

České vysoké učení technické v Praze  
Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i.  
Sweco Hydroprojekt a.s.



**FAKULTA  
STAVEBNÍ  
ČVUT V PRAZE**

metodika

# Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině

Petr Kavka, Miloslav Müller a kol.  
2018



České vysoké učení technické v Praze  
Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i.  
Sweco Hydroprojekt a.s.

# Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině

Metodika

Petr Kavka (20 %), Miloslav Müller (20 %), Luděk Strouhal (15 %), Marek Kašpar (15 %),  
Vojtěch Bližňák (10 %), Martin Landa (7 %), Lenka Weyskrabová (7 %), Martin Pavel  
(3 %), Tomáš Dostál (3 %)

## Dedikace

Metodika vznikla jako výstup projektu NAZV QJ1520265 „Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině“ řešeného v letech 2015–2017.

Metodika byla certifikována Státním pozemkovým úřadem pod číslem: 3/2018-SPU/O

ISBN: 978-80-01-06363-7

## Oponenti:

Ing. František Pavlík, Ph.D., Státní pozemkový úřad

RNDr. Michal Jeníček, Ph.D., Univerzita Karlova

1	Cíl metodiky .....	5
2	Vlastní popis metodiky .....	7
2.1	Vodohospodářská opatření v krajině .....	7
2.2	Využití hydrologických modelů .....	8
2.2.1	Typy modelů, principy .....	9
2.2.2	Komentář k vybraným modelům v ČR .....	11
2.2.3	Vstupní data pro hydrologické modelování .....	17
2.3	Návrhové srážky a jejich prostorové zastoupení .....	20
2.3.1	Průběh návrhových srážek .....	20
2.3.2	Předchozí nasycenost na počátku návrhových srážek .....	23
2.3.3	Zastoupení tvarů návrhových srážek na území ČR .....	26
2.3.4	Úhrny návrhových srážek kratší doby trvání .....	27
2.4	Příklady řešení .....	29
2.4.1	Návrh hospodářského přejezdu - propustku .....	29
2.4.2	Studie pro umístění a posouzení transformačního účinku suché nádrže ...	33
3	Srovnání novosti postupů .....	44
3.1	Problematika návrhových srážek v Česku .....	44
3.1.1	Přehled dosavadního řešení problematiky návrhových srážek .....	44
3.1.2	Postupy zpracování problematiky návrhových srážek .....	45
3.1.3	Porovnání s jinými řešeními problematiky návrhových srážek .....	50
3.2	Přehled souvisejících metodik .....	51
4	Popis uplatnění certifikované metodiky .....	52
5	Ekonomické aspekty.....	53
6	Seznam použité související literatury .....	54
7	Seznam publikací, které předcházely metodice .....	57
8	Přílohy .....	60

## 1 Cíl metodiky

Metodika „Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině“ byla vytvořena v rámci projektu NAZV QJ1520265 „Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině“ řešeného v letech 2015 – 2017.

Cílem této metodiky je doplnění současného znalostního deficitu variability krátkodobých dešťů pro potřeby hydrologického modelování, navrhování staveb na drobných vodních tocích a úprav v ploše povodí. Metodika popisuje variabilitu a možné scénáře krátkodobých dešťů s ohledem na četnost jejich výskytu, vnitřní rozdělení intenzit a prostorové rozložení v rámci ČR. Tyto scénáře byly odvozeny z desetileté řady radarových dat adjustovaných dle měření pozemních pozorovacích stanic. Doposud byla v oblasti krátkodobých návrhových dešťů využívána data z relativně starých zdrojů Trupl (1958), Šamaj (1985), Hrádek (1994). Tato metodika rozšiřuje a doplňuje výše zmíněné zdroje s cílem zpřesnit a zefektivnit hydrologické modelování a navazující navrhování staveb především v ploše povodí a na drobných vodních tocích. Navrhování opatření sloužící k ochraně půdního fondu a rozvoje hospodaření, jako jsou komplexní pozemkové úpravy (KPÚ), protierozní opatření (PEO), protipovodňová opatření (PPO) nebo naopak opatření sloužící k zadržení vody v krajině, je zatíženo absencí dostupných kvalitních dat o návrhových srážkách. Podpora realizace těchto vodohospodářských staveb v ploše povodí a na drobných tocích je podporována dotačními tituly (MZe, MŽP, AOPK atp.) a lze tedy předpokládat uplatnění této metodiky při zpracování návrhů těchto opatření.

Praxe umožňuje použití simulačních modelů, pro něž jsou srážky často řídicím vstupem. Nevhodná volba jejich časového průběhu může způsobit nedostatečnou ochranu či naopak předimenzování a předražení výsledného návrhu. Metodika proto také slouží jako návod pro využití ve vybraných hydrologických modelech, respektive zástupcích dvou základních typů hydrologických modelů. Při jejich výběru byl kladen důraz na odlišnost způsobů řešení tak, aby byly postihnuty různé přístupy k modelování srážko-odtokových vztahů.

