

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
V PRAZE**

KATEDRA BIOTECHNICKÝCH ÚPRAV KRAJINY



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta životního
prostředí**

Disertační práce

**Využití bilančních modelů pro zjišťování
vodních režimů povodí**

Ing. Jan Gregar

Školitel: prof. Ing. Pavel Kovář, DrSc.

Praha 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně s použitím výsledků vlastní nebo společné práce s kolegy a s pomocí dalších zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne:

Poděkování

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Pavlu Kovářovi, DrSc. za odbornou podporu v průběhu doktorského studia, za jeho velmi cenné rady, připomínky a konzultace během celého doktorského studia. Dále děkuji i všem ostatním za jejich odborný přínos a spolupráci. Zejména pak RNDr. Miloš Gregar, prof. Ing. Jiří Wanner DrSc., Ing. Jan Petrů, Ing. Petr Fučík PhD, Ing. Daniel Kahuda.

Dále bych měl poděkovat Technologické agentuře České republiky za poskytnutí grantu na zpracování povodí VN Trnávka a povodí Kejtovského potoka. Povodí Vltavy a.s. za poskytnutí dat.

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Teoretická část	8
2.1. Bilanční modely	10
2.2. Krátký přehled bilančních modelů.....	11
2.3. Matematické simulační modely používané na území ČR.....	25
2.4. Stručný popis jednotlivých modelů:	26
2.5. Modelování eroze a protierozní ochrany	30
2.6. Simulace eroze	31
3. Experimentální část.....	36
3.1. Povodí VN Trnávka	36
3.1.1. Data pro vytvoření základního parametrického modelu SWAT	37
3.1. Základní parametrický model SWAT	47
3.1.2. Další datové zdroje:	52
3.1.3. Monitorovací síť	55
3.1.4. Kalibrace a validace modelu SWAT.....	60
3.1.5. Diskuse.....	73
3.1.6. Závěr – realizovatelnost scénářů.....	74
3.2. Povodí Kejtovského potoka	77
3.3. Povodí Kopaninského potoka	96
4. Diskuse.....	107
5. Závěry	108
6. Zdroje.....	113
7. Přílohy.....	124

1. Úvod

Současné způsoby modelování narážejí na různé překážky, jako například dostupnost komplexních modelů, náročnost na vstupní data, či cena modelů samotných. Výběr vhodného modelu se tedy stává komplikovaný. Krátký přehled modelů se nachází v teoretické části této práce, nicméně zvoleným modelem pro zpracování této práce je model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Tato práce má za cíl hodnotit možnosti využití tohoto modelu v našich podmínkách. Nejen samotnou hydrologickou bilanci, ale i bilanci látkovou, jelikož současný trend není pouze zjištění množství vody, ale také její kvalita. Tato práce obsahuje studie na třech lokalitách, ve kterých je pomocí modelu SWAT zjištěna vodní bilance v povodí a v rámci zpracování těchto tří lokalit byla zpracována také látková bilance. Výstupy tohoto modelu mohou být použity správci povodí, kteří potřebují ověřit účinnost jednotlivých plánovaných opatření, nebo například k ověření plánů oblasti povodí a dalších úprav krajiny. S vodním režimem souvisí neodmyslitelně také látková bilance, jelikož voda je přenosové médium pro velké množství látek a částic půdy. V současné době jsou kladeny stále vyšší nároky na kvalitu vod, jelikož je jí v půdě a v tocích stále menší množství a tím pádem se koncentrace látek zvyšují.

Rychlý vzestup průmyslu, spotřeby domácností a intenzifikace zemědělských postupů v průběhu minulého století vedl k výraznému nárůstu obsahu živin v hydričtém prostředí. Od druhé poloviny 90. let 20. století sice dochází ke zlepšení postupů v zemědělství, snižování obsahu živin v komunálních odpadních vodách důslednějším čištěním a je podporován prodej detergentů a pracích prášků bez obsahu fosforu, ale tato opatření se ukazují jako nedostatečná. Kromě toho není v oblastech se sídly do 250 obyvatel obvykle zajištěn odpovídající stupeň čištění odpadních vod. V současné době ani sídla do velikosti 2000 EO (ekvivalentní obyvatelé) nejsou obvykle vybavené technologiemi zaručujícími odstranění živin (zejména fosforu) pod koncentrace nezpůsobující eutrofizaci recipientu.

U vod, které jsou zatěžovány nadměrným přísunem živin, dochází ke změně jejich úživnosti (např. z oligotrofie na eutrofii). Klíčovým prvkem trofizace je fosfor a jeho sloučeniny. Zvýšený vnos fosforu do povodí nádrže může být jak z bodových tak z plošných zdrojů znečištění. Nejčastějším průvodním jevem u takto znečištěných vod

je masivní rozvoj sinic a zelených řas. Tento druh znečištění se nevyhýbá ani zdrojům pitné vody. Vysoké koncentrace sinic a řas ve zdrojích pitné vody způsobující problémy ve vodárenských provozech, hlavně zhoršení organoleptických vlastností upravené vody. Dalším negativním dopadem je produkce toxických látek, které způsobují zdravotní potíže. Je-li daný zdroj pitné vody zasažen, je ohrožena jeho další využitelnost pro vodárenské účely a v případě že se tento problém nezačne řešit, může dojít až k jeho ztrátě. Podobnému omezení využití jsou vystaveny i nádrže určené jako koupací.

Pro snížení vnosu nutrientů do nádrže je zásadní identifikace zdrojů znečištění v povodí. Nutriční prvky se mohou do povodí dostávat z bodových nebo plošných zdrojů znečištění. Pro vyhodnocení a identifikaci znečištění v povodí je nutnou podmínkou provedení podrobného monitoringu dané oblasti a rozlišení podílu plošných a bodových zdrojů na celkovém přiváděném znečištění. Protože v případě, že převládá plošné (difúzní) znečištění, není ani úplná eliminace bodových zdrojů znečištění zárukou dosažení požadované kvality vody v nádrži. Nejvhodnějším přístupem je prevence, tedy omezování vstupu nutrientů do nádrží, v první řadě vodárenských a koupacích.

2. Teoretická část

Základním přístupem při modelování procesů v povodí je hydrologická bilance. Její zpracování je základním kamenem úspěchu při modelování látkových bilancí, například nutrientů, nebo pohybu sedimentů v toku apod. K tomuto účelu byly vytvořeny různé matematické modely, kterým se věnuje tato část práce. *Cílem této práce je zhodnotit a ověřit použitelnost modelu SWAT v podmínkách České republiky v povodích o různé velikosti.*

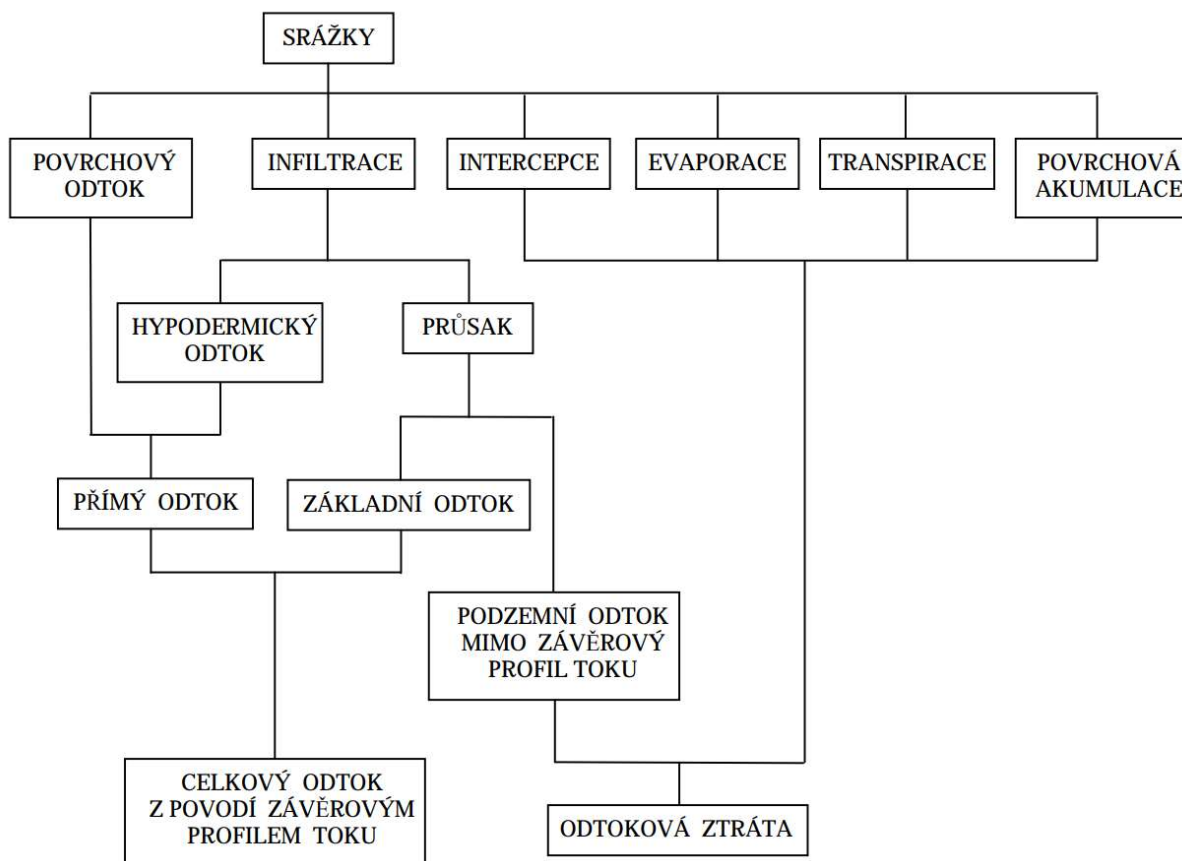
Základní bilanční rovnice oběhu vody popisující srážko-odtokový proces (rovnice 1):

$$H_s = H_o + H_v \pm H_r \pm H_u \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

Kde:	H_s	roční výška srážek
	H_o	roční výška odtoku
	H_v	roční výška výparu
	H_r	změna zásob vody v povodí
	H_u	výměna se sousedním povodím

Celkový odtok H_o je součtem odtoků povrchových a podpovrchových, kde **povrchový odtok** je označován jako **odtok přímý** a naopak **podzemní** je označován jako **odtok základní** (obr. 1).

Ke stanovení velikosti přímého odtoku se využívá metoda čísel odtokových křivek (CN), jejíž popularita tkví v její jednoduchosti. Tato metoda je založena na reakci odtoku z přívalového deště na čtyři snadno pochopitelné vlastnosti povodí: půdní hydrologické charakteristiky, využití a obhospodařování půdy, vlastnosti povrchu a předchozí nasycenost povodí.

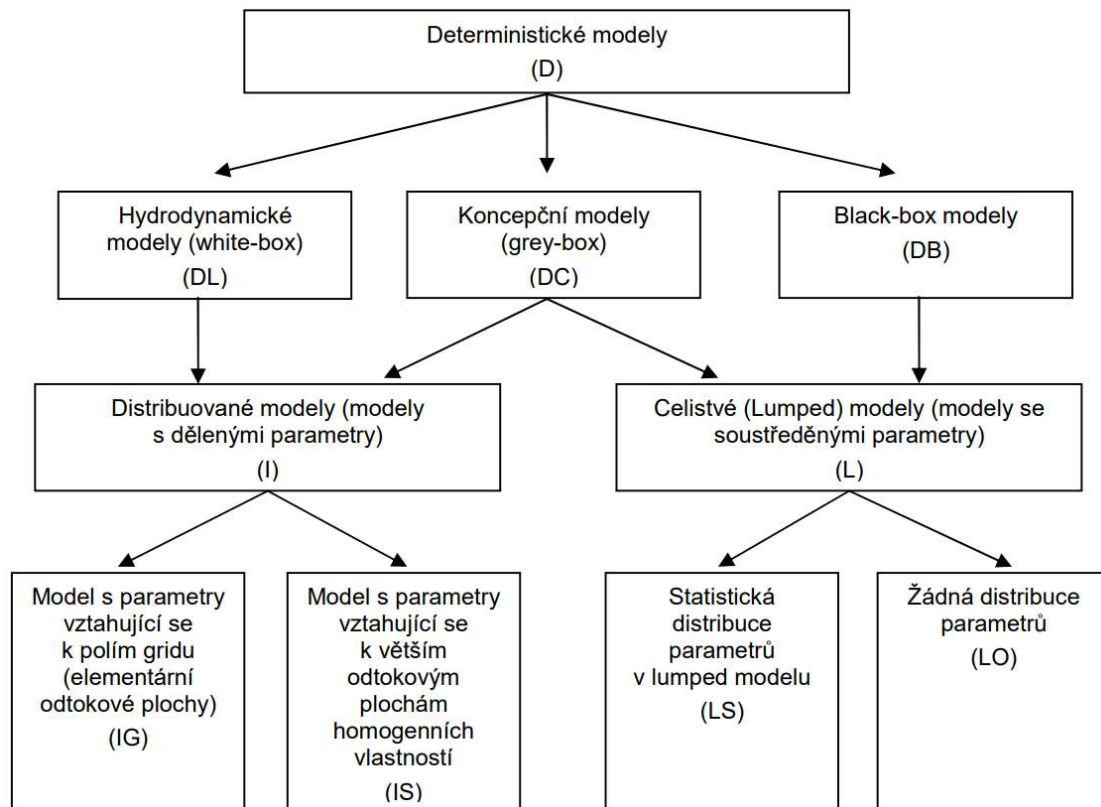


Obrázek 1 Schéma odtokového procesu (ČSN 736530 – Názvosloví hydrologie, 1985)

Základním principem odtoku je překročení schopnosti krajiny pojmout vodu ze srážek. V tomto důsledku vzniká buď povrchový (hortonovský) odtok, nebo odtok ze saturace. Pokud intenzita deště překročí infiltrační kapacitu půdy, dochází k tvorbě malé vrstvy vody na povrchu, která začne pomalu stékat směrem dolů ze svahu a odtok nazýváme hortonovský. Pokud však dojde ke stavu, kdy je půda na úpatí svahů nasycena vodou a srážka spadne na tuto plochu, dochází k povrchovému odtoku a následně dochází k nasycení i vyšší části svahu. Při srážkách také dochází k akumulaci vody, nazývané detence, kdy dochází k zadržení vody v povrchových depresích. Pokud je naplněna kapacita deprese, dochází k přetečení a odtoku. Dalšími faktory ovlivňujícími odtok je výpar z volné vodní hladiny, výpar ze sněhu a ledu (sublimace), výpar z povrchu půdy (bez vegetace) a transpirace – voda vydechovaná do atmosféry. Celý tento odtokový proces je možné sledovat pomocí různých modelů.

2.1. Bilanční modely

Základní otázkou je samotný výběr modelu. Matematické modely dělíme na Statistické (pravděpodobnostní, stochastické, korelační, regresní) a deterministické (kybernetické – black-box, fyzikálně založené, koncepční). Přes velké množství matematických modelů, jsou pro toto téma vhodnější modely fyzikálně založené, patřící mezi deterministické modely. Tento typ modelů je vytvářen zejména pro simulaci nejen odtoku, ale také dalších procesů probíhajících v povodí v dlouhém časovém intervalu. Modely jsou nejčastěji fyzikálně založené, ze kterých lze jmenovat např. SWAT (Arnold et al., 1998) či DHSVM (Wigmosta, Nijssen, Storck, 2002), nebo konceptuální, jako např. AFFDEF (Moretti, Montanari, 2007) a SIMHYD (Chiew, Peel, Western, 2002). Síla v jejich využití je především simulace různých druhů hospodaření a vlivu na přírodní podmínky a bilanci látek v povodí. Do dnešní doby byla vyvinuta celá řada těchto modelů. Některé jsou relativně nové, jiné zase starší, nicméně jsou starší modely, které po celou dobu svojí existence procházejí úpravami (obr. 2).



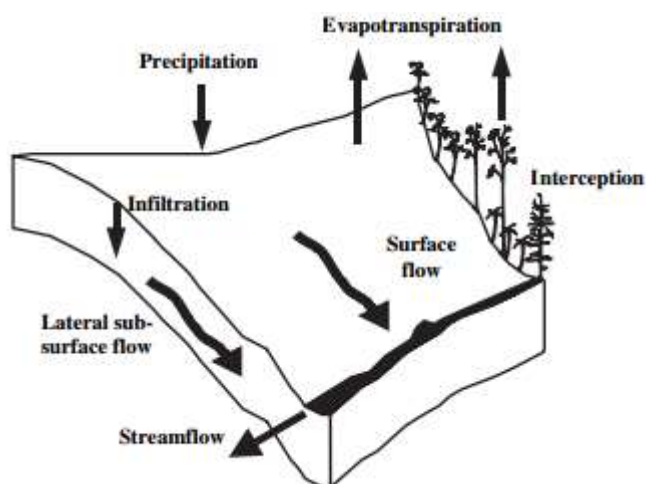
Obrázek 2 Klasifikace deterministických modelů (Becker, 1990)

2.2. Krátký přehled bilančních modelů

Model AFFDEF

Je prostorově distribuovaný konceptuální model s fyzikálně založenými schémata. Dokáže počítat průtok v jakémkoliv čase a místě povodí. Bohužel nepočítá s táním sněhu. Efektivně však převádí srážky na odtok a největší výhodou je jeho efektivnost při výpočtech, kdy při hodinovém kroku zvládne spočítat na jednu i tisíce let. Nejvhodnější je k simulacím hydrologických studií. Byl vytvořen v jazyce FORTRAN. Zejména zajímavá je možnost modelu generovat průtoky v libovolném místě na toku (Moretti, Montanari, 2007).

Model může být spuštěn pro jakékoliv rozlišení prostorových dat, ale i v jakémkoliv časovém kroku. Na obrázku č. 3 je vidět schéma, na jehož základě fungují srážko-odtokové poměry v modelu AFFDEF.

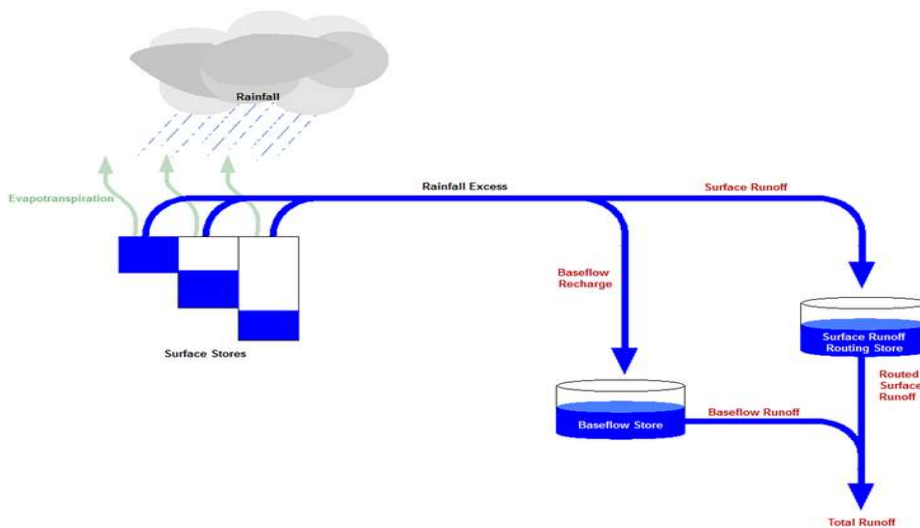


Obrázek 3 Schéma hydrologických procesů vzhledem k modelu AFDEF (Moretti, Montanari, 2007)

Model byl původně vyvinut pro simulaci hydrologických podmínek v oblastech s nedostatkem vstupních dat, jenž znemožňoval kalibraci modelu (Moretti, Montanari, 2007).

Model AWBM

Australský model AWBM (Australian water balance model) je založen na nasyceném povrchovém odtoku. Byl vytvořen z teoretické analýzy maximální potenciální sorpční kapacity, kdy se zkoumalo, kolik vody dokáže povrch zadržet, než dojde k povrchovému odtoku (obr. 4). Byl vyvinut v devadesátých letech a nyní se řadí mezi nejvíce používané srážko-odtokové modely v Austrálii (Boughton 1993, Boughton and Carroll 1993). Výrazným rysem je vývoj kalibračních postupů, které jsou specifické pro model a jsou založeny na struktuře modelu a nikoliv na testování různých parametrů. Model pracuje jak v denním, tak hodinovém režimu (časovém kroku). Denní krok slouží k výpočtu bilančních složek, zatímco hodinový krok slouží k simulaci povodňových vln (Boughton 2004, 2006).



Obrázek 4 Základní princip modelu AWBM

Model BILAN, PODBIL

Modely, které v měsíčním časovém kroku simulují potenciální evapotranspiraci, územní výpar a celkový odtok z povodí. Rozdíl mezi oběma verzemi podobné struktury modelů spočívá v prioritním využití dat celkového odtoku (BILAN), nebo dat stavů podzemních vod (z podzemních vrtů–PODBIL). Oba modely mají 5 parametrů, automaticky optimalizovaných. Jsou převážně zaměřeny k simulaci odtokové složky bilance (Kašpárek, Krejčová), (Kulhavý, Kovář, 2000).

Model DHSVM

The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model (DHSVM) je fyzikálně založený model který dynamicky reprezentuje prostorové rozdělení evapotranspirace, sněhové pokrývky, půdní vlhkosti a odtoku vzhledem k danému digitálnímu modelu terénu. Především se osvědčil při modelování vlivu lesních cest na odtok a erozi, kdy dochází ke změnám směru toku. Model funguje pod ARC/INFO, kdy nástroj GIS analyzuje rozvodnici, toky a další hydrologické vlastnosti nutné ke spuštění modelu na základě DEM (Digital Elevation Model). (Wigmosta, Nijssen, Storck, 2002) Jedná se o velice detailní model spíše vhodný pro menší území - vysoký detail vstupních dat.

Model DHVSM

Distribuovaný model určený k analýze prostorového rozdělení povrchové vlhkosti, toků energie a vzniku odtoku v povodích. DHSVM poskytuje dynamické znázornění prostorové distribuce půdní vlhkosti, sněhové pokrývky, evapotranspirace a tvorby odtoku v měřítku digitálních topografických dat (typicky 30-100 metry). V současné době DHVSM předpovídá říční průtoky pro mnohá povodí (Andrew, Dymond, 2007).

Model HBV

Model HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) je konceptuální model se semi-distribuovanými komponenty. Analyzuje odtok povodí a znečištění vody v denním kroku. Původně byl vyvinut pro skandinávské země, nicméně v současné době byl implementován na velkém množství povodí na většině kontinentů. Jeho hlavními složkami je tání sněhu, vlhkost půdy, bilance vstup – výstup a celkový odtok.

Model HIDROMORE

Je to prostorově distribuovaný hydrologický model založený na bilanční rovnici FAO56. V denním kroku po výpočtu efektivního deště, povrchového odtoku a závlah poskytuje odhady perkolace, evapotranspirace a změny zásoby vody.

Hydrologická bilance je počítána individuálně pro každou buňku gridu, zohledňuje se počáteční stav, vlastnosti a časový vývoj systému půda–vegetace–atmosféra. HIDROMORE je účinným nástrojem pro charakterizaci hydrologických parametrů v celosvětovém měřítku. Kombinace FAO56 metodiky a techniky dálkového průzkumu země je účinná v prostorově distribuované simulaci vlhkosti půdy (Sánchez et al., 2010).

Model HYRRROM

Model HYRRROM (Hydrological Rainfall – Runoff Model) simuluje zjednodušeně hydrologický cyklus v denním časovém kroku. Simuluje evapotranspiraci, dynamiku půdních vlhkostí, přímý a základní odtok. Model má 15 parametrů, z nichž některé jsou automaticky optimalizovány (Rosenbrockova metoda). Struktura modelu nereflektuje příliš fyzikální principy hydrologických procesů, význam parametrů spočívá spíše v robustním určení tzv. efektivního deště (tj. části, tvořící přímý odtok). (Kulhavý, Kovář, 2000)

Model IHDM

Model IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) (Calver, WOOD, 1989) je fyzikálně založený, distributivní (dělený) model, vycházející z numerického řešení parciálních diferenciálních rovnic, popisujících neustálé proudění svahové, soustředěné povrchové proudění a proudění podpovrchové v nenasycené i nasycené zóně. Cílem je snaha o dokonalý fyzikální popis hydrologických a hydraulických procesů. Jeho stavba je velmi sofistikována, je náročný na množství kvalitních dat, proto je zejména testován na experimentálních odtokových plochách. Jeho předností jsou velmi solidně zpracované komponenty odtoku (Kulhavý, Kovář, 2000).

Model J2000

Hydrologický systémový model J2000 nabízí fyzikální model vodní bilance ve velkých povodí. Kromě modelování hydrologických procesů, které mají vliv na odtok a jeho koncentrace v horním mezo a makro měřítku, modelovací systém obsahuje postupy, které napomáhají k přesné regionalizaci klimatické a srážkové hodnoty. Skutečný výpar je počítán vzhledem k diferencovanému využití půdy. Model je vhodný pro modelování velkých povodí více než 1000 km². Modelování může být provedeno pomocí dostupných základních údajů ve velkém měřítku. Simulace různých hydrologických procesů, se provádí v programových modulech, které jsou dokončeny navzájem na sobě nezávisle. To nabízí možnost upravit, nahradit nebo přidat jednotlivé moduly bez nutnosti strukturovat celý model znovu. Modelování celkového odtoku je postaveno na součtu jednotlivých složek odtoku, které jsou samostatně vypočítaných během modelování. Modelovací systém rozlišuje čtyři odtokové složky podle jejich původu. Složka s nejvyšším dynamikou, je rychlý přímý odtok. Skládá se z odtoku z uzavřených prostor, sněhové vody, která protéká ze sněhových vrstev a povrchového odtoku. Pomalý přímý odtok, který může být považován za podobný bočnímu podzemnímu odtoku v půdní zóně, reaguje nepatrně pomaleji. Další dvě odtokové komponenty lze rozlišit takto: na jedné straně je velmi jednoduchá základní odtoková složka, která simuluje odtoku z povrchu v blízkosti dobře propustné zvětrané zóny. Na druhé straně je pomalý základní odtok, jenž vyúsťuje v odtok ze společné podzemní vrstvy vody nebo homogenní zvodně s kameny. Na základě parametrů se v modelu provádí přidělení srážkové vody do jednotlivých složek odtoku z oblastí, které mohou být odvozeny z použitých základních údajů. Kromě tvaru reliéfu, mají významný vliv specifické půdní parametry, jako je hydraulická vodivost jednotlivých půdních horizontů. Výpočet různých koncentračních časů rozhodujících komponentů se provádí s ohledem na hydraulické charakteristiky zásob, z nichž jednotlivé složky odcházejí. Dále jsou zohledněny při modelování další parametry, jako například předcházející půdní vlhkost (Krause, 2002).

Model LSM

Lineární retenční model je sestaven především za účelem popisu celkového průtoku korytem malého povodí v bezdešťovém období. Tento model byl koncipován jako lineární a nejjednodušší možný pro popis všech podstatných vlivů na tvorbu odtoku v období sucha. Model vychází z představy tří provázaných rezervoárů vody. Každý z těchto rezervoárů reprezentuje určitou podpovrchovou vrstvu o celkovém objemu vody a časově závislém objemu disponibilní vody, účastníci se odtokového procesu. Každá z těchto vrstev přispívá svým dílem k celkovému odtoku korytem. Výpar vody je aproximován harmonickou sinovou funkcí. Hydrologickou soustavu popisujeme jako soustavu tří provázaných rezervoárů, z nichž každý má možnost přesouvat vodu do rezervoáru sousedního a současně přímo do koryta potoka. Tok mezi rezervoáry či rezervoárem a povodím budiž přímo úměrný rozdílu vodních objemů v zónách. Z jedné ze zón navíc dochází k vyčerpávání jinam než do koryta či do sousední zóny a tento úbytek je definován harmonickou funkcí času (Bonan, 1996).

Model ModSpa

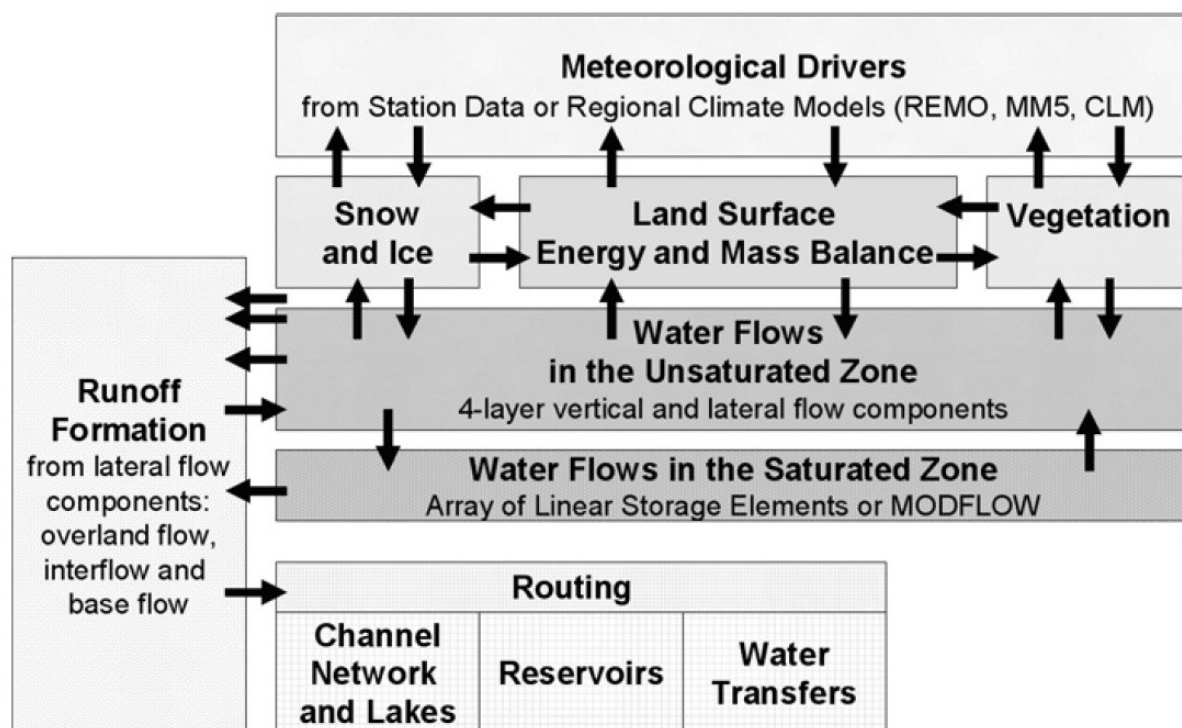
Povodí jsou v tomto modelu dělena do subpovodí, každé subpovodí je dále zpracováno dvouvrstevným modelem. První vrstva reprezentuje povrchový odtok, infiltraci, perkolaci a evapotranspiraci, které jsou funkcí srážky, půdních charakteristik, vlhkosti půdy a indexu listové plochy. Ve druhé vrstvě vzniká základní odtok.

Model PROMET

PROMET (Process of Radiation, Mass and Energy Transfer) je distribuovaný hydrologický model. Fyzikálně založený pracující na základě osmi komponent. Jsou jimi Meteorologická data, sníh s ledem, vegetace, land-use, pohyb vody v nasycené a nenasycené zóně, formování odtoku a tvorba říční sítě (obr. 5) (Mauser and Bach, 2008,2007). Byl vytvořen jako rastrový model s rozlišením 1 x 1 km a pracuje v hodinových krocích.

Model Kinfil

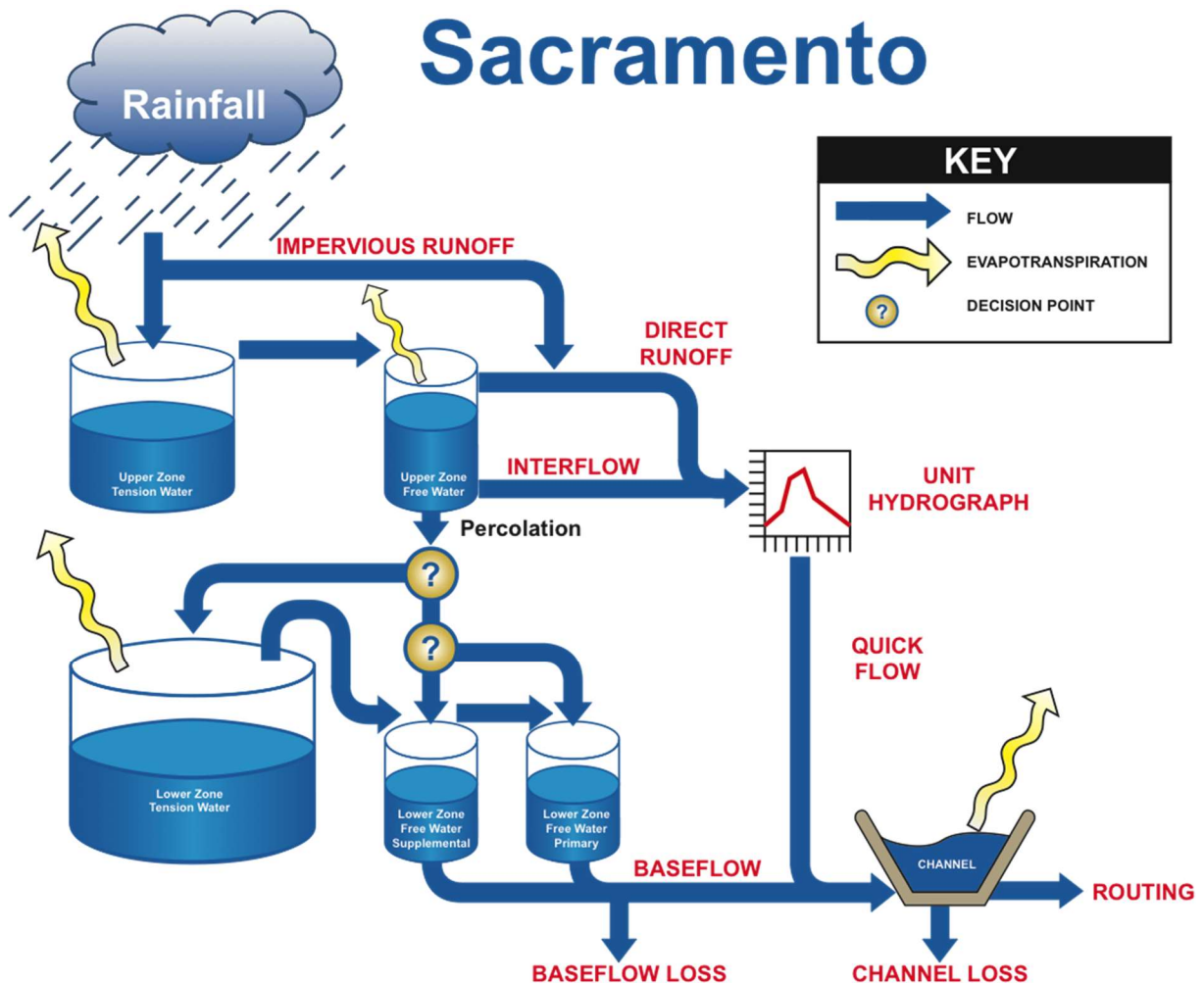
Model KINFIL (KIN - transformace odtoku kinematickou vlnou a INFIL- řeší infiltraci) je určen pro stanovení návrhových průtoků ovlivněných antropogenní činností, jako například změna kultur, odlesnění nebo urbanizace, a simulaci významných odtokových procesů. Je postaven na základě teorie infiltrace a kombinace přímého odtoku kinematickou vlnou, a počítá pomocí rovnice Green-Ampt. Na základě kaskády až deseti desek je provedeno modelování povrchu (Kovář, Vaššová, 2011).



Obrázek 5 Schéma součástí modelu PROMET (Mauser and Bach, 2009)

Model SACRAMENTO

Model Sacramento je kontinuální model odtoku používaný ke generování denního toku z denních srážek a potenciálních evapotranspirace. Využívá půdní vlhkosti k simulaci vodní bilance v povodí. Koncepční uspořádání modelu je znázorněno na obrázku 6.



Obrázek 6 Model SACRAMENTO (<http://www.toolkit.net.au/Tools/RRL>)

Interní výpočty modelu Sacramento představují množství vody pomocí jednotek hloubky (v milimetrech). Výstupy modelu se přepočítají na objemy vynásobením povodí (<http://www.toolkit.net.au/Tools/RRL>).

Model SIMHYD

Konceptuální srážko-odtokový model SIMHYD pracuje na srážko-odtokovém principu a potenciální evapotranspirace. Je to jeden z nejpoužívanějších modelů v Austrálii. Je možné používat různé verze, dle počtu parametrů, se kterými se počítá. Je možné používat tři parametrovou až devíti parametrovou verzi. Model pracuje v denním kroku, kdy denní srážka nejdříve naplní intercepční zásobník, ze kterého se voda dostává díky výparu. K povrchovému odtoku dochází ve chvíli, kdy výška deště překročí infiltrační kapacitu (Chiew, Peel, Western, 2002), (Chiew, F.H.S. and L. Siriwardena), (J. M. Whyte, A. Plumridge, and A. V. Metcalfe, 2011).

Model SMD

Model SMD (Soil Moisture Deficit) je modelem hydrologických procesů aktivní zóny povodí, sloužící pouze k simulování půdní vlhkosti v denním časovém kroku. (Kovář, 1994).

Model SWAT

Hydrologický model SWAT neboli Soil and WaterAssessment Tool byl vyvinut Dr. Jeffem Arnoldem a je velmi aktivně podporován americkým výzkumným ústavem, speciálně laboratoří na výzkum půdy a vody v Temple v Texasu. Výstupem tohoto produktu je model, který je založen na fyzických (reálných) datech, tedy datech z terénních měření. Model byl vyvinut za účelem hodnocení dopadu způsobů využití půdy na komplexním území. Komplexním územím se rozumí vždy povodí nebo sub-povodí určitého toku. Přesnost predikce balance fosforu a dusíku v povodí vychází z historie vstupních dat. Čím je delší historie dat, tím je vyšší přesnost modelu v predikci. Díky přesnému zpracování dat a správně zvoleným výpočtům, model umožňuje uživatelům sledovat dlouhodobý vývoj daného sledovaného povodí. Tedy nejen pro data měřená, ale i simulovaná (například meteorologická data zohledňující klimatickou změnu).

Vstupní data, která jsou pro model potřeba: meteorologická data, DTM, Pedologická mapa a Mapa Land Use (postačí landcover).

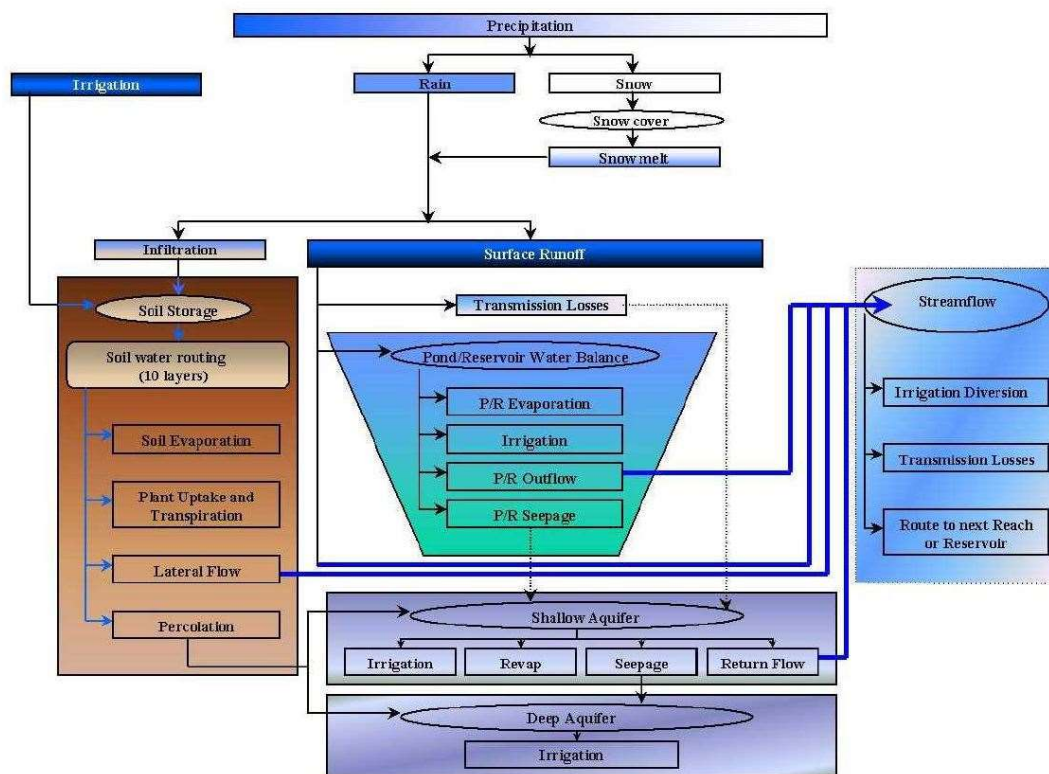
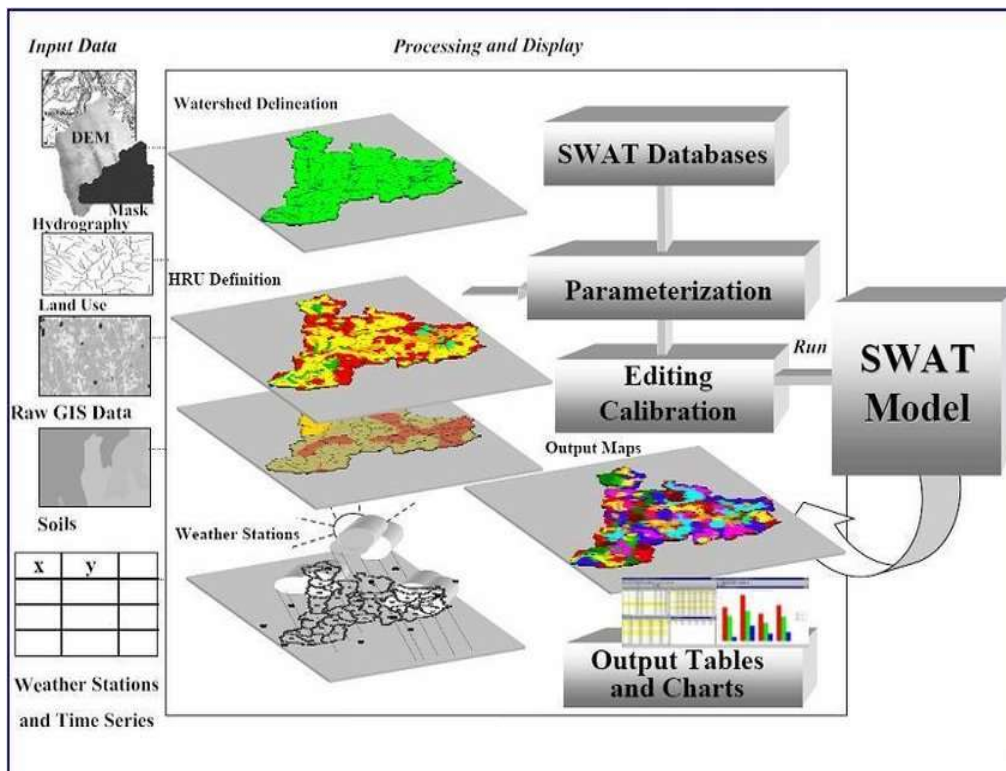
Vzhledem k svému využití byl model zařazen mezi hydrologické bilanční modely. Model je využívám celosvětově a neustále se rozvíjí.

