

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA**



Disertační práce

**Vliv uspořádání krajinné matrice na složky odtoku**

**Ing. Pavel Žlábek**

**2009**

**Školitel:** doc. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.  
Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i., Praha  
Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta

**Školitel specialista:** Ing. Pavel Tachecí, Ph.D.  
DHI a.s., Praha

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně na základě vlastních výsledků s využitím řádně uvedené literatury.

V Českých Budějovicích 2009

.....

## **Poděkování**

V první řadě bych rád poděkoval svým blízkým, především rodičům, za podporu a vytvoření vhodných podmínek k práci.

Velice rád bych poděkoval doc. Ing. Tomáši Kvítkovi, CSc. za podporu při tvorbě disertační práce jak z pozice mého školitele, tak z pozice vedoucího katedry pozemkových úprav. Děkuji za odborné vedení, cenné rady a připomínky udávající směr vývoje této disertační práce. Rovněž bych rád poděkoval kolektivu katedry pozemkových úprav, především Ing. Václavu Bystřickému za všestrannou pomoc při řešení společných úkolů, Ing. Pavlu Ondrovi, CSc. za jeho lidský přístup, paní Květoslavě Ondokové a Ing. Petru Lechnerovi za pomoc při řešení organizačních záležitostí.

Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Tachecímu, Ph.D. za odborné konzultace při modelování MIKE SHE, Ing. Františku Doležalovi, CSc. za uvedení do problematiky separací odtoku vody a Ing. Františku Zemkovi, CSc. za nasměrování v oblasti statistického vyhodnocení.

Děkuji rovněž Ing. Markétě Kaplické, Ing. Petru Fučíkovi a Ing. Renatě Duffkové, Ph.D. z VÚMOP Praha za poskytnutí datových souborů z povodí Kopaninského toku.

Dále bych velice rád poděkoval Ing. Mileně Randýskové, referentce pro studenty DSP, za vstřícné a milé jednání.

## Summary

Low flow periods and floods both belong to extreme hydrological events. Water, as well as air, is essential for living and a sufficient amount during the whole year is a fundamental prerequisite for the existence of all living organisms. Furthermore, a sufficient amount of water is important for plant and animal production, industry and transportation and holiday and sport. In large volumes, though, water is dangerous. More frequent floods cause huge damage to the landscape. A common factor of both the above mentioned extreme events is the runoff process. Whilst during low flow or drought period the runoff is formed by the base flow (from more distant parts of the catchment and from deeper layers of the aquifers), during extreme rainfall-runoff events quick flow (direct runoff compound of overland flow and shallow subsurface flow) is a dominant runoff process. All runoff components are subject to a number of separation methods.

Several authors were concerned with runoff separations within the Czech Republic (directly in crystalline complex, to which researched catchment belongs, by F. Dolezal and Z. Kulhavy) but no such comprehensive study of the influence of different parameters of catchment on runoff components has been carried out.

The primary aim of the presented study was to evaluate the influence of landscape matrix on runoff components. Within the analysis, it turned out that a wider, more complex approach has to be carried out and more catchment parameters, as well as more meteorological data, has to be involved in the study. Hydrological modelling focused on a simulation of runoff under different landscape matrix scenarios and evaluation of runoff balance, which is provided by the MIKE SHE model.

Discharge measurements from 12 subcatchments in the Kopaninský tok experimental catchment (6.7 km<sup>2</sup>) were analysed. The catchments are rather small (up to tens of hectares). Nested catchments were taken out of the data set for some analysis. About 10% of agricultural lands are tile-drained. The main soil types are Cambisols, Planosols and Gleysols. The catchment is mostly underlain by acid igneous or metamorphic rocks such as granite and gneiss. The turnover of groundwater is generally quick.

At first, measured discharge data were processed in order to obtain basic statistics and a probability-of-exceedance curve of runoff. Then, different runoff components in terms of their origin, flow paths and travel time (direct runoff, interflow and baseflow) were separated using a combination of two runoff separation techniques (a digital filter and a simple

conceptual model GROUND). These two methods were chosen after several more methods were applied on the data set and compared. In the next step, the influence of land use and landscape matrix on runoff components was evaluated. This evaluation led to inconsistent conclusions because the issue is more complicated and can not be interpreted only from the land use (matrix) point of view. Therefore, ordinations diagrams performed with Canoco software were used to evaluate the influence of different catchment parameters on different runoff components. A canonical ordination method analyses (RDA) was used to explain one data set (runoff components – either volumes of each runoff component or occurrence of baseflow) with another data set (catchment parameters – proportion of arable land, proportion of forest, proportion of vulnerable zones with high infiltration capacity, average slope, topographic index and runoff coefficient). The influence was analysed both for long-term runoff balance and selected rainfall-runoff events. In the final step, a distributed hydrological model MIKE SHE was used to simulate rainfall-runoff processes in one subcatchment (P52). The model was successfully calibrated and validated on the period of hydrologic years 2006, resp. 2005, with model efficiencies (Nash-Sutcliffe) equal to 0.66 and 0.46. Five scenarios with different patterns of landscape matrix were developed in order to evaluate its influence on runoff components.

Original results:

Completely forested catchment behaves as expected. From all studied catchments in the period 2005-2007 showed:

- a) lowest peak specific discharges
- b) most steady discharges during the period - (lowest coefficient of variation + well-balanced exceedence curve with lower maximum and higher minimum discharges)
- c) lowest runoff coefficient.

The only catchment with both agglomeration (municipality with 60 inhabitants) and water reservoir (more than 2% of total area) surprisingly showed:

- a) highest peak specific discharge
- b) highest runoff coefficient.

Only one catchment with arable land and tile drainage systems showed zero discharges in the period studied.

Runoff separation methods GROUND and Chapman's digital filter (both set for local conditions) seem to be suitable, sufficiently accurate and enter data relatively undemanding after validation with other separation methods.

It has been confirmed that the Kille method slightly overestimates the amount of baseflow in comparison with other methods.

The baseflow ratio is inversely proportional to the precipitation rate and average runoff. The ratio is dependant on the period studied. The baseflow ratio varied by 14 % between wet and dry periods in one catchment.

Land use, morphological factor (topographic index) and soil permeability factor showed a significant influence on long-term balance of runoff components.

The influence of land use is restrained during medium and extreme rainfall-runoff events, when meteorological (precipitation rate and antecedent precipitation index) and morphological factors are dominant.

The water runoff is quickened in catchments with higher amount of tile drained arable land, especially because of drained springs.

Forests both shorten the length of baseflow periods occurrence and, in long-term runoff balance, decrease the volume of direct runoff.

Topographic index represents well the behavior of underground water.

The presence of most permeable and vulnerable areas in the catchment influence mainly direct and hypodermic runoff.

The use of multivariate analysis is a very useful tool for such analysis of the relationship between more environmental variables and responses.

No significant relationship between landscape matrix and runoff components has been found with MIKE SHE modelling, whereas the influence of drainage has, once again, been confirmed.

The findings can be applied in the preparation process of protection (buffer) zones planning in water supply catchments, river basin district plans, Nitrate Direction phrased in Action programmes and Governmental regulations and Water Framework Direction.

## OBSAH:

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
1.1. UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY .....	8
2.1. CÍL PŘEDKLÁDANÉ PRÁCE .....	8
<b>2. LITERÁRNÍ PŘEHLED</b> .....	<b>9</b>
2.1. OBĚH VODY V PŘÍRODĚ .....	9
2.2. ODTOK VODY .....	10
2.2.1. ODTOK VODY Z POVODÍ.....	10
2.2.2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ODTOK.....	11
2.2.3. SLOŽKY ODTOKU A JEJICH GENEZE .....	15
2.2.4. SEPARACE ODTOKU.....	17
2.2.4.1. Uplatnění separace odtoku .....	18
2.2.4.2. Přehled vybraných metod separace odtoku.....	19
2.3. KRAJINA.....	23
2.3.1. DEFINICE KRAJINY.....	23
2.3.2. TYPY KRAJIN .....	24
2.3.3. CHARAKTERISTIKY KRAJINY .....	25
2.3.3.1. Základní skladebné součásti krajiny .....	26
2.3.3.2. Rozmístění skladebných součástí krajiny .....	28
2.4. VLIV VYUŽITÍ ÚZEMÍ NA HYDROLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY (se zaměřením na odtok).....	29
2.5. HYDROLOGICKÉ MODELÝ .....	31
2.5.1. DĚLENÍ HYDROLOGICKÝCH MODELŮ.....	32
2.5.2. DETERMINISTICKÉ MODELÝ .....	33
<b>3. MATERIÁL A METODY</b> .....	<b>34</b>
3.1. MATERIÁL .....	34
3.1.1. POVODÍ KOPANINSKÉHO TOKU .....	34
3.1.2. CHARAKTERISTIKY MIKROPOVODÍ.....	38
3.2. METODY .....	45
3.2.1. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	45
3.2.2. STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ.....	49
3.2.3. MODELOVÁNÍ.....	51
<b>4. VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>64</b>
4.1. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	64
4.1.1. PRŮTOKY .....	64
4.1.2. SEPARACE ODTOKU VODY .....	68
4.1.3. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SEPARACE ODTOKU VODY PRO RŮZNĚ VYUŽÍVANÁ POVODÍ.....	76
4.1.4. MNOHORozměrná ANALÝZA .....	77
4.2. MODELOVÁNÍ POMOCÍ MIKE SHE .....	83
4.3. SOUHRN PŮVODNÍCH VÝSLEDKŮ .....	87
<b>5. ZÁVĚR</b> .....	<b>89</b>
<b>6. SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>90</b>
<b>7. PŘÍLOHY</b> .....	<b>106</b>

# 1. ÚVOD

## ***1.1. UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY***

Jak období sucha, tak i povodně patří mezi extrémní hydrologické jevy. Voda je stejně jako vzduch pro život nepostradatelná a její dostatečné množství během celého roku je základním předpokladem pro existenci všech žijících organismů. Dále je dostatek vody důležitý pro rostlinnou a živočišnou výrobu, průmysl a dopravu, rekreaci a sport. V příliš velkém množství je však voda nebezpečná. Stále častější záplavy způsobují v krajině značné škody. Společným jmenovatelem obou výše uvedených extrémních jevů je proces odtoku vody z povodí. Zde však jakákoliv podobnost končí. Zatímco je odtok vody v období sucha tvořen základním odtokem a je dotován především zásobami podzemních vod, při extrémních srážko-odtokových událostech je dominujícím procesem rychlý odtok povrchovým a mělkým podpovrchovým prouděním (tzv. přímým odtokem).

V rámci ČR byly již několika autory separovány jednotlivé složky odtoku (přímo v oblasti krystalinika, kde se zájmové povodí nachází, například F. Doležalem a Z. Kulhavým), nebyl zde však proveden ucelený výzkum vlivu parametrů povodí na složky odtoku vody z povodí.

## ***2.1. CÍL PŘEDKLÁDANÉ PRÁCE***

Původním cílem této disertační práce bylo zjištění vlivu krajinné matrice (a jejího uspořádání) na složky odtoku vody z povodí. Do řešení byly samozřejmě zahrnuty i ostatní parametry povodí.

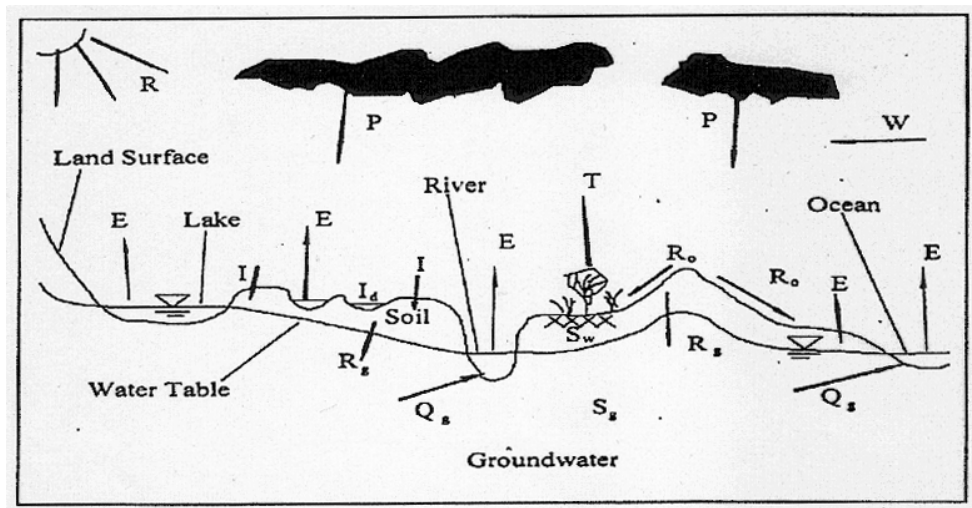
V rámci hydrologického modelování bylo cílem simulování jednotlivých scénářů uspořádání krajinné matrice na příkladu jednoho mikropovodí a vyhodnocení bilancí odtoku vody, které model MIKE SHE umožňuje.



## 2. LITERÁRNÍ PŘEHLED

### 2.1. OBĚH VODY V PŘÍRODĚ

Koloběh vody (hydrologický cyklus) je stálý oběh povrchové a podzemní vody na Zemi, doprovázený změnami skupenství. Hlavními hnacími silami koloběhu vody jsou sluneční záření a gravitace.



Obr. 2.1. Hydrologický cyklus

Zdroj: (SERRANO, 1997).

R – sluneční záření

E – evaporace

T – transpirace

W – rychlost větru

P – srážky

I<sub>n</sub> – intercepce

I – infiltrace

S<sub>w</sub> – půdní vlhkost

Q<sub>s</sub> – podpovrchový odtok

R<sub>g</sub> – odtok do saturované zóny

S<sub>g</sub> – rezervoár podzemní vody

Q<sub>g</sub> – odtok podzemní vody do řek, jezer a oceánů

Primárním vstupem do hydrologické bilance vody v povodí jsou srážky. Srážky jsou výsledkem kondenzace nebo desublimace vodní páry v ovzduší, na povrchu půdy, předmětů a rostlin. Kondenzace je změna skupenství vody v ovzduší z plynného na kapalné. Desublimace je změna skupenství vody v ovzduší z plynného přímo na pevné (HRÁDEK, KUŘÍK, 2002).

Ještě než srážková voda dosáhne zemského povrchu, je její část zadržena intercepčí. Intercepce je pojem, který zahrnuje množství procesů, při nichž je voda ze srážek dočasně zadržována na vegetaci či na površích vytvořených člověkem. Zadržovaná voda ze srážek může

být evaporována do atmosféry či nakonec steče na zemský povrch (SMITH, WHEATCRAFT, 1993).

Po dopadu srážek na zemský povrch jsou srážky zadržovány pokrývným porostem úměrně mocnosti těchto částí a době trvání srážek. Významnou roli hrají také akumulární prostory povodí – povrchové mikrodeprese, mokřady, nádrže aj. Ta část srážek, která je zachycena na půdním povrchu a na hrabance, je nazývána povrchová akumulace (KREŠL, 1999) a může se buď vypařit nebo infiltrovat do půdy (SERRANO, 1997).

Voda, která se dostane na zemský povrch buďto odteče, nebo se vypaří nebo je zadržována povodím. Voda z povodí odtéká po povrchu, v nenasycené a nasycené zóně půdního profilu (odtoku vody je věnována samostatná kapitola).

Základní rozdělení výparu je na transpiraci a evaporaci. Míra výparu je závislá na dostupnosti energie na povrchu, kde dochází k výparu a na schopnosti vodní páry pronikat do atmosféry. Difúze je ovlivňována různými fyzikálními procesy, ale princip ztráty vody z vodní hladiny, z půdy a z rostlin je stejný (SHUTTLEWORTH, 1993). Transpirace je forma výparu z listů rostlin a stromů. Závisí na rostlinných biologických procesech, druzích, lokalitě, půdní vlhkosti a také na meteorologických faktorech ovlivňujících výpar (SERRANO, 1997). Evaporaci z otevřené vodní hladiny nebo povrchu půdy a transpiraci biologické vody rostlinami není jednoduché rozlišit, proto jsou tyto procesy označovány souhrnně jako evapotranspirace (BRUTSAERT, 2005).

Intercepce a povrchová akumulace se sice významně podílejí na celkové vodní bilanci porostů, nemohou ale svojí velikostí podstatně ovlivnit utváření odtoku. Rozhodujícím činitelem pro retenci je infiltrace (KANTOR, 2003). Infiltrace je proces, kdy voda ze srážek, tání sněhu či zavlažování zasakuje do půdy. Pohyb půdní vody je proces, kdy voda putuje z jednoho bodu do druhého půdním profilem. Tyto dva procesy nelze separovat od sebe, neboť velikost infiltrace je limitována velikostí pohybu půdní vody a naopak pohyb půdní vody následuje až po infiltrační události (procesu), po níž následuje redistribuce této infiltrované vody (RAWLS A KOL., 1993).

## **2. 2. ODTOK VODY**

### **2.2.1. ODTOK VODY Z POVODÍ**

Povodí je základní hydrologickou oblastí, ve které zkoumáme odtokový proces a zjišťujeme vzájemný vztah bilančních prvků (KUŘÍK, 2001).

Odtok vody z povodí se vyjadřuje jednoduchou bilanční rovnicí:

$$O = S - E \pm \Omega,$$

kde:

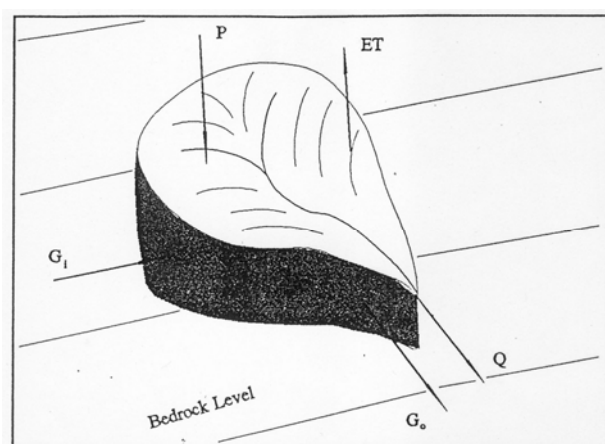
O - odtoková výška,

S - srážky,

E - evapotranspirace,

$\Omega$  - množství vody, které zvýšilo nebo snížilo zásoby povrchové a podzemní vody.

K výměně vody mezi povodími může sice docházet v důsledku prosakování podzemní vody přes rozvodnici (orografické a hydrogeologické rozvodí) a to zejména ve vápencových oblastech s podzemní krasovými dutinami, tyto ztráty vody z povodí jsou ale malé a lze je proto většinou zanedbat. Nicméně např. *DIJKSMA A KOL. (2002)* uvádí, že u povodí, kde se hladina podzemní vody nachází hluboko pod terénem, se lišila plocha „hydrologického“ povodí (vymezeného na základě měření hlubokých piezometrů a následnou aplikací modelu) a topografického povodí o 340 ha (716 a 1056 ha, resp.).



Obr. 2.2. Hydrologická bilance povodí

Zdroj: (*SERRANO, 1997*).

P - srážky

ET - evapotranspirace

Q - celkový odtok

$\Delta S$  - množství vody, které zvýšilo nebo snížilo

$G_i$  - přítok podzemní vody

zásoby povrchové a podzemní vody.

$G_o$  - odtok podzemní vody

### 2.2.2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ODTOK

Odtok vody během roku (sezónní odtokové poměry) je výsledkem interakce několika faktorů: geologie, morfometrie povodí, půd, vegetace a klimatu. Z těchto faktorů jsou zcela nezávislé na klimatu pouze geologie a velikost povodí. Dalším nezávislým faktorem

ovlivňujícím srážko-odtokové poměry, jehož význam v současnosti roste, je činnost člověka. Nejvýznamnějším faktorem je plocha povodí, protože ovlivňuje celkové množství srážek a tím velikost odtoku z povodí.

### **Vliv plochy povodí**

S rostoucí plochou povodí obvykle roste hodnota kulminačního průtoku (ale klesá maximální specifický průtok - *KREŠL, 2001*), zároveň je však tvar povodňové vlny výrazně plošší (*DAŇHELKA, 2007*).

### **Vliv geologických charakteristik**

Geologie ovlivňuje další charakteristiky povodí, především typ a mocnost půdy, sklon a tvar povodí. Vlastní geologické podmínky se uplatňují převážně ve smyslu rozložení propustných a nepropustných území (*DAŇHELKA, 2007*). Geologické podloží a jeho propustnost má význam pro utváření odtoku v období bezdeští. Ovšem nepropustné vrstvy s málo mocným půdním překryvem snižují celkovou retenční kapacitu povodí a spolupůsobí při prudkém stoupání průtoků při vydatných deštích. Z toho vyplývá, že geologické poměry povodí umožňující vznik velkých zásob podzemní vody (šterky, pískovce), mají čáry překročení pŕutoků ploché. Opakem jsou pak povodí mající čáry překročení strmé (*KREŠL, 2001*).

### **Vliv pedologických charakteristik**

Půdní charakteristiky ovlivňují zejména infiltrační a retenční schopnosti území (písčité půdy mají větší infiltrační rychlosti, ale menší retenční schopnost) (*DAŇHELKA, 2007*).

### **Vliv vegetace (využití území)**

Land use (land cover) determinuje míru intercepce daného území a jeho infiltrační vlastnosti (rychlost infiltrace). Tím je výrazně ovlivněna intenzita rychlé složky odtoku (přímý odtok). Pro vznik rychlého odtoku jsou nepříznivé zemědělské plochy bez dostatečného zapojení pěstovaných plodin chránících půdní povrch (chmelnice, vinice, porosty kukuřice a ostatní porosty na začátku vegetační sezóny) (*DAŇHELKA, 2007*). V lese dochází k významné ztrátě srážkové vody jejím zachycením na listech a větvích stromů, odkud se voda vypaří (intercepce).

*Příklad: v bukovém lese (Nový Zéland), kde dopadla roční srážka 1530 mm, průměrně propršelo až na povrch půdy pouze 69 % vody (tj. 1060 mm) a pouze další 2 % stekla na zem*

po kmenech stromů. To znamená, že 71 % srážkové vody se dostalo na zemský povrch. Ztráty vody intercepční se navíc liší v různých ročních sezónách. V létě, kdy stromy mají listy, a kdy je vyšší teplota, se takto ztratilo průměrně 35 %, a v zimě pouze 22 % srážkové vody (ROWE, 1983).

### **Vliv zásahů člověka do povodí**

Poměrně dobře je zdokumentovaný vliv změn využití území v zalesněných povodích, kde se studovala velikost odtoku před a po vykácení lesa (např. HORNBECK A KOL., 1993). Vykácení lesa vede k tomu, že se sníží intercepční kapacita a výpar a větší podíl srážkového úhrnu se pak zapojuje do povrchového odtoku. V podmínkách ČR se této problematice v rámci disertační práce velice podrobně věnoval například TACHECÍ (2002) na příkladu horského povodí Uhlířská v Jizerských horách, kde v důsledku ekologické kalamity došlo v letech 1984-1986 k plošné těžbě dřeva. Na základě detailních rozborů jednotlivých hydrologických procesů a jejich dynamiky dospěl k následujícím závěrům. Z porovnání celkové ztráty v jednotlivých letech s konstruovanou řadou evapotranspirace v období sedmi let od počátku těžby odhadl navýšení odtokové výšky o přibližně 80 mm. Po tomto období se již výrazněji začíná projevovat vliv zvýšené intercepce mladého porostu na hydrologickou bilanci. Rovněž zvětšení velikosti větších a velkých povodní v období těsně po těžbě po pěti letech mizí. Nicméně vyslovuje hypotézu, že k výrazné změně v procesech tvorby odtoku nedošlo. Infiltrační rychlosti ve svrchních horizontech byly zřejmě lokálně redukovány při těžbě, ale vysoká heterogenita (a porušení profilu), kombinovaná s působením kořenů travního porostu vede ve větším prostorovém měřítku k průměrným infiltračním rychlostem, které stále ještě překračují pozorované intenzity srážky.

Na řadě řek je odtok přímo regulován stavěním přehrad, které zmenšují roční variabilitu průtoků tím, že zadržují vodu, když je přítok do přehrady větší než vypouštění a naopak nadlepšují průtoky, když je přítok menší než vypouštění. Např. na řece Peace v Kanadě došlo po výstavbě přehrady ke snížení ročního rozpětí průtoků z 1500 – 9000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> na pouhých 500 – 2000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (PETERS, PROWSE, 2001).

Dalším zásahem, ovlivňujícím odtok, jsou umělé převody vody mezi povodími. Takto je odtok uměle ovlivněn v povodí Ostravice, kde dochází k převodům vody na rozdělovacím objektu (jez Vyšní Lhoty) z Morávky do Lučiny. KAŇOK (1997) vyjádřil převody vody v povodí Ostravice pomocí tzv. antropogenního specifického odtoku (l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>) za období 1971 – 1990. V tomto období má povodí horní Ostravice až po soutok s Morávkou zápornou

bilanci – tzn., že zde dochází k odebírání vody a celý dolní zbytek povodí naopak bilanci kladnou, protože zde dochází k vypouštění vody zpět do řeky.

Ještě významnějším vlivem, než převody vody, je urbanizace rozsáhlých oblastí. Zvýšení odtoku a snížení vsaku vody do půdy je v urbanizovaných oblastech způsobeno rozrůstáním ploch s nepropustným povrchem (silnice, parkoviště, domy) a zvětšováním hustoty odvodňovací sítě budováním splaškové a dešťové kanalizace.

### **Vliv odvodnění**

Velmi výrazným prvkem vyskytujícím se v zemědělsky využívané krajině České republiky je přítomnost drenážních systémů.

Plochy v České republice odvodněné drenáží, uváděné Zemědělskou vodohospodářskou správou k 1.1.1995, jsou 1 064 999 ha (*KULHAVÝ A KOL., 2007*).

Změny ve využití pozemků, které v ČR nastaly během 90-tých let 20. století, způsobily, že návrhové parametry některých staveb odvodnění nebo jejich dílčích částí již neodpovídají současným podmínkám. Platí to např. v případě, že pozemek byl odvodněn pro plodiny pěstované na orné půdě a je nyní využíván jako louka (*SOUKUP A KOL., 2001*). Systémy odvodnění zemědělské půdy postrádají, až na výjimky, složku retardace odtoku, neboť byly navrhovány především pro zajištění odvodu přebytečné vody z půdního profilu. Funkce odvodnění je u těchto systémů nejdůležitější a je třeba ji zachovat, pokud odpovídá požadavkům zemědělské výroby, respektive požadavkům hlavních zemědělských plodin (*EICHLER A KOL., 2000*).

Určitou změnu v případě dříve navržených systémů představuje i nárůst výkonnosti nových pěstovaných odrůd. Ty mají celkově vyšší vláhovou spotřebu a tudíž jejich vláhový režim nebyl upravován jednostranně, ale byl optimalizován s ohledem na vegetační fázi vývoje plodin (*SOUKUP A KOL., 2001*).

### **Vliv klimatu**

Problematikou se zabývá např. *SVAZEK 32 NÁRODNÍHO KLIMATICKÉHO PROGRAMU ČR (2002)* na základě čtyř variant scénářů klimatické změny (vývoj imisí a předpokládaná citlivost zvýšení teploty v závislosti na zvýšení obsahu CO<sub>2</sub> v atmosféře), s použitím tří hydrologických modelů a dat z dvanácti povodí. I u optimistických scénářů se projevují zřetelné změny hydrologického režimu, zejména pokles průměrných průtoků průměrně o cca 15 %. U pesimistických scénářů jsou poklesy průměrných průtoků v rozmezí 25 – 40 %, což již znamená zásadní změnu hydrologického režimu.

### 2.2.3. SLOŽKY ODTOKU A JEJICH GENEZE

Srážková voda nebo voda z tajícího sněhu se ze svahů dostává do koryta vodního toku různými cestami. Jaká je cesta vody do řeky závisí nejdříve na tom, jaké jsou infiltrační schopnosti půdy, dále v jakém stavu je povrch půdy a následně na vlastnostech povrchových a podzemních vodních zásob.

Jednoduché rozdělení odtoku na jeho jednotlivé složky je následující:

- a) základní odtok (angl. *baseflow*) - je dotovaný podzemní vodou,
- b) hypodermický odtok (angl. *interflow*) - podpovrchový odtok makropóry a preferenčními cestami,
- c) nasycený povrchový odtok (angl. *saturated overland flow*) - po povrchu málo propustných nebo dočasně nasycených půd, nebo z trvale nasycených zón v blízkosti vodních toků. České výrazy jsou uvedeny dle ČSN 73 6530 (1983) - *Názvoslovní hydrologie*.

Mělký hypodermický a nasycený povrchový odtok dohromady tvoří přímý odtok (angl. *quick flow*) - rychlý odtok v průběhu a krátce po skončení srážky. Do kategorie přímého odtoku patří rovněž hortonovský povrchový odtok, vznikající po překročení infiltračních schopností půdy a povrchové retence (např. *NAEF A KOL., 2002*). Přímá složka odtoku je odezvou na srážku nebo tání, zatímco základní složka je výslednicí dlouhodobé redistribuce podzemních vod (*KULHAVÝ A KOL., 2001*).

Podrobnější popis procesu tvorby a rozdělení odtoku na jeho jednotlivé složky je často citován. Podrobné rozdělení rychlé odezvy odtoku na srážkou najdeme např. v *BRUTSAERT (2005)*:

1. Povrchový odtok
  - a. Odtok z překročení infiltrace - „Infiltration excess overland flow“.
  - b. Odtok z překročení nasycení – „Saturation excess overland flow“.
2. Podpovrchový odtok
  - a. Odtok makropóry a jinými preferenčními cestami - „Macropores and other preferential flow paths“.
  - b. Odtok mělkou permeabilní vrstvou (nasycené proudění) - „Throughflow in a shallow permeable layer“.
  - c. Odtok způsobený zvýšením hladiny podzemní vody „Wavelike mobilization of water table“.

Mezi pomalé složky odtoku pak patří:

1. nenasycené podpovrchové proudění,
2. proudění podzemní vody.

## **Povrchový odtok**

Primárním zdrojem vody pro tento odtok je srážkový úhrn.

Odtok z překročení infiltrace – hortonovský. Vzniká v případě, že intenzita srážky přesahuje infiltrační kapacitu půdy. V současné době je známo, že povrchový odtok není univerzálně vyskytující se jev, a že se v mnoha případech nemusí vůbec objevit.

Odtok z překročení nasycení. Objevuje se na místech, kde je povrch předem nasycen (vývěr podpovrchového odtoku, zvýšená hladina podzemní vody), bez ohledu na intenzitu srážky (BRUTSAERT, 2005).

Specifické podmínky pro vznik povrchového odtoku vznikají v období tání. Intenzita tání je podstatně nižší než intenzita dešťových srážek. Avšak rychlost vsakování je minimální a kolísá u hlinitých a jílovitých půd mezi  $0,01$  a  $1,0 \text{ mm.den}^{-1}$ , protože půda je v zimě promrzlá a v povrchových vrstvách nasycená vodou. Značné množství tající vody proto odtéká, takže odtokový koeficient, který je především dán charakteristikou hydrologických vlastností povodí, je pro vodu z tajícího sněhu obvykle vyšší než pro dešťovou vodu. Povrchový odtok probíhá hlavně v době tání, kdy během 10 a 20 dnů taje podstatná část sněhu. Tento stav dotýkající se eroze je nepříznivější, je-li tání doprovázeno deštěm a náhlým oteplením vzduchu (TOMAN, PODHRÁZKÁ, 2002).

## **Podpovrchový odtok**

Primárním vstupem vody pro tento odtok je infiltrovaná voda.

Podpovrchový odtok makropóry a jinými preferenčními cestami. Protože se vysoušení půdy i biologická aktivita (jako nejčastější původci makropórů) odehrávají blízko povrchu půdy, vyskytují se makropóry ve svrchních vrstvách půdního profilu.

Podpovrchový odtok mělkou permeabilní vrstvou. Jedná se většinou o několik desítek centimetrů mocnou vrstvu složenou z minerálních půd s vysokým obsahem organických zbytků, jejíž spodní rozhraní je charakteristické náhlým snížením hydraulické vodivosti. Tato vrstva je v mnoha studiích označena jako významné až hlavní transportní médium událostního odtoku.

Podpovrchový odtok způsobený zvýšením hladiny podzemní vody. Tento druh odtoku může být obzvlášť rychlý v dolních částech svahu. Vyskytuje se v místech, kde při vysokém stupni nasycení půdního profilu, může vést k tomu, že dodání i relativně malého množství vody může vést k rychlému zvýšení hladiny podzemní vody. To se dále může projevit v podpovrchovém nebo dokonce povrchovém odtoku (BRUTSAERT, 2005).

Podpovrchový odtok nenasyčený. Může trvat až několik týdnů po srážce.



## Podzemní odtok

Obecně je odtok podzemní vody do toku považován za rovný odtoku základnímu získanému s pomocí metod separace odtoku (*HALFORD, MAYER, 2000*). Podzemní voda navzdory pomalému pohybu představuje největší zdroj vnitrozemské vody na světě. Podíl podzemní vody z celkové vnitrozemské vody byl vyhodnocen na 30 % a na 90 % tekuté vnitrozemské vody (*SERRANO, 1997*). Podzemní vody proudí skrz navzájem propojené póry, mikrotrhlinami mezi hranicemi zrn a trhlinami větších rozměrů (*SMITH, WHEATCRAFT, 1993*). Relativně pomalé rychlosti proudění podzemní vody a její dlouhá doba zdržení ve zvodních vytváří nepřetržitý odtok vody do vodních toků a vodních nádrží. Tento proces zajišťuje minimální výšky hladin ve vodních nádržích a minimální průtok ve vodních tocích v bezsrážkových obdobích (*SERRANO, 1997*). Zajímavé je zjištění, že pro velikost základního odtoku je důležitějším faktorem litologie než srážky. Jsou známy případy, že v oblastech, kde málo prší, bývá větší základní odtok než v deštivějších oblastech v případě, že se tam nachází horniny schopné akumulovat více podzemní vody.

### 2.2.4. SEPARACE ODTOKU

Mnoho hydrologických studií zaměřených na nízké průtoky je založeno na analýze datových řad o průtocích, používající metody jako analýzu četnosti (např. rozdělení pravděpodobnosti) a metody separace (např. digitální filtry, analýza poklesových větví) (*SMAKHTIN, 2001*).

Separace složek, dohromady tvořících celkový odtok vody z povodí v závěrovém profilu, je základním nástrojem hydrologie už po mnohá desetiletí. Metodami, jak separovat přímý odtok od odtoku základního, empiricky i hydrologicky zdůvodněnými, se zabývala již řada autorů (*KULHAVÝ A KOL., 2001*).

Odlišení cest, jakými voda dosáhla vodního toku, je možné pouze pomocí intenzivních pokusů na povodích. Ve skutečnosti je separace jednotlivých komponent odtoku prováděna na základě doby doběhu nebo odezvy, což odpovídá analytickým metodám, spíše než odvozování na základě fyzikálních procesů.

Při separaci hydrogramu je nezbytné určit tři hlavní body hydrogramu. Jsou to začátek a konec období přímého odtoku a tvar hydrogramu základního odtoku mezi těmito dvěma body. Začátek přímého odtoku je obvykle snadno identifikovatelný v místě, kde se po začátku srážky hydrogram poprvé odchýlí od konstantního nebo trvale klesajícího průběhu základního odtoku, který do té doby převažoval. Určení konce období rychlé složky odtoku a

tvaru hydrogramu základního odtoku je více obtížné. Používá se například metoda analýzy poklesové větve hydrogramu. Pro vyjádření pokulminační fáze se používá více termínů, výše uvedená poklesová větev, dále pak výtoková čára a čára prázdňení (STEHLÍK, 1998). V této práci bude používán termín poklesová větev.

#### **2.2.4.1. Uplatnění separace odtoku**

Charakteristiky nízkých průtoků se v posledních letech stále více sledují v důsledku zvyšující se spotřeby vody (TALLAKSEN, 1995). Využívání vody vzrůstá s rozvojem lidských znalostí a vynálezů. V roce 1900 využívali lidé 400 km<sup>3</sup> vody ročně, to znamená 242 m<sup>3</sup> na osobu, zatímco v roce 1985 už okolo 2000 m<sup>3</sup> vody (TESAŘ A KOL., 2005).

Informace o nízkých průtocích poskytují důležité poznatky pro mnoho vodohospodářských aktivit a jsou vyžadovány pro takové oblasti hospodaření s vodou jako je zásobení obyvatelstva vodou, závlahy a stanovení jakosti vody. Pochopení odtokových procesů podzemní vody a jiných „zpožděných“ zdrojů vody je také nezbytné pro vyhodnocování vodní bilance a odezvy povodí (TALLAKSEN, 1995).

Analýza složek odtoku byla rovněž použita k modelování koncentrací znečišťujících látek (BROWN, 1986; LESACK, 1993). Byl sledován vliv všech složek odtoku na výsledné koncentrace v uzavěrovém profilu. Např. MENDEL, PEKÁROVÁ (1989) vyvinuli jednoduchý regresní model SIM, používaný k modelování koncentrací znečišťujících látek na základě dat o průtocích.

DOLEŽAL, KVÍTEK (2004) použili výsledky separace odtoku v rámci jedné studie a zjistili mírnou, ale statisticky signifikantní, pozitivní korelaci mezi koncentracemi dusičnanů a hypodermickým, resp. základním odtokem.

O důležitosti sledování základního odtoku svědčí i fakt, že už od roku 1976 se započalo v rámci Hydrofondu ČHMÚ s vyhodnocováním základních odtoků jako ukazatele přírodních zdrojů podzemních vod (KESSL, KNĚŽEK, 2000).

To však umožňovalo jen srovnání dlouhodobých charakteristik, zpracování v ročních cyklech se ukázalo nevhodné pro příliš malý rozsah souboru. Proto se od konce 70. let rozvíjely metody vyčlenění podzemního (základního) odtoku z hydrogramu odtoku ve vodoměrných stanicích. V roce 1998 byla na základě celkového zpracování základního odtoku vypracována mapa specifických odtoků pro období 1971 – 1990 (KESSL, KNĚŽEK, 2001).

## 2.2.4.2. Přehled vybraných metod separace odtoku

### Metoda Klinera a Kněžka

Z domácích autorů sestrojili vhodnou metodu separace odtoku např. *KLINER, KNĚŽEK (1974)*. Metoda navržená Klinerem a Kněžkem vychází ze vztahu mezi pozorovanou úrovní hladiny podzemní vody a průtokem v hodnoceném vodoměrném profilu. Existuje-li mezi podzemními vodami a tokem hydraulická spojitost, existuje nutně i závislost hladin podzemních a povrchových vod. Při hydraulickém řešení pohybu podzemních vod se obvykle vychází z obecné diferenciální rovnice nestacionárního proudění homogenním porézním prostředím. Tento vztah lze vyjádřit funkcí:

$$O_z = f(H),$$

kde:

$O_z$  - základní podzemní odtok v recipientu,

H - stav hladiny podzemní vody ve vrtech (spád hladiny podzemní vody, vydatnost pramenů, atd.)

Vynášeli-li se tedy do bilogarithmické soustavy odpovídající si dvojice průtoků a kolísání hladin podzemní vody, měly by body z období, kde je celkový odtok dotován jen podzemními vodami, vytvořit přímkovou závislost.

Naopak všem obdobím se smíšeným průtokem musí nutně odpovídat body udávající pro určitý rozdíl hladin podzemní vody větší průtok. Tento poznatek byl využit tak, že místo výběru období vynášíme do závislosti všechny naměřené dvojice povrchového průtoku a rozdílu hladin podzemních vod bez ohledu na tvar hydrografu a časový průběh srážek. Vykreslená obalová čára pak představuje výslednou závislost.

Po vynesení naměřených údajů o odtoku a vydatnosti pramene do grafu a následném vykreslení obalové křivky byl získán vztah pro určení poměru základního odtoku k přímému a vymezení období základního odtoku. Při praktickém zpracování je výhodné použít bilogarithmickou soustavu, kde se předpokládaný vztah musí projevit jako přímka.

Podobně orientovanou metodu jako u Klinera a Kněžka dále rozvinuli *PETERS, VAN LANEN (2003)*. K odseparování základního odtoku použili nový filtr rovněž založený na využití pozorovaných hladin podzemní vody. Pro vyjádření závislosti základního odtoku na hladině podzemní vody byl použit nelineární vztah. Přímý odtok byl na základě srážek a potenciální evapotranspirace vypočten pomocí bilančního modelu.

## **Metoda GROUND a MPMG**

Doležal a Jain (*JAIN, 1997*) a Kulhavý (*KULHAVÝ A KOL., 2001*) vypracovali empirické metody. U obou metod jde o rozčlenění hydrogramu podle zásady, že každá zřetelná odtoková vlna má příčinu v určité srážkové epizodě, přičemž dílčí příčinné deště na sebe mohou volně navazovat.

Začátek vyhodnocovaného období by měl připadnout do málo vodného období, kdy průtok nekolísá. Metoda obsahuje jediný proměnlivý vstupní parametr - koeficient přírůstku základního odtoku COEF. Vnitřními parametry, nepočítáme-li pomocné proměnné, jsou přírůstek základního odtoku DIFF a logická proměnná FLOOD. Vstupem je řada středních denních nebo v jiném konstantním časovém kroku průměrovaných průtoků nebo odtoků. Výstupem jsou dvě řady středních denních nebo obdobných průtoků představujících, v pořadí, přímý a základní odtok z povodí.

Tato metoda je použitelná i tehdy, nenachází-li se v datové řadě velká, dobře vyvinutá a izolovaná odtoková vlna, datová řada přitom není dostatečně dlouhá pro použití metody Killeho a vedle odtoku samotného nejsou k dispozici žádné jiné měřené veličiny. Algoritmus metody GROUND po jednotlivých krocích je podrobně uveden v *KULHAVÝ A KOL. (2001)*.

## **Metoda Killeho (metoda minimálních měsíčních průtoků)**

Předností této metody jsou především snadná dostupnost podkladových dat nevyžadujících doplňkové údaje, regionální platnost, rychlost a jednoduchost zpracování, které téměř vylučuje subjektivní zásahy vedoucí u různých zpracovatelů k výrazněji odlišným výsledkům. Metoda minimálních měsíčních průtoků je z větší části empirická. Její základ, totiž výběr nejmenšího průměrného denního průtoků v měsíci, je obdobný některým metodám vyčlenění základního odtoku z hydrogramu. Přínos metody Killeho je v tom, že takto vybrané hodnoty jsou seřazeny do čáry překročení a ta je v oblasti vyšších hodnot aproximována čarou odpovídající tečně jejího průběhu v oboru maximálních výskytů. Zjednodušeně můžeme říci, že se v této metodě pracuje s čarou překročení jako s čarou poklesu průtoků. Upustíme-li od exaktního vyjadřování, najdeme zdůvodnění v tom, že oblast hodnot průtoků nad aproximovanou čarou procentuálně odpovídá počtu minimálních měsíčních průtoků ovlivněných ať již přímým nebo hypodermickým odtokem (*KNĚŽEK, 1988*).

