

Typová lokalita Tulešice a modelování přírodě blízkých  
opatření modely Bilan, HEC-HMS a HYPE

**Adam Vizina, Miriam Dzuráková a kol.**

**Název a sídlo organizace:**

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Podbabská 2582/30 Praha 6 160 00

**Zadavatel:**

Odbor ochrany vod

**Zahájení a ukončení úkolu:**

duben 2017 - duben 2018

**Místo uložení zprávy:**

VÚV TGM, v.v.i.

**Ředitel:**

Ing. Tomáš Urban

**Náměstek ředitele pro výzkumnou a odbornou činnost:**

Ing. Libor Ansorge, Ph.D.

**Vedoucí odboru:**

Ing. Anna Hrabánková

**Řešitelé:**

Ing. Adam Vizina, Ph.D., Ing. Miriam Dzuráková, Ing. Pavla Štěpánková, Ph.D., Doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D., Ing. Roman Kožín, Ing. Adam Beran, Ing. Luděk Strouhal, Ph.D.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
1.1	Metodika řešení . . . . .	3
1.1.1	Metoda CN křivek . . . . .	3
1.1.2	Hydrologický model Bilan . . . . .	5
1.1.3	Model HEC-HMS . . . . .	6
1.1.4	Model HYPE . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Modelování</b>	<b>9</b>
2.1	Opatření . . . . .	11
2.1.1	Vodní nádrž (odkaz na katalog) . . . . .	11
2.1.2	Opatření na stávající nádrži ## Vodní nádrž (odkaz na katalog) . . . .	13
2.1.3	Revitalizace vodního toku a nivy (odkaz na katalog) . . . . .	13
2.1.4	Agrotechnická opatření (odkaz na katalog) . . . . .	13
2.1.5	Organizační opatření – vyloučení širokořádkových plodin (odkaz na katalog) . . . . .	13
2.2	Klima . . . . .	13
2.3	Návrhové srážky . . . . .	15
2.4	Analýza trendů . . . . .	16
2.5	Výsledky modelování hydrologické bilance modelem Bilan . . . . .	17
2.6	Výsledky modelování modelem HEC-HMS . . . . .	18
2.7	Výsledky modelování modelem HYPE . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Závěr</b>	<b>24</b>

## Seznam obrázků, map a grafů

1	Umístění povodí . . . . .	10
2	Umístění povodí (satelitní mapa) . . . . .	11
3	Navržená společná zařízení na ortofoto (Zdroj: ČÚZK) . . . . .	12
4	Měsíční srážkové úhrny za období 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015 ve formě boxplotů . . . . .	14
5	Průměrné měsíční teploty vzduchu za období 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015 ve formě boxplotů . . . . .	14
6	Návrhové srážky s dobou opakování 2, 5, 10, 20 a 50 let . . . . .	15
7	Průběh 5-min intenzit návrhových srážek . . . . .	16
8	Rozdělení jednotlivých typů návrhové srážky . . . . .	16
9	Analýza trendů srážek a teplot vzduchu pomocí Mann-Kendall testu . . . . .	17
10	Hodnoty CN pro zájmové území a různé vláhové podmínky . . . . .	17
11	Průměrné měsíční odtokové výšky ve formě boxplotů pro jednotlivé varianty hodnocení . . . . .	18
12	Změny měsíčních odtokových výšek ve formě boxplotů (pře opatřením a po realizaci opatření) . . . . .	19
13	Měsíční odtokové výšky za období 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015 ve formě boxplotů bez opatření (BEZ) a s opatřením (OP) . . . . .	20
14	Návrhové průtoky dle N - letostí pro jednotlivé typy vln (čárkovaně-před opatřením, plně-po opatření) . . . . .	21
15	Anorganický dusík . . . . .	22
16	Organický dusík . . . . .	23
17	Pevný fosfor . . . . .	23
18	Rozpustný fosfor . . . . .	24

## Seznam tabulek

1	Hodnoty CN II pro jednotlivé kategorie půdního pokryvu a hydrologické skupiny půd . . . . .	4
---	---	---

2	Hodnoty CN II pro jednotlivá opatření a hydrologické skupiny půd . . . . .	26
3	Vyhodnocení krátkodobých srážko-odtokových epizod . . . . .	27

# 1 Úvod

V předložené studii je rámcově kvantifikován vliv přírodě blízkých retenčních opatření na hydrologický systém jednotlivých povodí. Navržený postup umožňuje stanovit hodnoty parametrů modelů Bilan a HMS pro povodí, jehož hydrologický systém je ovlivněn plošnými a liniiovými přírodě blízkými retenčními opatřeními. Cílem je vyhodnocení jednotlivých opatření jak na dlouhodobý hydrologický režim, tak na extrémní odtoky v daných lokalitách.

Hodnocení jednotlivých opatření bylo provedeno v následujících scénářích:

1. bez opatření - normální stav (pro dlouhodobou bilanci)
2. bez opatření - kritický stav (pro extrémní odtoky)
3. navržená opatření - normální stav (pro dlouhodobou bilanci)
4. navržená opatření - kritický stav (pro extrémní odtoky)

## 1.1 Metodika řešení

Pro hodnocení ovlivnění odtokového režimu byla použita metoda SCS-CN v kombinaci se dvěma hydrologickými modely. Posouzení vlivu na dlouhodobou hydrologickou bilanci bylo provedeno pomocí modelu Bilan, pro posouzení vlivu na extrémní odtoky byl využit konceptuální model HMS a pro hodnocení kvality vody model HYPE.

### 1.1.1 Metoda CN křivek

Metoda SCS-CN je v ČR známa jako metoda odtokových křivek (CN z anglického Curve Number) je založena na experimentálním výzkumu. Metoda je celosvětově oblíbená vzhledem ke své jednoduchosti a stále se hojně využívá, přestože má mnohá teoretická omezení. Používá se ke stanovení velikosti přímého odtoku (povrchový odtok plus rychlý podpovrchový odtok) na základě znalosti úhrnu příčné srážky a hydrologických vlastností půdy a půdního pokryvu. Metoda byla testována a ověřena mnohými výzkumy a studii odtokových poměrů. V malých povodích existuje dobrá korelace mezi naměřenou výškou odtoku a výškou odtoku stanovenou metodou SCS-CN. Průměrné hodnoty CN pro libovolné území lze snadno určit z běžných datových podkladů s využitím nástrojů GIS. Metoda CN křivek může být použita při navrhování vodohospodářských opatření a drobných staveb nacházejících se v ploše povodí nebo na vodních tocích do velikosti povodí  $5 \text{ km}^2$  (Havlík a Fremrová, 2010). Mezi opatření a stavby prováděných v ploše povodí patří např. technická protierozní opatření jako jsou

dráhy soustředěného povrchového odtoku, zatravněné údolnice, průlehy, záchytné příkopy nebo zasakovací pásy, mezi typické stavby na malých vodních tocích pak patří malé vodní nádrže nebo suché nádrže (Smelík, 2016).

Metoda byla odvozena na zemědělsky využívaných povodích, jejichž plocha není větší než  $10\text{km}^2$ . Zejména pro velká povodí je potřeba u výsledků výpočtu počítat se značnými nepřesnostmi. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost metody zejména pro extrémální úlohy je časové rozložení intenzit srážek, které metoda CN nezohledňuje a pro jakýkoliv zvolený průběh srážky dává totožný objem odtoku. Průměrná hodnota CN se pro konkrétní území určuje jako plošný vážený průměr hodnot pro jednotlivé pozemky. Tato detailní čísla se stanovují obvykle podle metodických tabulek. Pro potřeby projektu byly hodnoty CN převzaty z originální metodiky (SCS, 1986). Pro přiřazení CN k elementárním odtokovým plochám je potřeba znát druh půdního pokryvu (PP) a hydrologickou skupinu půd (HSP). Datová vrstva PP byla odvozena ze ZABAGED se zjednodušením na 10 kategorií povrchu. Pro určení hydrologické skupiny půd byla využita volně dostupná data BPEJ pro zemědělskou půdu a vrstva Lesních typů od ÚHÚL překlasifikovaná na HSP dle metodiky (Macků, 2012). Tabelované hodnoty CN se zpravidla vztahují k průměrnému vlhkostnímu stavu danému indexem předchozí srážky (IPS2), pro potřeby extrémálního modelování byly hodnoty CN II dále přepočteny i pro nasycený stav daný indexem IPS3. Pro každé řešené území byly určeny průměrné hodnoty CN II a CN III, které byly následně přepočteny na jim příslušnou retenci. Tyto hodnoty jsou nezbytné pro stanovení parametru  $S_{pa}$  v hydrologickém modelu BILAN a objem přímého odtoku v modelu HMS. V následující tabulce 1 jsou uvedeny tabelované CN II hodnoty pro jednotlivé kombinace HSP a PP.

Tabulka 1: Hodnoty CN II pro jednotlivé kategorie půdního pokryvu a hydrologické skupiny půd

<b>Typ</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Orná půda (úhor/obilniny)	77/64	86/75.5	91/83.5	94/87.5
Chmelnice	40.8	63	74.8	80.8
Vínice	40.8	63	74.8	80.8
Sad	39.5	62	74.5	80.5
Trvalý travní porost	34.5	59.5	72.5	79
Zahrada, park	49	69	79	84
Lesní půda se stromy	30	55	70	77
Křovinaté porosty	32.5	57	70.5	77.5
Vodní plocha	98	98	98	98
Antropogenizované plochy	81	88	91	93

Hodnoty CN II pro jednotlivá navržená opatření byly určeny podle originální metodiky (SCS, 1986) tak, že jim byly přiřazeny hodnoty CN podle charakterově nejbližší kategorii půdního pokryvu. Rozdíly v hodnotách CN oproti původnímu stavu udávají změnu v odtokových poměrech způsobené daným typem opatření, výsledné hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 2. Hodnoty -1 označují opatření modelovaná jiným způsobem, než změnou CN.

### 1.1.2 Hydrologický model Bilan

Pro modelování hydrologické bilance byl použit model Bilan, který je vyvíjen více jak 15 let na oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v.v.i. Model počítá v denním či měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Odtok je modelován jako součet tří složek: dvě složky přímého odtoku (zahrnující i hypodermický odtok) a základní odtok (Vizina et al., 2015). Pro modelování hydrologické bilance byla použita měsíční verze modelu, která má 8 parametrů. Pro samotný odtok má největší význam parametr  $Spa$ , který udává retenci půdy v povodí a parametr  $Grd$  udávající odtok ze zásob podzemních vod (základní odtok).