Je několik alternativ programů, se kterými model SWAT umí komunikovat. Jsou to například: ArcMap, Map Window, QGIS nebo GRASS GIS. Pro potřeby projektu byl zvolen program QGIS. Díky možnosti práce s rozsáhlými databázemi je to vhodný GIS nástroj. (Workshop Warsaw, 2011), (Bari Italy, 2012). Na obrázku 7 je znázorněna struktura modelu SWAT (AVSWAT – Arc View SWAT).

Obecně se dá říci, že využívá základní rovnici pro simulaci hydrologického cyklu. Která je popsána následovně rovnicí 2:

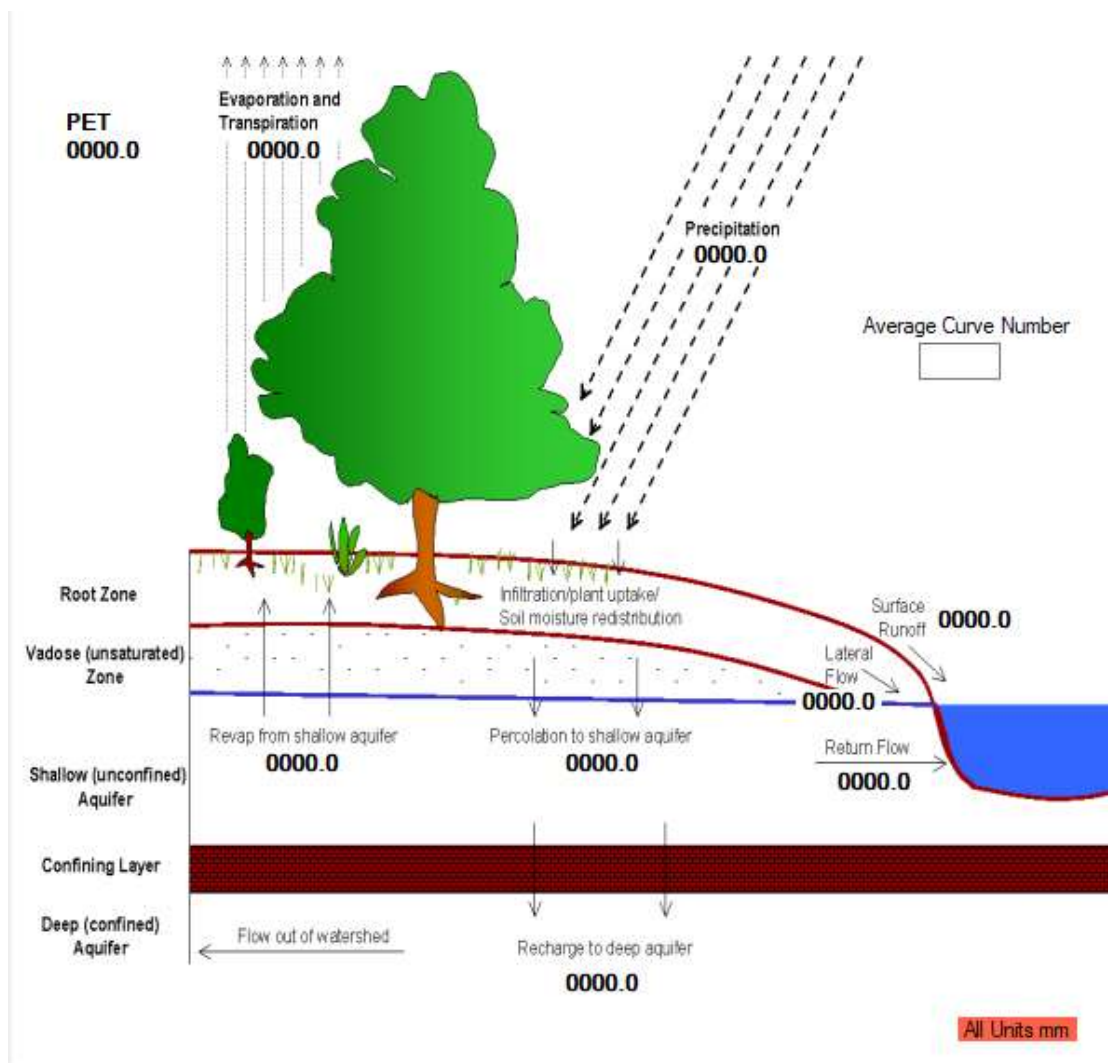
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2)$$

SW_t je finální objem vody, SW_0 je počáteční objem vody v půdě v den i , R_{day} je denní srážkový úhrn, Q_{surf} je objem povrchového odtoku v den i , E_a je míra evapotranspirace v den i , w_{seep} je objem vody vstupující do saturovaného (nasyceného) pásma z půdního profilu v den i a Q_{gw} je objem vzlínající vody v den i . Všechny veličiny jsou v mm H₂O (Neitsch 2011). Další jednotlivé procesy jsou obsaženy v manuálu SWAT (Neitsch, 2011), kdy by bylo vhodné některé vyzdvihnout, jako například průsak, infiltrace, zavlažování, povrchový odtok, nebo perkolace. (Obr. 8)



Obrázek 7 Schéma modelu SWAT (Neitsch, 2011)

Klimatické podmínky jsou pro hydrologický model SWAT velmi důležitou součástí. Modelu dávají informace o bilanci hydrologického cyklu. Pro zpracování tohoto typu dat je možné využít tzv. WeatherGenerator. WeatherGenerator je statistický model, který je schopný generovat reálné hodnoty jako například denní úhrn srážek, maximální a minimální denní teplotu, vlhkost, atd. (Richardson, 1981).



Obrázek 8 Scéma hydrologické bilance v modelu SWAT

Model SWATRE

Modely (Soil Water Atmosphere Transport Reaction Models) představují řadu koncepčně-fyzikálních modelů hydrologické bilance [FEDDES, WESSELING, BELMANS, 1983], rozpracované nebo komentované pro využití v našich podmínkách dalšími autory [DAMAŠKOVÁ, 1989], [KOVÁŘ, KURÁŽ, NACHTNEBEL, 1996]. Tyto modely používají pro řešení přímého odtoku buď metodu Hortonovu, nebo Dunneovu. Modely SWATRE potřebují kromě údajů hydrometeorologických také údaje o vegetačním porostu. Řeší procesy intercepce, povrchové retence, přímého odtoku, infiltrace, evapotranspirace, kapilárního vztlínání (v případě mělké hladiny podzemní vody) a doplňování zásob podzemních vod, případně základní odtok. Mají nevýhodu, že se dají použít pouze pro velmi malé elementární plochy, kontrolované lyzimetrem. Pro svou detailnost jsou základem řady dalších koncepčních modelů, simulujících hydrologickou bilanci malých povodí (Kulhavý, Kovář, 2000).

Model TOPMODEL

TOPMODEL je zaměřen na simulaci odtoku z proměnlivých zdrojových ploch povodí a pracuje s plošným rozdělením deficitu půdních vlhkostí. Model zpracovává údaje o topografii povodí a jeho půdách do topografických indexů TOPSi. TOPMODEL kromě simulace historických řad rovněž generuje srážkové epizody z daného rozdělení intenzity a trvání dešťů. Využívá spojení s GIS (Geografickým Informačním Systémem) pro automatické vyhodnocení plošných indexů TOPi, TOPSi a dalších parametrů (Beven, 1986), (Blažková, 1993), (Kulhavý, Kovář, 2000).

Model Theseus

Model Theseus (Toolbox for Hydro Ecological Simulation and Evaluation Utilities) je navržený pro studium dopadů změny hospodářského využití pozemků. Pracuje v denním kroku, je prostorově distribuovaný a propojený s GIS. Využívá se především k modelaci zalesněných ploch. Je založen na výpočtu potenciální evapotranspirace a využívá různé komplexní přístupy jako je například jednoduchý empirický vzorec Haude (1955) nebo fyzikální Penman-Monteith (Wegehenkel, 2006).

Model WASIM

Water Flow and Balance Simulation Model Wasim je deterministický prostorově distribuovaný modelu hydrologie povodí který simuluje koloběh vody nad a pod povrchem půdy. Tento model může být použit v různých prostorových a časových měřítcích. Je schopen modelovat hydrologické procesy povodí s velikostí <1 km² až na více než 100.000 km². Časové rozlišení modelu se pohybuje v rozmezí od minut do několika dní. Wasim může být použit jak pro krátkodobé (povodně) tak i dlouhodobé simulace (dlouhodobé simulace vodní bilance). V závislosti na obecné dostupnosti dat a hydrologických problémech je třeba řešit výběr z několika algoritmů pro simulaci určitého procesu, což Wasim umožňuje. Minimální požadavky pro spuštění modelu jsou časové řady srážek a teploty, stejně jako rastrová data pro topografii, využití půdy a půdní vlastnosti. Prostorová diferenciací je realizována v modelu Wasim rozdělením prostoru v síti bodů pomocí běžně používaných formátů ASCII. Tím je zajištěna optimální výměna dat s mnoha jinými modely a softwarovými balíčky. Vstupní data mohou být upraveny rychle a s malou ztrátou na požadované rozlišení modelu. Wasim je k dispozici pro systémy Windows a Linux nebo Unix. Je k dispozici pro 32-bit a 64-bitové verze těchto operačních systémů (Niehoff et al., 2002; Bormann et al., 2007).

Model WEC-C

Water and environmental consultants – catchment (WEC-C) je distribuovaný deterministický model, který simuluje pohyb vody a rozpuštěných látek v povodí. Byl navržen pro simulaci dopadů změny hospodářského využití pozemků, lesní těžby či povrchové důlní činnosti na odtok vody z povodí (Croton, Barry, 2001; Croton, Bari, 2001).

Model WBCM (Water Balance Conceptual Model)

Model WBCM je klasifikován jako model deterministický, koncepční, celistvý, nelineární. Jeho parametry jsou pravděpodobnostně rozděleny po ploše povodí tak, aby mohla být zachována jejich plošná variabilita. Každý kapacitní element modelu reprezentuje přirozenou zásobu vody v jednotlivých vertikálních subsystémech hydrologického profilu.

Model byl navržen pro studium jednotlivých komponent hydrologické bilance v závislosti na změnách hospodářského využití povodí. Simuluje denní bilanční hodnoty ve vegetačním období – kritickém období pro vznik vláhových deficitů – a uvažuje všechny podstatné interakce mezi jednotlivými zónami, tj. vegetační, nenasycenou a nasycenou zónou. Kapacity všech zón respektují různorodost přirozených hydrologických podmínek povodí. Model ve většině zón uvažuje lineární rozdělení těchto kapacit kolem jejich průměrných hodnot. Struktura modelu respektuje fyzikální principy, podle nichž dochází k interaktivním hydrologickým procesům (evapotranspiraci, intercepci, infiltraci a tvorbě přímého a základního odtoku). Nedílnou součástí modelu je automatická optimalizace parametrů v jeho identifikační fázi. Aplikační verze modelu WBCM používá denních hydrometeorologických dat a optimalizuje tři parametry (SMAX, GWM, BK) (Kovář et al., 2010).

Model WYM

Model WYM (Water Yield Model) řeší potenciální retenci zóny povodí pomocí denního časového kroku (kontinuálně) pro aktuální stanovení odtokových křivek CN (Williams, La Seur, 1976).

2.3. Matematické simulační modely používané na území ČR

V České republice jsou v praxi používány modely pro různé účely. Rozdělujeme je podle časového nebo prostorového hlediska. (obr. 9)

Časově:

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

Prostorově:

- pro jednotlivý svah
- pro celá povodí

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

- uvolnění půdních částic
 - deštěm
 - povrchovým odtokem
- transport částic
 - deštěm
 - povrchovým odtokem

Matematické simulační modely používané na území ČR:

- MIKE
- SIJAK
- SMODERP
- WaTEM/SEDEM
- Erosion 3D
- AnnAGNPS
- SWAT

2.4. Stručný popis jednotlivých modelů:

Model MIKE HYDRO Basin

Výkonný nástroj pro multisektorové použití v povodí řek pro získání údajů z oblasti životního prostředí – zdroje povrchové a podzemní vody a kvalita vody.

MIKE SHE

Je to globální, dynamický hydrologický model pro simulace základních procesů v zemní fázi hydrologického cyklu; model je vhodný pro analýzu, plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů, povodí a životního prostředí, model má širokou oblast

uplatnění při posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou a při řešení zásadních technických zásahů v povodí.

SIJAK – Aplikace pro optimalizaci návrhů opatření z hlediska snížení eutrofizace vodních nádrží EUTRO je založena na simulačním modelu jakosti povrchových vod SIJAK, který je také jedním ze skupiny nástrojů VSTOOLS, vyvíjených Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, veřejnou výzkumnou institucí. Aplikace využívá prostředky simulačního modelu doplněné a rozšířené o plně integrované funkce a nástroje pro výpočet a posuzování vstupů znečištění (zejména fosfor) do povrchových vod a návrh a přiřazení vhodných opatření k jejich snížení. Aplikace tak umožňuje komplexní posouzení dopadu různých variant opatření na jakost vody v kontrolních profilech (zejména, ale nejen v profilech vodních nádrží) a zároveň jejich porovnání a vyhodnocení. Aplikace vychází z funkcí simulačního modelu jakosti povrchových vod (navazuje na zpracování simulačního modelu množství povrchových vod), z něž přejímá (v rozšířené podobě) systém uložení dat a funkce pro provádění simulačních výpočtů. Samotné řešení je založeno na definování (určení a popisu) zdrojů znečištění v povodí kontrolního profilu, návrhu a přiřazení vhodných (i alternativních) opatření zaměřených na snížení znečištění vody v kontrolním profilu, odvození vstupů látek z těchto zdrojů do říční sítě, simulaci látkových toků/koncentrací vybraných látek po jejich vstupu z různých zdrojů do vod a při jejich transportu v říční síti a ve vodních nádržích a na vyhodnocení vlivu jednotlivých navržených opatření na jakost vody v kontrolním profilu/profilech.

SMODERP řeší srážkoodtokové vztahy a erozní procesy na svahu a jeho výstupy lze využít pro návrh prvků protierozní ochrany. Model simuluje plošný povrchový odtok a erozní procesy ze srážky proměnné intenzity v území o velikosti přibližně do 1,0 km². Morfologické, půdní a vegetační poměry území mohou být proměnné.

Model je určen pro:

- pro stanovení charakteristik plošného povrchového odtoku (objem odtoku, kulminační průtok, rychlost, hloubka) ve zvolených profilech vyšetřovaného svahu a ve zvolených

časových intervalech od počátku srážky,

- pro stanovení přípustné délky pozemku ve směru sklonu (odtoku) na základě krajního

nevymílacího tečného napětí a krajní nevymílací rychlosti povrchového odtoku.

WaTEM/SEDEM prostorově distribuovaný model eroze půdy a sedimentů, který byl vyvinut ve výzkumné skupině pro fyzickou a regionální geografii (KULeuven, Belgie). Na rozdíl od sofistikovanějších dynamických modelů se *WaTEM / SEDEM* soustředí na prostorovou a méně časovou variabilitu relevantních parametrů. Jako takový, *WaTEM / SEDEM* umožňuje začlenění struktury krajiny nebo prostorové organizace různých pozemních jednotek a propojení mezi nimi. Vodní erozní složka *WaTEM / SEDEM* používá upravenou verzi revidované univerzální rovnice pro ztrátu půdy (RUSLE) pro výpočet průměrných ročních hodnot úbytku půdy.

WaTEM/SEDEM lze použít k:

- odhadu ztráty půdy a ukládání sedimentů, stopy vodní eroze

- vymezení zemědělské krajiny, která je náchylná k vodní erozi

- simulace dopadu různých scénářů využití území (opatření na ochranu půdy, zařízení k regulaci sedimentů) skrze míru ztráty půdy a splaveninovou analýzu.

AnnAGNPS je nástupcem modelu *AGNPS*, který modeluje erozi pro jednotlivou událost. Poskytuje odhad zatížení povrchového odtoku znečištěním v závislosti na využití území pro kontinuální srážky. Model simuluje povrchový odtok, transport splavenin a živin v zemědělsky využívaném povodí. Základním vstupem jsou hodnoty plošného znečištění, je ale možné zhodnotit také příspěvek bodových zdrojů znečištění (eroze – strže a výmoly; bodové zdroje chemického znečištění – zemědělská výroba, odpadní jímky apod.). Pomocí modelu je počítána výška přímého odtoku a kulminační průtok. K výpočtu eroze pro jeden přívalový déšť je použita upravená univerzální rovnice ztráty půdy (USLE – viz výše). Ztráta půdy je počítána pro každý element povodí a dále se sleduje pohyb materiálu v rámci toku. Část

modelu zkoumající transport chemických látek odhaduje pohyb dusíku, fosforu a CHSK v povodí. Model umožňuje zohlednit i lokální zdroje znečištění.

Erosion 3D je schopen pracovat s plochou celého povodí a do svých výpočtů zahrnuje ztrátu půdy způsobenou plošným i soustředěným odtokem. Model je použitelný až do velikosti plochy asi 400 km². K výpočtu dlouhodobého úbytku půdy mohou být simulovány série libovolného počtu jednotlivých srážkových událostí (sekvencí). Model lze využít pro prognózu plošné eroze půdy a ukládání látek v částech povodí, prognózu objemu povrchového odtoku při silných srážkových jevech, hodnocení zemědělského zpracování půdy a způsobu obdělávání s ohledem na jeho vliv na snižování odtoku a bránění erozi (retence vody a látek), rozsah a hodnocení vodohospodářských a/nebo kulturně technických opatření a odhad hromadění částečně vázaných škodlivých látek a sedimentů (např. těžkých kovů). Model může být aplikován obzvláště v rámci plánování rostlinné výroby a v poradenství, hodnocení povodňových opatření a pozemkových úprav s ohledem na jejich látkovou a hydrologickou retenční schopnost, hodnocení náchylnosti přetvářených oblastí krajiny k erozi (např. rekultivační plochy, zakrytí skládek, násypy, haldy), emisních, resp. imisních průzkumů jako látkových bilancí, vodohospodářsky-ekologického sanačního a renaturalizačního plánování.

Model	prostorové rozdělení a měřítko	Časové měřítko	Výstupy modelu		
			Management povodí	Erozní jevy	Transport látek (např. N a P)
SWAT	povodí, semidistribovaný	kontinuální	ano	ano	ano
MikeSHE	půdní profil až povodí, plně distribuovaný	epizodní, kontinuální	ano	ano	ano
SIJAK	povodí	kontinuální	ne	ne	ano
SMODERP	2D mikropovodí, distribuovaný	epizodní	ne	ano	ne
WaTEM/SEDEM	povodí, distribuovaný	kontinuální	ne	ano	ano (částečně)
EROSION 3D	regionální	epizodní	ne	ano	ano
AnnAGNPS	povodí	epizodní	ne	ano	ano

Obrázek 9 Základní charakteristiky jednotlivých modelů a kvantitativní porovnání výstupů

2.5. Modelování eroze a protierozní ochrany

Eroze je v širším slova smyslu opotřebovávání krajiny v čase. Zahrnujeme do ní oddělení půdních částic, jejich transport a následné ukládání pomocí erozních sil kapek vody a povrchového odtoku. Jedná se tedy o transport sedimentů působením vody, větru, ledu, sněhu a země. Dalším případem je eroze strojová, při které je půda přemísťována zemědělskou technikou (Takken a kol., 2001).

Simulace eroze je založena na terénním pozorování, laboratorních experimentech a použití časových řad. Z tohoto zkoumání byly vyvozeny vztahy již v ranném období používání výpočtů eroze. Tyto vztahy byly použity k navržení a používání tzv. empirických modelů erozního procesu. V polovině 70. let došlo k počátku rozvoje výpočetní techniky. Spolu s tímto došlo také k rozvoji teoretických znalostí v oblasti hydrauliky povrchového odtoku, mechanismu erozních procesů, infiltračních teorií a dalších. Tyto možnosti a nové zkušenosti vedly k navržení a použití dokonalejších postupů a metod v podobě řešení erozních jevů, jako dynamického procesu měnícího se v prostoru a čase. Spolu s dalším rozvojem této oblasti, došlo k vývoji simulačních modelů erozního procesu, který na základě fyzikálního popisu všech zúčastněných procesů, řeší průběh a výslednou intenzitu erozních jevů. Poznání zákonitosti vzniku a průběhu procesů vodní eroze je – tak jako při sledování všech přírodních procesů – založeno na dlouhodobém terénním pozorování a laboratorních experimentech. Je tedy zcela logické, že vztahy kvantifikující vlivy jednotlivých erozních faktorů i intenzity erozních jevů, mají svůj základ v analýze a zpracování časových řad a vedly v počátečním období výpočetních metod k odvození a používání tzv. empirických modelů erozního procesu. V polovině 70. let, teoretický rozvoj v oblasti hydrauliky povrchového odtoku, infiltračních teorií, mechanismu erozních procesů atd. a v neposlední řadě i rozvoj výpočetní techniky umožnily přechod od empirických postupů k řešení erozního jevu jako dynamického procesu proměnného v prostoru a v čase. Tento přístup vedl k prudkému rozvoji metod tzv. „simulačních modelů erozního procesu“, které na základě fyzikálního popisu všech zúčastněných procesů řeší průběh a výslednou intenzitu erozních jevů (Vavroš, 2007).

2.6. Simulace eroze

Simulační modely eroze vycházejí z definice eroze jako přírodního procesu uvolňování, transportu a ukládání půdních částic působením erozních činitelů. U vodní eroze jsou těmito činiteli ve většině případů dešťové srážky a z nich vzniklý povrchový odtok. Pro prognózu intenzity eroze a transportu látek a účinnosti protierozních opatření se podrobně vyhodnocují všechny přírodní a člověkem ovlivněné faktory, které se podílejí na vzniku a průběhu těchto jevů a kvantifikuje se jejich podíl na výsledné intenzitě erozního procesu a jeho vliv na prostředí. Použití simulačních modelů je v současnosti spojováno s programovými prostředky GIS pro přípravu vstupních podkladů řešení a prezentaci jeho výsledků. Toto spojení představuje moderní inženýrský nástroj, kterým lze účinně řešit různé varianty (scénáře) využití a ochrany území a vytvořit dostatečné množství podkladů pro rozhodovací a projekční činnost v této oblasti. Potřeba takového přístupu byla vyvolána i nutností posuzovat vodní erozi, jako největší plošný zdroj znečištění s negativním dopadem na kvalitu vodních zdrojů a prostředí (Neitsch, 2009, Janeček 2012).

MUSLE(modifikovaná USLE) rovnice (3):

$$Sed=11.8*(Qvol*qpeak*areahru)0.56*KUSLE*CUSLE*PUSLE*LS USLE*CFRQG \quad (3)$$

Všechny tyto parametry jsou získány na základě výpočtů SWAT (Soil and Water Assesment Tool) ze vstupních dat. *Sed* je množství splavenin z přívalového deště. *Q* jest objem přímého odtoku z přívalového deště a *q* je velikost kulminačního průtoku. *R* je faktor erozní účinnosti deště. *K* je faktor erodovatelnosti půdy. *LS* je faktor délky a sklonu svahu. *C* je faktor ochranného vlivu vegetace. *P* je faktor účinnosti protierozních opatření. Odtoky jsou řešeny pomocí CN křivek (Williams, 1995).

K zamezení nadměrné eroze byla definována řada postupů a opatření:

- Plošné nebo pásové zatravnění - Zatravnění běžnou směsí
- Plošné nebo pásové zalesnění - Výsadba lokálních dřevin
- Mez (hrázka) - Nepřelévaná zemní hrázka (v. cca 1 až 1,5m)
- Průleh s mezí - Mělký příkop s hrázkou z vyhloubené zeminy (š. cca 10 m), záchytný (v mírném sklonu podél vrstevnic) nebo svodný
- Záchytný příkop - Příkop v mírném sklonu podél vrstevnic
- Svodný příkop - Příkop pro odvedení odtoku do recipientu, koryto zpravidla opevněné
- Zatravnění údolnice - Jako plošné zatravnění, případně speciální travní směs a úprava profilu údolnice
- Vyloučení pěstování širokořádkových plodin - Vyloučení pěstování kukuřice, řepy, brambor, slunečnice, máku
- Pásové střídání plodin - Pásky úzkořádkových plodin široké min. 12 m
- Vrstevnicové obdělávání - Provádění agrotechnických operací po vrstevnici nebo s malým odklonem od vrstevnic
- Ochranné obdělávání - Redukované obdělávání půdy a ponechávání nejméně 30 % rostlinných zbytků na povrchu půdy.

(VUMOP, 2014)

Vybraná protierozní opatření použitelná v modelu SWAT:

Následuje výčet vybraných protierozních opatření, jejichž účinnost se dá modelovat například modelem SWAT, nebo APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender Model).

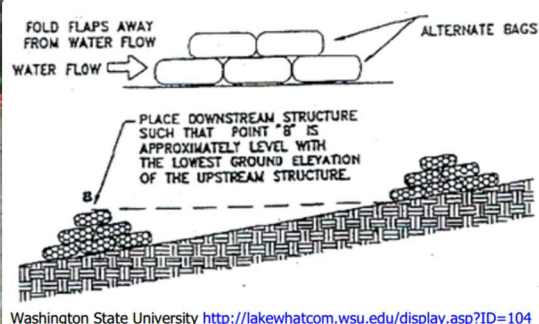
Hrázky (Check Dam)

Jsou to dočasné hrázky konstruované napříč mokřinami, nebo žlaby ke snížení rychlosti koncentrovaného odtoku a tím ke snížení eroze. Je možné je vytvořit ze sutiny, nebo balíků slámy (obr.10). Tento způsob se užívá, pokud není možné implementovat trvalá protierozní opatření. Většinou se instalují tím způsobem, že přepad je ve výši patky předcházející hrázky. Míra redukce polutantů byla vyčíslena na 57,5% u sedimentů, 30% u Dusíku(N) a 26% u Fosforu(P).



Colorado Department of Transportation
www.dot.state.co.us/.../envwaterqual/ECS.asp

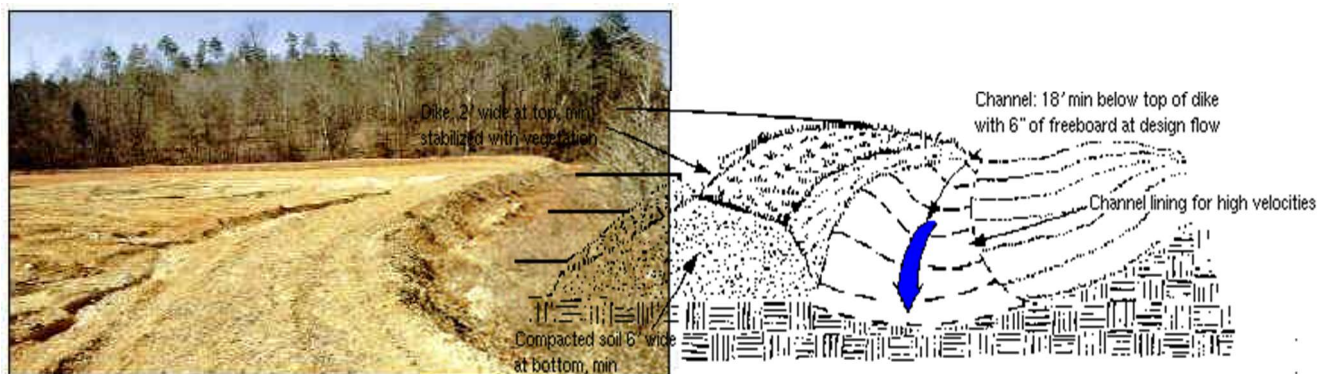
Obrázek 10 hrázky



Odvodňovací strouha (Diversion Dike)

Je to vlastně hráz konstruovaná ze zeminy, nebo umělých materiálů, která má chránit před povodněmi a kontrolovat výšku hladiny v souvislosti s obděláváním plodin, rybolovem a myslivectvím, nebo například údržbou, vylepšením, úpravou, nebo přímo

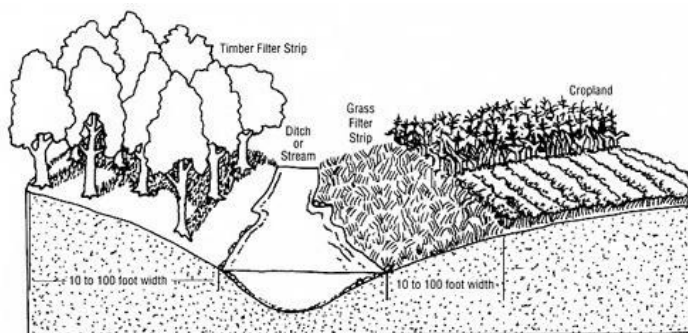
tvorbou mokřadů (obr. 11). Velmi přispívají ke kontrole rychlosti odtoku při přívalových deštích. Redukce sedimentu se zde dostává na 35%, N10% a P30%.



Obrázek 11 odvodňovací strouha (<http://infohouse.p2ric.org/ref/02/01524/urbst820.htm>)

Filtrační pásy

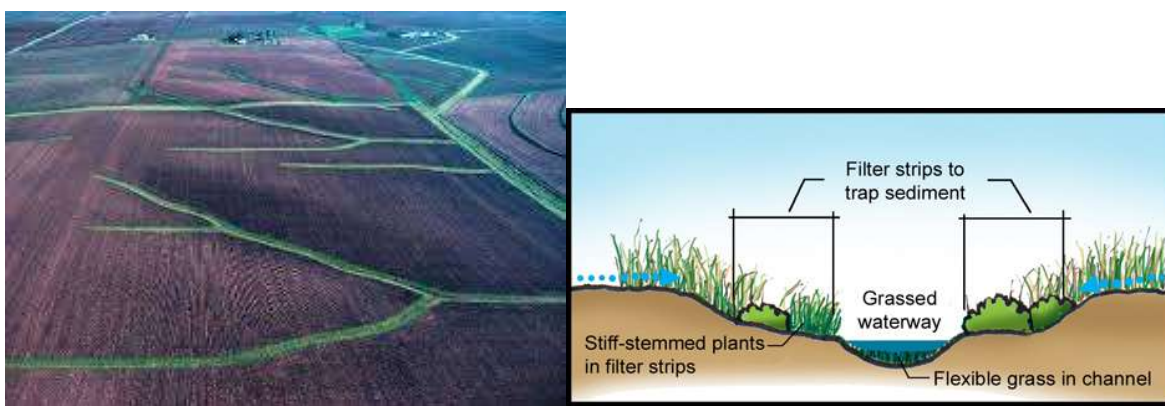
Jsou to pásy zeleně, většinou travní, které jsou umístěné podél břehů a oddělují zemědělskou půdu od vodních toků a ploch. Jejich funkcí je zachycovat smyvy z polí a filtrovat látky, které by se jinak dostaly do vodních toků (obr.12). Většinou se zde usazují větší částice a z těch se uvolní například nutrienty, které jsou nadále čerpané biomasou tohoto pásu. (suspended solids 65%, N=70%, P=75%).



Obrázek 12 Filtrační pásy (<http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0467.html>)

Zatravněné údolnice

Dalším způsobem, jak zachytit a filtrovat odnos látek a sedimentů z povodí je zatravnění údolnic, jak znázorňuje následující obrázek 13. V kombinaci s filtračním pásem plodin je to velmi účinné opatření pro snížení odnosu polutantů do toků. (Sediment = 65%, N=70%, P=75%).



Obrázek 13 Zatravněná údolnice (http://nac.unl.edu/buffers/guidelines/3_productive_soils/4.html ; <http://plantandsoil.unl.edu/pages/informationmodule.php?idinformationmodule=1088801071&topicorder=14&maxto=16&mint=1>)

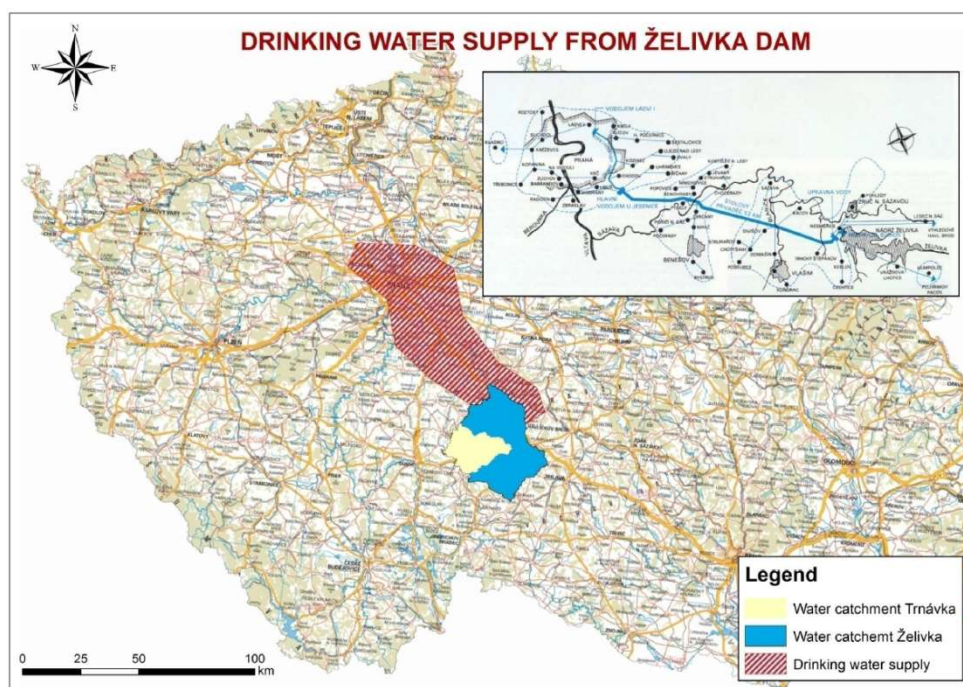
Vždy se jedná o zjištění místních podmínek, sklonech a orientací svahu, typu půdy, srážkových úhrnech a dalších nejúčinnější opatření bývají většinou hůře přijímána u majitelů pozemků, jelikož se jedná o plošná opatření. Tato se týkají velkých zemědělských ploch, jejich užívání a způsob hospodaření na nich.

3. Experimentální část

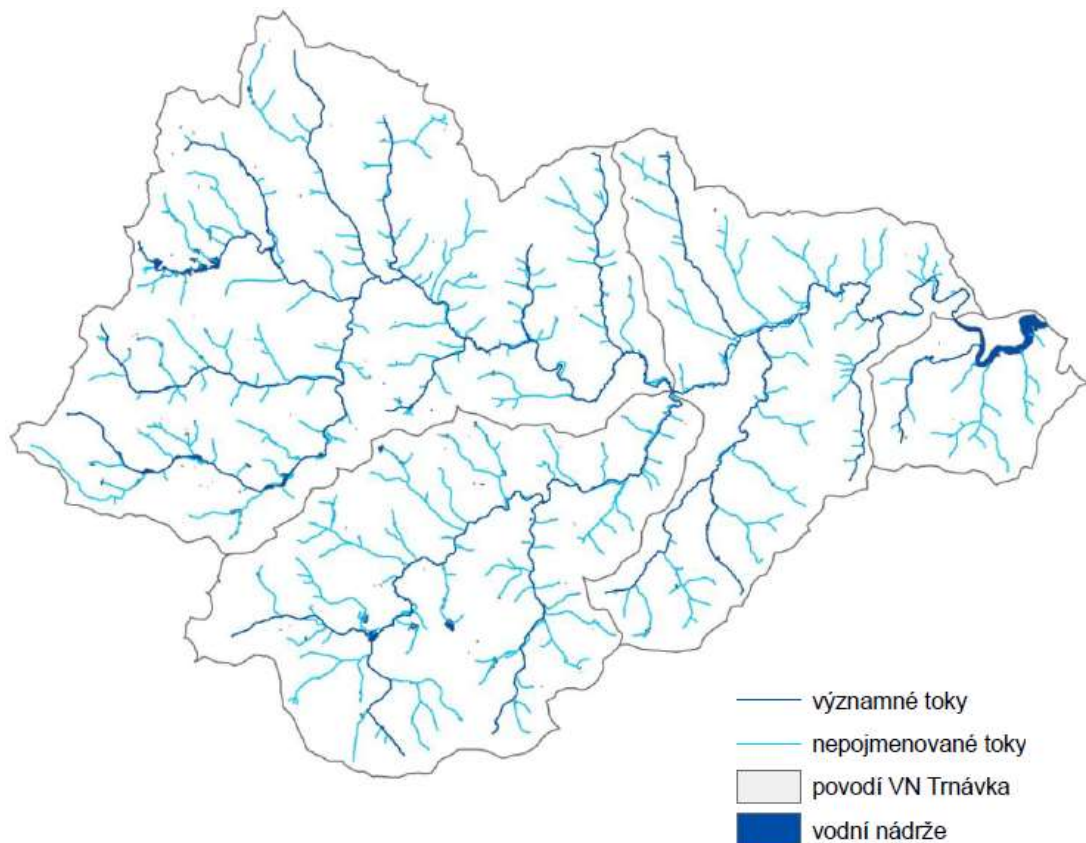
V této části práce budou představeny jednotlivé studie na různě velkých povodích. Jedná se o povodí vodní nádrže Trnávka (cca 300 km²), povodí Kejtovského potoka a povodí Kopaninského potoka. Ve všech třech studiích byla použita stejná metodika, tím pádem je detailněji rozebrána pouze v první studii.

3.1. Povodí VN Trnávka

Část vodárenského povodí vodní nádrže Švihov - povodí vodní nádrže Trnávka s velikostí povodí 339,3 km², s významnými vodními toky Trnava a Kejtovský potok na kterém se nachází jeden ze dvou největších zdrojů bodového znečištění VN Švihov (ČOV(čistírna odpadních vod) Pacov). Celé povodí vodní nádrže Švihov se rozkládá na ploše 1188 m², povodí vodní nádrže Trnávka zaujímá 28 % rozlohy celého povodí a je intenzivně zemědělsky obděláváno (obr. 14). Studie se zabývá zejména identifikací zdrojů znečištění reaktivními formami fosforu a dusíku v této oblasti v jednotlivých subpovodích (obr 15.), jako základní předpoklad k formulaci nápravných opatření k zamezení eutrofizace nádrže a dosažení dobrého ekologického a chemického stavu povrchových vod.