## **Digitální filtry**

První použití bylo založeno na filtru běžně používaném k zpracování signálu (*LYNE, HOLLICK, 1979*) a vykazovalo podobné výsledky jako konvenční metody. Při použití filtru je

potřeba odhadnout velikost koeficientu (parametru) pomocí jiné metody - analýza poklesové větve, tracerové metody apod. - nebo použít již osvědčenou hodnotu koeficientu pro dané podmínky (velikost povodí, formát vstupních dat). Mezi digitální filtry řadíme např. metody dle Chapmana a Maxwella, Boughtona nebo Lyne a Hollicka (souhrnný stručný popis např. v *GRAYSON A KOL., 1996*)

### **Analýza poklesových větví**

Při rozčlenění hydrogramu v jeho celém průběhu je možno vycházet z toho, že postupný pokles odtékajícího množství v čase vyjadřuje výtoková čára (poklesová větev), pro jejíž popis jsou v hydrologii podzemních vod nejčastěji užívány vztahy odvozené Boussinesquem, které jsou podrobně analyzovány např. *SLEPIČKOU A KOL. (1989)*. Pokud přírodní i antropogenní podmínky ji definující se nemění, je výtoková čára poměrně stabilní (*KNĚŽEK, KESSL, 2000*).

V našich klimatických podmínkách a patrně i v dalších oblastech střední Evropy je však obtížné nalézt delší bezsrážkové období a tudíž i dostatečně dlouhé úseky výtokových čar (*KNĚŽEK, KESSL, 2000*). Podle práce *BUCHTELEHO, HLADNÉHO (1975)* se např. v horní polovině povodí Vltavy opakovala bezsrážková období delší než 10 dní za posledních 30 až 40 let méně než desetkrát, dvoutýdenní období se vyskytla jen jednou. *KREJČOVÁ (1990)* uvádí, že pro spolehlivé popsání výtokových čar je nezbytné analyzovat 15 až 20 poklesových fází vln.

Poklesová větev má charakteristický průběh. Horní část vyjadřuje prudké, dolní pozvolnější klesání průtoku, které se asymptoticky přibližují k hranici nejmenších průtoků – k nevyčerpatelné kapacitě zásob vody v povodí (*STEHLÍK, 1998*).

Poklesové větve vynesené v semilogaritmickém měřítku (průtok v logaritmickém měřítku) často vymezují tři části, tvořené přibližně rovnými úseky. Za konec období přímého odtoku je většinou považován bod křížení dvou nejnižše položených rovných úseků. Obecně se uvádí, že dva inflexní body poklesové větve jsou určeny exponenciálně klesající křivkou dle:

$$q_t = q_0 e^{-t/k},$$

kde:

$q_0$  - hodnota průtoku v čase 0,

$q_t$  - hodnota průtoku v čase  $t$ ,

$t$  - čas,

$k$  - konstanta.

Pokud tato rovnice platí, pak poklesová větev znázorněna v semilogaritmickém měřítku má tvar přímky (SERRANO, 1997). Rozčlenění průtokové vlny pomocí poklesových větví představuje fyzikálně zdůvodněnou interpretaci rozdělení celkového objemu na efektivní srážky a podzemní odtok s delší dobou zdržení (STEHLÍK, 1998).

Separace odtokových složek pomocí poklesových větví bývá vztahována jak na jednotlivé události, tak i na celý hydrogram (např. BATES, DAVIES, 1988). Takovýto způsob separace pak umožňuje i bilancování, např. stanovení infiltrovaného množství do nádrže podzemní vody (FRÖLICH A KOL., 1994).

Dalšími aplikacemi analýzy poklesových větví je např. předpověď průtoků v bezsrážkových obdobích, určování návrhových malých průtoků (např. DEMUTH, HAGEMANN, 1993; VOGEL, KROLL, 1992), nebo výpočet hydrogeologických parametrů povodí (výhoda výpočtu hydraulických parametrů pomocí poklesových větví spočívá v tom, že takto vypočtené parametry poskytují souhrnnou informaci o hydraulických vlastnostech horninového prostředí v rámci celého povodí (STEHLÍK, 1998)). Touto problematikou se v rámci ČR zabývali např. SLEPIČKA A KOL. (1989).

## Ostatní metody

Z ostatních metod je pak další možností velmi účinná, ale nákladná analýza obsahu přírodních izotopů (radioaktivních i stabilních) ve srážkách, v půdní a podzemní vodě i v odtoku (BUTTLE, 1994; UHLENBROOK, LEIBUNDGUT, 2000; FREDERICKSON, CRISS, 1999).

Přírodní izotopy, jako  $O^{18}$  a deuterium, jsou stále více používány k separaci zvýšeného průtoku na jeho složku způsobenou srážkovou událostí (příp. táním) a složku dotovanou základním odtokem za účelem objasnění zdrojů, cest a doby zdržení vody v povodích (BUTTLE A KOL., 1995). Tak např. GIBSON A KOL. (2000) pro svažité zalesněné povodí vyhodnotili podíl přímého odtoku na 12 % a základního na 88 %, dobu zdržení na 2 měsíce a celkový objem zadržené vody v povodí na 400 mm. K podobným výsledkům na svažitém alpském povodí dospěli i CAREY, QUINTON (2005), kteří určili podíl přímého odtoku na 9 %. Obecně pak při použití metod separace odtoku analýzou obsahu přírodních izotopů uvádí BUTTLE (1994) nejméně 50 % jako podíl základního odtoku na malých a středně velkých povodích.

Další možností jsou chemické metody pro separaci odtokových složek hydrogramu, kdy LANGBEIN, DAWDY (1976) objevili poměrně těsnou souvislost mezi velikostí průtoku a chemickým složením vody. Jako chemické stopovače mohou být použity takové ionty, které

se nevyskytují v dešťové vodě a nebo se v ní vyskytují v malých koncentracích ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ).

*PEKÁROVÁ, PEKÁR (1996)* použili chemickou metodu separace na malém povodí (jako stopovač použit  $\text{SO}_4^{2-}$ ) ve východním Slovensku a zjistili následující podíly jednotlivých složek odtoku k celkovému odtoku: povrchový odtok 57,5 %, podpovrchový odtok 21,1 % a podzemní odtok 21,4 %.

*WELS A KOL. (1991)* zjistili podíl půdní vody v celkovém odtoku při použití metody separace odtoku pomocí chemických stopovačů na 90 % a pouze 72 % při použití izotopových stopovačů (deuteria). To může být vysvětleno skutečností, že při použití deuteria je určitý podíl vody, která rychle prochází půdním profilem, označen jako povrchová voda. Podobně použili kombinaci chemických a izotopových stopovačů i *JENKINS A KOL. (1994)*.

*ZAJÍČEK A KOL. (2008)* se v současné době zabývají možností separace rychlé složky drenážního odtoku pomocí měření teploty vody v drenážních systémech. Využívají rychlé odezvy drenážních průtoků a teploty drenážní vody na srážkovou činnost. V chladném období klesá teplota drenážní vody při zvyšujícím se průtoku, v teplém období naopak stoupá.

Dále byla k separaci odtoku použita elektrická vodivost (např. *KUNKLE, 1965 IN STEHLÍK, 1998*).

## **2.3. KRAJINA**

### **2.3.1. DEFINICE KRAJINY**

V podstatě každá z forem hodnocení krajiny vyžaduje vlastní, danému účelu nejlépe vyhovující definici krajiny. Společným znakem drtivé většiny definic krajiny je její polyfunkční charakter (*SKLENÍČKA, 2003*).

Krajina je část zemského povrchu s charakteristickým reliéfem, tvořená souborem funkčně propojených ekosystémů a civilizačními prvky (*ZÁKON Č. 114/1992 SB.*).

V ekologickém pojetí je krajina systémem přírodních, resp. přírodních a člověkem podmíněných elementů, jejichž vztahy mohou být harmonické či nevyvážené. Předmětem studia v tomto pojetí bývá struktura, funkce a dynamika krajiny (*SKLENÍČKA, 2003*).

Jednou z nejznámějších definic v tomto pojetí je definice Formana a Godrona, kteří krajinu chápou jako heterogenní část zemského povrchu, skládající se ze souboru vzájemně se ovlivňujících ekosystémů, který se v dané části povrchu v podobných formách opakuje (*FORMAN, GODRON, 1993*).

Pod pojmem krajina se rozumí část zemského povrchu se svéráznou přírodou, specifickými přírodními zdroji a způsobem života jejího obyvatelstva (*JŮVA A KOL., 1981*).

Jako krajina může být zkoumána libovolná prostorová jednotka, jejíž složky, vazby mezi nimi, toky látek, energií a informací jsou definovány tak, aby chování této jednotky bylo možné prognózovat a řídit. Tak může být podle různých kritérií ekologické stability zkoumáno v duchu těchto definic např. malé povodí, geomorfologicky jednotný úsek toku, fyzickogeografická jednotka libovolného řádu (*MÍCHAL, 1992*).

Krajina je tvořena skupinami ekosystémů společně s uměle vytvořenými strukturami. Na druhé straně je krajina součástí vyšších regionálních jednotek, takzvaných biomů (*ODUM, 1991*).

Neurčitost použité definice krajiny se stává pro sledovaný účel její velkou předností. Přiznáváme tím, že vymezení krajiny jako chorického geosystému je abstrakcí, kterou nelze uskutečnit bez formulace zvolených účelových kritérií. Tato účelová abstrakce však musí respektovat požadavek teorie systémů, aby krajina vymezená jako systém (ať jako ekosystém, nebo jako geosystém) byla něčím více než prostou sumou svých částí, aby tedy její vymezení umožňovalo kvalitativně novou, vyšší, jinak nedosažitelnou úroveň poznatků (*MÍCHAL, 1992*).

Krajinná ekologie chápe krajinu jako systém (geosystém). Geosystémy jsou svérázným typem prostorových systémů středního měřítko, které se vyskytují na povrchu naší planety a vyznačují se určitými příznačnými rysy (*DEMEK, 1999*).

### **2.3.2. TYPY KRAJIN**

**Krajina přírodní** je krajinou, která vznikla působením přírodních krajinotvorných procesů. Dnes je přírodní krajina omezena na nevelké plochy zemského povrchu v těžko přístupných oblastech (*ŠTULC, GÖTZ, 1993*).

Přírodní krajinu lze rozdělit na:

1. zonální přírodní krajinu, jejíž ráz a chování je určováno zákony šířkové pásovitosti a výškové stupňovitosti,
2. azonální krajinu, která se z nějakého důvodu vymyká zákonům šířkové pásovitosti a výškové stupňovitosti. Důvodem mohou být vlivy endogenních krajinotvorných pochodů (*DEMEK, 1999*).

**Krajina blízká přirozené** se vyznačuje převahou přirozené vegetace, která je však již ovlivněna lidskou činností (*SKLENIČKA, 2003*).



**Krajina kulturní**, ve které se prolíná přírodní základ s krajinnými složkami přímo vytvořenými lidskou společností, postupně vznikla změnou krajiny přírodní (*DEMEK, 1999*).

Podle Demka lze kulturní krajinu rozdělit na:

1. lesohospodářskou krajinu, která je často nejbliže původní přírodní krajině,
2. zemědělskou krajinu, jejímž hlavním rysem je převaha produkčních geosystémů, tj. zjednodušených ekosystémů zaměřených na produkci biomasy,
3. vodohospodářskou krajinu, vznikající vodohospodářskými krajinotvornými pochody, jako jsou regulace vodních toků, výstavba rybníků, přehrad a další,
4. sídelní krajinu,
5. průmyslovou krajinu (*DEMEK, 1999*).

Dalším členěním kulturní krajiny může být:

1. vlastní kulturní krajina (krajina kultivovaná), ve které je hospodářská činnost v souladu s přírodními podmínkami. Ekologická rovnováha a autoregulační schopnost krajiny zůstaly zachovány,
2. narušená kulturní krajina (krajina degradovaná), jejíž stabilita je narušena a přírodní podmínky jsou negativně ovlivňovány člověkem. Existuje zde naděje na regeneraci krajiny a návrat k autoregulaci a k obnově ekologické rovnováhy,
3. krajina devastovaná, ve které je porušena původní struktura krajiny a značně narušena její autoregulace. Její regenerace přirozenou cestou je zdlouhavá (*ŠTULC, GÖTZ, 1993*).  
*FORMAN S GODRONEM (1993)* uvádějí členění kulturní krajiny na:

1. krajinu obhospodařovanou, ve které se sice vyskytují původní druhy, ale je obhospodařována s cílem sklízet produkci (př. lesy, pastviny),
2. krajinu obdělávanou, ve které jsou přírodní nebo obhospodařované enklávy roztroušeny mezi převažujícími obdělávanými plochami,
3. krajinu příměstskou, která představuje přechod mezi městem a volnou krajinou,
4. městskou krajinu s hustou zástavbou.

### **2.3.3. CHARAKTERISTIKY KRAJINY**

Krajinná ekologie se zaměřuje na tři charakteristiky krajiny, kterými jsou: struktura krajiny, funkce, změna. Krajiny plní celou řadu funkcí, které odpovídají základním funkcím přírodního prostředí, a to zejména funkci přírodní, dále pak funkce společensko-ekonomické a kulturní.

Změny krajiny jsou působeny stejnými skupinami faktorů, které krajinu tvoří - tedy faktory přírodními a antropogenními.

Struktura (skladba) krajiny je dána vztahy mezi zastoupenými charakteristickými ekosystémy či složkami a dělí se na strukturu vertikální a horizontální. Struktura vertikální je dána geomorfologií, výškovou členitostí terénu, je výsledkem pouze přírodních vlivů (v určitých oblastech mohou antropické vlivy překrývat vliv přírodních faktorů - těžba).

Struktura horizontální je složena ze tří základních skladebních součástí každé krajiny: krajinné matrice (matrix), enklávy (plošky) a koridoru (SEMORÁDOVÁ, 1998; SKLENIČKA, 2003).

### 2.3.3.1. Základní skladebné součásti krajiny

#### Krajinná matrice (matrix)

Krajinná matrice je z nich nejrozsáhlejší a nejvíce spojitá, proto hraje v krajině dominantní roli (FORMAN, GODRON, 1993). Pro identifikaci matrix v krajině jsou uváděna tři kritéria (SKLENIČKA, 2003):

1) *Kritérium relativní plochy* - plocha matrix by měla být větší než plocha kteréhokoliv jiného typu krajinné složky. Pokud se podílí jeden z typů krajinných složek více jak 50 % na celkové výměře krajiny, lze jej pak s největší pravděpodobností označit jako matrix. Naopak, pokud nejrozšířenější typ pokrývá méně než 50 %, je nutné vzít v úvahu i zbylá dvě kritéria.

2) *Kritérium spojitosti* - jako příklad, kdy první kritérium nefunguje, uvádějí FORMAN, GODRON (1993) krajinu s živými ploty. Ty, ač tvoří maximálně 1/10 plochy krajiny, obklopují jednotlivé pozemky a splňují tak kritérium druhé, tedy spojují jednotlivé krajinné složky. Častějším případem jsou však krajiny, kde první dvě kritéria „jdou ruku v ruce“.

3) *Kritérium řídicího elementu v dynamice krajiny* - FORMAN, GODRON (1993) považují za nutné zvážit, který typ krajinných složek převezme funkci řídicího elementu v případě, kdy např. ustane obdělávání krajiny. Bude to ten typ, který představuje zdroj druhů, které budou nejnázeji kolonizovat opuštěné plochy. Vyhodnocení třetího kritéria je oproti prvním dvěma mnohem složitější. Třetí kritérium je klíčové a někdy rozhoduje i v případě, kdy je v rozporu s prvním a druhým kritériem, případně pokud je jejich interpretace nejasná.

Nejsnadněji se určuje první kritérium - relativní plocha. Odhadnout třetí kritérium - posouzení vlivu na dynamiku - je nejsložitější. Druhé kritérium, spojitost, se nachází někde

uprostřed. Třetí kritérium má však při určování matrice největší váhu (*FORMAN, GODRON, 1993*).

Pro vymezení matrice navrhuje *FORMAN, GODRON (1993)* následující postup. Nejprve určit relativní plochu a úroveň spojitosti pro všechny typy krajinných složek. Jestliže některý z typů složek pokrývá daleko větší plochu než jakýkoliv ostatní, prohlásíme jej za matici. Jestliže relativní plochy nejfrekventovanějších typů jsou přibližně podobné, za matici prohlásíme typ s největší spojitostí. Jestliže jsme nedokázali rozhodnout na základě těchto dvou kritérií, musíme přistoupit k terénním měřením, popřípadě využít již publikované informace o složení druhů a jejich vývoji na daném území. Tyto informace by nám měly umožnit odhadnout, který z typů krajinných složek vykazuje nejvyšší stupeň ovlivnění dynamiky celé krajiny.

### **Enkláva (ploška)**

Enkláva je neliniový, tedy plošný útvar, vzhledem se lišící od svého okolí, často obklopená krajinou maticí (*SKLENIČKA, 2003*). Enklávy se různí co do velikosti, tvaru, typu, heterogenity i vlastních hranic (*FORMAN, GODRON, 1993*).

*FORMAN, GODRON (1993)* rozlišuje podle příčiny vzniku pět typů plošek:

1. plošky vzniklé narušením malého území v matici,
2. zbytkové plošky vznikají díky narušení krajinné matrice obklopující malou plošku,
3. plošky zdrojů prostředí se liší od krajinné matrice díky podmínkám prostředí, které jsou v plošce jiné,
4. zavlečené plošky (obdělávané plošky a sídla),
5. dočasné plošky vzniklé krátkodobými fluktuacemi faktorů prostředí.

### **Koridor**

Koridor je pruh území, který je stejně jako enkláva obklopen odlišným prostředím (*SKLENIČKA, 2003*). Oproti enklávě má však výrazně liniový charakter. *FORMAN A GODRON (1993)* definují koridor jako úzký pruh země, který se liší od krajinné matrice po obou stranách. Lze rozlišit tři druhy koridorů:

1. liniové koridory – dominují zde druhy okrajů,
2. pásové koridory – jsou širší pruhy s vlastním vnitřním prostředím, kde žije mnoho organismů jemu vlastních,
3. koridory podél vodních toků (*FORMAN, GODRON, 1993*).

### 2.3.3.2. Rozmístění skladebných součástí krajiny

Tři základní skladebné součásti krajiny – matrix, enklávy a koridory tvoří strukturu krajiny. Významnou charakteristikou struktury krajiny je její prostupnost (poréznost), která souvisí s charakteristikou matrix, enkláv i koridorů a především pak s jejich relativně rovnoměrnou konfigurací. Poréznost vyjadřuje hustotu plošek určitého typu. Významnými místy struktury krajiny jsou tzv. body sbíhavosti či styčné linie. Označujeme jimi protnutí tří a více typů krajinných složek. Jsou klíčové jak pro pohyb živočišných organismů v krajině, tak pro výskyt druhů vyžadujících přítomnost více druhů zdrojů potravy (*SKLENÍČKA, 2003*).

Kombinací jednotlivých krajinných složek vzniká krajina se svými jedinečnými charakteristikami. Měřítko našeho pohledu je velmi důležité pro pochopení její celkové struktury. Složky vytvářejí v krajině různá seskupení, což řečeno jinými slovy znamená, že jejich rozmístění v prostoru je nenáhodné.

Nejčastěji se vyskytuje pět následujících způsobů rozmístění :

1. pravidelné,
2. liniové,
3. paralelní,
4. shlukové,
5. případy prostorové korelace mezi jednotlivými typy krajinných složek.

Jednotlivé krajiny se mezi sebou markantně liší v úrovni kontrastu, tj. stupni rozdílu a náhodnosti přechodu mezi sousedními plochami (*FORMAN, GODRON, 1993*).

Kontrast krajinné struktury je dán mírou odlišnosti či gradientem přechodu sousedních krajinných složek. Obecně lze považovat kulturní krajinu za kontrastnější než přírodní, ne vždy to však musí být pravda. I pouhé přírodní mechanismy mohou vést ke vzniku krajiny s vysokým kontrastem. Vliv člověka často kontrast dále zvyšuje.

Krajina jako celek má vlastnosti, které její části nemají, proto krajinu nelze popsat jako prostý součet obdělávaných polí, domů, cest, vodotečí a lesů. Nezbytný je popis konfigurace složek, tj. jejich umístění v prostoru, jejich vzájemný vztah a provázanost (*SEMORÁDOVÁ, 1998*).

## **2.4. VLIV VYUŽITÍ ÚZEMÍ NA HYDROLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY (se zaměřením na odtok)**

Problematikou vlivu využívání území na hydrologický režim krajiny se zabývalo mnoho autorů. Většina poznatků týkající se této problematiky pochází na jedné straně z experimentálních studií (např. *BOSCH, HEWLET, 1982*), nebo dlouhodobých pozorování (např. *SCHWARZE A KOL., 1994*) a na straně druhé z použití distribuovaných hydrologických modelů, které umožňují rozlišení časového a plošného rozdělení složek vodní bilance a nepopisují tak pouze stav minulý a současný, ale dovolují rovněž vyhodnotit budoucí scénáře (*KLÖCKING, HABERLANDT, 2002*). Předpokládá se, že změny ve využití půdy vyvolané implementací unijních dotačních programů povedou k hydrologické odezvě na úrovni regionálních povodí. Ve snaze zavést vhodný koncept využívání pozemků mohou být modely simulující hydrologické procesy cennými nástroji vyhodnocení důsledků těchto změn na jednotlivé složky vodní bilance (*FOHRER A KOL., 2001*). V následující kapitole je uveden přehled zajímavých poznatků týkajících se v této práci řešené problematiky.

Odtok je funkcí mnoha proměnných, které zahrnují faktory topografické, geologické, půdní, vegetační a klimatické (*LACEY, GRAYSON, 1998*). Vliv změny využití půdy a výzkumu vazby mezi vegetačním pokryvem krajiny a oběhem vody a tepla v přírodě se dostává do značného zájmu ze strany ekologů, především s důrazem na vodní ekosystémy a biodiverzitu (*TURNER A KOL., 2001; TESAŘ A KOL., 2005*). Změna využití půdy v povodí může ovlivnit zásoby vody v povodí změnou hydrologických procesů jakými jsou infiltrace, objem podzemní vody, základní a povrchový odtok (*LIN A KOL., 2006*). *FOHRER A KOL. (2001)* uvádí, že změna využití půdy má přímý vliv na hydrologické procesy díky spojitosti s evapotranspirací na jedné straně a na druhé straně díky enormnímu vlivu stupně a typu vegetačního pokryvu na tvorbu povrchového odtoku.

Každá krajinná struktura vstupuje do hydrologických procesů podílem odpovídajícím její rozloze, poloze na povodí, tvaru a vlastnostem té části půdního profilu, která je v bezprostředním kontaktu s vrstvou odtékající vody. U vegetačního krytu předpokládáme uplatnění vlastností ovlivňujících zadržování, změnu rychlosti povrchového odtoku i případně akumulaci vody v povodí s ohledem na ochranu vod. Musíme brát v úvahu pedologické i vegetační charakteristiky povodí, vzhledem k jejich ovlivňování ekologických a vodohospodářských hledisek sledovaného území (*MIMROVÁ, 1998*). Tak například mělké půdy v povodí umožňují stromům přijímat podzemní vodu pro jejich transpirační potřeby, jak je často sledováno v zalesněných horských povodích (*FEDERER, 1973*).

Simulování hydrologických efektů pro různé scénáře využití půdy je nezbytné pro optimalizaci krajinných funkcí (*HAVEKAMP A KOL, 2005*). Experimentální výzkumy vlivu změny vegetace v povodí na hydrologické charakteristiky jsou často prováděny na malých povodích, kde slovem „malý“ myslíme takovou velikost povodí, kde manipulace s vegetací v rámci povodí je z experimentálních záměrů uskutečnitelná. Ze zřejmých praktických důvodů nejsou takovéto studie uskutečňovány na velkých povodích, ale často jsou aplikovány výsledky zjištěné na malých povodí pomocí hydrologických modelů i na velkých povodích (*SIRIWARDENA A KOL., 2006*).

Tento proces je zřejmý například na sérii vědeckých prací zabývajících se na různých úrovních oblastí povodí řeky Mississippi. *SCHILLING (2004)* zkoumal vliv zastoupení řádkového pěstování a poměru základního odtoku k celkovému na dlouhých datových řadách průtoků na 11 malých povodích a zjistil, že existuje silná vazba mezi zvyšujícím se podílem řádkového pěstování na ploše povodí a zvyšujícím se podílem základního odtoku. Stejný závěr vyvodili pro celé povodí Mississippi *ZHANG, SCHILLING (2006)* a zdůvodnili jej především přeměnou trvalých porostů na sezónní řádkové pěstování, které způsobilo mimo jiné sníženou evapotranspiraci a povrchový odtok, zvýšilo přítok do kolektorů podzemní vody, základní odtok a tím i celkový odtok v toku. To potvrzují i *SCHILLING, LIBRA (2003)* důkazem zvyšujících se minimálních průtoků (základní odtok) v bezsrážkových obdobích. Toto zjištění je důležité například pro problematiku snížení odnosu živin do toku, protože koncentrace živin a jejich odnos povodňovými průtoky a základním odtokem je rozdílný. Studie ukázaly, že koncentrace dusičnanů se zvýšily a koncentrace organického dusíku a uhlíku se snížily se zvyšujícím se podílem ploch využívaných k řádkovému pěstování plodin (*JORDAN A KOL., 1997*).

Zajímavé výzkumy byly prováděny i na povodích ovlivněných výstavbou. *BRUN, BAND (2000)* uvedli, že nárůst nepropustných ploch v povodí o 18 % vedl k více než 20-ti % poklesu v poměru základního odtoku k celkovému. Podobně *NUNES A KOL. (2006)* zkoumali, jak velký vliv na odtokové poměry má zvyšující se rozsah urbanizace v povodí. Zvýšení podílu nepropustných ploch z 3,5 % na 15 % celkové plochy povodí vedlo ke zvýšení průměrných průtoků o 17,5 % a povodňových průtoků o 19 %.

Podzemní odtok je dále ovlivněn např. přítomností a hustotou drenážních systémů (*ZECHARIAS, BRUTSAERT, 1988*). Vliv drenážních soustav, ale naopak ve vztahu k povodňovým průtokům, podrobně zkoumali v podmínkách ČR *DOLEŽAL A KOL. (2003a, 2003b)*. Závěrem uvedené studie je, že odvodňovací systémy (drenážní systémy zahrnující i otevřené a zakryté kanály a upravené vodní toky) poněkud zvyšují kulminační průtoky povodní s krátkou dobou

opakování a menší extremitou průtoků. Toto potvrzuje s určitými výjimkami i *ROBINSON (1990)*.

Dále například *KUNKEL, WENDLAND (2002)* potvrdili vliv objemu podzemních vod na poměr jednotlivých složek odtoku. V rámci použití modelu GROWA98 mimo jiné zkoumali vliv využití půdy na celkový odtok a ten pak separovali na jeho přímou a základní složku. Hlavní podíl odtoku (více než 80 %) představuje přímý odtok. Pouze v povodích, kde se objevují krasové zvodně, je podíl odtoku podzemní vody značně vyšší (*BOGENA A KOL., 2005*).

Relativně vysoký podíl povrchového odtoku z celkového odtoku (více než 50 %) na jednom východoslovenském povodí připisují *PEKÁROVÁ, PEKÁR (1996)* velmi málo propustnému půdnímu profilu.

*ECKHART A KOL. (2003)* zjišťovali, jak velká musí být minimální část území, kde se musí změnit využití půdy, aby se tato změna projevila i na některých hydrologických charakteristikách. To závisí na jednotlivých druzích využití pozemků a na uvažované hydrologické proměnné. Např. v případě změny z pastviny na les s důrazem na průměrný roční průtok vody je minimální podíl nutné změny využití půdy přibližně 25 %, jak zjistili porovnáním naměřených dat z několika povodí a použitím modelu SWAT-G.

## **2.5. HYDROLOGICKÉ MODEL Y**

Matematický model srážko-odtokového procesu představuje zjednodušený kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami určitého hydrologického systému (*DAŇHELKA A KOL., 2002*). Pro hydrologické procesy je typické, že okamžité hodnoty výstupů (průtoky, změny vlhkosti půdy, změny hladiny podzemní vody atd.) závisí nejen na okamžitých hodnotách vstupů, ale i na okamžitém stavu systému, který je výsledkem předchozích hydrologických procesů (*KOVÁŘ, 2000*). Hydrologické modely našly svoje uplatnění při řešení nejrůznějších problémů, které by se daly shrnout do tří kategorií:

1. operativní hydrologické předpovědi,
2. návrhová a projekční činnost v oblasti vodního hospodaření,
3. výzkumná činnost (*JENÍČEK, 2005*).

V prvním případě se jedná o aplikaci modelu v operativní hydrologii, kdy vstupní data tvoří mimo stavové veličiny také okamžité údaje z automatických meteorologických stanic nebo radarů. Data jsou v tomto případě automaticky předávána modelu a prioritou je

rychlost jejich zpracování a převedení na krátkodobou předpověď vodního stavu či průtoku v určitém profilu. Tato výsledná informace může být doplněna o výstupy z modelů šíření povodňové vlny a určení záplavového území.

Ve druhém případě jde jednak o dlouhodobější řešení protipovodňové ochrany (např. stavba přehrad, poldrů, změna vegetačního pokryvu a další hydrotechnická či hydromeliorační opatření), ale také je použití hydrologických či hydraulických modelů užitečné při řešení nejrůznějších technických staveb od plavebních kanálů, čistíren odpadních vod až po mosty.

Pod třetí kategorií využití hydrologického modelu se skrývají možnosti dalšího vývoje modelu, výzkum jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu a jejich přesnější popis. Pro tyto účely jsou často zřizovány tzv. experimentální povodí s nadstandardní sítí měřících stanic (JENÍČEK, 2005).

### **2.5.1. DĚLENÍ HYDROLOGICKÝCH MODELŮ**

Hydrologické modely je možno dělit z mnoha hledisek. Členění modelů v této kapitole je převzato z následujících zdrojů (KOVÁŘ, 2000; DAŇHELKA, 2007). Abecední přehled jednotlivých modelů s krátkou charakteristikou a odkazem na domovské webové stránky je uveden např. na [www.spatialhydrology.com/software\\_hydrostat.html](http://www.spatialhydrology.com/software_hydrostat.html).

#### **Hledisko rozdělení proměnných**

Stochastické - mající pravděpodobnostní rozdělení proměnných.

Deterministické - neplatí žádné rozdělení pravděpodobností, vzájemné vztahy příčinné (deterministické) - dále se dělí na „black box“, „grey box“ a „white box“ dle stupně respektování fyzikálních zákonů.

#### **Hledisko linearity**

Lineární - je popsán lineárními diferenciálními rovnicemi - platí princip superpozice, odezva systému závisí pouze na funkci chování systému.

Nelineární - je popsán nelineárními diferenciálními rovnicemi, odezva systému závisí jak na funkci chování systému, tak na intenzitě vstupu.

#### **Hledisko prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin**

Celistvé (lumped) - neuvažují prostorovou závislost (pouze časovou).

Geometricky dělené (geometrically distributed) - uvažují prostorovou závislost.



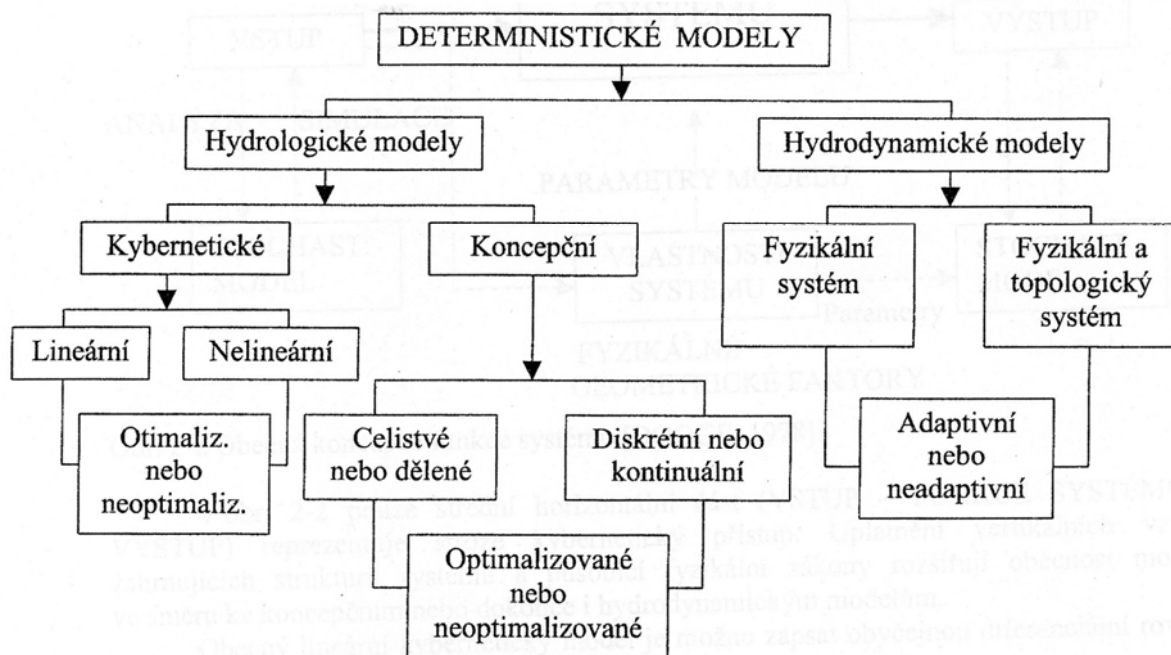
## Hledisko délky časové základny

Kontinuální - datovou bázi tvoří dlouhé časové řady dat.

Diskrétní - modelování jednotlivých srážko-odtokových událostí.

### 2.5.2. DETERMINISTICKÉ MODELY

Účelem deterministických modelů v hydrologické aplikaci je popsat matematickými vztahy určité fyzikální představy části hydrologického cyklu nebo jeho celku. Obecně se předpokládá, že čím přesněji model popisuje fyzikální systém, tím je model přesnější. Z praktického hlediska však vyšší stupeň přesnosti modelového popisu vede k náročnějším požadavkům na vstupní data a jejich kvalita je často v rozporu s přesností popisu (KOVÁŘ, 2000).



Obr. 2.3. Rozdělení deterministických modelů (KOVÁŘ, 2000)

Mezi deterministické modely patří také model MIKE SHE, který byl vybrán pro simulaci srážko-odtokových vztahů na povodí Kopaninského toku v rámci této práce. Detailní popis funkce deterministického modelu a nároků na datové vstupy jsou proto uvedeny na příkladu MIKE SHE v kapitole „Metodika“ a „Výsledky“.

## 3. MATERIÁL A METODY

### 3.1. MATERIÁL

#### 3.1.1. POVODÍ KOPANINSKÉHO TOKU

Pokusné povodí Kopaninského toku je sledováno Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v.v.i. od roku 1985. Základní charakteristiky povodí jsou uvedeny v tabulce 3.1. Z hlediska geomorfologického (*DEMEK, 1987*) patří povodí do oblasti Českomoravské vrchoviny, celku Křemešnické vrchoviny, podcelků Želivské pahorkatiny a Humpolecké vrchoviny, na rozhraní okrsků Košetické a Vyskytenské pahorkatiny. Území náleží k erozně denudačnímu typu reliéfu.

Povodí Kopaninského toku, hydrologické číslo 1-09-02-031, je levostranným přítokem Jankovského potoka, součástí povodí říčky Hejlovky, která je přítokem řeky Želivky. Nalézá se v bývalém okrese Pelhřimov. Zeměpisná poloha místa vtoku Kopaninského toku do Jankovského potoka má souřadnice 49° 28' s. š. a 15° 17' v. d. Nadmořská výška v místě pramene Kopaninského toku je 578 m, v místě ústí toku 467 m, průměrná nadmořská výška Kopaninského toku je 523 m. Celé povodí leží severovýchodně od Pelhřimova ve výšce tvořené silnicemi I. třídy č. 34 a č. 19.

Rozloha povodí Kopaninského toku činí 6,9 km<sup>2</sup> s délkou toku 5,9 km a průměrným sklonem hlavní údolnice 2,6 %.

Povodí se nachází v klimatické oblasti vrchovinné, mírně teplé, mírně vlhké (B5) podle Končeka, resp. v klimatickém regionu 7 (MT4), mírně teplém a vlhkém podle klasifikačního systému BPEJ (*MAŠÁT A KOL., 2002*). Oblast B5 charakterizuje normální až krátké léto, mírné až mírně chladné, suché až mírně suché, přechodné období normální až dlouhé, s mírným jarem a podzimem, zima je normálně dlouhá, mírně chladná, suchá až mírně suchá s normální až krátkou sněhovou pokrývkou. Dlouhodobý průměr srážek R = 665 mm. Srážkový úhrn ve vegetačním období se pohybuje od 350 do 450 mm, v zimních měsících od 250 do 300 mm. Průměrná denní teplota vzduchu  $t = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t(\text{veg}) = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Počet letních dní je v zájmovém území 30 – 40, počet dní se sněhovou pokrývkou 60 – 100.

Geologický podklad je pararula. Povodí Kopaninského potoka je součástí hydrogeologického rajónu 652 – Krystalinikum v povodí Sázavy zahrnující povodí Želivky a povodí Sázavy po Zruč nad Sázavou. Horniny krystalinika mají puklinovou propustnost, která v dosahu zvětrávacích procesů závisí hlavně na charakteru zvětralin. Relativně lepší puklinovou propustnost mají granitoidy moldanubického plutonu vyskytující se v jižní části

povodí. Z kvartérních sedimentů mají větší hydrogeologický význam fluviální akumulace sedimentů údolních niv a některá mocnější eluvia. Propustnost kvartéru se mění podle uloženin. Pro území jsou charakteristické mělké zvodně vázané na povrchovou zónu kvartérních uloženin, zónu zvětrávání, případně přípovrchového rozpojení hornin. Oběh vody má lokální charakter. Infiltrace probíhá v celé ploše kolektoru v závislosti na propustnosti zvětralinového pláště. K odvodňování dochází v úrovni nebo nad místní erozní bází.

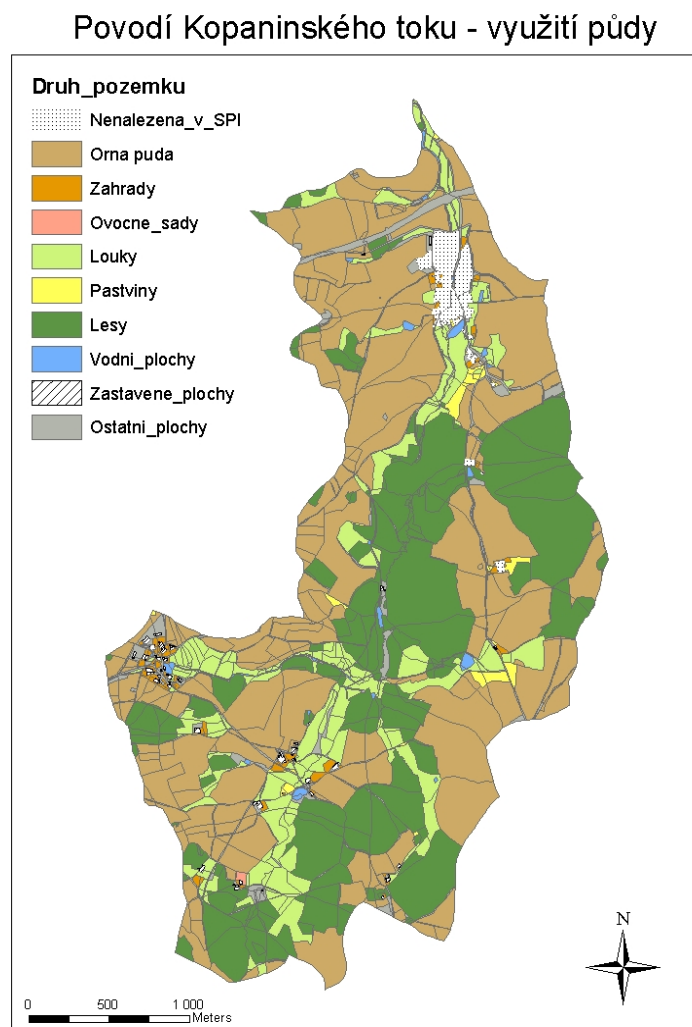
Zemědělská oblast představuje subtyp bramborářsko-žitný. Převažujícím půdním typem je kambizem kyselá, v nivních polohách půdy s různými stupni oglejení. Co se týče svažitosti pozemků převažují 2 až 5° v rozsahu až do 20°. Odvodněno je 10 % území, to je 82,5 ha, což je 16 % ze zemědělské půdy.

Tab. 3.1. Základní charakteristiky povodí Kopaninského toku

<b>Název toku</b>	Kopaninský tok
<b>Průměrná zeměpisná šířka</b>	49° 28' S
<b>Průměrná zeměpisná délka</b>	15° 17' V
<b>Nadmořská výška</b>	467 - 578 (prům. 523) m n. m.
<b>Plocha [km<sup>2</sup>]</b>	6,99
<b>Délka toku [km]</b>	5,9
<b>Hydrologické pořadí toku</b>	1-09-02-031
<b>Nadřazené vodní toky</b>	Jankovský potok, Želivka, Sázava, Vltava, Labe
<b>% orné půdy</b>	45
<b>% TTP</b>	13
<b>% lesů</b>	36
<b>% odvodněných ploch</b>	10
<b>Průměrné roční srážky [mm]</b>	665 (Humpolec, 1901-50)
<b>Průměrná roční teplota [°C]</b>	7,0 (Humpolec, 1901-50)
<b>Horninové podloží</b>	pararula
<b>Převládající půdní typ</b>	kambizem

Jak je patrné z tab. 3.1. a obr. 3.1., téměř polovina rozlohy povodí Kopaninského toku je využívána intenzivně zemědělsky jako orná půda a více než třetinu pozemků pokrývají lesy. Ostatní pozemky jsou využívány následovně: TTP - 13 %, zahrady - 0,9 %, zastavěné

plochy - 0,4 %, vodní plochy - 0,5 %, zbytek je uveden v katastru nemovitostí jako ostatní plochy (např. cesty a jejich bezprostřední okolí), sady nebo jako parcela nenalezena v SPI.



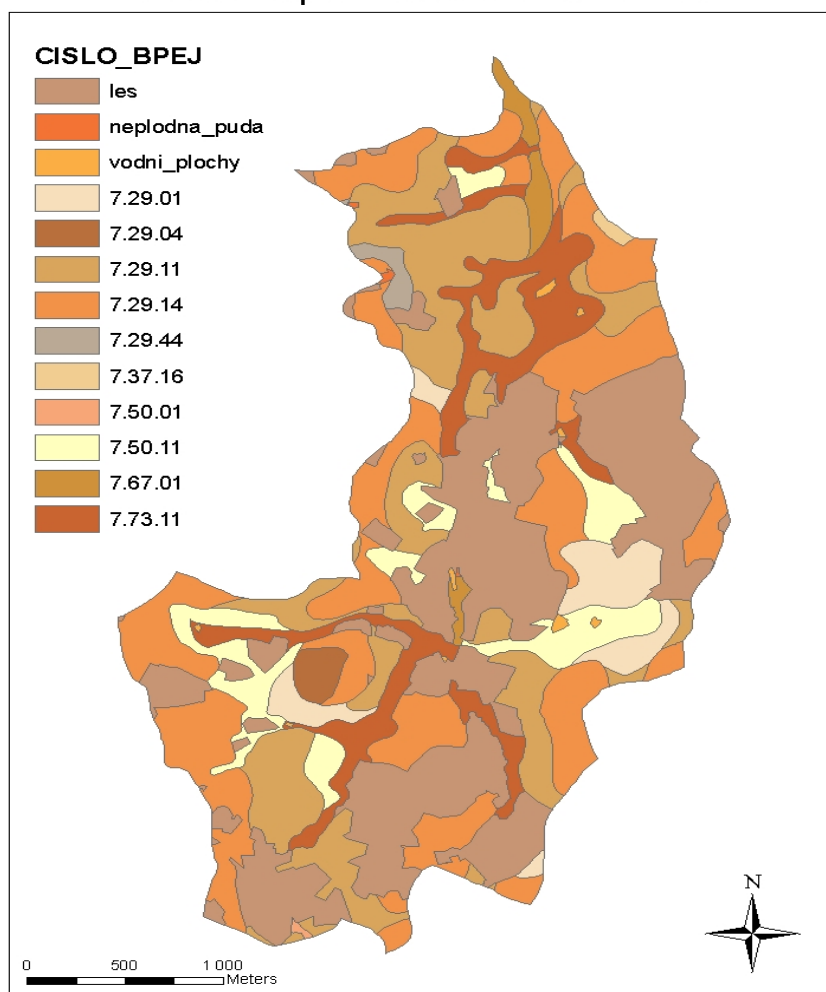
Obr. 3.1. Povodí Kopaninského toku - stav v letech 2005 – 2007

Zdroj dat: VÚMOP

### **Pedologické charakteristiky**

Většinu území tvoří následujících 5 nejvíce zastoupených BPEJ: 7.73.11, 7.50.11, 7.29.14, 7.29.11, 7.29.01. Pokrývají 66 % území. Ostatní území pokrývají tyto BPEJ: 7.67.01, 7.50.01, 7.37.16, 7.29.04 - dohromady 3,3 %. Lesy tvoří 30 % území a zbytek 0,7 % jsou vodní plochy. Popis jednotlivých skupin půd je uveden dle *MAŠÁTA A KOL. (2002)*.