Z hlediska navrhování vodohospodářských staveb je metodika využitelná pro úpravy v ploše povodí. Na vodních tocích je určena především pro zpracování odborných studií, variantní řešení a předprojektovou přípravu. Její využití nijak nenahrazuje současnou právní úpravu danou ČSN 75 1400 - Hydrologické údaje povrchových vod (2014).

Popisované metody získání tvarů krátkodobých dešťů pro konkrétní lokalitu na území ČR jsou také implementovány do volně dostupných webových aplikací a nástrojů. Rozdělovníkem těchto služeb je stránka [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz).

Kapitola 2 je koncipována jako návod pro práci s návrhovými srážkami při navrhování opatření v krajině. V kapitole 3 jsou uvedeny teoretické základy uvedených metod a jejich vymezení vůči stávajícím postupům.

## 2 Vlastní popis metodiky

Vlastní metodika v této kapitole je členěna na čtyři části. Podkapitola 2.1 je věnována typům navrhovaných opatření, 2.2 popisuje využití hydrologických modelů a jejich rozdělení a obsahuje komentáře k nejčastěji využívaným nástrojům v ČR a požadovaným vstupním datům. Samostatnou podkapitolou 2.3 je popis metody odvození hyetogramů návrhových srážek a využití webových nástrojů a služeb umožňujících zefektivnění a automatizaci celého procesu. Metodickou část uzavírá kapitola 2.4, která obsahuje zpracování dvou typových úloh. Metodika je koncipována jako samostatně stojící a aplikovatelný dokument. V příloze publikované přehledové mapy jsou však vzhledem k velikosti tiskových stran spíše informativní. Ve větším detailu jsou přehledové mapy publikovány v podobě souboru map s odborným obsahem s názvem "Klasifikace povodí 4. řádu a návrhové krátkodobé deště". Pro maximálně efektivní využití metodiky je vhodné využít popsané mapové a processingové služby provozované na portálu *rain.fsv.cvut.cz*. Tyto služby jsou postaveny na otevřené (OpenSource) platformě tak, aby byla zajištěna udržitelnost těchto služeb nezávisle na licenční politice komerčních softwarů.

### 2.1 Vodohospodářská opatření v krajině

Dnes prováděné technické zásahy do krajiny mají splnit celou řadu funkcí a kritérií. Nejčastěji jsou navrhovány zásahy vedoucí k ochraně pozemků před nepříznivými vlivy povrchových vod. Vodohospodářská opatření jsou součástí plánu společných zařízení v rámci pozemkových úprav, projektů vedoucích k ochraně povodí, zadržování vody v krajině, zlepšení odtokových poměrů, nebo jsou součástí návrhů přírodně blízkých protipovodňových opatření. Konkrétně se jedná o prvky, které mají protierozní funkci, nebo prvky sloužící k bezpečnému zachycení či odvedení extrémních odtoků z řešené lokality, případně mají funkci opačnou – prvky sloužící k zadržení vody v ploše povodí. V rámci plánu společných zařízení jsou tato opatření navrhována v souvislosti se silniční a cestní sítí. Dále je možné tyto prvky spojit s vymezením koridorů v rámci Územního systému ekologické stability (ÚSES). Tyto prvky jsou sice primárně určeny pro migraci živočichů, ale při vhodné orientaci a dimenzích je možné vytvářet koridory a plochy, které budou mít zároveň i funkci vodohospodářskou.

Konkrétní typy opatření jsou popsány v předcházejících publikacích (Janeček 2012; Kadlec et al. 2014). Jednotlivé typy opatření jsou podle své funkce projektovány na jeden či více návrhových parametrů. Zde je uveden pouze výčet opatření v tabelární podobě s určením klíčového návrhového parametru (viz Tabulka 1). Pro dimenzování protierozních i drobných vodohospodářských staveb je nutná znalost pouze celkového objemu odtoku v případě retenčních a akumulčních prvků (např. retenčních příkopů), pouze kulminačního průtoku v případě odváděcích prvků (odváděcí příkopy, propustky apod.), znalost celého průběhu hydrogramu je pak nutná při návrhu retardačních opatření (např. suchá nádrž).



Tabulka 1: Přehled technických opatření v krajině a návrhový parametr.

Opatření	Návrhový objem	Návrhový průtok	Návrhová vlna
Terénní urovnávky			
Zasakovací příkop	X		
Zasakovací průleh	X		
Odváděcí průleh		X	
Odváděcí příkop		X	
Ochranné hrázky	X		
Ochranné nádrže	X		
Cesty s protierozní funkcí		X	
Objekty na hydrografické síti (propustek, mostek, hospodářský přejezd)		X	
Suchá nádrž			X
Rozlivy do údolních niv VT		X	
Úpravy na VT		X	

## 2.2 Využití hydrologických modelů

Hydrologické modelování představuje v současnosti jeden z nejpoužívanějších způsobů hodnocení potenciálních srážko-odtokových událostí. V malých povodích hovoříme buď o nepozorovaných profílech anebo o úpravách mimo vodní tok, kde další metody (vyhodnocení čar překročení, statistické zpracování měřených dat, analogie atp.) jsou kvůli chybějícím detailním pozorováním hydrologicky relevantních veličin využitelné jen velmi vzácně. Neznalost nebo spíše nemožnost popisu přesného stavu povodí a všech procesů v hodnoceném systému vyžaduje zavedení různé míry zjednodušení do výpočtů - použití určitého modelu.