Obrázek 14 povodí VN Trnávka(Gregar a kol., 2015)



Obrázek 15 říční síť VN Trnávka Zdroj: HEIS VUV

3.1.1. Data pro vytvoření základního parametrického modelu SWAT

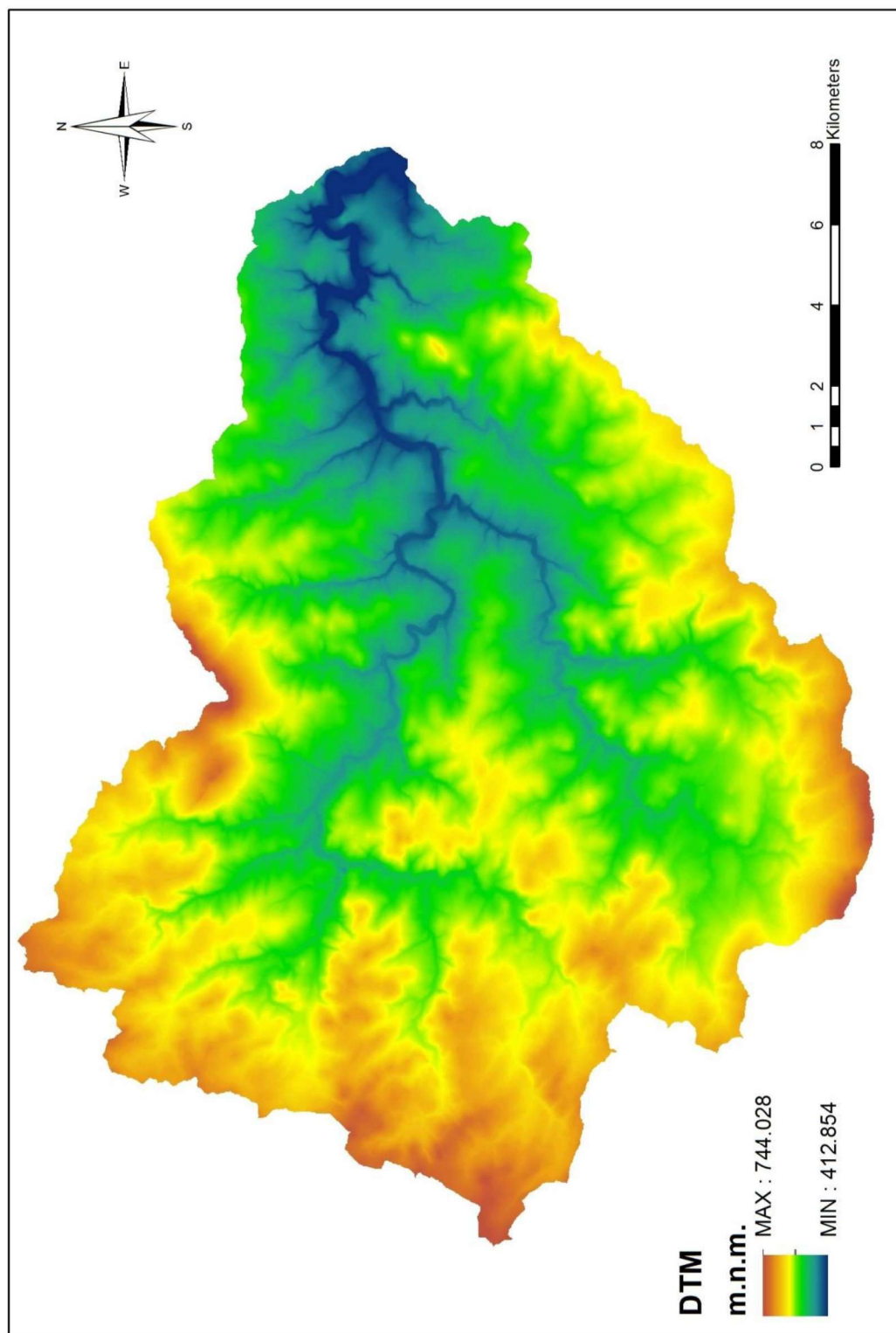
3D model povodí VN Trnávka

Digitální model terénu

Digitální model terénu (dále jen DMT) je digitální reprezentace terénu. Jde o model terénu, který simuluje zemský povrch bez ohledu na vegetaci nebo stavby (www.geoportalpraha.cz). Digitálních modelů je více druhů, jako použitelné je možné zmínit digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) případně 4. generace (DMR 4G), LIDAR nebo radarové snímky. Tyto modely se liší v přesnosti i metodě získávání dat. Pro účel modelování povodí VN Trnávka byl zvolen DMR 5G. Tento digitální model terénu zajišťuje dostatečnou přesnost pro potřeby modelu SWAT. Je poskytován a spravován Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK). “Digitální model reliéfu České republiky 5. generace představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného lidského zemského povrchu v digitální formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů o

souřadnicích X,Y,H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu (www.cuzk.cz). Model byl vytvořen z dat získaných metodou leteckého laserového skenování terénu, které probíhalo v letech 2009 až 2013 (obr. 16). Tento model je dle ČUZK přímo určen k analýzám terénních poměrů lokálního charakteru. Ideální tedy pro modelování jevů přírodního charakteru. Tato data jsou ve formátu xyz, což znamená, že před vložení DMT do modelu SWAT je nutné data upravit do správného formátu. Tato akce může být prováděna na příklad za pomoci ArcMapu, funkcí ASC II. Tato funkce udělá z 3 vstupních hodnot jeden lokalizovaný bod s danou nadmořskou výškou. Souřadnice bodů jsou v nové vrstvě v atributové tabulce automaticky spočítány. Pro další kroky je zapotřebí do atributové tabulky přidat a dopočítat sloupec se souřadnicí Z.

Digitální model terénu povodí VN Trnava

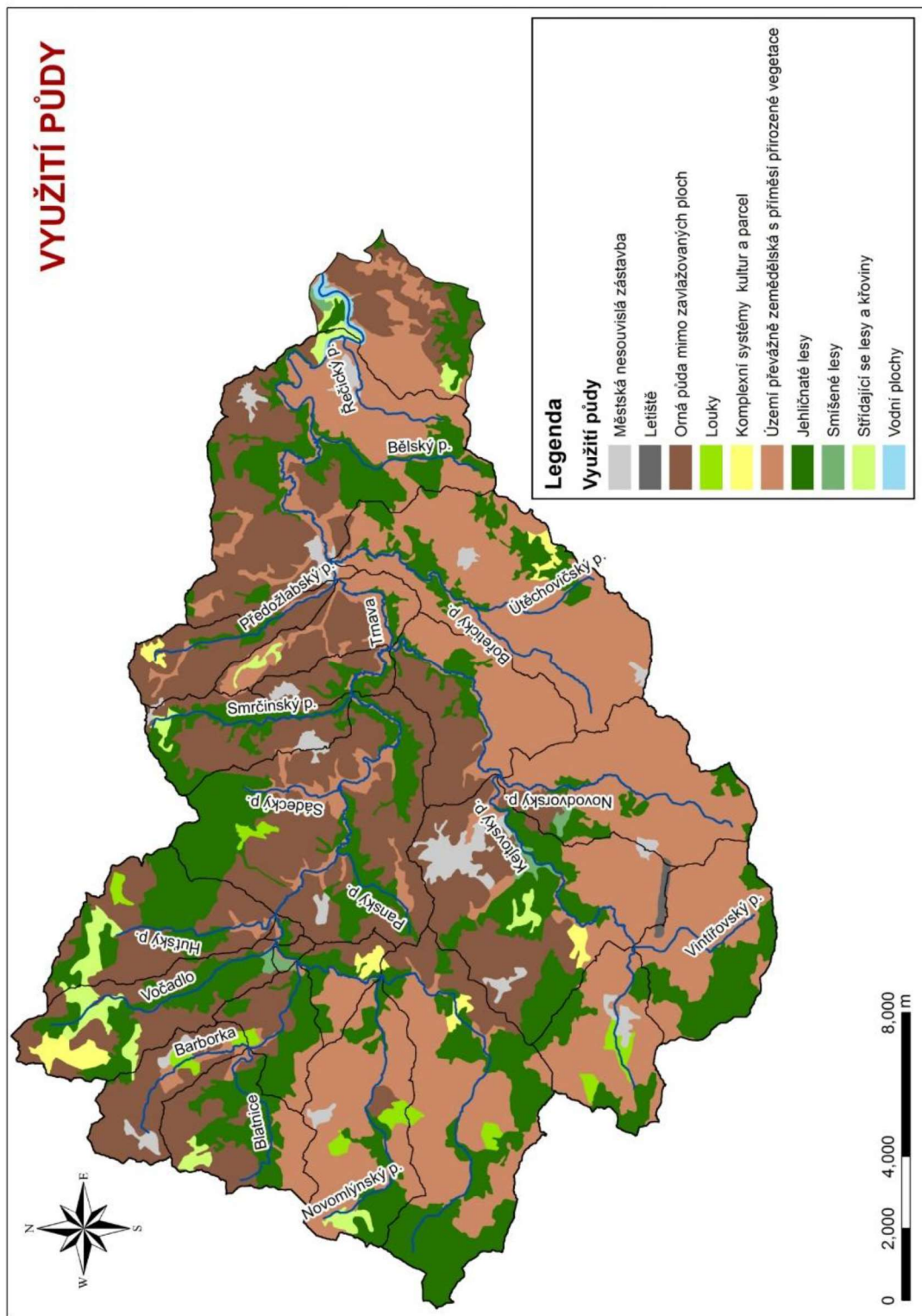


Obrázek 16 Digitální model terénu v povodí VN Trnávka(Gregar a kol., 2015)

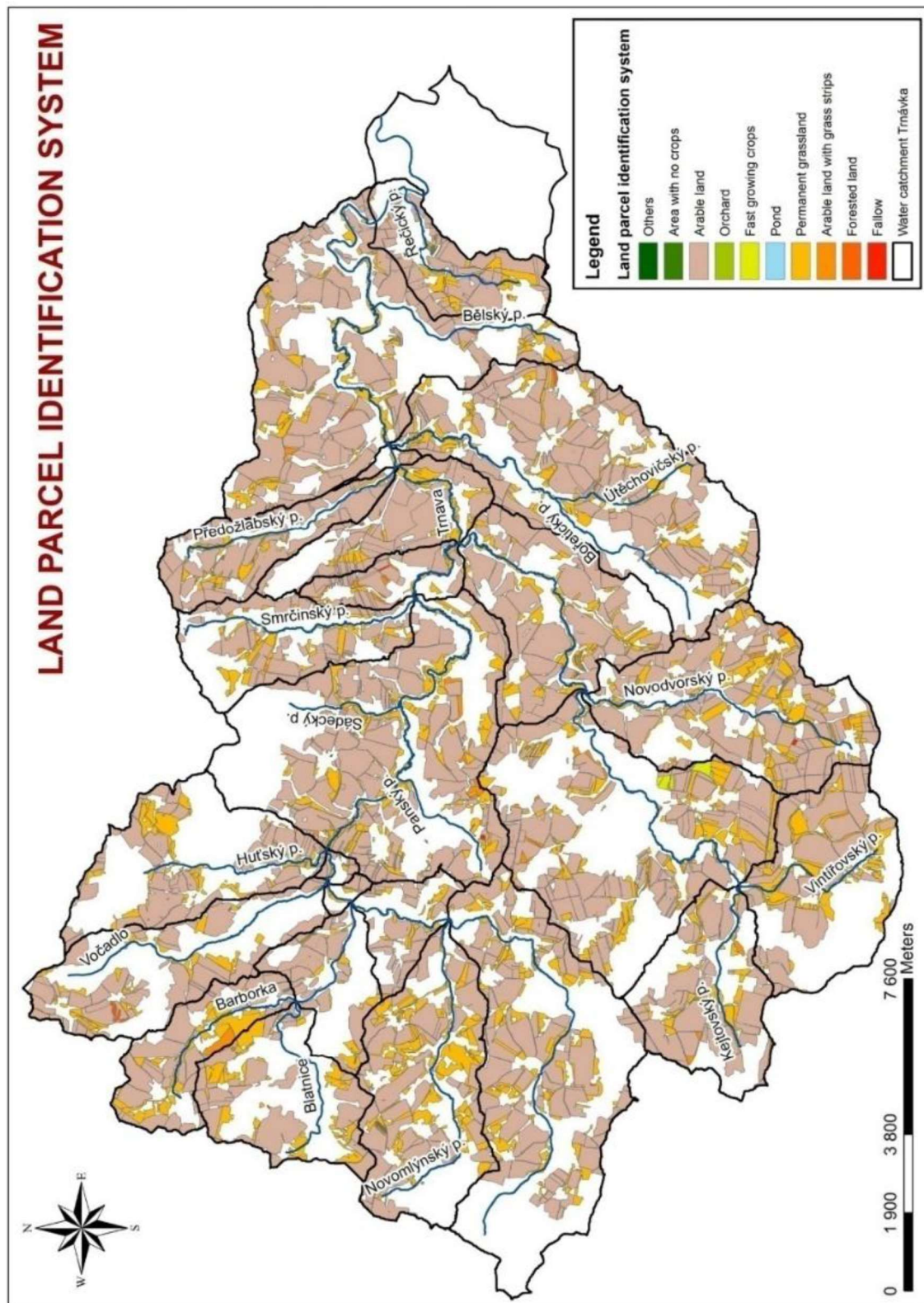
Land Cover(Land Use – využití půdy)

Půdní pokryv je velmi důležitým faktorem hydrologického cyklu povodí. Má vliv nejen na zachycování a zadržování vody, ale také na její kvalitu. Dalším důležitým aspektem pro model SWAT, z hlediska krajinného pokryvu, je eroze a erodovatelnost půdy. Pro Českou republiku existuje databáze krajinného pokryvu CORINE Land Cover. Tato databáze je volně přístupná. “CORINE Land Cover je databáze krajinného pokryvu zpracovaná na základě jednotné metodiky” (www.cenia.cz) (obr. 17). Databáze CORINE je vektorová vrstva, která byla vytvořena vektorizací satelitních snímků, které byly georeferencovány. Databáze je dostupná ve třech úrovních. Tyto úrovně se mění podle měřítka. Například úroveň jedna je pro měřítko 1:1 000 000 a obsahuje pouze základních 5 tříd. Úroveň 3 je navržena na měřítko 1:100 000 a tříd má 44 (z toho 28 tříd se vyskytuje v České republice) (www.cenia.cz). Na stránkách serveru Cenia je tedy možné získat bezplatně nejaktuálnější verzi databáze CORINE Land Cover. Databáze je volně přístupná. Jelikož model SWAT je primárně navržen pro americké datové zdroje, jednotlivé třídy krajinného pokryvu jsou částečně odlišné. Je tedy zapotřebí zjistit dle vzorového projektu, který je součástí SWATu, jaké je rozřazení dle amerického systému. Odlišností, ve zkoumaném území bylo jedno číslo v označení, proto došlo k úpravě atributové tabulky CORINE Land Cover, aby databáze korespondovala s databází modelu SWAT.

Kombinací s informacemi z LPIS (Land Parcel Identification System) (obr. 18), které obsahují detailnější využití zemědělských ploch, byl získán přehled o zemědělských aktivitách v povodí.



Obrázek 17 využití půdy v povodí VN Trnávka (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 18 Využití zemědělské půdy – LPIS (Gregar a kol., 2015)

Meteorologická data

Klimatické podmínky jsou pro hydrologický model SWAT klíčovou součástí. Modelu poskytují vstupní informace o hydrologickém cyklu. Pro zpracování tohoto typu dat je možné využít tzv. Weather Generator. Weather Generator je statistický model, který je schopný, na základě fyzických dat okolních srážkoměrných stanic, generovat reálné hodnoty pro zkoumané území - například denní úhrn srážek, maximální a minimální denní teplotu, vlhkost, atd. (Richardson, 1981). Hydrologická data pro model jsou potřebná v různých časových intervalech, s poměrně dlouhou srážkovou historií a musí být nejméně za 3 srážkoměrných stanic. Data je možné získat dvěma cestami. První variantou je nákup dat od Českého hydrometeorologického ústavu. Ten poskytne data ze všech srážkoměrných stanic v povodí. Problém je, že data nejsou vždy kompletní, a je zapotřebí doplnit chybějící data pomocí interpolace. Tato data, kvalitní podklad pro model SWAT. Pokud je modelováno rozsáhlejší území, je možné data získat ve veřejné databázi, která je provozována National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (obr. 19). V této databázi jsou všechna potřebná data, ale jejich přesnost není zcela stoprocentní. Síť srážkoměrných stanic je slabá a hodnoty pro menší povodí se musejí získávat interpolací dostupných dat. S velikostí zkoumaného povodí roste i hustota sítě srážkoměrných stanic. Pro povodí VN Trnávka (cca 330 km²) je tento datový zdroj dostatečný. Výhodou této databáze je, že poskytuje třicetiletou řadu měření, končící v roce 2014 a umožňuje tak modelovat dlouhodobé trendy. Model SWAT vyžaduje speciální formát dat, která jsou do něj zadávána. Data, která jsou většinou ve formátu .xls je nezbytné podrobit konverzi.

Další hydrologická data, která jsou pro spuštění modelu nezbytná, např. rozvodnice, vodní plochy a vodní toky v povodí je možné získat z databáze Výzkumného ústavu vodohospodářského T.G. Masaryka. Všechna tato data jsou ve formátu .shp, tedy je možné s nimi pracovat přímo.

Global Weather Data for SWAT

Thank you for your request.

Your data will be emailed to you when it is ready. You may also bookmark this page and return to check on the progress of your request.

Request Status



[Download your request data](#)

This data will be available online until 1/16/2015

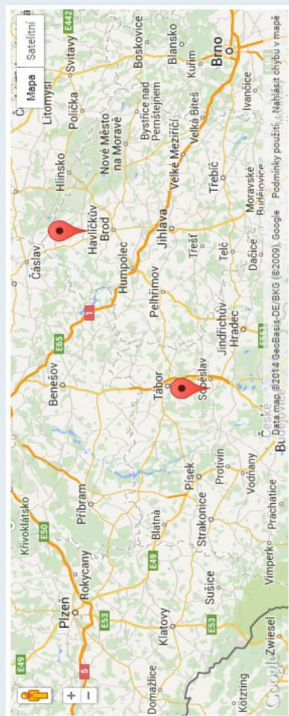
Request Information

Date Requested	12/16/2014 4:31 AM
Generate SWAT Files	Yes
Generate CSV File	Yes

Data Collected

Temperature	Yes
Precipitation	Yes
Wind	Yes
Relative Humidity	Yes
Solar	Yes

Location and Dates



South Latitude	49.2606	North Latitude	49.6943
West Longitude	14.6640	East Longitude	15.5704
Number of Stations	3		
Start Date	1/1/1979		
End Date	7/31/2014		
Starting Hour of Day	12:00 AM		



TEXAS A&M
UNIVERSITY



Cornell University



IWRM
International
Water Monitoring
Institute



ICARDA



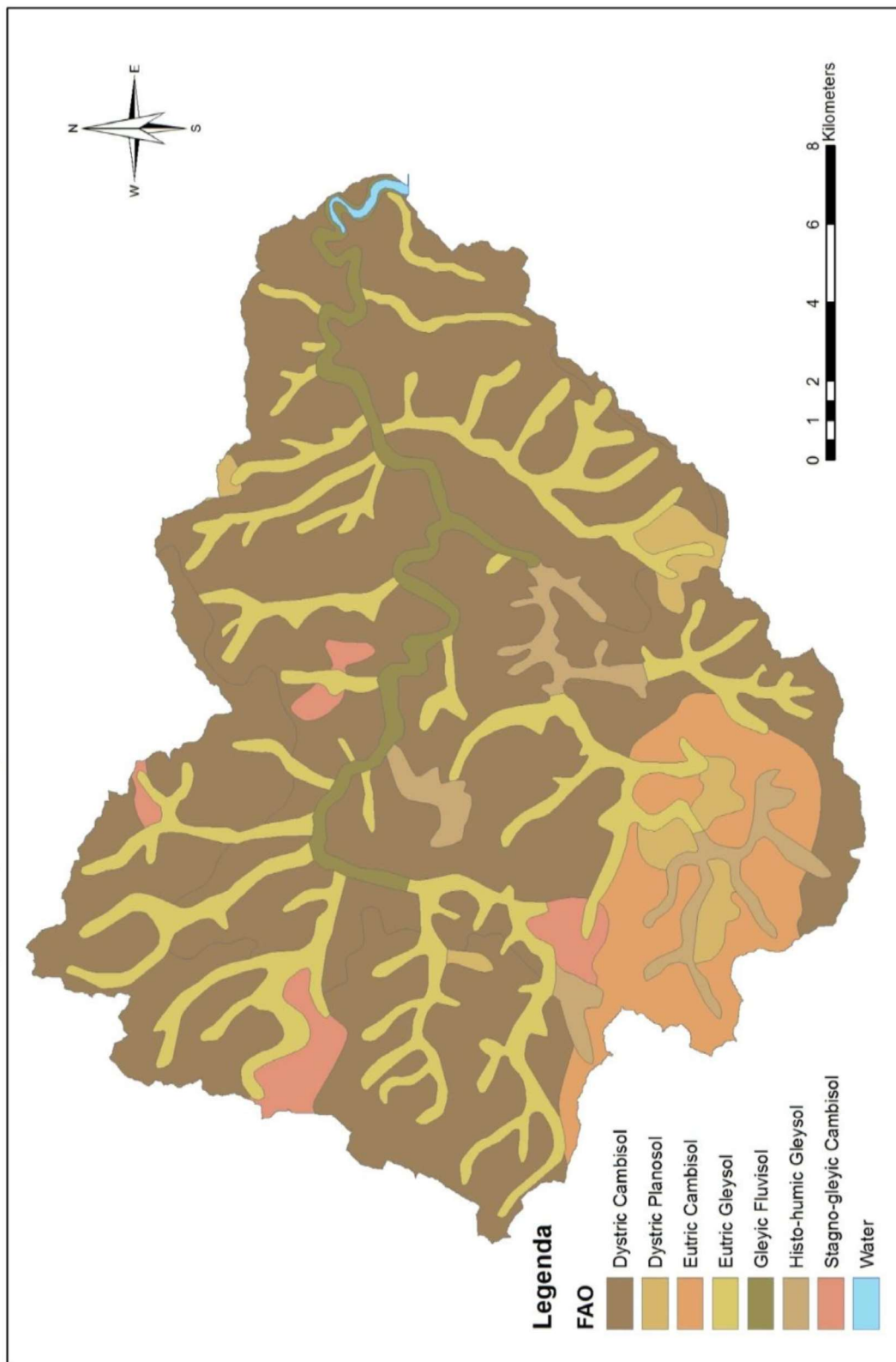
Virginia Tech
Invent the Future

Obrázek 19 Globální databáze počasí (Gregar a kol., 2015)

Pedologická data

Vrstva půdní mapa byla získaná od katedry pedologie, Fakulty agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů České zemědělské university v Praze (obr. 20). Tato mapa byla vytvořena dle českého pedologického systému. Jelikož má i pro půdní mapu model SWAT svou vlastní datovou strukturu, je nezbytné provést úpravu dat do požadovaného formátu. Jako optimální řešení se jeví doplnění existující databáze SWAT přidáním vlastních půdních vrstev do stávající databáze modelu; a to způsobem, že přidáme jeden půdní typ, který se vyhledá v pedologickém systému (klíč). K tomuto “novému” půdnímu typu definujeme reálné hodnoty ve formátu, který vyžaduje model SWAT pro propojení vrstev. Model využívá k základnímu výpočtu eroze takzvanou modifikovanou rovnici ztráty půd MUSLE (Williams, 1995). Dalším ideálním zdrojem pro pedologické mapy je mapa BPEJ, která je daleko přesnější, nicméně je třeba počítat s nepřítomností dat pro lesní pozemky. Informace pro lesní pozemky se dají získat například od ÚHÚL (Ústav pro Hospodářskou Úpravu Lesů).

Pedologické poměry v povodí VN Trnava



Obrázek 20 Pedologická mapa povodí VN Trnávka (Gregar a kol., 2015)

3.1. Základní parametrický model SWAT

Model SWAT – popis

SWAT je akronym pro Soil and Water Assessment Tool, model pro širokou škálu velikosti povodí, vyvinutý Dr. Jeff Arnoldem pro USDA Agricultural Research Service (ARS). SWAT byl vyvinut pro předpovídání vlivu managementu krajiny na vodu, sedimenty a pohyb nutrientů a agrochemikálií ve velkých komplexních povodích v rozličných klimatických podmínkách s různými pedologickými charakteristikami, různým využitím krajiny a jeho managementem, a to pro dlouhé časové periody (Neitsch, 2009).

o Jedná se o fyzikálně založený model obsahující soustavu regresních rovnic sloužících k popisu vztahů mezi vstupními a výstupními proměnnými. SWAT vyžaduje specifické informace o počasí, vlastnostech půd, topografii, vegetaci a managementu krajiny v povodí. Fyzikální proces spojený s oběhem vody, pohybem sedimentů, růstem vegetace, cyklem nutrientů atd. je modelován přímo modelem SWAT využívajícím tato data. Výhodou tohoto přístupu je:

o Povodí, která nemají přímo monitorovaná data (např. průtoky) mohou být přesto modelována.

o Relativní vliv alternativních vstupních dat (jako např. změny managementu krajiny, změny klimatických podmínek, vegetace atp.) na kvalitu vody nebo jiné proměnné mohou být modelem kvantifikována.

o Využívá obecně dostupná data - pokud je SWAT použit ke studiu specifických procesů jako např. transportu bakterií, je potřeba minimum speciálních dat ke spuštění modelu a navíc obvykle dostupných z veřejných databází.

o SWAT je počítačně efektivní. Simulace velmi velkých povodí nebo velkého množství strategií managementu může být prováděna bez dalších investic s minimem nároků na čas a peníze.

o Umožňuje uživatelům studovat dlouhodobé procesy. Celá řada v současnosti řešených problémů souvisí s postupným nárůstem škodlivin ve vodním prostředí.

Studium těchto problémů vyžaduje opakovaná spuštění časově rozsáhlých dat zahrnujících i několik dekad.

o SWAT je kontinuální časový model, tj. model využívající dlouhé časové řady. Není určen k simulaci detailních, jednorázových událostí (Gassman 2007).

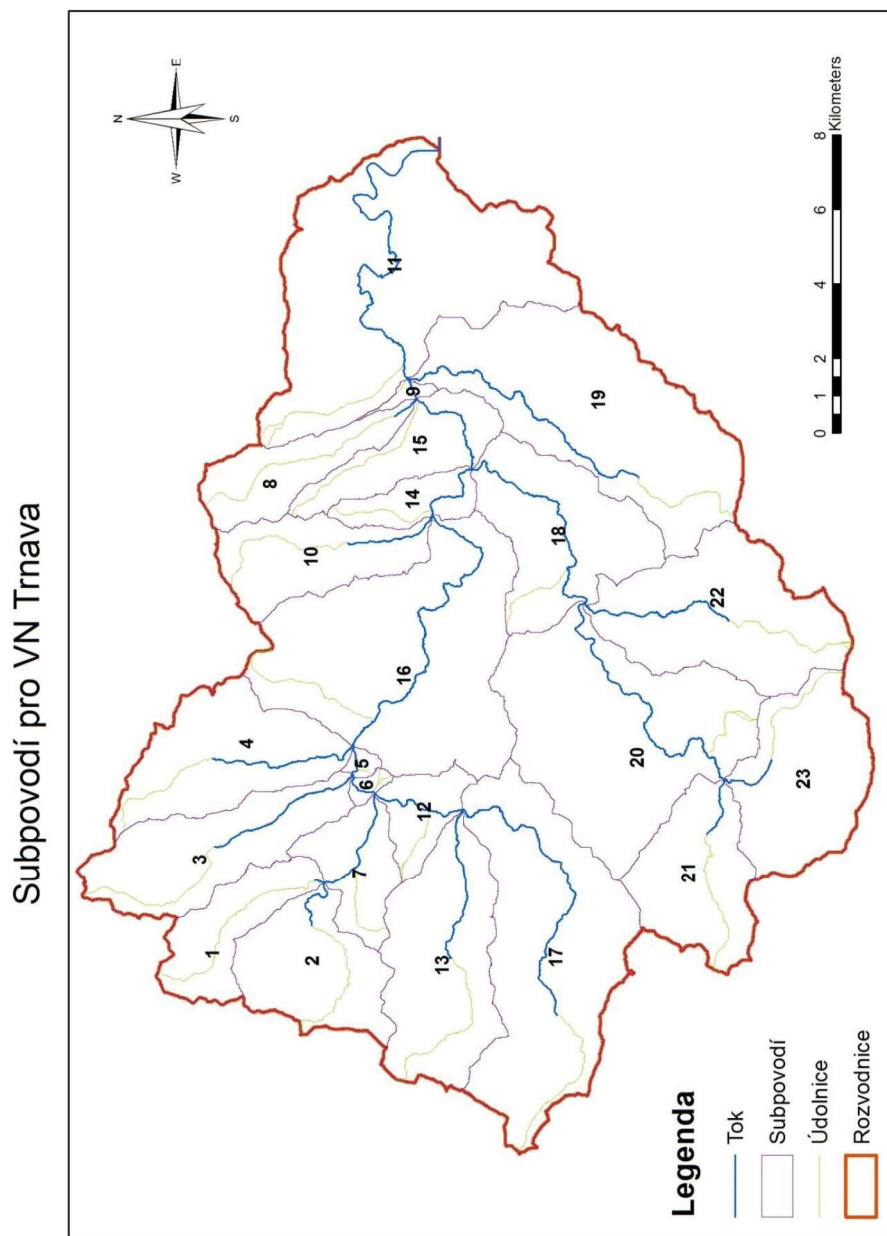
HRU – Hydrologic Response Units

SWAT umožňuje simulovat celou řadu rozdílných fyzikálních procesů v konkrétním povodí. Detailní diskuze simulace různých procesů přesahuje rámec této zprávy a je obsahem Teoretické dokumentace SWAT 2009. Podle potřeb modelu může být povodí rozděleno na větší množství subpovodí. Využití subpovodí při simulaci je výhodné zejména v těch případech, kdy v některých částech povodí je dominantní land-use nebo pedologické charakteristiky mající přímý vliv na hydrologické poměry. Rozdělením na subpovodí je možné prostorově přiřadit různým částem povodí obdobné vlastnosti. Obr. 21 ukazuje rozdělení povodí VN Trnávky na dílčí subpovodí, Vstupní informace pro každé subpovodí je sloučena do následujících kategorií

- Klima
- Hydrologic response units (HRU)
- Vodní plochy/ mokřady
- Podzemní vody
- Hlavní odtokový kanál

Hydrologic response units jsou sdružená (koncentrovaná) území uvnitř subpovodí, které v sobě zahrnují unikátní kombinaci využití území (land cover), pedologických vlastností a kombinací různých způsobů managementu území. Bez ohledu na problém, který je prostřednictvím SWATu studován, je vodní bilance řídicím procesem všeho, co se v povodí odehrává. Ke správné předpovědi pohybu pesticidů, sedimentů nebo živin je klíčová správná simulace hydrologického cyklu odpovídající skutečné bilanci v reálném povodí. Simulace hydrologického cyklu v povodí můžeme dělit do dvou hlavních fází. První hlavní fází je vodní cyklus v krajině (land phase). Krajinná fáze hydrologického cyklu kvantifikuje množství vody v

oběhu, sedimentů, nutrientů a pesticidů vstupující do hlavního odtokového kanálu každého subpovodí. Druhou hlavní fází můžeme nazvat odtoková fáze hydrologického cyklu a je definována, jako transport vody, sedimentů atd. prostřednictvím sítě odtokových kanálů povodí do závěrového profilu.



Obrázek 21 Rozdělené povodí VN Trnávka na jednotlivá sub-povodí (Gregar a kol., 2015)

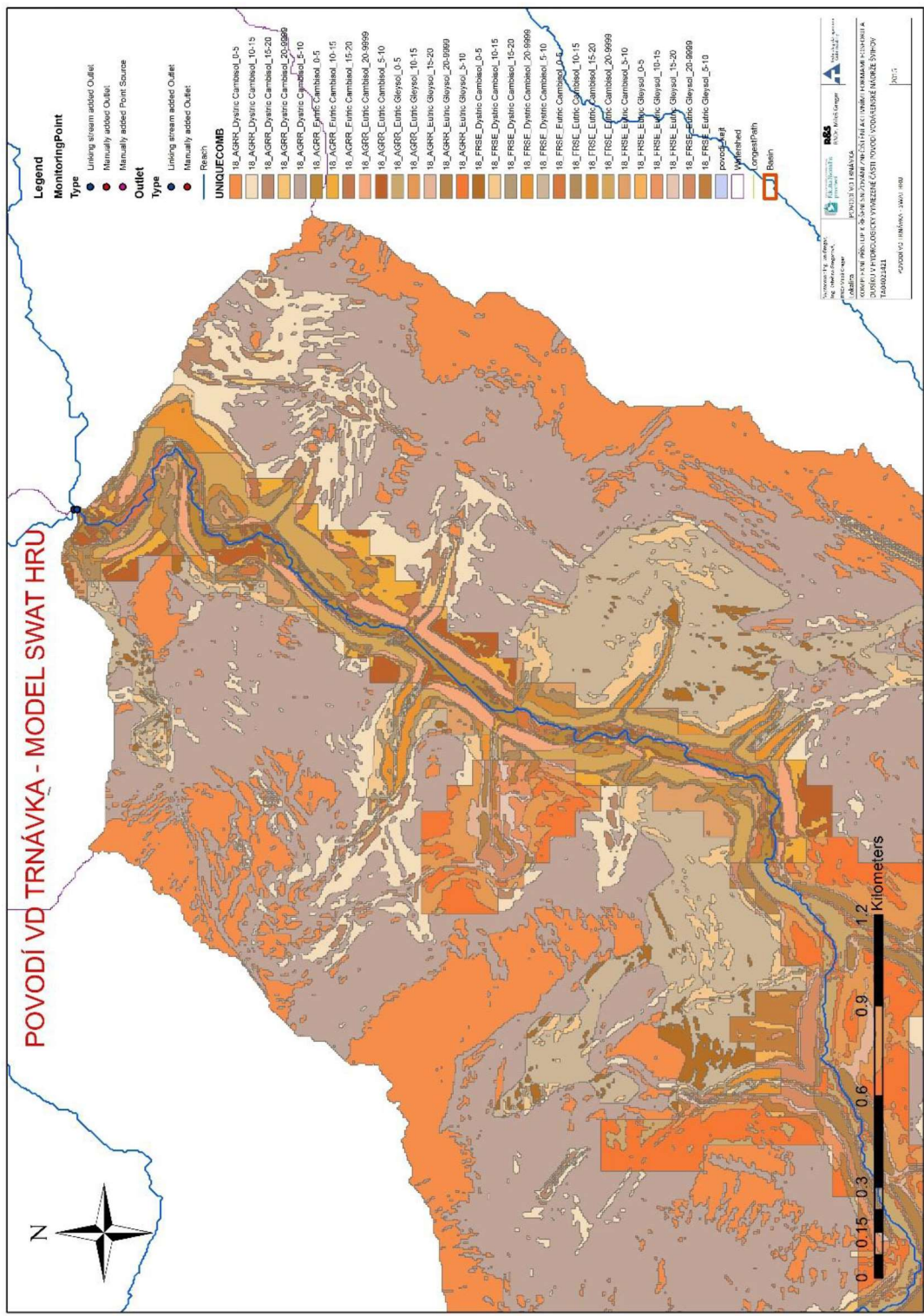
Spuštění modelu

DTM

Prvním krokem po spuštění programu je založení nového projektu. Tento projekt je pracovním prostředím. Jakmile je projekt pojmenován a vytvořen, je možné začít práci s modelem. Jako první se vkládá digitální model terénu. Jak již bylo zmíněno, digitální model terénu se vkládá ve formě rastru a vkládá se přímo do pracovního prostředí ArcMapu, jako nová vrstva. Na základě tohoto DMT si model SWAT spočítá, kudy v povodí prochází rozvodnice a území rozdělí na menší části, které jsou SWATem nazvána jako “sub-basins”. V rámci přípravy modelu je zapotřebí označit tzv. “point sources” (bodové zdroje) a “stream lines” (toky v povodí).

HRU

Dalším krokem je vytvoření “Hydrological Response Unit” neboli HRU. Hydrological response unit jsou oblasti reprezentující stejné podmínky z pohledu všech třech hlavních částí, tedy půdního pokryvu, půdní mapy a sklonitosti. HRU jsou tedy jednotky vytvořené modelem SWAT. Pro vytvoření nového HRU je tedy potřebné propojit vrstvu Land Cover s databází modelu SWAT, stejně je to i pro vrstvu půdní mapy. Sklonitost terénu, kterou spočítá program ArcMap se musí rozdělit ještě do skupin. Počet skupin záleží na členitosti terénu, ale většinou se dělí do 4 skupin. Sklonitost je důležitá z pohledu eroze v zájmovém území. Dělí se tedy do skupiny, kde riziko eroze je téměř nulové nebo jen velmi malé (0-5 %), poté do dvou skupin, plochy erozí ohrožených mírně (5-7%) a středně (7-10%) a extrémně ohrožených ploch (10-100%). Po propojení všech dat v modelu SWAT jsou založeny nové HRU, které je nadále možné editovat (obr. 22). V HRU se zejména edituje vrstva Land Cover, ve které se upřesňuje využití krajiny, neboli Land use. Dalším objektem editace jsou bodové zdroje (point sources). U bodů se určuje přesná lokalizace a detailně se popisují, aby bylo jasné, o jaký zdroj znečištění se jedná (způsob obhospodařování půdy, používaná hnojiva, popřípadě pesticidy, atd...).



Obrázek 22 Část povodí VN Trnávka - rozdělení na HRU (Gregar a kol., 2015)

Weather Data

Do modulu Weather data se vkládají převedená data, jak již bylo zmíněno výše. Tato data obsahují denní úhrny srážek, maximální půlhodinové úhrny srážek, solární radiaci, minimální a maximální teploty, atd...) Posledním krokem před spuštěním programu je vytvoření souhrnných tabulek. Tyto tabulky si generuje model SWAT na základě všech zadaných informací. Do těchto tabulek model zapisuje i výstupy z namodelovaných výsledků. Při jakékoliv změně hodnot, parametrů nebo jiných úprav v modelu, v datové části, je nutné tabulky vygenerovat znovu, aby se nová data zapsala do modelu. Vždy se mění název při spuštění modelu, původní tedy výsledky z předchozích spuštění zůstávají zachována. Po vykonání všech výše zmíněných kroků je možné model spustit.

3.1.2. Další datové zdroje:

Základní hydrologická síť

Pro lokalizaci hydrologické sítě slouží v prostředí GIS vrstva DIBAVOD. Jedná se o toky, nádrže a rozvodnice. Rychlost, nebo případně průtok vody je nedílnou součástí měřených dat, která jsou zapotřebí ke správné kalibraci modelu. Měření v uzavřevém profilu je prováděno kontinuálně společností Povodí Vltavy a.s., a ve vybraných profilech bylo prováděno hydrometrickou vrtulí.

ČOV – dle testované technologie

V základním kalibrovaném modelu SWAT jsou jako vstupní datové řady použity reálné hodnoty na odtoku z jednotlivých ČOV získaných od jejich provozovatelů. Speciálním případem je ČOV Pacov, kde byl z reálných dat simulován vliv rekonstrukce této čistírny na kvalitu vody v Kejtovském potoce, resp. v Trnavě a vliv na celkovou bilanci P a N při nátoce do VN Trnávka.

Z hlediska simulace opatření ke snížení odtoku P a N z ČOV (bodových zdrojů) byly kalkulovány hypotetické datové řady na odtocích z jednotlivých čistíren a to jednak s aplikací nejlepší dosažitelné technologie a jednak s aplikací technologie dosrážení fosforu na odtoku.

V povodí vodní nádrže Trnávka se nachází 6 významnějších čistíren odpadních vod. Pro účely této práce nebyly zkoumány domovní čistírny odpadních vod, které byly zahrnuty do kategorie plošného znečištění stejně, jako identifikované výpustě ze smíšených netěsněných kanalizací v malých obcích. Nejvýznamnější ČOV z hlediska velikosti je v Pacově. Tato čistírna prošla před několika lety rekonstrukcí a intenzifikací, která přispěla k výraznému snížení odtoku živin z vypouštěných odpadních vod a tím i zatížení Kejtovského potoka. Ostatní čistírny v povodí jsou podstatně menší, přesto je jejich vliv na celkovou bilanci živin v povodí významný. Pro řadu z nich jsou připravena opatření k jejich intenzifikaci popsána v Plánech oblasti povodí a Programu rozvoje vodovodů a kanalizací.

Difusní zdroje

Pro základní představu o těchto zdrojích byla provedena analýza počtu obyvatel v jednotlivých menších sídlech nevybavených centrální technologií čištění odpadních vod. Analýza byla provedena jak pro trvale bydlící obyvatele, tak pro sezonní návštěvníky (jedná se poměrně významnou rekreační oblast se sezonním výkyvem počtu EO). Návazně byla provedena podle údajů PRVK kraje Vysočina analýza individuálních ČOV. Pro celkový odhad vstupů P a N z těchto zdrojů byl použit přepočtené denní hodnoty produkce znečištění na jednoho EO, který byl upraven expertním odhadem (VŠCHT) z hlediska převažujících individuálních technologií čištění (zejména tříkomorové septiky). Takto vypočítané hodnoty byly použity jako vstup P a N do bilance v dílčích subpovodích.

Plošné zdroje

Povodí vodní nádrže Trnávka má vysoký stupeň zornění, a to i vzhledem ke skutečnosti, že ve druhé polovině 20. století zde byla vybudována rozsáhlá meliorační díla. S postupnou intenzifikací zemědělství vyžadující intenzivní agrochemické postupy a přechodem na velkoplošné způsoby hospodaření doprovázené zvýšenou erozí, jakož i změnou struktury pěstovaných plodin dochází ke zvýšenému vyplavování živin. Tento jev je v posledních desetiletích umocněn i dlouhodobou degradací půd a vlivem změny rozložení a intenzity srážek spojený s klimatickou změnou. Pro kvantifikaci vlivu zemědělského hospodaření na množství vyplavovaných živin nejsou k dispozici spolehlivá data. Byla vypracována celá řada

postupů jak tento vliv co možná nejpodrobněji popsat, ze všeobecnění pro povodí velikosti VN Trnávka je však problematické. Kromě omezeného rozsahu veřejně přístupných datových zdrojů chybí i ochota ze strany zemědělských subjektů hospodařících v povodí podrobné údaje o množství hnojiv a způsobu hospodaření poskytnout, takže ani terénní šetření nepřináší komplexní pohled na tuto problematiku.

Pro kalkulaci vstupů P a N ze zemědělství byly použity standardní hodnoty hnojení pro jednotlivé plodiny v rozložení dle LPIS. Pro ověření správnosti byla zpracována databáze vstupů od jednotlivých hospodařících subjektů na cca 20% území. Rotace plodin odpovídá v celkovém měřítku reálným podmínkám. Hodnoty sklizně (odběr biomasy) byl kalkulován podle průměrných hodnot pro dané období, plodinu a zemědělskou produkční oblast.

Osevní postupy + aplikace hnojiv

Osevní postupy byly získány na základě dat získaných od části (cca 20% plochy zemědělských pozemků) zemědělsky hospodařících subjektů, které poskytly svůj osevní plán, jehož součástí bylo také množství hnojiv využití k pěstování plodin. Tato data byla extrapolována na celé povodí VN Trnávka.

Intenzivní rybniční hospodaření

Pro potřeby modelu nebyly tyto vstupy kalkulovány vzhledem k extenzivnímu způsobu hospodaření na většině rybníků v povodí

Atmosférická depozice

Hodnoty atmosférické depozice nebyly vzhledem k jejich zanedbatelnému podílu na celkové bilanci v modelu kalkulovány.