## Povodí Kopaninského toku - BPEJ



Obr. 3.2. Povodí Kopaninského toku - BPEJ

Zdroj dat: VÚMOP

**Skupina hnědých půd** - kambizemě vyskytující se na povodí jsou značeny číslem BPEJ 7.29.01, 7.29.04, 7.29.11, 7.29.14, 7.29.44. Jedná se o skupinu hnědých půd, která zahrnuje především půdy na pevných horninách. Hlavním třídícím znakem jsou skupiny půdotvorných substrátů s typickými agronomicko-výrobními vlastnostmi. Do této skupiny patří hnědé půdy (HP), výjimečně rendzina (RA) a rendzina hnědá (RAh) a jejich oglejené variety a hnědé půdy kyselé (HPa). Amplituda výskytu je velmi široká, agronomická hodnota a využitelnost je určována zejména reliéfem terénu, skeletovitostí, minerální silou a klimatickými podmínkami. Hnědé půdy jsou typické půdy pahorkatiny nižších a středních poloh vrchovin. Ve vyšších polohách nepravidelně navazují na silně kyselé hnědé a rezivé půdy. Ve vlhčím klimatickém regionu 7 má znaky slabého oglejení, jsou přítomny slídy a půdy s nižší vodopropustností. Výměra je 440,1 ha.

**Skupina mělkých půd** – kambizemě, rankery, litozemě zahrnují půdy vyznačující se mělkostí profilu a převážně výraznou skeletovitostí. Do skupiny mělkých půd jsou řazeny všechny půdní typy, které mají uvedené vlastnosti. Za mělké půdy se považují i půdy s výraznou skeletovitostí, s větší velikostí kamene, která podstatně zhoršuje agrotechnické zásahy, zejména při používání velkovýrobních technologií. Do této skupiny patří BPEJ 7.37.16. Výměra půdy v této BPEJ je 1,7 ha.

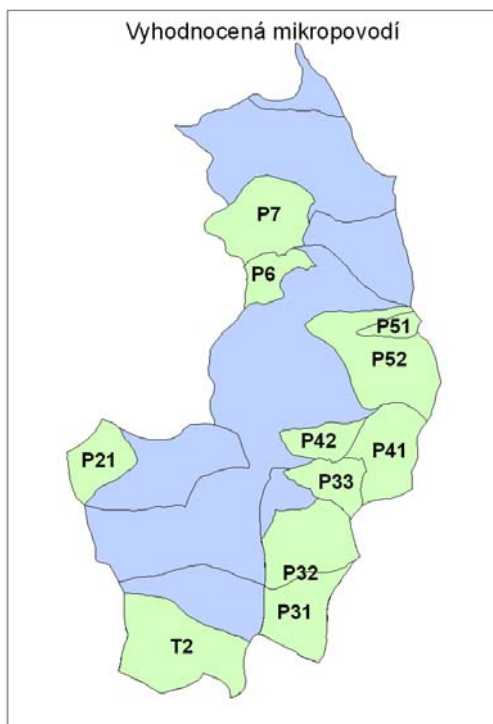
Skupina půd označených jako BPEJ 7.50.01 a 7.50.11 patří do skupiny **oglejených půd – pseudogleje**. Základním znakem této skupiny půd je periodické převlhčování profilu, především v jarním období. Typické oglejené půdy mají světle šedý až bělošedý nebo zelenavě šedý zesvětlený horizont se silným vývojem konkrecí a mramorovaný horizont s výrazným přerozdělením Fe, Mn na bělošedé až zelenavě šedé partie a okrově rezivé partie. Znaky oglejení jsou v některých případech reliktního původu a v současné době tyto půdy převážně netrpí škodlivým převlhčením. Některé oglejené půdy byly odvodněny trubkovou drenáží a měly by mít přijatelný vodní režim. Tyto půdy jsou rozšířeny v mírně teplé až chladné oblasti, kde se vyskytují v rovinnatém nebo mírně sklonitém či depresním terénu. Jedná se o půdy kambizemě oglejené a pseudogleje modální. Výměra činí 64,2 ha.

Půdy označené jako BPEJ 7.67.01 a 7.73.11 se nacházejí ve značně složitém reliéfu. Při vymezení HPJ bylo použito kromě genetického třídění i třídění podle charakteru reliéfu. Vedle reliéfu je druhým nejdůležitějším znakem stupeň hydromorfismu. Vyskytují se převážně na kratších svazích nebo dolních částech svahů, kde v nejnižších polohách jsou typické gleje. Dále se jedná o půdy kambizemě oglejené, pseudogleje glejové, gleje hydroeluviální a povrchové, pseudogleje hydroeluviální, s výskytem svahových pramenišť. Výměra činí 98,9 ha.

### **3.1.2. CHARAKTERISTIKY MIKROPOVODÍ**

Data z celkem 12 povodí byla vyhodnocena v rámci této práce. Jedná se o 11 mikropovodí v rámci povodí Kopaninského toku a samostatné povodí Kopaninského toku. Plocha jednotlivých mikropovodí se pohybuje v řádu jednotek až desítek ha (pouze mikropovodí P51 menší než 10 ha, největší povodí P32 má rozlohu 76 ha). Vybrána byla povodí, u kterých byly k dispozici nepřerušené řady měřených průtoků. Pro některé analýzy byla z důvodu omezení vlivu vnořených povodí z datového souboru vyjmuta mikropovodí

P31 a P51. Schémata mikropovodí, znázorněná vedle tabulek, jsou vybarvena v souladu s legendou v obr. 3.1.



Obr. 3.3. Povodí Kopaninského toku – vyhodnocená mikropovodí (zeleně vyznačená)

## MIKROPOVODÍ T2

Krajinnou matricí je les (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 71,8 %.

Tab. 3.2. Mikropovodí T2

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Orná půda	17.09	27.82
Zahrady	0.50	0.81
Ovocné sady	0.38	0.62
Louky	10.46	17.03
<b>Lesy</b>	<b>30.48</b>	<b>49.63</b>
Zastavěné plochy	0.23	0.37
Ostatní plochy	2.28	3.71
<b>Celková výměra</b>	<b>61.42</b>	<b>100.00</b>



## MIKROPOVODÍ P21

Krajinnou maticí je orná půda (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 50,1 %.

Tab. 3.3. Mikropovodí P21

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
<b>Orná půda</b>	<b>10.52</b>	<b>44.27</b>
Zahrady	2.61	10.97
Louky	3.15	13.26
Pastviny	0.06	0.26
Lesy	1.09	4.60
Vodní plochy	0.48	2.04
Zastavěné plochy	1.34	5.64
Ostatní plochy	4.51	18.96
Celková výměra	23.77	100.00

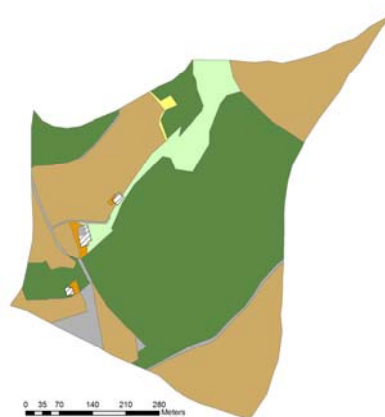


## MIKROPOVODÍ P31

Krajinnou maticí je les (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 60,9 %.

Tab. 3.4. Mikropovodí P31

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Orná půda	13.18	38.71
Zahrady	0.16	0.47
Louky	2.00	5.87
Pastviny	0.12	0.35
<b>Lesy</b>	<b>17.42</b>	<b>51.16</b>
Zastavěné plochy	0.13	0.38
Ostatní plochy	1.04	3.05
Celková výměra	34.05	100.00





### MIKROPOVODÍ P32

Krajinnou maticí je les – tvoří více spojitý prvek v daném území. Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 53,8 %.

Tab. 3.5. Mikropovodí P32

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Orná půda	36.00	46.08
Zahrady	0.16	0.21
Louky	7.19	9.44
Pastviny	0.19	0.25
<b>Lesy</b>	<b>32.10</b>	<b>42.14</b>
Vodní plochy	0.04	0.05
Zastavěné plochy	0.13	0.17
Ostatní plochy	1.27	1.67
Celková výměra	76.18	100.00

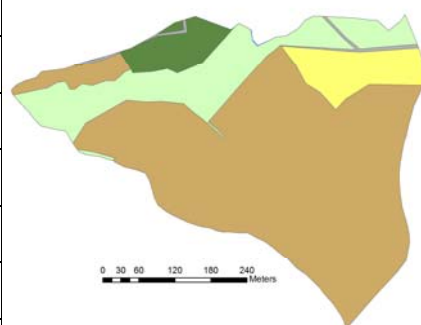


### MIKROPOVODÍ P33

Krajinnou maticí je orná půda (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 31,8 %.

Tab. 3.6. Mikropovodí P33

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
<b>Orná půda</b>	<b>13.46</b>	<b>68.22</b>
Louky	3.67	18.60
Pastviny	1.44	7.30
Lesy	0.98	4.97
Ostatní plochy	0.18	0.91
Celková výměra	19.73	100.00



## MIKROPOVODÍ P41

Krajinnou maticí je orná půda (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 33,7 %.

Tab. 3.7. Mikropovodí P41

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
<b>Orná půda</b>	<b>23.98</b>	<b>66.15</b>
Zahrady	0.28	0.77
Louky	4.30	11.86
Pastviny	0.79	2.18
Lesy	5.59	15.42
Zastavěné plochy	0.04	0.11
Ostatní plochy	1.27	3.50
Celková výměra	36.25	100.00

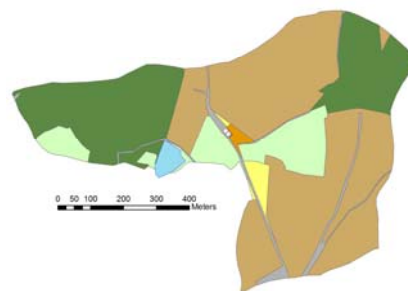


## MIKROPOVODÍ P42

Krajinnou maticí je orná půda (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 47,5 %.

Tab. 3.8. Mikropovodí P42

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Parcela nenalezena v SPI	0.02	0.04
<b>Orná půda</b>	<b>27.30</b>	<b>52.36</b>
Zahrady	0.28	0.54
Louky	6.00	11.51
Pastviny	0.80	1.53
Lesy	15.53	29.79
Vodní plochy	0.61	1.17
Zastavěné plochy	0.04	0.08
Ostatní plochy	1.56	2.99
Celková výměra	52.14	100.00

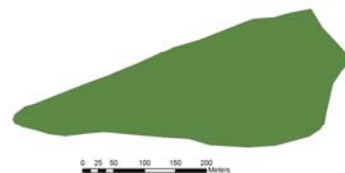


### MIKROPOVODÍ P51

Krajinnou maticí je les (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 100 %.

Tab. 3.9. Mikropovodí P51

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Lesy	7.12	100.00
Celková výměra	7.12	100.00



### MIKROPOVODÍ P52

Krajinnou maticí je les (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 68,2 %.

Tab. 3.10. Mikropovodí P52

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Parcela nenalezena v SPI	0.44	0.68
Orná půda	20.30	31.16
Zahrady	0.41	0.63
Louky	0.06	0.09
Pastviny	0.81	1.25
<b>Lesy</b>	<b>41.67</b>	<b>64.29</b>
Vodní plochy	0.17	0.26
Ostatní plochy	1.06	1.64
Celková výměra	64.92	100.00

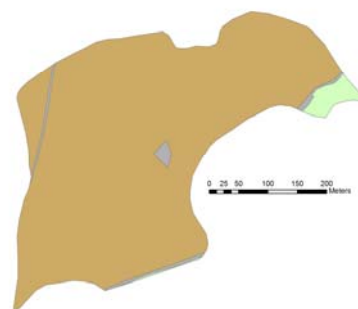


### MIKROPOVODÍ P6

Krajinnou maticí je orná půda (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 4,1 %.

Tab. 3.11. Mikropovodí P6

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
<b>Orná půda</b>	<b>15.08</b>	<b>95.87</b>
Louky	0.38	2.42
Ostatní plochy	0.27	1.72
Celková výměra	15.73	100.00



## MIKROPOVODÍ P7

Krajinnou maticí je orná půda (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 15,5 %.

Tab. 3.12. Mikropovodí P7

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Parcela nenalezena v SPI	0.11	0.30
<b>Orná půda</b>	<b>36.44</b>	<b>84.22</b>
Zahrady	0.05	0.12
Louky	1.68	3.88
Lesy	3.98	9.20
Vodní plochy	0.29	0.67
Ostatní plochy	0.70	1.62
Celková výměra	43.25	100.00



## POVODÍ T7

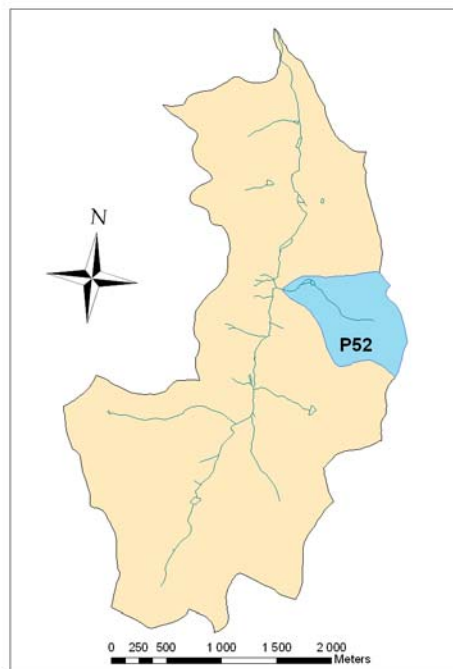
Krajinnou maticí je orná půda (převládající využití půdy). Podíl stabilních kultur na rozloze povodí je 54,3 %. Schéma viz. obr. 3.1.

Tab. 3.13. Mikropovodí T7

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Parcela nenalezena v SPI	1.70	0.24
<b>Orná půda</b>	<b>314.82</b>	<b>45.04</b>
Zahrady	6.14	0.88
Ovocné sady	0.39	0.06
Louky	86.82	12.42
Pastviny	6.01	0.86
Lesy	254.32	36.39
Vodní plochy	3.79	0.54
Zastavěné plochy	2.74	0.39
Ostatní plochy	22.24	3.18
Celková výměra	698.97	100.00

### 3.2. METODY

První etapa prací byla zaměřena na zpracování datových řad měření průtoků zaznamenávajících odtok vody z jednotlivých mikropovodí experimentálního povodí Kopaninského toku. Byla provedena separace odtoku různými metodami pro profil T7U, vybrána nejvhodnější z nich a použita pro třísložkovou separaci odtoku v jednotlivých mikropovodích. V návaznosti na zpracované údaje byl analyzován vliv rozmístění kultur na ploše povodí na odtok jako celek i na jeho složky. Protože se jedná o složitou problematiku, kterou nelze hodnotit pouze z pohledu využití pozemků v krajině, byly do analýzy zahrnuty i další parametry povodí. Poslední etapa prací byla věnována výstavbě, kalibraci a použití modelu, určeného k modelování pohybu vody na mikropovodí P52 (viz. obr. 3.4.). Jako vhodný model byl vybrán model MIKE SHE. Na následujících stranách je uveden postup zpracování datových a mapových podkladů a přehled použitých metod.



Obr. 3.4. Modelování MIKE SHE - poloha řešeného mikropovodí P52 v rámci povodí Kopaninského toku

#### 3.2.1. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

##### Průtoky

Průtoky byly měřeny na profilech osazených ultrazvukovými měřiči výšky vodní hladiny US1200 se záznamovou jednotkou M4016 (od firmy Fiedler-Mágr). Naměřená data byla následně vyhodnocována v programu MOST. Denní průměrné průtoky na

hydrometrických profilech byly vypočteny pomocí teoretické formule, platné pro profily vybavené Thompsonovými přepady s pravoúhlým výřezem:

$$Q(l/s) = 1,3546 \cdot h^{2,4856}$$

kde stav  $h$  reprezentuje přepadovou výšku vodní hladiny v centimetrech. Pro výšky hladin přesahující výšku Thompsonového přepadu byly použity rovnice, upravené zvláště pro každý profil. Datové řady byly očištěny od chyb způsobených výpadky měření, ucpáním profilu nečistotami (větve, listí..), zamrznutím vody v profilu apod. Přesnost měření průtoků byla kontrolována hydrometrováním.

V rámci této disertační práce byly vybrány datové řady z 12 profilů (11 uzávěrových profilů mikropovodí a 1 uzávěrového profilu celého povodí). Průtoky se měří současně na všech mikropovodích automaticky od roku 2004, proto bylo pro zpracování vybráno období hydrologických roků 2005 a 2006. Výběr popisných statistických charakteristik a způsob interpretace výsledků byl volen dle práce *KULHAVÝ A KOL. (2002)*:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \mu)^2}{N-1}}$$

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (k_i - 1)^2}}{N-1}$$

$$c_s = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (k_i - 1)}{c_v^3}$$

$$k_i = \frac{x_i}{\mu}$$

kde  $\mu$  - průměr,  $\sigma$  - směrodatná odchylka,  $c_v$  - koeficient variace,  $c_s$  - koeficient asymetrie. V tabulce 5.1. v kapitole „Výsledky“ jsou popisné charakteristiky uvedeny se symbolem Qd (celkový odtok) nebo qd (specifický odtok - odtok dělený plochou daného povodí).

Pro kalibraci modelu MIKE SHE byla zvolena tříletá řada průtoků (hydrologické roky 2005–07).

## Separace odtoku

Bylo provedeno porovnání výsledků separací odtoku provedených různými metodami na datech z profilu T7U (období XI.2004 - X.2007) a vybrání jedné pro aplikaci na všechna mikropovodí.

Nejdříve byl odseparován podíl přímého odtoku metodou GROUND (*KULHAVÝ A KOL., 2001*) - společně s metodou Klinera a Kněžka a Killeho je tato metoda podrobně rozepsána v kapitole 2.2.4.2. „Přehled metod separace odtoku“ - a digitálním filtrem dle Lyne a Hollick (*GRAYSON A KOL., 1996*):

$$q_f(i) = \alpha q_f(i-1) + (q(i) - q(i-1)) \frac{(1+\alpha)}{2}$$
$$q_f(i) \geq 0$$

kde  $q_f(i)$  je přímý odtok v  $i$ -tém dni,  $Q(i)$  měřený průtok v  $i$ -tém dni,  $\alpha$  parametr filtru (doporučená hodnota pro denní data je 0,925).

Pomalá složka odtoku je pak  $q_b = q - q_f$ .

Při použití tohoto filtru je třeba nastavit vzorec takovým způsobem, aby byla hodnota  $q_b$  rovna  $q$ , pokud je  $q_f$  je menší než 0. Filtr je používán ve třech následujících krocích. U prvního a třetího se používá vzorec dle (1). Druhý krok je zpětný za použití  $i+1$  místo  $i-1$  v uvedeném vzorci (1).  $Q(i)$  v prvním kroku je měřený průtok, ve druhém kroku je  $q(i)$  vypočtený základní odtok z prvního kroku a ve třetím kroku,  $q(i)$  je vypočtený základní odtok z druhého kroku. Tento postup vyhlazuje data.

Zbývající část odtoku pak byla rozdělena na dvě složky - podpovrchovou (hypodermickou) a podzemní (základní). Rozlišení těchto dvou složek bylo provedeno dvěma metodami: metodou zavedenou *KLINEREM, KNĚŽKEM (1974)* a následujícím výpočetně jednoduchým digitálním filtrem dle *CHAPMANA (1999)*:

$$Q_{total} = Q_{quick} + Q_{slow}$$
$$Q_{slow}(i) = \frac{k}{2-k} Q_{slow}(i-1) + \frac{1-k}{2-k} Q_{total}(i)$$
$$Q_{slow}(i) \leq Q_{total}(i)$$

kde  $Q(i)$  je průměrný denní průtok v  $i$ -tém dni, buď celkový (total) nebo základní (slow) a  $k$  je bezrozměrná konstanta (v tomto případě nastavená na 0,99483 - viz. *DOLEŽAL, KVÍTEK (2004)*). Dále pro kontrolu byla provedena separace metodou *KILLEHO (1970)*.

Pro výpočet metodou Klinera a Kněžka byla k separaci odtoku použita data z uzávěrového profilu T7U a z vrtu V1M, který se nachází v blízkosti profilu T7U (hloubka vrtu 3,5 m). Pro výpočet digitálním filtrem pak postačuje pouze datová řada průměrných denních průtoků z uzávěrového profilu.

Po porovnání výsledků byla nakonec vybrána kombinace metody GROUND (separace přímého odtoku) a digitálního filtru (separace základního odtoku) a ta byla aplikována na data ze všech mikropovodí pro období XI.2004 - X.2006.

### **Topografický index**

Topografické charakteristiky byly určovány z digitálního modelu terénu (dále jen DTM) o velikosti gridu 20 x 20 m. DTM byl vytvořen v programu ArcInfo z vrstvy vrstevnic v intervalu 2 m (Zdroj: ZABAGED).

Sklonitostní poměry byly vyhodnoceny z vytvořené rastrové vrstvy. V programu ArcInfo (Zonal statistics) byly získány průměrné hodnoty pro jednotlivé plochy.

Topografický index (TI) je nejčastěji (ostatní běžně užívané formy viz. např. *ARYAL, BATES, 2008*) vyjádřen následujícím vztahem:

$$TI = \ln(\alpha/\tan\beta),$$

kde:

$\alpha$  - představuje plochu, která je odvodňována daným gridovým čtvercem; tyto plochy se načítají se směrem po svahu až k uzávěrovému profilu (*ROBSON A KOL., 1993*),

$\beta$  - je lokální úhel sklonu.

TI je indikátor potenciálního „zamokření“ jedné rastrové buňky (*HABERLANDT A KOL., 2001*). Je to důležitý znak terénu, protože parametrizuje vliv topografie na tvorbu odtoku (*BEVEN, KIRKBY, 1979*). TI byl vypočten pomocí programu "DTM Analysis 97.07" získaného z [http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg\\_freeware\\_dta.htm](http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_dta.htm) (Environmental Science, Lancaster University). Vstupem do tohoto programu je jeden soubor obsahující údaje o názvu povodí, počtu sloupců a řádků rastru, velikosti gridu a následně nadmořských výškách jednotlivých gridů zapsaných v řádcích (počátek v levém spodním - jihozápadním - rohu rastru).



## Index předchozích srážek

Index předchozích srážek (angl. zkratka API) slouží pro nepřímé posouzení nasycenosti povodí a jeho schopnosti absorbovat další vodu. Počítá se dle vztahu:

$$API_n = \sum_{i=1}^n C^i \cdot P_i \text{ [mm]},$$

kde  $n$  znamená celkový počet dní před výskytem příčinné srážky, obvykle se volí  $n = 30$ ,

$i$  je pořadí dne počítané nazpět ode dne, ke kterému je API určován,

$C$  je evapotranspirační konstanta, pro naše podmínky obvykle  $C = 0.93$ ,

$P$  je denní úhrn srážky v milimetrech v  $i$ -tém dni před výskytem příčinné srážky.

Zde hodnocený jako API30. (*VYHODNOCENÍ KATASTROFÁLNÍ POVODNĚ V SRPNU 2002, 2003*)

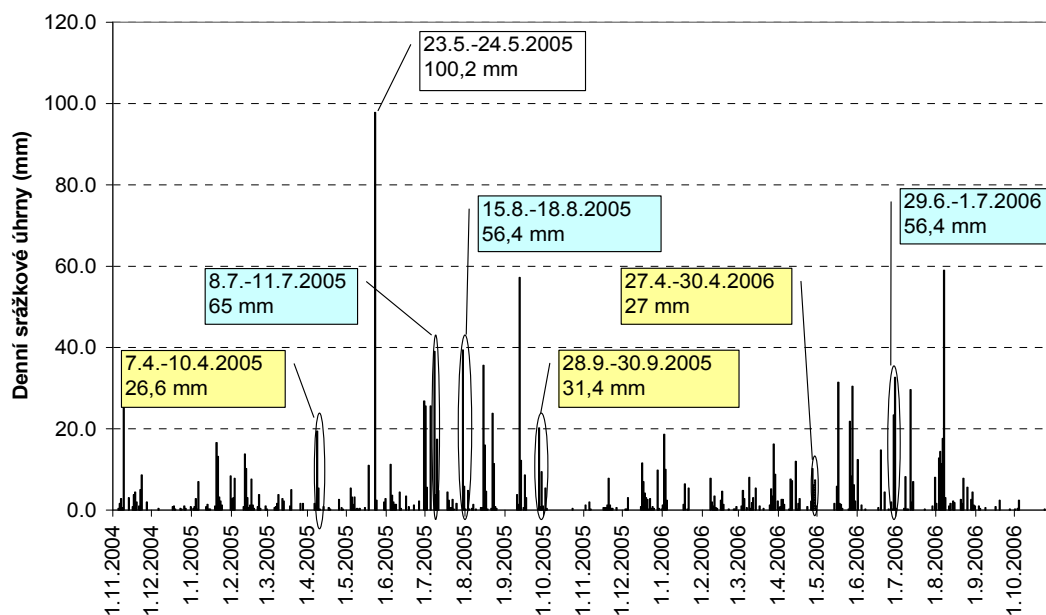
## 3.2.2. STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

### Canoco

K mnohorozměrné analýze dat byl využit programový modul Canoco (*TER BRAAK, ŠMILAUER, 2002*). Při provádění analýzy byly použity tyto součásti programu Canoco: WCanoImp pro import dat, Canoco for Windows 4.5 pro analýzu datových souborů a CanoDraw for Windows 4.1 pro tvorbu a export grafických výstupů.

Názvy jednotlivých datových vstupů do zde použité vícerozměrné statistické analýzy vycházejí z terminologie programu Canoco. Jedná se o následující kategorie: druhová data, charakteristiky prostředí a kovariáty. V případě druhových dat se jedná o data primární, kde jednotlivé složky odtoku vystupují jako vysvětlované proměnné. Charakteristiky prostředí představují parametry povodí a vystupují jako vysvětlující proměnné. Kovariáty pak jsou taktéž vysvětlujícími proměnnými, ale se známým nebo alespoň předpokládaným vlivem na vysvětlované proměnné.

Na vstupních datech byla nejdříve provedena nepřímá analýza (DCA-Detrended corresponded analysis), která poskytla údaj o délce gradientu a dle jeho délky (<3) byla pro další použití vybrána metoda RDA (Redundancy analysis), patřící mezi metody omezené lineární, ve které byly hledány směry variability dat, které korelují s vybranými proměnnými prostředí. Výsledkem analýzy jsou ordinační diagramy, kde jsou druhová data vynesena jako šipky ve směru abundance druhu (zde velikosti a délky výskytu složek odtoku) a charakteristiky prostředí jako šipky ve směru, ve kterém roste jejich hodnota (*LEPŠ, ŠMILAUER, 2000*). Mnohorozměrná analýza byla provedena jak na dlouhodobých bilancích odtoku, tak i v rámci jednotlivých srážko-odtokových událostí (viz. obr. 3.5.).



Obr. 3.5. Vybrané srážko-odtokové události pro analýzu vlivu parametrů (charakteristik) povodí v programu Canoco

Datové vstupy do mnohorozměrné analýzy:

#### **Druhová data („Species data“)**

BF - základní (pomalý) odtok (BASE FLOW) - objem v litrech přepočtený na 1 hektar za dané období.

SUBF - hlubší hypodermický odtok (SUBSURFACE FLOW) - objem v litrech přepočtený na 1 hektar za dané období.

DF - přímý (povrchový a mělký podpovrchový) odtok (DIRECT FLOW) - objem v litrech přepočtený na 1 hektar za dané období.

BF\_ONLY - počet dní, kdy se v daném období vyskytl pouze základní odtok.

BF\_MAX - nejdelší období základního odtoku (ve dnech), které se v daném období vyskytlo.

#### **Charakteristiky prostředí („Environmental variables“)**

OP - procentuální podíl plochy orné půdy z celkové plochy povodí.

LES - procentuální podíl plochy lesa z celkové plochy povodí.

INFIL - procentuální podíl ploch I. a II. kategorie infiltrační kapacity půd (propustné, zranitelné půdy) z celkové plochy povodí (dle metodiky JANGLOVÁ A KOL., 2003).

SKLON - průměrný sklon povodí [%].

TI - průměrná hodnota topografického indexu.

ODT. SOUC - odtokový součinitel (rozmezí 0-1).

## Kovariáty („Covariables“)

IPS - index předchozích srážek - objem přepočtený na plochu povodí v litrech za dané období.

ΣSRAZKY - objem srážkového úhrnu v litrech přepočtený na 1 hektar za událost.

### 3.2.3. MODELOVÁNÍ

#### *MIKE SHE*

MIKE SHE je dynamický hydrologický model pro simulaci základních procesů v zemní fázi hydrologického cyklu; model je vhodný pro analýzu, plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů, povodí a životního prostředí, má širokou oblast uplatnění při posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou a při řešení zásadních technických zásahů v povodí ([www.dhi.cz](http://www.dhi.cz)).

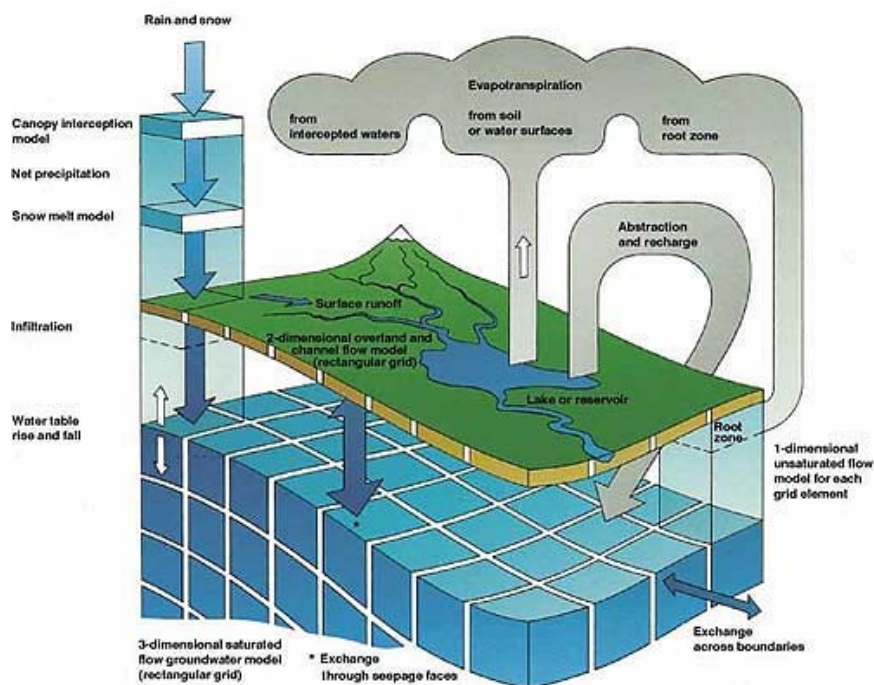
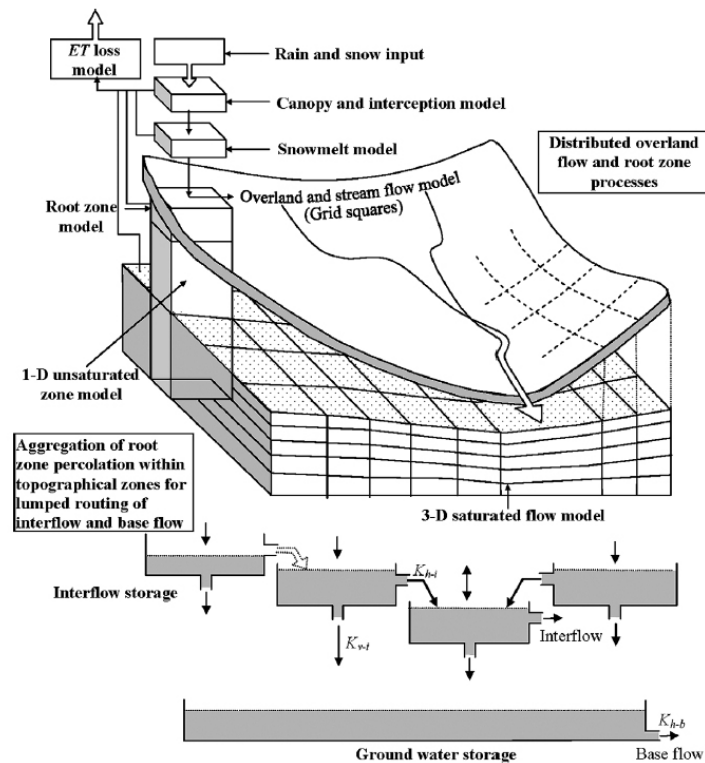
MIKE SHE byl vyvinut k modelování pohybu vody, zahrnující povrchový odtok, vodní toky a nádrže, nasyceného a nenasyceného proudění a evapotranspirace (*REFSGAARD, 1997*). Může být použit k popisu hlavních fyzikálních procesů hydrologického cyklu (*LIU A KOL., 2007*).

V rámci této práce bylo použito propojení modelu MIKE SHE s modelem říční sítě MIKE 11 pro to samé povodí. MIKE 11 je systém modelující proudění vody v korytech. Při tomto použití propojených modelů jsou simulace MIKE SHE a MIKE 11 simultánní, výměna dat mezi modely probíhá díky spojené paměti (*THOMPSON A KOL., 2004*). Pro popis pohybu vody byly využity následující aproximace:

1. proudění po povrchu: 2D difusní vlna aproximovaná metodou konečných rozdílů,
2. proudění koryty: 1D kinematická vlna aproximovaná metodou konečných rozdílů ve vystřídáném schématu,
3. proudění v nenasycené zóně: 1D vertikální aproximace Richardsovy rovnice, 3 schematizované půdní horizonty,
4. proudění v nasycené zóně: 2D horizontálně ve vrstvách pohybová rovnice aproximovaná metodou konečných rozdílů,
5. evapotranspirace: ze vstupních časových řad referenční evapotranspirace se počítají aktuální hodnoty pomocí Kristensen-Jensenovy metody na základě aktuálního obsahu vody v půdě a vegetačního pokryvu.

Na následujících stranách je uveden popis, jakým byl vystavěn model pro povodí Kopaninského toku, jednotlivé vstupy a nastavení. U datových řad byl postup takový, že data z tabulkového editoru byla použita k vytvoření \*.dfs0 řad. Z GISových vstupů byly v MIKE

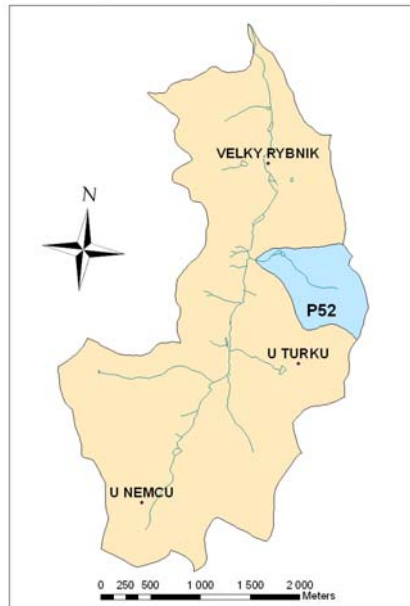
SHE vytvořeny soubory formátu \*.dfs2. Časové nastavení modelu, stejně jako ukázky jednotlivých vstupních údajů jsou uvedeny v přílohách.



Obr. 3.6. Nejčastěji používaná grafická schémata modelu MIKE SHE (Zdroje: *ANDERSEN A KOL., (2001); www.swisstechnology.com*).

## ***Srážky***

Časové řady denních srážkových úhrnů pro použití v modelu MIKE SHE byly upraveny pro jednotlivá mikropovodí dle dostupných dat ze srážkoměrných stanic Velký Rybník, U Němců a U Turků (viz. obr. 3.7.).



Obr. 3.7. Poloha srážkoměrných stanic na ploše povodí Kopaninského toku

Pro povodí P52 byl použit vážený průměr dle vzdálenosti zvoleného středu mikropovodí od jednotlivých stanic. Byl použit následující vzorec:

$$P52 - H_s = (1/1380 * VR + 1/2830 * UN + 1/800 * UT) / (1/1380 + 1/800 + 1/2830),$$

kde:

$H_s$  - denní srážkový úhrn [mm],

$VR$  - denní srážkový úhrn ze stanice Velký Rybník [mm],

$UN$  - denní srážkový úhrn ze stanice U Němců [mm],

$UT$  - denní srážkový úhrn ze stanice U Turků [mm].

V případě, že na stanici U Turků v daný den nepršelo, byla zvolena hodnota 0.

## ***Teplota vzduchu***

Teplota vzduchu byla měřena na meteorologické stanici ve Velkém Rybníku ve výšce 2 m nad povrchem. Tato data byla přímo zadána do modelu.

### ***Degree-day factor***

Degree-day modely předpokládají empirický vztah mezi teplotou vzduchu a mírou tání. Teplota vzduchu je nejčastěji používaná proměnná, ale i jiné proměnné, jako čistá radiace, rychlost větru, tlak vodních par nebo sluneční záření, jsou rovněž používány (SINGH, SINGH, 2001). V modelu byla použita hodnota DDF 1.

### ***Evapotranspirace***

Aktuální evapotranspirace v modelu MIKE SHE je vypočtená na základě referenční evapotranspirace (vstupu do modelu) a několika redukčních funkcí odvozených z hloubky kořenového systému a LAI a z vypočtené půdní vlhkosti (KRISTENSEN, JENSEN, 1975):

$$E_{at} = f_1(LAI) \cdot f_2(\theta) \cdot RDF \cdot ET,$$

kde:

$E_{at}$  - aktuální evapotranspirace (mm. den<sup>-1</sup>),

$f_1(LAI)$  - funkce založená na ploše listové pokrývnosti,

$f_2(\theta)$  – funkce založená na vlhkosti půdního profilu v kořenové zóně,

RDF – funkce kořenového systému.

FAO Penman – Monteithova metoda (ALLEN A KOL., 1998) je v rámci MIKE-SHE doporučena k výpočtu hodnot referenční evapotranspirace:

$$ET = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)},$$

kde:

ET – referenční evapotranspirace [mm.den<sup>-1</sup>],

$\Delta$  - směrnice změny tlaku nasycené vodní páry s teplotou [kPa.°C<sup>-1</sup>],

$R_n$  – čistá radiační energie [MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>],

G – tepelný tok do půdy [MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>],

$\gamma$  – psychrometrická konstanta [kPa.°C<sup>-1</sup>],

T – teplota vzduchu ve 2 m nad povrchem [°C],

$u_2$  – rychlost větru [m.s<sup>-1</sup>],

$e$  – tlak nasycených vodních par při teplotě T [kPa],

$e_a$  – tlak vodních par ve výšce 2 m nad povrchem [kPa].

Hodnoty, které nebyly na povodí Kopaninského toku měřeny, byly převzaty z meteorologické stanice na experimentálním povodí Dehtáře - vzdálené 2 600 m vzdušnou čarou viz. obr. 3.8.

Obr. 3.8. Vzájemná poloha výzkumného povodí Kopaninského toku a Dehtáře (barevně vymezena oblast bývalého Pelhřimovského okresu).



### **LAI**

Index listové pokryvnosti (Leaf Area Index) je podílem plochy asimilačního aparátu v m<sup>2</sup> na jednotku plochy půdy v m<sup>2</sup>. Parametr LAI je velmi důležitý, neboť LAI přímo ovlivňuje intercepci a absorpci světla rostlinami, tepelnou bilanci a výpar. LAI byl stanoven pomocí analyzátoru vegetačního krytu LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, LI-COR Biosciences (Nebraska, USA). Měření LAI tímto přístrojem je v porovnání s tradičními přímými metodami velmi rychlé. Optický sensor LAI-2000 se skládá z optického systému a čoček (rybích ok). Čočky „vidí“ hemisferický obrázek, který optický systém přenáší na fotodiodický detektor složený z pěti koncentrických kroužků. Každý kroužek zachycuje rozdílné množství rostlinného porostu nebo oblohy v jednom z pěti úhlů.

Stanovení LAI bylo provedeno na základě série měření, kdy pro každý záznam LAI bylo provedeno měření referenční hodnoty záření nad porostem (2x) a transmitance záření porostem (8x) tak, že byla změřena referenční hodnota záření a náhodně čtyři hodnoty vlastní transmitance záření porostem a následně byl celý postup zopakován. Vlastní výpočet LAI byl proveden metodou LAI-2000 (LI-COR, 1992).

LAI bylo měřeno vždy 1-2x pro každou kulturu, která se na povodích P33, P52 a P6 vyskytovala. První měření proběhlo dne 20.6.2008 za polojasného počasí. Hodnoty LAI naměřené terénním měřením dne 20.6.2008 přístrojem LI-COR dosahovaly uvedených hodnot (viz. tab. 3.14.).

Tab. 3.14. Výsledky terénního měření LAI dne 20.6.2008

Označení	Kultura	Výška [cm]	LAI
1	Ječmen ozimý	75	X
2	Ječmen ozimý	80	2.57
3	Pšenice ozimá	85	3.84
4	Pšenice ozimá	85	4.85
5	Mezická louka, nepokosená	110	4.97
6	Mezická louka, nepokosená	145	3.39
7	sad - ovsíková louka	110	5.80
8	ječmen jarní	70	2.94
9	ječmen jarní	70	2.05
10	řepka	120	3.66
11	řepka	120	3.66
12	kukuřice	30	1.00
13	ječmen jarní	70	3.98
14	lužní les	x	4.48
15	smrkový les stáří ± 70 let	x	2.88

pozn. X = nezměřeno.