Při aplikaci libovolného hydrologického modelu by jeho uživatel měl být obeznán s jeho předpoklady a omezeními. Rovněž s jeho výstupy je třeba zacházet s opatrností, neboť nejistoty v určení vstupních parametrů se mohou dramaticky podepsat na výstupech modelu. Proto je vhodné vždy, když je to možné, nejistoty v modelování snížit jednou z následujících metod (řazeno od nejvhodnější):

- kalibrace modelu na pozorovaných událostech.
- analýza nejistot, tj. modelování více srážko-odtokových scénářů s různými kombinacemi vstupních parametrů z rozumně definovaného intervalu (např. Ks dle rozpětí hodnot z terénního průzkumu).
- kalibrace modelu na jinak získané syntetické hydrogramy, např. zakoupené u ČHMÚ.

### 2.2.1 Typy modelů, principy

Hydrologických modelů existuje a je v praxi používán nespočet, liší se v mnoha aspektech např. úrovní podrobnosti popisu modelovaného systému a probíhajících procesů. Klasifikací hydrologických modelů opět existuje celá řada, uvedme několik základních hledisek jejich dělení.

- časové měřítko (kontinuální, epizodní).
- velikost domény (globální, regionální, povodí, pozemky či jednotlivé svahy).
- prostorové členění modelované domény (celistvé, částečně nebo plně-distribuované).
- složitost popisu procesů v modelovaném systému (datově orientované, konceptuální, fyzikálně založené).

Dalo by se uvažovat o celé řadě dalších hledisek a jejich detailnější kategorizaci, které jsou nad rámec této metodiky. Nejzásadnějším rozdílem mezi typy modelů je podrobnost popisu procesů. Zatímco datově orientované modely vycházejí pouze z empirického vztahu mezi daty typu vstup-výstup, fyzikálně založené modely se snaží matematicky popsat probíhající procesy a jejich interakce fyzikálními rovnicemi s co nejnižší, ale ještě efektivní mírou zjednodušení. Konceptuální modely pak představují širokou škálu přístupů mezi těmito krajními pohledy. Modelovaný systém většinou zjednodušují na několik komponent a popis jejich chování a interakcí může být i v rámci jednoho modelu na různých úrovních podrobnosti.

Pro dimenzování vodohospodářských opatření v krajině je možné se stejným výsledkem využít jednoduché konceptuální modely, stejně jako ty složité, fyzikálně založené. Zásadní je však časové měřítko, resp. kategorie epizodních modelů, neboť návrhové veličiny se získají modelováním odpovědi na vybranou příčinnou srážku. Kontinuální modely vyžadují kalibraci na měřených časových řadách, které zpravidla nejsou k dispozici vůbec, nebo je jejich pořízení nákladné. Shrnutí návodů, norem a metodik, které předcházejí vydání této metodiky a zabývají se hydrologickým modelováním, je uvedeno v kapitole 3.2.

Tabulka 2: Přehled modelů uváděných v českých metodikách, normách a odborných dokumentech.

Model	Prostorové dělení a měřítko	Časové měřítko	Parametry srážky	Metoda ef. srážky	Routing v ploše
Erosion 2D/3D	regionální	epizodní	hyetogram	A2	B3
WEPP	regionální / lokální	epizodní / kontinuální	hyetogram	A2	B3
DesQ / MaXQ	1, nebo 2 desky povodí do 10km <sup>2</sup>	epizodní	blokový déšť	B	B2
SMODERP 1D	1D svah	epizodní	hyetogram	A1	B3
SMODERP 2D	2D mikropovodí, distribuovaný	epizodní	hyetogram	A1	B1
SWAT	povodí, HRU - semidistribuovaný	kontinuální	řada úhrnů	A2 / B	D
KINEROS	semidistribuovaný	epizodní	hyetogram	C	B2
TOPKAPI	plně distribuovaný	kontinuální / epizodní	řada	D	B1
Topmodel	povodí, semidistribuovaný	kontinuální / epizodní	řada	D	C
MikeSHE	půdní profil až povodí, plně distribuovaný	epizodní / kontinuální	hyetogram, řada, mapy	A2 / A3	A
HMS	celiství, semidistribuovaný	epizodní / kontinuální	hyetogram	A2 / B / C	B1 / D
KINFIL	povodí, semidistribuovaný, kaskáda desek	epizodní	hyetogram	A2	B2
HydroCAD	malé povodí	epizodní	hyetogram	B	D

Tabulka 2 uvádí přehled epizodních modelů, jejichž použití bylo v českých podmínkách častěji zaznamenáno. Klasifikovány byly podle příbuznosti výpočetních metod, které určují podobu odezvy na příčinnou srážku. Konkrétně se jedná o metodu stanovení efektivní srážky a metodu transformace efektivní srážky do odtokové odezvy, tzv. routingu přímého odtoku. Jednotlivé kategorie podrobněji rozvádí Tabulka 3.

Tabulka 3: Výpočetní metody a kritéria pro klasifikaci epizodních modelů.