LPIS

Další informací zvolenou k získání přehledu o povodí byla data z LPIS (Land and Parcel Identification System). Jedná se o veřejný registr půd a je to geografický informační systém (GIS), který je tvořen primárně evidencí využití zemědělské půdy. LPIS vznikl na základě zákona č. 252/1997 Sb., o zemědělství na přelomu let 2003 a 2004. Ke spuštění došlo 21. března 2004. Data z LPIS byla použita pro potřeby konkrétního rozdělení jednotlivých zemědělských ploch. Jednotlivé informace byly

v kombinaci s dostupnými informacemi od hospodařících subjektů zadány do modelu SWAT, jako součást managementu v povodí.

3.1.3. Monitorovací síť

Pro správné určení bodových a difuzních zdrojů znečištění je prvním nutným krokem zjištění všech přítoků do hlavní sběrnice v zájmovém území, které by mohly být objektem zájmu jako potenciální zdroje sledovaných polutantů a naplánování postupu při odběrech. Tento krok je důležitý z toho důvodu, aby nedošlo k opomenutí nějakého významného zdroje znečištění.

Hlavními místy zájmu jsou veškeré přítoky do hlavního toku (potoky a strouhy, vyústění drenáží z odvodnění luk, pastvin a polí (pokud jsou v přímé blízkosti toku a jsou intenzivně využívány), komposty a pole pokud jsou obhospodařovány po spádnicí a jsou v přímé blízkosti toku, jsou narušeny erozí a je viditelné, že splach z polí se dostává přímo do toku.

V případě, že sledovaná vodoteč protéká skrz nebo v těsné blízkosti sídla, které není vybaveno uznatelnou technologií na čištění odpadních vod, kontroluje se, zda do toku není vyústěna kanalizace. U návesních rybníků se odebírají dva vzorky, jeden před vtokem do rybníka a druhý u výtoku z rybníka. Pokud je do rybníka vyústěna kanalizace z obce, odebere se jako samostatný vzorek.

Pokud jsou za vesnicemi nebo obcemi čistírny odpadních vod anebo kořenové čistírny, provádí se tři měření. Před ČOV (cca 3 m), v místě výtoku z ČOV a pod čistírnou (cca 5 m).

Pro detailní popis povodí je klíčovým faktorem co nejpřesnější výpočet hydrologické bilance. Řídícím (závěrovým) profilem povodí je použit profil „přítok do VN Trnávka“ kontinuálně měřený Povodím Vltavy s.p. Jako pomocný závěrový profil je použit „odtok z VN Trnávka“ kontinuálně měřený Povodím Vltavy s.p. (na tomto profilu se projevuje manipulace s vodní nádrží a tudíž je použit jako pomocný pro případné bilanční dopočty) Vzhledem k velikosti povodí a jeho členitosti (množství subpovodí) a s ohledem na potřebu detailního modelace transportu živin a sedimentů,

byly dílčí měrné profily vybrány na základě podrobné studie hydrologické sítě a to na významných přítocích Trnávky a Kejtovského potoka.

V rámci projektu byla vytvořena monitorovací síť měření kvality vody na odtoku z jednotlivých subpovodí (obr 23). Pro každý měřený profil byla vytvořena evidenční (katalogová) karta obsahující základní údaje (viz příloha).

Jako jeden z výstupů byla vytvořena mapa těchto měrných profilů s přiřazením katalogových karet s možností vložení do atributových tabulek. Mapa umožňuje identifikace problémových dílčích povodí. Současně jsou v mapě umístěna i jednotlivá historická měření prováděná různými pracovišti a to ve formě georeferencovaných bodů navázaných na příslušný katalogový list. Tento postup umožňuje ve větším detailu identifikovat podle jednotlivých drobných toků problematická místa z hlediska vnosu P a N. Pro tato měření nejsou k dispozici měřená data hydrologické bilance, pouze modelová. Přes tento nedostatek je z této mapy možné získat poměrně odpovídající přehled o zdrojích znečištění až k úrovni detailu dílčího subpovodí (méně než 10 km²).

Průtoky

Pro určení významnosti vlivu jednotlivých zdrojů znečištění na celkové zatížení vodní nádrže je klíčová hydrologická bilance. Vzhledem k tomu, že identifikace zdrojů probíhají v dílčích subpovodích, t.j. mimo standardně měřené profily, bylo nutné provést výběr vhodných profilů a provést na nich hydrometrická měření a výpočty. Celkem bylo tímto způsobem změřeno a zaznamenáno 23 profilů v povodí VN Trnávka.

Měření průtoku probíhá ve vybraném profilu, který se nachází pokud možno v místě s rovnoměrným prouděním, v co nejpřímějším úseku, kolmo na směr proudění. Profil se slovně popíše a zaměří (pomocí nivelační latě nebo pásma). Po zaměření rozhodneme, v kolika svislicích budeme profil měřit a určíme, kolik bodů bude v jedné svislici.

Měří se rychlosti v jednotlivých bodech na svislici. Podle rychlosti průtoku se určí čas, za který budeme měřit rychlost. Většinou jde o čas 30 s, kdy otáčkoměr zaznamenává otáčky vrtule, po tuto vymezenou dobu. Vše se zaznamená do

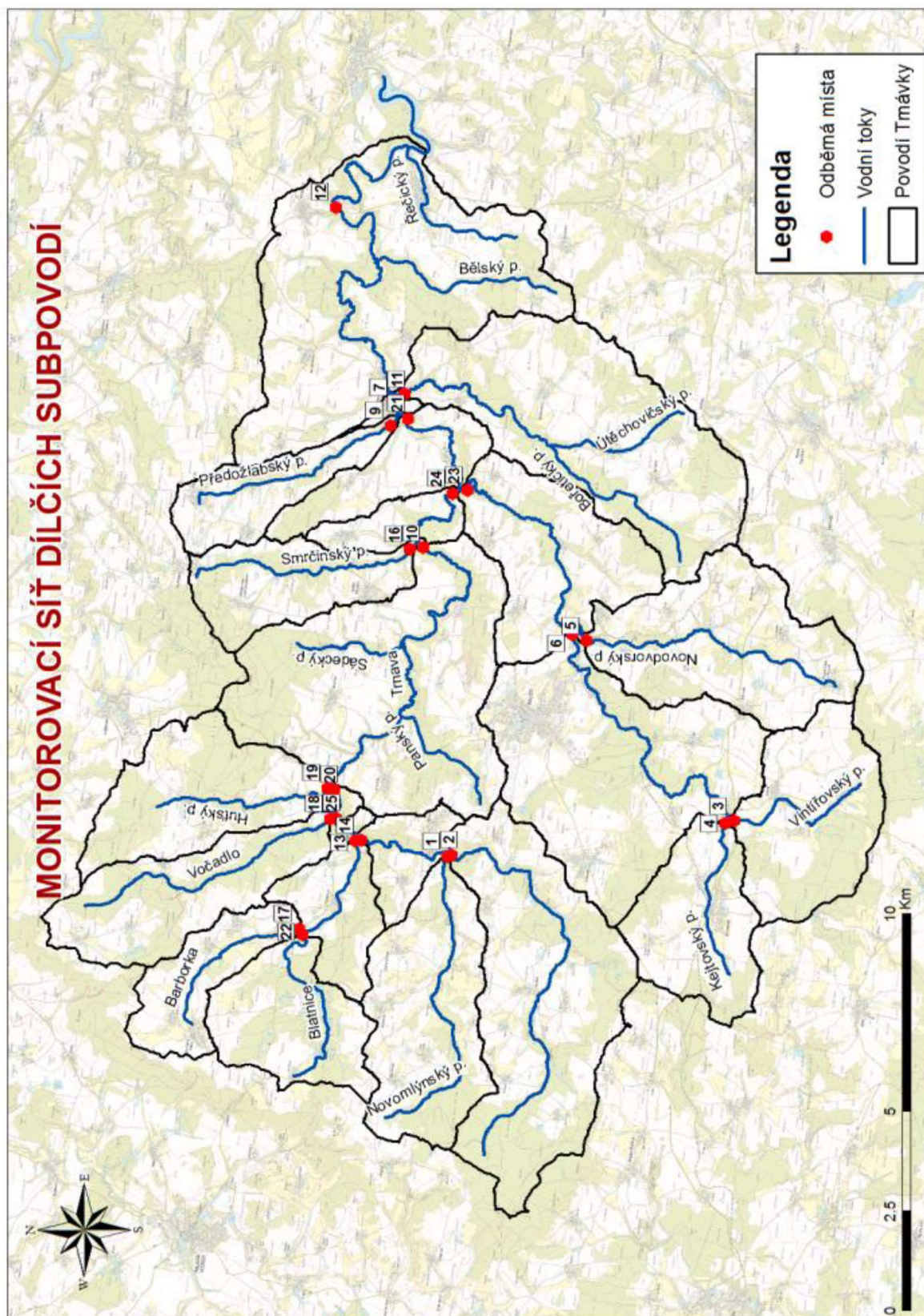
hydrometrického zápisníku. Měření je ukončeno po změření otáček v každé svislici koryta.

Koncentrace

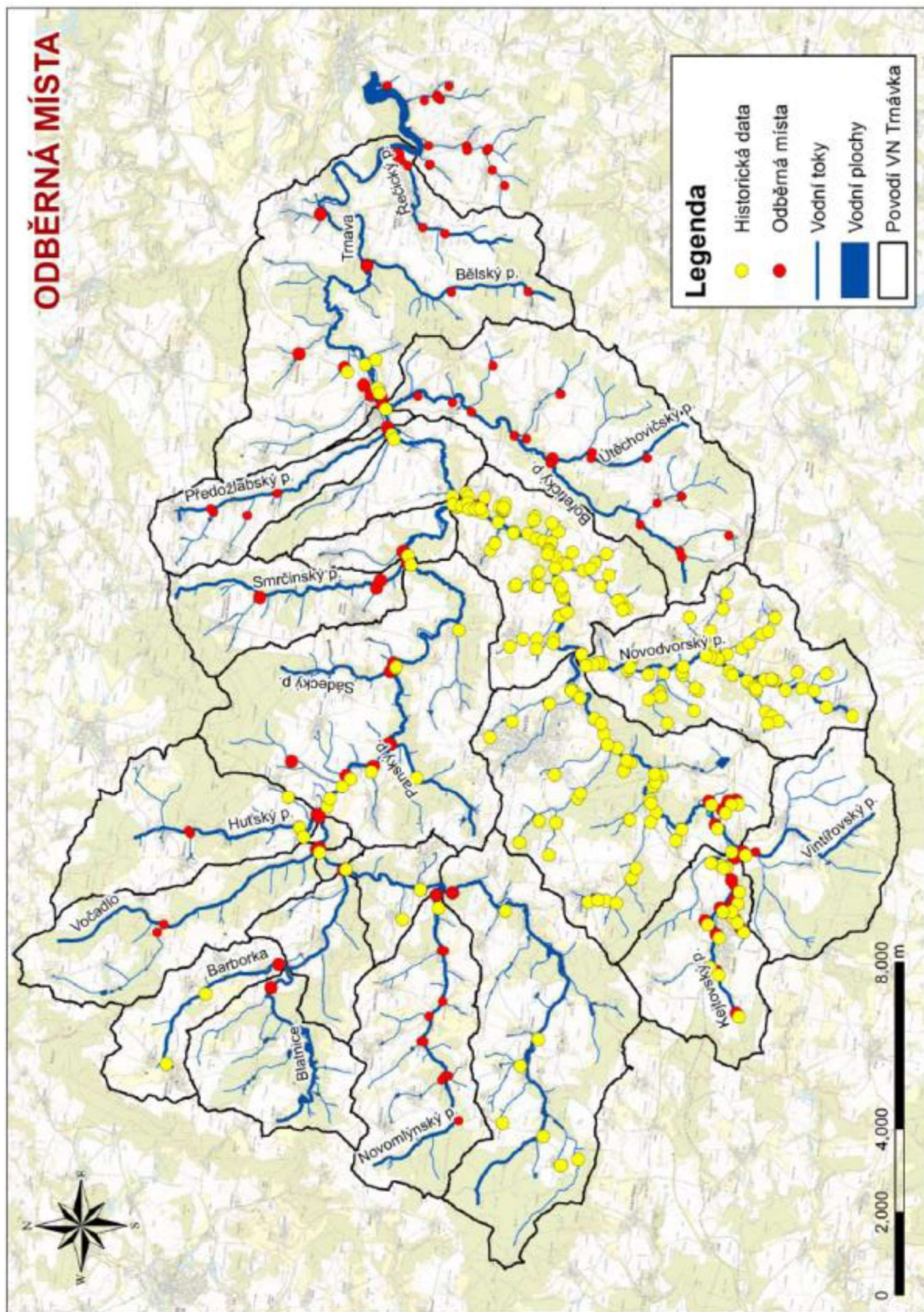
Na vybraných měrných profilech je třeba provést odběry vzorků povrchových vod a zjistit aktuální průtok vody pro zjištění množství vnášeného znečištění. V odůvodněných případech se odebírají i vzorky pevné (sedimenty, usazeniny, splaveniny) pro stanovení vázaného fosforu.

Cílem vytvořené metodiky bylo stanovit jednotný postup pro odebírání vzorků vody nebo za účelem určení bodových zdrojů znečištění v povodí řeky Trnavy. (viz. Výzkumná zpráva: Povodí vodní nádrže Trnávka – bodové a plošné zdroje znečištění TA04021421-2015V002)

Výsledky těchto odběrů jsou stěžejními informacemi pro model SWAT, který modeluje a vytvoří vizualizaci nejen aktuálního zatížení bodovým znečištěním, ale také poskytne výhled do budoucnosti, jak se podmínky v povodí řeky budou měnit, v případě realizace doporučených opatření. Celkem bylo tímto způsobem změřeno a zaznamenáno 362 vzorků v povodí VN Trnávka (obr. 24).



Obrázek 23 Monitorovací síť (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 24 Odběrná místa (Gregar a kol., 2015)

3.1.4. Kalibrace a validace modelu SWAT

Rozdíly mezi pozorovaným a simulovaným odtokem určují úspěšnost kalibrace srážko-odtokových modelů. V kontextu modelu SWAT je simulovaným odtokem výstup z modelu v určitém časovém kroku. Pozorovaný odtok je měřen na uzávěrovém profilu simulovaného povodí. Pokud jsou rozdíly mezi pozorovanými a simulovanými odtoky relativně malé, je model platný a všechny sub-modulové (CN-křivky, zdržení podzemní vody, atd...) výstupy modelu SWAT jsou realistické a použitelné v praxi. (Arnold, 2012)

Existují různé metody validace modelu, nicméně hlavní je využití statistických metod. Pokud není možné statistické metody vyhodnotit, je třeba použít grafické znázornění, které je však velice subjektivní a může se stát, že subjektivní shoda může být čistě náhodná.

Pro kalibraci modelu SWAT se dají použít různé statistické metody.

mult

$$g = \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{n_Q} * \frac{\sum_i (S_m - S_s)_i^2}{n_S} * \frac{\sum_i (N_m - N_s)_i^2}{n_N} * \dots \quad (4)$$

Tohle je multiplikativní forma kvadratické chyby, kde Q, S a N znamenají proměnné (např. výboj, sediment a dusičnan), n je počet pozorování a m a s jsou měřená a simulovaná data. (Abbaspour, 2015)

R² – regresní analýza

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (5)$$

Koeficient determinace R² kde Q je proměnná, m a s je měřená nebo simulovaná hodnota. (Abbaspour, 2015)

NS – Nash - Sutcliffe

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (6)$$

Nash – Sutcliffe (1970) je hodnota, kde Q je proměnná, m a s jsou měřená a simulovaná hodnota. (Abbaspour, 2015)

PBIAS – Percent Bias

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}} \quad (7)$$

Q je proměnná, m a s jsou měřená a simulovaná data. Je zde sledována tendence simulovaných dat a jejich odchylka od pozorovaných hodnot. Optimální hodnota je nula, kde čím menší výsledky, tím lepší výsledek. (Abbaspour, 2015)

KGE Kling – Gupta Efficiency

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (8)$$

(Gupta a spol, 2009)

Kalibrace modelu SWAT v povodí VN Trnávka

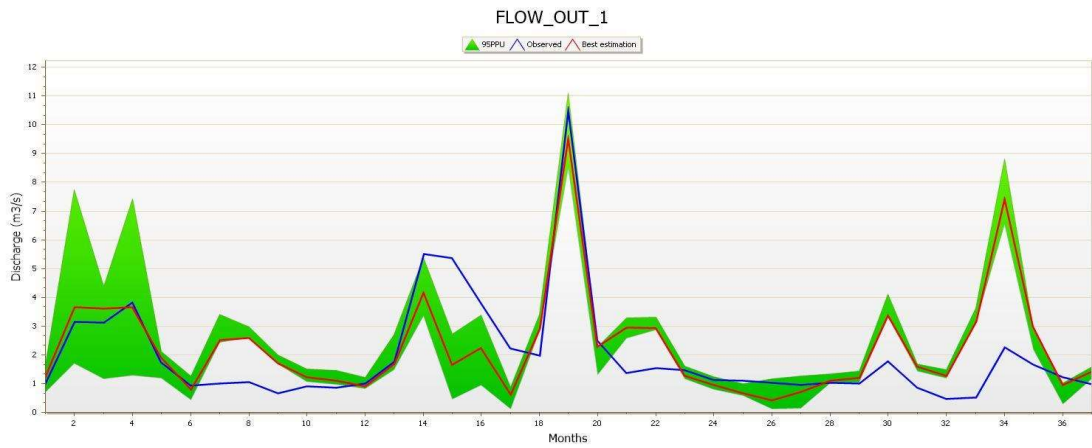
Celá plocha povodí byla rozdělena na 34 subpovodí pomocí programu Q-GIS (open source). Následně byla tato subpovodí rozdělena na 1002 HRU (Hydrological response unit), což je kombinace land use, typu půdy a sklonitosti. To slouží jako základní stavební kámen modelu SWAT, kdy na základě HRU je počítána nejen hydrologická bilance, ale i bilance dalších látek v povodí. Bylo použito sedm typů půd, sedm typů land-use a čtyři sklonitostní stupně viz tabulka 1.

Land use	Soil	Slope
RNGB	Eutric Cambisol	0-3.0
PAST	Gleyic Fluvisol	3.0-7.0
URLD	Dystric Cambisol	7.0-10.0
AGRL	Stagno-gleyic Cambisol	10.0-max
FRSE	Dystric Planosol	
FRST	Eutric Gleysol	
UIDU	Histo-humic Gleysol	

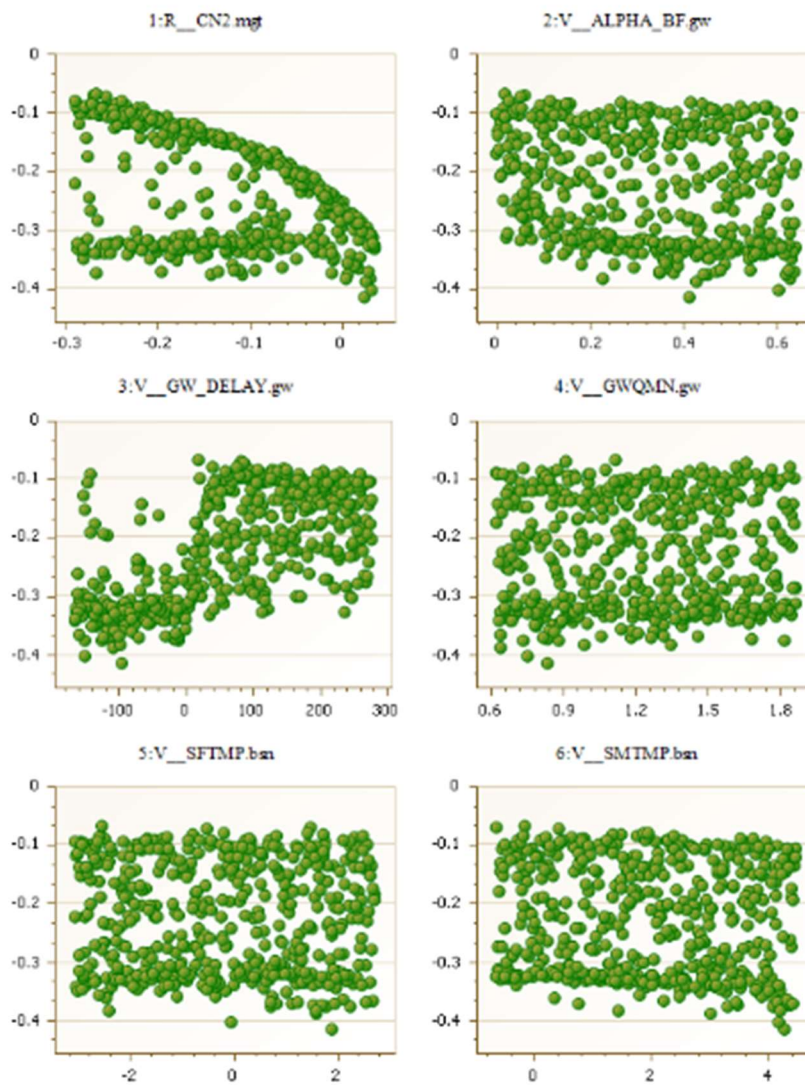
Tabulka 1 Rozdělení povodí dle jednotlivých kategorií (Gregar a kol., 2015)

Kalibrace a validace modelu byla provedena za použití měsíčních měřených dat v rozmezí let 2007 – 2014, kdy roky 2011-2014 byly použity pro kalibraci a roky 2007-2010 pro validaci. Citlivost jednotlivých parametrů byla zjištěna pomocí metody SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting version2). Výpočtem bylo zjištěno, že nejvyšší citlivost na změnu parametrů má hodnota zdržení vody v půdě a to i díky využití možnosti zapojení melioračního systému do modelu. Pomocí programu SWAT-CUP, byl model kalibrován s $KGE = 0.69$, $R^2 = 0.53$ a $NS = 0.44$, což dle dostupné literatury je uspokojivý výsledek a tedy akceptovatelný jako dostatečný (obr. 25 a 26).

Základní model byl doplněn zadáním meliorací, čímž se výrazně zlepšila hydrologická bilance. Měsíční měřená data vycházejí z jednoho měsíčního měření, a tudíž neobsahují hydrologické extrémny, které mají velký vliv na hydrologickou bilanci. S použitím denních dat a následným přepočtem na měsíční průměr, by bylo dosaženo lepších výsledků u kalibrace. Po kalibraci modelu byly zkoumány jednotlivé navržené scénáře, které byly postaveny na základním kalibrovaném modelu.



Obrázek 25 Kalibrace modelu SWAT - porovnání měřených a simulovaných dat (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 26 Detailní rozdělení parametrů při kalibraci (Gregar a kol., 2015)

Jednotlivé scénáře

Pro návrh komplexního managementu povodí VN Trnávka byly na základě kalibrovaného hydrologického modelu (obrázek 25) definovány čtyři scénáře. Kromě základního scénáře (reálný stav) který byl ověřen na měřených datech (měření prováděné PVL, s.p. na nátoku do nádrže Trnávka), byl simulován vliv použití nejlepších dostupných technologií čištění odpadních vod, redukce množství hnojiv použitých v rámci pěstebního cyklu a scénář zalesnění veškerých zemědělsky obhospodařovaných ploch (s výjimkou pastvin). Návrh komplexního managementu využívá tyto jednotlivé scénáře:

Základní scénář – reálný stav

Základní scénář bilance dusíku a fosforu odráží reálné poměry v povodí VN Trnávka. Při jeho sestavení byly použity vstupy odrážející skutečné poměry v povodí a to nejen z pohledu bodových zdrojů, ale i zemědělských a neidentifikovaných difúzních (viz kap. Zdroje). Na tyto hodnoty byl model kalibrován podle měřených koncentrací N a P prováděných podnikem Povodí Vltavy na nátoku na VN Trnávka a údaje byly verifikovány podle naměřených koncentrací z vlastní monitorovací sítě pro jednotlivá subpovodí (viz kap. Monitorovací síť). Vlastní bilance P a N vykazuje hodnoty odpovídající předpokladům při tomto způsobu managementu (Hanák, 2015). (obr 27)

Scénář 1

Scénář vychází z reálného stavu, kdy pro bodové a difúzní zdroje znečištění byly použity hodnoty vycházející z použití nejlepších dostupných technologií. Tyto hodnoty byly ověřeny v jiné fázi projektu na ČOV Pacov v průběhu testování poloprovozní jednotky na dosrážení fosforu na odtoku z ČOV prováděných VŠCHT a spol. Kunst. Tyto hodnoty byly transponovány na bodové a difúzní neidentifikované zdroje podle přepočtu na EO v jednotlivých sídlech. Simulace modeluje využití nejlepších možných technologií určených k čištění odpadních vod ve všech obcích v povodí VD Trnávka, tedy i tam, kde ještě žádná ČOV není. (obr 28.)

Scénář 2

Dalším simulovaným krokem byla redukce množství aplikovaných hnojiv v zemědělsky využívané části povodí VD Trnávka. Tento model vychází ze scénáře 1, kdy množství aplikovaných hnojiv bylo sníženo o 50%. (obr 29)

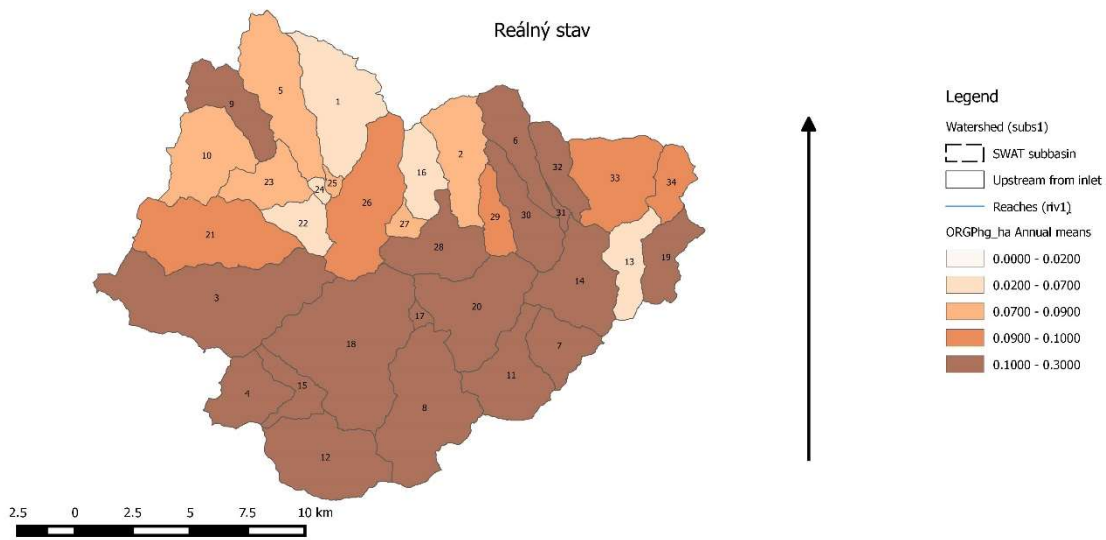
Komplexní management

Komplexní management vychází ze scénáře 1 a 2, kdy navíc v údolních nivách bylo formou změny landuse simulováno zavedení mokřadů s cílem redukovat odnos živin do toku (Duras, 2016). (obr 30)

Scénář VIZE

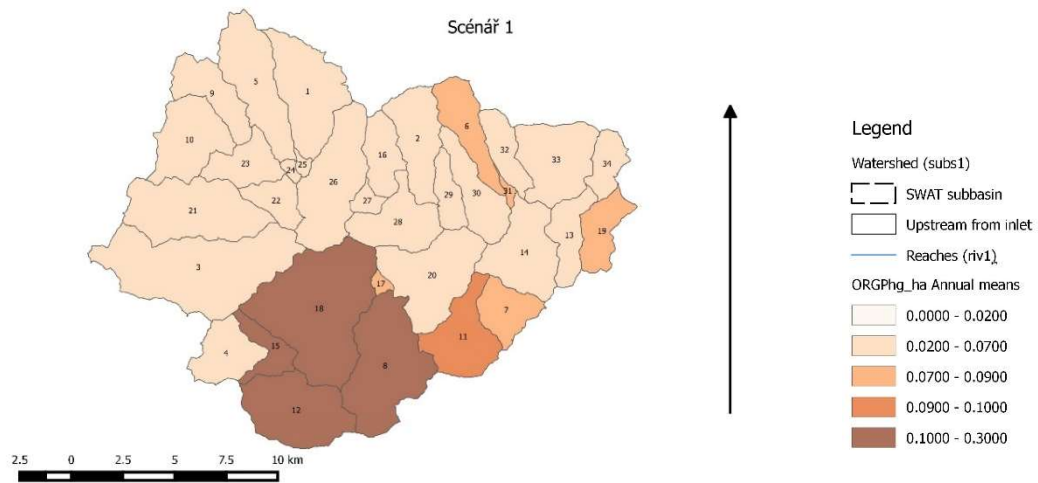
Podle příkladu managementu vodárenských povodí města Vídně, kdy celá vodárenská povodí byla na konci předminulého století zalesněna a tyto vodní zdroje vykazují dlouhodobou vynikající kvalitu vody, byla provedena simulace zalesnění celého rozsahu zemědělské půdy v povodí VD Trnávka. Byly zachovány bodové zdroje podle scénáře 1 (nejlepší možné technologie).

Reálny stav



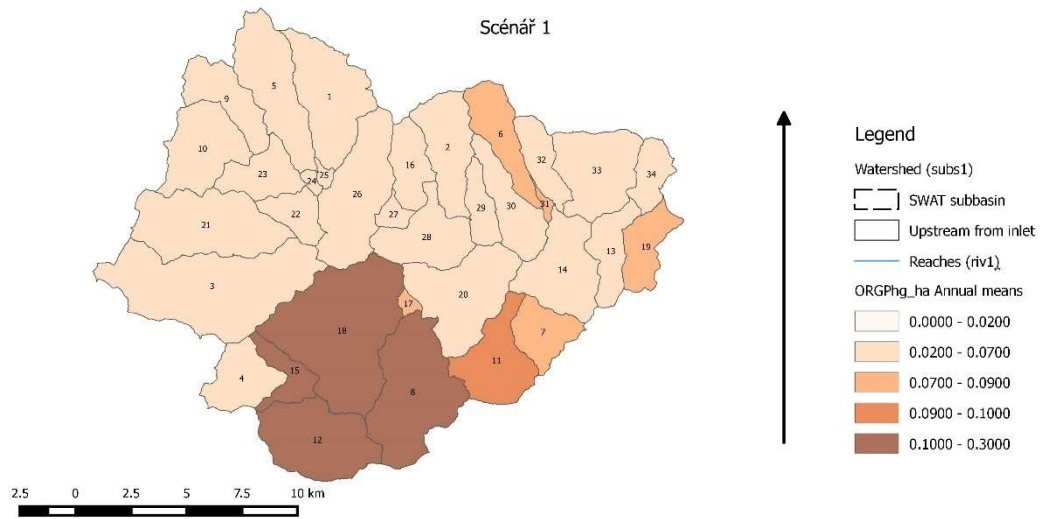
Subbasin	AREAk ²	ORGPhg _{ha}	SOLPkg _{ha}	SEDPkg _{ha}
1	14	0.063875	0.002625	0.043375
2	10	0.08675	0.003875	0.064125
3	28	0.105625	0.004375	0.0705
4	8	0.127375	0.006	0.088
5	14	0.07975	0.003375	0.0555
6	8	0.1335	0.005875	0.097875
7	6	0.14775	0.007125	0.1015
8	19	0.192875	0.007375	0.127625
9	8	0.116375	0.005	0.079125
10	11	0.079875	0.003625	0.05525
11	11	0.20625	0.010125	0.145875
12	15	0.178875	0.010375	0.110125
13	6	0.056375	0.002375	0.039875
14	12	0.1165	0.00525	0.084
15	4	0.177875	0.009625	0.114125
16	6	0.0665	0.002375	0.049875
17	1	0.135375	0.0065	0.102
18	28	0.17975	0.012	0.10975
19	6	0.133625	0.006625	0.095125
20	16	0.121125	0.005	0.09075
21	17	0.097375	0.003625	0.070375
22	4	0.058625	0.00225	0.04425
23	6	0.0715	0.00275	0.05
24	1	0.05425	0.00275	0.03475
25	1	0.080125	0.00325	0.054
26	16	0.09975	0.00475	0.07225
27	2	0.086375	0.0045	0.060125
28	10	0.102875	0.00475	0.075
29	4	0.091625	0.004875	0.06575
30	8	0.12975	0.006	0.095625
31	1	0.107875	0.010125	0.071875
32	5	0.131	0.00725	0.096

Scénář 1



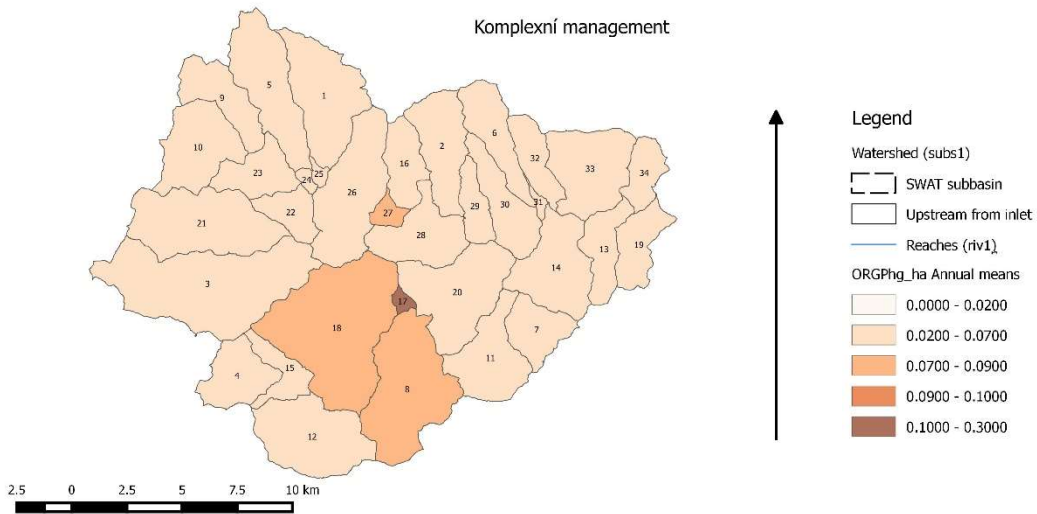
Subbasin	AREAk2	ORGPhg_ha	SOLPkg_ha	SEDPkg_ha
1	14	0.03375	0.001125	0.025125
2	10	0.0505	0.001625	0.04125
3	28	0.054375	0.002125	0.03875
4	8	0.067	0.003	0.05025
5	14	0.043125	0.001875	0.0335
6	8	0.073875	0.00225	0.06
7	6	0.074375	0.0035	0.055625
8	19	0.119	0.004375	0.080375
9	8	0.064125	0.0025	0.047125
10	11	0.042375	0.001625	0.031875
11	11	0.09675	0.005125	0.076125
12	15	0.10475	0.007375	0.06425
13	6	0.031125	0.001375	0.023125
14	12	0.062625	0.0025	0.0495
15	4	0.1095	0.006625	0.071625
16	6	0.04	0.001375	0.033625
17	1	0.081	0.00275	0.06725
18	28	0.1105	0.009375	0.06675
19	6	0.0705	0.003375	0.05525
20	16	0.06725	0.00225	0.05675
21	17	0.05825	0.001625	0.04575
22	4	0.03775	0.001125	0.0315
23	6	0.04325	0.001375	0.03225
24	1	0.03425	0.0015	0.02325
25	1	0.052125	0.001625	0.036875
26	16	0.055	0.002375	0.0435
27	2	0.051	0.002	0.03875
28	10	0.058375	0.00225	0.0475
29	4	0.048125	0.00225	0.03875
30	8	0.069	0.002625	0.057625
31	1	0.077875	0.0075	0.052375
32	5	0.067	0.00375	0.054875
33	13	0.055	0.002	0.04675
34	4	0.054375	0.002125	0.04575

Scénář 2



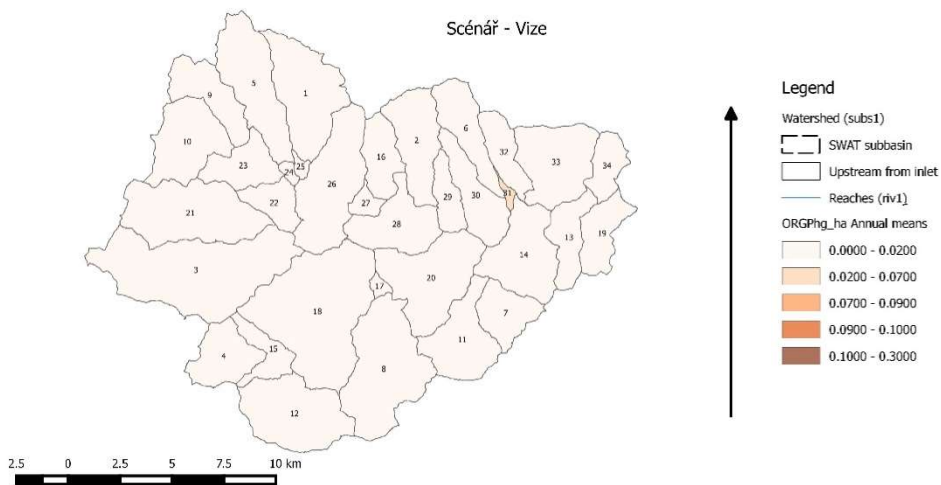
Subbasin	AREAckm2	ORGPhg_ha	SOLPkg_ha	SEDPkg_ha
1	14	0.020625	0.000625	0.017875
2	10	0.034625	0.000625	0.031125
3	28	0.0295	0.0005	0.02375
4	8	0.03925	0.001125	0.033625
5	14	0.0265	0.000625	0.0235
6	8	0.048125	0.001	0.04375
7	6	0.041875	0.0015	0.035375
8	19	0.071375	0.001875	0.0545
9	8	0.039625	0.001	0.033625
10	11	0.02375	0.0005	0.021
11	11	0.051875	0.001625	0.048375
12	15	0.0565	0.005375	0.037
13	6	0.019375	0.000625	0.016625
14	12	0.039625	0.000875	0.0355
15	4	0.049	0.002	0.03825
16	6	0.028625	0.0005	0.026375
17	1	0.056625	0.001	0.052875
18	28	0.063375	0.00675	0.04075
19	6	0.042125	0.001625	0.03825
20	16	0.041875	0.000875	0.041125
21	17	0.037	0.0005	0.0335
22	4	0.028	0.00025	0.025125
23	6	0.028	0.000375	0.02325
24	1	0.020625	0.000375	0.014375
25	1	0.037375	0.000625	0.0285
26	16	0.033375	0.00075	0.03025
27	2	0.03475	0.000625	0.0285
28	10	0.036875	0.000625	0.03375
29	4	0.02925	0.001	0.026625
30	8	0.041125	0.001	0.040625
31	1	0.061	0.00575	0.042875
32	5	0.0415	0.00175	0.039125
33	13	0.034125	0.0005	0.0335
34	4	0.036125	0.000875	0.034375

Scénář Komplexní

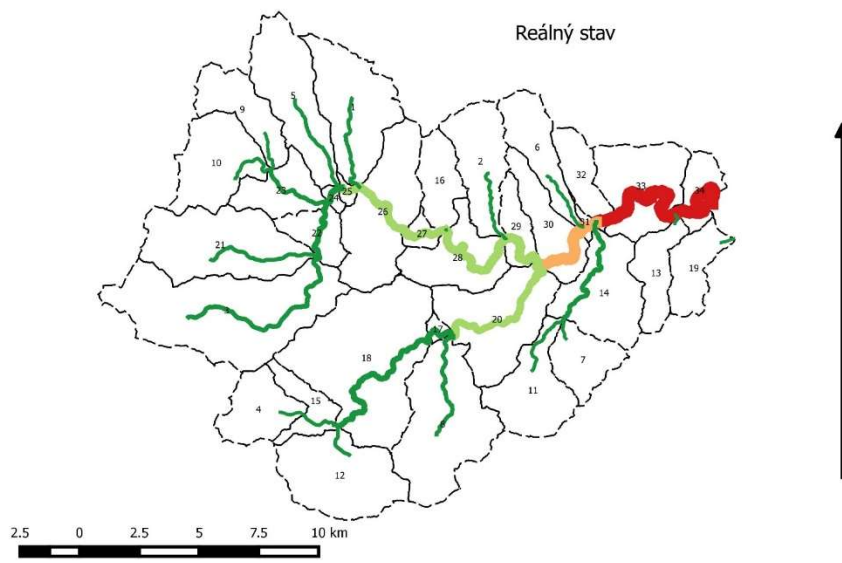


Subbasin	AREAk ²	ORGPhg_ha	SOLPkg_ha	SEDPkg_ha
1	14	0.0315	0.0015	0.04725
2	10	0.05625	0.00225	0.0775
3	28	0.044125	0.002625	0.059375
4	8	0.04325	0.00275	0.046375
5	14	0.042125	0.002	0.066
6	8	0.06875	0.0025	0.08625
7	6	0.062	0.00475	0.081
8	19	0.0805	0.003625	0.083375
9	8	0.044	0.00275	0.055125
10	11	0.036375	0.002125	0.051875
11	11	0.059375	0.004	0.067125
12	15	0.060125	0.00725	0.049625
13	6	0.0385	0.001	0.051
14	12	0.056875	0.002625	0.072875
15	4	0.051375	0.005	0.051875
16	6	0.040125	0.001125	0.04725
17	1	0.104125	0.0045	0.10825
18	28	0.07475	0.008	0.07375
19	6	0.049125	0.002375	0.053
20	16	0.05975	0.00225	0.069875
21	17	0.049375	0.00225	0.06975
22	4	0.042375	0.000875	0.05775
23	6	0.0465	0.002	0.069625
24	1	0.053875	0.0015	0.088
25	1	0.060625	0.00325	0.092125
26	16	0.05125	0.003	0.06375
27	2	0.071875	0.0025	0.09775
28	10	0.054875	0.00225	0.0685
29	4	0.04025	0.002	0.047
30	8	0.0525	0.003	0.06625
31	1	0.058125	0.0075	0.076
32	5	0.052375	0.00475	0.072375
33	13	0.04525	0.001875	0.058125
34	4	0.04975	0.00175	0.065