Vstupem do modelu jsou denní či měsíční:

- srážkové úhrny [mm]
- průměrné teploty [st. C]
- průměrná vlhkost vzduchu [%]
- pozorované odtokové výšky [mm]
- užívání vody
- potenciální evapotranspirace [mm]

Pro hodnocení se využilo přístupu práce (Máca et al., 2016), kde pro stanovení parametru  $Spa$  byl identifikován následující lineární model na základě krokové regrese:

$$Spa = 0,71S_3 + 88,91D_d - 8,89St + 65,76, \quad (1)$$



kde hlavní soubor deskriptorů je tvořen  $S_3$  maximální retencí pro II. typ předchozích vláhových podmínek [mm];  $D_a$  je hustota říční sítě povodí [ $km/km^2$ ] a  $St$  průměrný sklon říční sítě v [%]. Celý soubor představuje statisticky významné vstupní veličiny, což bylo potvrzeno výsledky F testu a t-testů, koeficient determinace lineárního modelu je roven 0,33.

Pro parametr  $Grd$  byl krokovou regresí stanoven následující lineární model:

$$Grd = 0,02St - 0,003S_{max} + 0,23, \quad (2)$$

kde soubor deskriptorů je tvořen  $St$  průměrným sklonem říční sítě v [%],  $S_{max}$  maximálním lokálním sklonem v povodí v [%]. Opět výsledný model obsahuje statisticky významné vysvětlující geomorfologické veličiny podle F testu a t-testů, koeficient determinace je roven 0,17.

Pro samotné stanovení parametrů modelu byly vypočteny pro jednotlivá povodí hydrogeomorfologické charakteristiky jako:

- hustota říční sítě,
- průměrný sklon říční sítě,
- sklonitost povodí,

kteří jsou také vstupem pro odvození parametrů hydrologického modelu.

### 1.1.3 Model HEC-HMS

Pro hydrologickou praxi velmi dobře známý HEC-HMS je veřejně dostupný a bezplatně poskytovaný nástroj vyvíjený v americkém Hydrologic Engineering Center. Jedná se o softwarové prostředí umožňující využití řady výpočetních modelů a metod, z nichž asi nejrozšířenější je metoda odtokových křivek SCS-CN. Výstupem metody je odtoková výška nebo také úhrn efektivní srážky. S využitím vstupního hyetogramu příčinné srážky lze s touto metodou odvodit i hyetogram efektivní srážky. Velkou nevýhodou této metody je, že hodnota výsledné odtokové výšky není závislá na časovém rozložení příčinné srážky. Odtoková výška ze dvou srážek s totožným úhrnem ale s průběhy např. v podobě rovnoměrného deště nízké intenzity a přívalovou srážkou je rovněž totožná, což neodpovídá fyzikálním principům tvorby přímého odtoku. Z tohoto důvodu je třeba opatrnosti při interpretaci výsledků modelu, neboť objemy odtoku i kulminační průtoky mohou být u přívalových srážek podhodnoceny.

Pro určení výsledného odtoku z příčinné srážky je nutné hyetogram efektivní srážky získaný metodou SCS-CN transformovat do odtokové odezvy. V HMS lze k tomuto účelu využít opět

řadu metod, nejznámější je pravděpodobně metoda jednotkového hydrogramu. Jedná se o jedno- či víceparametrickou matematickou funkci rozkládající jednorázový srážkový impulz do odtokové vlny. Parametry určující tvar hydrogramu lze odvodit často z hydro-morfologických charakteristik povodí, například maximální délky odtokové dráhy a průměrného sklonu povodí.

Pro určení dopadů navržených opatření na extrémní odtoky byly v HMS sestaveny modely povodí ve všech řešených lokalitách a to ve dvou variantách – před a po realizaci opatření. Podle velikosti povodí a umístění případných retenčních prvků na vodních tocích sestával model z jednoho až šesti dílčích podpovodí. Pokud realizací navrženého opatření došlo ke změně hydrologického povodí, byla tato skutečnost v modelu zahrnujícím opatření rovněž reflektována rozšířením plochy zdrojových povodí. Pro určení objemu odtoku byly použity průměrné hodnoty CN II spočtené dle 1 a 2, u orné půdy pak byly použity hodnoty pro nejvíce rizikový scénář, tedy holý úhor. Pro transformaci odtoku byla zvolena metoda SCS jednotkového hydrogramu, která vyžaduje pouze jeden parametr, dobu zpoždění, určenou z hodnoty CN II, maximální délky odtokové dráhy a průměrného sklonu povodí. Poslední dvě jmenované hodnoty byly určeny na základě DMT z rozlišením 10 m s využitím hydrologických nástrojů v prostředí ArcGIS.

Všechny modely povodí byly zatíženy sadou šestihodinových návrhových srážek s dobou opakování  $N = 2, 5, 10, 20$  a 50 let a to v několika variantách průběhu intenzity srážky. Návrhové úhrny byly určeny individuálně pro každé povodí, ale shodně pro všechna dílčí podpovodí v rámci řešeného povodí. Úhrny byly získány pomocí webové processingové služby (WPS) poskytované pracovištěm ČVUT <http://rain.fsv.cvut.cz/webapp/webove-sluzby/>.

Krátkodobé srážky, které jsou nejčastější příčinou extrémních odtoků z malých povodí, se vyznačují značnou časovou variabilitou průběhu. (Müller et al., 2017). Odvodili na území ČR šest typických průběhů šestihodinových srážek A-F včetně četnosti jejich výskytu v závislosti na poloze a době opakování. Stejně jako návrhové úhrny byly tyto četnosti výskytu ve všech povodích získány s využitím zmíněné WPS služby. Pro modelování v HMS pak byly vybrány typy průběhů s významným zastoupením (více než 17%) při dvou a více dobách opakování. Ve většině případů se jedná o průběhy typické pro přívalové srážky, pouze typ F je charakteristický pro frontální události a předběžné analýzy předchozích podmínek ukazují na častý příchod tohoto typu srážky do již nasycených podmínek. Proto byly srážky s průběhy A-E použity na modely povodí s průměrným stavem předchozího nasycení (CN II), zatímco pokud se v dané lokalitě častěji vyskytovala srážka typu F, byl použit vyšší stav nasycení (CN III).

V modelování odezvy povodí na extrémní srážky byly zohledněny významné retenční prvky – větší rybníky, vodní nádrže (současné i navržené) a navržené suché nádrže. Výpočet transformace umožňuje HMS na základě definice výpustních objektů a křivek zásobní funkce

nádrže či zatopených ploch. Objekty byly specifikovány orientačně na základě dimenzí typických pro daný typ stavby, případně odhadem dle ortofoto snímku. Zásobní funkce nádrže byly odvozeny v GIS na základě DMT a mapových podkladů. V případě navržených *opatření na stávajících VN* byla uvažována redukováná výchozí hladina v nádrži v úrovni 20 cm pod hranou přelivu.

Posledním typem modelovaného opatření je revitalizace vodního toku a přilehlé nivy. Pro transformaci odtokové vlny ve vodním toku využívá HMS jednoduchou hydrologickou metodu Muskingum-Cunge. Pro definici transformace je nutné zadat délku a sklon říčních úseků, geometrii koryta a jeho hydraulické drsnosti. Délka a sklon byly určeny v GIS, geometrie byla definována zjednodušeně jako jednoduché kapacitní lichoběžníkové koryto pro ovlivněné úseky toku a jako složené lichoběžníkové koryto s širokými bermami pro přírodě blízké úseky. Jako příslušné výchozí drsnosti byly použity hodnoty 0.025, respektive 0.025 či 0.03. Pokud byla v povodí navržena revitalizace vodního toku, byla v daném úseku o 30% navýšena délka, příslušným způsobem snížen podélný sklon, příčný profil změněn na přírodě *blízkou variantu* a zvýšena hydraulická drsnost na 0.03 či 0.035.

#### 1.1.4 Model HYPE

HYPE je semidistribuovaný open-source hydrologický model (Arheimer et al., 2012), který funguje na bázi fragmentace povodí na subpovodí, která jsou dále rozdělena do skupin hydrologicky rezponzivních jednotek (HRJ), které jsou výsledkem kombinace rastrových vrstev, jmenovitě vrstva digitálního modelu terénu, vrstva sklonitosti, vrstva krajinného krytu, vrstva základních hydrologických ukazatelů (hloubka hydrologicky aktivní vrstvy půdy a skeletovitost půdy) a volitelně v rámci modelování kvality vody vrstva plodinových map popřípadě drenážních systémů. Jednotlivé HRJ mají unikátní hydrologický režim, jež je ovládán příslušnými parametry modelu. HRJ vstupují do modelu ve formě procentuálního zastoupení každé HRJ v rámci jednotlivých povodí. Model uvažuje až tři půdní vrstvy s rozdílnými hloubkami pro přesnější simulaci pohybu nutrientů půdou. Model pracuje se třemi skupinami parametrů, které jsou vázány buď globálně nebo na druh krajinného pokryvu nebo na typ půdy.

Kromě zmiňovaných rastrových vstupů jsou dále vstupem do modelu charakteristiky vodních děl, zejména těch manipulovaných, jmenovitě hloubka, objem, plocha, typ vodní nádrže, průměrný odtok z nádrže, minimální zůstatkový odtok z nádrže a řada dalších. Vstupem do modelu je také procentuální zastoupení vodních ploch na povodí, které bylo odvozeno z vektorové vrstvy nádrží z databáze DIBAVOD. Stejně tak délka hlavního toku a délka vedlejších toků. Protože na experimentálních lokalitách nejsou k dispozici údaje o průtocích ani záznamy o kvalitě vody, byly vybrány analogony (povodí s podobnými charakteristickými

vlastnostmi, která měla k dispozici buď měření průtoků, nebo údaje o kvalitě vody, a na která byl model kalibrován), na které byly přeneseny parametry modelu z experimentálních lokalit. Poněvadž zatím nebylo známo uskupení pěstovaných rostlin v daných experimentálních lokalitách, byly aplikovány standardní hodnoty pro obecnou plodinu, kterou byla zvolena obilovina.

Z důvodu chybějících údajů pro jednotlivé lokality (viz výše), bylo modelování vlivu adaptačních opatření na jakost vody provedeno formou citlivostní analýzy vnitřních komponent modelu, které lze považovat za formy některých adaptačních opatření.