Metoda ef. srážky		Routing přímého odtoku	
A1	fyzikální, infiltrace dle Philipa	A	fyzikální, difuzní vlna
A2	fyzikální, infiltrace dle Greena&Ampta	B1	fyzikální, kinem. vlna na reálném 2D povrchu
A3	fyzikální, infiltrace dle Richardse	B2	fyzikální, kinem. vlna na koncept. povrchu
B	konceptuální (SCS-CN aj.)	B3	fyzikální, kinem. vlna na 1D profilu
C	empirická (exp. pokles aj.)	C	typ Topmodel (travel time function)
D	typ Topmodel	D	hydrogram
E	konceptuální, systém nádrží	E	konceptuální, systém nádrží

## 2.2.2 Komentář k vybraným modelům v ČR

Když pomíneme modely čistě pro výpočet erozního ohrožení, obsahují české normy a metodiky uvedené v kapitole 3.2 dále popsané srážkoodtokové modely. Strukturou a šíří využití sahají na jedné straně od konceptuálních a hojně využívaných modelů (např. model HMS využívající metodu odtokových křivek CN, DesQ-MaxQ atp.), po fyzikálně založené a původně spíše výzkumné modely (například SMODERP, KINFIL) na straně druhé. Cílem této kapitoly je poukázat na současný stav v metodikách uváděných modelů a usnadnit uživatelům orientaci při výběru vhodného nástroje. Modelovací prostředky se stále vyvíjejí, a tak je vhodné jejich současný stav a možnosti využití sledovat.

### SCS-CN v kombinaci s jednotkovým hydrogramem

Metoda odtokových křivek SCS-CN (SCS 1986) je v českých podmínkách jednou z nejrozšířenějších metod pro výpočet úhrnu efektivní srážky. Tato metoda byla integrována do řady komerčních i otevřených modelových prostředků, např. volně dostupného HEC-HMS či HydroCAD. Výpočetní vztahy lze nalézt v dříve platných metodikách, např. Janeček (2012), v této metodice budou uvedeny pouze základní vztahy a nová doporučení.

#### Objem přímého odtoku

Metoda CN odvozuje výšku přímého odtoku ze zákona zachování objemu a z předpokladu, že poměr odtokové výšky k srážkovému úhrnu bez počátečních ztrát (intercepce, povrchová retence) je roven poměru infiltrované části srážky k maximální potenciální retenci. Základní vztah pro určení odtokové výšky uvádí rovnice (2.1):

$$H_0 = (H_s - I_a)^2 / (H_s - I_a + A) \quad (2.1)$$

kde:  $H_0$  je výška přímého odtoku (mm),  
 $H_s$  celkový úhrn srážky (mm),  
 $I_a$  počáteční ztráty (mm),  
 $A$  maximální potenciální retence (mm).

Z rovnice (2.1) je zřejmé, že metoda CN nezohledňuje průběh vstupní srážky. S využitím vstupního hyetogramu příčinné srážky lze sice touto metodou odvodit i hyetogram efektivní srážky (rozdělení odtokových výšek vznikajících v jednotlivých časových krocích), celková odtoková výška ze dvou srážek s totožným úhrnem, ale odlišnými průběhy, je však vždy stejná. Metoda nerozlišuje mezi příčinnou srážkou v podobě rovnoměrného deště nízké intenzity a přívalovou srážkou, což neodpovídá fyzikálním principům tvorby přímého odtoku. Počáteční ztráty  $I_a$  se vyjadřují jako procentuální podíl maximální potenciální retence  $A$ , viz rovnici (2.2):

$$I_a = \lambda \cdot A \text{ (mm)} \quad (2.2)$$

Jako poměrový koeficient  $\lambda$  je osvědčená hodnota 0,2, ale v odůvodněných případech lze použít jinou. Např. pro urbanizovaná hladká povodí bez výrazné vegetace ve výši 10 %, pro povodí s členitým povrchem a hustou vegetací ve výši 25 %.

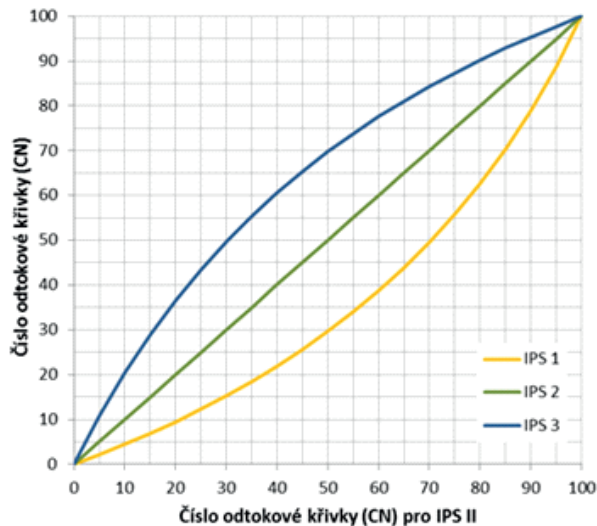
Maximální potenciální retence  $A$  se určí na základě čísla odtokové křivky CN pro zvolený stupeň předchozího nasycení dle vztahu (2.3):