Scénář VIZE

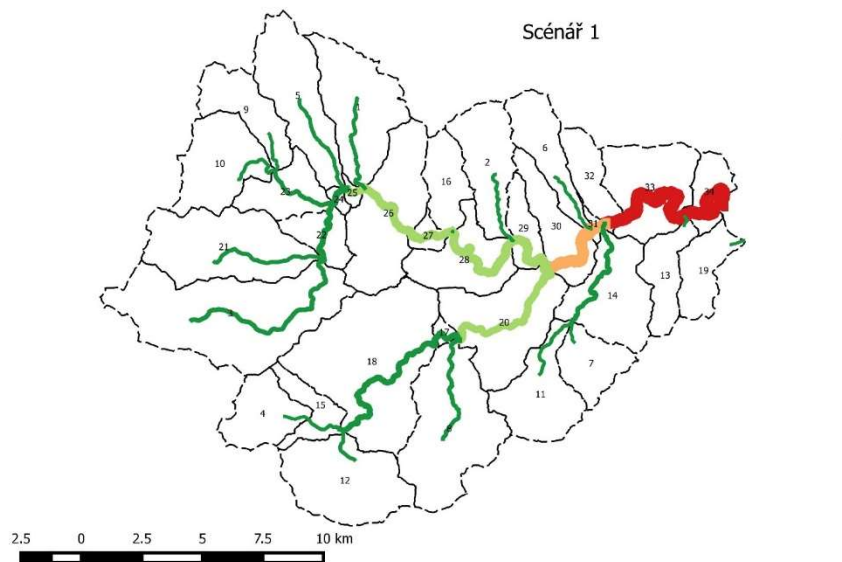


Subbasi	AREAk	ORGPh	SOLPkg	SEDPkg
1	14	0.01887	0.00125	0.03662
2	10	0.03912	0.00125	0.05962
3	28	0.02662	0.002	0.04537
4	8	0.01712	0.00175	0.02162
5	14	0.02875	0.0015	0.05337
6	8	0.03812	0.00087	0.06025
7	6	0.03662	0.00325	0.064
8	19	0.02925	0.00262	0.04287
9	8	0.0285	0.0025	0.03912
10	11	0.0205	0.002	0.03737
11	11	0.017	0.00237	0.03262
12	15	0.02912	0.00462	0.02112
13	6	0.025	0.00062	0.03825
14	12	0.02937	0.00187	0.05012
15	4	0.01837	0.00225	0.02437
16	6	0.0155	0.00137	0.02612
17	1	0.09037	0.00387	0.09512
18	28	0.04162	0.006	0.04675
19	6	0.0115	0.00175	0.01975
20	16	0.02275	0.00087	0.03187
21	17	0.03012	0.00162	0.051
22	4	0.02262	0.00062	0.03875
23	6	0.0305	0.00162	0.058
24	1	0.04275	0.00112	0.079
25	1	0.04562	0.0025	0.08425
26	16	0.03012	0.00175	0.0435
27	2	0.05012	0.00162	0.08487
28	10	0.02712	0.00137	0.0465
29	4	0.01787	0.00125	0.02712
30	8	0.0265	0.00187	0.04237
31	1	0.0445	0.00725	0.06287
32	5	0.0275	0.00325	0.04637
33	13	0.01687	0.00087	0.02962
34	4	0.02312	0.001	0.03887

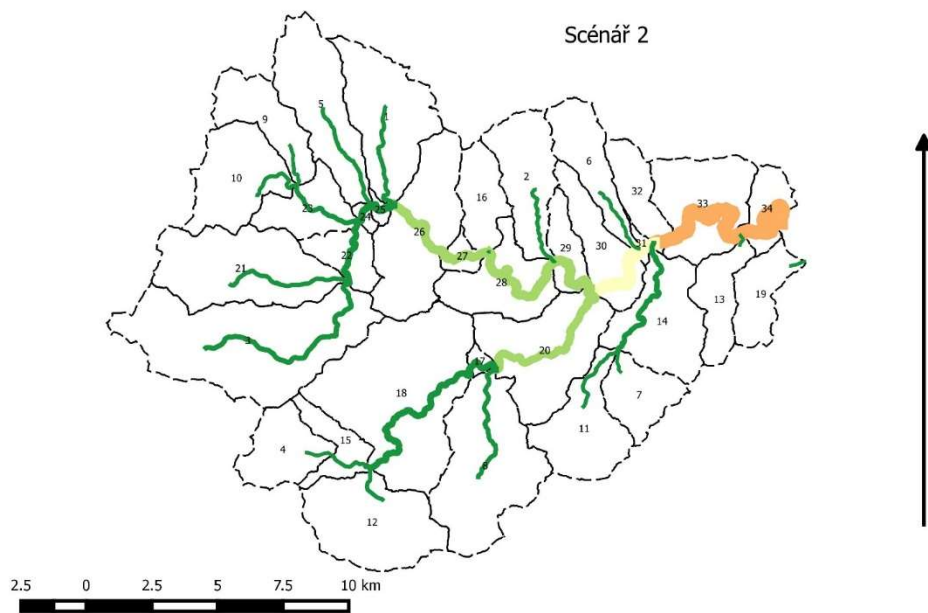


Obrázek 27 Průměrné roční hodnoty celkového dusíku v tocích (Gregar a kol., 2015)

Legenda
 Subpovodí
 □ SWAT subpovodí
 Celkový Dusík kg roční průměrné hodnoty
 — 0 - 100000
 — 100000 - 200000
 — 200000 - 300000
 — 300000 - 400000
 — 400000 - 500000

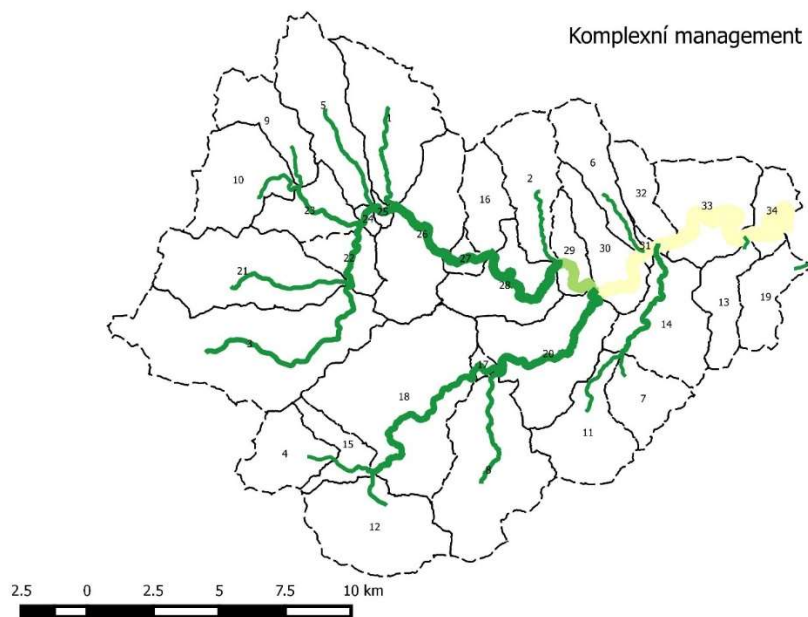


Obrázek 28 Průměrné roční hodnoty celkového dusíku v tocích (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 29 Průměrné roční hodnoty celkového dusíku v tocích (Gregar a kol., 2015)

- Legenda
- Subpovodí
- SWAT subpovodí
- Celkový Dusík kg roční průměrné hodnoty
- 0 - 100000
 - 100000 - 200000
 - 200000 - 300000
 - 300000 - 400000
 - 400000 - 500000



Obrázek 30 Průměrné roční hodnoty celkového dusíku v tocích (Gregar a kol., 2015)

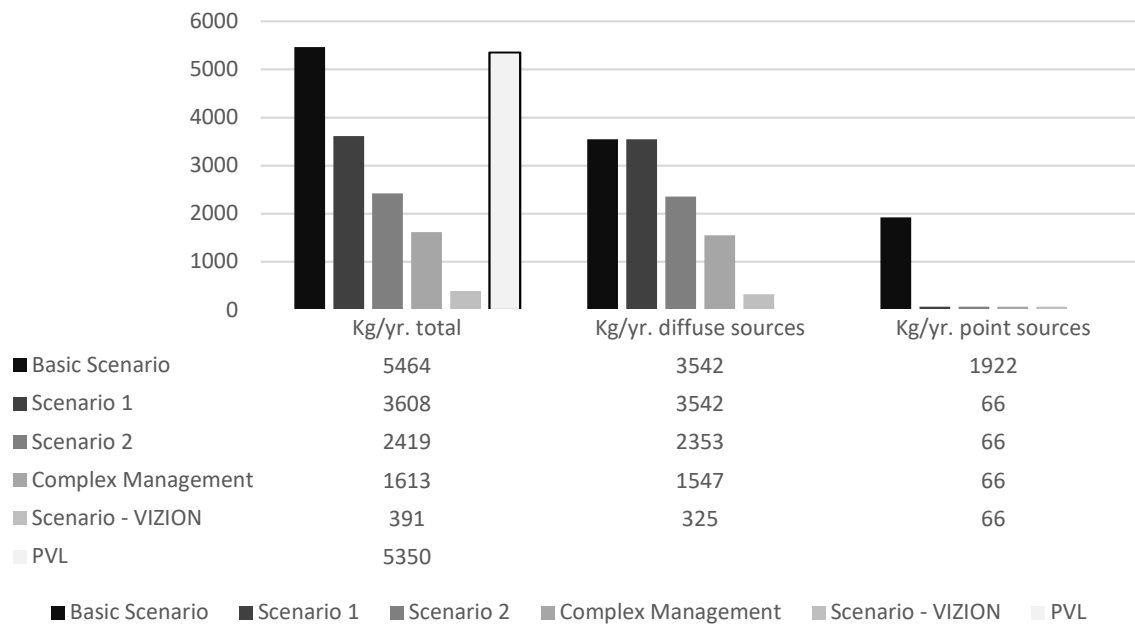
3.1.5. Diskuse

Výstupy jednotlivých scénářů jsou shrnuty v tabulce 2 a 3. Pro srovnání jsou zde uvedena i data vycházející z hodnot přímo měřených PVL, s. p. Při zajištění čištění odpadních vod nejlepšími dostupnými technologiemi včetně dosrážení fosforu na odtoku a to i pro sídla, které dosud nedisponují účinným způsobem odstranění fosforu (Scénář 1) dochází k dramatickému snížení koncentrace fosforu a tedy i celkového ročního množství z tohoto zdroje. Podle tohoto scénáře dochází ke snížení koncentrace fosforu na nátok do VN Trnávka z 0,0877 mg/l na 0,0579 mg/l. Při současném snížení množství hnojiv aplikovaných na zemědělsky obhospodařovaných pozemcích (Scénář2) dochází k dalšímu významnému poklesu celkových ročních vstupů, což se projevuje snížením koncentrace celkového fosforu na nátok na 0,0388 mg/l. Zalesněním zemědělsky obhospodařovaných pozemků (Scénář VIZE) dochází k dalšímu, výraznému poklesu odtoku fosforu až na 0,00628 mg/l. Tento scénář, přináší dramatický pokles koncentrace fosforu, z podstaty věci je dlouhodobě nejstabilnější a současně eliminuje i některé další negativní vlivy - pesticidní látky, eroze, atp. Návrh komplexního managementu používá scénáře 1 a 2 se současným vybudováním mokřadů v údolních nivách vodních toků. Mokřady byly zvoleny jako stabilizační prvek krajiny, který současně snižuje množství živin transportovaných sedimentem. Výsledné celkové množství fosforu je 1613 kg/rok, tj. 0,0259 mg/l na nátok, což představuje vzhledem k charakteru VN Trnávka koncentraci zaručující s vysokou pravděpodobností eliminaci rizika eutrofizace.

Fosfor celkový	Základní scénář	Scénář 1	Scénář 2	Komplexní management	Scénář - VIZE	PVL
Kg/rok celkem	5464	3608	2419	1613	391	5350
Ø konc.mg/l celkem	0.08771	0.05792	0.03883	0.02589	0.00628	0.08782
Kg/rok plošné zdroje	3542	3542	2353	1547	325	
Kg/rok bodové zdroje	1922	66	66	66	66	

Tabulka 2 Koncentrace fosforu v uzávěrovém profilu povodí VD Trnávka (Gregar a kol., 2015)

Jednotlivé scénáře - koncentrace fosforu



Tabulka 3 Zhodnocení scénářů z pohledu fosforu (Gregar a kol., 2015)

3.1.6. Závěr – realizovatelnost scénářů

V rámci řešení projektu byla provedena celá řada dílčích simulací k určení hlavních postupů, na které by se mělo soustředit úsilí při zavádění managementu povodí vedoucího ke snížení obsahu fosforu ve vodních tocích a nádržích. Po vyhodnocení těchto výstupů byl zvolen pro návrh komplexního managementu scénář vycházející z reálných možností jeho implementace. Další látky antropogenního původu vstupující do vodních toků (tedy i nádrží) jako např. pesticidy, farmaka atp. představují do budoucna mnohonásobně větší problém, než prostá eutrofizace. Aby management povodí mohl být nazýván komplexní, musí zahrnovat i tyto dnes již známé negativní jevy. Přístup postupné eliminace známých příčin zhoršování kvality vody, včetně eutrofizace, by měl mít prioritu a dostat přednost, či alespoň stejnou váhu, před opatřeními vedoucími k odstraňování následků přímo na úpravkách vody.

Spuštění modelu SWAT vyvolalo další otázky týkající se kvality vstupních dat. Můžeme usoudit, že nízká kvalita vstupních dat může mít za následek sníženou možnost správného kalibrace modelu a dosažení vysoce kvalitních výsledků (Malago,

2015). Náklady na jeho realizaci (investice, lidské zdroje, organizační, provozní atd.) nebyly vypočteny vzhledem k tomu, že problematika fosforu jako hlavního faktoru eutrofizace není jediným problémem v povodí nádrže. Zalesňování zemědělské půdy by nemělo smysl pro zemědělce, ale je to skvělý způsob, jak snížit obsah živin, a to i při částečném zalesňování. Výsledky této studie řešící problematiku eutrofizace by měly být součástí návrhu komplexního řízení povodí vodní nádrže Švihov.

Scénář 1

Tento scénář je pro neidentifikované difúzní zdroje realizovatelný za podmínky uplatnění kontrolních mechanismů ze strany státu a striktního zamezení nelegálního vypouštění odpadních vod do vodních nádrží a toků. Pro realizaci tohoto scénáře by mě být vytvořen program “nulové tolerance”, který by měl být ze strany státu nekompromisně aplikován.

Pro bodové zdroje (ČOV) musí stát přistoupit k revizi regulačních předpisů (norem) pro vypouštění vod z ČOV do toků ve vodárensky využívaných povodích - tzn. Nařídit a současně vytvořit finanční nástroje k aplikaci BAT (Best Available Technology). Pro financování provozních nákladů je možné vytvořit mechanismus využití části poplatku za odebíranou pitnou vodu od uživatelů vzhledem k zvýšení její kvality před úpravou a tedy i ke snížení nákladů na její úpravu.

Scénář 2

Navazuje na scénář 1 a je možné ho realizovat současně. Pro realizaci tohoto scénáře je nezbytné vytvořit finanční mechanismus náhrad pro zemědělské hospodařící subjekty pokrývající výnos ze ztráty produkce a při aplikaci omezeného množství hnojiva. Stejný mechanismus by byl využitelný i pro jiné zdroje znečištění ze zemědělství (pesticidy, insekticidy, herbicidy, atd.). Financování těchto opatření může být vícezdrojové (stát, vodárenské společnosti ceny produktů - v případě ekologického zemědělství).

Scénář komplexní management

Tento scénář kombinuje opatření scénáře 1 a 2. Pro snížení odtoku P jsou realizovány v údolních nivách mokřady. Tyto slouží jako stabilizační prvek managementu a současně i jako adaptační opatření ke změně klimatu (zmírnění povodňových vln, zvýšení základního odtoku v období sucha, zvýšení biodiverzity, zvýšení evapotranspirace a tedy i změny mikroklimatických poměrů krajiny).

3.2. Povodí Kejtovského potoka

Ověření změny koncentrací N a P z plošného znečištění při různých způsobech hospodaření v povodí

První čistírna odpadních vod pro město Pacov byla naprojektována v roce 1965 a následně byla stavba i realizována. S rostoucími požadavky na kvalitu vyčištěné vody, především z hlediska odstraňování nutrientů, se původní technologie ukázala jako nedostačující a proto byla v letech 1992 – 1994 ČOV modernizována na systém R-D-N s interní recirkulací a chemickým srážením fosforu. Při návrhu modernizace ovšem nebyla vzata v potaz některá místní specifika, především po větší část roku velmi nízká teplota přitékající odpadní vody, která negativně ovlivňuje proces nitrifikace. Problematické bylo i řešení kalového hospodářství, především nedostatečná kapacita zařízení pro odvodnění kalu, díky čemuž se kalhromadil v dosazovacích nádržích a zhoršoval kvalitu vyčištěné vody ve všech parametrech. V kombinaci s končící životností strojních částí mechanického předčištění a zařízení pro odstraňování fosforu bylo po roce 2000 již dosahováno nadlimitních odtokových koncentrací dusíkatého a fosforového znečištění pro zvláště citlivý recipient – Kejtovský potok, který je jedním z důležitých zdrojů vody pro vodní nádrž Švihov. V roce 2005 byla proto zpracována projektová dokumentace pro intenzifikaci ČOV Pacov. Průměrné odtokové koncentrace obou nutričních prvků z období před intenzifikací ČOV jsou shrnuty v tabulce 6. (Gregar a kol., 2015). Pro spuštění modelu byla použita stejná metodika, jako v prním příkladu.

Syntéza vrstev GIS

Jedním ze zdrojů byl HEIS-VUV, který posloužil jako zdroj informací o tocích. Dalším zdrojem byl výstup modelu SWAT – rozdělení povodí na jednotlivá subpovodí. Dále byly dle souřadnic vloženy body zobrazující polohu čistíren odpadních vod (ČOV). Jako podkladová mapa byla použita prohlížečská služba WMS – ZM 25, Základní mapa v měřítku 1:25 000, poskytovaná Českým ústavem

Legenda

Pro potřeby projektu byla pro celkový fosfor rozdělena škála do 5 skupin kvality vody (tabulka 4). Maximální přípustnou koncentrací je 0,15 (eutrofizační limit). Tato koncentrace současně slouží jako návrhový parametr TMDL (Total Maximal Daily load) pro celkový fosfor.

Tabulka 4 Stupnice tříd jakosti

Skupina	MIN	MAX
1	0	0,02
2	0,02	0,05
3	0,05	0,1
4	0,1	0,15
5	0,15	max

Stupnice používá detailnější členění oproti: **Třídy jakosti vody a jejich mezní hodnoty-výpis z ČSN75 7221, Klasifikace jakosti povrchových vod**

celkový fosfor / <i>total phosphorus</i>	mg.l ⁻¹	< 0,05	< 0,15	< 0,4	< 1	1
--	--------------------	--------	--------	-------	-----	---

Pro potřeby podrobnější analýzy vlivu rekonstrukce ČOV Pacov na kvalitu vody v Kejtovském potoce byla zvolena podrobnější stupnice kvality vody v toku (pro parametry N celk. a N-NH₄), která neodpovídá hodnotám uvedeným v ČSN 75 7221 Klasifikace jakosti povrchových vod (obdobně jako pro P celk.). Toto členění umožňuje lepší vizualizaci výsledků. Hodnoty pro jednotlivé třídy kvality jsou uvedeny v tabulce 5 (Gregar a kol, 2015).

2014	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	průměr
Peek PVL	0.068	0.058	0.061	0.13	0.15	0.19	0.16	0.15	0.3	0.15	0.092	0.072	0.132
N celk. PVL	7.9	8	7.3	7.1	6.5	5.9	5.9	5.1	5.4	6.8	9.4	8.1	6.950

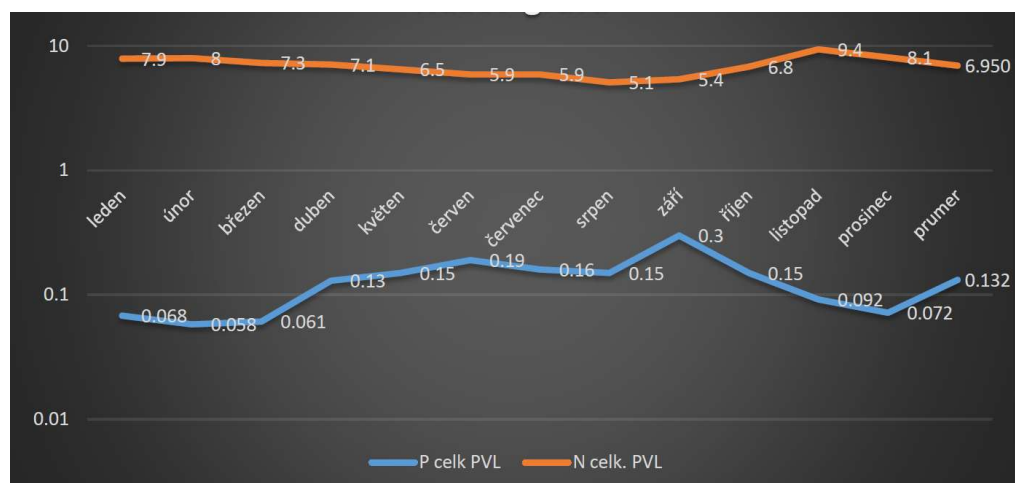
Peek mg/l Třída

0	0.02	1
0.02	0.05	2
0.05	0.1	3
0.1	0.15	4
0.15	max.	5

Ncelk mg/l Třída

0	3	1
3	6	2
6	10	3
10	13	4
13	max.	5

Tabulka 5 třídy kvality vody v průběhu roku (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 31 Průběh koncentrací P a N v průběhu roku (Gregar a kol., 2015)

čsn 75 7221														
Samšín		leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	prumer
2009	Pcelk PVL	0.059	0.077	0.14	0.058	0.059	0.26	0.069	0.11	0.1	0.079	0.055	0.056	0.094
	N celk. PVL	10	7.5	11	13	8.2	6.9	7.9	6.2	5.7	5.6	8	8.5	8.208
	N - NH4+ PVL	7.5	6.1	11.0	11.0	7.5	5.2	7.0	5.9	5.2	4.7	6.3	7.2	7.054
2010	Pcelk PVL	0.047	0.04	0.074	0.078	0.144	0.2755	0.109	0.25	0.087	0.109	0.18	0.18	0.131
	N celk. PVL	10	9.1	15	13	8.2	9.6	5.4	11	11	10	9.5	8.9	10.058
	N - NH4+ PVL	0.46	0.57	0.21	0.15	0.21	0.04	0.04	0.44	0.04	0.32	0.23	0.25	0.246
2011	Pcelk PVL	0.25	0.097	0.067	0.1	0.15	0.18	0.13	0.19	0.14	0.073	0.067	0.048	0.124
	N celk. PVL	11	11	12	10	7.1	7.2	5.8	7.7	7.5	5.7	7.5	6.3	8.233
	N - NH4+ PVL	0.40	0.20	0.19	0.42	0.13	0.08	0.03	0.08	0.05	0.06	0.03	0.03	0.142
2012	Pcelk PVL	0.14	0.072	0.091	0.043	0.1075	0.12	0.088	0.12	0.079	0.11	0.079	0.054	0.092
	N celk. PVL	6.1	15	15	9	6.55	6	6.7	6	5	4.1	5.1	7.3	7.654
	N - NH4+ PVL	0.10	0.31	0.12	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.08	0.074
2013	Pcelk PVL	0.52	0.094	0.046	0.05	0.1	0.14	0.11	0.092	0.11	0.064	0.079	0.28	0.140
	N celk. PVL	9.7	13	9.9	10.8	8.9	8.7	10	6.9	5.6	5.8	6.6	7.6	8.625
	N - NH4+ PVL	0.15	0.14	0.16	0.05	0.07	0.12	0.05	0.03	0.10	0.04	0.08	0.52	0.126
2014	Pcelk PVL	0.068	0.058	0.061	0.13	0.15	0.19	0.16	0.15	0.3	0.15	0.092	0.072	0.132
	N celk. PVL	7.9	8	7.3	7.1	6.5	5.9	5.9	5.1	5.4	6.8	9.4	8.1	6.950
	N - NH4+ PVL	0.08	0.10	0.24	0.28	0.03	0.15	0.04	0.04	0.07	0.03	0.06	0.03	0.096

Pcelk	mg/l	Třída	Ncelk	mg/l	Třída	N-NH4	mg/l	Třída
0	0.02	1	0	3	1	0	0.1	1
0.02	0.05	2	3	6	2	0.1	0.3	2
0.05	0.1	3	6	10	3	0.3	0.7	3
0.1	0.15	4	10	13	4	0.7	2	4
0.15	max	5	13	max	5	2	max	5

Tabulka 6 Koncentrace pro měrný profil Samšín (Gregar a kol., 2015)

V této studii - I. fázi řešení ověření změn koncentrací N a P z plošného znečištění v návaznosti na různé způsoby hospodaření byly práce soustředěny na získání relevantních dat od hospodařících subjektů, jejich transformace do formátu využitelného pro zpracování modelem a tvorba metodiky kalkulace vstupů N a P pro jednotlivé produkční bloky podle LPIS. Získaná data byla porovnávána s koncentracemi N a P v závěrovém profilu Kejtovského potoka na datech v rámci jednoho hydrologického roku. Analýzou dat získaných terénním šetřením, z analýz kvality vody prováděné podnikem Povodí Vltavy, s. p. v profilu Samšín a vlastními analýzami dílčích profilů (viz monitorovací síť dílčích subpovodí) prováděné VŠCHT byla zkoumána korelace mezi způsobem zemědělského hospodaření a kvalitou vody (tabulka 6). S ohledem na velké objemy mnohdy nesourodých dat nebylo v této fázi jednoznačně definovat závislost vlivu hospodaření na koncentrace N a P v Kejtovském potoce. Data bylo potřebné ověřit na delší časové řadě (pět let), což je předmětem další fáze řešení projektu. Ze získaných dat byla vytvořena databáze a vytvořeny GIS vrstvy s vlastní relační databází. Pro další závěry bude nezbytné zpřesnit hydrologickou a látkovou bilanci a zejména eliminovat vliv některých bodových zdrojů P a N (zejména ČOV Pacov). Dílčí výsledky jsou shrnuty v mapě s odborným obsahem. (Viz mapa – kombinace plodiny, kvalita v profilu

Samšín pro jednotlivé části roku – obrázek 31, mapy na obrázcích 32 - 46).(Gregar a kol., 2015)

Pro potřeby podrobnější analýzy vlivu rekonstrukce ČOV Pacov na kvalitu vody v Kejtovském potoce byla zvolena podrobnější stupnice kvality vody v toku (pro parametry N celk. a N-NH₄), která neodpovídá hodnotám uvedeným v ČSN 75 7221 Klasifikace jakosti povrchových vod (obdobně jako pro P celk.). Toto členění umožňuje lepší vizualizaci výsledků. Hodnoty pro jednotlivé třídy kvality jsou uvedeny v tabulce 5.

Vliv rekonstrukce ČOV Pacov na kvalitu vody v profilu Samšín byl ověřován na datech poskytnutých VODAK Humpolec a dále z dat kvality vody v závěrovém profilu Kejtovského potoka (profil Samšín) poskytnutých podnikem Povodí Vltavy s.p.

Vlastní rekonstrukce a modernizace ČOV Pacov probíhala v letech 2010 – 2011. (Gregar a kol., 2015)

rok	2008	2009	2010	2011
N _c [mg/l]	20,2	21,4	16,9	13,0
P _c [mg/l]	0,6	0,4	0,6	0,8

Tabulka 7 Roční průměry odtokových koncentrací nutrientů v období před intenzifikací (Gregar 2015)

Intenzifikace ČOV Pacov proběhla v letech 2010 – 2011. (tabulka 7) V rámci úprav technologické linky byl nově vystrojen a dovybaven stupeň mechanického předčištění, byly vybudovány dešťové zdrže pro zachycení zvýšených přítoků (v původním uspořádání byl zvýšený přítok odlehčován před ČOV přímo do recipientu). V biologické lince byla denitrifikační část rozšířena o anoxický selektor,

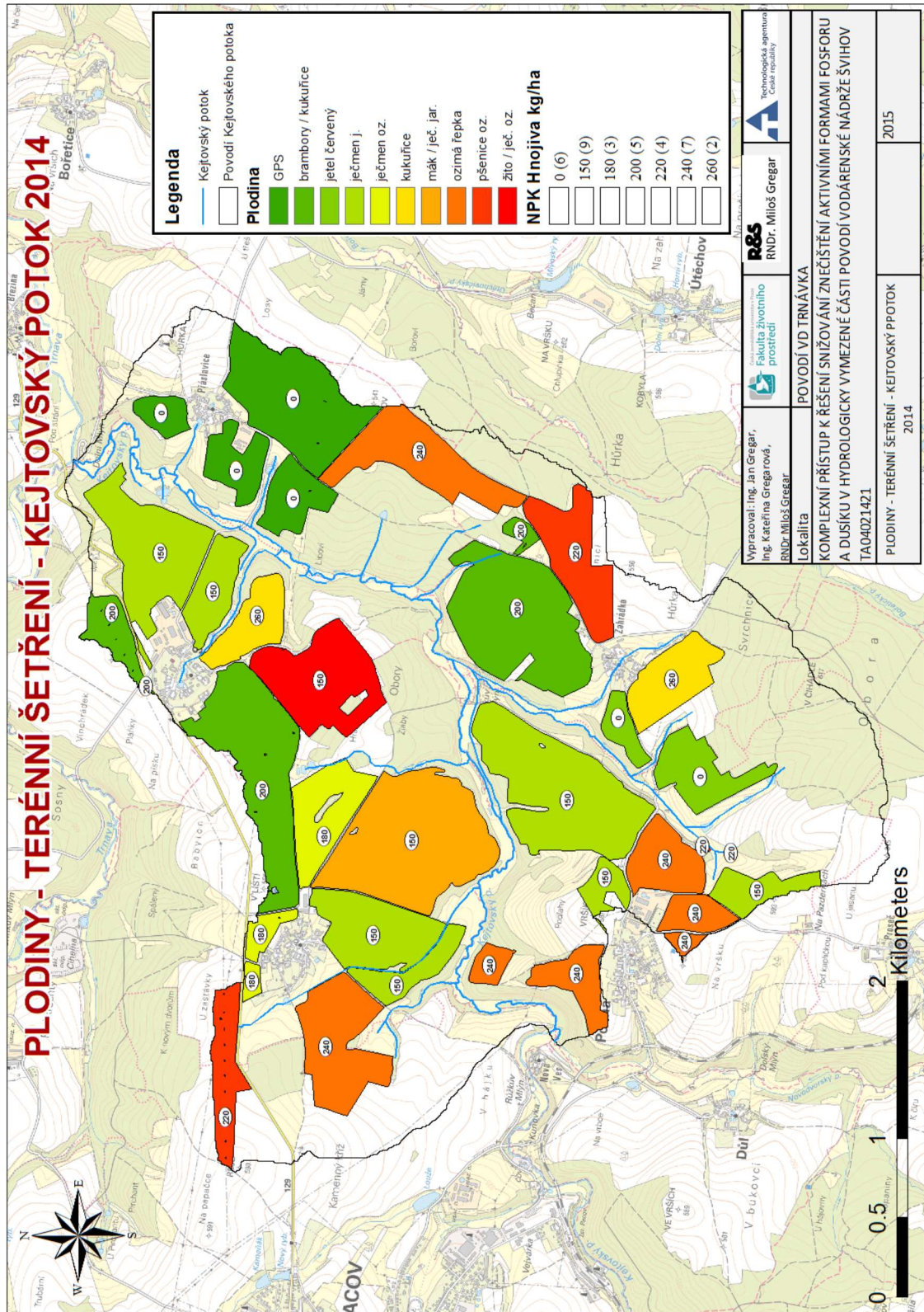
byla zvýšena kubatura nitrifikační části aktivace a nádrže byly vybaveny systémem řízené intenzity aerace. Zrekonstruovány byly obě dosazovací nádrže (osazeny flokulačními válci). Pro dosažení požadované odtokové koncentrace celkového fosforu bylo na ČOV osazeno nové zařízení pro chemické srážení fosforu solemi železa. V kalovém hospodářství bylo intenzifikováno zařízení na odvodnění kalu. Současná kapacita ČOV je 7 000 EO. Vliv provedených úprav na odtokové koncentrace nutrientů je zřejmý z tabulky 8. (Gregar a kol., 2015)

rok	2012	2013	2014	2015
Nc [mg/l]	11,8	10,1	9,9	8,9
Pc [mg/l]	0,5	0,3	0,3	0,3

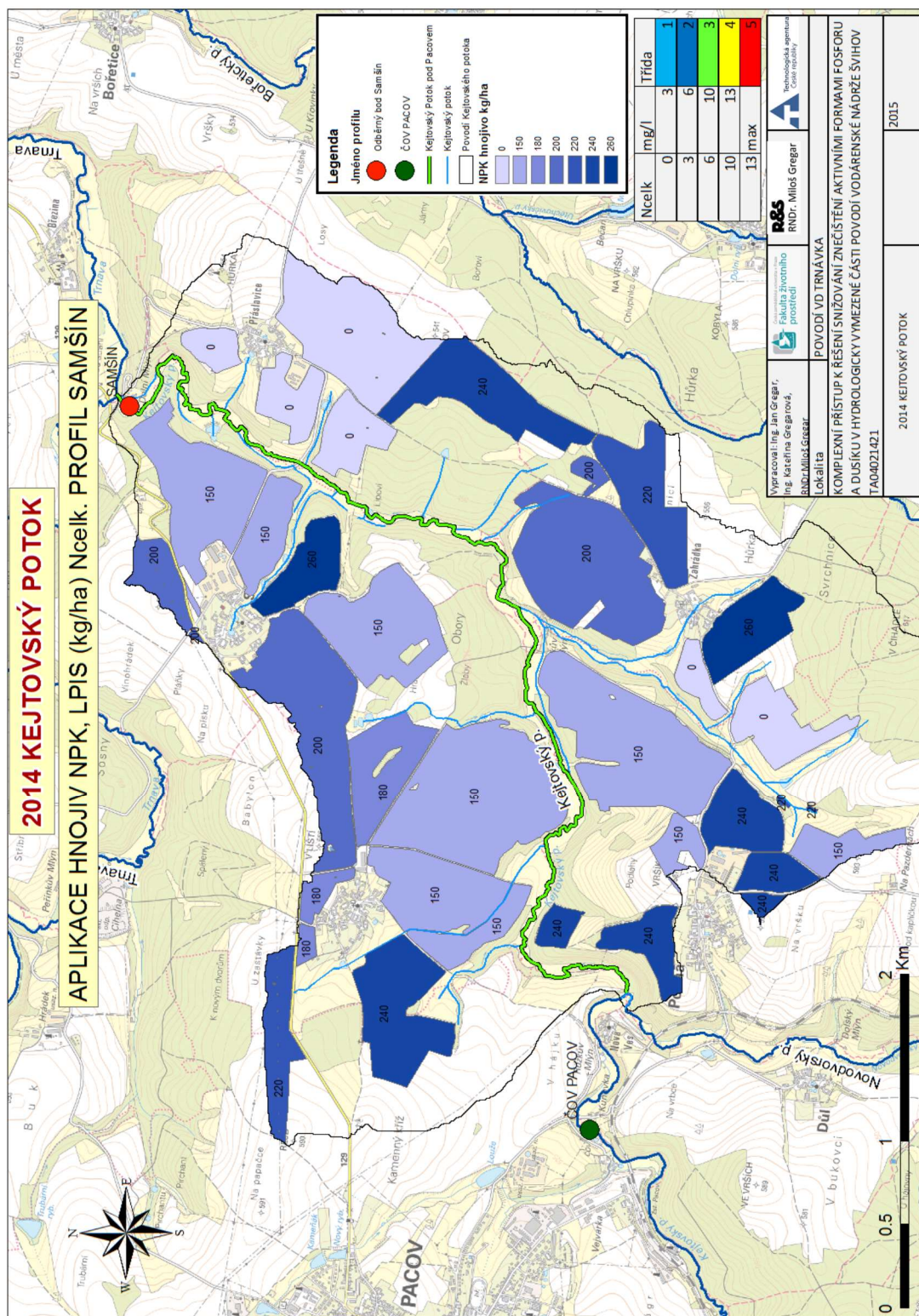
Tabulka 8 Roční průměry odtokových koncentrací nutrientů po intenzifikaci ČOV (Gregar a kol., 2015)

Přínos provedené intenzifikace je patrný především na odtokových koncentracích celkového dusíku, které se nyní dlouhodobě pohybují pod limitem předepsaným platnou legislativou. Odtokové koncentrace celkového fosforu se rovněž pohybují s významnou rezervou pod předepsaným limitem pro tuto kategorii ČOV, pro účinnou ochranu recipientu před nežádoucími projevy eutrofizace by ale bylo nutné zajistit odtokové koncentrace fosforu pod 0,05 mg/l. Této hodnoty by stávajícími technologiemi bylo možné dosáhnout pouze při neúměrném zvýšení provozních nákladů, což by navíc bylo spojeno s dalšími nežádoucími projevy ekonomického (zvýšení stočného) a environmentálního charakteru (např. zvýšení koncentrací RAS v recipientu). Přijatelným řešením je instalace vhodné technologie terciárního dočištění.