Zmiňovanými komponenty byly:

1. **změna struktury půdy:** uvažována záměna jemnozrné půdy za půdu hrubozrnou, a to v pětiprocentním kroku, jinými slovy v každém kroku bylo z povodí odebráno 5 % půdy jemnozrné a přidáno 5 % půdy hrubozrné.
2. **změna krajinného krytu (landuse):** uvažována záměna orné půdy za luční porost, a to v pětiprocentním kroku, jinými slovy v každém kroku bylo z povodí odebráno 5 % orné půdy a přidáno 5 % lučního porostu.
3. **změna v množství dávkovaných hnojiv:** bylo uvažováno odečítání v desetiprocentním kroku od standardního dávkování, dokud dávkování nebylo rovno 0 % standardní dávky a naopak přičítání k standardnímu dávkování dokud dávkování nebylo rovno 200 % standardní dávky.
4. **změna v množství atmosférické (suché i mokré) depozice dusíku:** bylo uvažováno odečítání ve dvacetipětiprocentním kroku od standardních hodnot atmosférické depozice, dokud depozice nebyla rovna 0 % standardní depozice a naopak přičítání k standardní hodnotě atmosférické depozice dokud depozice nebyla rovna 200 % standardní depozice.
5. **změna teploty ovzduší o 2 st. C:**<sup>1</sup> bylo uvažováno zvýšení veškeré vstupní teploty do modelu o 2 st. C.

## 2 Modelování

Zájmové povodí vzorové lokality zasahuje do 4 katastrálních území: Tulešice, Horní Dubňany, Dolní Dubňany a Rešice. Lokalita se nachází v Jihomoravském kraji v okrese Znojmo a je

<sup>1</sup>Spíše než jako adaptační opatření byla tato změna zavedena za účelem zjištění citlivosti modelu na zvýšení teploty v rámci jakosti vody.



Obrázek 1: Umístění povodí

součástí dílčího povodí Dyje. Jedná se o povodí tzv. kritického bodu (tj. bod, kde dráha soustředěného odtoku vniká do zastavěné části a jehož povodí splňuje určité charakteristiky), který se nachází nad obcí Tulešice na Tulešickém potoce. V území vznikl prozatím jen návrh opatření vytvořený v rámci projektu Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice ([www.vodavkrajine.cz](http://www.vodavkrajine.cz)). Návrhy vznikaly celoplošně, a proto jsou jejich lokalizace i parametry pouze na úrovni studie. V zájmovém území vzorové lokality se jedná o návrh nové vodní nádrže nad obcí Citonice, opatření na stávajícím Vracovickém rybníce v k.ú. Vracovice u Horního Břečkova, revitalizaci vodních toků a úpravu nivy a návrh plošných opatření na zemědělské půdě (agrotechnická ([odkaz na katalog](#)) a organizační ([odkaz na katalog](#))). Cílem návrhu je nejen ochrana před povodněmi a omezení erozních projevů, ale také zabránění degradace půdy, ochrana vodních útvarů, akumulace vody v krajině a zpomalení povrchového odtoku z povodí. Skladba krajinného pokryvu v povodí je využívána z velké míry zemědělsky a lesní porosty zabírají pouze zhruba 6% plochy povodí.

Umístění řešené lokality je zobrazeno na mapě 1 a satelitní mapa, kde je možné sledovat krajinný pokryv je poté na mapě 2. Navržená společná zařízení jsou na obrázku ??.

Základní charakteristiky hodnoceného povodí Tulešice:





Obrázek 2: Umístění povodí (satelitní mapa)

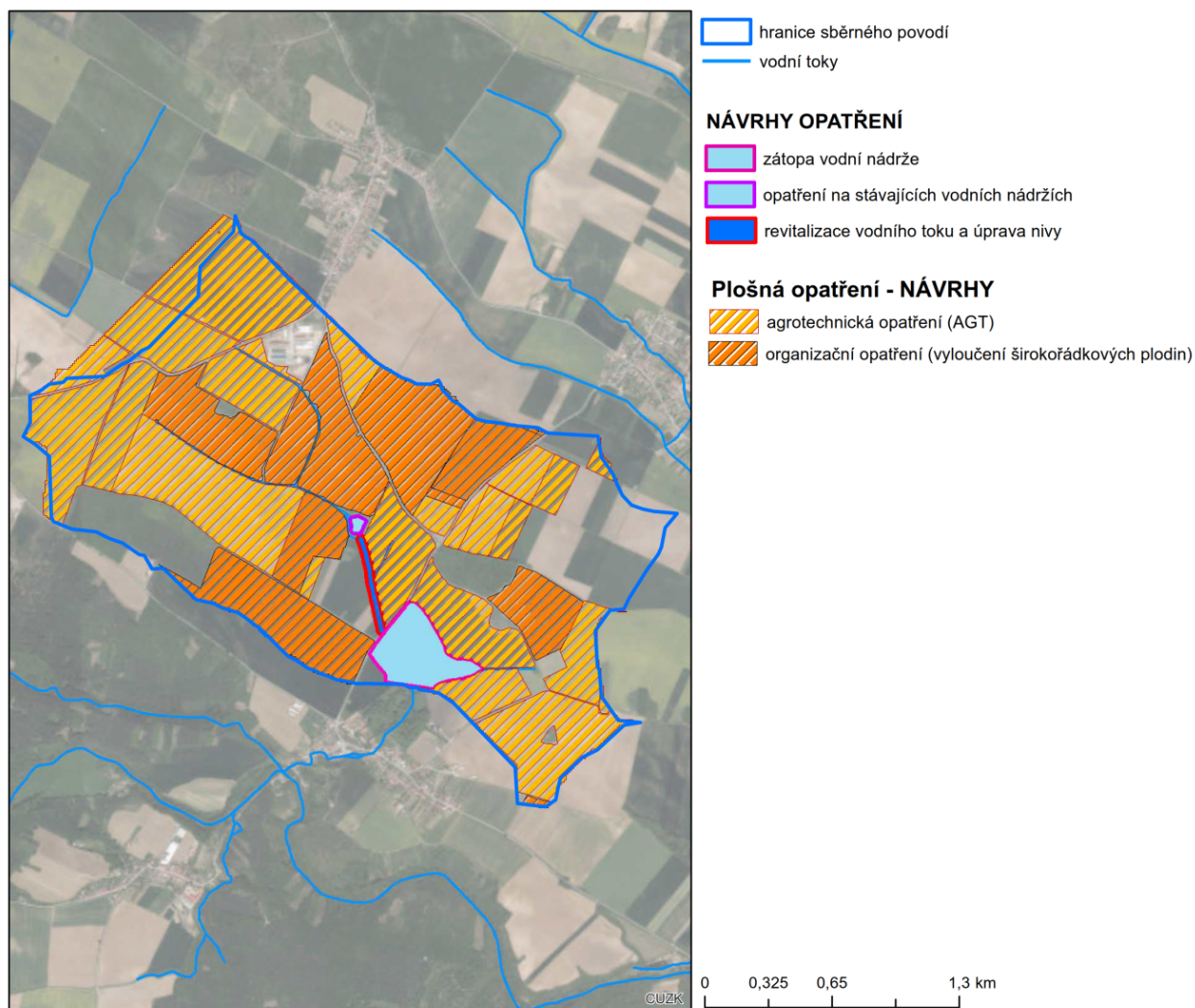
- plocha povodí:  $4.563 \text{ km}^2$
- průměrný srážkový úhrn:  $500.6 \text{ mm}$
- průměrná teplota:  $8.87 \text{ st.C}$
- průměrná roční potenciální evapotranspirace:  $694.5 \text{ mm}$
- průměrná nadmořská výška:  $320.42 \text{ mn.m.}$
- průměrná sklonitost:  $2.4 \%$

## 2.1 Opatření

V zájmové lokalitě Tulešice jsou navržena tato opatření:

### 2.1.1 Vodní nádrž ([odkaz na katalog](#))

Nová vodní nádrž byla navržena na Tulešickém potoce jako protipovodňová ochrana obce Tulešice. Zároveň by ale mohla v období sucha zajišťovat akumulaci vody v krajině a



Obrázek 3: Navržená společná zařízení na ortofoto (Zdroj: ČÚZK)

napomáhat k infiltraci povrchového odtoku. Uvažováno je o nádrži s retenčním potenciálem pro transformaci povodňové vlny. Nádrž může být po realizaci suchá, nebo suchá s částečným nadržением. Konečný typ nádrže vyplyne až z podrobně vyhotovené dokumentace nádrže dle potřeby a kapacity sběrné plochy povodí nad nádrží. Objem nádrže z vymezené zátopy byl dle lokálních morfologických podmínek odhadnut na  $244\,700\ m^3$ . Hrubý odhad ceny lze vyčíslit z průměrných nákladů na realizaci nádrže uvažované ve výši 270 Kč za  $m^3$  zadržného objemu vody v nádrži.

### 2.1.2 Opatření na stávající nádrži ## Vodní nádrž ([odkaz na katalog](#))

Návrh předpokládá potenciální opatření typu rekonstrukce objektů, hrází nebo odbahnění dle místních podmínek a potřeb.

### 2.1.3 Revitalizace vodního toku a nivy ([odkaz na katalog](#))

Jedná se o opatření, která mají zlepšit morfologii koryta vodního toku, zajistit migrační zprůchodnění příčných objektů, obnovit proces zaplavování nivy při zvýšených průtocích atd. Návrh předpokládá s revitalizací o délce až 512 m.

### 2.1.4 Agrotechnická opatření ([odkaz na katalog](#))

### 2.1.5 Organizační opatření – vyloučení širokořádkových plodin ([odkaz na katalog](#))

Vhodný výběr skladby plodin na zemědělských pozemcích, tedy vyloučení širokořádkových plodin, jako např. kukuřice či brambory, napomáhá ke snížení erozního smyvu, snížení degradace půdy a celkově dochází ke zlepšení vodního režimu v půdě. Návrh organizačních opatření byl uvažován na ploše 369,6 ha.