Průběh hodnot LAI pro jednotlivé pozemky (resp. plodiny, které se na nich pěstovaly ve sledovaných letech - viz. tab. 4.2.) byl odhadnut s pomocí naměřených údajů a následujících zdrojů: *KVĚT A KOL. (1971)*, *PETR A KOL. (1980)*, *NOVÁK (1995)*, *ESCHENBACH, KAPPEN (1996)*, *ROSSET A KOL. (1997)*, *KOSTREJ (1998)*, *MARKOVÁ, JANOUŠ (2002)*, *REINING (2002)*, *EDOKA (2006)* a dále byly použity údaje zjištěné z FAO a modelu RODOS. Poté byl průběh LAI odhadnut i pro ostatní pozemky (les, TTP, zahrady a sady, zastavěné a vodní plochy).

Tab. 3.15. Plodiny pěstované na jednotlivých pozemcích orné půdy na mikropovodí P52

Pozemky	2004	2005	2006	2007
<b>P52</b>				
21	jetel luční.	ječmen jarní	pšenice ozimá	kukuřice
22	ječmen ozimý	řepka	pšenice ozimá	kukuřice
23	ječmen jarní	jetel luční	pšenice jarní	kukuřice
24	pšenice ozimá	kukuřice	ječmen jarní	ječmen ozimý
25	pšenice ozimá	kukuřice	ječmen jarní	ječmen jarní



### ***Hloubka kořenového systému***

Hloubka kořenového systému nebyla na povodí měřena. Hodnoty byly odhadnuty s pomocí literatury podobně jako v případě LAI (*CANADELL A KOL., 1996*).

### ***Topografie***

Digitální model terénu byl vytvořen modelem MIKE SHE na základě shapefilu obsahujícího vrstevnice v intervalu 2 m.

### ***Nenasycená zóna***

Na základě mapy BPEJ byla vytvořena vrstva vymežující pozemky s různými kódy HPJ pro jednotlivá mikropovodí. V současné době jsou k dispozici pouze parametry pro 5 horizontů jednotně pro celé povodí.

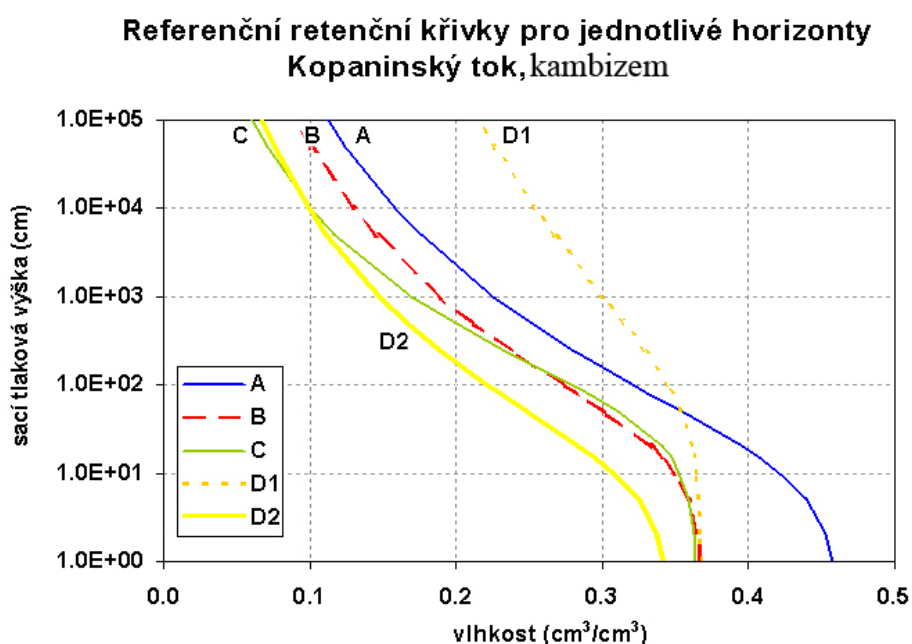
Složení půdních profilů bylo rozčleněno následovně – horních 100 cm bylo rozděleno na 3 až 4 horizonty a těm přiřazeny hydraulické charakteristiky zjištěné z měření na Kopeckého válečcích odebraných přímo na ploše zájmového povodí. Pro povrchový horizont pak byly hodnoty nasycených hydraulických vodivostí upraveny podle měření rychlostí výtopové infiltrace (soubor 84 měření, AG Hejnák).

Z projektu QF3301 bylo získáno měření vždy jedenácti bodů retenčních čar celkem na 70 vzorcích (Kopeckého válečky) ze tří až čtyř hloubek půdního profilu v místech deseti sond (K4, K5, K6, K7, K9, K10, K11, K14, K15, K16). V každé hloubce byly odebrány 1 až 3 vzorky.

Měřenými body retenčních čar byly proloženy křivky (výraz podle van Genuchtena/Mualem) a ty byly dále scalovány (postup např. *CÍSLEROVÁ, 1989*) v pěti skupinách, členěných podle hloubek (odpovídajících jednotlivým půdním horizontům) a podle tvaru retenční čáry. Pro každou skupinu retenčních čar tak byla vytvořena referenční retenční křivka (viz. tab. 3.16. a obr. 3.9.). (*TACHECÍ, 2002*)

Tab. 3.16. Členění retenčních křivek podle hloubky, vybrané fitované parametry, Kopaninský tok

Označení referenční retenční křivky	Počet retenčních čar ve skupině	Hloubka [cm]	Thr [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Ths [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]
A	30	9 – 16	0.01	0.461
B	24	35-52	0.01	0.368
C	18	63 – 75	0.01	0.364
D1	9	91- 110	0.01	0.368
D2	6	80-85	0.01	0.346



Obr. 3.9. Referenční retenční křivky pro jednotlivé horizonty

### Nasycená zóna

Geologický konceptuální model byl specifikován pomocí geologických jednotek určených hydrogeologickými parametry (nasycená a nenasycená hydraulická vodivost, specifická nasávakost, součinitel nadlepšení odtoku a pórovitost). V současné verzi modelu je nasycená zóna schematizována zjednodušeně pouze 1 vrstvou proměnné mocnosti s jednotnými hydraulickými parametry.

## ***Drenáž***

Digitalizací dostupných podkladů (projekty odvodnění) byly vytvořeny vrstvy odvodnění. Plochy drenážních skupin byly přizpůsobeny schematizací použité modelem tak, aby kontinuálně zasahovaly až k recipientu.

## ***Toky***

Do modelu MIKE 11 byly vloženy souřadnice lomových bodu toku společně se zaměřenými příčnými profily. Ve čtyřech hlavních součástech MIKE 11 (Network, Cross-sections, Boundary data a HD parameters) byla definována nastavení modelu (Manning (n), aproximace povodňové vlny, typ proudění a další). Korytový model byl sestaven tak, aby dobře navazoval na drenáž.

## ***Kalibrace a validace modelu***

Sestavený model byl kalibrován na datech hydrologického roku 2006 a poté validován na datech hydrologického roku 2005. Proces kalibrace i validace byl prováděn porovnáním měřených a simulovaných průměrných 2-hodinových průtoků v uzávěru povodí.

Model byl nejdříve otestován na hrubé chyby a byla provedena prvotní úprava modelu. Po prvotní úpravě nastavení modelu byly použity ke kalibraci následující parametry:

1. horizontální a vertikální hydraulická vodivost v nasycené zóně,
2. nasycené hydraulické vodivosti jednotlivých vrstev v nenasyné zóně ,
3. drainage time constant – tato konstanta vyjadřuje komplex faktorů ovlivňujících režim proudění v místech drenážního systému (např. rozchod drenážního systému, jehostav, propustnost půdy v okolí drénu apod.)
4. bypass – rychlé preferenční proudění makropóry přímo do nasycené zóny.

Jak otestování na hrubé chyby, tak i kalibrace byla prováděna manuálně, jednalo se tedy o časově velmi náročnou proceduru. Počáteční podmínky nasycení prostředí (prostřednictvím výšky hladiny podzemní vody) byly určeny pomocí předchozích simulací.

U jednotlivých simulací v rámci kalibrace byl porovnáván především Nash-Sutcliffův koeficient determinance, tvar a časová shoda naměřeného a vypočteného hydrogramu, jak oblasti nízkých, tak i kulminačních průtoků (tvar vzestupné a sestupné větve kulminační vlny, maximální průtok).

*Koeficient účinnosti předpovědi – koeficient determinance* (Nash-Sutcliffe correlation coefficient – (NASH, SUTCLIFFE, 1978; IN WEGLARCZYK, 1998)) – patří k nejčastěji využívaným

bezrozměrným ukazatelům při hodnocení účinnosti modelů (koeficient je přímo počítaný programem MIKE SHE):

$$R2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qcalc_i)}{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \overline{Qobs})},$$

kde:

$Qobs_i$  – naměřená hodnota průtoku v čase  $i$

$\overline{Qobs}$  – průměrná hodnota měřených průtoků

$Qcalc_i$  – vypočtená hodnota v čase  $i$

$R2 = 1$  znamená úplnou shodu mezi naměřenými a simulovanými daty. Pokud je  $R2$  menší 0, je dlouhodobá průměrná hodnota lepším odhadem než výstup modelu. Ukazatel  $R2$  je citlivý na velikost odchylek měřených a vypočtených hodnot pro povodňové události s vysokými průtoky (KRAUSE A KOL., 2005).

Při prezentaci výsledků simulací finálního nastavení modelu byly použity (pokud je model sám počítal) nebo propočteny ještě níže uvedené charakteristiky:

*Průměrná chyba* udává průměrnou chybu za celé období. Pomocí této charakteristiky lze díky výsledné hodnotě (plusová nebo minusová) určit zda model oproti skutečnosti nadhodnocuje nebo naopak podhodnocuje. Vypočítá se dle tvaru (chyba je přímo počítána programem MIKE SHE):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qcalc_i)}{N}$$

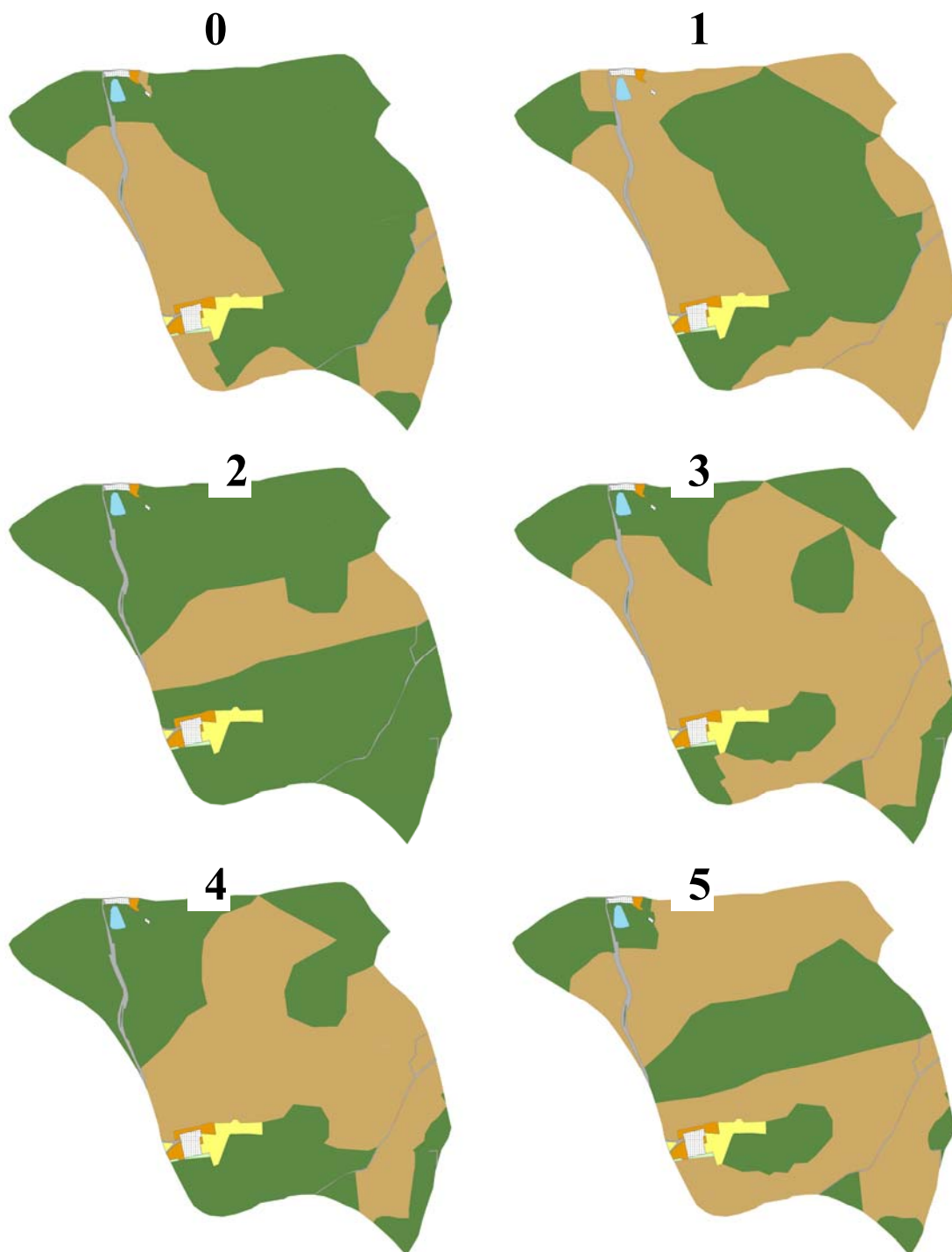
### ***Scénáře uspořádání krajinné matrice***

Scénáře využití pozemků v povodí byly voleny dle problematiky uvedené v názvu, tedy dle rozdílného uspořádání krajinné matrice. Při výběru scénářů byl kladen důraz na první dvě kritéria identifikace matrice dle FORMANA, GODRONA (1993), a to na kritérium relativní plochy a kritérium spojitosti. Třetí kritérium (řídícího elementu v dynamice krajiny) bylo v tomto případě zanedbáno, protože má z hlediska scénářů uspořádání krajinné matrice malý význam. Bylo stanoveno 6 možných kombinací uspořádní matrice dle výše uvedených kritérií (viz. tab. 3.17. a obr. 3.11.). Scénář 0 zobrazuje současnou (reálnou) situaci, kdy je les krajinnou maticí jak díky větší relativní ploše, tak i více spojitému rozmístění lesních pozemků. Scénáře 1 a 2, kdy je les rovněž krajinnou maticí, vždy splňují jen jedno z kritérií. U scénářů 3, 4 a 5 je krajinnou maticí orná půda, kdy jsou scénáře řazeny analogicky výše

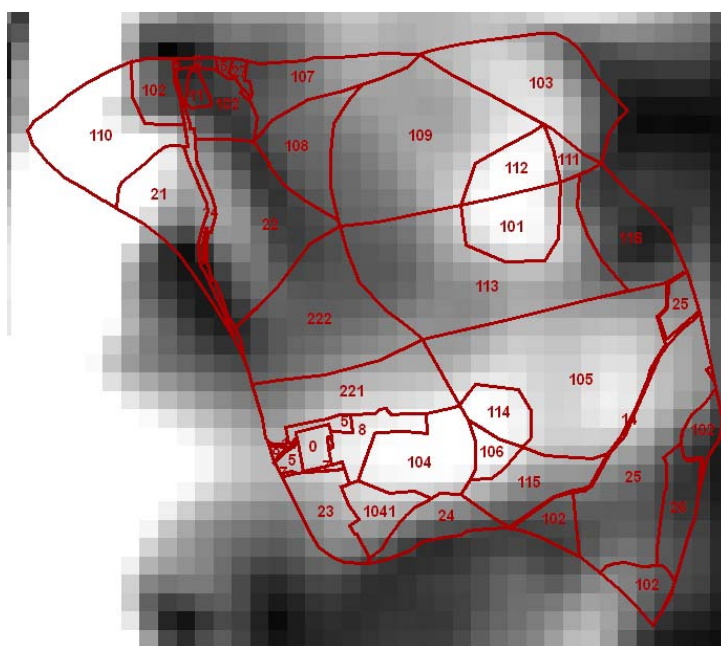
uvedenému postupu (scénář 3 je postaven na úroveň scénáři 0 atd.). Uvažovány byly pouze krajinné matrice takového využití území, které jsou v dané oblasti plošně převažující (orná půda a les), ostatní mají v oblasti malé zastoupení. Pro možnost změny využití pozemku z lesa na ornou půdu byl stanoven limit sklonu pozemku maximálně 12 ° (viz. pozemky 101, 104, 106, 110, 112 a 114 na obr. 3.10.). V rámci jednotlivých scénářů byly měněny druhy pozemků z orné půdy na les nebo naopak. Pokud se měnilo využití pozemku z lesa na ornou půdu, byla vždy zvažována přítomnost drenážních systémů jako velmi častého doprovodného jevu intenzivního využívání půdy. Pokud v některém pozemku (či jeho části) morfologické podmínky nasvědčovaly možnému zamokření území, byly tam nastaveny parametry odvodnění, tak aby byl alespoň přibližně poměrně zachován stávající procentuální podíl ploch orné půdy odvodněných drenážními systémy. Ostatní charakteristiky byly z důvodu značné variability a lepší možnosti porovnání výsledků zanedbány.

Tab. 3.18. Vyhodnocení kritérií určování krajinné matrice pro různé scénáře

Varianta	Využití půdy	Kritérium relativní plochy	Kritérium spojitosti	Krajinná matrice
0	Les	Ano (64%)	Ano	Les
	Orná půda	Ne (31%)	Ne	
1	Les	Ne (48%)	Ano	Les
	Orná půda	Ne (48%)	Ne	
2	Les	Ano (77%)	Ne	Les
	Orná půda	Ne (18%)	Ne	
3	Les	Ne (33%)	Ne	Orná půda
	Orná půda	Ano (63%)	Ano	
4	Les	Ne (47%)	Ne	Orná půda
	Orná půda	Ne (49%)	Ano	
5	Les	Ne (38%)	Ne	Orná půda
	Orná půda	Ano (58%)	Ne	



Obr.3.11. Jednotlivé scénáře uspořádání krajinné matrice na povodí P52.



Obr. 3.10. Sklonové poměry povodí, vymezení ploch se sklonem větším než 12° (bílé plochy).

## 4. VÝSLEDKY A DISKUZE

### 4.1. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 4.1.1. PRŮTOKY

Prvním krokem podávajícím obraz o odtokových poměrech na povodí Kopaninského toku a jeho mikropovodích je statistické vyhodnocení datových řad průtoků z jednotlivých profilů, které se na povodí nacházejí a poskytují pro dané období neporušené datové řady – viz. tab. 4.1.

Tab. 4.1.a. Základní statistické charakteristiky datových řad ve sledovaných pokusných povodích

Název povodí	Jednotky	T2	P21	P31	P32	P33	P41
Plocha povodí	[ha]	61.42	23.76	34.05	76.18	19.73	36.25
Maximum Qd	[l.s <sup>-1</sup> ]	62.22	62.71	56.16	97.26	37.09	36.10
Maximum qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	1.01	2.64	1.65	1.28	1.88	1.00
Minimum qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.019	0.018	0.000	0.015	0.004	0.002
Směrodatná odchylka qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.09	0.28	0.12	0.11	0.17	0.10
Průměrný odtok qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.06	0.14	0.03	0.07	0.06	0.09
Koeficient variace	-	1.32	1.94	3.74	1.67	2.79	1.11
Koeficient asymetrie	-	6.41	5.82	8.60	6.06	6.43	4.19
Medián qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.05	0.07	0.01	0.03	0.01	0.06
Součinitel odtoku	-	0.27	0.59	0.13	0.27	0.24	0.39

Tab. 4.1.b. Základní statistické charakteristiky datových řad ve sledovaných pokusných povodích

Název povodí	Jednotky	P42	P51	P52	P6	P7	T7U
Plocha povodí	[ha]	52.14	7.12	64.92	15.73	43.25	710.35
Maximum Qd	[l.s <sup>-1</sup> ]	57.29	2.75	87.16	21.58	26.97	1173.42
Maximum qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	1.10	0.39	1.34	1.37	0.62	1.65
Minimum qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.004	0.015	0.006	0.020	0.012	0.006
Směrodatná odchylka qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.14	0.03	0.12	0.10	0.08	0.13
Průměrný odtok qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.10	0.04	0.06	0.07	0.07	0.07
Koeficient variace	-	1.38	0.81	2.08	1.37	1.05	1.87
Koeficient asymetrie	-	3.57	4.89	6.62	6.68	3.58	6.70
Medián qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04
Součinitel odtoku	-	0.42	0.15	0.23	0.30	0.30	0.29



Jednotlivá povodí se liší plochou, proto byly ke zpracování většiny charakteristik použity hodnoty specifických průtoků. Pouze na mikropovodí P31 se vyskytlo v průběhu let 2005-06 období s nulovým průtokem - 10 dní v srpnu 2006. Na profilu T7U (uzávěrovém profilu celého povodí Kopaninského toku) činila hodnota minimálního průtoku  $4,27 \text{ l.s}^{-1}$ . Z hodnot průměrného specifického odtoku vyplývá, že povodí P21 je nejvodnější, zatímco povodí P31 vykazuje výrazně nejmenší průtoky. Koeficient variace ukazuje, že průtokově nejvyrovnanější je čistě lesní povodí P51. Vysokých hodnot koeficientu variace naopak dosahují velmi málo vodná mikropovodí P31 a P33, které rovněž dosahují nejvyšších hodnot specifických maximálních průtoků. Nejnížší hodnotu součinitele odtoku má dle očekávání díky vysokému retenčnímu a evapotranspiračnímu potenciálu lesní povodí P51, nejvyšší pak povodí P21 a povodí P42 a P41. Čistě lesní povodí P51 tedy beze zbytku naplňuje představy o funkci lesa na odtokové poměry: v souladu s literaturou vykazuje nejnížší maximální specifický odtok (rovněž např. v *BOSCH, HEWLETT, 1982; KOVÁŘ, 2006*), nejnížší odtokový součinitel (např v *TALLAKSEN, 1993; WEGEHENKEL, 2002, WEGEHENKEL, 2003*) a nejvyrovnanější průtoky v průběhu roku. To potvrdila i provedená korelace, která prokázala významný vliv zastoupení lesních porostů v povodí na hodnotu součinitele odtoku ( $R=-0,61, p<0,05$ ).

Nejvyšší maximální specifický průtok a nejvyšší odtokový součinitel má mikropovodí P21, které má jako jediné na své ploše jednak významnější aglomeraci (obec Útěchovičky – 60 obyvatel), ale rovněž jako na jediném povodí více než 2 % celkového povrchu tvoří vodní plochy (rybník v blízkosti závěrového profilu). Pravděpodobně zde půjde o kombinaci několika faktorů najednou. Na vysokou hodnotu odtokového součinitele může mít pozitivní (zvyšující) vliv: přívod vody ze sousedního mikropovodí P1 pro zásobování obyvatel pitnou vodou a přítomnost zastavěných ploch (téměř 6%) v povodí, velmi pravděpodobně zde rovněž nesouhlasí povodí vymezené orografickou rozvodnicí s hydrogeologicky vymezeným povodím. V okolí obce Útěchovičky se nachází několik pramenných vývěrů (jeden stálý a silný), jejichž zdrojová plocha není určena. Na druhou stranu by měla vodní nádrž v tomto povodí plnit funkci akumulární a retenční a tedy ovlivňovat především maximální odtok z povodí. V této nádrži rybničního typu je ale prováděna manipulace s vodou takovým způsobem, že je vytvořen malý záchytný prostor a nádrž ovlivňuje maximální průtoky omezeným způsobem.

Nicméně období, pro které byly uvedené charakteristiky odhadnuty, je poměrně krátké a vypočtené hodnoty, ač pro porovnání mikropovodí mezi sebou postačují, nejsou příliš reprezentativní. Toto je dobře patrné v tab. 4.2., kde jsou porovnána data z období 1991-2000

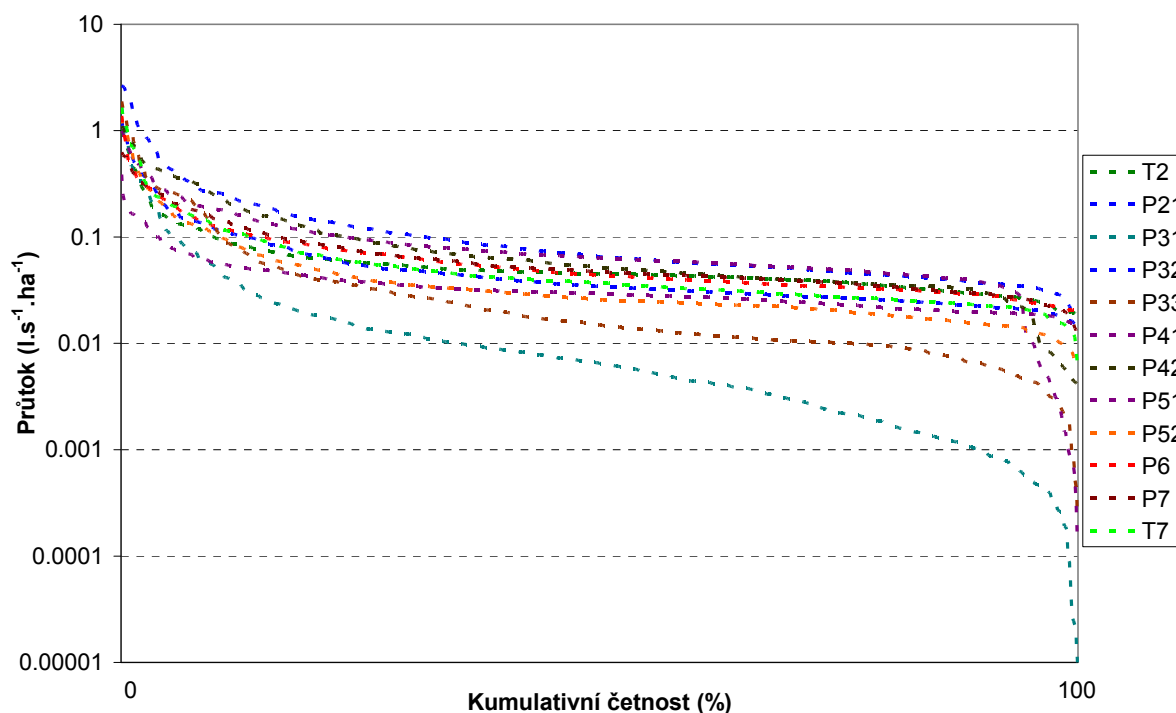
a 2004-2006. Podobně má velký vliv výběr období na výsledné hodnoty i při ostatních zpracováních, viz. například porovnání výsledků separace Killeho metodou pro stejné povodí, ale různá období v kap. 4.3.

Tab. 4.2. Porovnání statistických charakteristik povodí Kopaninského toku pro různá období

Název povodí	Jednotky	T7U (1991-2000)	T7U (2004-2006)
Maximum Qd	[l.s <sup>-1</sup> ]	470.00	1173.42
Maximum qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.71	1.65
Minimum qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.001	0.006
Směrodatná odchylka qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.04	0.13
Průměrný odtok qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.04	0.07
Součinitel variace	-	0.98	1.87
Součinitel asymetrie	-	5.80	6.70
Medián qd	[l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	0.03	0.04

### Empirické čáry překročení průtoků

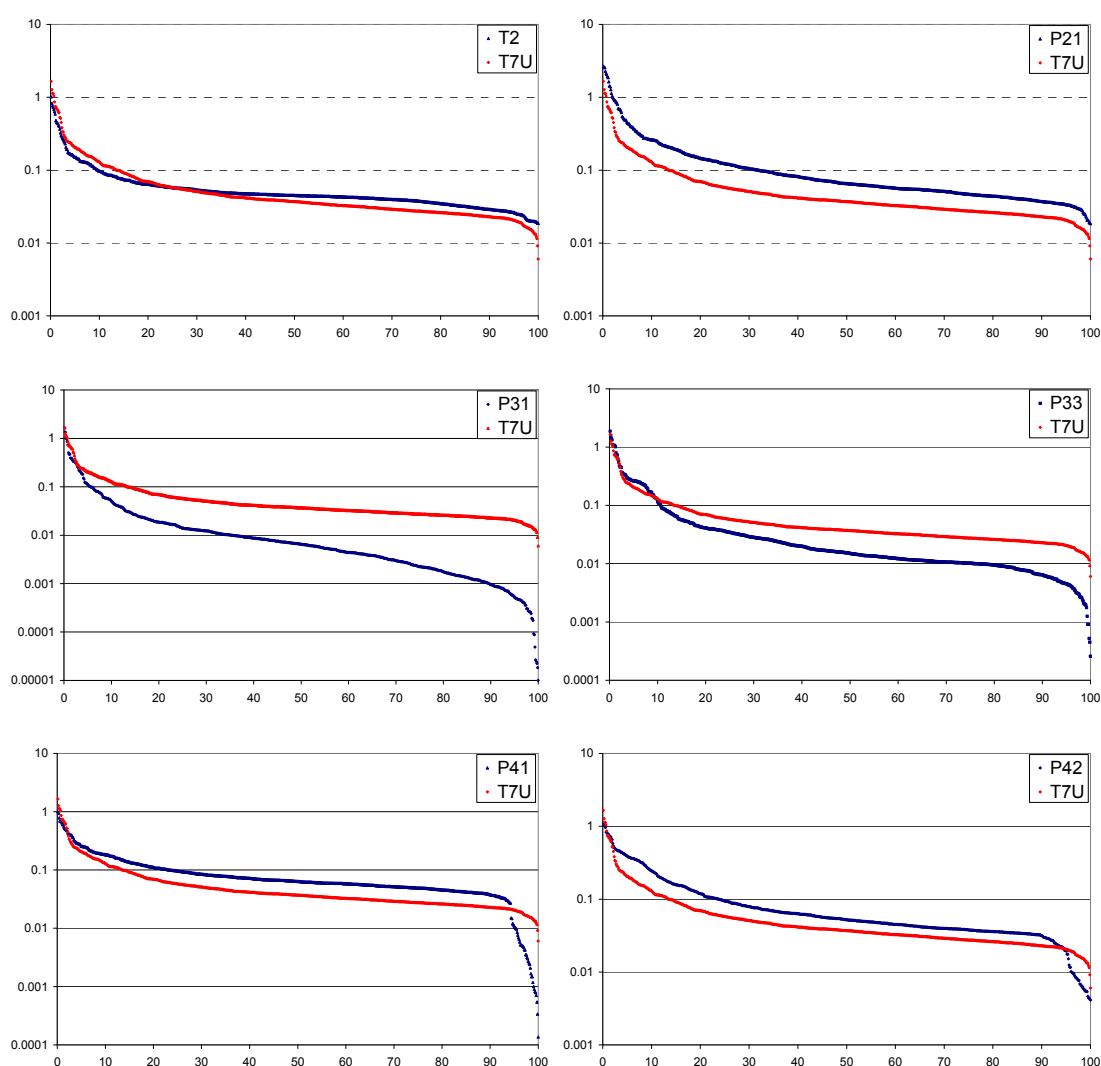
Empirické čáry překročení průtoků vyjadřují závislost mezi hodnotami průtoků a kumulativní četností, tj. počtem dosažení nebo překročení těchto hodnot za uvažované období.



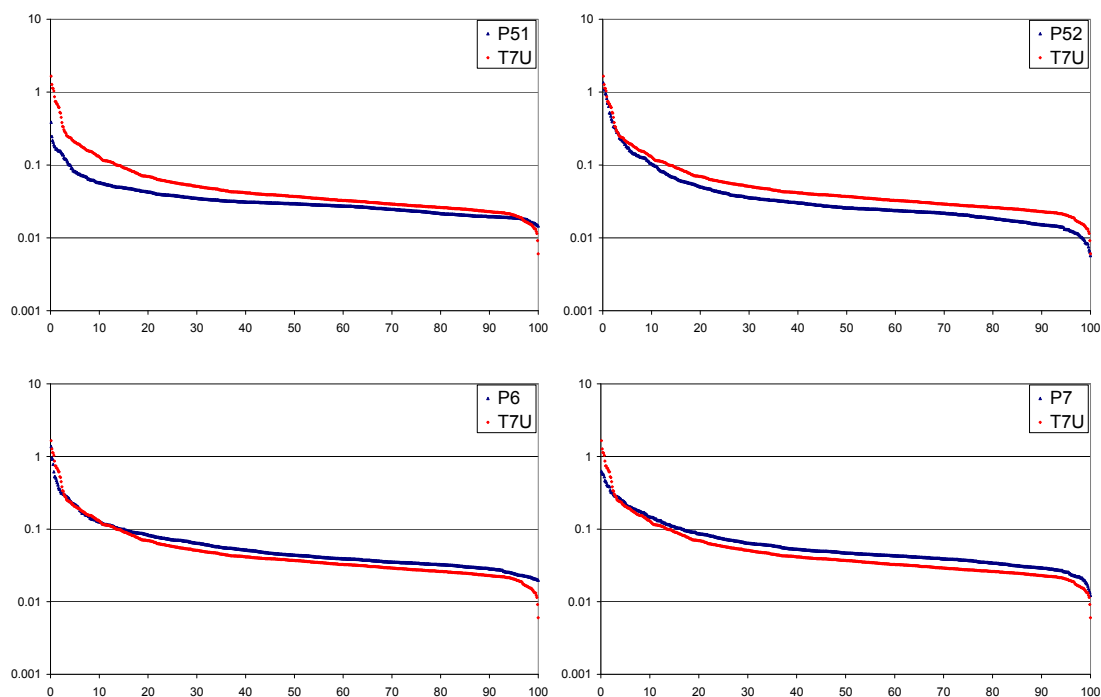
Obr. 4.1. Empirické čáry překročení středních denních specifických průtoků jednotlivých mikropovodí

Z obr. 4.1. je patrné, že až na povodí P31 a P32, mají čáry překročení specifických průtoků pro všechny ostatní povodí podobný průběh. Tato dvě mikropovodí se s ostatními shodují pouze v malé oblasti maximálních průtoků, v oblasti průměrných a především minimálních průtoků je pak tvar křivky výrazně jiný. Opačný trend má křivka z lesního mikropovodí P51, která vykazuje větší specifický odtok v oblasti minimálních průtoků než většina ostatních povodí a naopak v oblasti maximálních průtoků viditelně nižší.

Pro větší přehlednost jsou v rámci obr. 4.2.(a.,b.) znázorněny čáry překročení průtoků jednotlivých mikropovodí, jako srovnání byla použita čára překročení průtoků pro celé povodí Kopaninského toku. Na ose x vždy kumulativní četnost (%).



Obr. 4.2.a. Empirické čáry překročení středních denních specifických průtoků - porovnání jednotlivých mikropovodí a celého povodí - T7U (osa y je vždy průměrný denní specifický průtok v  $l \cdot s^{-1}$ )



Obr. 4.2.b. Empirické čáry překročení středních denních specifických průtoků - porovnání jednotlivých mikropovodí a celého povodí - T7U (osa y je vždy průměrný denní specifický průtok v  $l.s^{-1}$ )

Čáry překročení povodí P33, P31 a P51 byly zmíněny již výše. Ze zbývajících sedmi povodí má již pouze jedno povodí (P52) průběh čáry překročení pod čarou překročení T7U. Ostatní čáry probíhají, alespoň ve větší části grafu (pokud ne v celé délce), nad čarou překročení pro T7U.

#### 4.1.2. SEPARACE ODTOKU VODY

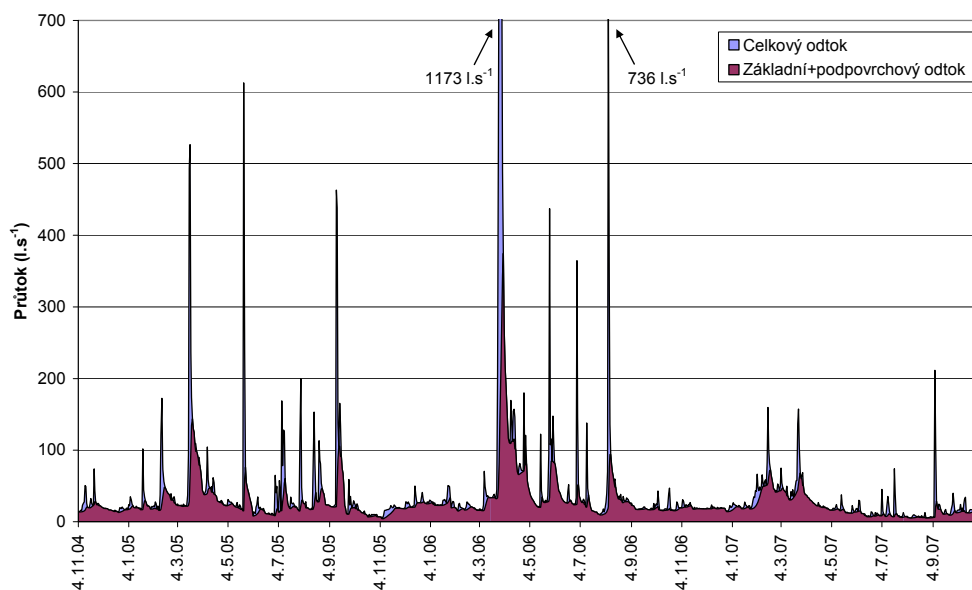
Při diskuzi o jednotlivých složkách odtoku je nutné nezanedbat jejich původ a definice. Například, přímý odtok definovaný ve smyslu izotopové separace jako „event water“ (událostní odtok) nemá ten samý původ jako očividně podobná složka odtoku (opět přímý odtok), která byla graficky vyčleněna separací hydrogramu (HOLKO A KOL., 2000). Proto, pokud mluvíme o výsledcích, nemůžeme dosáhnout úplné shody díky rozdílným metodologickým přístupům k řešení problému. Porovnáním několika metod separace odtoku se v poslední době zabývali například NEFF A KOL. (2005), kteří porovnávali 6 různých metod na 959 datových řadách nebo ECKHARDT (2008) - 7 metod pro 65 povodí.

Pro následné použití na všech profilech bylo nejdříve třeba vybrat jednu vhodnou metodu pro separaci rychlé složky odtoku (přímý odtok - povrchový a mělký podpovrchový) a následně pro separaci pomalé složky odtoku (podzemní - základní - odtok). Odečtením

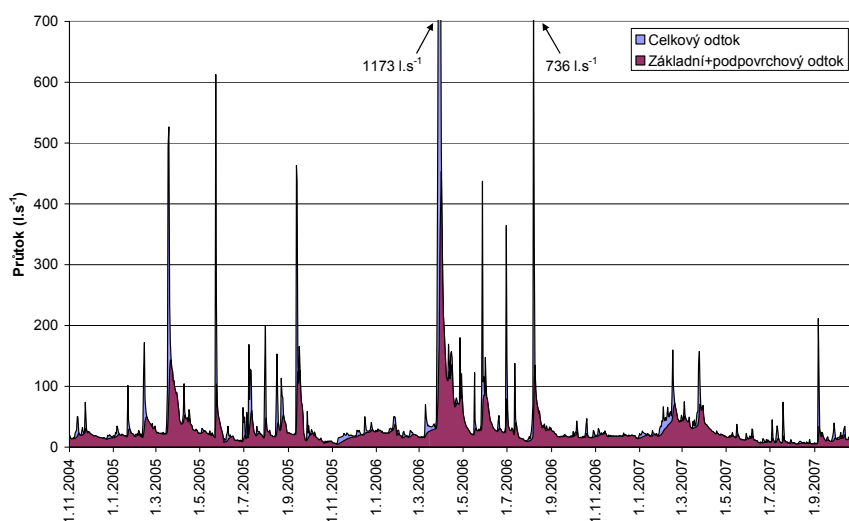
přímého a základního odtoku od celkového odtoku pak byl odseparován odtok hlubší hypodermický (podpovrchový).

*Separace rychlé složky odtoku (přímého odtoku) - výběr metody*

Obr. 4.3. a 4.4. ukazují výsledek separace odtoku pomocí dvou metod (GROUND a Lyne-Hollick). Obě metody byly použity s doporučenými koeficienty (DOLEŽAL A KOL., 2002; GRAYSON A KOL., 1996).



Obr. 4.3. Separace přímého odtoku metodou GROUND pro profil T7U (XI.2004 - X.2007)



Obr. 4.4. Separace přímého odtoku metodou dle Lyne a Hollick pro profil T7U (XI.2004 - X.2007)

Výsledný průběh přímého odtoku i podíl této složky na celkovém objemu odtoku vyšel u obou metod velice podobně - GROUND 33,8 %, Lyne-Hollick 30,4 % (před zhlazením 34,1 %) (viz tab. 4.3.). Tyto hodnoty odpovídají podobným studiím, např. DOLEŽAL A KOL. (2002) uvádí průměrný přímý odtok 30 % pro malá povodí ČR, MÜLLER A KOL. (2003) pro malá zemědělsky využívaná povodí v Německu 34 %.

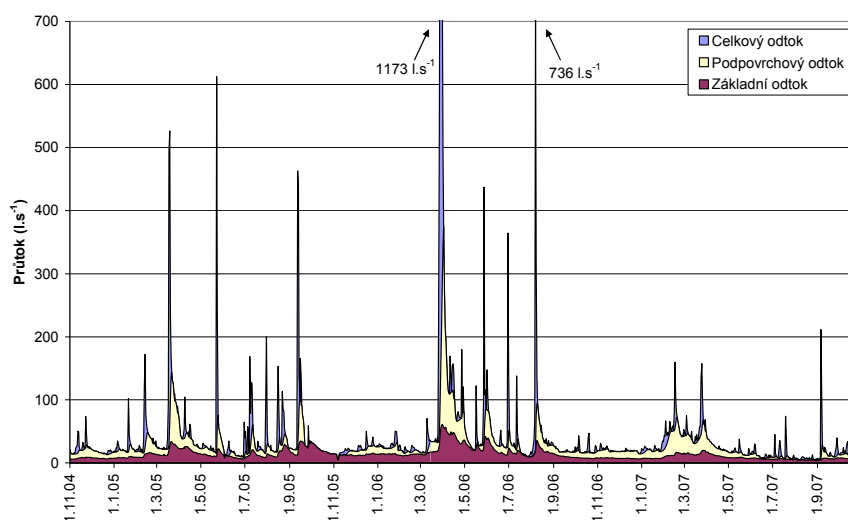
Tab. 4.3. Porovnání výsledků separace přímého odtoku - období XI. 2004 - X.2007

	Qpřímý/Qtotal [%]
<b>GROUND</b>	<b>33.8</b>
Lyne-Hollick - první pass	34.1
<b>Lyne-Hollick - třetí pass</b>	<b>30.4</b>

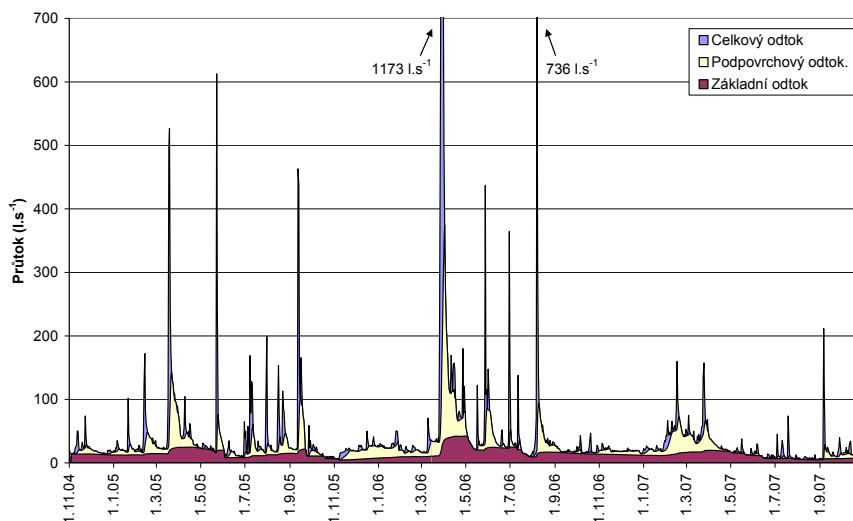
Pro další použití při separování přímého odtoku na jednotlivých mikropovodích Kopaninského toku byla vybrána metoda GROUND, která byla primárně vytvořena pro podmínky malých zemědělsky využívaných odvodňovacích povodí v rámci ČR a jejíž přesnost byla ověřena Lyne-Hollickovým filtrem.