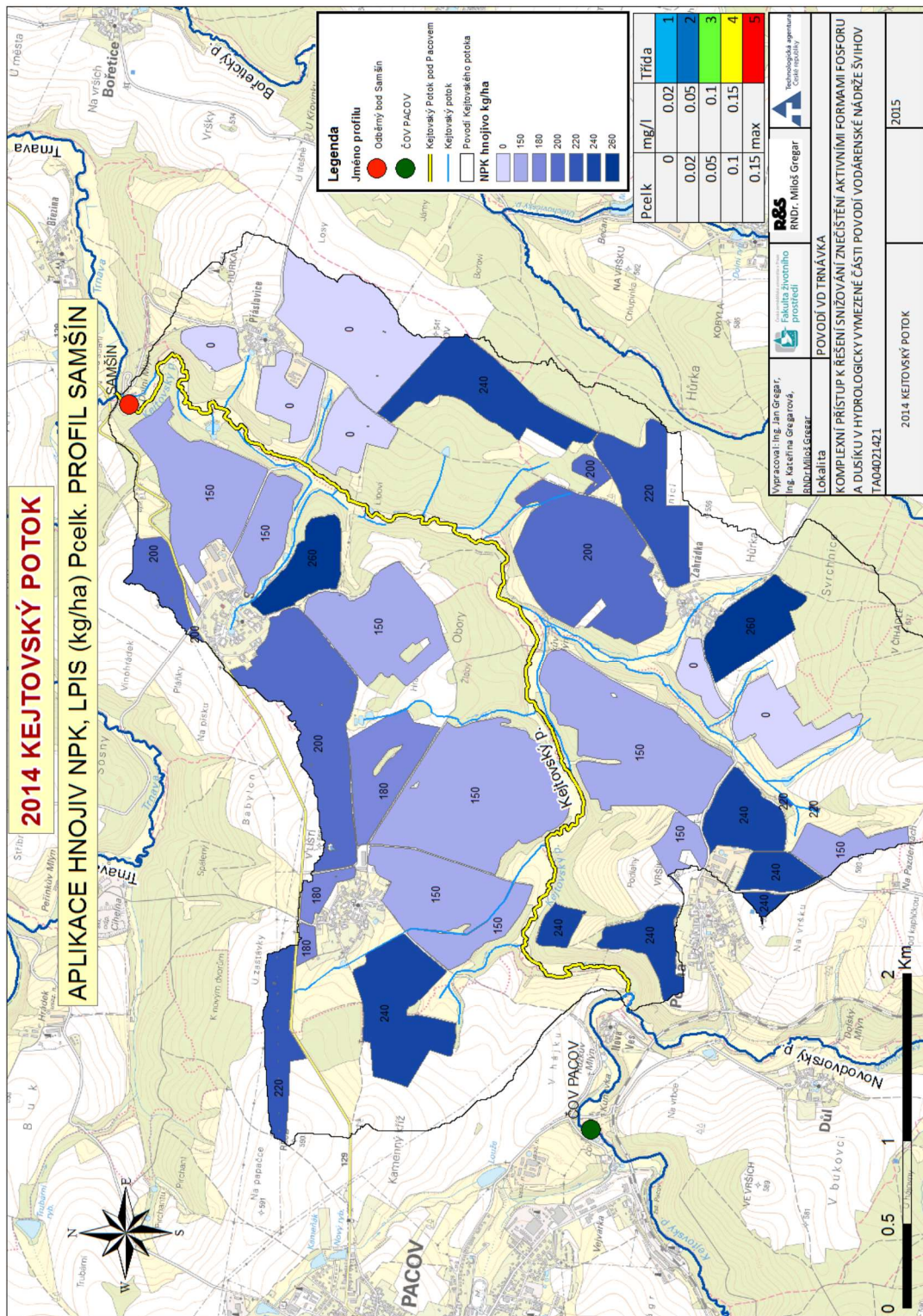
Pro vytvoření celkového obrazu o vlivu rekonstrukce na kvalitu vody v Kejtovském potoce byla vytvořena zvláštní GIS vrstva zachycující jednotlivé fáze provozu čistírny a to v období před a po rekonstrukci. (obrázek 32 – 46)



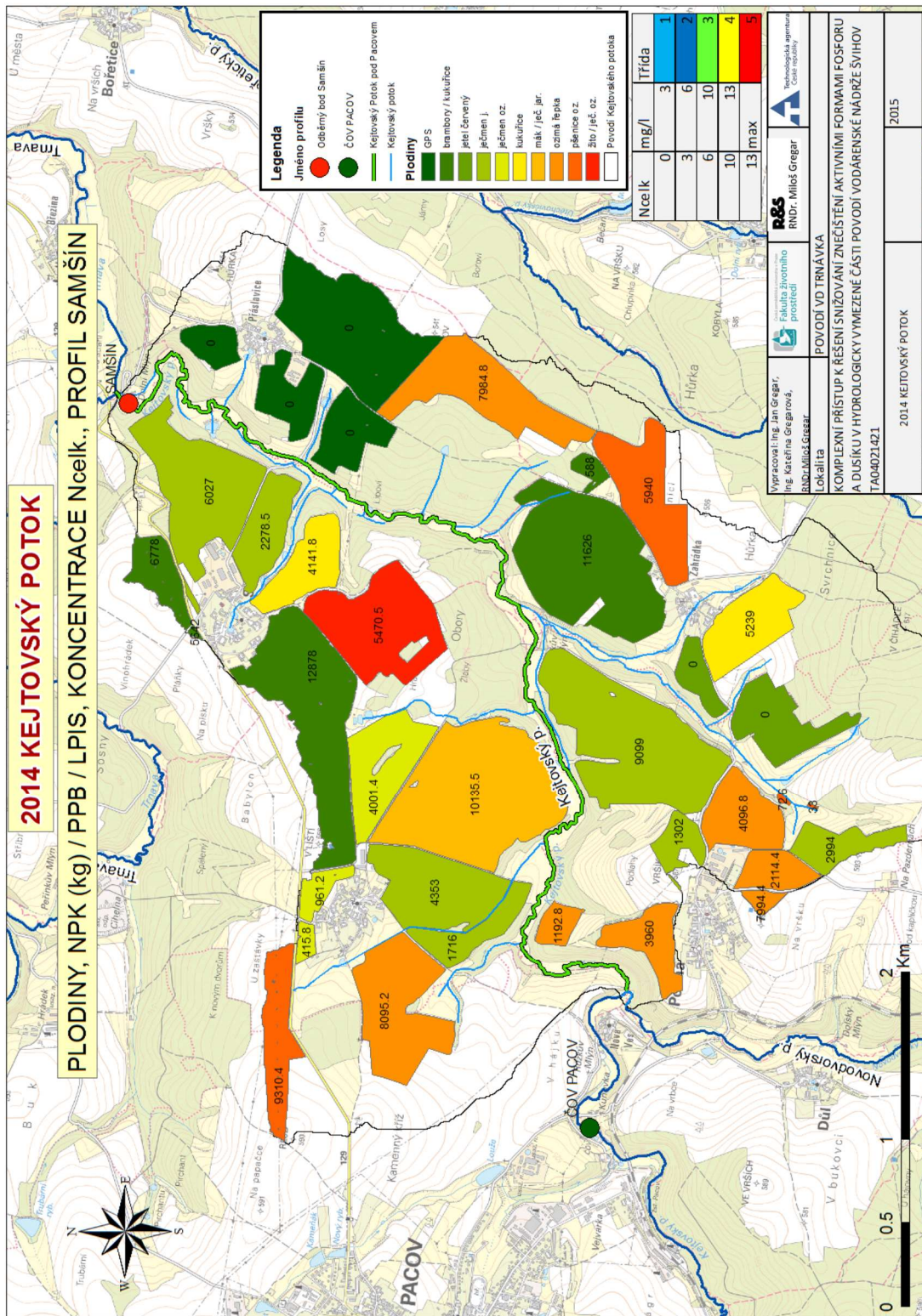
Obrázek 32 plodiny dle LPIS (Gregar a kol., 2015)



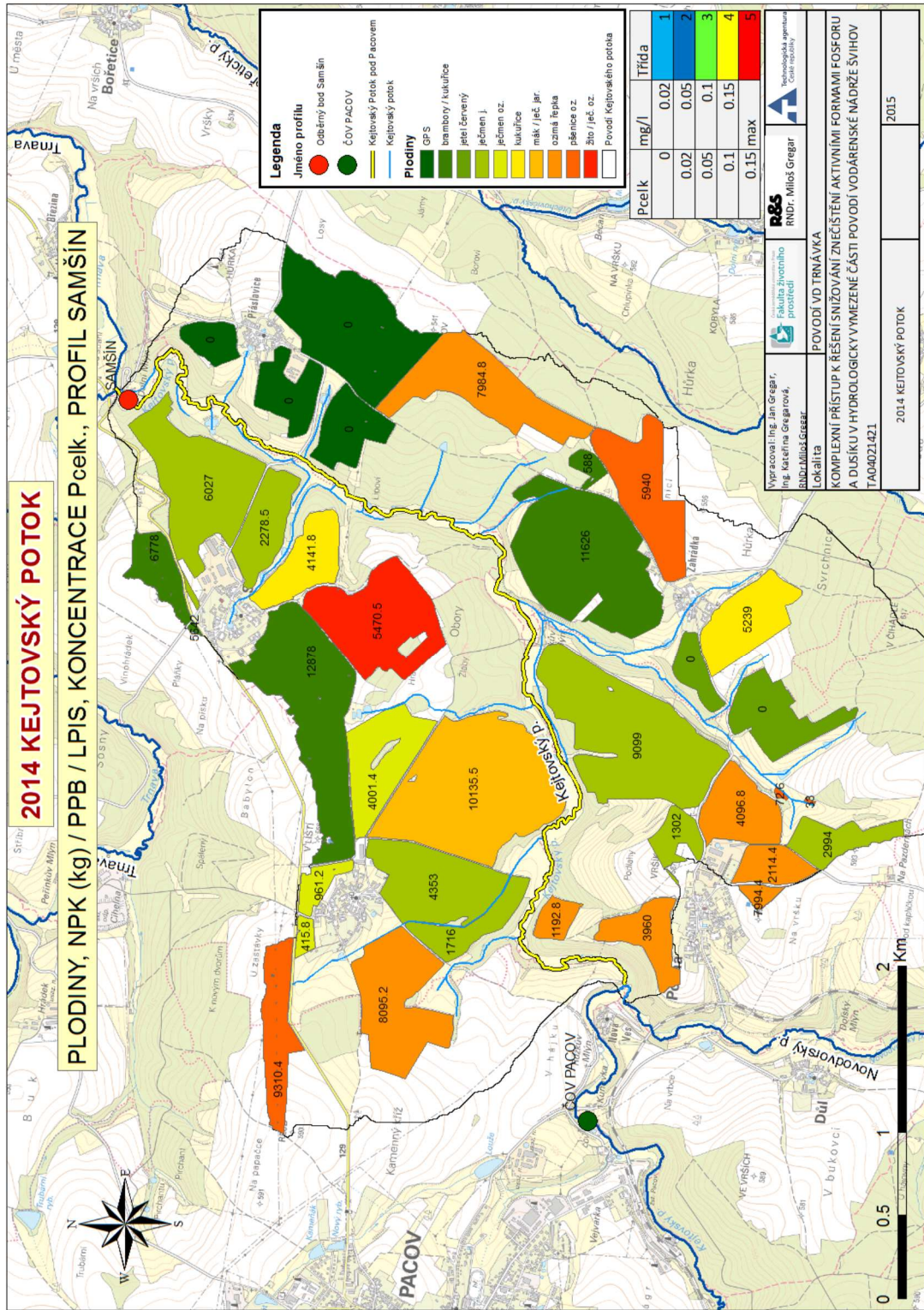
Obrázek 33 množství celkového dusíku v toku (Gregar a kol., 2015)



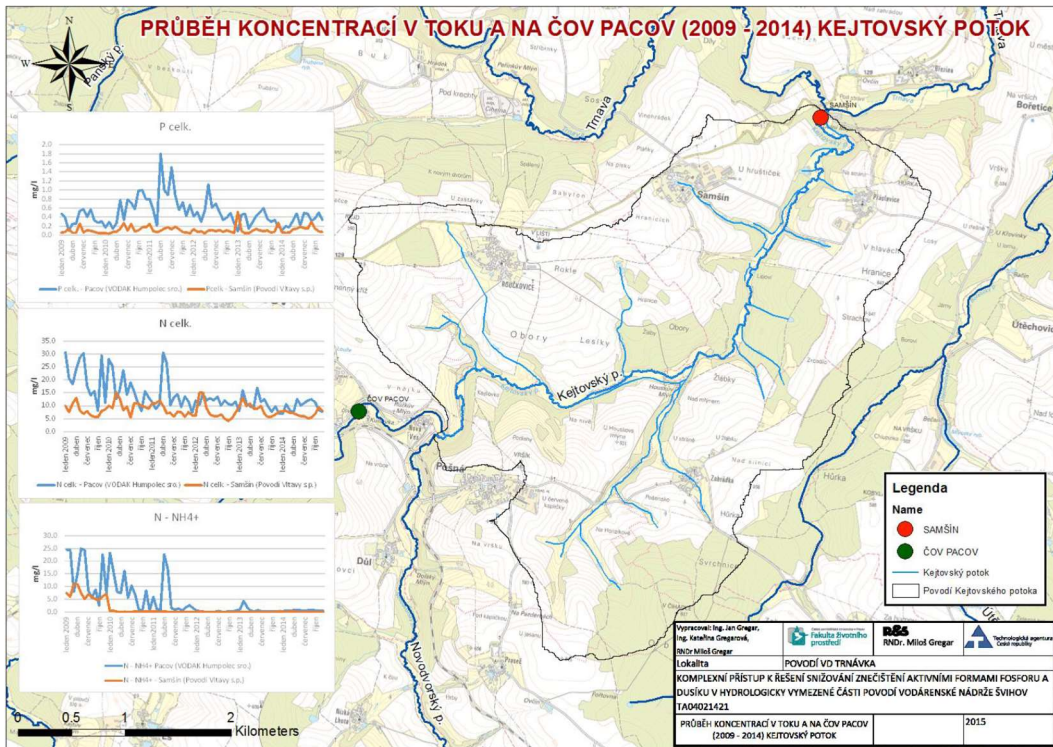
Obrázek 34 množství celkového fosforu v toku (Gregar a kol., 2015)



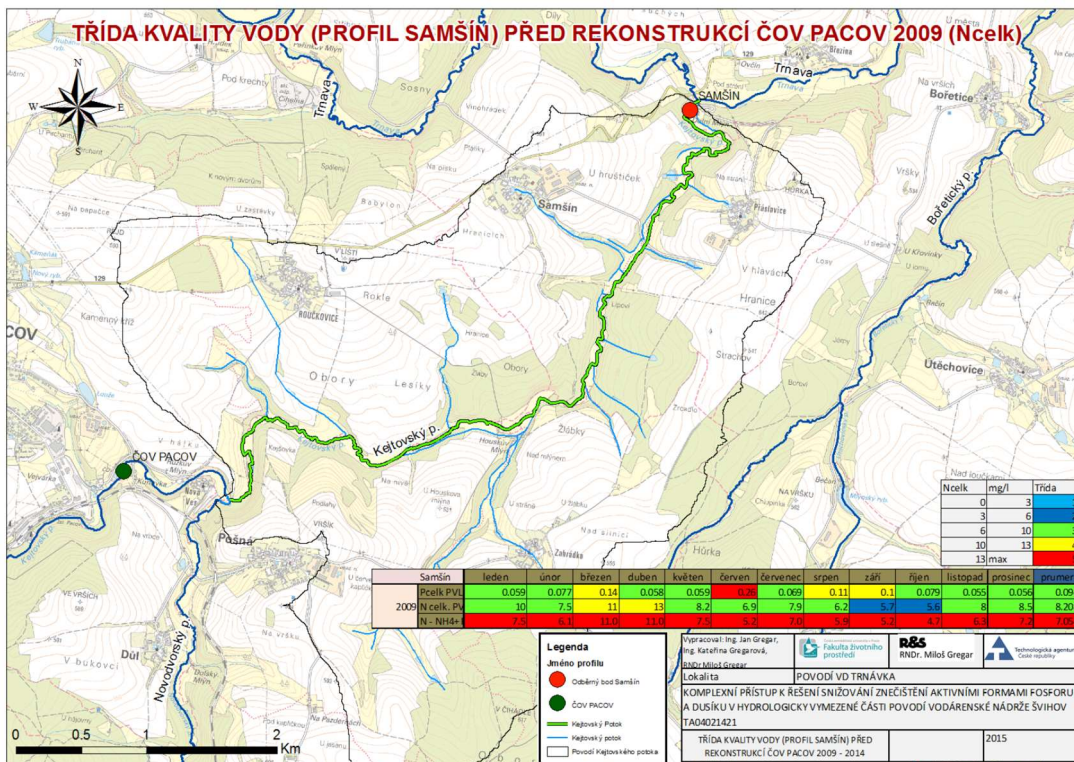
Obrázek 35 množství celkového dusíku v toce (Gregar a kol., 2015)



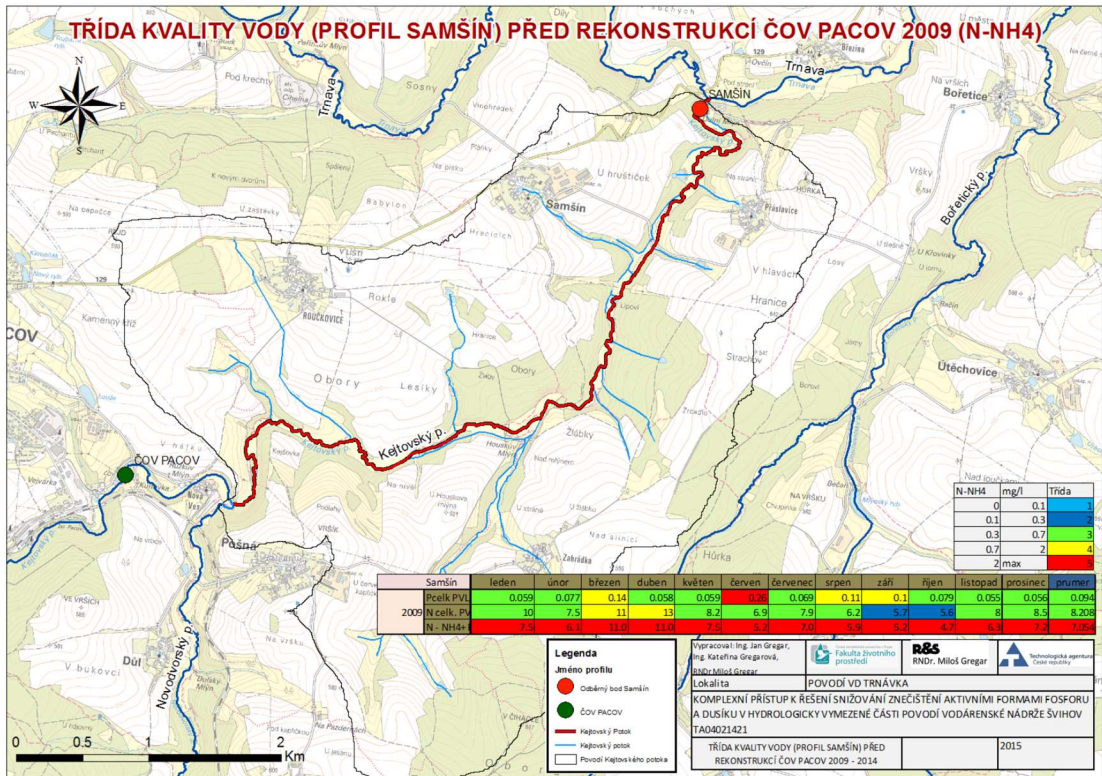
Obrázek 36 množství celkového fosforu (Gregar a kol., 2015)



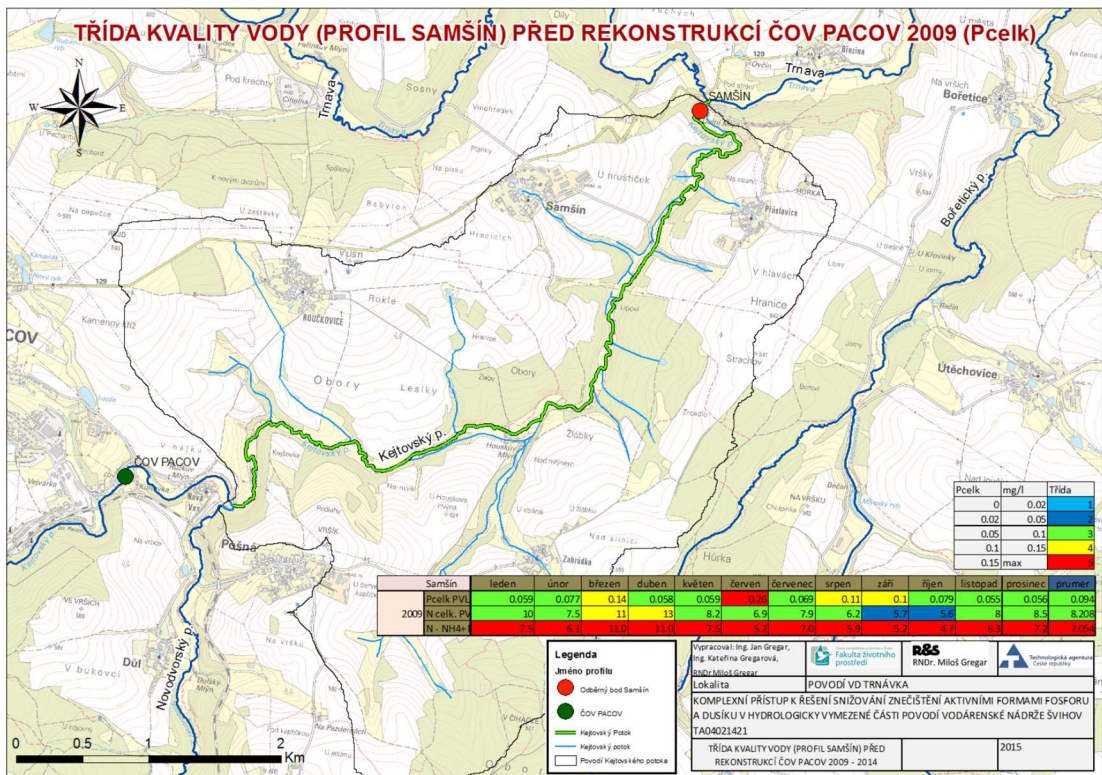
Obrázek 37 koncentrace v průběhu rekonstrukce ČOV Pacov (Gregar a kol., 2015)



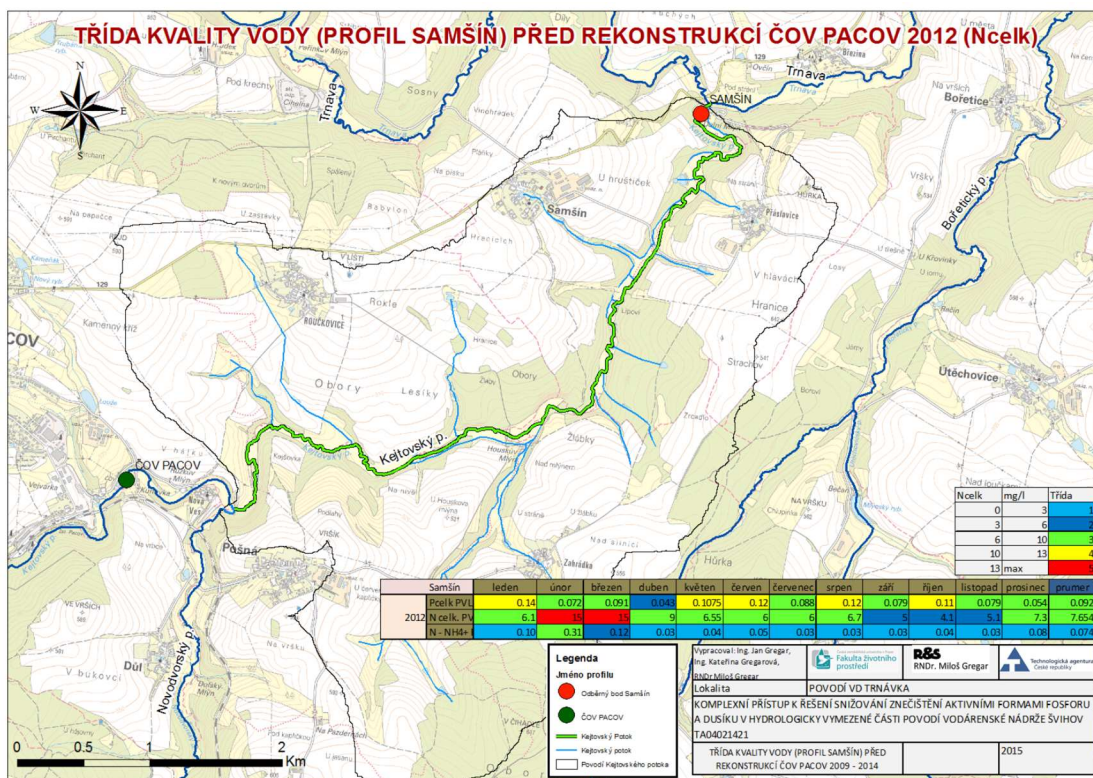
Obrázek 38 koncentrace Ncelk před koncentrací ČOV Pacov (Gregar a kol., 2015)



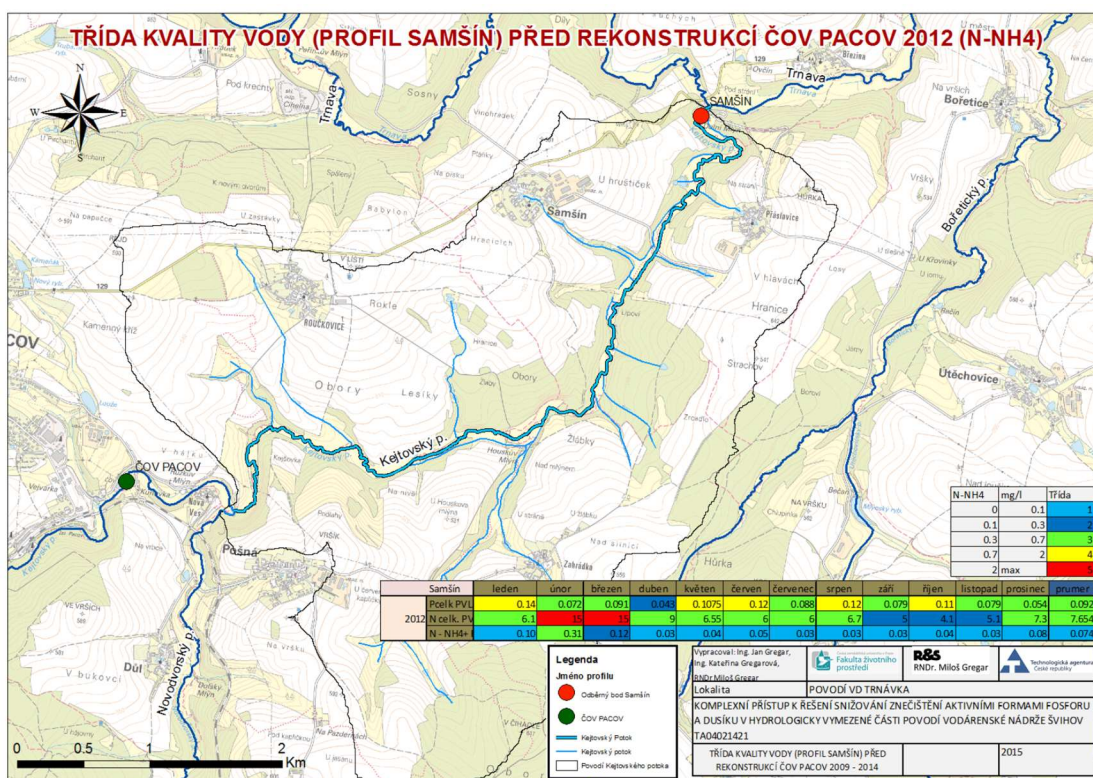
Obrázek 39 koncentrace N-NH4 před koncentrací ČOV Pacov (Gregar a kol., 2015)



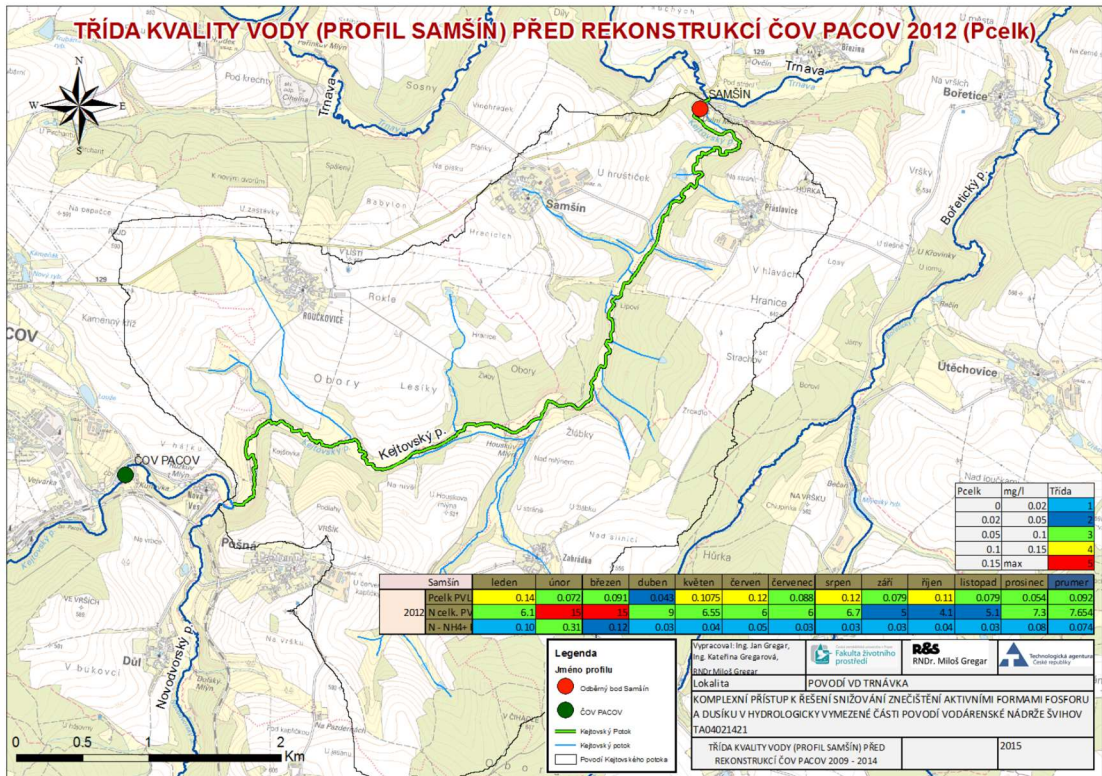
Obrázek 40 koncentrace Pcekl před koncentrací ČOV Pacov (Gregar a kol., 2015)



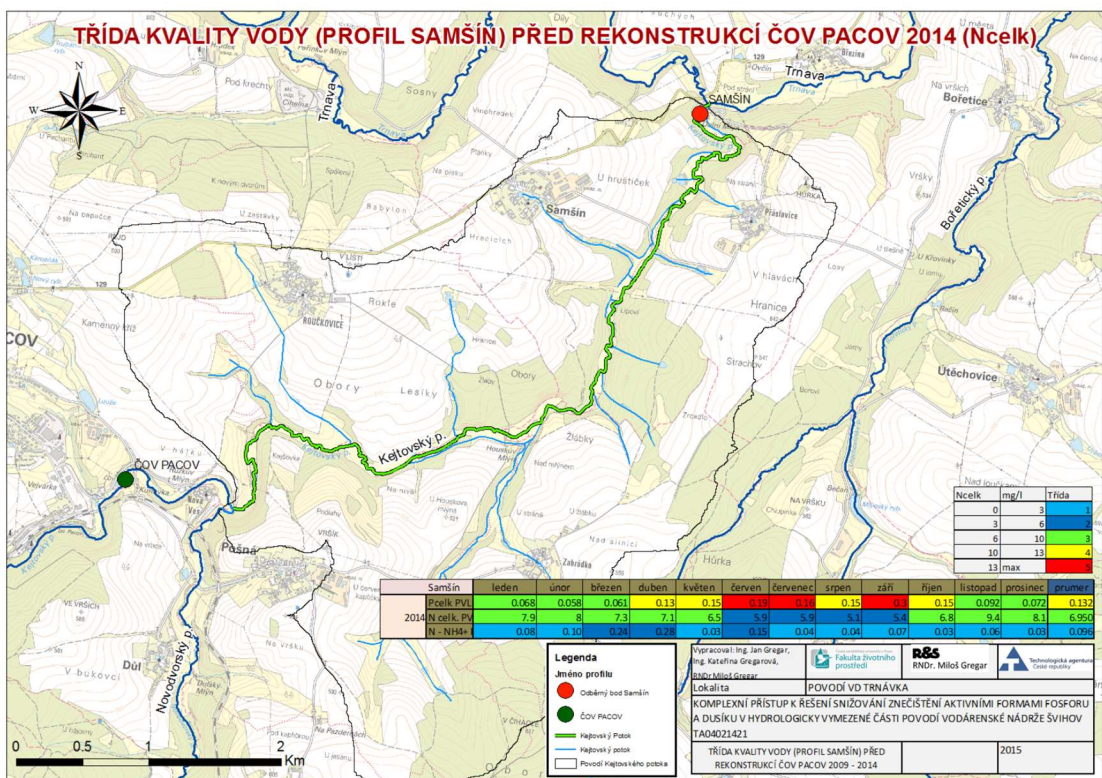
Obrázek 41 koncentrace Ncelk v roce 2012 (Gregar a kol., 2015)



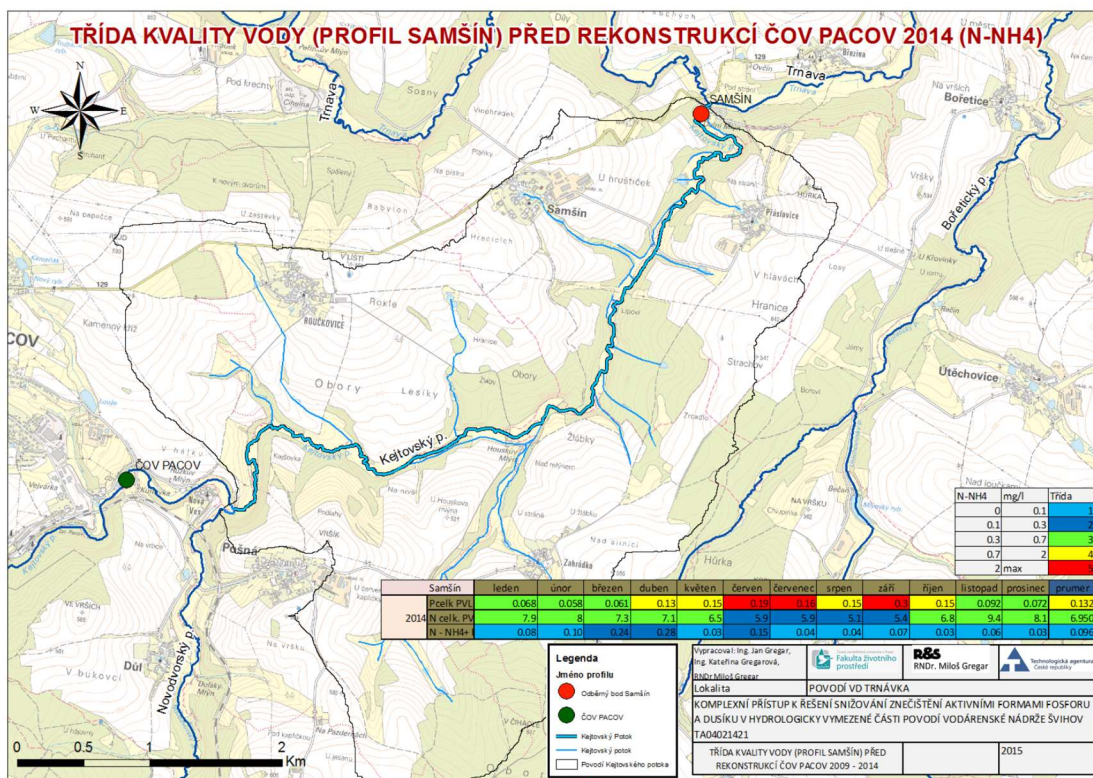
Obrázek 42 koncentrace N-NH4 v roce 2012 (Gregar a kol., 2015)



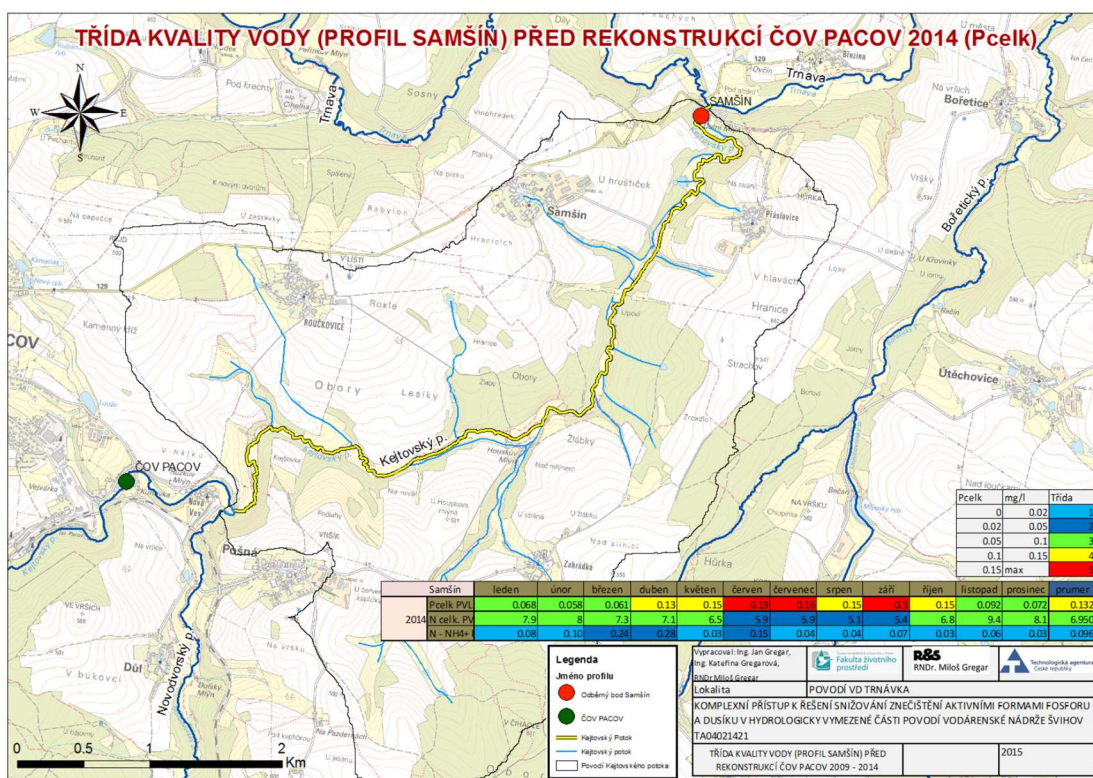
Obrázek 43 koncentrace Pcelk v roce 2012 (Gregar a kol., 2015)



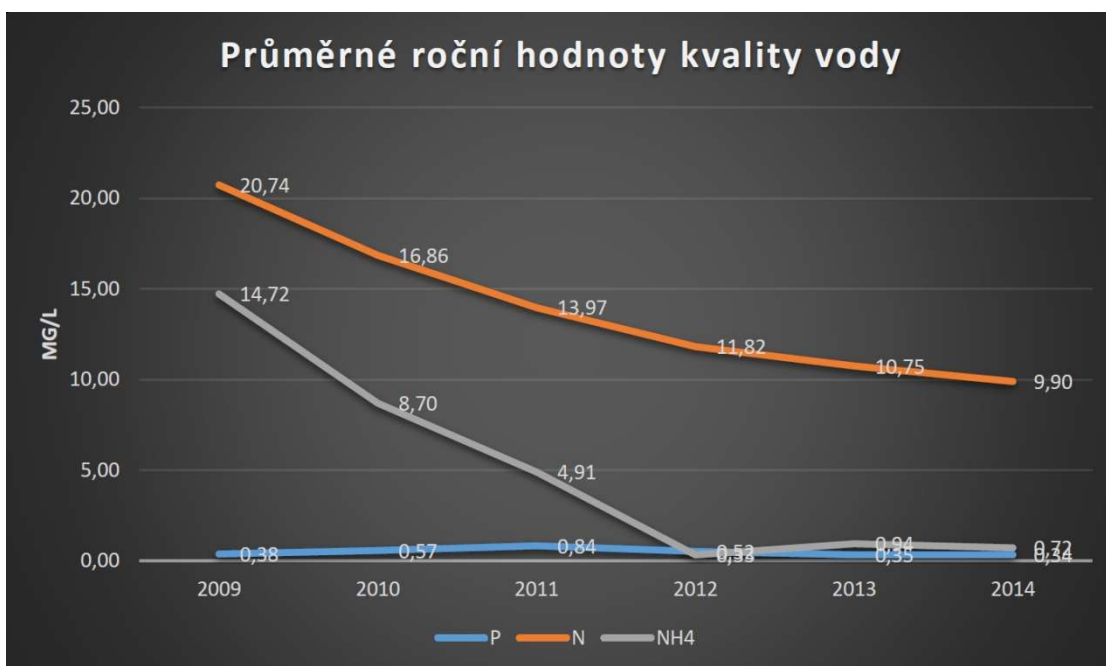
Obrázek 44 koncentrace Ncelk v roce 2014 (Gregar a kol., 2015)



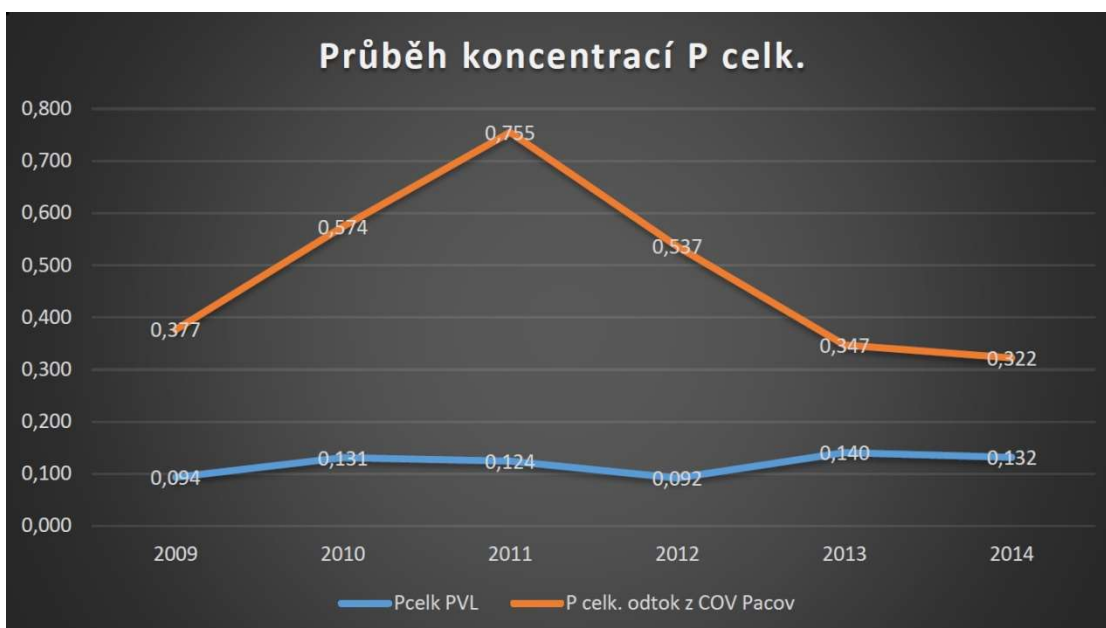
Obrázek 45 koncentrace N_{NH4} v roce 2014 (Gregar a kol., 2015)



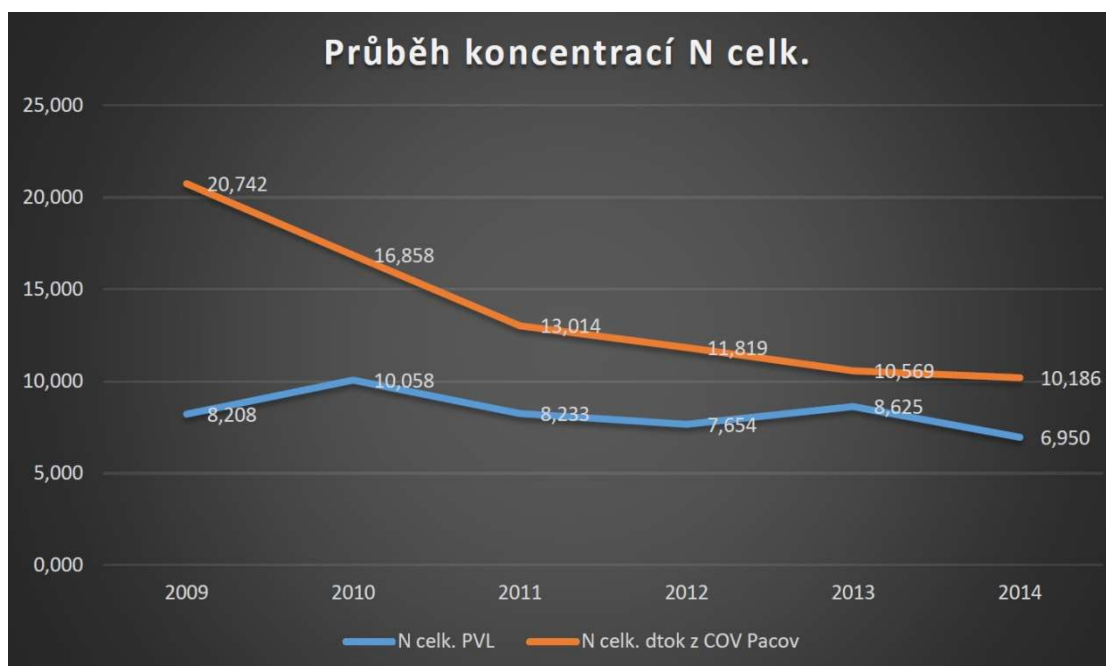
Obrázek 46 koncentrace Pcekl v roce 2014 (Gregar a kol., 2015)



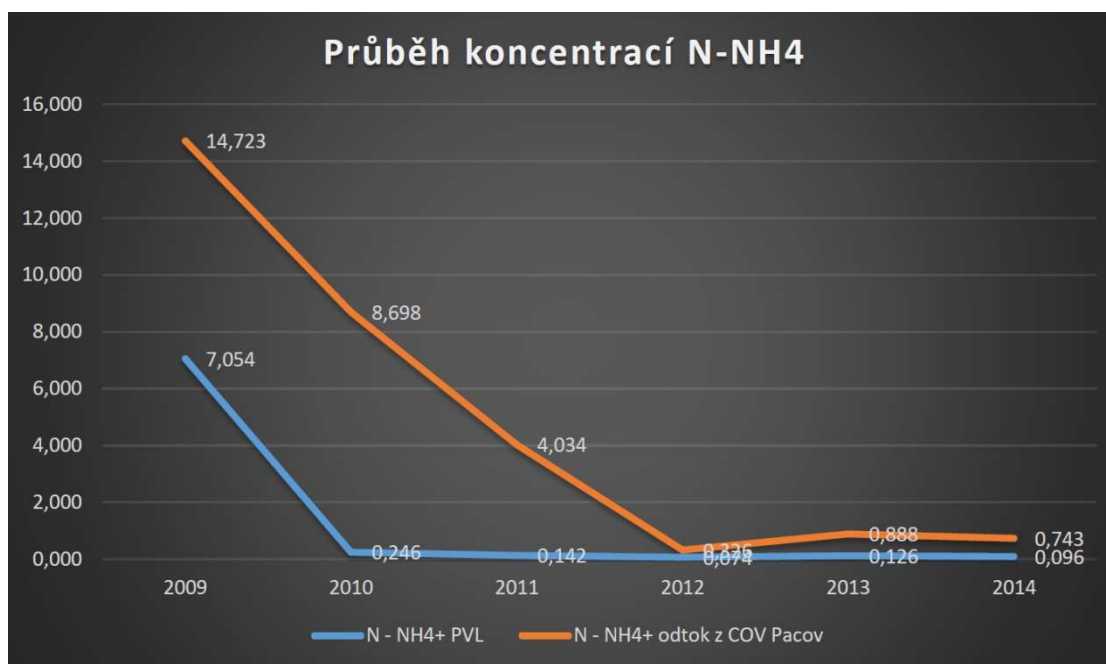
Obrázek 47 Průměrné hodnoty koncentrací před a po rekonstrukci ČOV Pacov (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 48 Průběh koncentrací celkového Fosforu v toku (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 49 Průběh koncentrací celkového Dusíku v toku (Gregar a kol., 2015)



Obrázek 50 Průběh koncentrací N-NH4 v toku (Gregar a kol., 2015)

Závěr

V první fázi probíhal zejména sběr dat o způsobech zemědělského hospodaření v povodí Kejtovského potoka. Byly shromážděny velké objemy dat v různých formátech (nejčastěji v tištěné podobě), které bylo nutné před jejich zpracováním digitalizovat, transformovat a upravit do využitelné podoby. Souběžně probíhaly práce na metodice kalkulace vstupů N a P a to jednak ze záznamů hospodařících subjektů a jednak z objemů NPK hnojiv doporučených pro jednotlivé plodiny podle produkčních půdních bloků LPIS. Vhodnost obou postupů byla v další fázi testována modelem SWAT. Ze získaných podkladů je možné si vytvořit poměrně ucelený pohled na velikost vstupu N a P z plošných zdrojů. Vliv těchto vstupů na kvalitu vody v Kejtovském potoce byl v prvním přiblížení porovnán s kvalitou vody v závěrovém profilu. Nebyly zde zvažovány transformační procesy N a P v rámci jejich uložení v rostlinných pletivech. Otázka využití vstupujících hnojiv plodinami je řešena následně modelem a ověřena podle dat o sklizni jednotlivých plodin na produkčních půdních blocích. Tento postup, společně s výsledky agrochemického zkoušení obsahu N a P v půdách (prováděného v letech 2009 – 2014 ÚKZUZ), přináší komplexní obraz o efektivitě využití aplikovaných hnojiv a jejich migraci v povodí.