## 2.2 Klima

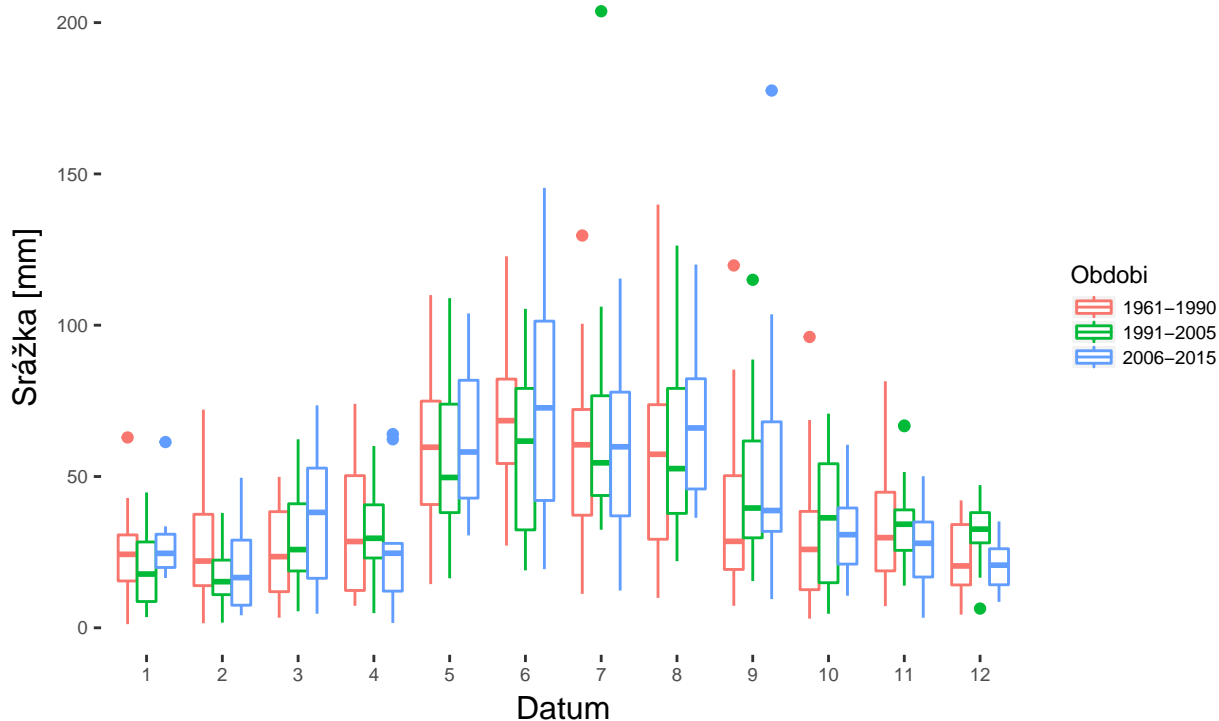
Vyhodnocení klimatologických veličin bylo provedeno pomocí boxplotů<sup>2</sup> pro 3 časová období: 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015. Jednotlivá období jsou od sebe barevně odlišena. Na grafu 4 lze vidět, že prostřední období 1991-2005 bylo srážkově nadprůměrné a současný stav se přiblížil podmínkám v období 1961-1990 (z pohledu průměrných měsíčních úhrnů).

Pro hodnocení změn teplot vzduchu za období 1916-2015 je zvolen graf typu boxplot (5). Hodnoceny jsou průměrné měsíční teploty vzduchu za období 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015. Můžeme pozorovat výrazný nárůst teplot, a to především v zimních a letních měsících. Což s sebou v zimě snižené zásoby ve sněhu a dřívější jarní tání (pokud jsou zásoby sněhové pokrývky) a v létě výrazným nárůstem evapotranspirace.

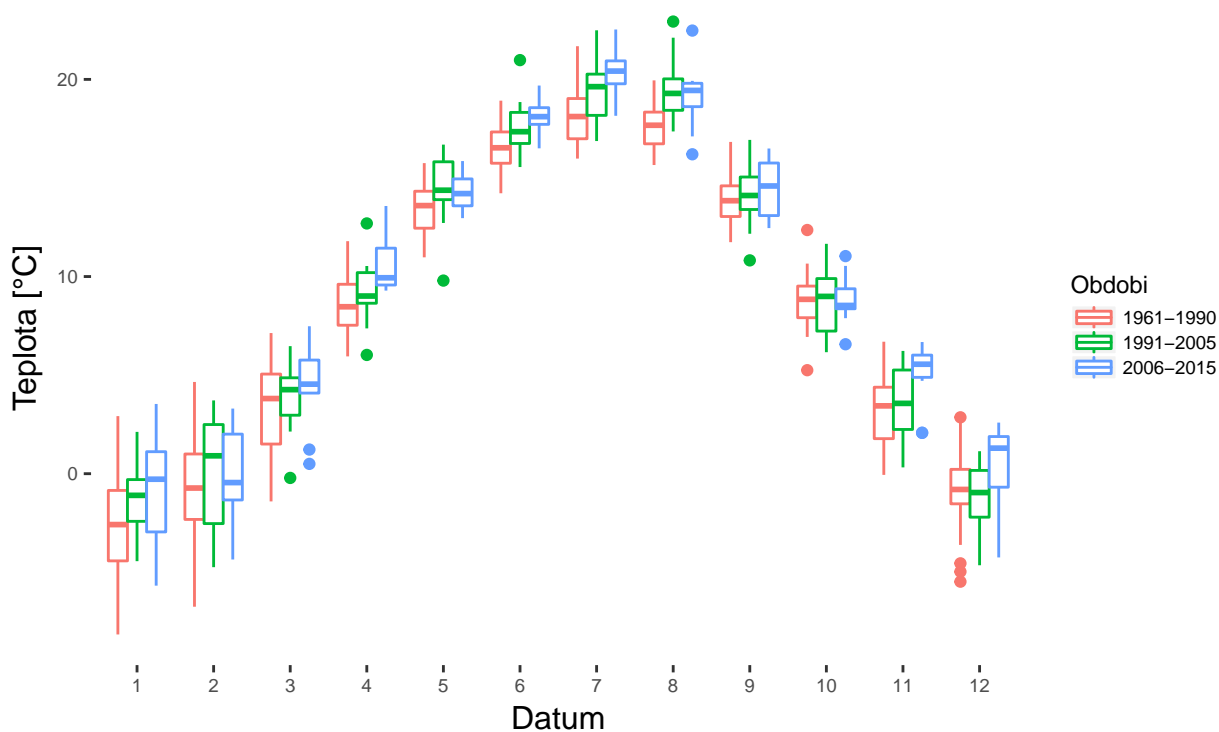
---

<sup>2</sup>Boxplot neboli krabicový graf či krabicový diagram jeden ze způsobů grafické vizualizace numerických dat pomocí jejich kvartilů. Střední krabicová část diagramu je shora ohraničena 3. kvartilem, zespodu 1. kvartilem a mezi nimi se nachází linie vymezující medián.

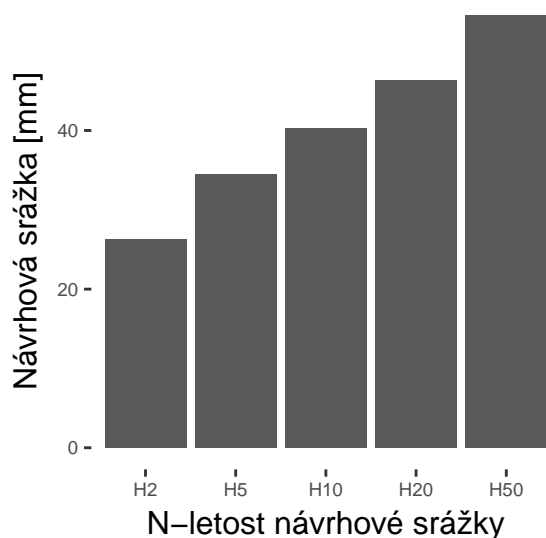




Obrázek 4: Měsíční srážkové úhrny za období 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015 ve formě boxplotů



Obrázek 5: Průměrné měsíční teploty vzduchu za období 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015 ve formě boxplotů

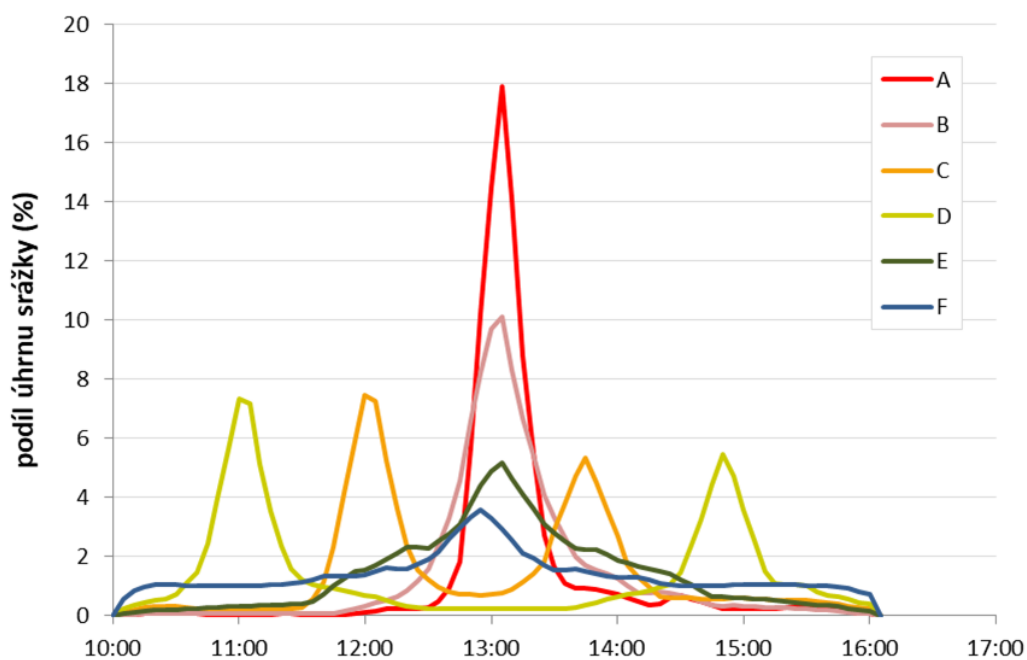


Obrázek 6: Návrhové srážky s dobou opakování 2, 5, 10, 20 a 50 let

### 2.3 Návrhové srážky

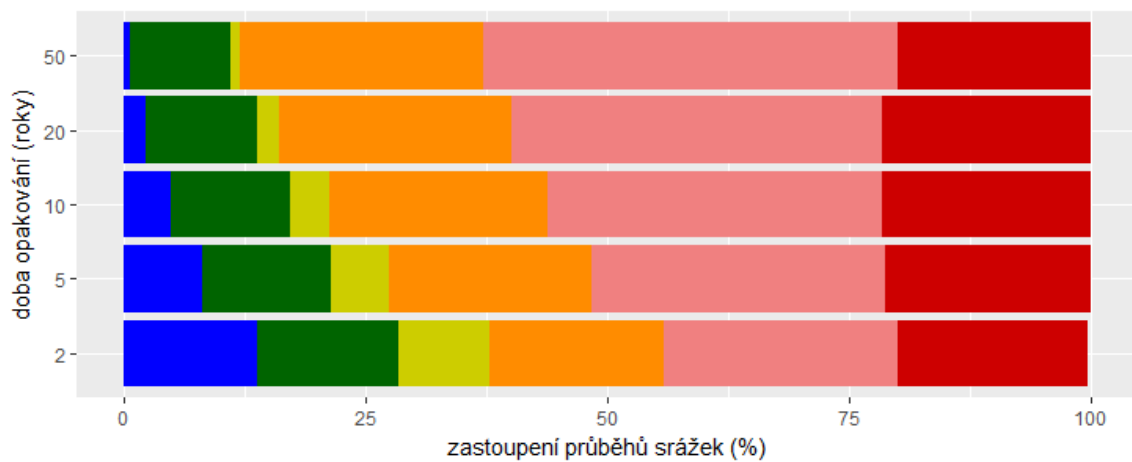
Pro posouzení modelem HEC-HMS byly odvozeny návrhové srážky pro lokalitu Tulešice s dobou opakování 2, 5, 10, 20 a 50 let . Pro odezvu malých povodí jsou klíčové krátkodobé intenzivní srážky, uvažovány byly srážky 6hodinové, pro které jsou k dispozici volně dostupná data o úhrnech a časových průbězích prostřednictvím webové processingové služby (WPS) <http://rain.fsv.cvut.cz/webapp/webove-sluzby/>. Návrhové 6hodinové úhrny jsou zobrazeny na grafu 6.