$$A = 25,4 (1000 / CN_{IPS} - 10) \text{ (mm)} \quad (2.2)$$

Stupeň předchozího nasycení je charakterizován pětidenním indexem předchozích srážek (IPS) a nabývá hodnot 1–3. Hodnoty  $CN_2$  se odvozují na základě tabelovaných kombinací hydrologické skupiny půdy A–D a kategorií půdního pokryvu. Lze je nalézt v platných metodikách, např. Janeček (2012). Nové poznatky z analýzy výskytu různých typických průběhů srážek ukazují, že ve významném množství případů dochází k výskytu intenzivních srážek za vlhkých podmínek. Více k tomuto tématu v kapitole 2.3.2. V těchto případech je vhodné předpokládat pro výpočet i třetí, nasycený stav daný IPS 3. Naopak uvažovat stav povodí jako zcela nenasycený ( $CN_1$ ) se na základě provedených analýz jeví jako neopodstatněné. Pro přepočtení hodnoty  $CN_2$  na ostatní stavy nasycení lze použít následující vztahy (2.4) a (2.5), graficky jsou hodnoty znázorněny na obrázku 1.

$$CN_1 = 4,2 CN_2 / (10 - 0,058 CN_2) \quad (2.4)$$

$$CN_3 = 23 CN_2 / (10 + 0,13 CN_2) \quad (2.5)$$



Obrázek 1: Čísla odtokové křivky pro indexy předchozího nasycení IPS 1–3.

Kulminační průtok, hydrogram odtoku

Pro odvození návrhového kulminačního průtoku nabízí Janeček (2012) do českých podmínek lokalizovanou grafickou metodu podle SCS-CN. Pro kulminační průtok podle ní platí jednoduchý vztah ve tvaru (2.6):

$$Q = 0,00043 \cdot q_{pH} \cdot P_p \cdot H_o \cdot f \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.6)$$

kde  $q_{pH}$  je jednotkový kulminační průtok ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ),  
 $P_p$  plocha povodí ( $\text{km}^2$ ),  
 $H_o$  odtoková výška (mm),  
 $f$  opravný součinitel pro rybníky a mokřady (-).

Jednotkový kulminační průtok se určuje na základě dvou nomogramů podle CN, poměru počáteční ztráty  $I_a$  k 24hodinovému maximálnímu úhrnu deště  $H_s$  a doby koncentrace řešeného povodí. Nicméně ze vztahu (2.6) je opět patrné, že kvůli aplikaci na celkový úhrn efektivní srážky (odtokovou výšku) nebere v úvahu průběh příčinné srážky, což lze pro určení kulminačního průtoku považovat za výraznější nedostatek než v případě určení objemu odtoku.

Korektnější alternativou je stanovení průběhu odtoku, potažmo kulminačního průtoku, transformací hyetogramu efektivní srážky do odtokové odezvy. K tomu je možné využít např. metodu jednotkového hydrogramu. Jedná se o jedno- či víceparametrickou matematickou funkci rozkládající každý srážkový impulz do dílčí odtokové vlny, výsledný hydrogram pak vzniká jejich součtem.

Tímto způsobem se průběh příčinné srážky, resp. její efektivní části, promítne do průběhu a kulminace odtokové odezvy. Pro ruční výpočet je možné použít originální metodiky, pro větší efektivitu je doporučeno využít simulačních nástrojů, např. volně dostupný HEC-HMS.

Parametrem určujícím tvar hydrogramu je nejčastěji doba zpoždění  $TL$ , případně doba koncentrace  $TC$ . Pro její výpočet Janeček (2012) uvádí opět do českých podmínek lokalizovanou jednu z metod SCS, která pracuje s rozdělením nejdelší odtokové dráhy na část plošného, mělkého koncentrovaného a korytového odtoku. Pro každý úsek zvlášť poté uvádí vztahy a nomogramy pro výpočet doby doběhu, potažmo celkové doby koncentrace. Použití této metody výpočtu  $Tc$  jako parametru pro jednotkový hydrogram však může poskytovat nekonzistentní výsledky. Proto se doporučuje využít vztahů odvozených pro daný typ hydrogramu a integrovaných přímo do zvoleného simulačního nástroje. Jako vstupní parametry jsou pak po uživateli požadovány zpravidla jen běžné morfologické charakteristiky povodí, jako je průměrný sklon či maximální délka odtokové dráhy, které lze snadno odvodit z běžných datových podkladů v kterémkoliv prostředí GIS.

Na druhé straně proti popsaným nevýhodám metody SCS-CN stojí výhoda její výpočetní jednoduchosti, která umožňuje automatizaci a rychlý výpočet. V případě využití modelu HMS má uživatel k dispozici v rámci výpočetního nástroje i modul pro citlivostní analýzy, v němž lze snadno definovat rozsah a statistické rozdělení hodnot vybraného parametru a řádově během minut vyčíslit stovky realizací. Výsledkem je pak jednoduché statistické zobrazení rozptylu a charakteristik modelovaných hydrogramů, které může sloužit pro odhad nejistot v modelovaných návrhových charakteristikách a volbu jejich výsledné hodnoty dle preferované úrovně zabezpečení.