#### Separace podzemního odtoku - výběr metody

Obr. 4.5. a 4.6. ukazují výsledek separace základního odtoku pomocí dvou metod (Kliner-Kněžek a Chapman). Protože metoda Killeho je metodou objemovou, je v obr. 4.7. zobrazen pouze průběh minimálních hodnot ve sledovaném období 2004 - 2007.



Obr. 4.5. Průběh jednotlivých složek odtoku v období XI.2004 - X.2007 (základní odtok vyhodnocený metodou Kliner-Kněžek, přímý odtok vyhodnocen metodou GROUND)

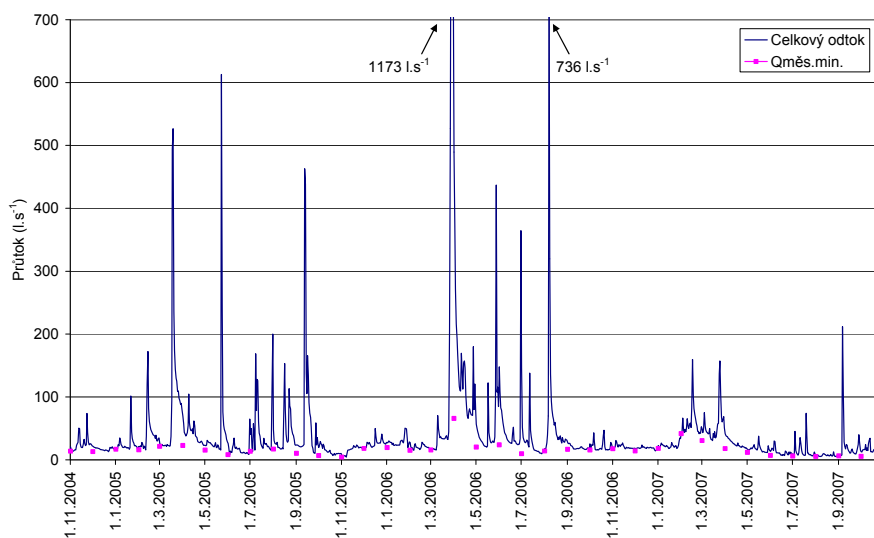


Obr. 4.6. Průběh jednotlivých složek odtoku v období XI.2004 - X.2007 (základní odtok vyhodnocený digitálním filtrem dle Chapmana, přímý odtok vyhodnocen metodou GROUND)

Tab. 4.4. Porovnání výsledků jednotlivých metod separace základního odtoku na profilu T7U za období XI.2004 - X.2007 (% celkového odtoku)

Metoda	Podzemní odtok
Kille	38.2
Kliner-Kněžek	32.3
Chapman*	34.5

\* při použití koeficientu  $k = 0.99834$  (DOLEŽAL A KOL., 2002)

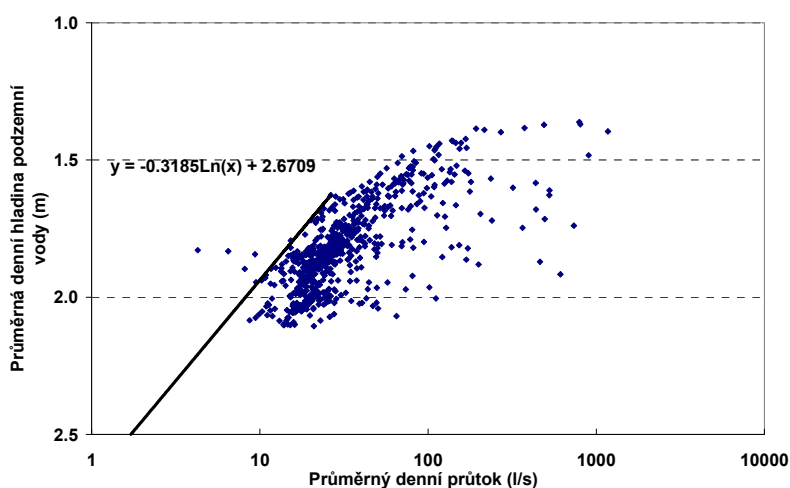


Obr. 4.7. Průběh minimálních měsíčních průtoků v období XI.2004 - X.2007 - vstup pro Killeho metodu

V tab. 4.4. je uveden přehled výsledků jednotlivých metod separace základního odtoku. V souladu s literaturou (MIHÁLIK, KAJAN, 1990) vychází podíl základního odtoku vyhodnocený Killeho metodou mírně vyšší než u ostatních metod.

Druhá metoda dle Klinera a Kněžka, která není čistě výpočetní, dává ze tří provedených metod podíl základního odtoku nejnížší. Metoda digitálního filtru dle Chapmana (nastavena dle Doležala pro české podmínky malých povodí na hodnotu  $k = 0.99834$ ) vyhodnotila podíl základního odtoku přibližně na úrovni aritmetického průměru dvou uvedených metod.

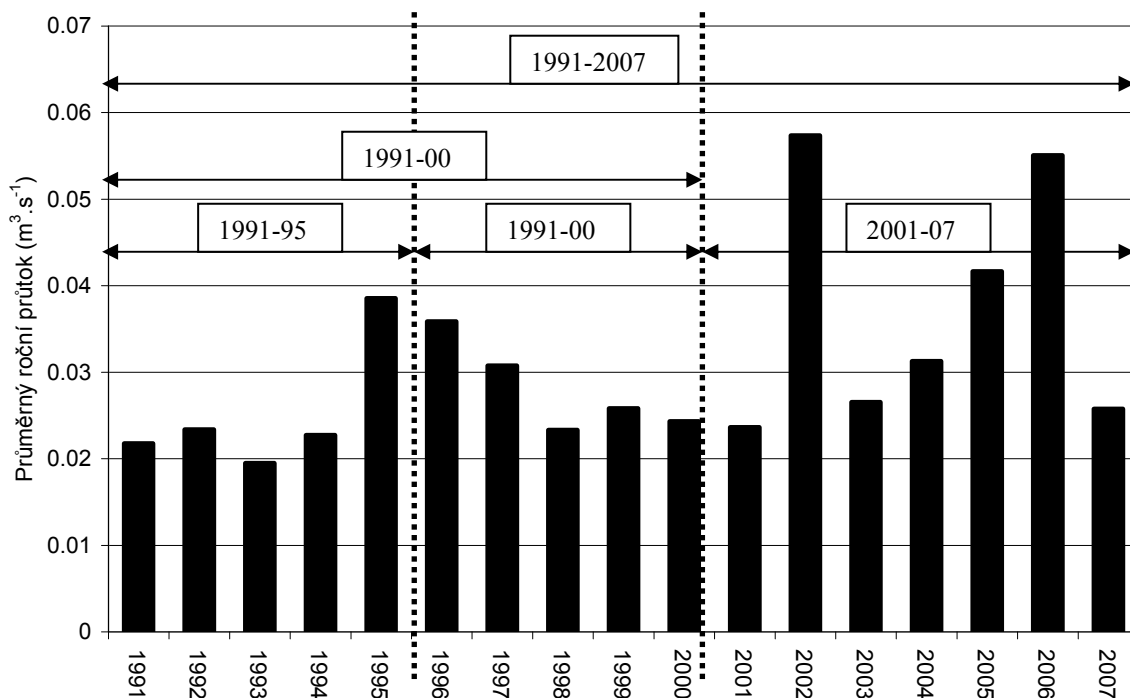
Na základě těchto skutečností (nahodnocení Killeho metodou, aritmetický průměr blízko výsledkům digitálního filtru a nastavení  $k$  na podmínky malých povodí) bylo pro další aplikaci na jednotlivá mikropovodí rozhodnuto použít digitální filtr se stejnou hodnotou  $k$ . Dalším důvodem k použití metody digitálního filtru dle Chapmana je fakt, že metoda Klinera a Kněžka je založena na vzájemném vztahu základního odtoku a kolísání hladiny podzemní vody v okolí toku (viz. obr. 4.8.). Protože se na povodí Kopaninského toku nachází pouze dva vrty (oba v blízkosti uzávěru povodí), leží řada uzávěrových profilů mikropovodí v poměrně velké vzdálenosti od nich a nemusí tak být vždy zaručena hydraulická spojitost mezi hladinou vody v toku a daným vrtem.



Obr. 4.8. Separace základního odtoku - vztah mezi hladinou podzemní vody a průtokem v toku - metoda Klinera-Kněžek pro profil T7U a vrt V1M (XI.2004 - X.2007)

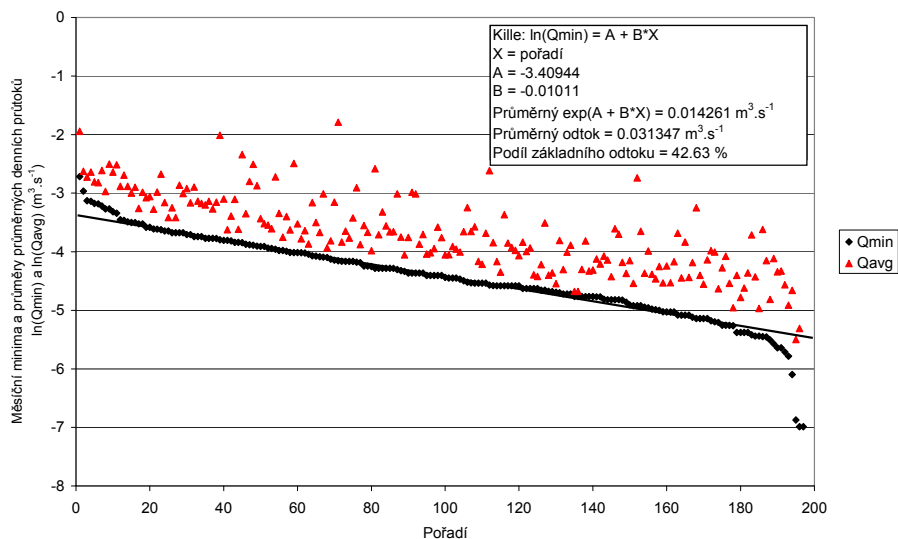
Při vyhodnocování separace odtoku Killeho metodou byla provedena separace na několika různě dlouhých obdobích na datech z profilu T7U – společně s průměrnými roční průtoky je zobrazuje obr. 4.9.



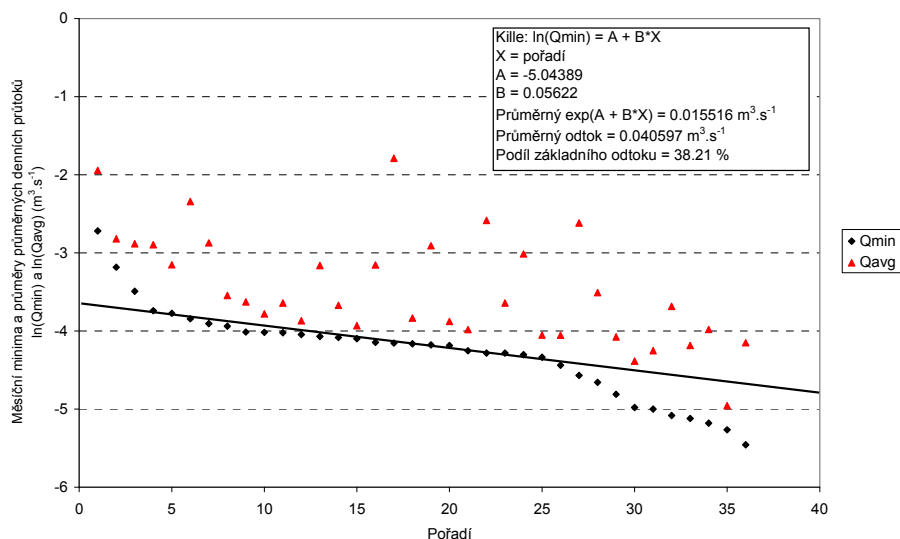


Obr. 4.9. Průměrný roční průtok na profilu T7U - rozdělení jednotlivých období pro tab. 5.5.

Nahrazení přímé části čáry překročení minimálních měsíčních průtoků přímkovou aproximací a parametry výpočtu (směrnice (B) a úsek (A) aproximace, vypočtený průměrný základní odtok, průměrný odtok za celé období) jsou uvedeny v obr. 4.10. a 4.11.



Obr. 4.10. Separace základního odtoku - metoda Killeho pro profil T7U (VII.1991 - X.2007)



Obr. 4.11. Separace základního odtoku - metoda Killeho pro profil T7U (XI.2004 - X.2007)

Tab. 4.5. Parametry výpočtu podílu základního odtoku Killeho metodou pro různě dlouhá období pro profil T7U

<p><b>1991-1995</b>            Kille: <math>\ln(Q_{min}) = A + B \cdot X</math>            X = pořadí            A = -3.38890            B = -0.040706            Průměrný <math>\exp(A + B \cdot X) = 0.01337 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>            Průměrný odtok = <math>0.02555 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>  <b>Podíl základního odtoku = 52.32 %</b></p>	<p><b>1995-2000</b>            Kille: <math>\ln(Q_{min}) = A + B \cdot X</math>            X = pořadí            A = -3.45848            B = -0.03191            Průměrný <math>\exp(A + B \cdot X) = 0.01379 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>            Průměrný odtok = <math>0.02802 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>  <b>Podíl základního odtoku = 49.23 %</b></p>
<p><b>1991-2000</b>            Kille: <math>\ln(Q_{min}) = A + B \cdot X</math>            X = pořadí            A = -3.41470            B = -0.01851            Průměrný <math>\exp(A + B \cdot X) = 0.01374 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>            Průměrný odtok = <math>0.02716 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>  <b>Podíl základního odtoku = 50.58 %</b></p>	<p><b>2001-07</b>            Kille: <math>\ln(Q_{min}) = A + B \cdot X</math>            X = pořadí            A = -3.32534            B = -0.02178            Průměrný <math>\exp(A + B \cdot X) = 0.01513 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>            Průměrný odtok = <math>0.03591 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>  <b>Podíl základního odtoku = 42.14 %</b></p>

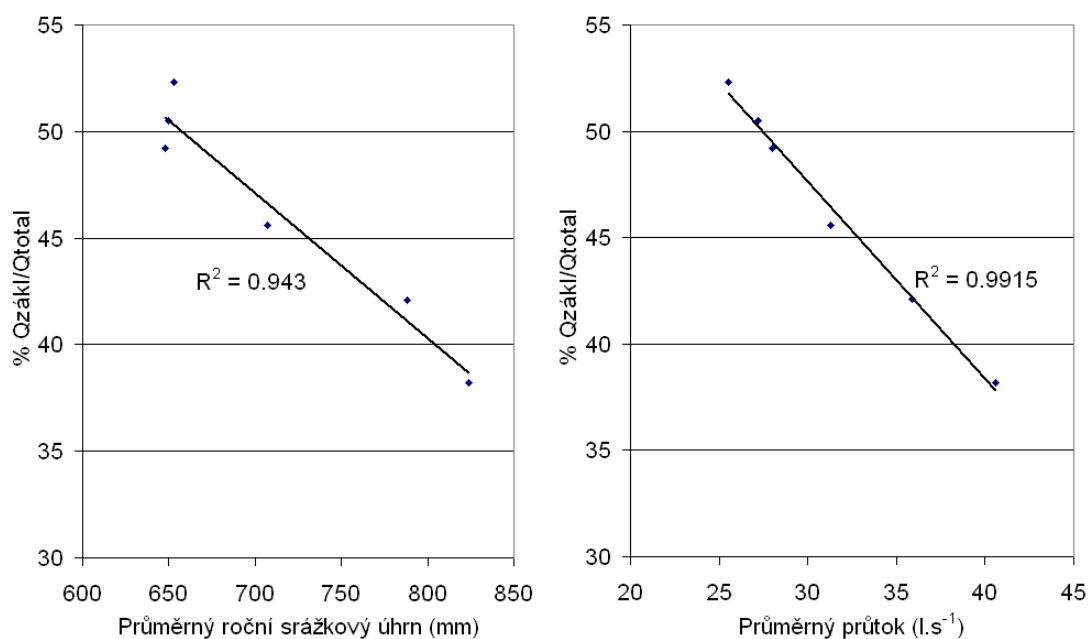
Pro ostatní různě dlouhá období jsou výše uvedené parametry výpočtu podílu základního odtoku uvedeny souhrnně v tab 4.5. Obecně se dá říci, že čím delší období se Killeho metodou analyzuje, tím snazší je odhadnout období, dle kterého se aproximují maximální a v případě malých povodí a krátkých období i minimální průtoky. Zřetelně je to vidět na nejdelší (obr. 4.10.) a nejkratší (obr. 4.11.) zkoumané datové řadě. Tímto se výrazně degraduje jedna z hlavních předností této metody, a to jednoduchost zpracování, která téměř vylučuje subjektivní zásahy vedoucí k odlišným výsledkům (KNEŽEK, 1988). Na druhou

stranu byly všechny separace Killeho metodou prováděny jednou osobou, čímž se tato možná chyba, alespoň pro porovnání jednoho toku mezi jednotlivými obdobími, eliminuje.

V tab 4.6. je uveden seznam výsledků separace základního odtoku Killeho metodou pro profil T7U pro různě dlouhá období. Je zřetelné, že podíl základního odtoku je nepřímo úměrný množství spadlých srážek a velikosti průtoku, tzn. čím vyšší průměrný roční srážkový úhrn, resp. průměrný roční průtok, tím je nižší podíl základního odtoku (viz. obr. 4.12.). Velmi dobře je to patrné na obdobích 1991 - 95 (suché - nejméně vodné) a 2004 - 07 (nejvlhčí - nejvíce vodné), kdy na stejném povodí klesá podíl základního odtoku o 14,1 %.

Tab. 4.6. Podíl základního odtoku k celkovému na profilu T7U v různých obdobích

Období	Průměrný roční srážkový úhrn [mm.rok <sup>-1</sup> ]	Průměrný průtok [l.s <sup>-1</sup> ]	Průměrný roční základní odtok [l.s <sup>-1</sup> ]	Qzákl./Qtotal [%]
1991-1995	653	25.5	13.4	52.3
1995-2000	648	28.0	13.8	49.2
1991-2000	650	27.2	13.7	50.5
2001-2007	788	35.9	15.1	42.1
2004-2007	824	40.6	15.5	38.2
1991-2007	707	31.3	14.3	42.6



Obr. 4.12. Závislost podílu základního odtoku z celkového odtoku na průměrném ročním srážkovém úhrnu (resp. průměrném průtoku za dané období) - v obou případech  $p < 0,01$

#### 4.1.3. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SEPARACE ODTOKU VODY PRO RŮZNĚ VYUŽÍVANÁ POVODÍ

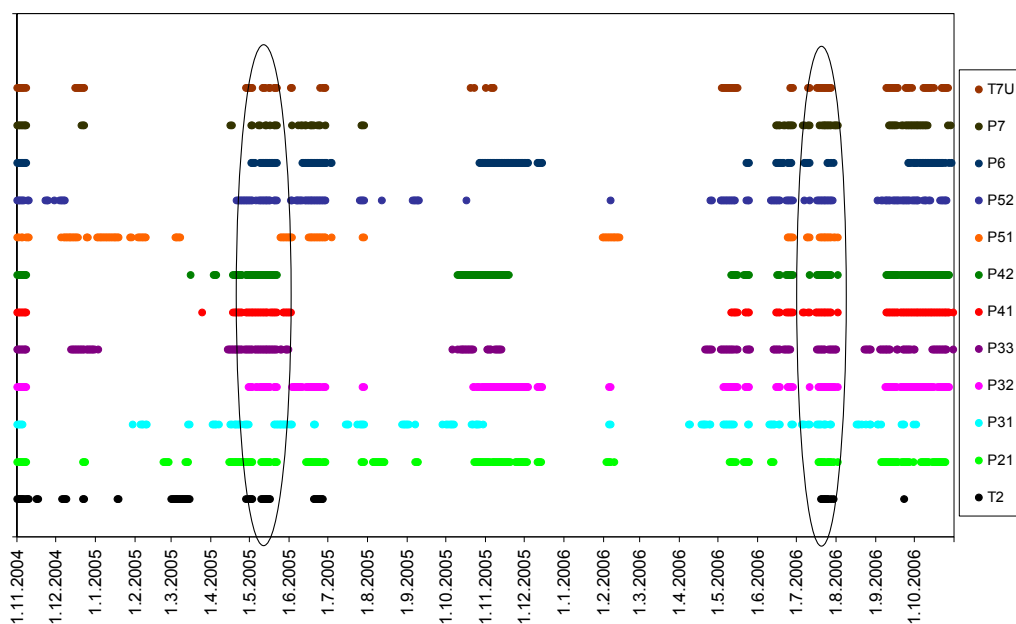
Tab. 4.7. ukazuje, že nejvyšší podíl základního odtoku má čistě lesní mikropovodí P51 (48 %). Mikropovodí P51 je součástí většího mikropovodí P52 (31 % orné půdy) a podíl základního odtoku v tomto profilu činí už jen 29,6 %. Vysoký podíl základního odtoku mají rovněž mikropovodí (P6, P7) s vysokým podílem orné půdy, resp. odvodnění.

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že tato interpretace není dostačující. Problematiku odtoku vody je nutné pojímat komplexněji, ne jen z pohledu využití pozemků na povodí. Mnohorozměrné analýze vlivu více parametrů povodí na složky odtoku vody se věnuje následující kapitola 4.5.

Tab. 4.7. Přehled rozdělení složek odtoku pro jednotlivá mikropovodí s uvedeným podílem plochy využívané jako orná půda a podílem odvodněných ploch na celkové ploše povodí

	% orné půdy	% odvodněných ploch	podzemní odtok (% $Q_{total}$ )	hypodermický odtok (% $Q_{total}$ )	přímý odtok (% $Q_{total}$ )
<b>P31</b>	39	2	13	28	60
<b>P33</b>	68	37	20	36	44
<b>P52</b>	31	16	30	31	39
<b>P21</b>	44	19	32	25	43
<b>T7</b>	52	10	32	32	36
<b>P42</b>	52	7	34	32	34
<b>P32</b>	46	7	38	29	33
<b>P41</b>	66	9	38	34	27
<b>P7</b>	84	22	39	34	27
<b>P6</b>	96	62	42	32	26
<b>T2</b>	27	0	47	28	25
<b>P51</b>	0	0	48	32	20

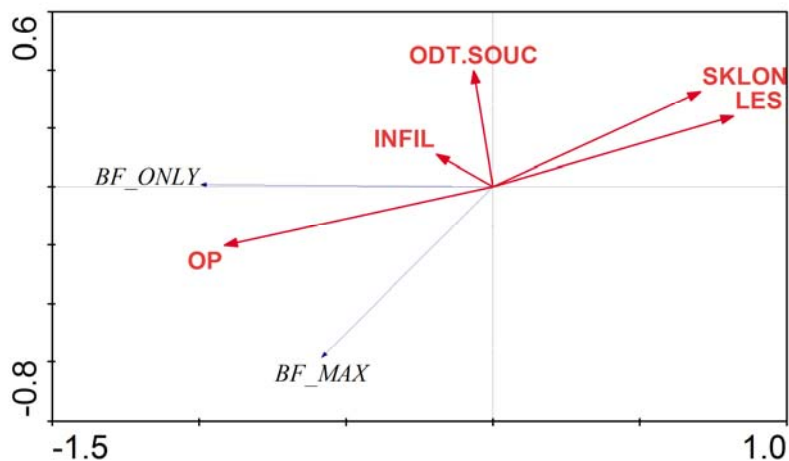
Na obr. 4.13. jsou znázorněna všechna období, kdy se na povodích vykytl pouze základní odtok. Za vyhodnocované období se vyskytla pouze dvě období, kdy byl na všech povodích současně odtok dotován pouze zdroji podzemní vody. Jednalo se o přelom dubna a května 2005 (20 mm srážek za 38 dní) a červenec 2006 (12 mm za 19 dní, odpolední teploty až 36°C po několik dní).



Obr. 4.13. Časová shoda období, kdy se na povodích vyskytoval pouze základní odtok

#### 4.1.4. MNOHOROZMĚRNÁ ANALÝZA

V této kapitole jsou v obr. 4.14. - 4.17. zobrazeny ordinační diagramy, které ukazují vždy první dvě osy redunční analýzy shrnující vliv různých parametrů povodí na bilanci odtoku vody. Popis datových souborů vstupujících do analýzy je uveden v kap. 3.2. Při provádění statistických testů byla zvolena hladiny významnosti  $\alpha=0,05$ .



Obr. 4.14. Ordinační diagram redunční analýzy shrnující vliv parametrů povodí na počet dní, kdy se vyskytl pouze základní odtok (BF\_ONLY) a nejdelší období základního odtoku (BF\_MAX) - období XI.2004 - X.2006

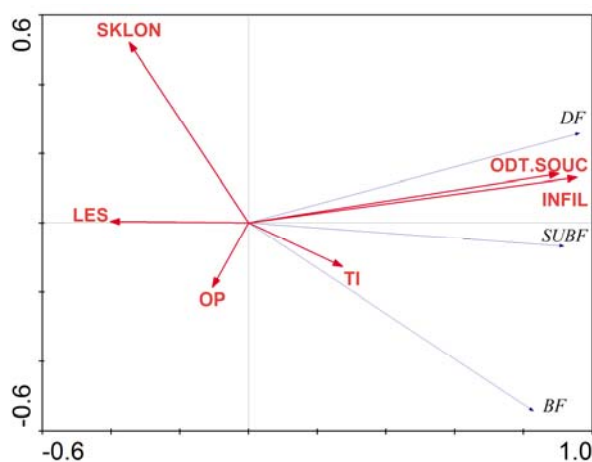
Ordinační diagram v obr. 4.14. naznačuje vztahy mezi jednotlivými parametry povodí a ukazatelem základního odtoku BF\_ONLY a BF\_MAX. Oba ukazatele vyjadřují dobu trvání

jevu, nikoliv jeho objemovou kvantifikaci. Statisticky významné úrovně při otestování Monte Carlo permutačním testem dosáhly tři vztahy a to OP, INFIL a LES.

Parametr OP má na BF\_ONLY i BF\_MAX pozitivní vliv. Plochy využívané jako orná půda ovlivňují tyto charakteristiky několika způsoby. Orná půda obecně méně přispívá ke zvýšení infiltrace (např. HRÁDEK, 1998), čímž podporuje tvorbu rychlého přímého odtoku. To má za následek jak rychlejší nárůst i pokles povodňové vlny zpět na úroveň základního odtoku, tak i vyšší podíl objemu přímého odtoku. Dále je podíl plochy orné půdy korelován ( $R=0,82$ ,  $p<0,05$ ) s výskytem a plošným zastoupením drenážních systémů. Drenážní systémy rovněž mírně zvyšují kulminační průtoky méně extrémních událostí s nižší dobou opakování (DOLEŽAL A KOL., 2003). Drenážní systémy navíc odebírají vodu z nenasycené zóny půdního profilu, kde po odeznění rychlé složky odtoku jinak ještě probíhá odtok hypodermický.

INFIL (podíl propustných, zranitelných půd na orné půdě a TTP) ještě vliv orné půdy a drenážních systémů dále umocňuje, protože velmi propustný půdní profil ve spojení s drenážními systémy vytváří dobré podmínky pro rychlé odvedení vody po srážce a brzký návrat do stavu, kdy v odtokové bilanci převládá odtok základní.

Z diagramu dále vyplývá, že v povodích s vyšším podílem lesních ploch se vyskytují kratší období BF\_MAX a rovněž méně dnů, kdy je odtok dotován pouze zásobami podzemní vody (BF\_ONLY). Les v tomto případě funguje jako tlumič (buffer) odtokových procesů. Zajímavá je také funkce lesa v období základního odtoku z hlediska kvantitativního. Na začátku období dodávají lesní porosty, díky vysoké schopnosti zadržet vodu v předešlém období a vyššímu podpovrchovému odtoku, říčnímu systému vodu. Dále v průběhu období sucha, kdy je říční systém dotován především podzemní vodou, lesní porosty naopak odebírají již tak redukováné vodní zdroje v povodí (KASPRZYK, BIERNAT, 2008).



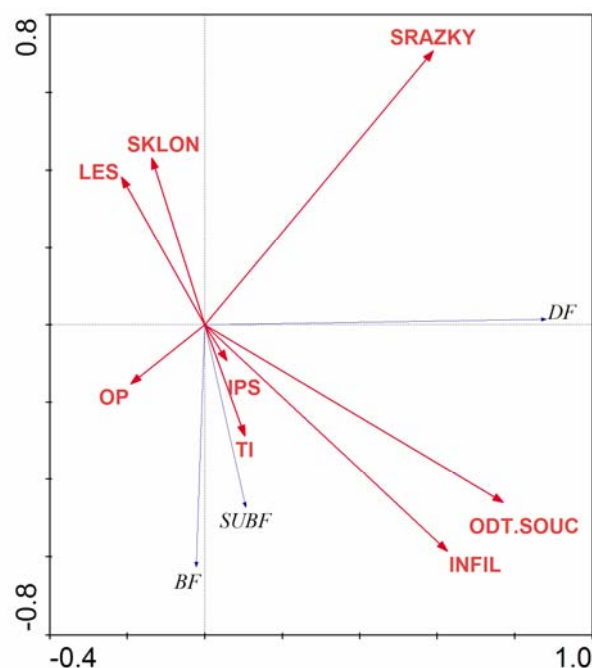
Obr. 4.15. Ordinační diagram redunční analýzy shrnující vliv parametrů povodí na jednotlivé složky odtoku - období XI.2004 - X.2006.

Na rozdíl od obr. 4.14. jsou v ordinačním diagramu v obr. 4.15. naznačeny vztahy mezi parametry povodí a kvantitativním vyjádřením jednotlivých složek odtoku (dle separace odtoku z kapitoly 4.1.2.) v rámci dlouhodobé bilance odtoku. Jednotlivé složky odtoku do analýzy vstupují tedy jako objemy v litrech za dané období 2 hydrologických let, pro možnost porovnání přepočtené na jednotku plochy (1 ha). Protože jsou složky odtoku vyjádřeny v objemových jednotkách, svírají mezi sebou poměrně ostrý úhel, tzn. zvětšuje-li se v závislosti na vodnosti povodí množství jedné složky odtoku, zvětšuje se množství i u ostatních dvou. Proto bude v této analýze věnována větší pozornost směru a délce jednotlivých vektorů parametrů povodí. Statisticky významné úrovně při otestování Monte Carlo permutačním testem dosáhly tři vztahy a to INFIL, LES a TI.

Parametr INFIL má velký vliv na DF a SUBF. Protože INFIL vyjadřuje podíl propustných, zranitelných půd na orné půdě a TTP, jedná se zde opět o vliv kombinace velmi propustného půdního profilu a drenážních systémů v případě DF, resp. v místech, kde se drenážní systémy nenacházejí o zvýšenou infiltraci vody do půdního profilu a o zvýšenou dotaci hypodermické složky odtoku v případě SUBF.

Směr vektoru podílu lesních ploch v povodí je opačný ke směru vektorů všech složek odtoku. Lesní porosty díky i) zvýšené intercepci (ovlivněná hustotou porostu a zvýšenou drsností povrchu); ii) zvýšené transpiraci (velké množství biomasy, LAI, hluboké kořenové systémy a celoroční funkce); iii) zvýšené rozrušení půdní struktury, vyšší retenční a infiltrační schopnosti snižují jak přímý, tak základní odtok (*SMAKHTIN, 2001*). Směr vektoru parametru LES je nejvíce podobný směru vektorů SUBF a DF. Jak bude patrné z dalších analýz, z dlouhodobého hlediska mají lesní porosty vliv na snížení rychlejších složek odtoku (DF a SUBF), zatímco u krátkodobých událostí je tento vliv neprůkazný.

Topografický index je morfologický parametr povodí, který vyjadřuje nasycenost prostředí (*HLAVČOVÁ A KOL., 2001*). Vyšší hodnota TI indikuje vyšší nasycenost prostředí a naopak (v literatuře viz. např. *BORWICK A KOL. (2006)*). Také v případě obr. 4.15. vektor TI potvrzuje průkazný pozitivní vliv hodnoty topografického indexu na množství základního odtoku.



Obr. 4.16. Ordinační diagram redunční analýzy shrnující vliv parametrů povodí na jednotlivé složky odtoku - vybrané srážko-odtokové události

Krátkodobý (událostní) úhel pohledu na problematiku vlivu parametrů povodí na složky odtoku vody přináší obr. 4.16. a 4.17. Pro vyhodnocení analýz byla použita data vybraných srážko-odtokových událostí podobného charakteru. Vždy se jednalo o vyšší srážkové úhrny (3 události v kategoriích 20-40 mm a 50-70 mm a 1 událost nad 100 mm - viz. obr. 3.5.), které se vyskytly v krátkém intervalu (1-3 dny) a způsobily zřetelnou vlnu na hydrografu. Podobně jako v obr. 4.15. vstupují složky odtoku do analýzy jako objemy odteklé vody v litrech na 1 hektar, zde ale sečteny za dobu trvání události. Jako doba trvání události byl vybrán časový úsek, po který trval přímý odtok. Při testování dosáhly statisticky významné úrovně následující parametry: SRAZKY, IPS, ODT.SOUC, TI, SKLON a INFIL.

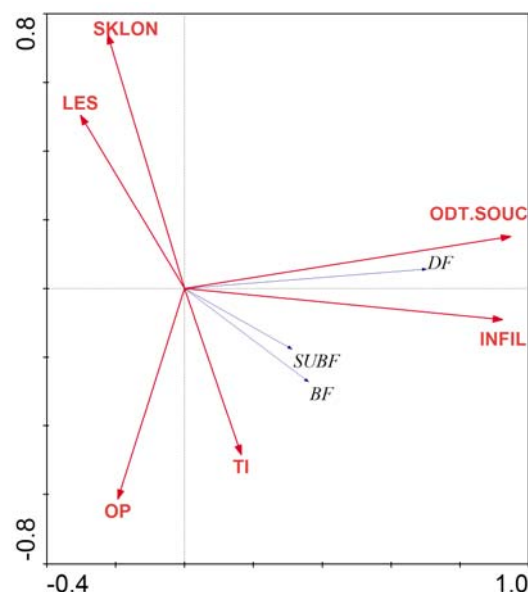
Parametry SRAZKY a IPS ukázaly, dle očekávání, na pozitivní vztah s objemem přímého odtoku (DF). Dle délky obou vektorů je zřejmé, že větší vliv než míra předchozího nasycení povodí má výška srážkového úhrnu. To může být v tomto případě způsobeno výběrem srážko-odtokových událostí, kdy dalším kritériem výběru byl požadavek, aby se v předchozím období (stanovováno pro 30 dní před událostí) vyskytlo pokud možno co nejméně srážek.

Vliv parametru TI je popsán výše u interpretace obr. 4.15. a platí u vyhodnocení jak dlouhodobých, tak i událostních bilancí. Naproti tomu vyjádření sklonitostních poměrů povodí (SKLON) má s charakteristikami odtoku vztah podepřený statistickým testem pouze



u událostí. Proto se jeví použití topografického indexu jako morfologického parametru povodí ve vztahu k odtokovým charakteristikám (především v oblasti chování podzemních vod) jako více vhodné oproti použití pouhého sklonu. Rostoucí sklonitost povodí má dle očekávání negativní vliv na množství odtoku základního a hypodermického.

Vektory parametru INFIL a ODT.SOUC (odtokový součinitel – podíl výšky odtoku a spadlých srážek) se nachází ve výseči vymezené vektory DF a BF. V této fázi analýzy vykazují vliv na všechny tři složky odtoku. Mnohorozměrná analýza v programu Canoco nabízí možnost užití kovariátů v případě, že je u některých z vysvětlujících proměnných známý a prokazatelný vliv na druhová data (LEPŠ, ŠMILAUER, 2000). V tomto případě by mezi kovariáty mohly být zahrnuty parametry, které nejvíce ovlivňují objem událostního odtoku a přitom nejsou dlouhodobou charakteristikou povodí, a to objem spadlých srážek a předchozí nasycení povodí vodou. Svou přítomností mezi vysvětlujícími proměnnými v tomto případě parametry SRAZKY a IPS vysvětlují příliš mnoho variability datového souboru. Výsledek mnohorozměrné analýzy s použitím kovariátu ukazuje ordinační diagram v obr. 4.17.



Obr. 4.17. Ordinační diagram redunční analýzy shrnující vliv jednotlivých parametrů povodí (SRAZKY a IPS použity jako kovariáty) na jednotlivé složky odtoku - vybrané srážko-odtokové události.

Po použití kovariátů SRAZKY a IPS dosáhly při otestování Monte Carlo permutačním testem statisticky významné úrovně následující parametry: ODTOK.SOUC, TI.

Vliv parametru TI byl zmíněn v popiscích k obr. 4.13. Topografický index vykazuje po použití kovariátů větší vliv na objem podzemního odtoku, čímž dále potvrzuje výše popsané tvrzení, že velmi dobře vystihuje především množství a dynamiku podzemní vody.

Součinitel odtoku udává, kolik procent vody spadlé ve srážkách z povodí odtéká, přičemž čím vyšší hodnota, tím lze území charakterizovat jako území s nižší jímavostí. Společná poloha vektorů ODT.SOUC a DF tedy dobře koresponduje s tímto tvrzením. Vysoký podíl přímého odtoku odvádí velké množství událostní vody rychle z povodí a zanechává na povodí méně vody pro následné procesy.

Velmi důležité je potvrzení správnosti vymezení ploch infiltrační kategorie I a II. dle metodiky *JANGLOVÁ A KOL (2003)*, kterou se na základě kódu BPEJ vymezují zranitelné oblasti z hlediska kontaminace povrchových a podpovrchových vod živinami. Vektor takto vymezených ploch se při mnohonásobné analýze vždy nalézá v úzké výseči vymezené vektory přímého a hypodermického odtoku, i když statisticky významné úrovně dosáhl pouze při analýze dlouhodobé bilance a při velkých až extrémních srážko-odtokových je jeho vliv potlačen. Toto nebylo dosud studiem odtoků z jednotlivých mikropovodí prokázáno.

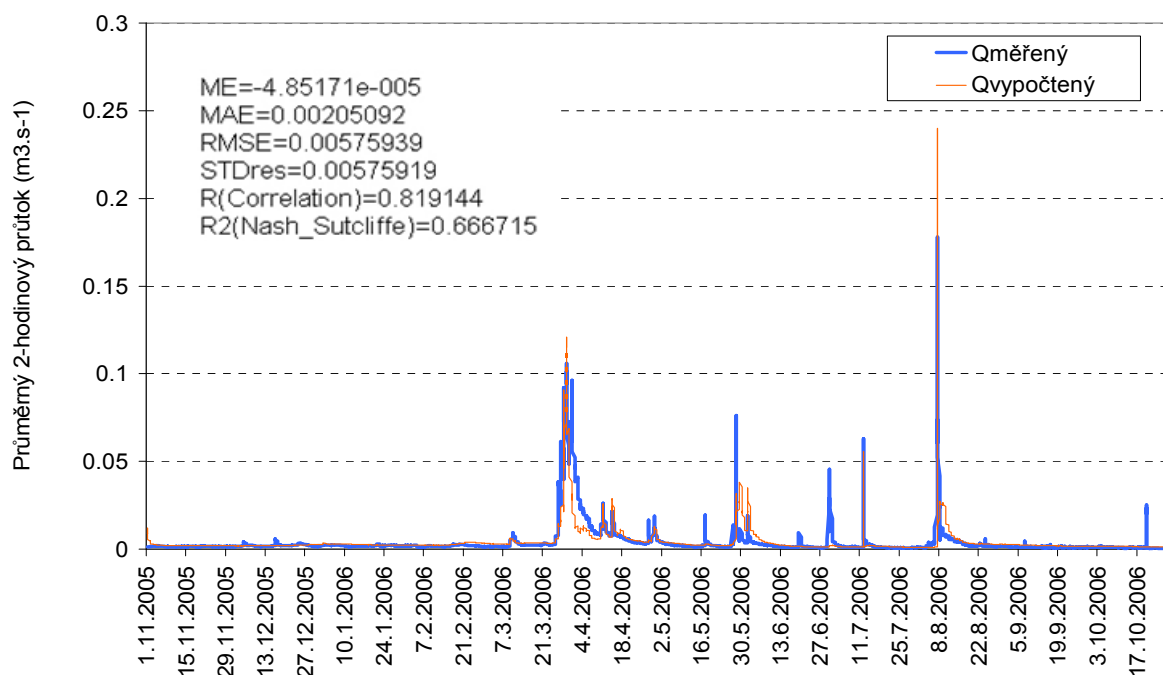
## 4.2. MODELOVÁNÍ POMOCÍ MIKE SHE

Jak již bylo naznačeno v kapitole 3.2.3. sestavený model byl nejdříve otestován na hrubé chyby. Po prvotní úpravě nastavení modelu byly použity pro kalibraci následující parametry:

1. horizontální a vertikální hydraulická vodivost v nasycené zóně - vodivosti v nasycené zóně byly nakonec po hrubém otestování voleny jednotně pro celé povodí v intervalu  $1.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  až  $1e-06 \text{ m.s}^{-1}$ , konečná hodnota použitá pro simulování scénářů byla zvolena  $2e-05 \text{ m.s}^{-1}$ ,
2. nasycená hydraulická vodivost v nenasycené zóně – také počet horizontů nenasycené zóny byl po hrubém otestování redukován ze 4 na 2 s mocností 0.2m (A) a 2.8m (B), konečné hodnoty použité pro simulování scénářů byly zvoleny pro horizont A  $5e-06 \text{ m.s}^{-1}$  a pro horizont B  $8e-07 \text{ m.s}^{-1}$ ,
3. drainage time constant – její hodnota ovlivňuje především tvar sestupné větve, konečná hodnota použitá pro simulování scénářů byla zvolena  $2e-06 \text{ m.s}^{-1}$ ,
4. bypass – rychlé preferenční proudění makropóry přímo do nasycené zóny. Vymezuje kolik procent efektivního srážkového úhrnu proteče preferenčními cestami do nasycené zóny. Proudění makropóry je nejvyšší za plného nasycení půdního profilu vodou, jako prahové hodnoty pF tlaku pro tento druh proudění byly z retenčních křivek odhadnuty hodnoty 0,34 až 0,43. Konečná hodnota procentuálního podílu pro simulování scénářů byla zvolena 20 %.