Průběh návrhové srážky významně ovlivňuje hydrologickou odezvu. Rozmanitost průběhů je velmi značná a z těchto důvodů byly použity šestihodinové hyetogramy, které jsou uvedeny na následujícím obrázku. Tvary hyetogramů jsou označeny písmeny A až F, kdy tvary A, B, E a F mají jednoduchý průběh.



Obrázek 7: Průběh 5-min intenzit návrhových srážek

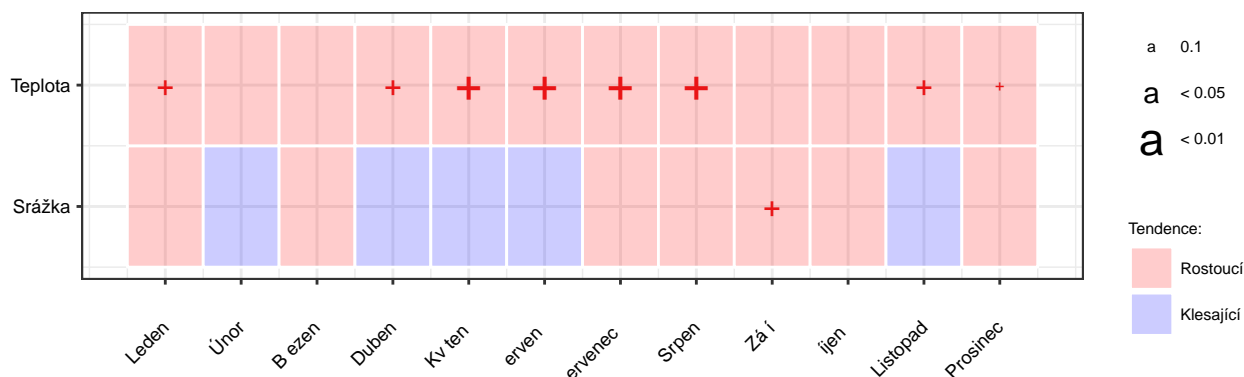
Pravděpodobnost výskytu návrhové srážky pro danou N-letost je zobrazena v dalším grafu.



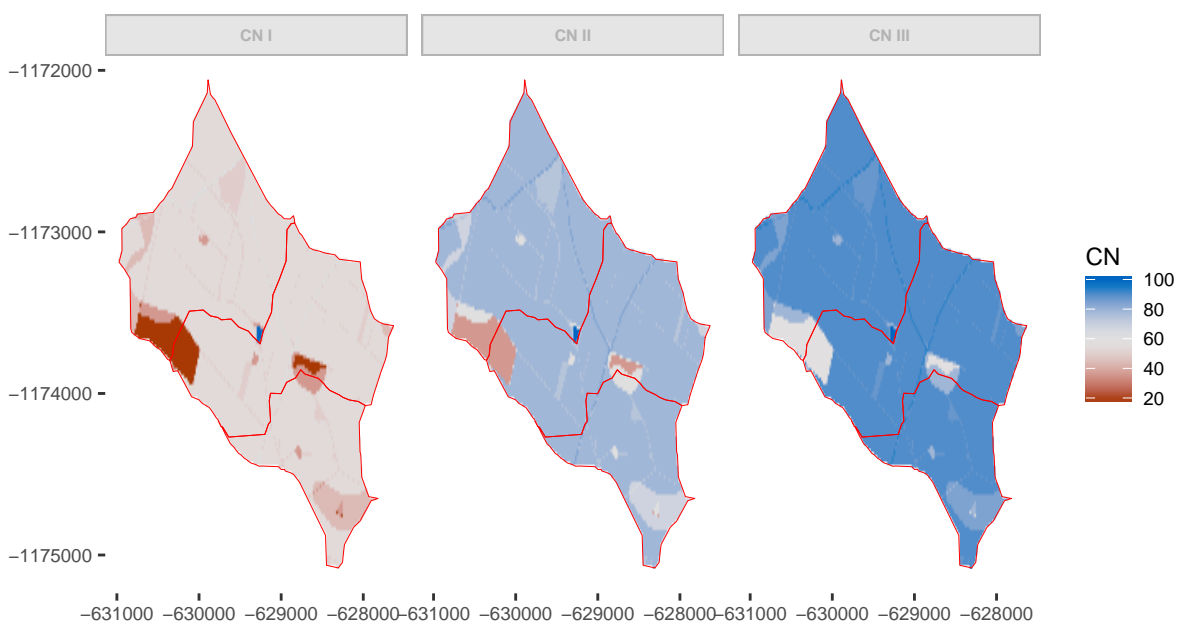
Obrázek 8: Rozdělení jednotlivých typů návrhové srážky

## 2.4 Analýza trendů

Zdali existují změny v jednotlivých měsících a jestli jsou tyto trendy statisticky významné za období 1961-2015 bylo posouzeno Mann-Kendalovým testem. Výsledky jsou zobrazeny



Obrázek 9: Analýza trendů srážek a teplot vzduchu pomocí Mann-Kendall testu



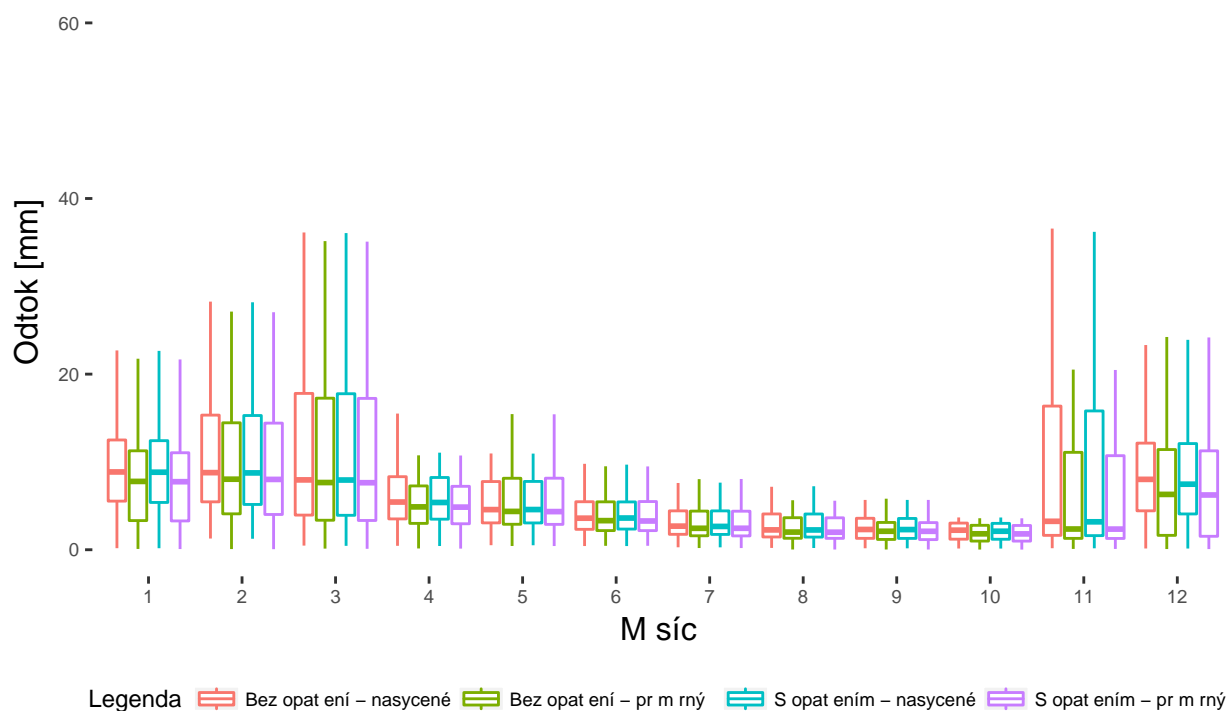
Obrázek 10: Hodnoty CN pro zájmové území a různé vláhové podmínky

na 9. Lze pozorovat statisticky významný nárůst teploty s vysokou hladinou významnosti především v měsících počátku vegetačního období, kdy naopak srážkové úhrny mají spíše tendenci klesat. Celkově srážkové úhrny spíše lehce rostou.

Na obrázku 10 jsou zobrazeny hodnoty CN I, CN II a CN III pro současné podmínky (bez navrhovaných opatření) a různé vláhové podmínky.