## SMODERP

Tento fyzikálně založený srážko-odtokový model je přímo zacílen na navrhování drobných staveb v krajině. Jedná se o epizodní model, jehož výsledky lze využít k získání příslušných návrhových parametrů. V modelu jsou zahrnuty procesy infiltrace (Philipova rovnice) i povrchové retence. Tento model se v podobě profilové verze (1D) objevuje v předcházejících metodikách, např. (Janeček 2012; Kadlec et al. 2014). Model je dostupný na stránkách Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulty stavební, ČVUT v Praze ([storm.fsv.cvut.cz](http://storm.fsv.cvut.cz)). Vývoj profilové verze modelu byl již ukončen a byl nahrazen prostorovým řešením (2D), v němž jsou kromě plošného odtoku zahrnuty procesy soustředěného odtoku v rýhách a odtok ve vodních tocích. Nově vyvíjená verze modelu SMODERP ve formě 2D je koncipována tak, aby bylo možné využít běžně dostupná data o půdě, vegetaci a morfologii (viz kapitola 2.2.3). Doporučené střední hodnoty jednotlivých parametrů jsou součástí manuálu k modelu. Současná verze využívá prostředí ArcGIS, do budoucna je plánováno poskytnutí verze modelu pro volně dostupné GIS prostředí (QGIS, GRASS).

## MikeSHE

Jedná se o jeden z modelů rodiny MIKE od dánské společnosti DHI s celosvětovou působností v oblasti vodního hospodaření a plánování. Zaměřený je na modelování procesů v povodí pomocí prostorově distribuovaného fyzikálního přístupu. Ve vztahu k této metodice lze model doporučit stejně jako jakýkoliv plně distribuovaný fyzikální model. Tyto modely zpravidla akceptují jako vstupní data libovolnou časovou distribuci zátěžových srážek. Tvary návrhových srážek publikované v této metodice tak lze v MikeSHE lze bez omezení využít. Z hlediska složitosti výpočetních metod se struktura modelu v MikeSHE liší v závislosti na zakoupené licenci. Lze si vybrat z celé palety výpočetních metod, například v oblasti infiltrace od jednoduchých konceptů přes metodu Green&Ampt až po Richardsovu rovnici včetně preferenčního proudění v makropórech. Nesaturovaná zóna je jako v naprosté většině modelů zaměřených na hydrologii povodí řešena pouze v 1D, MikeSHE tedy není schopen modelovat laterální složky podpovrchového odtoku. Hlavní devizou tohoto modelu je právě zmíněná komplexnost řešení, která je však vykoupena nároky na vstupní data. Za hlavní nevýhodu lze považovat značnou pořizovací cenu.

## KINFIL

Model KINFIL je založen na kombinaci teorie infiltrace a transformace přímého odtoku kinematickou vlnou. Současná verze modelu KINFIL je založena na infiltrační teorii Greena a Ampta se zavedením koncepce výtoky podle Meina – Larsona a MorelSeytoux. Model je určen přednostně pro stanovení návrhových průtoků pro různé „scénáře“ dané lidskou činností, jako je změna kultur, odlesnění, urbanizace aj. Průběh povrchového odtoku je řešen pomocí kinematické vlny na konceptualizovaném virtuálním povrchu. Ten může být reprezentován jako jednoduché geometrické útvary (kaskáda rovinných desek, konvergentní nebo divergentní segmenty), pro něž existuje matematické řešení kinematické vlny. Model zahrnuje i komponentu pro soustředěný odtok v úsecích říčních koryt. KINFIL je spíše autorský software určený pro vědecké účely, jeho využití v běžné praxi je nesnadné. Pro jeho využití je doporučeno kontaktovat autory. Více informací lze nalézt na <http://fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>.

## Erosion 2D/3D

Fyzikálně založený Erosion (von Werner 2006) je epizodní distribuovaný model srážko-odtokových vztahů, erozních a transportních procesů, primárně odvozený pro prostředí Saska. Tento model je zaměřen především na erozní problematiku, ale lze jej použít i pro výpočet množství protékající vody v každém výpočetním elementu zvolené oblasti. Obtížnost nasazení modelu pro podmínky v ČR spočívá především v určení vlastností půd. Katalogové parametry vycházejí ze standardu KA4 (AG BODEN 1994) a jsou odvozeny a kalibrovány na území německého Saska. Převod klasifikačních systémů půd používaných v ČR je v současnosti prakticky nemožný a je nutné vycházet z analýzy odebraných půdních vzorků. Minimálním potřebným rozbohem je zrnitostní složení půdy, podle kterého je půdu možné zatřídit dle standardu KA4 (klasifikační půdní systém pro Sasko).



Výstup z modelu tvoří soubor rastrových vrstev pro jednotlivé výstupní veličiny, mimo jiné i objem odtoku a průtok. Tyto vrstvy je možné ukládat pro každý časový krok simulace. V případě použití dodatečného modulu pro sledování odtoku je možné definovat profily (buňky rastru), z nichž jsou hodnoty výstupních veličin ukládány jako časové řady v tabelované podobě.