Na základě provedených analýz je možné konstatovat, že rekonstrukce ČOV se projevila na kvalitě vody v Kejtovském potoce a to prakticky ve všech sledovaných parametrech. Výsledky jsou částečně zkresleny z důvodu vzdálenosti měřeného profilu kvality vody od výustě ČOV v Pacově. Ve vlastním toku dochází vlivem samočištění k postupnému snižování obsahu nutrientů a to i díky tomu, že koryto Kejtovského potoka je v této části zachovalého přírodního charakteru. I přes vliv samočištění, jsou výsledky rekonstrukce na kvalitu vody v profilu Samšín prokazatelné a to zejména pro amoniakální dusík. Jednotlivé měřené koncentrace jsou zobrazeny v grafech na obrázcích 46 - 49.

Současně je možné konstatovat, že hladiny P a N v toku jsou ovlivněny jednak pozadím a zejména vstupy z plošných zdrojů, které mají významný vliv na koncentrace těchto látek v profilu Samšín.

3.3. Povodí Kopaninského potoka

Modelování kvality vody v malém, zemědělsky využívaném povodí (společně s VÚMOP, Vodní zdroje a.s.)

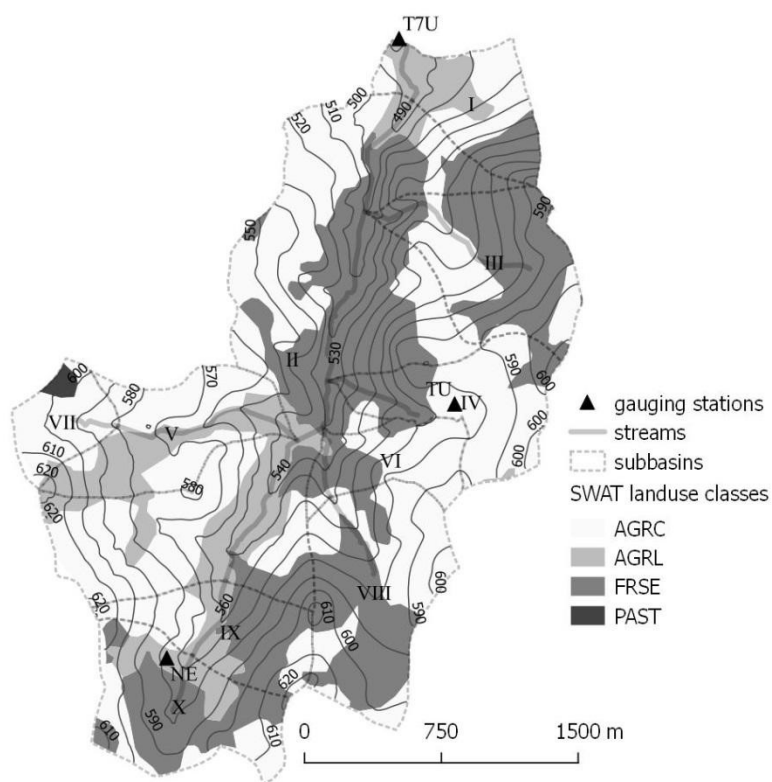
Zhoršená kvalita vody malých zemědělských toků v důsledku vysokého zatížení dusičnany zůstává výzvou, navzdory zavádění povinných kroků stanovených směrnicí o vodě a dusičnanech (Meals et al., 2010, Udias et al., 2016, van Meter et al., 2017). Je však pravděpodobné, že bez důkladného pochopení procesů, které řídí dlouhodobou i krátkodobou kvalitu vody, je obtížné dosáhnout zlepšení v této oblasti (Ulén et al., 2015). Pravidelné sledování hydrologie a kvality vody v malých zemědělských povodích poskytuje užitečné informace o hydrochemické reakci v dlouhodobém pohledu a také v kratších, srážko-odtokových událostech. Monitoring však sám o sobě není dostatečný pro podrobný popis exportu NO₃-N, jelikož tento proces má dynamický prostorotemporální vzorec s mnoha faktory, včetně využívání půdy a hospodaření, hydrologie, biogeochemie půdy a role kolísání hladiny vody ve vadosní zóně (Billy et al., 2013, Ulén a kol., 2015, Zhao a kol., 2016). Modelování je proto potřebné k odhalení charakteru těchto jednotlivých faktorů, za účelem získání znalostí pro nejlepší postupy řízení povodí (BMP - best management practice), nebo jiné zmírňující opatření, aby byla účinná. Použití modelů kvality vody bylo prokázáno jako nezbytné pro posouzení skutečného zatížení znečištění v různých scénářích a strategiích implementace BMP na úrovni terénu a povodí (Biothias 2013, Udias 2016). Dále se pomocí modelování dají identifikovat kritické zdrojové oblasti, tj. Lokality odpovědné za vysoký přísun znečištění na jednotku plochy. Na základě těchto informací jsou cíleně umístěny návrhy BMP.

Celosvětově byla schválena dominantní role drenážních kanalizačních systémů pro dodávku NO₃-N do potoků. Zvýšené vyluhování dusičnanů z půdního profilu v důsledku odvodnění půdy bylo zdokumentováno jako funkce zvýšeného provzdušňování předem zaplavovaných půd a kontinuální mineralizace půdního organického dusíku, zejména v době klidové sezóny (Bauwe 2015, Zhao et al., 2016). V podmínkách krystalického komplexu se ve větším rozsahu jedná o mělké propustné půdy s nízkou schopností zadržovat vodu a živiny (Doležal a Kvítek, 2004, Zajíček et

al., 2016). Orba a vláčení výrazně přispívají k vnosu dusičnanů do povrchových vod tak, jak jsou popsány jak na úrovni pole, tak v povodí (Fučík et al., 2008, Fučík a kol., 2015).

Podle Rahman et. Al (2014), zvýšení průtoku vody v tocích může být dosaženo podpovrchovým odvodněním, jako je například drenážní soustava. Tedy tam, kde by se měly nízké průtoky zvýšit a vysoké snížit. Liu (2014) navrhl ve své studii, že management ochrany zemědělství může snížit NO₃-N o více než 10%. Nicméně dusičnany mohou být sníženy o 38% za použití méně hnojiv (Schilling, 2009).

Cílem této studie bylo zhodnotit efektivitu několika scénářů využívání a řízení managementu v povodí s cílem snížit zatížení dusičnany v malém drenáži odvodněném zemědělském povodí. Změnou managementu povodí na BMP, je možné snížit zatížení dusičnanů o více než 50% a zvýšení produkce. Důležitým faktorem je při tom optimalizace množství hnojiv, které jsou rozhodující pro zatížení živinami.



Obrázek 51 Kopaninský potok – rozdělení území dle využití půdy

Studie se uskutečnila v povodí kopaninského potoka, což je malémeliorované zemědělsky využívané povodí, typické pro Českomoravskou vysočinu, o rozloze 710 ha, viz obr. 50. Průměrná celková roční srážka je 665 mm a průměrná teplota vzduchu je 7,1 ° C. Nadmořská výška se rozkládá mezi 478 - 620 m a.s. Délka hlavního kanálu je 4,2 km, průměrný sklon 2,6%. Kopaninský potok je typickým místním malým zemědělským povodím se společným využíváním půdy: 44,7% zemědělské půdy, 36,7 lesů, 13,1% luk a pastvin, 3,5% další plochy, 1% zahrady, 0,6% zastavěné plochy, 0,5% vodní nádrže. Nad uzávěrovým profilem povodí, se nacházejí dvě malé vesnice a několik odlehlých obydlí s vlastními septiky. Odvodňovací systémy, meliorací, které se nacházejí převážně ve svazích, jsou zde postaveny jak pod ornou půdou, tak i pod loukami. Jako časté zušlechťovací opatření v tomto venkovském regionu byly systémy zkonstruovány koncem 70. let a počátkem 80. let jako součást celostátní kampaně drenážních děl, která se konala v letech 1960 až 1985 v celé České republice [Kulhavý a kol. 2007]. Uchovávání meliorací je 0,9-1,1 m pod půdním povrchem a jejich vzdálenost od sebe je 12-18 m. Odvodnění melioracemi pokrývá přibližně 10% povodí a 16% zemědělské půdy.

Údaje o vypouštění a kvalitě vody používané pro modelování pocházejí z výpusti (T7U), sledované v období 2000-2014. Hladina vody byla měřena kalibrovaným Thompsonovým přelivem, vybaveným ultrazvukovou sondou připojenou k dataloggeru (Fiedler-Magr) s nahráváním 10 minut (1 min pro snap-shot); současně převedeny na výboj. Výška hladiny a průtoky vody (kromě extrémů) byly také měřeny manuálně každé dva týdny pro případnou korekci automatizovaných záznamů. Odběr vzorků vody byl proveden ručním odběrem ve čtrnácti krocích v uzávěrovém profilu. Vzorky vody byly bezprostředně po odběru transportovány do certifikované laboratoře Výzkumného ústavu ochrany půdy a vody a zpracovány v automatickém přístroji "SKALAR" s použitím metod CFA a FIA (Analysis Injection Flow, Continuous Flow Analysis); ISO metoda č. 13395 pro NO₃-N. V povodí byly umístěny dva automatické srážkoměry a jedna automatická meteorologická stanice.

LULC	Area km2	CN	AWC mm	PREC mm	GWQ mm	ET mm	NO3 kgh	ORGN kgh
AGRC	0.03	73.00	83.00	701.01	16.94	514.15	5.98	12.87
AGRR	3.10	78.88	100.79	701.01	14.89	462.27	14.21	42.83
BERM	0.09	72.74	118.16	701.01	11.67	511.03	7.69	8.40
FRSE	2.82	77.00	167.00	701.01	15.57	530.31	0.21	16.75
PAST	0.99	77.78	140.47	701.01	12.81	499.30	0.98	23.96
RNGB	0.06	67.46	111.56	701.01	20.84	568.56	0.60	12.40

Tabulka 9 Charakteristika využití půdy dle kategorií modelu SWAT

BPEJ kód	
75011	Stagnic Cambisols (sandy loam / loam)
72901	shallow Haplic Cambisols (loamy sand / sandy loam)
72904	shallow Haplic Cambisols (loamy sand / sandy loam)
72911	shallow Haplic Cambisols (loamy sand / sandy loam)
72914	Cambic Hyperskeletal Leptosol (loamy sand / sandy loam)
99	Cambisols (loamy sand / sandy loam)
77311	Haplic Gleysols (sandy clay loam / loam)
76701	Haplic Stagnosol (sandy clay loam / loam)

Tabulka 10 Zobrazení typů půd používaných v modelu SWAT. Dle BPEJ.

Typ dat	Zdroj	popis
DEM	ZABAGED	Vrstva GIS (1m)
Půdy	Data RISWC	Vrstva GIS+databáze (VSEU), upravené terénním šetřením. Charakteristiky půdy VÚMOP, laboratorní testy.
Land use	Data RISWC	Katastrální mapy, LPIS
Meteorologická data	Data RISWC	Denní minimální a maximální teploty a srážky
Plodiny	Data RISWC	Informace od zemědělců a terénní šetření
Průtoky	Data RISWC	Denní průtoky
Kvalita vody	Data RISWC	Odběry vzorků (NO ₃ -N)

Tabulka 11 Vstupní data modelu SWAT

V 10 dílčích povodích bylo vytvořeno 173 HRU s prahem 10/10/10 (Younggu, 2015), což je jedna z běžně používaných prahových kombinací v modelování SWAT (např. Larose et al., 2007; Meng et al. 2010; Srinivasan a kol., 2010; EPA, 2013).

		Rozloha [ha]		
Povodí		709.67		
		Rozloha [ha]		%povodí
Landuse	RNGB	6.46	(23.95)	0.91 (3.38)
	AGRC	3.21	(18.47)	0.45 (2.60)
	FRSE	282.50	(242.74)	39.81 (34.21)
	URML	8.76	(10.31)	1.23 (1.45)
	PAST	99.41	(87.55)	14.01 (12.34)
	AGRR	309.33	(264.94)	43.59 (37.33)
	UTRN	-20.17		-2.84
	WATR	-1.08		-0.15
	FRST	-9.12		-1.29
	FRSD	-0.44		-0.06
	AGRL	-1.18		-0.17
Půda	75011	51.05	(60.29)	7.19 (8.49)
	72901	37.53	(37.49)	5.29 (5.28)
	72904	5.12	(7.23)	0.72 (1.02)
	72911	109.04	(100.56)	15.36 (14.17)
	72914	168.95	(160.07)	23.81 (22.56)
	99	283.65	(254.19)	39.97 (35.82)
	77311	54.35	(57.61)	7.66 (8.12)
	76701	-2.52		-0.36
Sklon	0-3.0	17.09	(25.02)	2.41 (3.53)
	3.0-7.0	195.39	(185.50)	27.53 (26.14)
	7.0-10.0	212.71	(194.73)	29.97 (27.44)
	10.0-15.0	192.39	(181.71)	27.11 (25.60)
	15.0-9999	92.09	(93.00)	12.98 (13.10)

Tabulka 12 SWAT model – výstup HRU

Dusíkový cyklus je klíčovým faktorem při modelování živin pomocí modelu SWAT. Dusík se obvykle pohybuje povrchovým odtokem nebo laterálním průtokem. Dusičnany, které vstupují do mělké zvodně, tam mohou zůstat, nebo se mohou přesunout do hluboké zvodně a pak se dostat zase zpátky do mělké zvodně (Boithias, L. a kol., 2013).

Pro účely modelování byly použity dva různé scénáře správy půdy. Nulový scénář (SC0) byl založen na posledním uplatňovaném managementu v povodí (podle zpráv příslušných zemědělců) a na testovaném scénáři (SC1) s 20% nárůstem pastvin přes ornou půdu v povodí. Zatravnění bylo zaměřeno na mělké, na infiltraci náchylné oblasti s nízkou schopností zadržovat vodu a živiny. Na obdělávaných půdách byly obiloviny, řepka olejná, kukuřice a v menší míře i brambory. Orná půda byla hnojena v průměru 120-180 kg N.ha-1.y-1 a 20-30 kg P.ha-1.y-1. U modelu SWAT se zemědělství udržovalo jako standard pro jednotlivé kategorie pozemků, které nevytvářejí více proměnných pro porovnání dvou modelovaných scénářů.

Analýza citlivosti

Model SWAT obecně závisí na mnoha parametrech, které otevírají mnoho možností pro vyhodnocení správného výkonu modelu. Použitím předchozích studií Arnold et al. (2000), Erckhard a Arnold (2001), Santhi a kol. (2001), Santhi a kol. (2003) a Bracmort a kol. (2006) byly stanoveny parametry a provedena analýza citlivosti pomocí metody SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting verze 2) s výsledky uvedenými v tabulce 13. Popis osmi parametrů, které byly použity pro kalibraci, je uveden v tabulce 14. Vzhledem k tomu, že hodnota P se pohybuje od 0 do 1, jsou pro tento případ významné parametry CN2, SFTMP a SMTMP. T-stat je koeficient parametru, dělený jeho standardní chybou. Je to míra přesnosti, se kterou se měří regresní koeficient. Pokud je koeficient "velký" ve srovnání s jeho standardní chybou, pravděpodobně se bude lišit od 0 a parametr bude citlivý. Hodnota p pro každé kritérium testuje nulovou hypotézu pro koeficient, která se rovná nule (žádný účinek). Nízká hodnota p ($<0,05$) znamená odmítnutí nulové hypotézy. Jinými slovy, prediktor s nízkou hodnotou p je pravděpodobně významným přírůstkem modelu kvůli změnám v hodnotě prediktoru vztahující se ke změnám v odpovědi proměnné. Pro CN2,

SFTMP a SMTMP můžeme odmítnout nulovou hypotézu a 95% pravděpodobnost, že je správná, má proměnnou nějaký účinek.

Název parametru	t-stat	P-Value
CN2	-20.09	0.00
ALPHA_BF	0.05	0.96
GW_DELAY	0.59	0.56
GWQMN	-0.45	0.65
SFTMP	-2.03	0.04
SMTMP	-2.14	0.03
EPCO	-0.31	0.76
ESCO	-0.17	0.96

Tabulka 13 Výsledky citlivostní analýzy jednotlivých parametrů

Diskuse a výsledek

Výsledky ukazují, že výstup SWAT, vypočítaný ve sledovaném povodí, je citlivý na změny v řízení managementu povodí. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo zavedením meliorací do modelu, které přidaly vodu do proudu a zlepšila se tak celková hydrologická bilance. Odstranění meliorací v modelu vede ke snížení a neustálému podhodnocování rychlostí odtoku (Koch et al., 2012). Pomocí software SWAT-CUP používaného pro kalibraci modelu SWAT bylo dosaženo hodnoty vyšší, než $R^2=0,6$ což znamená, že výkonnost modelu je uspokojivá. Spruill et al. (2000) naznačuje, že použití SWAT na malých povodích je přijatelné, pokud jsou použity měsíční údaje s podobným R^2 . V povodí je velká variabilita povětrnostních podmínek, takže konečná vodní bilance není 100% správná. Pro predikci odtoku však kalibrovaný model plně dostačuje.

Kalibrace a ověření modelu byly provedeny pro měsíční průtoky. Kopaninský potok byl kalibrován na současná data, která byla k dispozici po celou dobu modelování.

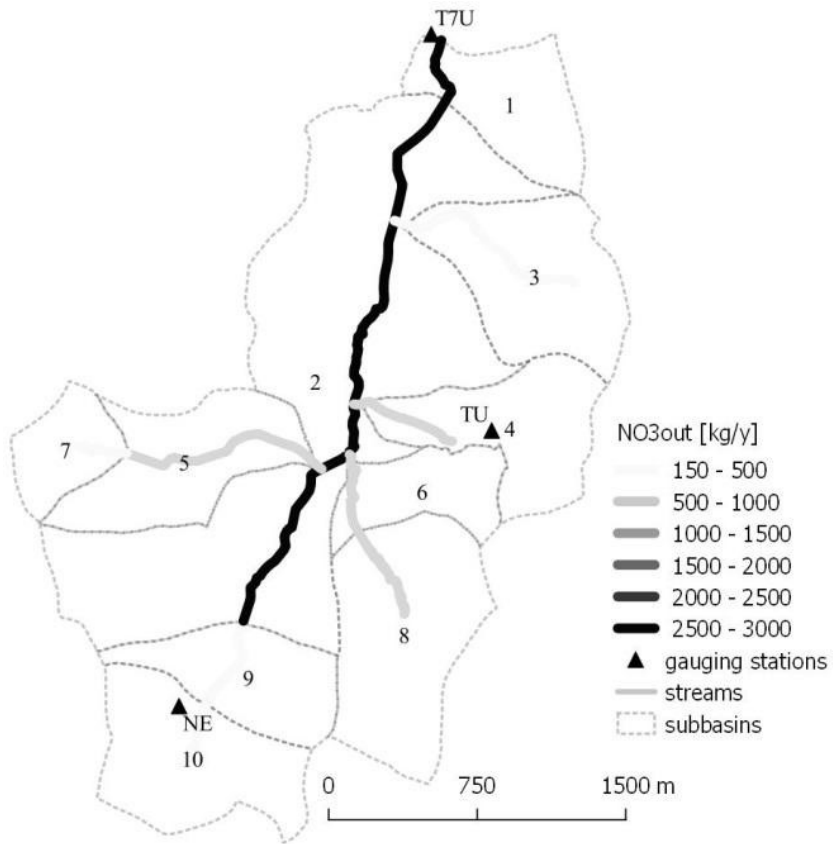
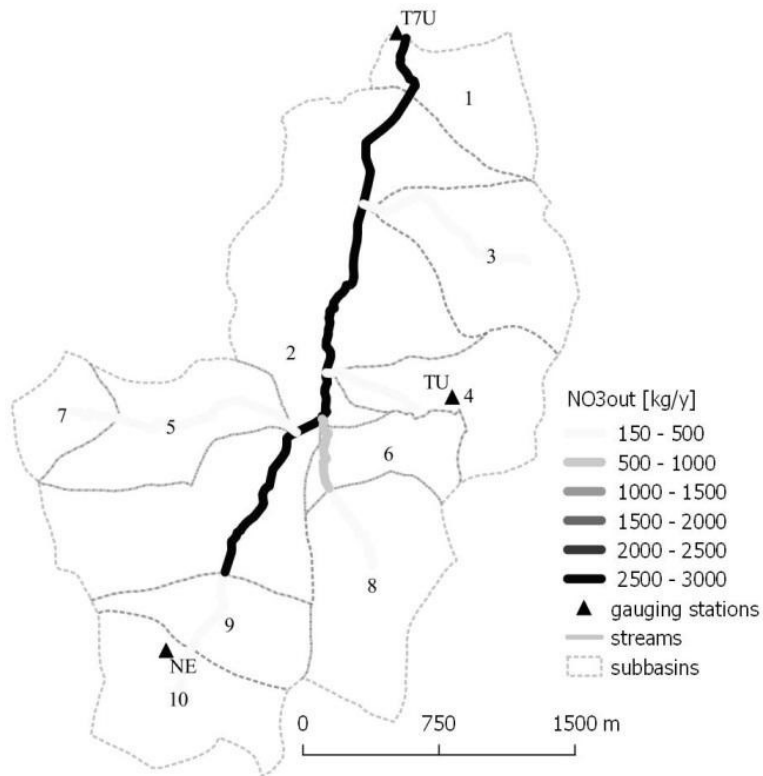
Nastavení rozsahu vybraných parametrů:

Parameter	popis	Min	Max	Units
CN2	Initial SCS runoff curve number	-2	2	--
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	0	1	Days
GW_DELAY	Groundwater delay time	0	500	Days
GWQMN	Treshold depth of water in the shallow aquifer	0	1000	mm
SFTMP	Snowfall temperature	-5	1	C
SMTMP	Snowmelt temperature	0	5	C
EPCO	Plant uptake compensation factor	0.01	1	--
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.01	1	--

Tabulka 14 Rozsah jednotlivých parametrů

Pozorovaná data byla rozdělena do dvou datových souborů, jedna pro kalibraci a druhá pro validaci (Arnold, 2012). Pro účely kalibrace byly použity údaje za roky 2011 - 2013 a od roku 2008 do roku 2010 pro validaci. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo pro rok 2013. Jako výsledek kalibrace byl vložen nový rozsah parametrů. Po spuštění modelu SWAT s novou sadou parametrů bylo provedeno ověření pro dobu 3 let s uspokojivými výsledky. Koefficient Nash-Sutcliffe byl rovný 0,82 a regresní koeficient (R^2) 0,61 indikující přijatelný výkon modelu, podle Engel et al. (2007).

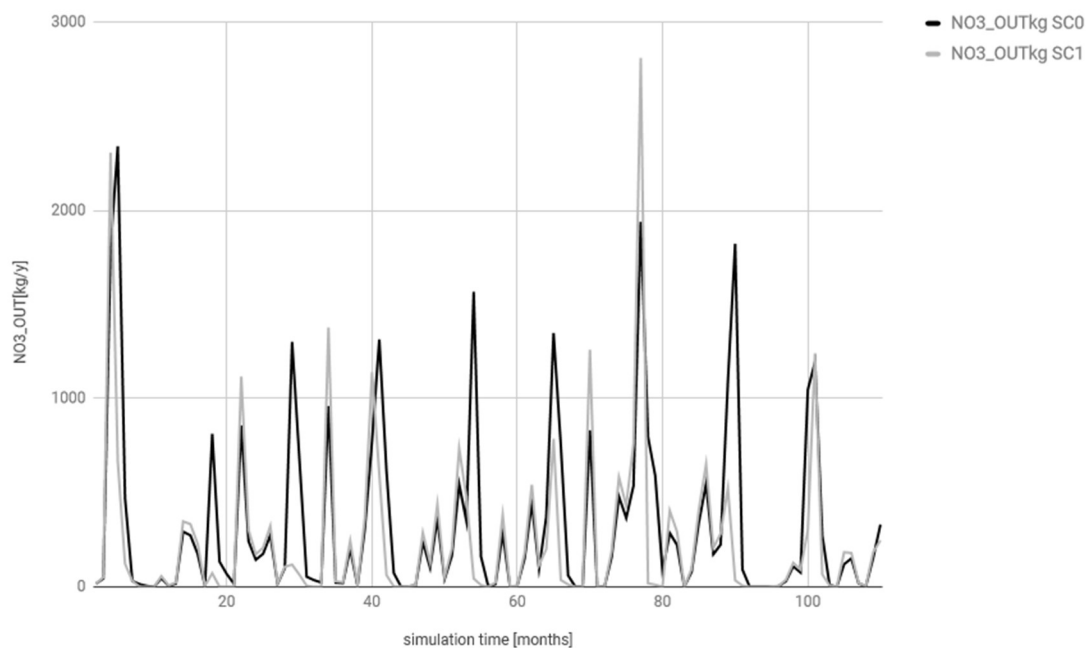
Ve srovnání se simulovanými scénáři lze identifikovat významný pokles nutrientů z hlediska objemu NO_3 ve vodách. SC1 (s 20% vyšší účastí na pastvin) dokázal nižší odtok NO_3 než SC0 (stávající struktura landuse). Zmenšující se podíl orné půdy ve prospěch pastvin snížil přísun živin do potoků. Hnací mechanismus této změny spočívá ve snižování vodní eroze doprovázené sníženým využíváním hnojiv k odstranění části živin migrujících sedimenty. Největší roční změnu lze pozorovat v subpovodí 4, kde snížení NO_3 pro SC1 v proudu dosahuje více než 3krát nižší hodnoty ve srovnání s SC0.(obr 51)



Obrázek 52 množství NO₃ v tocích

Závěry

Na základě modelovaných variant SC0 (současné využití půdy) a SC1 (snížení poměru orné půdy o 20% ve prospěch pastvin) byl posouzen dopad na odtok vody z povodí a zatížení NO₃. Vzhledem k tomu, že hlavní část toku se vyskytuje vúdolnicích (meliorační síť a dočasné přítoky Kopaninského potoka), nedochází k významné změně vodní bilance, avšak u SC1 se rozhodně zvyšuje zadržování v povodí. Na druhé straně snížení zatížení NO₃ kleslo o <40% uvnitř povodí - mění se mezi jednotlivými dílčími subpovodími (obr 52). Vzhledem k omezenému dopadu na samotný tok vody je tento pokles způsoben rozdíly ve správě agrotechniky, kde byly vstupy NO₃ sníženy odpovídajícím způsobem na změnu využití pozemků, tedy především využití hnojiv.



Obrázek 53 NO₃ v Kopaninském potoce - porovnání scénáře SC0 a SC1

4. Diskuse

Výsledky těchto studií jsou srovnatelné se studiiemi v zahraničí, kdy v tomto případě bylo dosaženo velmi dobrých výsledků, jelikož byl model kalibrován v denním kroku, zatímco podobné práce byly kalibrovány v kroku měsíčním. Měsíční krok obecně vykazuje lepší shodu s měřenými daty, nicméně při dobré shodě denního kroku je dosaženo vyšší přesnosti modelu. Jedná se především o středně velká povodí a to ve stejném klimatickém pásu, jako se nachází Česká republika.

V celém světě probíhá velké množství studií využívající model SWAT a v současné době existuje přibližně 3824 odborných článků v recenzovaných časopisech, které se věnují této problematice.

Velmi podobná studie proběhla na severu Německa, na povodí o rozloze 50 km². (Lam 2011). V tomto povodí dosáhli díky využití BMP snížení dusičnanů a dusíku o cca 50%. Je však důležité zmínit, že každá lokalita je vhodná pro pěstování různých plodin a tím pádem se výsledné hodnoty v těchto studiích liší.

Problému vstupních dat pro model se zhostil Camargos a spol.(Camargos,2018), když zpracovali studii povodí o velikosti cca 100 km² a zjistili, že příliš detailní data mohou zhoršovat výstupy modelu. Zpracovali osm různých kombinací vstupních dat do modelu. V mojí práci se osvědčila kombinace různých rozlišení spojená do jedné vrstvy, například spojení corine, copernicus, LPIS a katastrálních map.

K podobným výsledkům jako v mojí práci došla i studie zkoumající vliv rozlišení na kvalitu modelu, která zkoumala vliv velikosti povodí a rozlišení vstupních dat na kvalitu modelu. (Chaplot, 2014)

5. Závěry

V rámci práce byl zpracován přehledný stručný popis vybraných hydrologických bilančních modelů. Pro další práce na vytvoření modelů konkrétních povodí byl použit distribuovaný model SWAT (Soil and Water Assessment Tool – kontinuální, semi-distribuovaný model povodí), vzhledem k jeho možnostem sledování nejen kvantity, ale také kvality vody při dosažení statisticky významné shody s měřenými daty. Dalším důvodem výběru tohoto modelu bylo jeho celosvětové využití, množství publikací a souvisejících aplikací. Správně kalibrovaný model hydrologické bilance je základním stavebním kamenem při modelování managementu v povodí a jako takový umožňuje determinovat způsob pohybu nejen vody, ale také látek v ní vázaných.

Možnost modelování stávajícího managementu a návrhů jeho změn v povodí je z hlediska eliminace rizika eutrofizace unikátní možností, jak testovat jednotlivé scénáře opatření k omezení eutrofizace ještě před jejich samotnou realizací. Jednotlivá navrhovaná opatření je možné finančně vyčíslit a ještě před jejich realizací je možné posoudit jejich efektivnost nejen z hlediska environmentálního přínosu, ale i finančních nákladů. Provedení cost – benefit analýzy, nebylo předmětem této práce, ale prokázání možnosti simulace jednotlivých opatření (z pohledu environmentálních benefitů) je z hlediska jejich realizovatelnosti jedinečnou možností pro ověření efektivnosti vynakládaných prostředků (např. na dotace). Přínosem práce je prokázání možnosti použití modelu SWAT pro zpracování environmentálně a finančně optimálního způsobu sestavení plánu managementu povodí s počitatelnými výstupy na časové ose realizace.

Modelem je možné nastavit nejen samotnou změnu využití půdy, ale také například pěstované plodiny a jejich rotace, použité způsoby orby, hnojiva a použití rostlino-ochranných látek (pesticidy, fungicidy, insekticidy, atp.). Nesnadnou úlohou je vložení existujících melioračních soustav a opatření, vzhledem k jejich částečné nefunkčnosti a obtížné lokalizovatelnosti. Terénním šetřením je možné většinu z nich lokalizovat, nicméně jejich stav a funkčnost lze posoudit jenom obtížně, pokud vůbec.

Předmětem této studie bylo nejen ověřit samotnou vhodnost modelu, ale především navrhnout a následně na modelu simulovat opatření vedoucí ke snížení eutrofizace. Hlavním cílem je vytvoření návrhu komplexní správy povodí vedoucí k omezení rizika eutrofizace a celkovému zlepšení kvality vody v tocích a nádržích a celkově stavu životního prostředí v povodí. Různé postupy managementu (souboru opatření a jejich realizace v čase) vedou ke snížení odnosu živin do toků a zvyšují kvalitu vody jako klíčový faktor eutrofizace nádrže. Tato práce přináší metodologii a systematický přístup pro implementaci integrovaného managementu povodí, který může být použit nejen pro vodní nádrž Trnávka, povodí Kejtovského, nebo Kopaninského potoka, ale také na další povodí nejen vodárenských nádrží. V současné době pobíhá s využitím modelu SWAT zpracování povodí vodní nádrže Hostivař (příspěvek na konferenci Voda 2019 – viz. Příloha).

Jednou z klíčových otázek bylo nalezení optimálního vztahu mezi velikostí zkoumaného povodí, podrobností vkládaných dat a jejich časovou periodou. Nalezení vztahu měřítka povodí a vhodné datové „sady“ je méně viditelným, ale pro praktické využití modelu podstatným přínosem práce. Byla testována povodí od velikosti jednoho pole, případně studované zájmové plochy, až po celá povodí ohraničená rozvodnicí, od velikosti malých povodí v řádu jednotek km² až na úroveň hlavních povodí v řádu 100 a více km². Kvalita vstupních dat, je přímo úměrná kvalitě výsledných hodnot, nicméně není možné používat detailní data při zpracování velkých povodí z hlediska nedostatečného výpočetního výkonu současných běžných počítačů. Například pro modelaci povodí Labe by bylo zcela nevhodné využívat mapu katastru s připojeným využitím plochy. Naopak při modelaci malého povodí např. do 10 km² je nevhodné využít např. Corine, které má na tuto plochu příliš nízké rozlišení.

Vybraný model SWAT se vyznačuje nejen možností modelace hydrologické bilance, ale také bilance látkové, kdy v této studii byly sledovány sloučeniny fosforu a dusíku. Tyto nutrienty jsou základní příčinou eutrofizace vodních nádrží a toků, která významným způsobem snižuje jejich vhodnost pro vodárenské, koupací či jiné využití. V současnosti i vlivem nedostatečných srážek a vysokých letních teplot dochází ve větší či menší míře k eutrofizaci stále většího množství nádrží, což je klíčový a limitující faktor pro využitelnost zadržené vody. Nádrže, jež slouží jako

zdroje pitné vody, jsou z hlediska vodní bezpečnosti největší problém, nicméně i nádrže plnicí funkci například koupací vody, je třeba chránit. Snížením vnosu nutrientů do nádrže z jednotlivých zdrojů v povodí se dá zamezit eutrofizaci. Podle limnologické charakteristiky a charakteru podnebí má každá nádrž jinou citlivost na množství natékajících nutrientů. Pro každou nádrž proto musí být stanovena kritická eutrofizační mez. V současnosti používané nařízení vlády č. 401/2015 sb. pro koncentrace látek na přítoku nezohledňuje individuální charakteristiku nádrží a navíc je její hodnota násobně vyšší než odpovídá současným světovým trendům. Z toho vyplývá, že stávající normy a nařízení jsou většinou stanoveny na příliš vysokou hodnotu, a proto i realizovaná opatření jsou navrhována na příliš „měkký“ cíl a nevedou k eliminaci eutrofizace. Jednou z možných cest je stanovení nikoliv plošného, ale konkrétního limitu na jednotlivé nádrže, který zaručí, že nádrž „nepokvete“. Takovýmto přístupem je například tzv. TMDL (Total Maximum Daily Load), jenž je využíván EPA (Environmental Protection Agency) a USDA (United States Department of Agriculture) pro kontrolu kvality vody v nádržích.

Ke snížení vstupu látek do systému vede celá řada možností. Technicky nejjednodušší je cesta zkvalitnění technologií na čistírnách odpadních vod, výstavba nových čistíren i v menších obcích při aplikaci technologie dosrážení fosforu v odpadní vodě (v současnosti nic takového nařízení vlády pro ČOV zejména v malých obcích nepožadují a tudíž i ochota provozovatelů k jejich zavádění je mizivá). Redukce a vhodná aplikace hnojiv a pesticidů na zemědělských plochách, skladba plodin, anebo například změna využití půdy jsou opatření organizačně-technická, která jsou však nepoměrně náročnější na realizaci a vyžadují součinnost obvykle velkého množství v povodí zemědělsky hospodařících subjektů. Ani k zavádění těchto opatření není na úrovni ČR zatím vytvořen efektivní nástroj pro jejich podporu. Nová zemědělská politika EU je v tomto směru příslibem zlepšení přístupu.

Realizace návrhů komplexního managementu však bývá obtížná a proto je třeba hledat kompromisy mezi bezhlavým zatravňováním / zalesňováním a naopak snahou o co největší zisky ze zemědělských pozemků pomocí nadměrné aplikace hnojiv. Práce se dále zabývá možnostmi využití BAT (Best Available technology) na

ČOV (Čistírny odpadních vod) a BMP (Best Management practice) na zemědělských a jiných plochách.

Pokračování práce by se mělo zaměřit na zpracování dalších povodí a vytvoření republikové vstupní databáze, aby bylo možné bez větších obtíží model spustit v různých lokalitách ČR. Jednalo by se o model s validovanými parametry, a tedy by ho bylo možné aplikovat i na povodí, která nemají kontinuální měření průtoků. Cílem je vytvořit efektivní a operativní nástroj pro modelaci opatření v povodích nejen pro správce toků a nádrží, ale i orgány samosprávy a poskytovatele dotací na realizaci opatření managementu povodí a výběr jejich nákladově nejefektivnější varianty. Velmi důležité je též zmínit možnost modelování vlivu využití různých způsobů hospodaření na klimatické změny a extrémní počasí.

V budoucnu by měl model SWAT vstoupit do povědomí širší odborné veřejnosti a jeho využití by se mělo spojit s plánováním biotechnických úprav krajiny, regulace zemědělského využití krajiny a například i při tvorbě urbanistických studií a územního plánování. Vzhledem k jeho celosvětovému využití, se z něj stal ideální nástroj pro správu managementu především pro správce toků a nádrží a veřejnou správu.