## 2.5 Výsledky modelování hydrologické bilance modelem Bilan

Na obrázku 11 jsou vyhodnoceny průměrné odtokové výšky za období 1961-2015 pro danou lokalitu a 4 scénáře. Na grafu 12 jsou zobrazeny změny odtokových výšek po aplikaci opatření pro průměrný a nasycený stav. Na grafech 13 jsou zobrazeny odtokové výšky v jednotlivých



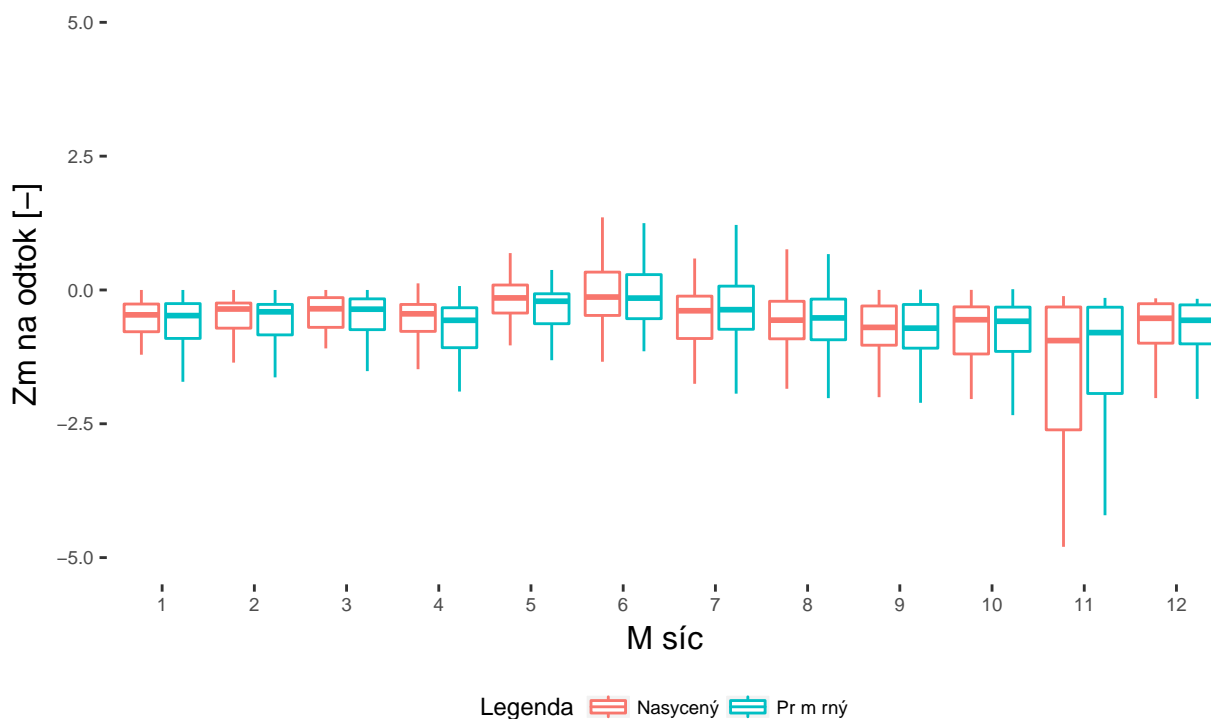
Obrázek 11: Průměrné měsíční odtokové výšky ve formě boxplotů pro jednotlivé varianty hodnocení

měsících rozdělených do 3 období: 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015 pro varianty před realizací opatření a po jejich realizaci.

## 2.6 Výsledky modelování modelem HEC-HMS

V zájmové lokalitě Tulešice byla navržena rozsáhlá agrotechnická protierozní opatření, revitalizace vodního toku v délce 0,5 km, drobná opatření na jedné stávající malé vodní nádrži a jedna nová vodní nádrž o rozloze 13,3 ha. Z hlediska průběhů krátkodobých srážek v lokalitě převažují tři nejintenzivnější typy A, B a C, jak ukazuje ???. Ovlivnění odtokové odezvy na extrémní návrhové srážky s těmito průběhy a s dobami opakování 2-50 let ukazuje 14 a procentuální snížení kulminačních průtoků, objemu odtoku do konce simulace a posun kulminace je vyčíslen v 3.

Z uvedených grafů a hodnot je patrné, že navržená opatření mají značný potenciál snížit objem odtoku v časovém úseku simulace (11 h), kdy zadržovaný objem se pohybuje až na úrovni 90 %. Hlavní zásluhu na tom má značný retenční prostor navržené vodní nádrže složený z ovladatelné retence (20 cm pod úrovní bezpečnostního přelivu) i neovladatelný prostor vymezený výškou přepadového paprsku nad hranou přelivu při průchodu odtokové vlny. Hodnoty redukce objemu odtoku v tabulce 3 jsou ovlivněny krátkou dobou simulace, během níž nebyl dokončen

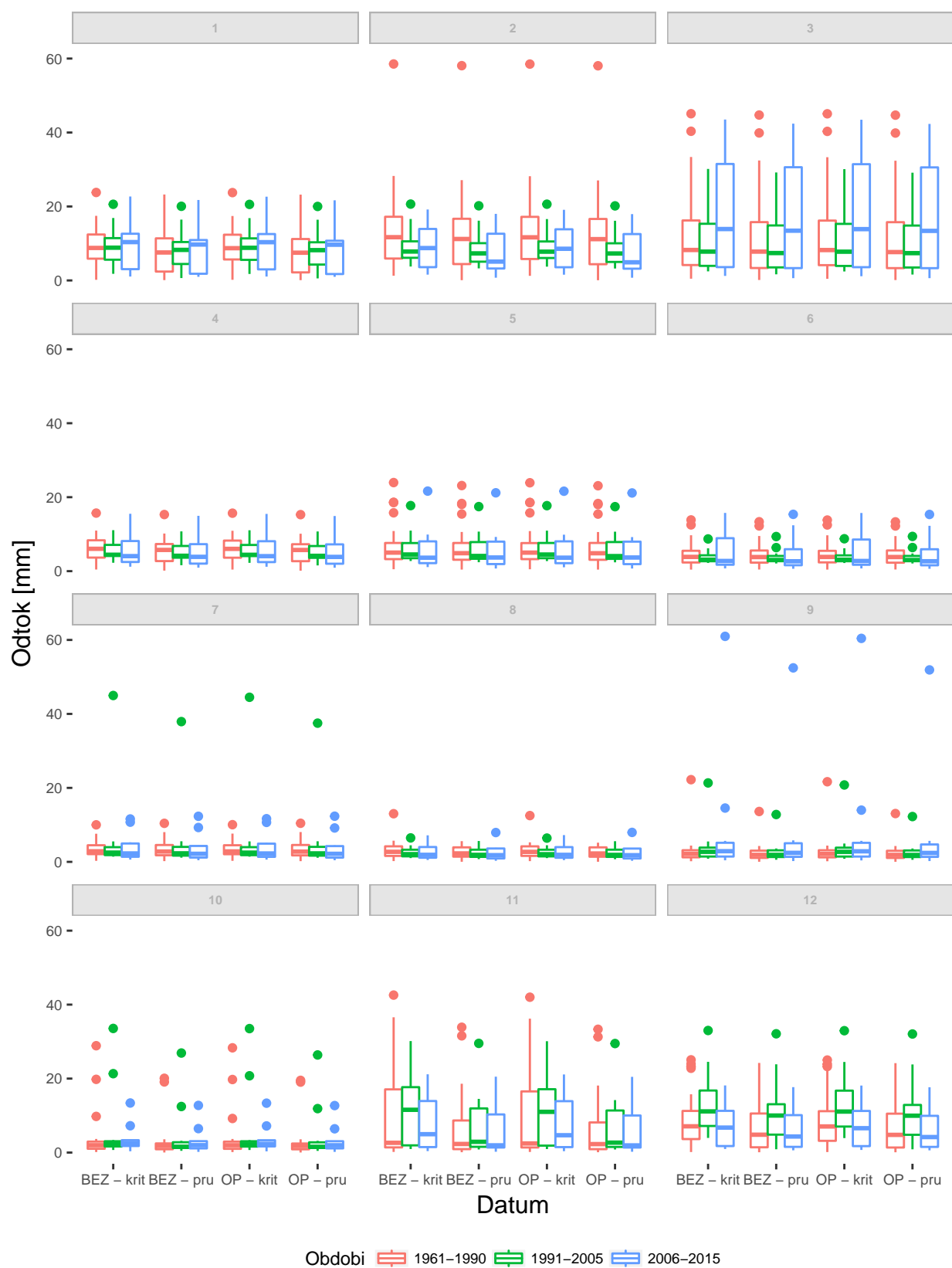


Obrázek 12: Změny měsíčních odtokových výšek ve formě boxplotů (pře opatřeními a po realizaci opatření)

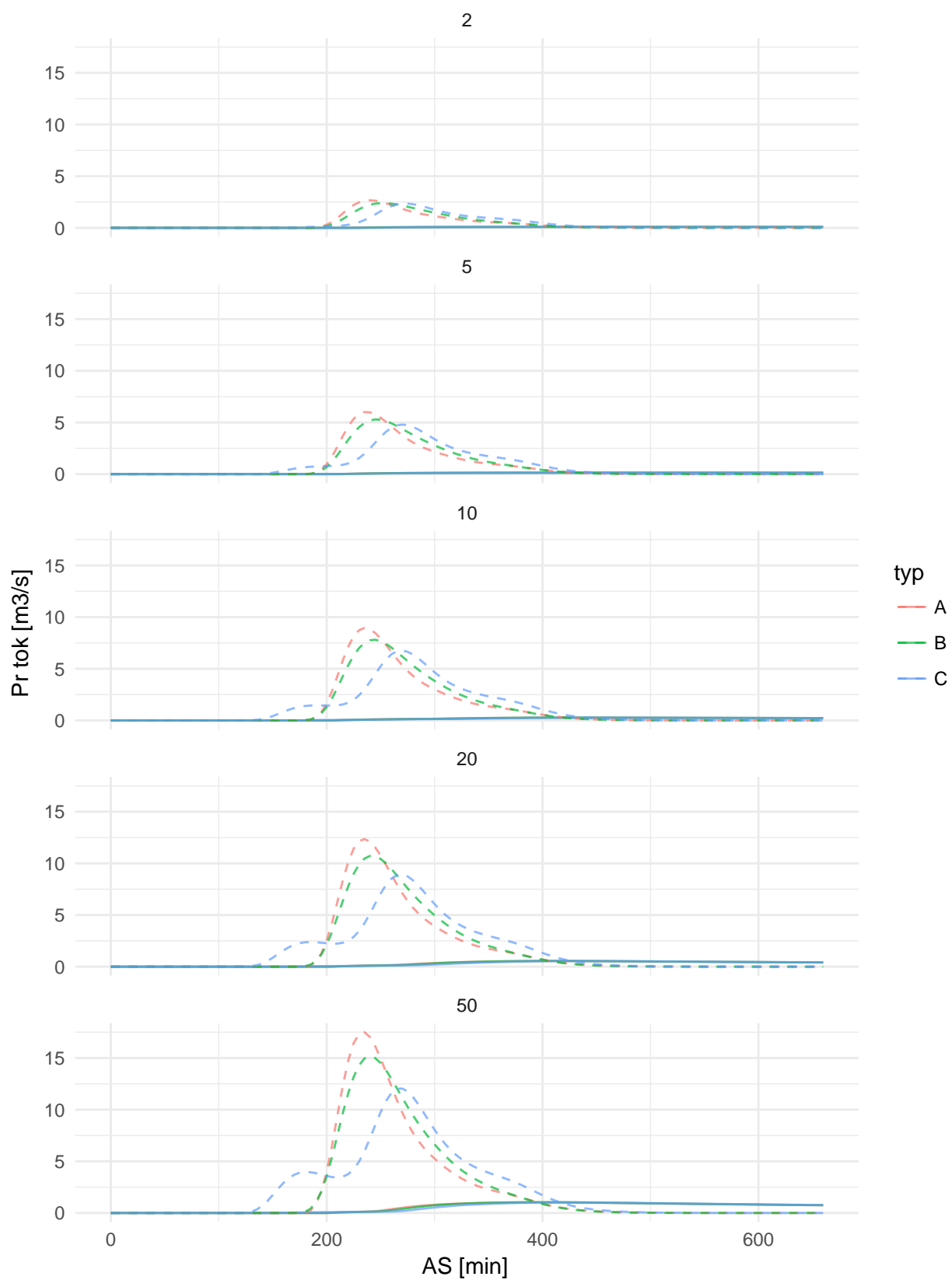
výpočet transformace odtokových vln ve vodní nádrži. Výsledné redukce objemu během celého průchodu odtokové vlny budou ve skutečnosti nižší, neboť samotná agrotechnická opatření aplikovaná v ploše povodí při použité metodě výpočtu snižují odtokovou výšku jen o jednotky procent. Dále nově navržená nádrž při dodržení simulovaného retenčního prostoru má potenciál prakticky zcela eliminovat kulminační průtoky a to v průměru na 4 % původních hodnot, zpoždění kulminací pak vlivem transformace v nádrži může dosáhnout i více než tři hodiny. Z hlediska průběhu posuzovaných návrhových srážek generuje vyšší odtoky dle očekávání nejkonzentrovanejší půlhodinová srážka typu A, rozdíl oproti druhým dvěma nejčastějším průběhům typu B a C roste s dobou opakování.