Soustředěný povrchový odtok je simulován odděleně od plošného povrchového odtoku, tím je umožněno sledovat průtok například v korytě vodního toku. Geometrie koryta a jeho další hydraulické vlastnosti však nejsou do modelu nijak zadány a pohyb vody po povrchu je simulován pouze modelem kinematické vlny na buňkách rastru, což je nutné zohlednit při vyhodnocení výsledků spojených se soustředěným odtokem.

Možnou adaptací modelu pro prostředí ČR se zabývá pracoviště Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství, FSv, ČVUT v Praze a VÚMOP v.v.i. Model Erosion 3D je dostupný pouze v komerční verzi (<http://www.geognostics.de>).

#### **WEPP**

Model pro předpověď vodní eroze (WEPP) je fyzikální model založený na základech hydrologie, znalosti fenofází rostlin, hydraulice a mechanice eroze. Model poskytuje různé druhy výstupů, včetně vodní bilance (povrchový, podpovrchový odtok a evapotranspirace), eroze, transport a sedimentace půdy. Model WEPP se od svého uvedení v roce 1995 nepřetržitě vyvíjí a je použitelný pro celou řadu oblastí (např. zemědělství, lesní hospodářství, lesnictví, rybolov a další.) Tento model v USA nahrazuje široce rozšířenou rovnici výpočtu ztráty půdy USLE, lze jej využít i pro stanovení charakteristik odtoku. Model pracuje s celou řadou parametrů, které byly verifikovány pro USA. Chybějící verifikace a vstupní data jeho využití v ČR znesnadňují.

#### **DesQ-MaxQ**

Komerční software DesQ-MaxQ je jednoduchý nástroj pro odvození objemu odtoku metodou CN a průběhu odtoku metodou jednotkového hydrogramu. Kvůli nedostatkům metody CN popsaným v kapitole 2.2.2.1 nezohledňuje tento nástroj průběh příčné srážky při výpočtu objemu odtoku. Z hlediska určení kulminačního průtoku má jistá omezení. Úhrn návrhové srážky odvozuje metodou redukce uživatelem zadaných 24hodinových maximálních úhrnů na zvolenou dobu trvání. Zadání tvaru návrhového hyetogramu ale DesQ-MaxQ neumožňuje, a protože tak uvažuje intenzitu příčné srážky za konstantní, není možné pomocí tohoto modelu věrně simulovat odezvy na časově proměnlivé srážky.

### 2.2.3 Vstupní data pro hydrologické modelování

Výše zmiňovaná nutnost hydrologického modelování při navrhování vodohospodářských opatření v ploše povodí je podmíněna dostupností a kvalitou vstupních dat. Na tom také do jisté míry závisí rychlost, přesnost a cena zpracování hydrologické studie i návrhu konkrétních opatření.

Získání vstupních dat může být částečně zpoplatněno. Cenu za poskytnutí dat nelze jednoznačně stanovit. Data jsou poskytována různými správci s různou a měnící se cenovou politikou. Některá data jsou k dispozici bezplatně např. jen státním institucím s možností poskytnutí třetím stranám právě pro zpracování studií a projektů. Obecně lze ale říci, že dostupnost dat se zvyšuje a dochází k postupnému zveřejňování dříve těžko dostupných dat, v poslední době např. prostorových dat HPJ, klíčových pro určení hydrologické skupiny půd.

Konkrétní modely vyžadují specifické parametry, které je možné rozčlenit do čtyř skupin. Jedním ze zásadních podkladů jsou návrhové srážky, těm je věnována samostatná kapitola 2.3. Dále to jsou data popisující morfologii, vlastnosti půd a využití území a jeho aktuální stav z hlediska nasycení. Pro inženýrskou praxi jsou dostupné, pro modelování použitelné a autory této metodiky ověřené následující datové zdroje.

#### Digitální model terénu

Hlavním vstupem většiny hydrologických modelů je vhodně ošetřený digitální model reliéfu. V současné době je dostupný model DMR 4G (cuzk.cz) v podobě rastru s prostorovým rozlišením 5 x 5 m, případně detailnější model DMR 5G, který je poskytován jako mračno bodů. Toto relativně podrobné rozlišení modelu může v některých případech značně prodloužit výpočetní dobu, pak je možné uvažovat o převzorkování na rozlišení 10 x 10 m.

Velmi často, zejména pro použití ve fyzikálních modelech povrchového odtoku, je třeba vstupní model upravit, aby byl hydrologicky korektní (odstranění bezodtokých míst, úprava směřování odtoku dle tras vodních toků či jiných významných liniových prvků měnících odtokové poměry). Ověřený postup úpravy DMR uvádí např. Krása et al., (2013) nebo Rosendorf (2016). Základem v těchto publikacích popisovaných metod je snížení buněk v modelu terénu podél vodních linií a vyplnění bezodtokých míst s využitím běžných GIS technik.

V méně podrobném rozlišení je pak dostupný SRTM 25. Jedná se o globální datovou sadu digitálního modelu terénu vytvořeného v rámci mise Shuttle Radar Topography Mission vedené americkými organizacemi NASA a NGA. V nejnovější verzi datové sady je území ČR pokryto v prostorovém rozlišení 30 m, výšková přesnost se pohybuje kolem 16 m.