### Výsledky kalibrace

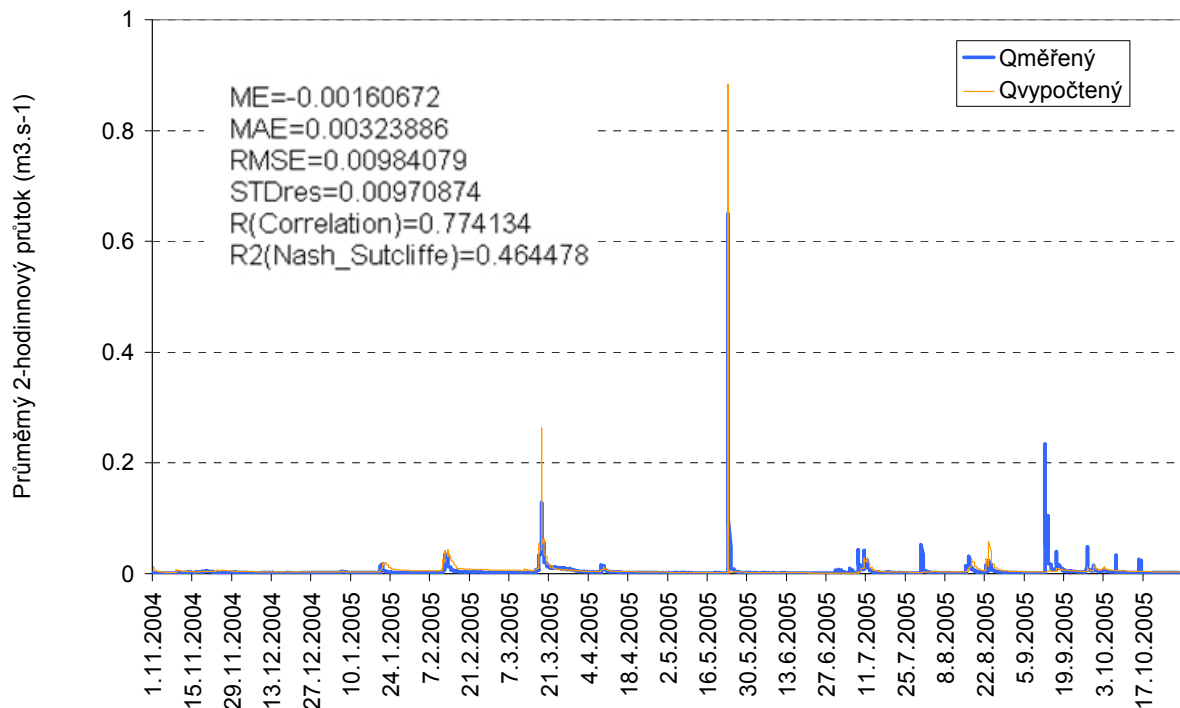
Výše popsané konečné nastavení vykazalo při poslední simulaci kalibrace následující statistické charakteristiky:  $R^2$  (Nash-Sutcliffe) = 0,66, ME = - 0.05  $\text{l.s}^{-1}$ . Obr. 4.18 ukazuje jak průběh měřených a vypočtených průtoků, tak v tabulce i všechny statistické charakteristiky, které model MIKE SHE sám v rámci simulace počítá. Nash\_Sutcliffeův koeficient determinance dosáhl hodnoty 0,66, která již znamená poměrně dobrou shodu s měřenými hodnotami.. Hodnota tohoto koeficientu je velmi závislá na odchylkách vypočtených hodnot od naměřených při povodňových stavech. V srpnu 2006 se na povodí vyskytla povodňová situace, kterou model při simulaci podstatně nadhodnotil (o 62  $\text{l.s}^{-1}$ ). Model MIKE SHE spočetl hodnotu průměrné odchylky (vzorec obsahuje vztah „Qobs-Qcalc“) na -0.05  $\text{l.s}^{-1}$ . Záporná hodnota ukazuje, že model oproti skutečnosti nepatrně podhodnocuje.



Obr. 4.18. Průběh měřených a simulovaných průtoků v profilu P52 a statistické charakteristiky simulace, kterou byla ukončena kalibrace

### Výsledky validace

Nastavení modelu bylo validováno na datech hydrologického roku 2005. Při validaci dosáhl model následujících statistických charakteristik:  $R_2$  (Nash-Sutcliffe) = 0,46,  $ME = -1 \text{ l.s}^{-1}$ . Vypočtená data se od naměřených liší především v oblasti velmi vysokých průtoků. V květnu 2005 se na některých místech povodí Kopaninského toku vyskytly denní srážkové úhrny dosahující až 100 mm. V oblasti mikropovodí P52 byla naměřena hodnota přibližně o třetinu nižší, ale i přesto model na tento úhrn zareagoval velmi citlivě a vypočítal výrazně vyšší kulminační průtok. Na druhou stranu model na některé menší srážkové úhrny (např. září 2005) téměř nezareagoval. Průběh měřených a vypočtených průtoků a všechny statistické charakteristiky, které model MIKE SHE sám v rámci simulace počítá, jsou znázorněny v obr. 4.19. Hodnoty obou charakteristik ( $R_2$  i  $ME$ ) jsou nižší než u kalibrace. Potvrdil se předpoklad, že kalibrací určené hodnoty parametrů odpovídají lépe kalibračnímu období. Pro jiné období, díky jiným podmínkám prostředí před a při událostech, již model nevystihuje hydrologickou odezvu povodí na srážkový úhrn natolik přesvědčivě, nicméně vzhledem k délce období, podrobným datům a zjednodušené schematizaci lze z hlediska využitelnosti modelu pro danou úlohu považovat dosažené hodnoty statických veličin hodnocení shody modelu s měřením za uspokojivé



Obr. 4.19. Průběh měřených a simulovaných průtoků v profilu P52 a statistické charakteristiky simulace, kterou bylo nastavení modelu validováno.

### Vliv scénářů uspořádání krajinné matrice na složky odtoku

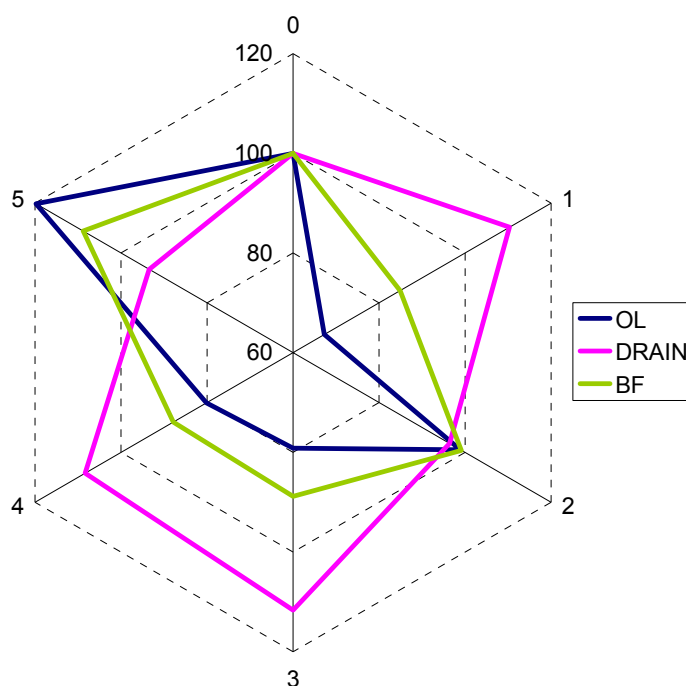
Úvodem je třeba říci, že model MIKE SHE nehodnotí složky odtoku z hlediska rychlosti odezvy na srážku. Jednotlivé složky odtoku jsou zde hodnoceny podle místa, odkud voda do toku proudí. Povrchový odtok (OL) je tedy v tomto případě opravdu odtok povrchový, nikoliv přímý. Odtok označovaný jako DRAIN je odtokem z nenasycené zóny definovanou vrstvou půdního profilu. V místech kde se nachází drenážní systémy je hloubka této vrstvy nastavena na hloubku uložení drenážních systémů, v ostatních místech povodí je nastavena na 10 cm pod povrchem. Odtok podzemní (BF) je pak čistě odtokem podzemní vody v nasycené zóně půdního profilu.

Z výsledků tab. 4.7. je patrné, že nejvyšší úhrn evapotranspirace (ET) 569 mm za hydrologický rok 2006 vykázala varianta 2, kde je navrženo největší procentuální zastoupení lesních porostů. Nejnižší naopak varianta 3 s nejnižším zastoupením lesních porostů na povodí. To odpovídá celoročně vyššímu evapotranspiračnímu potenciálu lesních porostů. Celkový odtok naopak logicky s vyšším zastoupením lesních porostů, v souladu s výsledky předešlých kapitol, klesá. Nejvyšší maximální průtok

Tab. 4.7. Procentuální změny jednotlivých složek bilance vody v povodí P52 při simulaci scénářů 0 až 5 - hodnota jednotlivých složek v mm při scénáři 0 (současný stav) představuje 100%.

	<b>ET</b>	<b>Q</b>	<b>OL</b>	<b>DRAIN</b>	<b>BF</b>
<b>0</b>	100	100	100	100	100
<b>1</b>	98	103	67	110	85
<b>2</b>	102	97	99	96	99
<b>3</b>	97	105	79	112	89
<b>4</b>	99	103	80	108	88
<b>5</b>	98	101	120	93	109

Z hlediska vlivu uspořádání krajinné matrice na složky odtoku vody se v současném stavu zadání jednotlivých scénářů jednoznačně nejvíce projevuje plošná míra zastoupení drenážních systémů na povodí. Ta byla, jak již bylo napsáno v kapitole 3.2.3. navržena tak, aby byl alespoň přibližně poměrně zachován stávající procentuální podíl ploch orné půdy odvodněných drenážními systémy. Odvodnění bylo však navrhováno pouze v místech, kde morfologické podmínky terénu nasvědčovaly možnému výskytu zamokření. Při celkové bilanci složek odtoku měl právě tento faktor největší vliv. Pokud se do nastavení modelu drenážní systémy nezadaly, pohyboval se rozdíl u jednotlivých složek odtoku při různých variantách v řádu desetin procenta.



Obr. 4.20. Procentuální změny jednotlivých složek odtoku vody v povodí P52 při simulaci scénářů 0 až 5 - hodnota jednotlivých složek odtoku v mm při scénáři 0 (současný stav) představuje 100%.

### **4.3. SOUHRN PŮVODNÍCH VÝSLEDKŮ**

**Z jednotlivých výše uvedených kapitol věnujícím se výsledkům práce lze pro oblast krystalinika Pelhřimovské vrchoviny formulovat tyto původní výsledky:**

1. Lesní mikropovodí z hlediska celkového odtoku za sledované období 2005 - 2007 vykazuje:
  - a. nejnižší maximální specifický odtok,
  - b. nejvyrovnanější průtoky (nejnižší koeficient variace + vyrovnaná empirická čára překročení průtoků s nižšími maximálními a vyššími minimálními průtoky),
  - c. nejnižší odtokový součinitel.
2. Mikropovodí, které má jako jediné na své ploše jednak významnější aglomeraci (obec Útěchovičky – 60 obyvatel), ale rovněž jako na jediném povodí více než 2 % celkového povrchu tvoří vodní plochy (rybník v blízkosti uzávěrového profilu) překvapivě vykazuje:
  - a. nejvyšší maximální specifický odtok,
  - b. nejvyšší odtokový součinitel.
3. Mikropovodí s ornou půdou a drenážními systémy ve sledovaném období 2005-2007 pouze jako jediné vykázalo i nulový průtok.
4. Separační metoda GROUND (vytvořena primárně pro malá povodí v ČR) a Chapmanův digitální filtr (rovněž upraven pro místní podmínky) se po validaci dalšími metodami ukazují jako vhodné, dostatečně přesné a na vstupní data nenáročné metody.
5. Potvrdilo se, že Killeho metoda oproti ostatním metodám mírně nadhodnocuje příspěvek základního odtoku.
6. Podíl základního odtoku je nepřímo úměrný množství spadlých srážek v povodí a velikosti průtoků. Poměr jednotlivých složek odtoku je závislý na vyhodnocovaném období. V rámci jednoho povodí činil rozdíl podílu základního odtoku na celkovém mezi srážkově bohatým a chudým obdobím 14 %.

7. Na dlouhodobou bilanci složek odtoku vody má vliv jak využití území (LES, OP), tak faktor morfologický (TI) a faktor propustnosti půdního profilu (INFIL).
8. Při středně velkých až extrémních srážko-odtokových událostech je vliv využití půdy potlačen na úkor meteorologických (SRAZKY, IPS) a morfologických parametrů (TI, SKLON).
9. Odtok vody je v povodích s vyšším podílem odvodněné orné půdy spíše urychlen, především vlivem podchycených pramenných vývěřů.
10. Lesní porosty jednak zkracují dobu trvání výskytu základního odtoku, jednak v dlouhodobé bilanci kvantitativně snižují objem přímého odtoku.
11. Topografický index velmi dobře vystihuje chování podzemních vod.
12. Přítomnost nejpropustnějších a nejzranitelnějších ploch na povodí (I. a II. kategorie infiltrační kapacity) ovlivňuje především přímou a hypodermickou složku odtoku.
13. Použití mnohorozměrné analýzy se ukazuje jako velice užitečné při řešení podobné analýzy vztahu více vysvětlovaných proměnných a více vysvětlujících proměnných.
14. Při modelování různých scénářů uspořádání krajinné matrice nebyl u výsledován žádný významný vliv, jen byl opět potvrzen vliv drenážních soustav na složky odtoku vody.



## 5. ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na vyhodnocení vlivu parametrů povodí na jednotlivé složky odtoku. Problematika byla studována na povodí Kopaninského toku. Zkoumané povodí se nachází v oblasti krystalinika a v této práci popsané výsledky a závěry jsou proto platné primárně pro tuto oblast. Kombinací použitých metod zpracování a vyhodnocení dat se projevily vlivy různých parametrů povodí na různé složky odtoku při zohlednění různého časového přístupu. Dohromady tak tato práce posloužila k poznání zákonitosti chování pohybu vody v povodí.

Prokázalo se, že očekávání laické veřejnosti a mnoha ekologů, že lze pomocí změn ve využívání území významně ovlivňovat maximální průtoky je nerealistické.

Velice důležité je potvrzení významného vlivu zranitelných (zdrojových) lokalit na složky odtoku. Tyto lokality zvyšují podíl rychlých složek odtoku vody (přímý a hypodermický odtok). Tato rychle proudící voda je často kontaminována aplikovanými zemědělskými živinami a prostředky na ochranu rostlin. Výsledky prokázaly, že infiltračním oblastem povodí musí být věnována zvýšená pozornost s ohledem na velikost odtoku a kontaminaci vody. Tuto skutečnost lze promítnout do přípravy projektování ochranných pásem vodárenských nádrží a i do Plánů oblasti povodí. Zahrnout lze tyto poznatky i do Nitrátové směrnice vyjádřené v Akčních programech a Nařízeních vlády k této problematice a při řešení Rámcové směrnice o vodách.

## 6. SEZNAM LITERATURY

1. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
2. Andersen, J., Refsgaard, J.C., Jensen, K.H. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin – model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247, 2001, s. 200–214.
3. Aryal, S.K., Bates. B.C. Effects of catchment discretization on topographic index distributions. *Journal of Hydrology*, 359 (1-2), 2008, s. 150-163.
4. Bates, B.C., Davies, P.K. Effect of baseflow separation procedures on surface runoff models. *Journal of Hydrology*, 103, 1988, s. 309-322.
5. Beven, J., Kirkby, M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24 (1), 1979, s. 43-69.
6. Bogena, H., Kunkel, R., Schöbel, T., Schrey, H.P., Wendland, F. Distributed modeling of groundwater recharge at the macroscale. *Ecological Modelling*, 187 (1), 2005, s. 15-26.
7. Borwick, J., Buttle, J., Ridgway, M.S. A topographic index approach for identifying groundwater habitat of young-of-year brook trout (*Salvelinus fontinalis*) in the land–lake ecotone. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63 (1), 2006, s. 239-253.
8. Bosch, J.M., Hewlett, J.B. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 (1-4), 1982, s. 3-23.

9. Brown, M.J. Use of stream chemistry to estimate hydrologic parameters. *Water Resources Research*, 22, 1986, s. 805-811.
10. Brun, S.E., Band, L.E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24 (1), 2000, s. 5-22.
11. Brutsaert, W. *Hydrology: An introduction*. Cambridge University Press, 2005, 605 s.
12. Buchtele, J., Hladný, J.: K metodologii předpovědi odtoku v období sucha. *Vodohospodářský časopis SAV*, č.4-5, sv. 23, Bratislava, 1975.
13. Buttle, J.M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography*, 1994, s. 16-41.
14. Buttle, J.M., Vonk, A.M., Tayllor, Ch. Applicability of isotopic hydrograph separation in a suburban basin during snowmelt. *Hydrological processes* 9 (2), 1995, s. 197-211.
15. Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., Schulze, E-D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108, 1996, s. 583-595.
16. Carey, S.K., Quinton, W.L. Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpine catchment. *Hydrological processes* 19 (1), 2005, s. 95-114.
17. Císlerová, M. *Inženýrská hydrogeologie*, ČVUT Praha, Praha, 1989, 125 s.
18. ČSN 736530 *Vodní hospodářství. Názvosloví hydrologie*. Československá státní norma. Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 1984, 92 s.
19. Daňhelka, J. *Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí*. Sborník prací ČHMÚ, Praha, 2007, 104 s.

20. Daňhelka, J., Krejčí, J., Šálek, M., Šercl, P., Zezulák, J. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU Praha, Praha, 2002, 214 s.
21. Demek, J. Úvod do krajinné ekologie. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 1999, 102 s.
22. Demek, J. Zeměpisný lexikon ČSR, Hory a nížiny. Academia, Praha, 1987, 584 s.
23. Demuth, S., Hagemann, J. Case study of regionalising base flow in SW Germany applying a hydrogeological index. Flow Regimes from International and Network Data (FRIEND), Hydrological studies, (1), 1993, s. 86-98.
24. Dijkema, R., van Lanen, H.A.J., Aalders, P. Variable groundwater catchment size in an area with deep water tables. ERB/FRIEND Conference - Interdisciplinary approaches in small Catchment Hydrology: Monitoring and research, Demänovská dolina, Slovensko, 2002, s. 111-115.
25. Doležal, F., Kvítek, T. 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, 29 (11-12), 2004, s. 775-785.
26. Doležal, F., Kulhavý, Z., Kvítek, T., Soukup, M., Tipl, M. Methods of runoff separation applied to small stream and tile drainage runoff. ERB/FRIEND Conference - Interdisciplinary approaches in small Catchment Hydrology: Monitoring and research, Demänovská dolina, Slovensko, 2002, s. 131-136.
27. Doležal, F., Soukup, M., Kulhavý, Z. Bilanční odhady příspěvku odvodňovacích soustav k průběhu povodní. I. Teorie Soil and Water 2/2003, vědecké práce VÚMOP Praha, Praha, 2003, s. 7-19.

28. Doležal, F., Soukup, M., Kulhavý, Z. Bilanční odhady příspěvku odvodňovacích soustav k průběhu povodní. II. Aplikace Soil and Water 3/2003, vědecké práce VÚMOP Praha, Praha, 2003, s. 93-108.
29. Eckhardt, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, 352 (1-2), 2008, s. 168-173.
30. Eckhardt, K., Breuer, L., Frede, H.G. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *Journal of Hydrology*, 273 (1-4), 2003, s. 164-176.
31. Edoka, N.P. Influence of leaf area development of early and mid-early maturity varieties of silage maize on dry matter yield and forage quality. Dissertation, 2006. (in electronic)
32. Eichler, J., Soukup, M., Pilná, E. Využití DMT při návrhu retardace podzemního drenážního odtoku. *Sborník GIS Seč 2000*, Seč, 2000, s. 57-63.
33. Eschenbach, C., Kappen, L. Leaf area index determination in an alder forest: a comparison of three methods. *Journal of Experimental Botany*, 47 (302), 1996, s. 1457-1462.
34. Federer, C.A. Forest transpiration greatly speeds streamflow recession. *Water Resources Research* 9, 1973, s. 1599 - 1604.
35. Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K., Frede, H.G. Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26 (7-8), 2001, s. 577-582.
36. Forman, T.T., Godron, M. *Krajinná ekologie*. Academia Praha, Praha, 1993, 572 s.
37. Frederickson, G.C., Criss, R.E. Isotope hydrology and residence times of the unimpounded Meramec River Basin, Missouri, *Chemical geology*, 157 (3-4), 1999, s. 303-317.

38. Frölich, K., Frölich, W., Wittenberg, H. Determination of groundwater recharge by baseflow separation: regional analysis in northeast China. IAHS Publ., 221, 1994, s. 69-75.
39. Gibson, J.J., Price, J.S., Aravena, R., Fitzgerald, D.F., Maloney, D. Runoff generation in a hypermaritime bog-forest upland. Hydrological processes 14 (15), 2000, s. 2771-2730.
40. Grayson, B.R., Argent, R.M., Nathan, J.R., McMahon, T.A., Mein, R.G. Hydrological recipes: estimation techniques in Australian hydrology. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1996, 125 s.
41. Haberlandt, U., Klöcking, B., Krysanova, V., Becker A. Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components - a case study in the Elbe River Basin. Journal of Hydrology, 248 (1-4), 2001, s. 35-53.
42. Halford, K.J., Mayer, G.C. Problems associated with estimating groundwater discharge and recharge from streamdischarge records. Ground Water, 38 (3), 2000, s. 331-342.
43. Haverkamp, S., Fohrer, N., Frede, H.G. Assessment of the effect of land use patterns on hydrologic landscape functions: a comprehensive GIS-based tool to minimize model uncertainty resulting from spatial aggregation. Hydrological Processes 19, 2005, s. 715-727.
44. Holko, L., Herrmann, A., Schöniger, M., Schumann, S. Groundwater runoff in a small mountainous basin: testing a separation method based on groundwater table and discharge measurements. Conference on "Monitoring and Modelling Catchment Water Quantity and Quality", Ghent, Belgium, 2000, s. 37-44.
45. Hornbeck, J.W., Adams, B.M., Corbett, E.S., Verry E.S., Lynnch, P.J. Long-term impacts of forest treatment on water yield: a summary for northern USA. Journal of Hydrology, 150, 1993, s. 323-344.

46. Hrádek, F., Kuřík, P. Hydrologie, Skriptum FLE ČZU Praha, 2002, 280 s.
47. Hrádek, F. Výpočet odtoku vody z malých povodí. Voda v krajině, Kutná Hora, 1998, s.69-79.
48. Chapman, T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrological Processes 13, 1999, s. 701-714.
49. Jain, S.K. Evaluation of catchment strategies by modeling soil erosion/water quality in EPIC supported by GIS. M.Sc. thesis, Galway: National University of Ireland, Department of Engineering Hydrology, 1997.
50. Janglová, R., Kvítek, T., Novák, P. Categorization of soil infiltration capacity based on GIS processing of soil survey data. Soil Water 2, 2003, s. 61-81.
51. Jeníček, M. Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. In Langhammer, J (ed.): Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko. PřF UK, Praha. 2005, s. 112-126.
52. Jenkins, A., Ferrier, R.C., Harriman, R., Ogunkoya, Y.O. A case study in catchment hydrochemistry: Conflicting interpretations from hydrological and chemical observations. Hydrological Processes, 8, 1994, s. 335-349.
53. Jordan, T.E., Correll, D.L., Weller, D.E. Relating nutrient discharges from watersheds to land use and streamflow variability. Water Resources Research, 33, 1997, 2579 s.
54. Jůva, K., Klečka, A., Zachar, D. a kolektiv. Ochrana krajiny ČSSR z hlediska zemědělství a lesnictví. Academia Praha, 1981, 543 s.
55. Kantor, P. Lesy a povodně. Souhrnná studie. MŽP, Praha, 2003, 48 s.

56. Kaňok, J. Antropogenní ovlivnění velikosti průtoků řek povodní Odry po profil Kožle. Spisy prací přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity, Ostravská univerzita, č. 103, 1997, 188 s.
57. Kasprzyk, A., Biernat, T. Influence of land use on low flows formation (case study of two small catchments at the Malopolska upland). XII. Biennial International Conference: Hydrological extremes in small basins, Krakow, 2008, s. 173-175.
58. Kessler, J., Kněžek, M. Pozorovací síť podzemních vod ve vztahu k metodám vyhodnocování režimních dat. In: Hydrologické dny. Nové podněty a vize pro příští století. Plzeň, 2000, s. 65-68.
59. Kessler, J., Kněžek, M. Současný stav a rozvoj pozorování podzemních vod. In: XI. národní hydrogeologický kongres. Ostrava, 2001, s. 31-34.
60. Kille, K. Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, Sonderheft Hydrogeologie und Hydrogeochemie, 1970, s. 89-95 In: Doležal, F., Kvítek, T. 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, 29 (11-12), 2004, s. 775-785.
61. Kliner, K., Kněžek, M. Metoda separace podzemního odtoku při využití pozorování hladiny podzemní vody. Vodohospodářský časopis, 1974, 22 (5), s. 457-466.
62. Klöcking, B., Haberlandt, U. Impact of land use changes on water dynamics - a case study in temperate meso and macroscale river basins. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 27 (9-10), 2002, s. 619-629.
63. Kněžek, M. Podzemní složka odtoku. VÚV, Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 1988, 62 s.



64. Kněžek, M., Kessler, J. Metody výpočtu základního odtoku. In: Hydrologické dny. Nové podněty a vize pro příští století. Plzeň, 2000, s. 337-3463.
65. Kostrej, A., Danko, J., Jureková, Z., Zima, M., Gáborčík, N., Vidovič, J. Ekofyziológia produkčného procesu porastu a plodín. SPU v Nitre, 1998, 187 s.
66. Kovář, P. Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. ČZU Praha, Praha, 2000, 136 s.
67. Kovář, P. The extent of land use impact on water regime. Plant, soil and environment, No. 6, 2006, s. 239-244.
68. Kožnarová, V., Klabzuba, J. Doporučení WMO pro popis meteorologických, resp. klimatologických podmínek definovaného období. Rostlinná výroba, 48(4):, 2002, s. 190-192.
69. Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences 5, 2005, s. 83 - 87.
70. Krejčová, D. Vyčleňování základního odtoku separací hydrogramu pomocí průměrných výtokových čar. Zpráva ČHMÚ, Brno, 1990.
71. Krešl, J. Hydrologie. MZLU Brno, Brno, 2001, 128 s.
72. Krešl, J. Vliv lesa na utváření odtoku při přívalových a dlouhotrvajících deštích. Lesnická práce, 78, 1999, s. 501-503.
73. Kristensen, K.J., Jensen, S.E. A model of estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. Nordic Hydrology 6, 1975, s. 170-188.
74. Kulhavý, Z., Čmelík, M., Kvítek, T., Soukup, M., Tipl, M. Extrémní průtoky v pokusných povodích a pravděpodobnost jejich výskytu. Sborník workshopu „Pokusná zemědělsko-lesní povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku“, Nové Hradky 2001, 2002, 96 s.

75. Kulhavý, Z., Doležal, F., Soukup, M. Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů. Vědecké práce VÚMOP, Praha, 2001, s. 29-52.
76. Kulhavý, Z., Soukup, M., Doležal, F., Čmelík, M. Zemědělské odvodnění drenáží - Racionalizace využívání, údržby a oprav. VUMOP Praha, 2007, 86 s.
77. Kunkel, R., Wendland, F. The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins - the river Elbe case study. *Journal of Hydrology*, 259 (1-4), 2002, s. 152-162.
78. Kunkle, G.R. Computation of ground water discharge to streams during floods, or to individual reaches during base flow by use of specific conductance. USGS Prof. Pap., 525-D, 1965, s. 207-210.
79. Kuřík, P., Hydrologie. Rozšířené sylaby vybraných kapitol pro kombinované (dálkové studium), ČZU Praha, 2001. Zdroj: [www.sweb.cz/kurik.petr/hydrologie.html](http://www.sweb.cz/kurik.petr/hydrologie.html) (in electronic).
80. Květ, J., Nečas, J., Ondok, J.P. Metody růstové analýzy (studijní zpráva). Ústav vědeckotechnických informací, Praha, 1971, 112 s.
81. Lacey, G.C., Grayson, R.B. Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 204 (1-4), 1998, s. 231-250.
82. Langbein, W.B., Dawdy, D.R. Occurrence of dissolved solids and river flow. *Water Resources Research*, 12, 1976.
83. Lepš, J., Šmilauer, P. Mnohorozměrná analýza ekologických dat. Biologická fakulta JU, České Budějovice, 2000, 102 s.

84. Lesack, L.F.W. Export of nutrients and major ionic solutes from a rain forest catchment in the central Amazon basin. *Water Resources Research*, 29, 1993, s. 743-758.
85. Li-COR, LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Li-COR Biosciences, Inc., Lincoln, Nebraska, USA, 1992, s.178.
86. Lin, Y., Hong, N., Wu, P., Wu, Ch., Verburg, P.H. Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 80 (1-2), 2007, s. 111-126.
87. Liu, H.-L., Chen, X., Bao, A.-M., Wang, L. Investigation of groundwater response to overland flow and topography using a coupled MIKE SHE/MIKE 11 modeling system for an arid watershed. *Journal of Hydrology*, 347 (3-4), 30, 2007, s. 448-459.
88. Lyne, V., Hollick, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. I.E. Aust. Natl. Conf. Publ. 79/10, Canberra, 1979, s. 89-91.
89. Marková, I., Janouš, D. Radiační bilance mladého smrkového porostu. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed.): XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě, 2002, s. 290-296.
90. Mašát, K., Němeček, J., Tomiška, Z. Metodika vymezení a mapování bonitovaných půdně ekologických jednotek. VÚMOP Praha, Praha, 2002, 113 s.
91. Mendel, O., Pekárová, P. Simulation of nitrate concentrations in surface water on the basis of discharge changes. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 37, 1989, s. 494-507.
92. Mihálik, F., Kajan, J. Groundwater runoff in the mountainous areas of Slovakia and its relations to precipitation and hydrogeological conditions. *Hydrology of Mountainous Areas. Proceedings of the Štrbské Pleso Workshop, Czechoslovakia, IAHS Publ. no. 190, 1990, s. 313-327.*

93. Michal, I. Ekologická stabilita. Veronica, Brno, 1992, 276 s.
94. Mimrová, K. Hodnocení oběhu vody z hlediska krajinné ekologie v malém zemědělském povodí. Sborník semináře Hydrologická bilance a možnosti zvyšování složek retence a akumulace vody, KBÚK LF ČZU Praha, 1998, s. 126-128.
95. Mosley, M.P., McKerchar, A.I. Streamflow. Chapter 8 In: Maidment, D.R. (ed.): Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New York, 1993, 1424 s.
96. Müller, K., Deurer, M., Hartmann, H., Bach, M., Spiteller, M., Frede, H.-G. Hydrological characterisation of pesticide loads using hydrograph separation at different scales in a German catchment. Journal of Hydrology, 273 (1-4), 2003, s. 1-17.
97. Naef, F., Scherrer, S., Weiler, M. A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. Journal of Hydrology, 267 (1-2), 2002, s. 74-79.
98. Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10, 1970, s. 282-290. In: Weglarczyk, S. The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. Journal of Hydrology, 206 (1-2), 1998, s. 98-103.
99. Neff, B.P., Day, S.M., Piggott, A.R., Fuller, L.M. Base Flow in the Great Lakes Basin. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5217, 2005, 23 s.
100. Novák, V. Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie ved, Bratislava, 1995, 253 s.
101. Nunes, J.P., de Lima, J.L.M.P., Singh, V.P., de Lima, M.I.P., Vieira, G.N. Numerical modeling of surface runoff and erosion due to moving rainstorms at the drainage basin scale. Journal of Hydrology, 330 (3-4), 2006, s. 709-720.

102. Odum, E.P. Prinzipien der Ökologie: Lebensräume, Stoffkreisläufe, Wachstumsgrenzen, Překlad: Grein S., Spektrum – der- Wissenschaft – Verlagsgesellschaft, Heidelberg 1991, 296 s.
103. Pekárová, P., Pekár, J. The impact of land use on stream water quality in Slovakia. *Journal of Hydrology*, 180 (1-4), 1996, s. 333-350.
104. Peters, D.L., Prowse, T.D. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Processes*, 15 (16), 2001, s. 3181-3194.
105. Peters, E., van Lanen, H.A.J. New method for base flow separation based on heads - illustrated in the Pang catchment (UK). *Geophysical Research Abstracts*, 5, 2003, Abstract no. 5525.
106. Petr, J., Černý, V., Hruška, L. Tvorba výnosu hlavních polních plodin. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 1980, 448 s.
107. Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L., Shirmohammadi, A. Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D.R. (ed.), *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York, 1993, 1424 s.
108. Refsgaard, J.C. Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198 (1-4), 1997, s. 69-97.
109. Reining, E. Leaf area index as non-destructive indicator of the development of cereals. Department of Land Use Systems and Landscape Ecology, Reining, 2002. (in electronic)
110. Robinson, M. Impact of improved land drainage on river flows. Report No. 113, Wallingford (UK): Institute of Hydrology, 1990, 226 s.
111. Robson, A.J., Whitehead, P.G., Johnson, R.C. An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhiddar catchments. *Journal of Hydrology*, 145 (3-4), 1993, s. 357-370.

112. Rosset, M., Riedo, M., Grub, A., Geissmann, M., Fuhrer, J. Seasonal variation in radiation and energy balances of permanent pastures at different altitudes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86, 1997, s. 245-258.
113. Rowe, L.K. Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 66 (1-4), 1983, s. 143-158.
114. Semorádová, E. *Ekologie krajiny*. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Ústí nad Labem, 1998, 116 s.
115. Serrano, E.S. *Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals*, HydroScience Inc. Lexington, Kentucky, 1997, 468 s.
116. Shuttleworth, W.J. Evaporation. In Maidment, D.R. (ed.), *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill Inc., New York, 1993, 1424 s.
117. Schilling, K.E. Relation of baseflow to row crop intensity in Iowa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105 (1-2), 2004, s. 433-438.
118. Schilling, K.E., Libra, R.D. Increased baseflow in Iowa over the second half of the 20th century. *Journal of the American Water Resources Association*, 39 (4), 2003, s. 851-860.
119. Schwarze, R., Herrmann, A., Mendel, O. Regionalization of runoff components for Central European basins. *IAHS Publ. no. 221*, 1994, s. 493-502.
120. Singh, P., Singh, V.P. *Snow and glacier hydrology*. Kluwer Academic Publishers, UK, 2001, 742 s.
121. Siriwardena, L., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 326 (1-4), 2006, s. 199-214.

122. Sklenička, P. Základy krajinného plánování. Naděžda Skleničková, Praha, 2003, 321 s.
123. Slepíčka, F., Sarga, K., Anton, Z. Moderní hydrologické metody pro hydrogeologické testování a bilancování, Praha, MON, 1989, 317 s.
124. Smakhtin, V.U. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology, 240, 2001, s. 147-186.
125. Smith, L., Wheatcraft, S.W. Groundwater flow. Chapter 6 In: Maidment, D.R. (ed.): Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New York, 1993, 1424 s.
126. Soukup, M., Kulhavý, Z., Pilná, E., Mimrová, K., Eichler, J. Opatření pro regulaci odtoku v zemědělsky využívaném povodí. METODIKA 26/2001, VÚMOP Praha, 2001, 51 s.
127. Stehlík, J. Současný stav metodologie poklesové fáze odtoku. ČHMÚ Praha, Praha, 1998, 27 s.
128. Svazek 32 Národního klimatického programu: Zpřesnění scénářů projekce klimatické změny na území České republiky a odhadů projekce klimatické změny na hydrologický režim, sektor zemědělství, sektor lesního hospodářství a na lidské zdraví v ČR, Praha, 2002. 151 s.
129. Štulc, M., Götz, A. Krajina a životní prostředí pohledem geografie, Český ekologický ústav, Praha, 1993, 90 s.
130. Tallaksen, L.M. A review of baseflow recession analysis. Journal of Hydrology, 165 (1-4), 1995, s. 349-370.
131. Tachecí, P. Hydrologický režim malého horského povodí a odhad účinků změny porostu. Doktorská disertační práce, ČVUT Praha, 2002, s. 133.

132. Ter Braak, C.J.F., Šmilauer P. Canoco Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca, USA, 2002, 550 s.
133. Tesař, M., Šír, M., Harčarik, J. Vodní režim v Krkonoších. Krkonoše, Jizerské hory, měsíčník o přírodě a lidech 10/2005, 2005, s. 18-19.
134. Thompson, J.R., Sørensen, H.R., Gavin, H., Refsgaard, A. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England. *Journal of Hydrology* 293, 2004, s. 151-179.
135. Toman, F., Podhrázká, J. Vliv klimatických podmínek na vznik eroze způsobené táním sněhu. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed.): XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě, 2002, s. 456-464.
136. Turner, M.G., Gardner, R.H., O'Neill, R.V. *Landscape Ecology in Theory and Practice Pattern and Process*, Springer-Verlag, New York, 2001, 401 s.
137. Uhlenbrook, S., Leibundgut, Ch. Monitoring and modelling of water quantity and chemistry to identify runoff processes in a mountainous basin. In: Verhoest, N.E.C., van Herpe, Y.J.P., De Troch, F.P. (eds.): *Monitoring and Modelling Catchment Water Quantity and Quality*. ERB Conference, Ghent, Belgium, September 27-29, Book of abstracts, 2000, s. 147-149.
138. Vogel, R.M., Kroll, Ch.N. Regional geohydrologic - geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resources Research*, 28 (9), 1992, s. 2451-2458.
139. Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002. 2. etapa. Hydrologické vyhodnocení povodně v srpnu 2002. ČHMÚ Praha, 2003, 134 s.
140. Wegehenkel, M. Longterm evaluation of land use changes on catchment water balance- a case study from North-East Germany. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28 (33-36), 2003, s. 1281-1290.



141. Wegehenkel, M. Longterm evaluation of the impact of afforestation of arable land on landscape water balance. ERB/FRIEND Conference - Interdisciplinary approaches in small Catchment Hydrology: Monitoring and research, Demänovská dolina, Slovensko, 2002, s. 209-214.
142. Wels, C.H., Cornett, R.J., Lazerte, B.D. Hydrograph separation: A comparison of geochemical and isotopic tracers. *Journal of Hydrology*, 122, 1991, s. 253-274.
143. Zajíček, A., Kvítek, T., Kaplická, M. Tile drainage water temperature as an identifier of tile drainage runoff fast component. XII. Biennial International Conference: Hydrological extremes in small basins, Krakow, 2008, s. 391-394.
144. Zákon č. 114/1992 Sb. o ochraně přírody a krajiny.
145. Zecharias, Y.B., Brutsaert, W. The influence of basin morphology on groundwater outflow, *Water Resources Research*, 24 (10), 1988, s. 1645-1650.
146. Zhang, Y.-K., Schilling, K.E. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940s: Effect of land use change. *Journal of Hydrology*, 324 (1-4), 2006, s. 412-422.

## 7. PŘÍLOHY

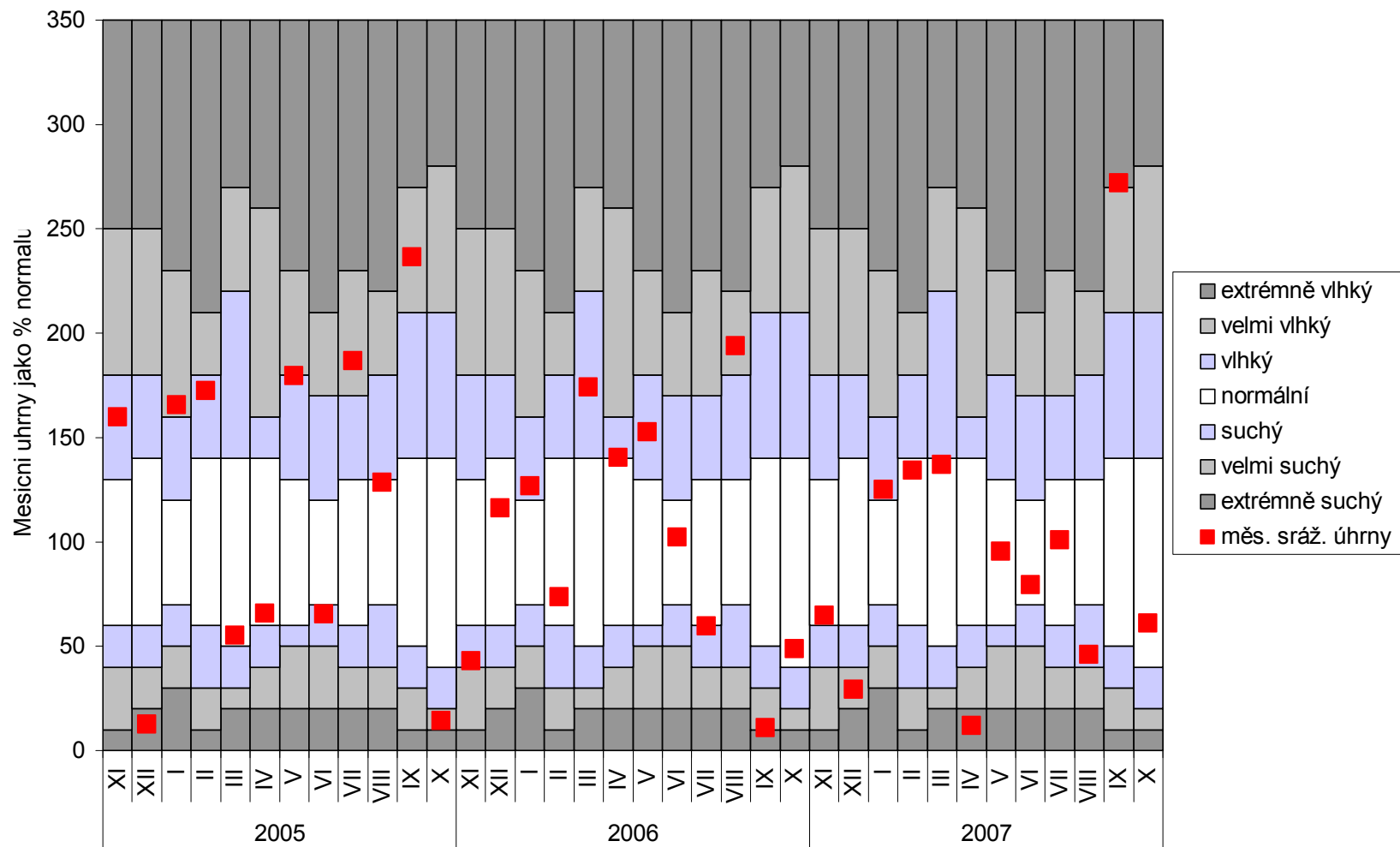
### Seznam příloh

1. Využití území na jednotlivých mikropovodích Kopaninského toku v ha a % - souhrnná tabulka
2. Měsíční srážkové úhrny pro povodí Kopaninského toku vyjádřené jako procenta dlouhodobého průměru měsíčních srážkových úhrnů.
3. Nastavení časového kroku modelu použité v této práci
4. Definování trasy vodního toku P52 a příčných profilů
5. Vkládání datových údajů - srážkové úhrny (jedná se o velmi malé povodí, proto bylo prostorové rozmístění zvoleno uniformní).
6. Vkládání datových údajů – teplota vzduchu.
7. Vkládání datových údajů – referenční evapotranspirace.
8. Vkládání datových údajů – LAI (plocha listovné pokrývnosti) a RD (root depth) – zde pro pšenici ozimou, v levém dolním rohu mapka s červeně vyznačenou polohou pozemku
9. Vkládání datových údajů – vrstevnice – tvorba DTM
10. Vkládání datových údajů – hloubka geologického podloží
11. Vkládání datových údajů – rozmístění jednotlivých schematizovaných geologicky částí povodí – pro každou část se v navazující tabulce zadávají parametry
12. Vkládání datových údajů – charakteristiky půdního profilu
13. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 0
14. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 1
15. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 2
16. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 3
17. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 4
18. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 5
19. Hladiny podzemní vody při různých scénářích uspořádání krajinné matrice
20. Vlhkost půdy při jednotlivých scénářích uspořádání krajinné matrice



2. Měsíční srážkové úhrny pro povodí Kopaninského toku vyjádřené jako procenta dlouhodobého průměru měsíčních srážkových úhrnů.