## 2.7 Výsledky modelování modelem HYPE

Obrázky 15, 16, 17 a 18 sumarizují citlivostní analýzu a dávají jasnou představu o tom jaká komponenta modelu má vliv na tu kterou koncentraci modelovaných látek. Na ose Y lze vidět danou komponentu modelu (adaptační opatření) na ose X pak procentuální změnu dané komponenty, přičemž hodnota (resp. barva) dlaždice udává průměrnou hodnotu změny od výchozí modelované koncentrace. Modrá barva značí pokles od výchozí koncentrace, naopak červená značí nárůst od výchozí koncentrace a bílá barva reprezentuje nulovou změnu.



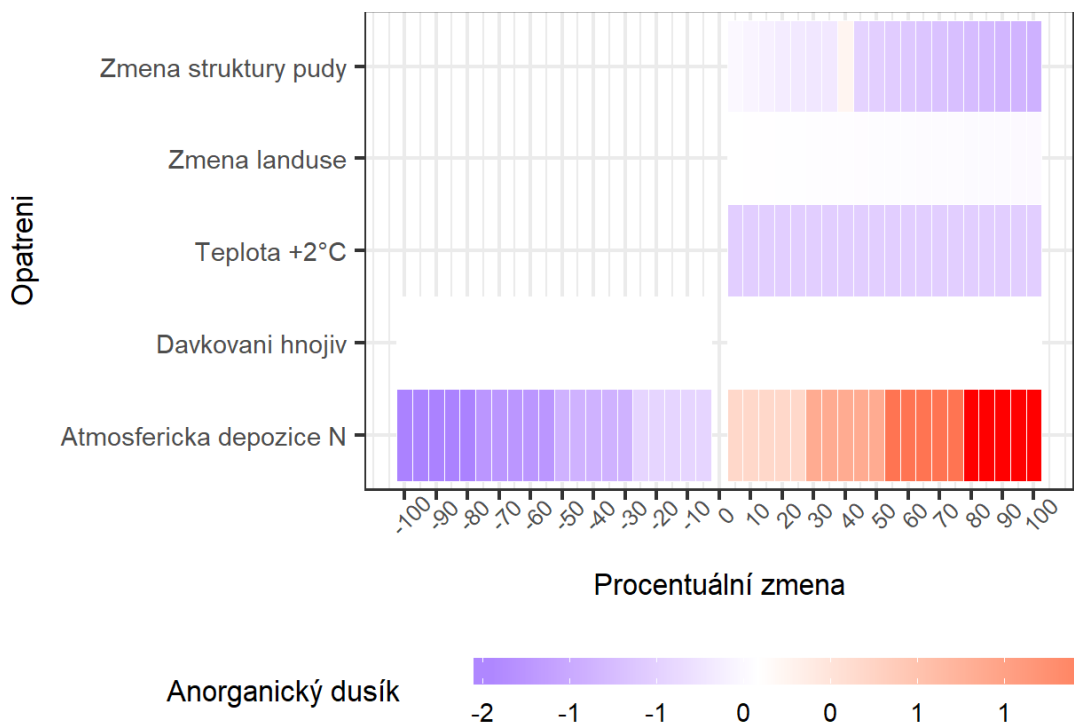
Obrázek 13: Měsíční odtokové výšky za období 1961-1990, 1991-2005 a 2006-2015 ve formě boxplotů bez opatření (BEZ) a s opatřením (OP)



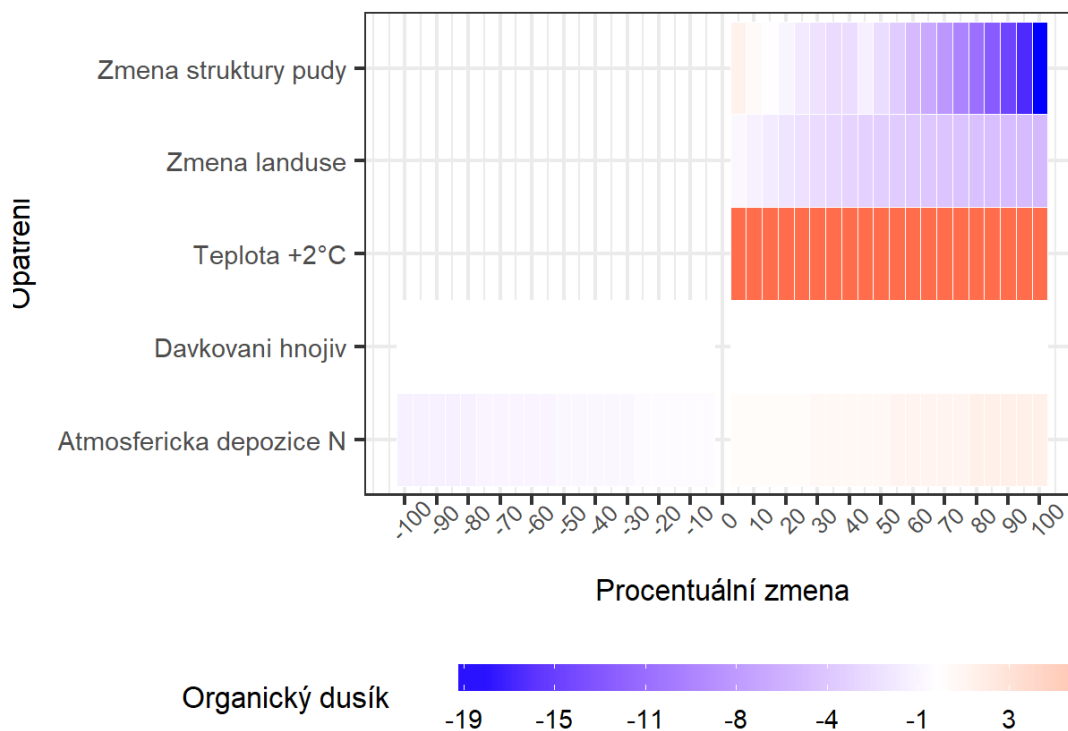
Obrázek 14: Návrhové průtoky dle N - letostí pro jednotlivé typy vln (čárkovaně-před opatřením, plně-po opatření)



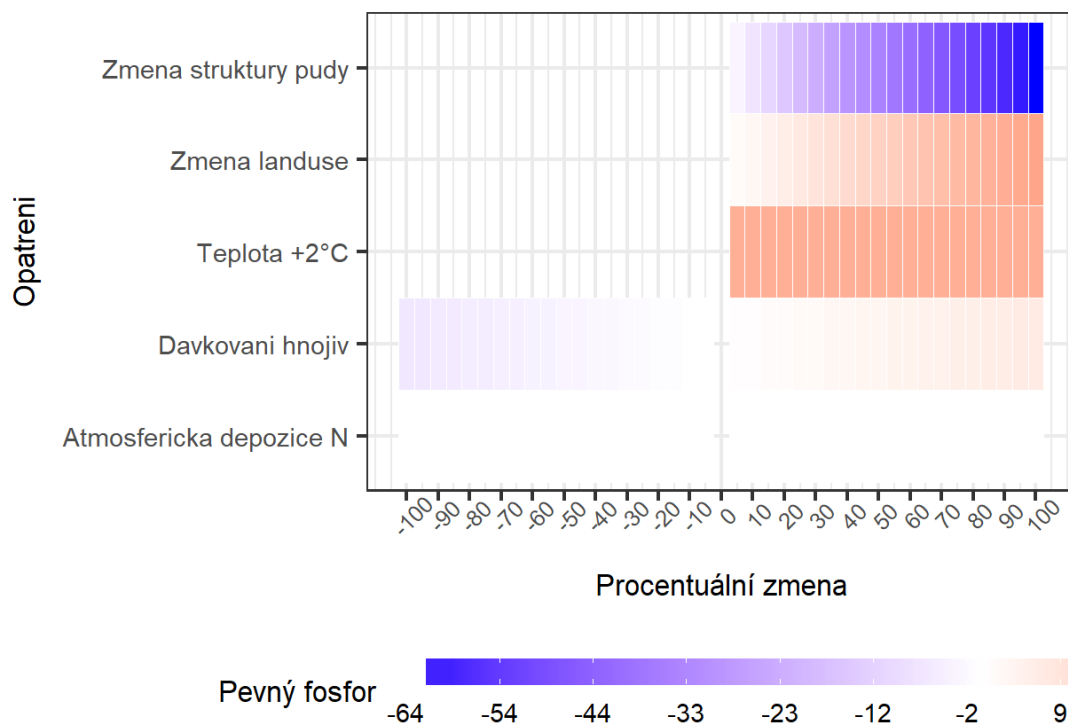
Hodnotový rozsah je pro každou látku specifický, poněvadž jejich koncentrace v povodích, respektive v tocích je rozdílná. Obecně lze vyvozovat, že s přechodem z jemnozrnné půdy na půdu s hrubší strukturou klesá koncentrace všech čtyř modelovaných látek (jmenovitě anorganický dusík, organický dusík, pevný fosfor a rozpustný fosfor). Přechod z orné půdy na luční porost zapříčiňuje pokles koncentrace dusíku a rozpustného fosforu, nikoliv však pevného fosforu. Dávkování hnojiv má vliv pouze na fosfor v obou fázích a jejich výsledná koncentrace kladně koreluje s mírou dávkování, dusík zůstává neměnný. Stejně tak atmosférická depozice dusíku logicky kladně koreluje s mírou koncentrace dusíku v tocích. Zvýšení teploty o 2 st. C zapříčiňuje nárůst pevného fosforu a organického dusíku a naopak pokles rozpustného fosforu a anorganického dusíku.