Model Swat byl úspěšně kalibrován a validován na několika územích v rámci České republiky. V rámci projektů byly testovány různé návrhy managementu, vedoucího ke snižování plošného znečištění Dusíkem a Fosforem a snížení eroze. Je zřejmé, že příčinou eutrofizace není pouze plošné znečištění a ČOV, ale celá řada dalších zdrojů, což dokazují i měřená data na vybraných lokalitách. Dalšími zdroji, zejména v povodích s velkým množstvím malých sídel, vysokým podílem melioračních soustav nebo v povodích s významným podílem rekreačního osídlení to jsou dosud nijak neidentifikované zdroje, jejichž vliv můžeme v širším měřítku pouze odhadovat.

V současné době probíhají práce na nové verzi modelu –SWAT+. Nejedná se o finální verzi, nicméně je již funkční a její nesporná výhoda je v možnosti prostorového rozložení jednotlivých HRUs. Je tedy možné modelovat přírodní procesy

v konkrétních, geograficky vymezených lokalitách, nikoliv pouze hromadně v jednotlivých subpovodích (SWAT+, 2019).

6. Zdroje

1. Andrew, R. M., Dymond, J. R. (2007): A distributed model of water balance in the Motueka catchment, New Zealand. *Environmental Modelling & Software* 22: 1519–1528.
2. Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R., and P. M. Allen (2000): Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *J. Hydrology* 227: 21-40.
3. Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., Jha, M. K. (2012): SWAT: Model Use, Calibration, and Validation, *Transactions of the ASABE*. 55(4): 1491-1508. (doi: 10.13031/2013.42256)
4. Bauwe, A., Tiemeyer, B., Kahle, P., Lennartz, B. (2015): Classifying hydrological events to quantify their impact on nitrate leaching across three spatial scales. *J.Hydrol.*, 531, 589–601, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.069>.
5. BEVEN K.J., 1986: Runoff production and flood frequency in catchments of order n : an alternative approach. In: *Scale Problems in Hydrology* (editor GUPTA, V.K. et al.) pp. 107-131. D. Riedel Publishing Comp.
6. Billy C, Birgand F, Ansart P, Peschard J, Sebilou M, Tournebise J. (2013): Factors controlling nitrate concentrations in surface waters of an artificially drained agricultural watershed. *Landscape Ecol.* 2013;28:665–684
7. BLAŽKOVÁ Š., 1993: Srážkoodtokové modely založené na principu jednotkového hydrogramu. *Práce a studie VÚV, sešit, 183, VÚV TGM Praha.*
8. Bonan, G.B. (1996). A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide. NCAR Technical Note NCAR/TN-417+STR. National Center for Atmospheric Research 1-150.
9. Boithias, L., Srinivasan, R., Sauvage, S., Macary, F., Sánchez-Pérez (2013), J.M., Daily Nitrate Losses: Implication on Long-Term River Quality in an

Intensive Agricultural Catchment of Southwestern France, *Journal of Environmental Quality*, doi:10.2134/jeq2011.0367

10. Bormann, H., Breuer, L., Gräff, T., Huisman, J. A. (2007): Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis. *Ecological modelling* 209: 29–40.
11. Boughton, W. C. and Carroll, D. G., 1993. A simple combined water balance/flood hydrograph model. In: Proceedings of the 1993 Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers, Australia, National Conference Publication 93/14, 299-304.
12. Boughton, W. C., 1993. A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. In: Proceedings of the 1993 Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers, Australia, National Conference Publication 93/14, 317-324.
13. Boughton, W. (2004): The Australian water balance model. *Environmental Modelling & Software* 19: 943–956.
14. Boughton, W. (2006): Calibrations of a daily rainfall-runoff model with poor quality data. *Environmental Modelling & Software* 21: 1114–1128.
15. Bracmort KS, Arabi M, Frankenberger JR, Engel BA, Arnold JG (2006): Modeling Long-Term Water Quality Impact on Structural BMPs. *Transactions of the ASABE*. Vol. 49(2): 367-374. (doi: 10.13031/2013.20411)
16. Camargos, C.; Julich, S.; Houska, T.; Bach, M.; Breuer, L. Effects of Input Data Content on the Uncertainty of Simulating Water Resources. *Water* 2018, 10, 621.
17. CALVER A. - WOOD W.L., 1989: On the discretization and cost - effectiveness of a finite element solution for hillslope subsurface flow. *Journal of Hydrology*, 110, pp. 165-179.
18. Central Eastern European SWAT Workshop, RaghavanSrinivasan (June 27- July 1, 2011), WULS-SGGW Water Centre, Warsaw (Poland).

19. Coffey, M. E., Workman, S. R., Taraba, J. L., Fogle, A. W. (2004): Statistical procedures for evaluating daily and monthly hydrologic model predictions. *Trans. ASAE* 47(1): 59-68.
20. Chaplot V., (2014); Impact of spatial input data resolution on hydrological and erosion modeling: Recommendations from a global assessment; *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, ISSN: 1474-7065, Vol: 67, Page: 23-35
21. Chiew, F. H. S., Peel, M. C., Western, A. W. (2002): Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. In *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Chelsea, Michigan: Water Resources Publications, LLC. s. 335–368.
22. Croton, J. T., Bari, M. A. (2001): Using WEC-C, a distributed, deterministic catchment model, to simulate hydrologic responses to agricultural clearing. *Environmental Modelling & Software* 16: 601–614.
23. Croton, J. T., Barry, D. A. (2001): WEC-C: a distributed, deterministic catchment model — theory, formulation and testing. *Environmental Modelling & Software* 16: 583–599.
24. ČSN 75 7455. Jakost vod - Stanovení dusičnanů - Fotometrická metoda s 2,6 - dimethylfenolem - Metoda ve zkumavkách. Praha: Český normalizační institut, 2008. 13 p.
25. ČSN EN ISO 6878. Jakost vod - Stanovení fosforu - Spetrofotometrická metoda s molybdenanem amonným. Praha: Český normalizační institut, 2005. 23 p.
26. ČSN EN 13346. Charakterizace kalů - Stanovení stopových prvků a fosforu - Metody extrakce lučavkou královskou. Praha: Český normalizační institut, 2001.
27. ČSN 736530 – Názvosloví hydrologie, 1985
28. DAMAŠKOVÁ H., 1989 : Podklady primární realizace (Uživatelská příručka - uplatnění modelu SWATRE pro návrh parametrů a prognózu účinnosti odvodnění). ZZ P 06-329- 813-01-03 VÚZZP Praha

29. Doležal, F., Kvítek, T. (2004): The role of recharge zones, discharge zones, springs and tile drainage systems in peneplains of Central European highlands with regard to water quality generation processes. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C. Volume 29, Issues 11-12, Pages 775-785, ISSN 1474-7065.*
30. DURAS JINDŘICH (2015), Co je nového kolem fosforu?. In: *Vodní nádrže 2015*
31. Eckhardt, K., and J. G. Arnold. (2001): Automatic calibration of a distributed catchments model. *J. Hydrology 251(1-2): 103.*
32. Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., Arabi, M. (2007): A hydrologic/water quality model application protocol. *J. American Water Resour. Assoc. 43(5): 1223-1236.*
33. EPA. (2013). *Watershed modeling to assess the sensitivity of streamflow, nutrient, and sediment loads to potential climate change and urban development in 20 U.S. watersheds (final report).* Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency.
34. FEDDES R.A. - BELMANS C. - WESSELING J. G., 1983: Simulation model of the Water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology 63, 3/4: 271-286*
35. Fučík P., Kvítek T., Lexa M., Novák P., Bílková A. (2008): Assessing the Stream Water Quality Dynamics in Connection with Land Use in Agricultural Catchments of Different Scales. *Soil & Water Res 2008;3: 98–112.*
36. Fučík, P.; Zajíček, A.; Duffková, R.; Kvítek, T. (2015): Water Quality of Agricultural Drainage Systems in the Czech Republic — Options for Its Improvement, In *Research and Practices in Water Quality*; Lee, T. S.; InTech: Rijeka, pp. 239-262, <http://dx.doi.org/10.5772/59298> ; ISBN 978-953-51-2163-3
37. Gessesse, B., Bewket, W. and Bräuning, A. (2014), MODEL-BASED CHARACTERIZATION AND MONITORING OF RUNOFF AND SOIL

EROSION IN RESPONSE TO LAND USE/LAND COVER CHANGES IN THE MODJO WATERSHED, ETHIOPIA. Land Degrad. Dev.. doi: 10.1002/ldr.2276

38. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F.(2009), Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling *Journal of Hydrology*, 377 (1-2) , pp. 80-91.
39. Gregar Jan, Gregarová Kateřina, Miloš Gregar, Martin Pečenka (2015), Ověření změny koncentrací N a P z plošného znečištění při různých způsobech zemědělského hospodaření v povodí fáze I. – Nmap, RIV/60460709:41330/15:#0000084
40. HANÁK ROMAN, RYŠAVÝ STANISLAV (2015), Jakostní model povodí VD Vranov, Vodní nádrže 2015; <http://swat.tamu.edu/> (přístup 2017)
41. Her, Y., Frankenberger, J., Chaubey, I., Srinivasan, R.: Threshold Effects in HRU Definition of the Soil and Water Assessment Tool, *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 58(2):367-378 · April 2015 DOI: 10.13031/trans.58.10805
42. Horáková, M.; et al. *Chemické a fyzikální metody analýzy vod*, 2nd ed.; Vydavatelství VŠCHT Praha: Praha, 1989.
43. Horáková, M.; et al. *Analytika Vody*, 2nd ed.; Vydavatelství VŠCHT Praha: Praha, 2007.
44. Janeček, M. – Dostál, D. – Kozlovsky Dufková, J. – Dumbrovský, M. – Hůla, J. – Kadlec, V. – Kovář, P. – Krása Ph.D., D. – Kubátová, E. – Kobzová, D. – Kudrnáčová, M. – Novotný, I. – Podhrázská, J. – Pražan, J. – Procházková, E. – Středová, Ph.D., I. – Toman, F. – Vopravil, J. – Vlasák, J., 2012, Novelizovaná metodika "Ochrana zemědělské půdy před erozí", Protecting agricultural land from erosion, water erosion, wind erosion, soil conservation, surface runoff, 2012, DA - Hydrologie a limnologie, A - Uplatněná certifikovaná metodika, KBÚK, FŽP, Agrární valy Metodika, Osvědčení 1/CZU/2011-14140, Optimalizace nákladů na protierozní opatření, B -

Výsledek je využíván orgány státní nebo veřejné správy, Ústřední pozemkový úřad MZe ČR, 20.01.2012, Smlouva č. 1/72085/2011-14140

45. Konference Voda v Krajině 2013, Praha
46. Koch S., Bauwe A., Lennartz B. (2012), Application of the SWAT Model for a Tile-Drained Lowland Catchment in North-Eastern Germany on Subbasin Scale, *Water Resources Management* 27(3):791-805 · November 2012 DOI: 10.1007/s11269-012-0215-x
47. KOVÁŘ P., 1994: Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Doktorská disertační práce, LF ČZU Praha.
48. KOVÁŘ P. a kol, 1996: Aplikace hydrologických modelů v povodí Rokytenky. Závěrečná zpráva GAČR 103-94-0653: Transportní procesy v pramenných oblastech. Praha, 66 str.
49. Kovář P., Vaššová D. (2011), Model KINFIL Manuál, Katedra Biotechnických Úprav Krajiny, FŽP, ČZU.
50. Krause, P. (2002): Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. *Physics and Chemistry of the Earth* 27: 663–673.
51. Kubátová, E., 2001, protierozní ochrana půdy, cvičení
52. Kulhavý, Z., Kovář, P. (2000), Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí, VÚMOP, Praha. 123 s., ISSN 1211-3972
53. Kulhavý, F. Doležal, P. Fučík, F. Kulhavý, T. Kvítek, R. Muzikář, M. Soukup: Management of agricultural drainage systems in the Czech Republic, *Irrig. Drain.* 2007, 56 (1), 141 – 149, DOI: 10.1002/ird.339.
54. Lam, Q.D., Schmalz, B. & Fohrer, N.: The impact of agricultural Best Management Practices on water quality in a North German lowland catchment; *Environ Monit Assess* (2011) 183: 351. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1926-9>
55. (2011) 183: 351. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1926-9>

56. Larose, M., Heathman, G. C., Norton, L. D., & Engel, B. (2007). Hydrologic and atrazine simulation of the Cedar Creek watershed using the SWAT model. *J. Environ. Qual.*, 36(2), 521-531. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2006.0154>.
57. Laurent, F. and Ruelland, D., 2011. Assessing impacts of alternative land use and agricultural practices on nitrate pollution at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 409(1), pp.440-450.
58. Liu X, Chen Q, Zeng Z., Study on nitrogen load reduction efficiency of agricultural conservation management in a small agricultural watershed. *Water Sci Technol.* 2014;69(8):1689-96. doi: 10.2166/wst.2014.076.
59. MAUSER, W. AND BACH, H. (2008). PROMET – a Physical Hydrological Model to Study the Impact of Climate Change on the Water Flows of Medium Sized, Complex Watersheds, *Journal of Hydrology* (submitted).
60. Mauser, W. and Bach, H.: PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds, *J. Hydrol.*, 376,362–377, 2009.
61. Meals, D.W. et al. (2010): Lag Time in Water Quality Response to Best Management Practices: A Review. *J. Environ. Qual.* 39:85–96 (2010). doi:10.2134/jeq2009.0108
62. Meng, H. S., Maddox, M. C., Sood, A., Brown, C. W., Ferraro, R. R., & Murtugudde, R. (2010). Modeling Rappahannock River basin using SWAT: Pilot for Chesapeake Bay watershed. *Appl. Eng. Agric.*, 26(5), 795-805. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.34948>.
63. Moretti, G., Montanari, A. (2007): AFFDEF: A spatially distributed grid based rainfall runoff model for continuous time simulations of river discharge. *Environmental Modelling & Software* 22: 823–836.
64. Nash, J. E., J. V. Sutcliffe, (1970): River Flow Forecasting through Conceptual Models 1. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
65. NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R. (2005): Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (version 2005), 525 s. Dostupné na: <<http://www.brc.tamus.edu/swat/>>.

66. Neitsch, S.L. et al. (2009) Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2009, September 2011, Texas Water Resource Institute Technical Report No. 406.
67. Niehoff, D., Fritsch, U., Bronstert, A. (2002): Landuse impacts on stormrunoff generation: scenarios of landuse change and simulation of hydrological response in a mesoscale catchment in SW Germany. *Journal of Hydrology* 267: 80–93.
68. Prasch M., T. Marke, U. Strasser, W. Mauser (2011) Large scale integrated hydrological modelling of the impact of climate change on the water balance with DANUBIA, *Advances in Science and Research*, 10.5194/asr-7-61-2011
69. Rahman, Mohammed M., Zhulu Lin, Xinhua Jia, Dean D. Steele, and Thomas M. DeSutter. "Impact of subsurface drainage on streamflows in the Red River of the North basin." *Journal of Hydrology* 511 (2014): 474-483.
70. Reichl, J. P. C., A. W. Western, N. R. McIntyre, and F. H. S. Chiew (2009), Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow, *Water Resour. Res.*, 45, W10423, doi:10.1029/2008WR007248.
71. Richardson, C. W. (1981), Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation, *Water Resour. Res.*, 17(1), 182–190, doi:10.1029/WR017i001p00182.
72. Santhi, C., Arnold, J. G. , J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.
73. Santhi, C., R. Srinivasan, J. G. Arnold, and J. R. Williams. 2003. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in the Big Cypress Creek watershed. In *Proc. Conference: Total Maximum Daily Load (TMDL) Environmental Regulations – II*, 384-394. A. Saleh, ed. St. Joseph, Mich.: ASAE.
74. Sánchez, N., Fernández, J. M., Calerab, A., Torres, E., Gutiérrez, C. P. (2010): Combining remote sensing and in situ soil moisture data for the application

- and validation of a distributed water balance model (HIDROMORE). *Agricultural Water Management* 98: 69–78.
75. Schilling, Keith E., and Calvin F. Wolter. "Modeling nitrate-nitrogen load reduction strategies for the Des Moines River, Iowa using SWAT." *Environmental management* 44, no. 4 (2009): 671-682.
76. Spruill C.A, S. R. Workman, Joseph L Taraba. 2000. Simulation of daily stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers* 43(6):1431
77. Srinivasan, R., Zhang, X., & Arnold, J. (2010). SWAT ungauged: Hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi River basin. *Trans. ASABE*, 53(5), 1533-1546. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.3490>
78. Udias, A.; Malagò, A.; Pastori, M.; Vigiak, O.; Reynaud, A.; Elorza, F.J.; Bouraoui, F. Identifying Efficient Nitrate Reduction Strategies in the Upper Danube. *Water* **2016**, 8, 371, doi:10.3390/w8090371
79. Ulén, B. et al. 2015. Lagged response of nutrient leaching to reduced surpluses at the field and catchment scales. *Hydrol. Process.* 29, 3020–3037 (2015). DOI: 10.1002/hyp.10411
80. Van Meter, Kimberly & Basu, Nandita & Van Cappellen, Philippe. (2016). Two Centuries of Nitrogen Dynamics: Legacy Sources and Sinks in the Mississippi and Susquehanna River Basins: Two Centuries of Nitrogen Dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*. 31. 10.1002/2016GB005498.
81. Vavroš P., 2007, Srovnání výsledků rovnice RUSLE a dynamického erozního modelu SWAT na příkladu povodí Rožnovské Bečvy, GISacek 2007, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic, 2007.
82. VUMOP, 2014, HODNOCENÍ EKONOMICKÝCH ASPEKTŮ PROTIEROZNÍ OCHRANY ZEMĚDĚLSKÉ PŮDY Certifikovaná metodika, Výstup projektu MZE0002704902 Integrované systémy ochrany a využití půdy, vody a krajiny v zemědělství a rozvoji venkova, BRNO

83. Wegehenkel, M., Heinrich, U. , Uhlemann, S. , Dunger, V. , Matschullat, J. (2006): The impact of different spatial land cover data sets on the outputs of a hydrological model: a modelling exercise in the Ucker catchment, North-East Germany . - *Physics and Chemistry of the Earth*.31 (17): 1075-1088.
84. Whyte, J. M., Plumridge, A., and Metcalfe, A. V.: Comparison of predictions of rainfall-runoff models for changes in rainfall in the Murray-Darling Basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 917-955, doi:10.5194/hessd-8-917-2011, 2011.
85. Wigmosta, M. S., Nijssen, B., Storck, P. (2002): The distributed hydrology soil vegetation model. In *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Chelsea, Michigan: Water Resources Publications, LLC. s. 7–42.
86. WILLIAMS J.R. - LA SEUR W.R., 1976: Water Yield Model using SCS Curve
87. Williams, J.R. 1995. Chapter 25: The EPIC model. p. 909-1000. In V.P. Singh (ed.) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications. Numbers. Journal of Hydraulic Division, HY9, pp. 1241-1253.
88. Zajíček, A.; Pomije, T.; Kvítek, T. Event water detection in tile drainage runoff using stable isotopes and a water temperature in small agricultural catchment in Bohemian-Moravian Highlands, Czech Republic. *Environ. Earth. Sci.* 2016, 75:838, DOI 10.1007/s12665-016-5561-1.
89. Zhao, X.; Christianson, L.E.; Harmel, D.; Pittelkow, C.M. Assessment of drainage nitrogen losses on a yield-scaled basis. *Field Crops Res.* 2016, 199, 156-166, DOI:10.1016/j.fcr.2016.07.015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.015>.

Internetové zdroje:

1. Abbaspour Karim B.,
https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf EAWAG, 2015
2. S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams; Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2009; technical report No. 406/ september 2011; <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>

7. Přílohy

OPATŘENÍ V POVODÍ K ZAMEZENÍ EUTROFIZACE KOU PACÍCH NÁDRŽÍ V HL. M. PRAZE

MEASURES TO AVOID EUTROPHICATION OF BATHING RESERVOIRS IN PRAGUE

Gregar J.^{1*}, Petrů J.¹, Gregarová K.¹

¹Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, Kamýcká 129, 165 Praha - Suchbát

*autor pro korespondenci, email: gregarj@fzp.czu.cz

ABSTRAKT

U vod, které jsou zatěžovány nadměrným přísunem živin, dochází ke změně jejich účinnosti (např. z oligotrofie na eutrofii). Klíčovým prvkem eutrofizace je fosfor a jeho sloučeniny. Zvýšený vnos fosforu do povodí nádrže může být jak z bodových, tak z plošných zdrojů znečištění. Nejčastějším průvodním jevem u takto znečištěných vod je masivní rozvoj sinic a zelených řas. Tento druh znečištění se nevyhýbá ani povodí Hostivařské přehrady, která je zájmovým územím projektu. Vysoké koncentrace sinic a řas ve vodní nádrži působí problémy hlavně ve zhoršení organoleptických vlastností vody. Dalším negativním dopadem je produkce toxických látek, které způsobují zdravotní potíže. Bylo zpracováno šest scénářů návrhu managementu, který by měl snížit vnos nutrientů do nádrže a tím pádem zamezit eutrofizaci.

KLÍČOVÁ SLOVA

SWAT, nutrienty, Hostivař, management povodí

ABSTRACT

A water body exposed to excessive loads of nutrients changes its nutrient efficiency (e.g. from oligotrophy to eutrophy). A key element of eutrophication is phosphorus and its compounds. Increased phosphorus input into the basin of a reservoir can be from both point and diffuse sources of pollution. The most frequent accompanying phenomenon in such polluted waters is the massive development of cyanobacteria and green algae. This kind of pollution appears also in the catchment area of the Hostivař reservoir, which is the project's area of interest. The main problem caused by high concentrations of cyanobacteria and algae in the reservoir is the deterioration of organoleptic properties of water. Another negative impact is the production of toxic substances that cause health problems. Six management scenarios were designed to reduce nutrient input into the reservoir and thus prevent eutrophication.

KEYWORDS

SWAT, nutrients, Hostivar reservoir, watershed management

1. ÚVOD

Pro řešení této v současnosti velmi aktuální problematiky eutrofizace bylo zvoleno povodí Hostivařské přehrady – vodní nádrže na vodním toku Botič s velikostí povodí 94,8 km², s významnými přítoky Hájecký potok, Pitkovický (Vinný) potok a Jesenický potok. Povodí

Hostivařské přehrady se nachází v aglomeraci hl. m. Prahy, a tudíž je významně zastavěné a je zde hustá síť dopravní infrastruktury. Zbylé plochy jsou intenzivně zemědělsky využívány (cca 61%). Jen malé procento území je zalesněno (jedná se především o Průhonický park a Milíčovský les). Zkoumán byl i vliv rybníční soustavy v povodí a hospodaření na nich. Tyto rybníky představují současně i významné inkulum fytoplanktonu do VN Hostivař. Projekt se zabývá zejména identifikací zdrojů znečištění reaktivními formami fosforu a dusíku v této oblasti v jednotlivých sub-povodích, jako základní předpoklad k formulaci nápravných opatření k dosažení dobrého ekologického a chemického stavu povrchových vod.

V rámci grantu OPPPR bylo povodí modelováno pomocí modelu SWAT, který je zaměřen nejen na hydrologickou bilanci, ale také na bilanci látkovou, jako je například bilance Fosforu a Dusíku. Jako vstupní data pro model byly použity podklady z ČUZK a ČHMI, doplněné o způsoby hospodaření na zemědělských plochách a dostupné informace o bodových zdrojích ČOV. Kalibrací byla zajištěna správná funkčnost modelu a byly navrženy úpravy s cílem snížení vtoku fosforu do nádrže. Celková přípustná koncentrace byla stanovena na základě limnologického posudku, a to snížit přísun živin 10x. Tedy ze současných 0,1 – 0,2 mg/l na 0,02 mg/l. To znamená, že by přísun P do nádrže měl klesnout z 10 g/m²/rok na ideálních 1,5 g/m²/rok. Kromě opatření na ČOV k dodatečnému srážení fosforu na odtoku, je dále uvažováno vybudování biologických rybníků pod ČOV, které by fungovaly, jako dočišťovací stanice a revitalizační opatření na jednotlivých tocích.

Cílem bylo navržení scénářů sloužícím ke snížení vnosu Fosforu do nádrže. Jedná se především o redukci použití zemědělských hnojiv, eliminaci difúzních zdrojů a o zlepšení technologií při čištění odpadních vod. Velmi důležité je brát povodí jako celek a identifikovat zdroje znečištění již od rozvodnice, jelikož voda tekoucí s sebou nese znečištění, které se nakonec usazuje v nádržích.

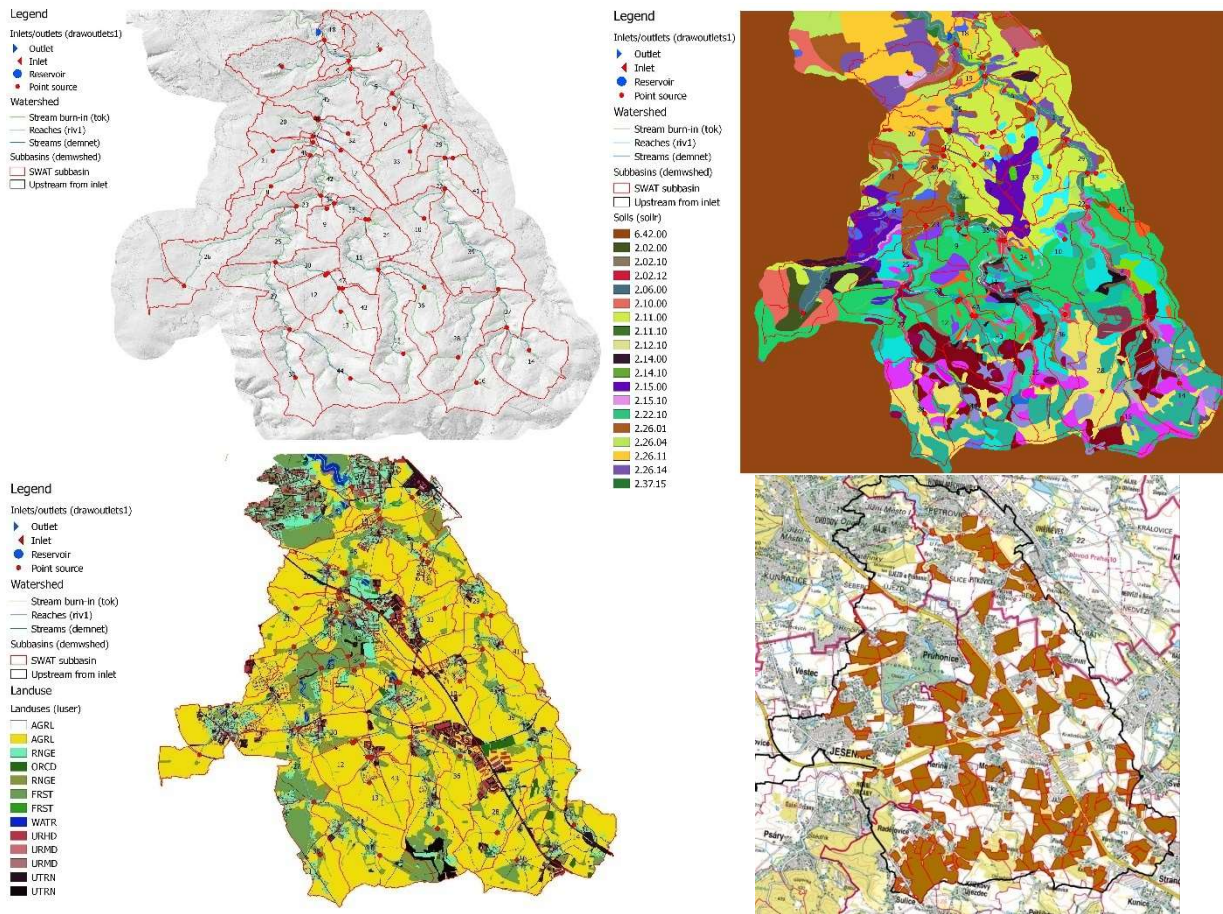
2. MATERIÁL A METODY

K popisu povodí VN Hostivař byl použit model SWAT (Soil and water assessment tool), (Arnold 2012). Jedná se o model využívaný po celém světě s velkou uživatelskou základnou a pod záštitou USDA (United States department of agriculture). Byl použit 3D model terénu z CUZK – model terénu 5. generace. Jako zdroj meteorologických dat z CHMI byly použity minimální a maximální teploty, objemy srážek, solární radiace, rychlosti větru a relativní vlhkosti na několika přílehlých meteorologických stanicích. Dále byl použit LandUse ze dvou různých zdrojů (CUZK a CLC 2018). Corine bylo doplněno detaily z katastrálních map. Půdní mapa byla odvozena z mapy BPEJ a parametry byly odvozeny z půdních sond (VÚMOP). Veškeré mapy byly převedeny do rastrové podoby. Model byl spuštěn pro období deseti let do roku 2016.

Jako další vstupy do modelu byly použity informace z čistíren odpadních vod a dostupných měření. Na zemědělských pozemcích byla simulována stávající rotace plodin, včetně způsobů a množství hnojení. Dále byla simulována meliorační síť, která má velký vliv na dobu zdržení vody v povodí.

Celé povodí bylo rozděleno na 47 dílčích subpovodí (viz. Obrázek 1), která fungují jako samostatné celky. Tato povodí byla dále rozdělena na 8167 jednotlivých HRU (hydrological response unit), které slouží jako základní jednotka při modelování. Je to unikátní kombinace

sklonu, typu půdy a landuse. Jako uzávěrový profil byl použit kontrolní profil u nátoku do nádrže, kde probíhá kontinuální měření. Toto měření bylo použito pro potřeby kalibrace.



Obr. 1. Rozdělení povodí vodní nádrže Hostivař na 47 jednotlivých subpovodí a jednotlivé vstupní údaje, jako je landuse a pedologická mapa. Obrázek vpravo dole zobrazuje erozně ohrožené plochy.

V poslední fázi bylo vytvořeno šest scénářů, které byly postupně ověřeny modelem SWAT. Prvním je eliminace bodových zdrojů pomocí rekonstrukcí stávajících a výstavbou nových ČOV. Druhý scénář bere základ z prvního scénáře a přidává výstavbu nových nádrží. Třetí scénář opět vychází z prvního a modeluje revitalizaci vodních toků. Čtvrtý scénář modeluje opatření nižší kategorie na zemědělské půdě (změna osevních postupů a využití agrotechniky) a pátý modeluje opatření vyšší kategorie (změna půdy na TTP, a technická opatření - například retenční průleh, mez s retenčním průlehem a pásem trvalého travního porostu, retenční příkop, odváděcí příkop, odváděcí průleh, svodný příkop a svodný průleh). Šestý scénář kombinuje všechny předchozí scénáře a dává je dohromady. Měl by sloužit jako optimální návrh managementu v povodí.

3. VÝSLEDKY A DISKUSE

Modelování procesů v přírodě může být značně komplikované. Model SWAT je velice komplexním modelem, umožňujícím modelování nejen hydrologických procesů, ale také

procesů chemických, především pohyb látek v povodí, jako je například Fosfor a Dusík. Model již před kalibrací vykazoval celkem solidní výsledky, kdy NS (Nash – Sutcliffe) dosahoval hodnoty 0,5. Tím pádem se dá říci, že model je přijatelně přesný a tedy je možné ho využít pro modelování procesů v povodí a zjistit účinnost jednotlivých navržených opatření.

Citlivostní analýza jednotlivých kalibrovaných parametrů ukázala, že vysokou citlivostí se při kalibraci vyznačovalo hlavně zdržení vody v podzemních vrstvách a množství podzemní vody v nenasycené zóně.

Jednotlivé scénáře byly navrženy a zpracovány také po finanční stránce. Jako neoptimálnější se jeví scénář poslední, který kombinuje všechna navržená opatření. Jedná se o finančně nejnáročnější variantu, nicméně redukce fosforu se v tomto případě dostává na únosnou míru.

Náklady na plánovaná opatření

- Náklady na plošná opatření na zemědělské půdě
 - Vyšší opatření (změna z orné půdy na Trvalé travní porosty, technická protierozní opatření) – 11 501 000 Kč
- Náklady na opatření na vodních tocích
 - Revitalizace toků – 136 237 000 Kč
 - Výstavba 4 vodních nádrží – 283 066 000 Kč
 - Výstavba 6 suchých nádrží – 176 510 000 Kč
- Náklady na opatření na ČOV
 - Nové ČOV – 40 528 900 Kč
 - Modernizace stávajících ČOV – 4 500 000 Kč

Celková částka všech opatření cca 662 342 900 Kč

Všechna tato opatření vedou k výrazné redukci vnosu fosforu do nádrže. Vzhledem k finanční náročnosti jednotlivých opatření bude třeba vyhodnotit, která opatření jsou vhodná a která nemají příliš velký účinek na redukci fosforu.

4. ZÁVĚRY

Vodní nádrž Hostivař trpí eutrofizací a i přes využití různých technologií přímo v nádrži (dosrážení fosforu síranem železitým, anebo využití přístroje emitujícího vlnění), je z dlouhodobého hlediska důležité neřešit pouze nádrž jako takovou, ale především celé povodí, které je zdrojem látek způsobujících eutrofizaci nádrže.

Model SWAT se osvědčil, jako plnohodnotný nástroj pro tvorbu managementu povodí. Práce s modelem SWAT vyžaduje velké množství vstupních dat, které je třeba správně upravit do požadovaného formátu. Současně jsou některá vstupní data těžko dostupná (hospodaření na zemědělských plochách – například způsob a množství aplikovaných hnojiv), nebo jsou velmi finančně náročná na pořízení. Pokud by se podařilo získat vstupní data pro celou Českou republiku, dal by se model aplikovat na všechna naše povodí a zpracovat komplexní plán managementu na redukci pohybu nutrientů v tocích a nádržích. Cílem dalších prací je definovat konkrétní plán managementu povodí na základě nákladově nejefektivnějších opatření vedoucích k dosažení eutrofizačního limitu


PODĚKOVÁNÍ

Publikace byla vytvořena v rámci projektu Strategie zajištění udržitelného managementu povodí ovlivňující kvalitu vody v nádržích významných z hlediska potřeb Hl.m.Prahy prostřednictvím referenčního pracoviště SWAT – Operační program Praha - pól růstu ČR. Vstupní data pro bodové zdroje byla poskytnuta 1. SČV, a.s.

SEZNAM LITERATURY

Arnold, J.G., D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. van Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, M. K. Jha. 2012. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*. Vol. 55(4): 1491-1508.

Katalogový list odběrného místa č. 037_2 (příklad)

Tok: Novomlýnský potok	Obec:
Kraj: Vysočina	ORP: Pelhřimov
ID toku: 126670005700	Hydrologické pořadí: 1-09-02-037
Plocha povodí: [km ²]	Délka toku: [km]
Zeměpisné souřadnice:	
49°29'10,8" v.d.	14°56'47,6" s.š.
Mapa:	

Odběrné místo:

Odběrné místo – popis:

Odběrné místo –
fotodokumentace:



Chemismus vody:

Měření číslo	Datum měření	P-PO ₄ ³⁻ [mg/l]	P _c [mg/l]	N-NO ₃ ⁻ [mg/l]	N _{amon} [mg/l]	CHSK [mg/l]
1	24.9.2014	0,076	0,076	3,86		
2	7.1.2016	0,005	0,022	3,47		
3	15.6.2016	0,085	0,131	5,213		
4	23.5.2017	0,01	0,09	5,63		

Počasí při odběru

Datum odběru:	Počasí	Teplota
24.9.2014	Slunečno	17°C
7.1.2016	Polojasno, sníh	-1°C

15.6.2016	Přeháňky	15°C
23.5.2017	Jasno	20°C

Jan Gregar

Narozen:11.02.1983 v Praze

Adresa:Kopanina 365/2, Praha 13, 155 00

E-mail:gregarj@fzp.czu.cz

Vzdělání

2013 – 2019 : Doktorské studium
 Krajinářství
 ČZU v Praze, fakulta životního prostředí

2011 – 2013: Magisterské studium
 Krajinářství
 ČZU v Praze, fakulta životního prostředí

2005 – 2010: Bakalářské studium
 Krajinářství
 ČZU v Praze, fakulta životního prostředí

Článek impaktovaný

GREGAR, J. – KOVÁŘ, P. – BAČINOVÁ, H. – BAŽATOVÁ, T. Comparison of Water Regimes of Two Dump Catchments in the Krušné hory Mts. (Czech Republic) in Dry Years Using a Hydrological Balance. . *Soil and Water Research*, 2017, roč. 2017, č. 12, s. 137-143. ISSN: 1801-5395.

FEDOROVA, D. – KOVÁŘ, P. – GREGAR, J. – JELÍNKOVÁ, A. – NOVOTNÁ, J. The Use of Snyder Synthetic Hydrograph for Simulation of Overland Flow in Small Ungauged and Gauged Catchments. *Soil and Water Research*, 2018, roč. 13, č. 4, s. 185-192. ISSN: 1801-5395.

GREGAR, J. – PETRŮ, J. – NOVOTNÁ, J. EVALUATION OF THE SWAT MODEL AS AN INTEGRATED MANAGEMENT TOOL IN DRINKING WATER SUPPLY CATCHMENT ŠVIHOV. *Soil and Water Research*, 2019, roč. 14, č. 2, s. 76-83. ISSN: 1801-5395.

Stať ve sborníku

GREGAROVÁ, K. – GREGAR, J. – **GREGAR, M. Identifikace zdrojů znečištění fosforem a dusíkem pomocí modelu SWAT a jejich komplexní metoda evidence. In *Voda 2015 Poděbrady, 16.-18. září 2015, Sborník přednášek a posterových sdělení 16.09.2015, Poděbrady*. Brno: Tribun, EU, 2015. s. 201-204.

GREGAR, J. – GREGAROVÁ, K. – **GREGAR, M. Model SWAT jako nástroj integrovaného managementu povodí. In *Voda 2015 Poděbrady, 16.-18. září 2015, Sborník přednášek a posterových sdělení 16.09.2015, Poděbrady*. Brno: Tribun, EU, 2015. s. 47-52.

Certifikovaná metodika, postup, mapa

GREGAR, J. – **GREGAR, M. – GREGAROVÁ, K. – **PEČENKA, M. Ověření změny koncentrací N a P z plošného znečištění při různých způsobech zemědělského hospodaření v povodí fáze I. – Nmap, Verifying changes in the concentration of N and P from diffuse pollution in different ways of farming in the catchment Phase I - Nmap, nutrients, Trnavka, water treatment plant, 2015, DK - Kontaminace a dekontamin.půdy vč. pesticidů, D - Specializovaná mapa s odborným obsahem (Nmap), GREG/02/15, Mapa byla vytvořena v prostředí programu ArcGIS, je ve formátu PDF. Je vybavena technickou zprávou popisující konkrétní součásti mapy., Mapa znázorňuje plošné znečištění v povodí VD Trnávka. Slouží pro účely minitoringu a pro rozhodování o lokalitách, ve kterých by mělo dojít ke změně managementu., B - Výsledek je využíván orgány státní nebo veřejné správy, ,

GREGAR, J. – GREGAROVÁ, K. – **GREGAR, M. – **GREGAR, M. Vliv rekonstrukce ČOV Pacov na změny koncentrací N a P v povodí – Nmap, influence of Pacov WWTP reconstruction on changes in the concentration of N and P in the basin - Nmap, wwtp, pacov, waterbasin, nutrients, 2015, DJ - Znečištění a kontrola vody, D - Specializovaná mapa s odborným obsahem (Nmap), greg/01/15, Mapa byla vytvořena v prostředí programu ArcGIS, je ve formátu PDF. Je vybavena technickou zprávou popisující konkrétní součásti mapy., Mapa znázorňuje plošné znečištění v povodí VD Trnávka. Slouží pro účely minitoringu a pro rozhodování o lokalitách, ve kterých by mělo dojít ke změně managementu., B - Výsledek je využíván orgány státní nebo veřejné správy, ,

GREGAR, J. – **GREGAR, M. – VYMAZAL, J. Návrh optimálního režimu plošných zdrojů vedoucí k minimalizaci zátěže N a P, Optimal management of diffuse sources for N and P pollution minimalization, nutrients, SWAT, Trnava, , 2016, DJ - Znečištění a kontrola vody, D - Specializovaná mapa s odborným obsahem (Nmap), greg/06//16, Mapa byla vytvořena v prostředí programu QGIS, je ve formátu PDF. Je vybavena technickou zprávou popisující konkrétní součásti mapy., Mapa znázorňuje plošné znečištění v povodí VD Trnávka. Slouží pro účely minitoringu a pro rozhodování o lokalitách, ve kterých by mělo dojít ke změně managementu., C - Výsledek je využíván bez omezení okruhu uživatelů, ,

GREGAR, J. Ověření změny koncentrací N a P z plošného znečištění při různých způsobech zemědělského hospodaření v povodí - fáze II. - Nmap, Verifying changes in the concentration of N and P from diffuse pollution in different ways of farming in the catchment Phase II. - Nmap, Nnutrients; Trnavka; water treatment plant, 2016, DK - Kontaminace a dekontamin.půdy vč. pesticidů, D - Specializovaná mapa s odborným obsahem (Nmap), GREG/12/16, Mapa byla vytvořena v prostředí programu QGIS, je ve formátu PDF. Je vybavena technickou zprávou popisující konkrétní součásti mapy., Mapa znázorňuje plošné znečištění v povodí VD Trávka. Slouží pro účely minitoringu a pro rozhodování o lokalitách, ve kterých by mělo dojít ke změně managementu., C - Výsledek je využíván bez omezení okruhu uživatelů, TAČR TA04021421-2016V004, 01.01.2017,

Ostatní výsledky, které nelze zařadit do žádného z výše uvedených druhů výsledku

GREGAR, J. SWAT – Metoda sledování, vyhodnocování a modelování změn kvality vody v hydrologicky definovaných územích. 2014, 10. bienální konference VODA 2013;

Granty

Spoluřešitel: TAČR TA04021421 2015 - 2018

Hlavní řešitel: OPPPR 2018 - 2020

Výuka

Výuka předmětu Správa a řízení povodí

Výuka předmětu Malé vodní toky

Vedení bakalářských prací