Hydrologický rok 2005 byl vlhký (129%), 2006 normální (109%) a 2007 normální (96%)(intervaly dle KOŽNAROVÁ, KLABZUBA (2002)).



### 3. Nastavení časového kroku modelu použité v této práci

#### Time step control

Time Steps

Initial time step	<input type="text" value="2"/>	[hrs]
Max allowed UZ,DL,ET time step	<input type="text" value="2"/>	[hrs]
Max allowed SZ time step	<input type="text" value="12"/>	[hrs]
MIKE 11 time step	<input type="text" value="10"/>	[minutes]

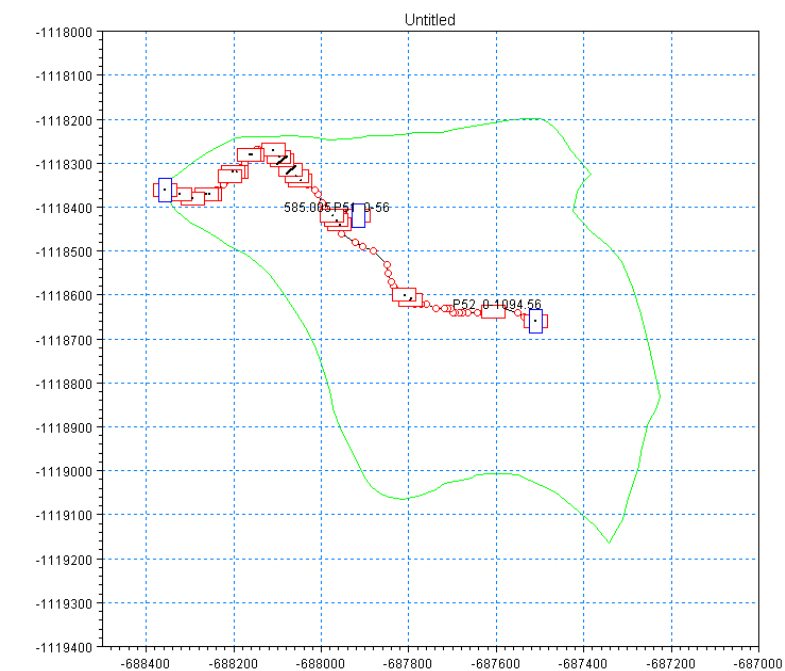
Increment of reduced time step length

Increment rate (0-1)	<input type="text" value="0.05"/>
----------------------	-----------------------------------

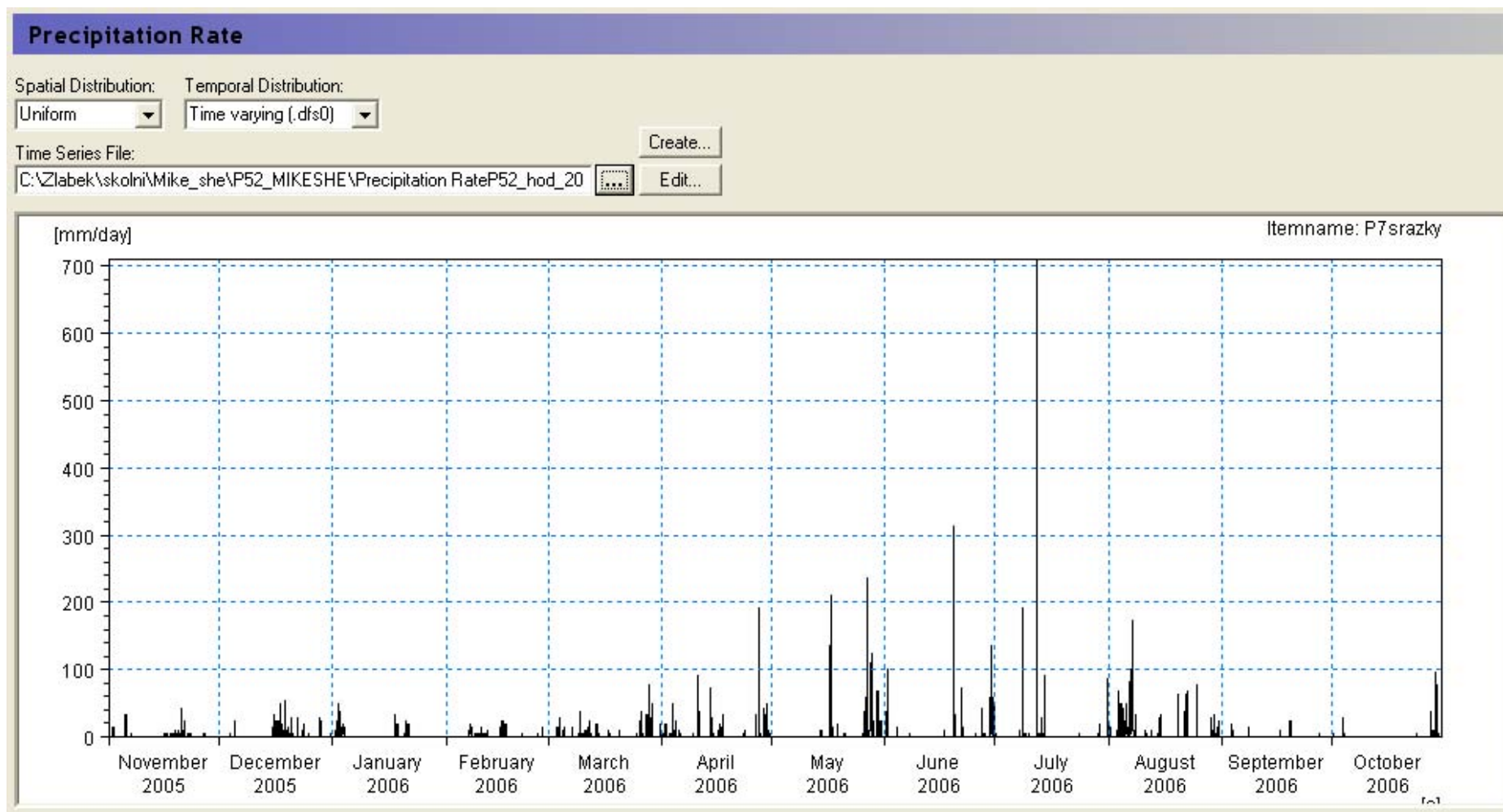
Parameters for Precipitation-dependent time step control

Max precipitation depth per time step	<input type="text" value="1"/>	[mm]
Max infiltration amount per time step	<input type="text" value="1"/>	[mm]
Input precipitation rate requiring its own time step	<input type="text" value="0.1"/>	[mm/hr]

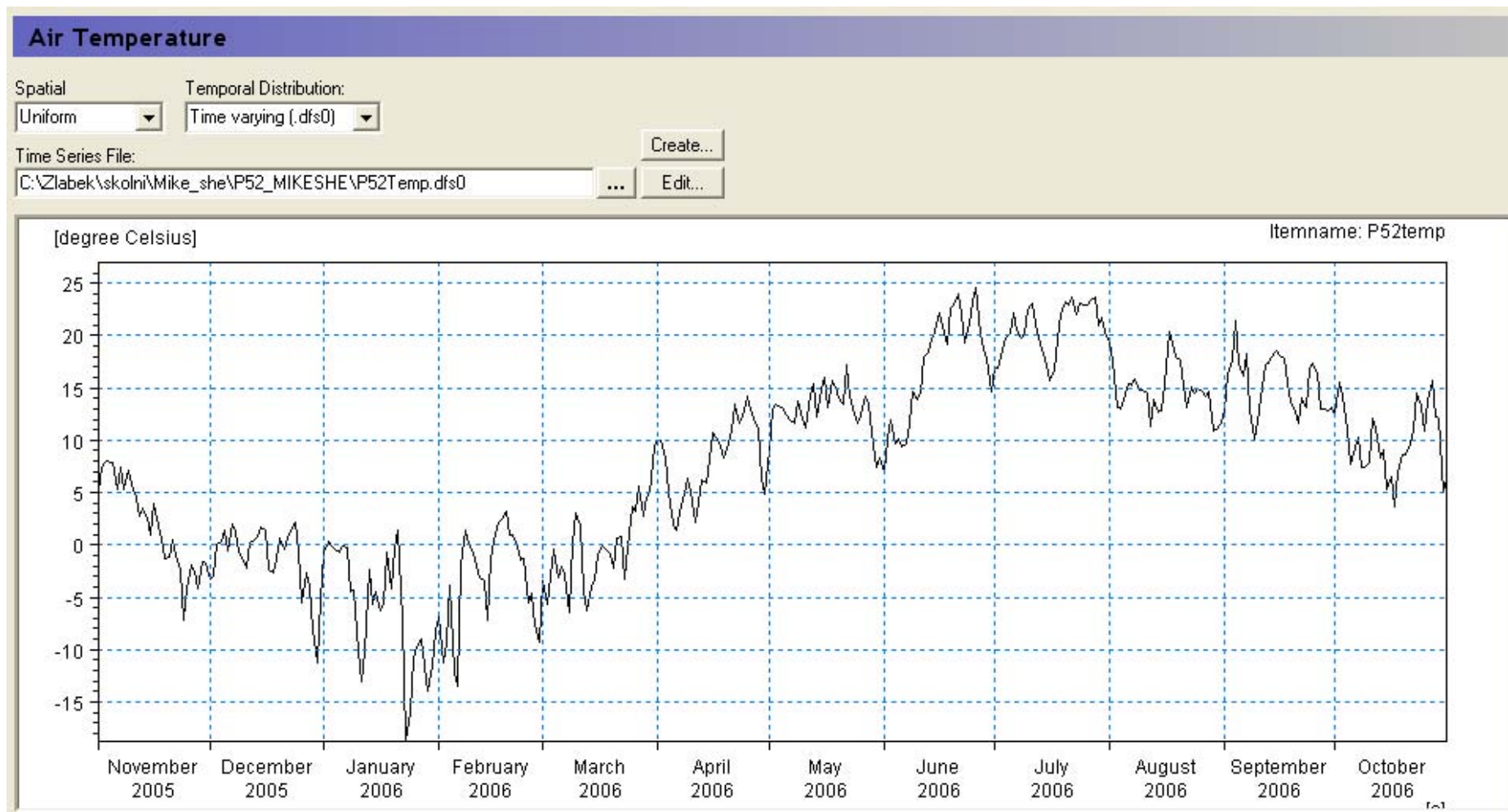
### 4. Definování trasy vodního toku P52 a příčných profilů



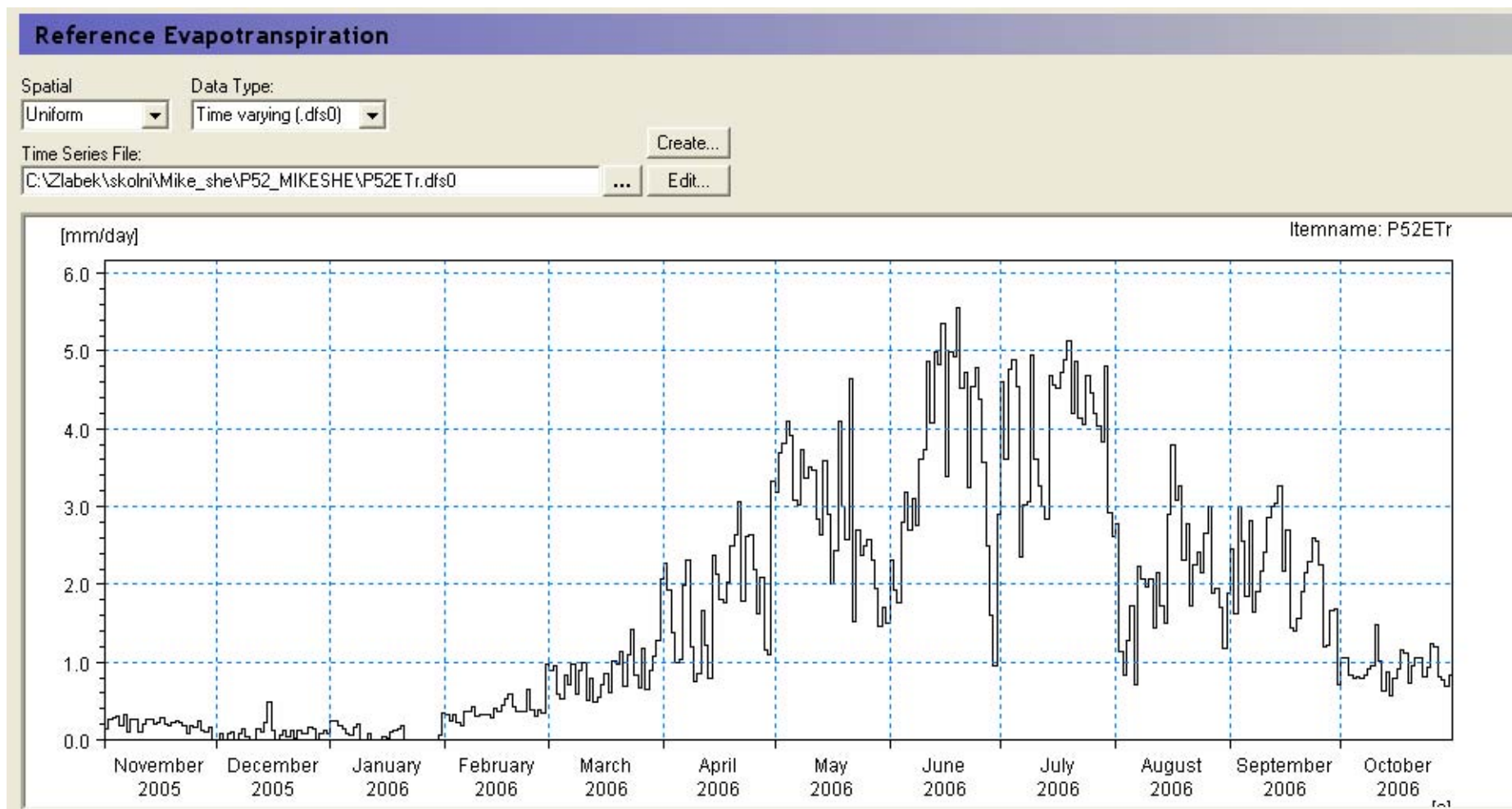
5. Vkládání datových údajů - srážkové úhrny (jedná se o velmi malé povodí, proto bylo prostorové rozmístění zvoleno uniformní).



## 6. Vkládání datových údajů – teplota vzduchu.

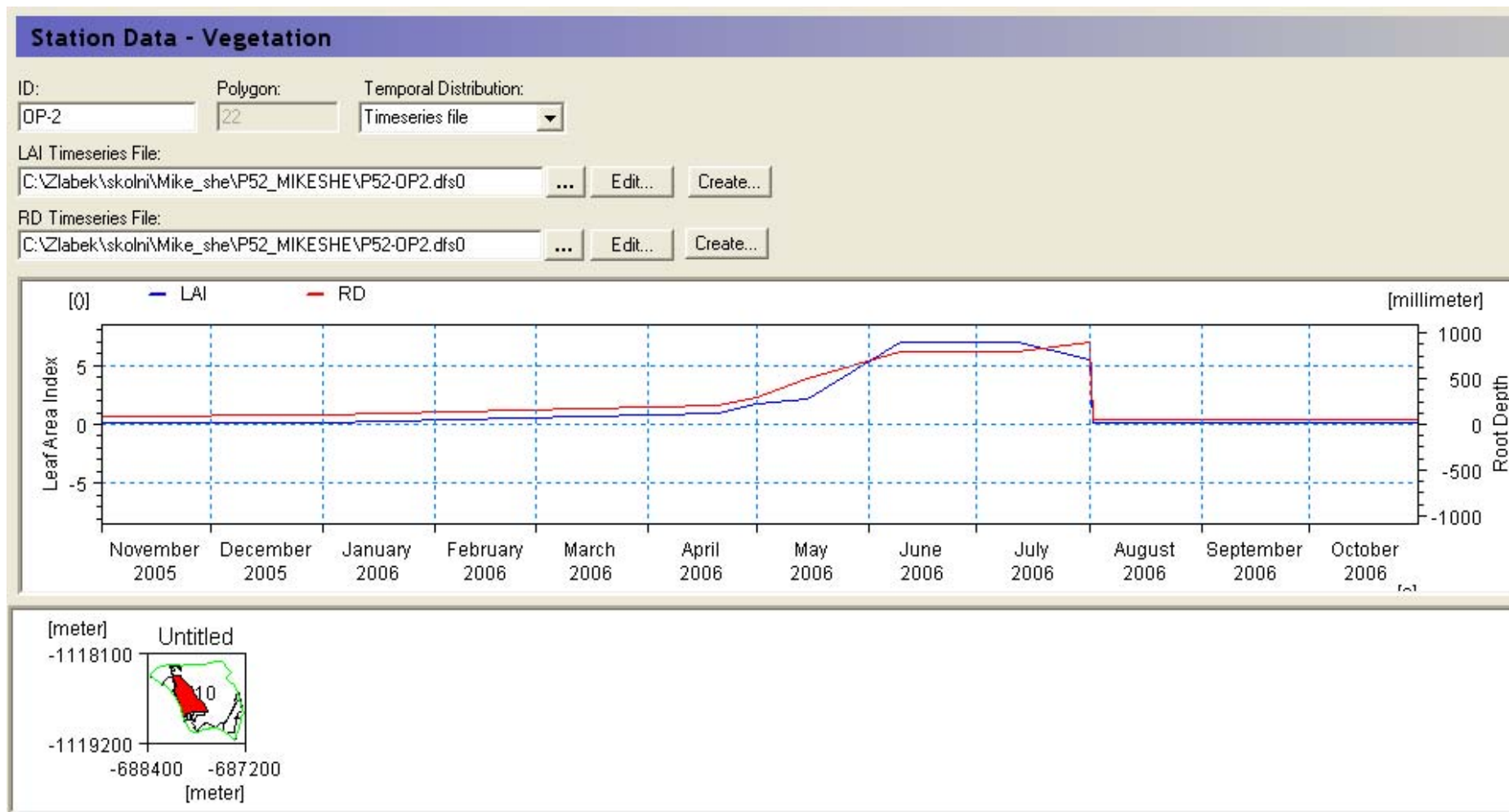


## 7. Vkládání datových údajů – referenční evapotranspirace.

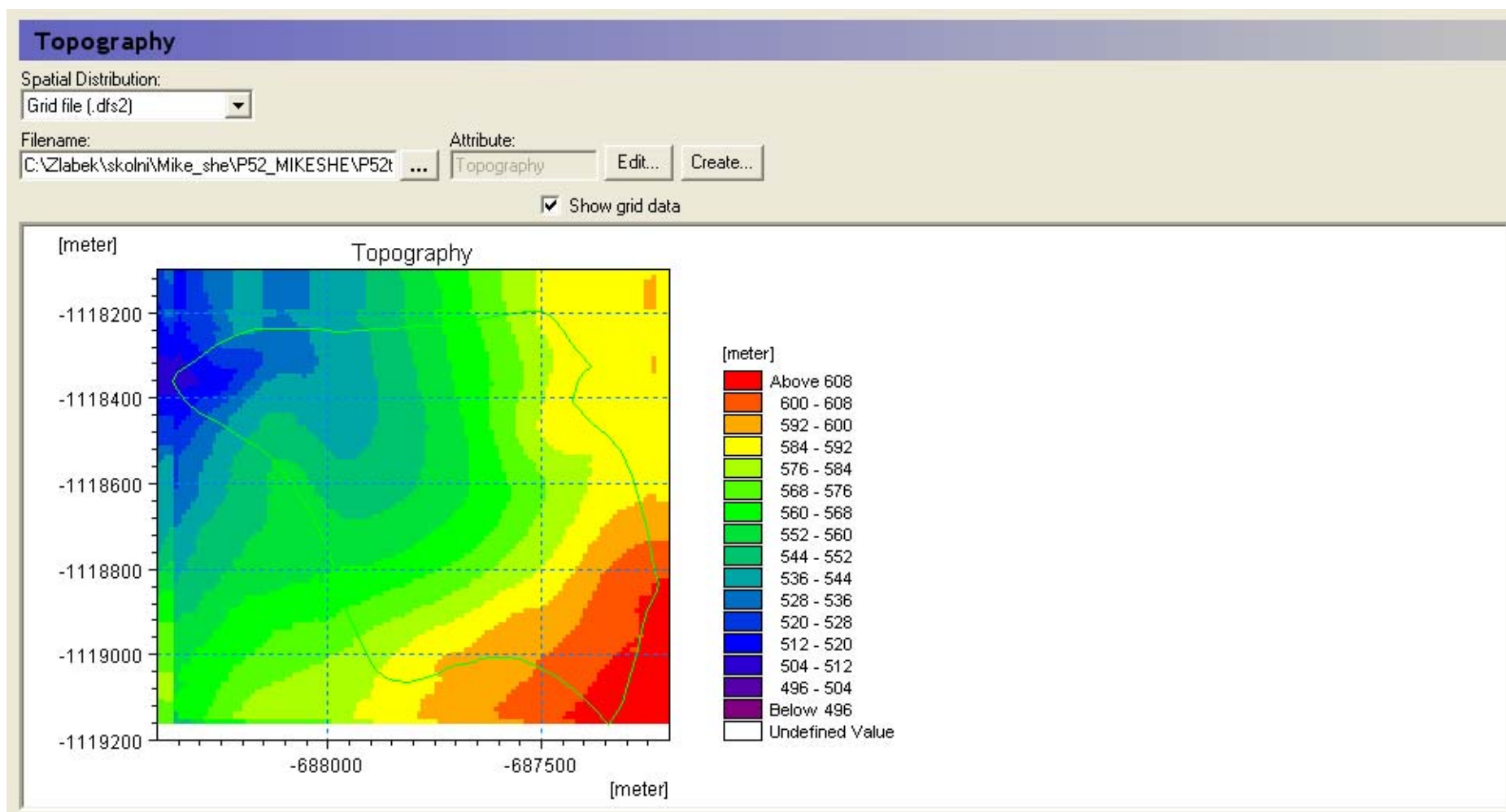




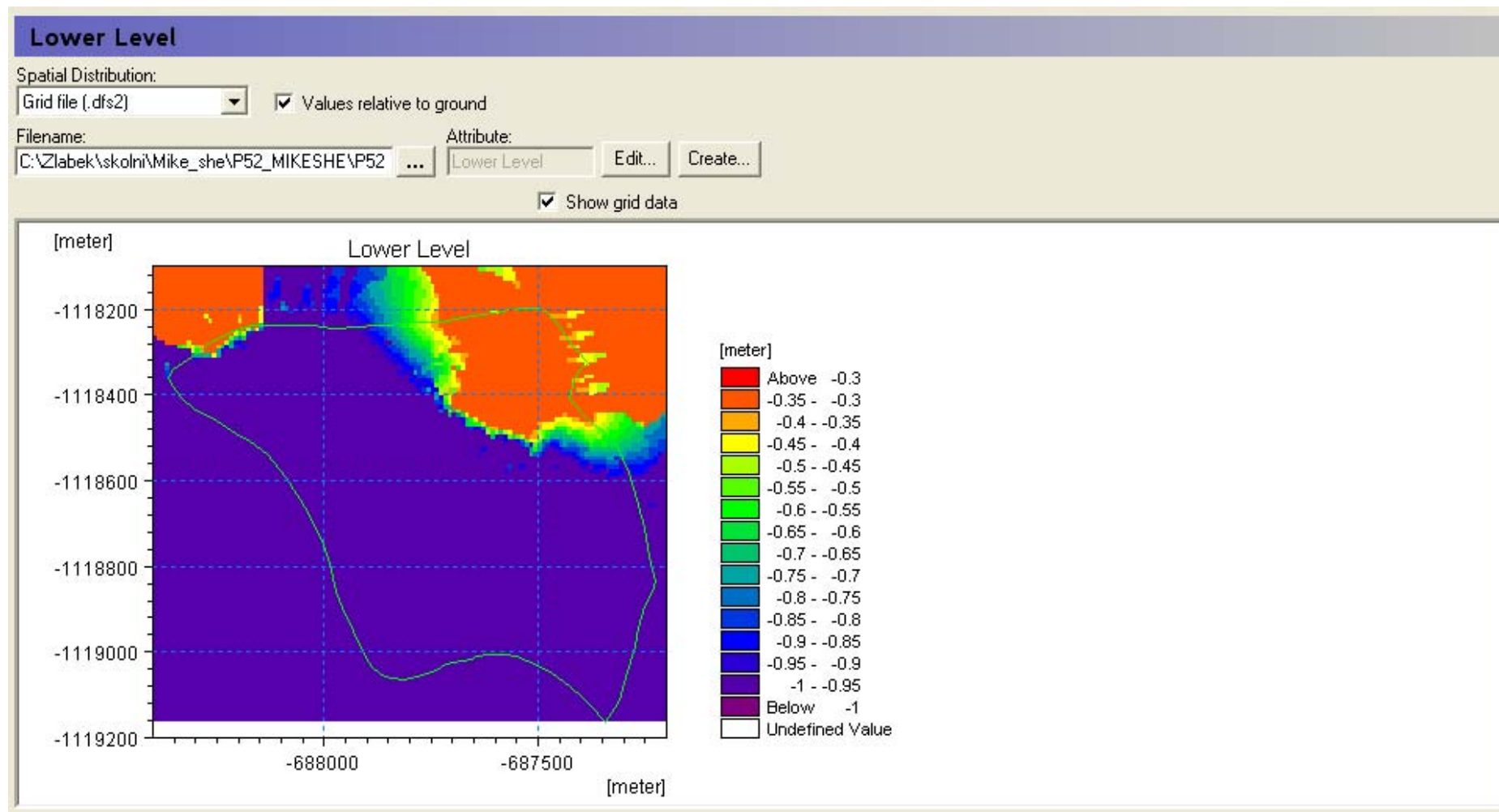
8. Vkládání datových údajů – LAI (plocha listovné pokrývnosti) a RD (root depth) – zde pro pšenici ozimou, v levém dolním rohu mapka s červeně vyznačenou polohou pozemku



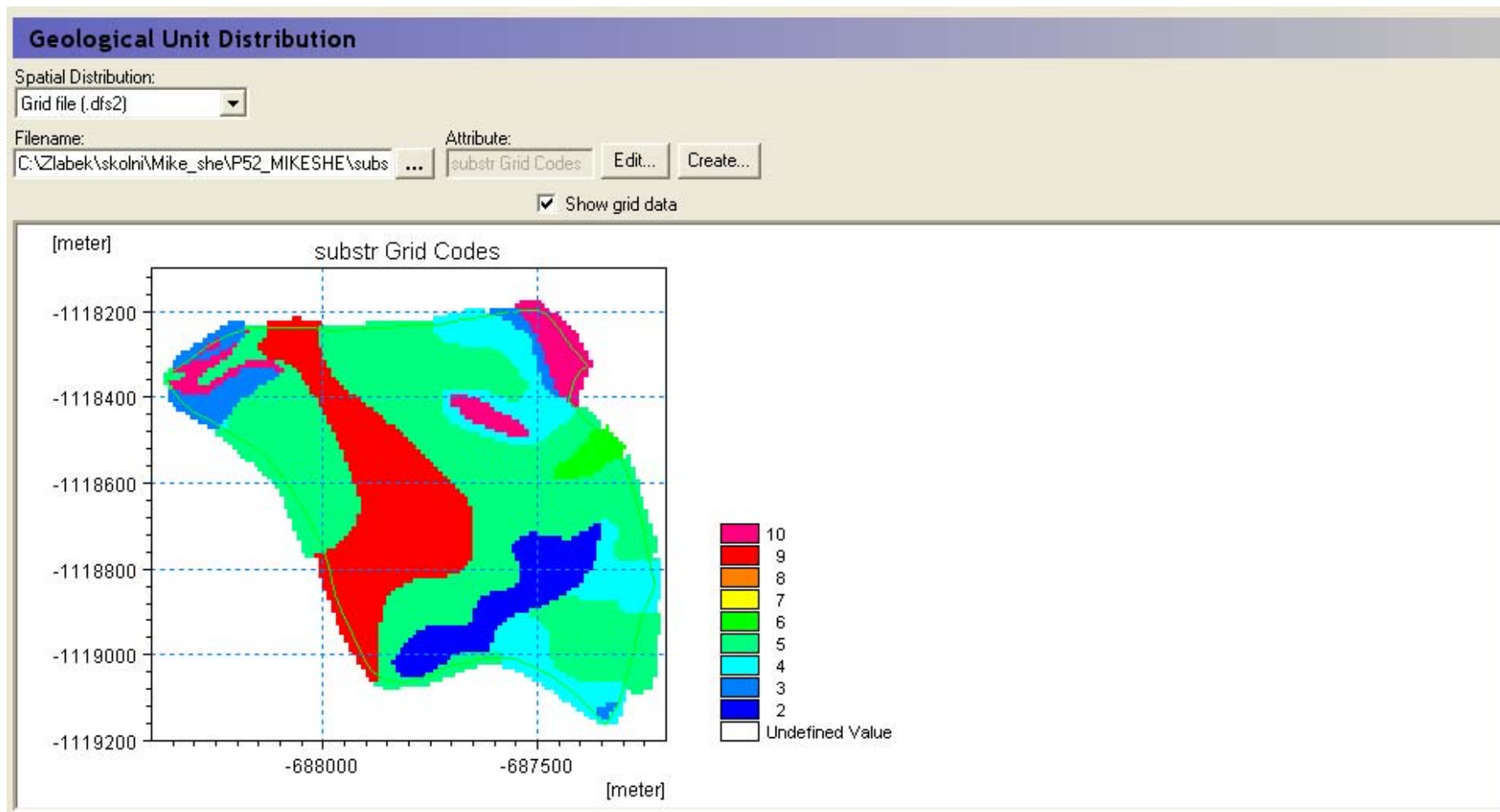
## 9. Vkládání datových údajů – vrstevnice – tvorba DTM



## 10. Vkládání datových údajů – hloubka geologického podloží



11. Vkládání datových údajů – rozmístění jednotlivých geologicky schematizovaných částí povodí – pro každou část se v navazující tabulce zadávají parametry



## 12. Vkládání datových údajů – charakteristiky půdního profilu

### UZ Soil Profile Definition

Profile ID:  Grid code value:

Soil Profile:

	From depth	To depth	Soil name	UZ Soil property file		
1	0	0.2	A	C:\Zlabe\...\P52_MIKESHEVP52pudy	...	Edit...
2	0.2	0.4	B	C:\Zlabe\...\P52_MIKESHEVP52pudy	...	Edit...
3	0.4	0.6	C	C:\Zlabe\...\P52_MIKESHEVP52pudy	...	Edit...
4	0.6	3	D1	C:\Zlabe\...\P52_MIKESHEVP52pudy	...	Edit...

Vertical Discretization:

	From depth	To depth	Cell height	No of cells
1	0	0.2	0.05	4
2	0.2	0.6	0.1	4
3	0.6	2	0.2	7
4	2	3	0.25	4

Bypass Const.

byp

thr1

thr2

[meter] HPT code

-1118500

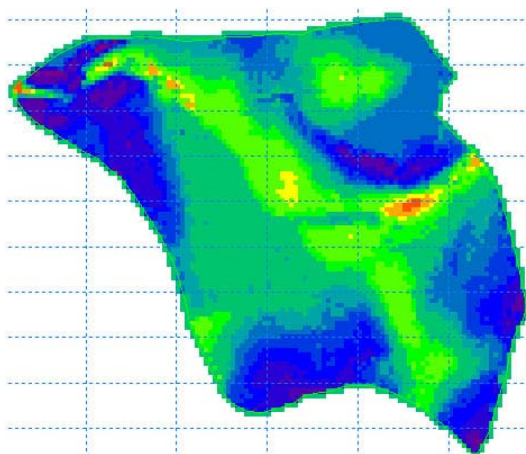
-1119000

-688400 -687200

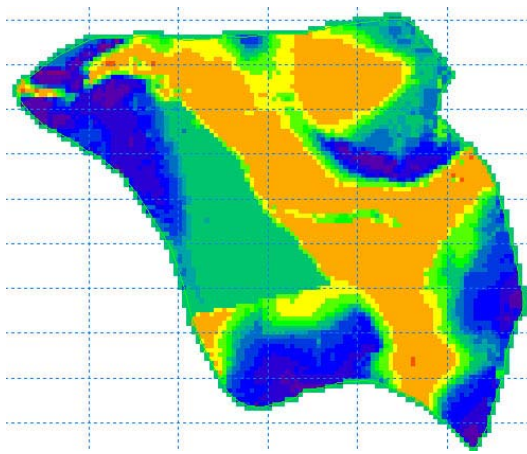
[meter]



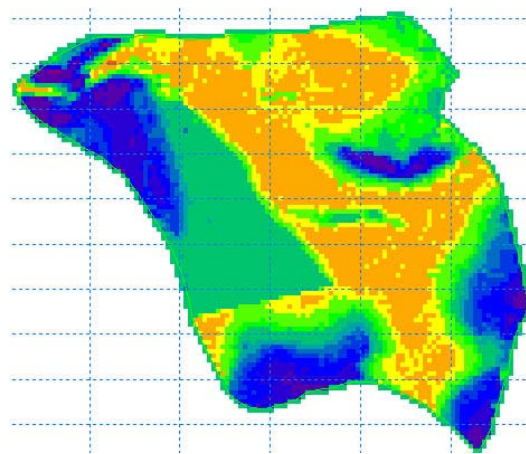
13. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 0



1. den - začátek srážkové činnosti

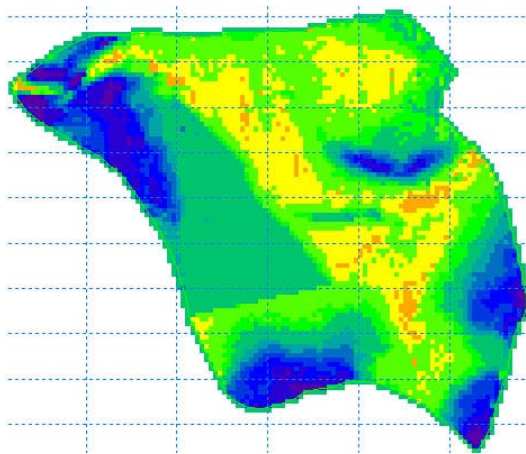


5. den - konec srážkové činnosti

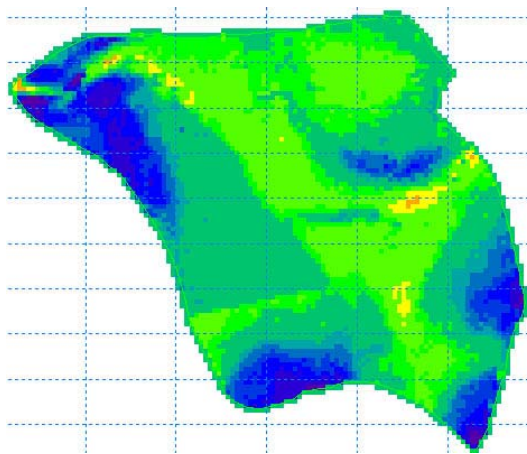


9. den

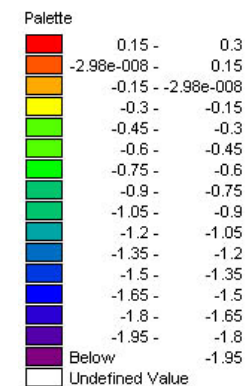
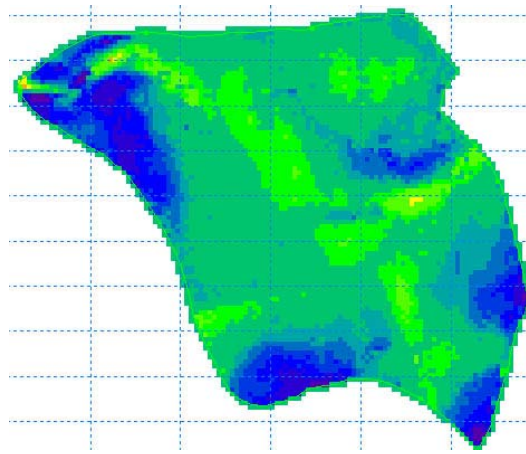
13. den



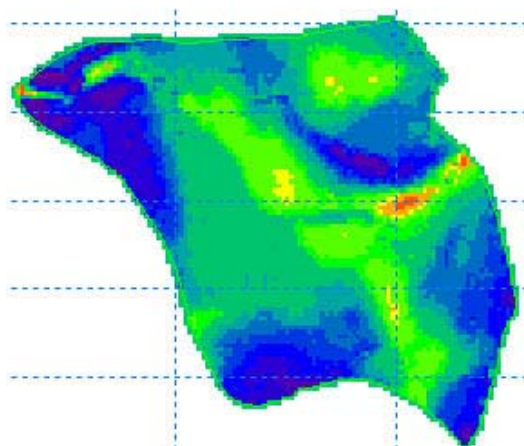
17. den



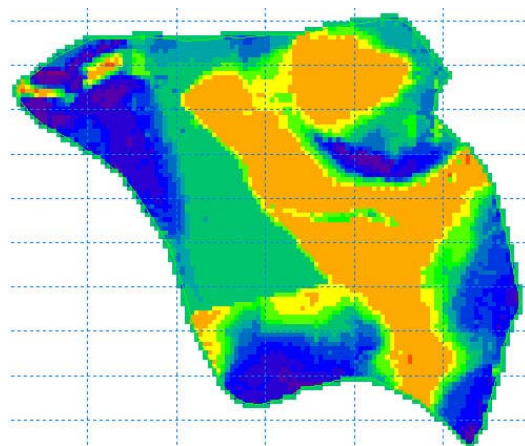
21. den



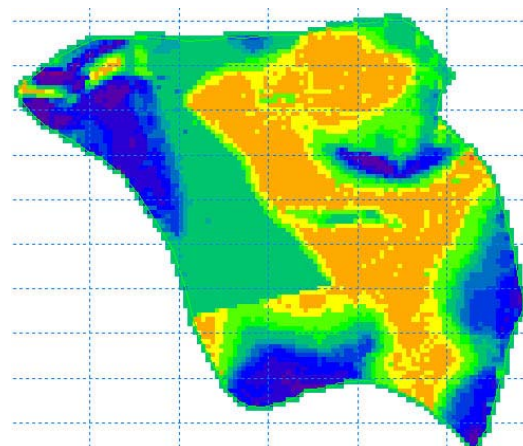
14. Ukázka reakce povodí na významnou srážkovou událost z května 2006 - scénář 1



1. den - začátek srážkové činnosti

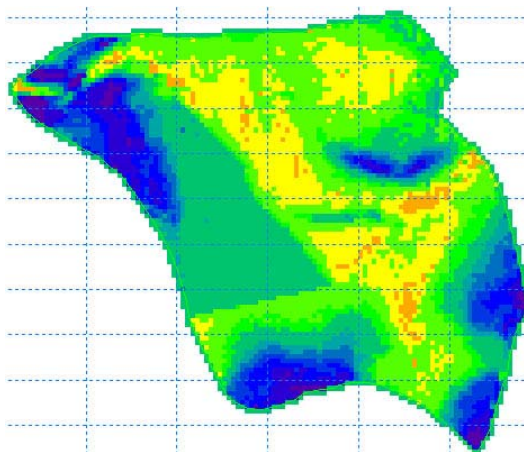


5. den - konec srážkové činnosti

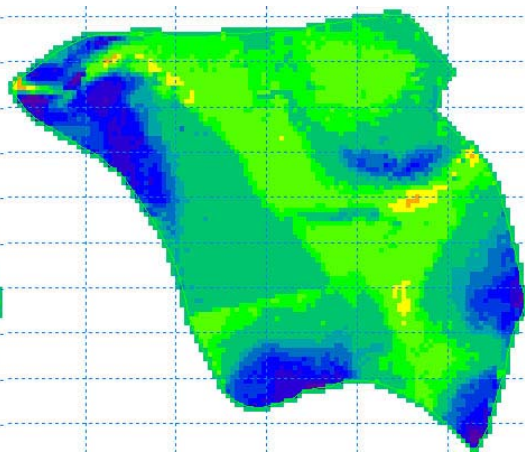


9. den

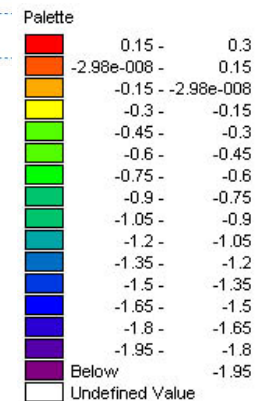
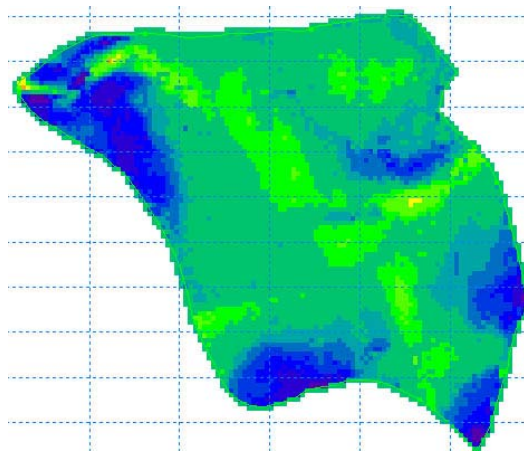
13. den



17. den

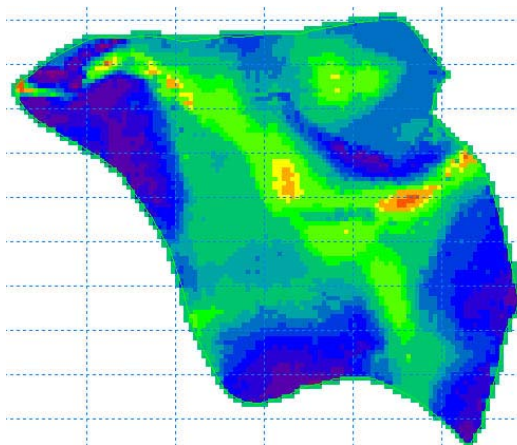


21. den

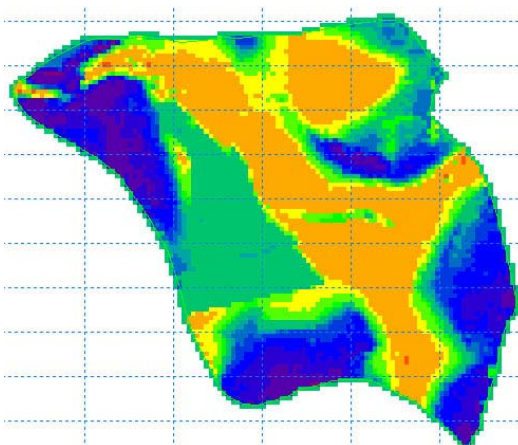




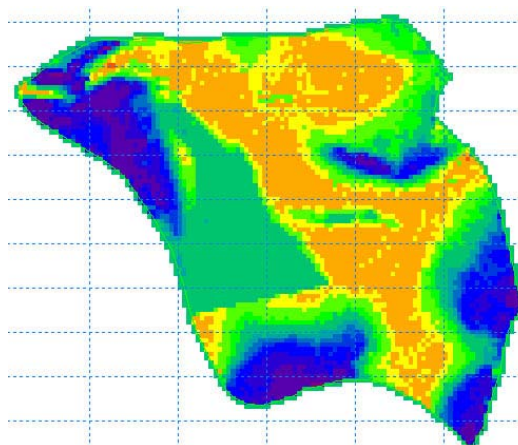
15. Ukázka reakce povodí na významnou srážkovou událost z května 2006 - scénář 2