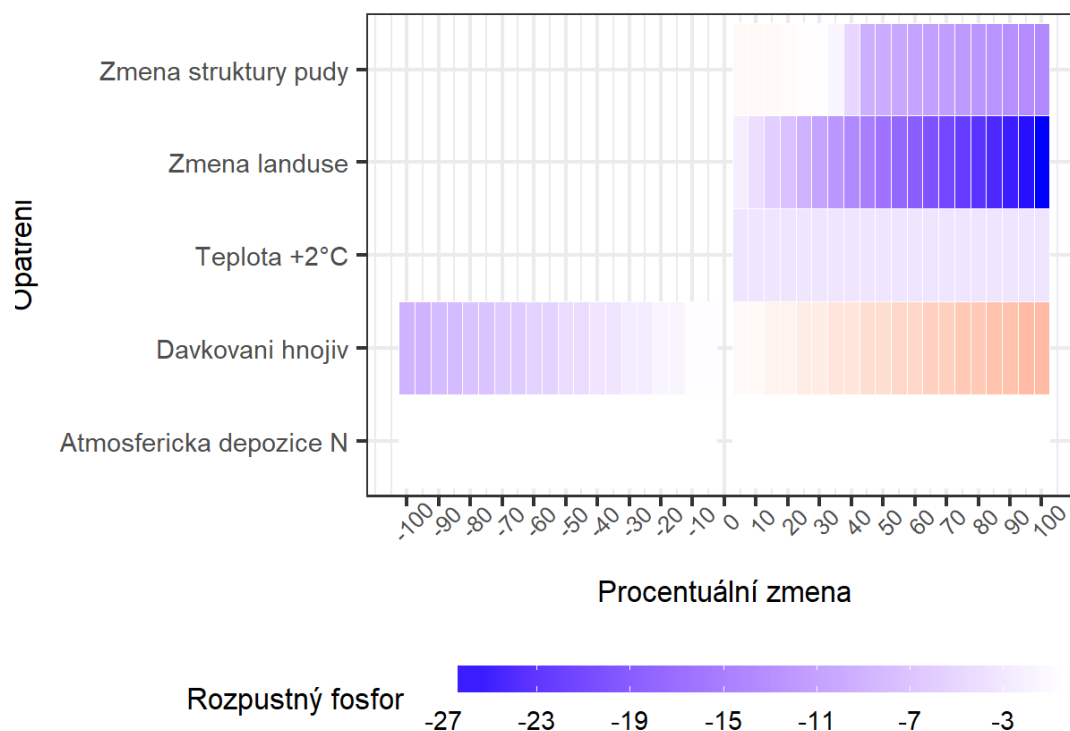
Obrázek 15: Anorganický dusík



Obrázek 16: Organický dusík



Obrázek 17: Pevný fosfor



Obrázek 18: Rozpustný fosfor

### 3 Závěr

Na lokalitě Tulešice je dlouhodobě výrazně negativní bilance (srážky-potenciální evapotranspirace), což vede k nízkým odtokovým výškám, a to především v letních obdobích. Navržená a realizovaná opatření způsobí pokles odtoku především v zimním období, kdy tato voda zůstane zadržena v krajině. V letním období nebude docházet ke změnám průměrných odtoků a k mírnému poklesu dojde v měsících zaří a říjen. Nová vodní nádrž bude schopna částečně mírnit dopady hydrologického sucha.

Navržená opatření mají značný potenciál snížit objem odtoku v časovém úseku simulace (11 h), kdy zadržovaný objem se pohybuje až na úrovni 90 %. Hlavní zásluhu na tom má značný retenční prostor navržené vodní nádrže složený z ovladatelné retence (20 cm pod úrovní bezpečnostního přelivu) i neovladatelný prostor vymezený výškou přepadového paprsku nad hranou přelivu při průchodu odtokové vlny.

Obecně lze vyvozovat, že s přechodem z jemnozrnné půdy na půdu s hrubší strukturou klesá koncentrace všech čtyř modelovaných látek (jmenovitě anorganický dusík, organický dusík, pevný fosfor a rozpustný fosfor). Přechod z orné půdy na luční porost zapříčiňuje pokles

koncentrace dusíku a rozpustného fosforu, nikoliv však pevného fosforu. Dávkování hnojiv má vliv pouze na fosfor v obou fázích a jejich výsledná koncentrace kladně koreluje s mírou dávkování, dusík zůstává neměnný.

## References

- Arheimer, B., Dahné, J., Donnelly, C., Lindström, G., Strömqvist, J. (2012) Water and nutrient simulations using the HYPE model for Sweden vs. the Baltic Sea basin—influence of input-data quality and scale. *Hydrology research*, 43(4), 315–329.
- Havlík, A., Fremrová, L. (2010) TNV 75 2102 Úpravy potoků.
- Macků, J. (2012) Problematika stanovení hydrologických skupin půd v lesích. In *Krajinné inženýrství 2012*, Ministerstvo zemědělství, Praha, 15–22, ISBN 978-80- 87384-03- 9.
- Müller, M., Kašpar, M., Bližňák, V. (2017) Rainfall time structure variability depending on precipitation depths and duration.
- Máca, P., Bašta, P., Kozín, R., Hanel, M. (2016) Využití geomorfologických charakteristik pro odhad celkové retence povodí. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 58(6), 54–57.
- SCS (1986) Urban hydrology for small watersheds. Technická zpráva, Engineering Division, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington, DC.
- Smelík, L. (2016) Analýza změn odtokových poměrů pro Českou republiku. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 58(4), 7–12.
- Vizina, A., Horáček, S., Hanel, M. (2015) Nové možnosti modelu Bilan. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 57(4–5), 7–10.

Tabulka 2: Hodnoty CN II pro jednotlivá opatření a hydrologické skupiny půd

<b>Opatření</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Zasakovací pásy	34.5	59.5	72.5	79
Svodný průleh	34.5	59.5	72.5	79
Svodný příkop	81	88	91	93
Vyloučení erozně nebezpečných plodin	77	86	91	94
Protierozní agrotechnika -širokoř. kultury	64	74	81	85
Vyloučení širokořádkových plodin mírnější	75.5	84.5	89.5	92
Vyloučení erozně nebezpečných plodin a protierozní agrotechnologie	74	83	88	90
Plošné TTP (zatravnění plošné dle HPJ)	34.5	59.5	72.5	79
Stabilizace drah soustředěného odtoku	34.5	59.5	72.5	79
Ochranné pásy podél vodních toků a vod. ploch	34.5	59.5	72.5	79
Zatravnění na speciálních kulturách	37.6	61.3	73.6	79.9
Plošné TTP (zatravnění plošné dle sklonu)	34.5	59.5	72.5	79
Plošné TTP (zatravnění plošné dle eroze)	34.5	59.5	72.5	79
Polní cesta zpevněná s příkopem	83	89	92	93
Ochranný sad, vinice	37.6	61.3	73.6	79.9
Zatravnění	34.5	59.5	72.5	79
Agrotechnika mírnější	75.5	84.5	89.5	92
Agrotechnika přísnější	74	83	88	90
Mez, hrázka	32.5	57	70.5	77.5
Záchytný průleh	34.5	59.5	72.5	79
Větrolam	30	55	70	77
Mokřad	83	89	92	93
Vodní nádrž nová	98	98	98	98
Biocentrum	30	55	70	77
Biokoridor	30	55	70	77
Interakční prvek	30	55	70	77
Opatření na stávajících VN	-1	-1	-1	-1
Přehrážka	83	89	92	93
Revitalizace toku a nivy	-1	-1	-1	-1
Suchá nádrž	34.5	59.5	72.5	79

Tabulka 3: Vyhodnocení krátkodobých srážko-odtokových epizod

$N(\text{roky})$	$TYP$	$Q_{pre}$	$Q_{po}$	$V_{pre}$	$V_{po}$	$T_{pre}$	$T_{po}$	$dQ$	$dV$	$Posun$
2	2.70	0.10	15 015	2 143	14:00	17:10	-97%	-86%	190	
2	2.40	0.10	15 030	2 101	14:10	17:10	-96%	-86%	180	
2	2.30	0.10	15 018	1 994	14:35	17:30	-96%	-87%	175	
5	6.00	0.10	31 828	3 368	13:55	17:15	-98%	-89%	200	
5	5.30	0.10	31 824	3 318	14:05	17:15	-97%	-90%	190	
5	4.80	0.10	31 818	3 219	14:30	17:35	-97%	-90%	185	
10	8.90	0.30	46 131	5 767	13:55	17:05	-97%	-87%	190	
10	7.80	0.30	46 125	5 715	14:05	17:00	-97%	-88%	175	
10	6.80	0.30	46 119	5 530	14:30	17:20	-96%	-88%	170	
20	12.40	0.60	62 563	11 370	13:55	16:50	-96%	-82%	175	
20	10.70	0.60	62 560	11 250	14:00	16:50	-95%	-82%	170	
20	8.90	0.60	62 556	10 840	14:30	17:10	-94%	-83%	160	
50	17.50	1.00	87 180	21 616	13:55	16:40	-94%	-75%	165	
50	15.20	1.00	87 171	21 385	14:00	16:35	-93%	-75%	155	
50	12.00	1.00	87 165	20 620	14:30	17:00	-91%	-76%	150	