1. den - začátek srážkové činnosti

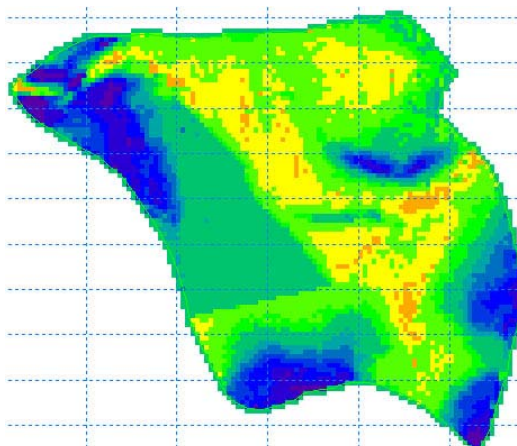


5. den - konec srážkové činnosti

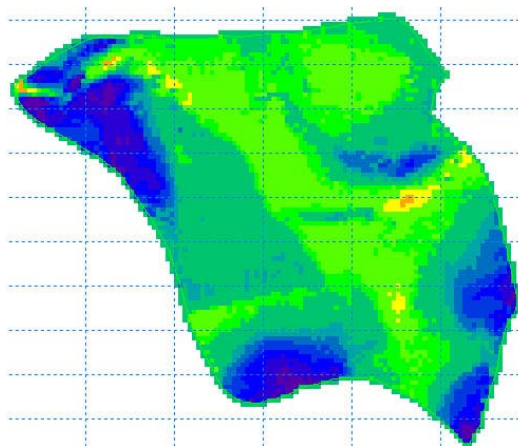


9. den

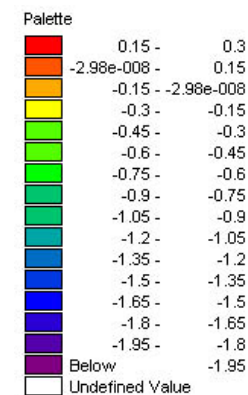
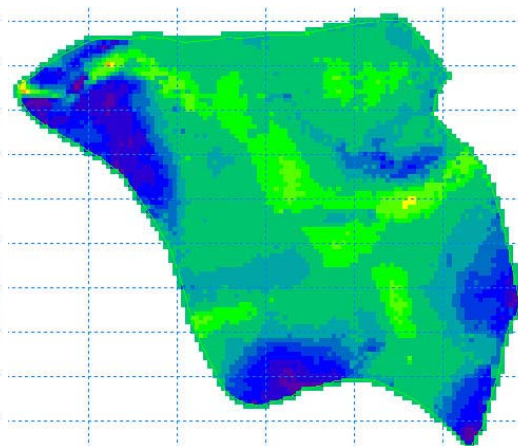
13. den



17. den

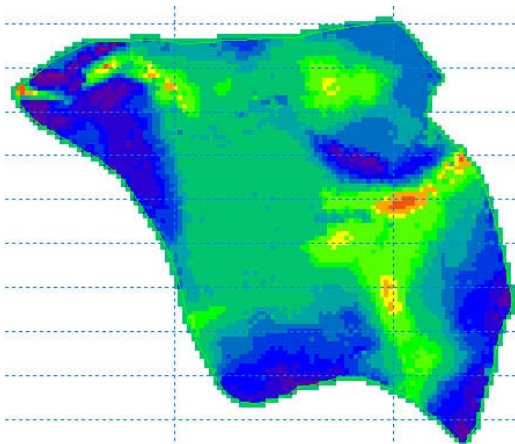


21. den

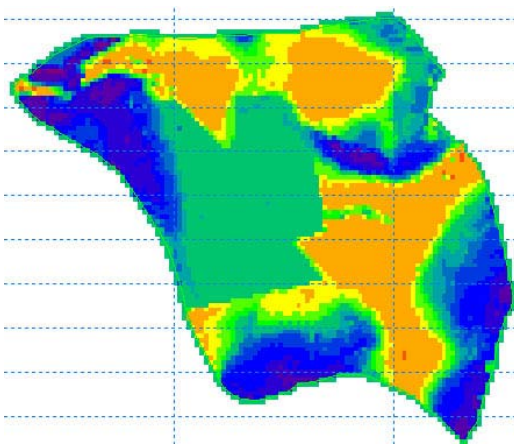




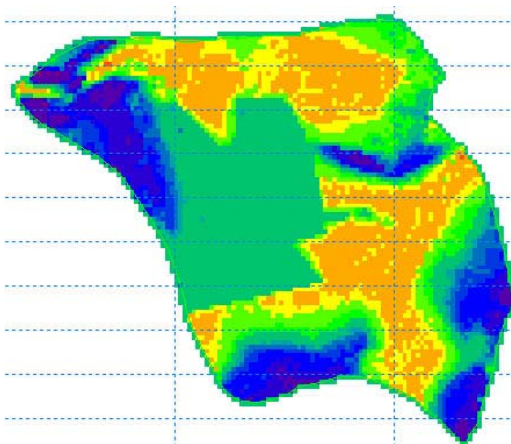
16. Ukázka reakce povodí na významnou srážkovou událost z května 2006 - scénář 3



1. den - začátek srážkové činnosti

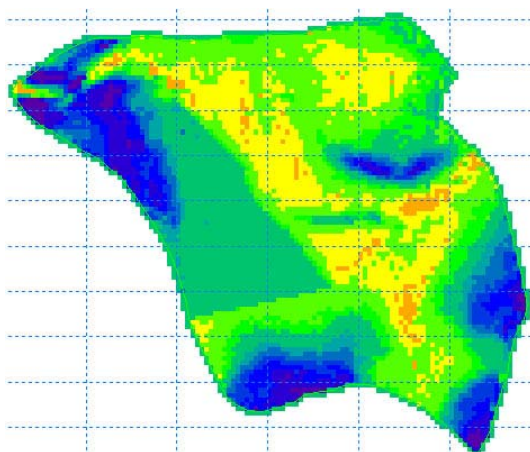


5. den - konec srážkové činnosti

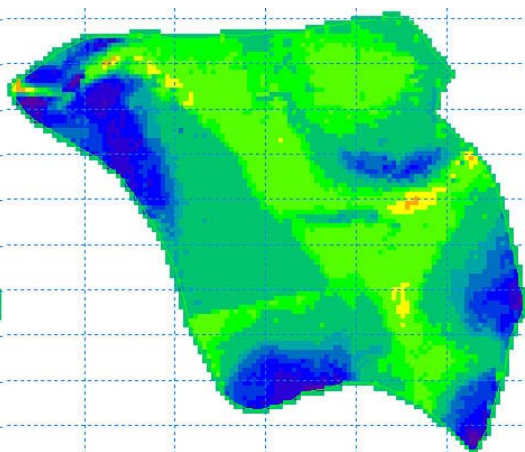


9. den

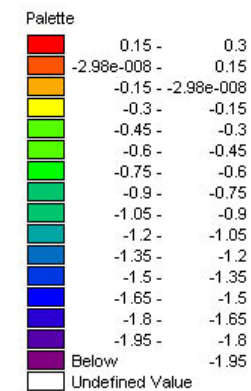
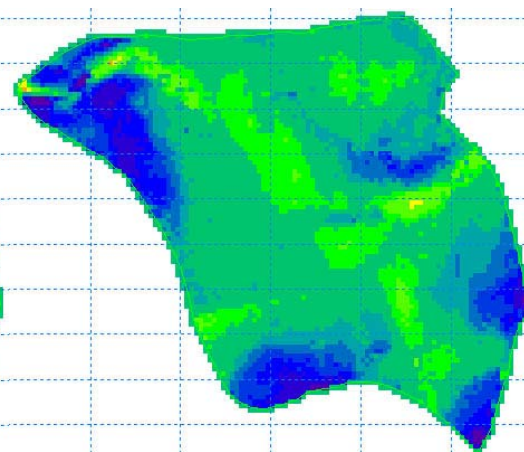
13. den



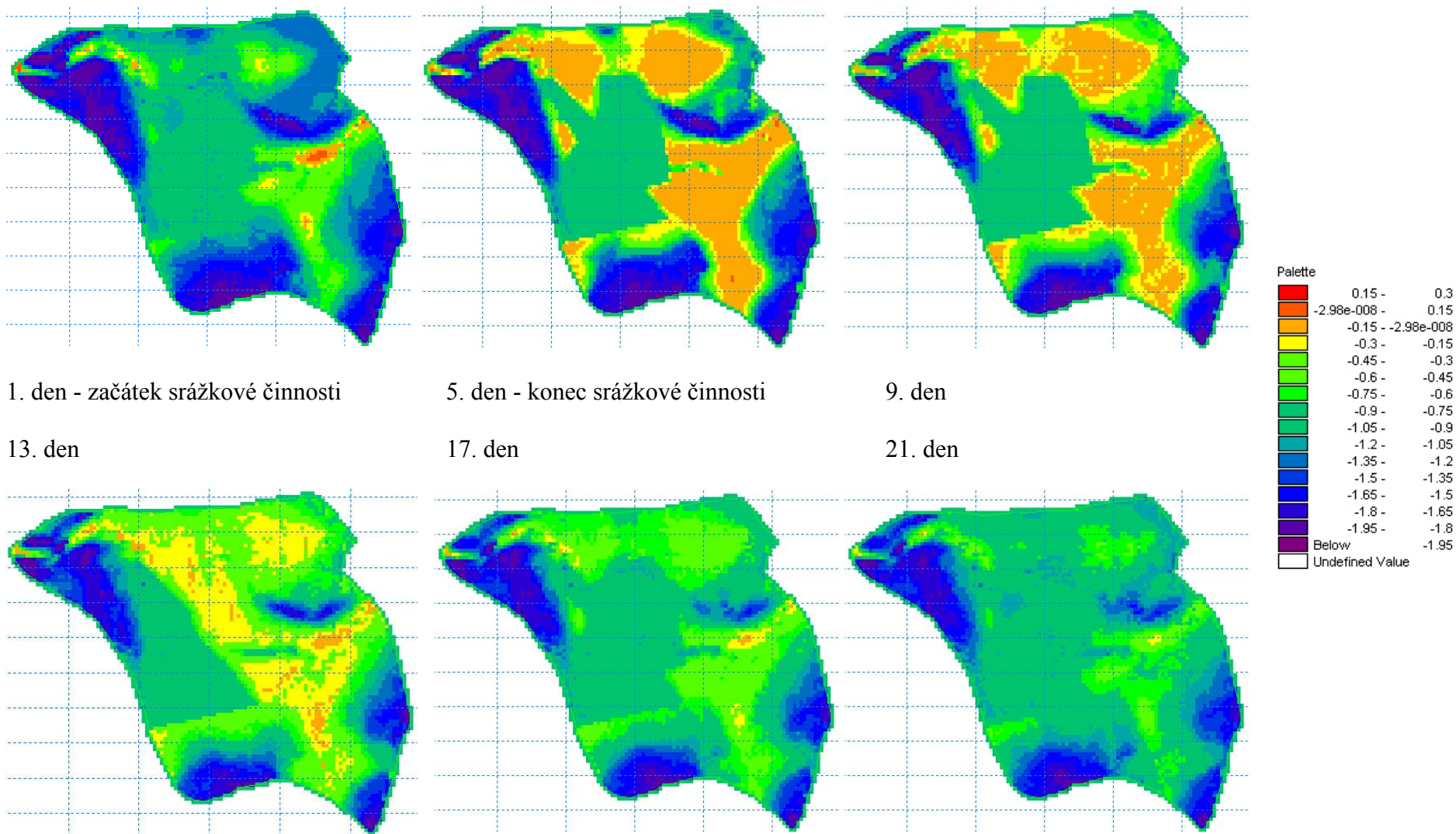
17. den



21. den

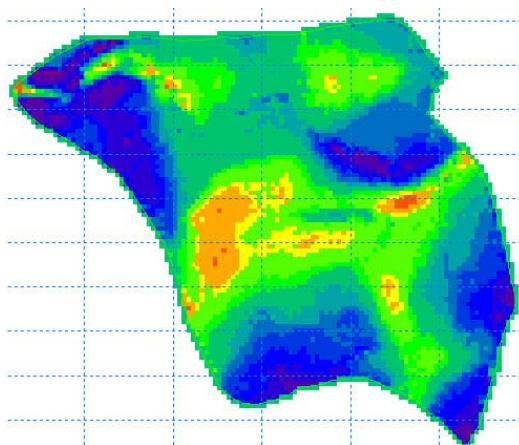


17. Ukázka reakce povodí na významnou srážkovou událost z května 2006 - scénář 4

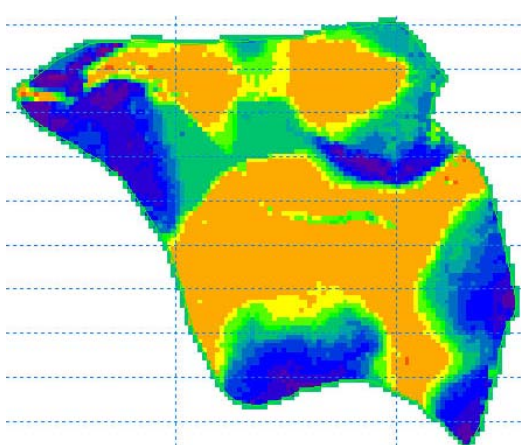




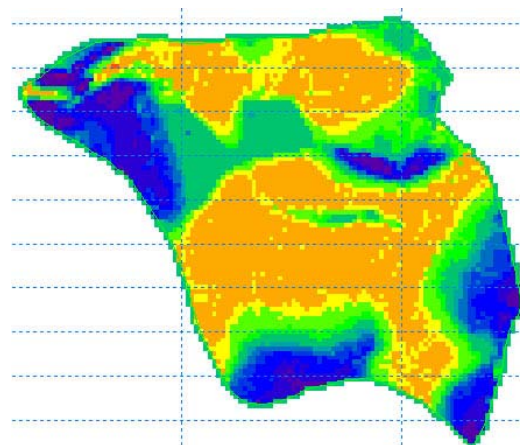
18. Ukázka reakce povodí na významnou srážkou událost z května 2006 - scénář 5



1. den - začátek srážkové činnosti

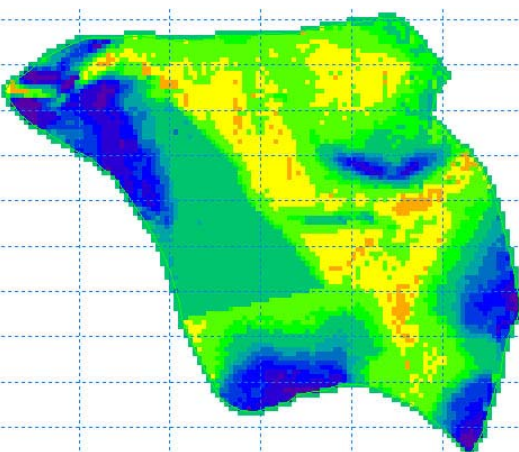


5. den - konec srážkové činnosti

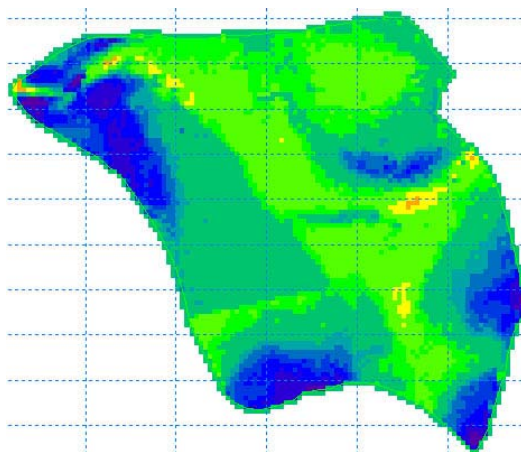


9. den

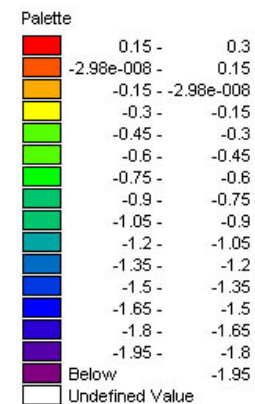
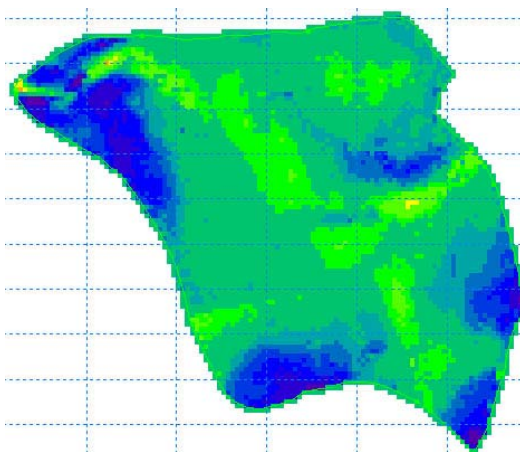
13. den



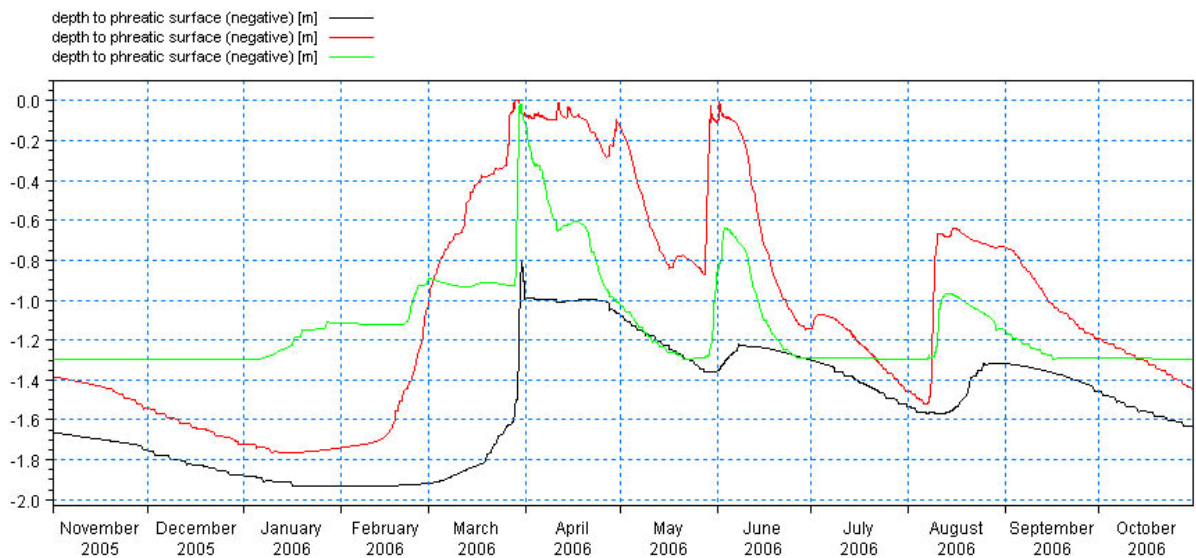
17. den



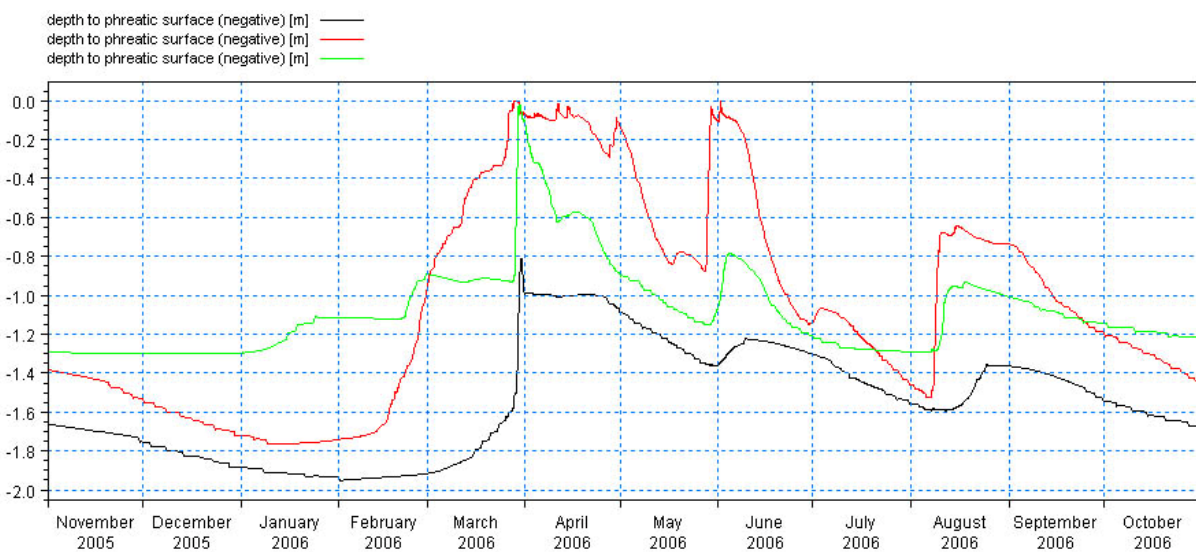
21. den



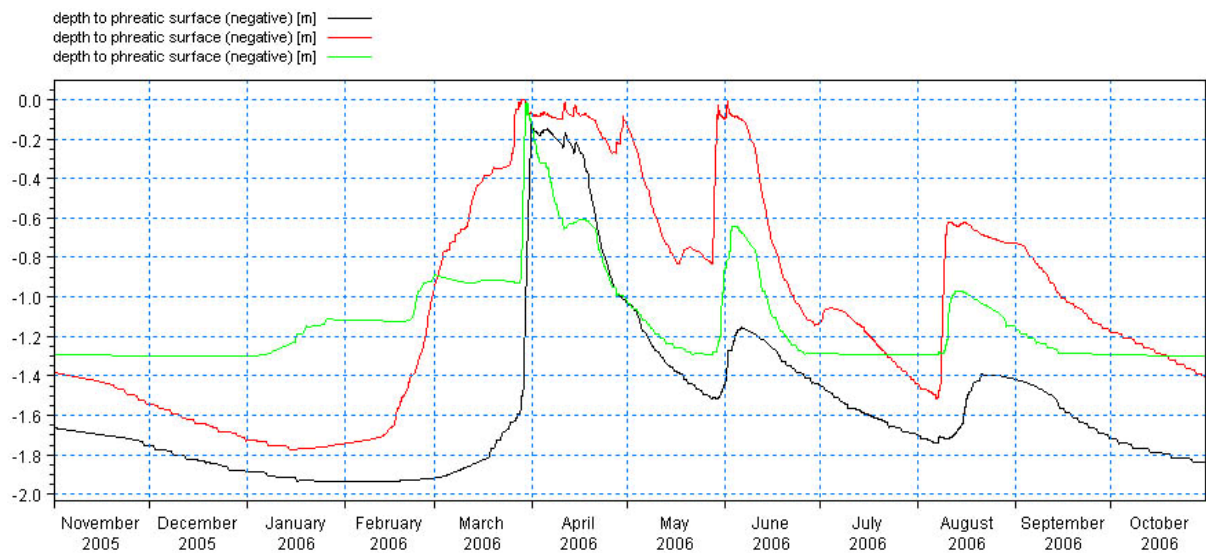
## 19. Hloubky podzemní vody při různých scénářích uspořádání krajinné matrice



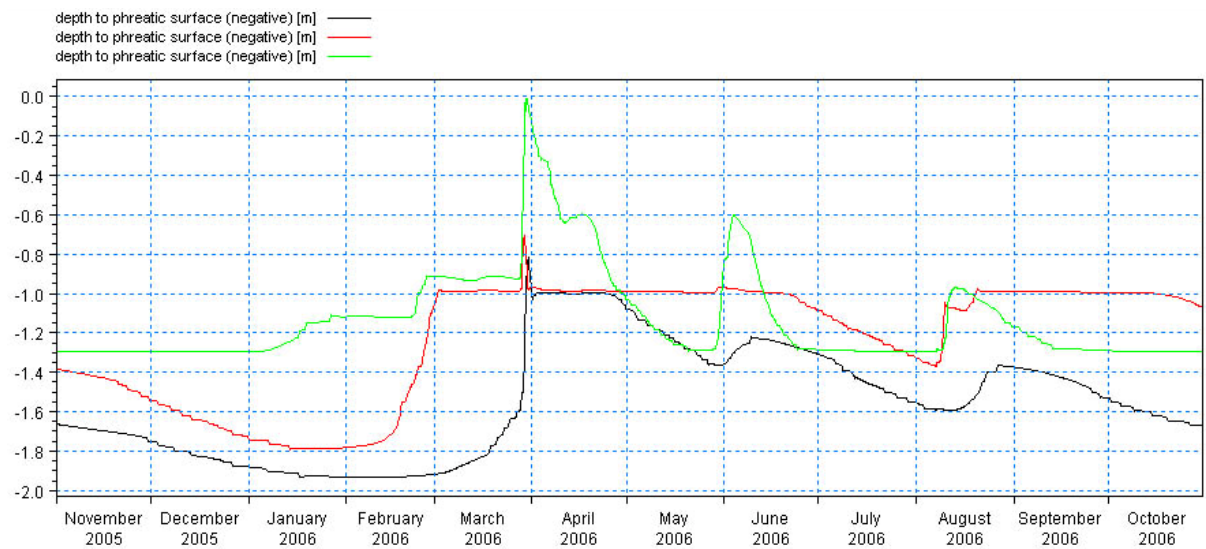
Hloubky hladin podzemní vody při scénáři 0: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)



Hloubky hladin podzemní vody při scénáři 1: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)

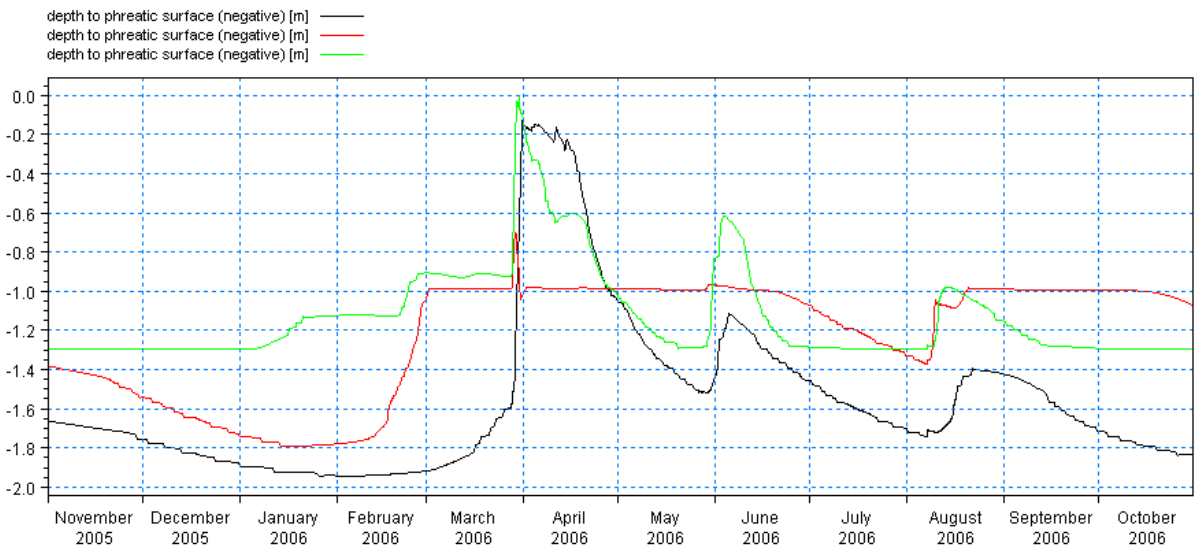


Hloubky hladin podzemní vody při scénáři 2: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)

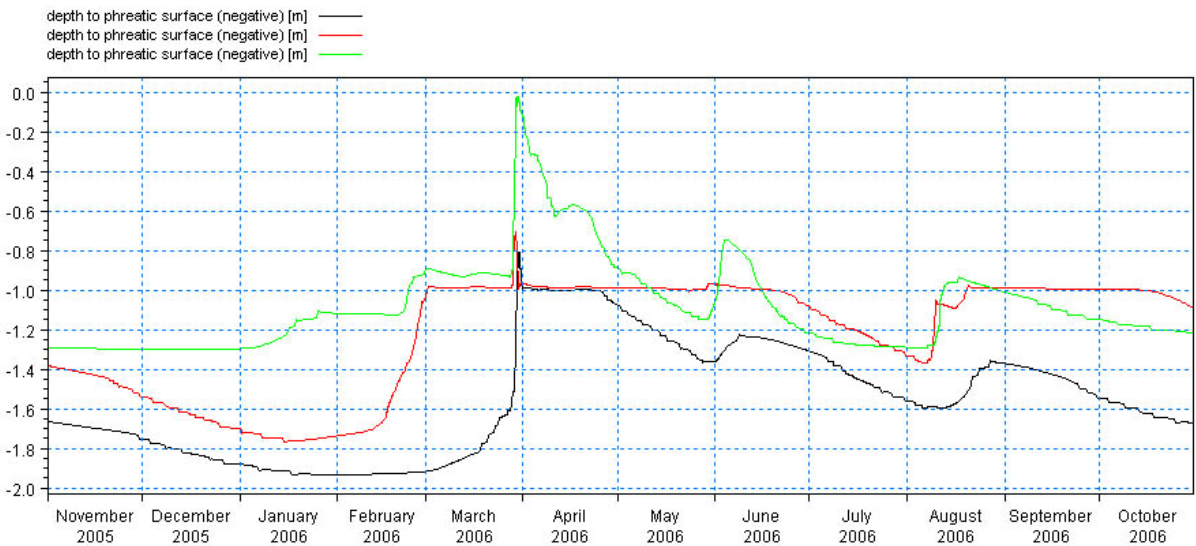


Hloubky hladin podzemní vody při scénáři 3: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)



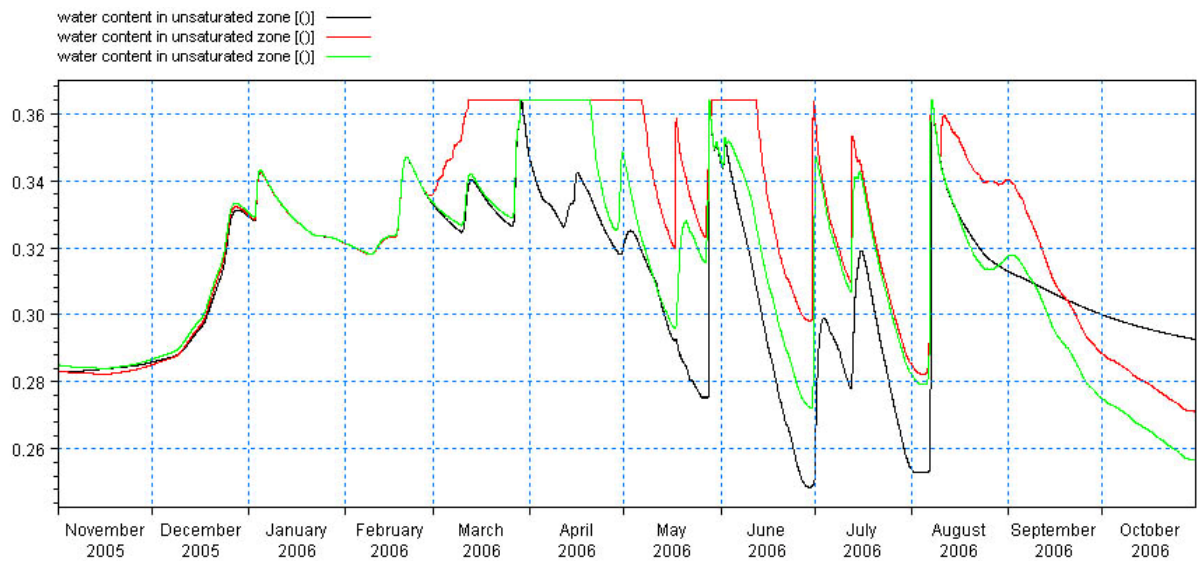


Hloubky hladin podzemní vody při scénáři 4: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu. zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)

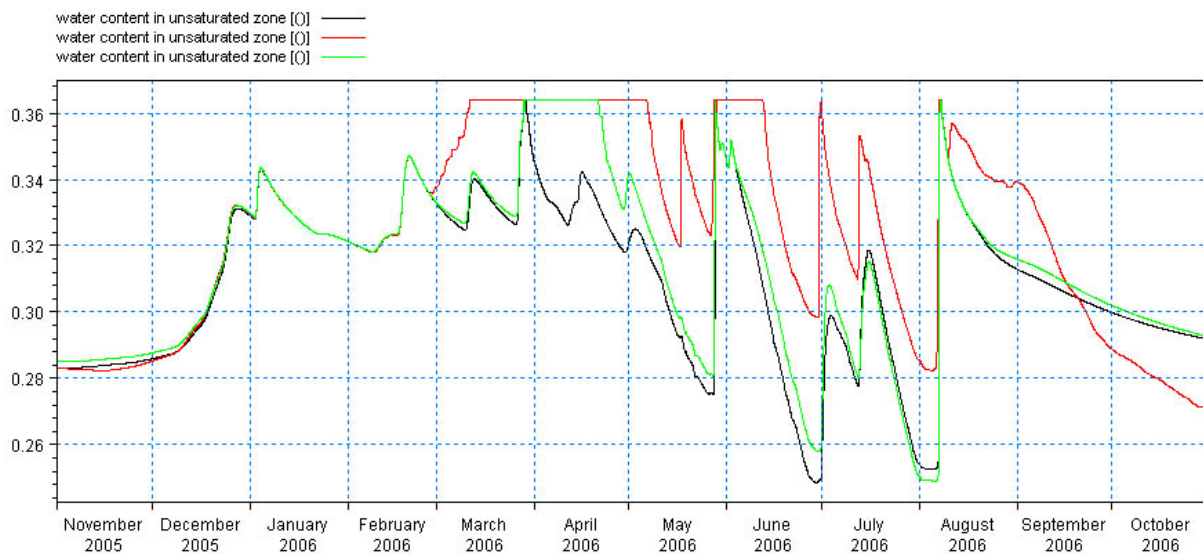


Hloubky hladin podzemní vody při scénáři 5: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu. zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)

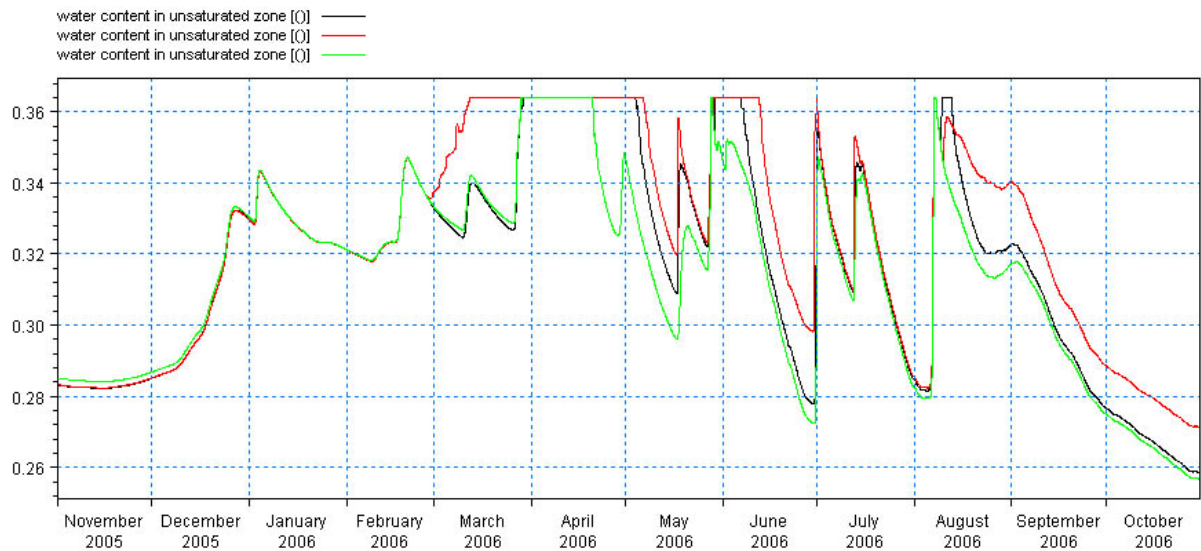
## 20. Vlhkost půdy při jednotlivých scénářích uspořádání krajinné matrice



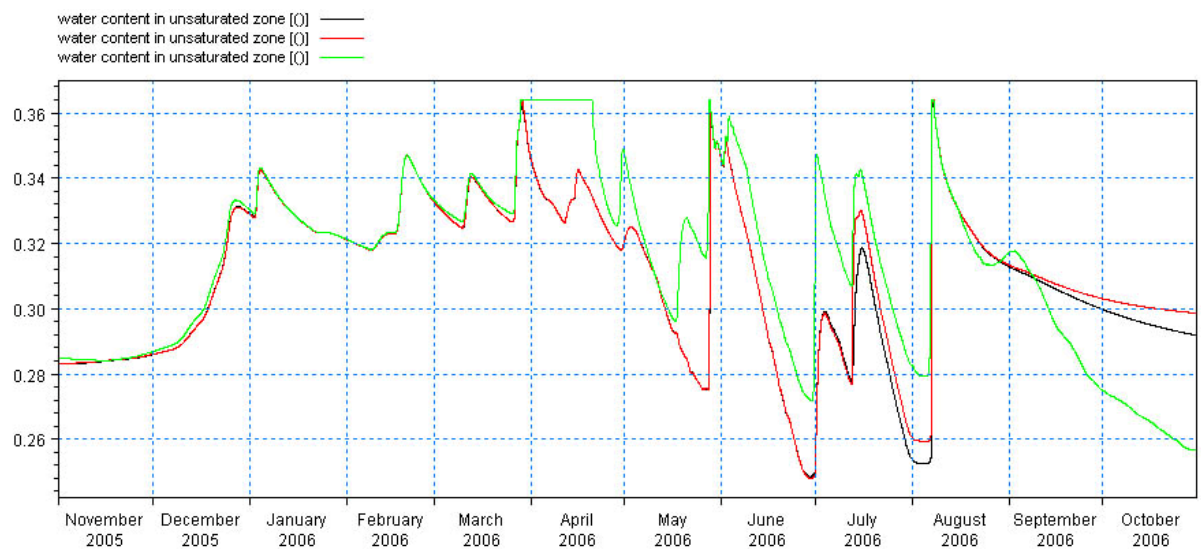
Vlhkost půdy v hloubce 50 cm pod povrchem při scénáři 0: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)



Vlhkost půdy v hloubce 50 cm pod povrchem při scénáři 1: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)

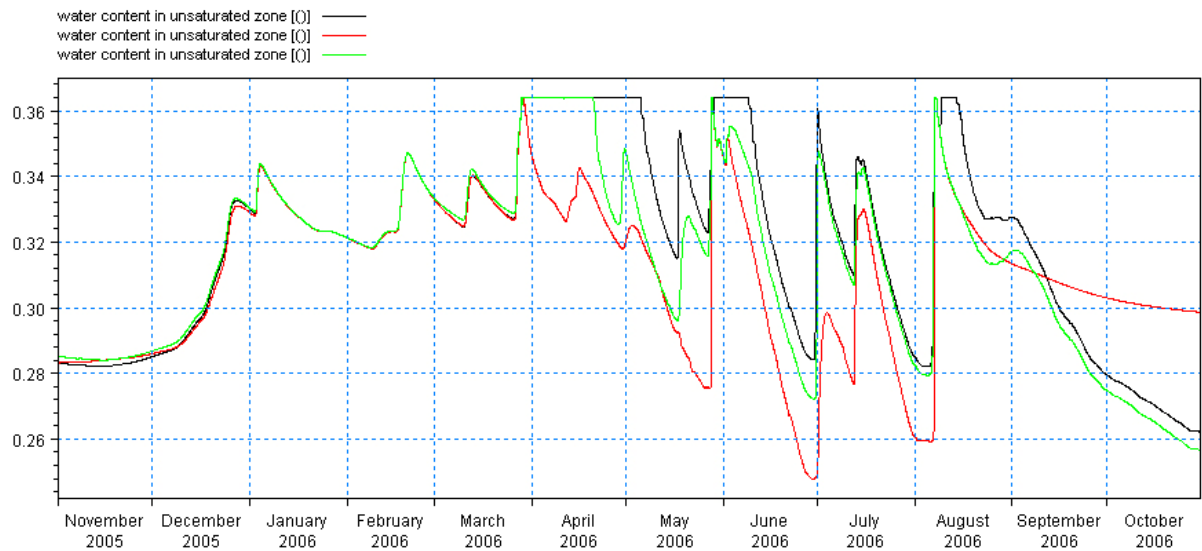


Vlhkost půdy v hloubce 50 cm pod povrchem při scénáři 2: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)

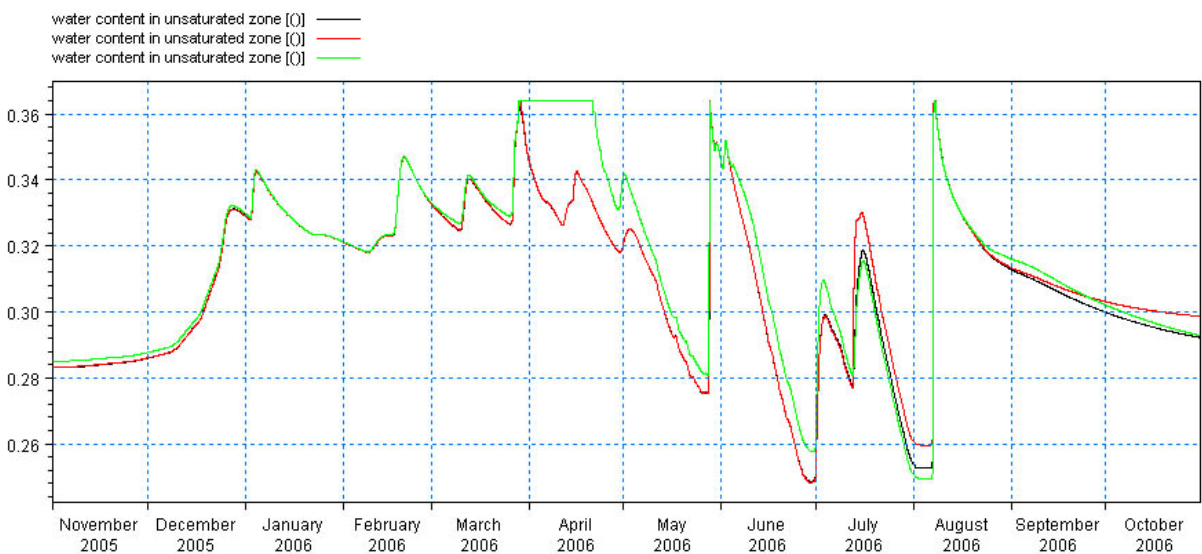


Vlhkost půdy v hloubce 50 cm pod povrchem při scénáři 3: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)





Vlhkost půdy v hloubce 50 cm pod povrchem při scénáři 4: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)



Vlhkost půdy v hloubce 50 cm pod povrchem při scénáři 5: modrá barva - lokalita v blízkosti rozvodnice, červená barva - lokalita ve svahu, zelená barva - lokalita v údolí (dolní části svahu)