EU-DEM je evropský produkt digitálního modelu terénu pořízený v rámci programu Copernicus pod záštitou Evropské komise a DG Enterprise and Industry. Data jsou poskytována v souřadnicovém systému EU-LAEA (EPSG 3035) v prostorovém rozlišení 25 m. Jedná se o hybridní produkt založený na SRTM a ASTER GDEM.

### **Půdní pokryv (LandCOVER / LandUSE)**

Data o využití území jsou dostupná jak ve vektorové, tak rastrové podobě. Na stránkách MŽP je po registraci zdarma dostupná vrstva CORINE LandCover. Ve větším detailu je možné data o povrchu odvodit z databáze ZABAGED. Z vrstev je možné získat informace o plochách, liniových prvcích, cestní síti, vodních tocích. Využití území je možné na zemědělské půdě zpřesnit na základě dat LPIS. Převod liniových prvků na plošné je vhodné jen u prvků šířky srovnatelné se zvoleným rozlišením DMT, např. u dálnic a silnic první třídy. Rozumnou volbou podrobnosti pro účely hydrologického modelování je spojení vstupních vrstev do přiměřeného množství kategorií. Vhodné členění může být například:

- Orná půda
- Travní porosty
- Ostatní zeleň
- Vodní plochy
- Sady
- Křovinaté porosty
- Lesní porosty
- Antropogenní a zpevněné plochy
- Zahrady

V kategorii zpevněných ploch jsou zařazeny jak oblasti zástavby, tak zpevněné komunikace s přiměřeným rozšířením podle kategorie silnice. Orientační hodnoty poměrné plochy listové (Ppl), potenciální intercepce (Pi), povrchové drsnosti a retence jsou uvedeny v příloze v Tabulka 17.

### **Půdní data**

Z hlediska půdních dat jsou obecně v ČR v rozumném měřítku podrobnosti k dispozici tři datové zdroje. Syntetická půdní mapa v měřítku 1: 250 000 (KPP250), která vychází z komplexního průzkumu půd. Jedná se o základní zdroj dat odvozený z předešlé tištěné mapy, čemuž také odpovídá měřítko podrobnosti dat.

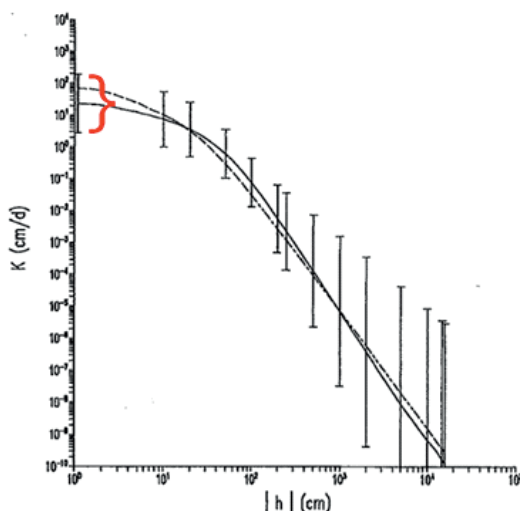
Po rozdělení půdního fondu na lesní a zemědělskou půdu jsou dalšími zdroji oddělené databáze pro tyto dvě skupiny. Na zemědělské půdě je dostupná půdní typologie (ve formě kódu BPEJ, resp. HPJ), v současné době uvolněn a k využití na portálu SPÚ.

Půdní druhy vyjadřující zrnitost ornice a podorničí podle Novákovy klasifikace je možné získat na VÚMOP v.v.i., dle aktuálního ceníku jako vektorovou vrstvu ve formátu shp. Dále jsou na portálu kpp.vumop.cz dostupné informace o konkrétních půdních sondách průzkumu KPP (kpp.vumop.cz).

Pro u nás značně rozšířenou metodu výpočtu efektivní ztráty SCS-CN je nutným vstupem zatřídění půd do hydrologických skupin. Pro zemědělské půdy je v literatuře dostupný převodní klíč pro určení hydrologických charakteristik půd na základě HPJ (Janeček 2012).

V případě lesních půd, lesnické typologie a informací o půdních charakteristikách je dostupnost omezená. Veřejně jsou kódy lesnické typologie, ale metodika pro převod kódované informace na hydrologické vlastnosti půd (Macků 2012) není veřejně dostupná. Hloubka lesních půd, zrnitostní složení a některé další charakteristiky jsou k dispozici na Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHUL), ale jejich poskytnutí vyžaduje součinnost s uvedeným úřadem. Tato data nejsou běžně poskytována veřejnou službou jako v případě uvolněných dat BPEJ na zemědělské půdě.

V případě využití fyzikálních hydrologických modelů jsou pro modelování infiltrace klíčovým vstupem hydraulické charakteristiky půd, zejména (a často pouze ona) nasycená hydraulická vodivost  $K_s$ . Tato veličina je závislá na řadě půdních charakteristik, nejčastěji je vztahována k jejímu zrnitostnímu složení. Regionalizované informace o zrnitosti půd lze v ČR získat z výše jmenovaných datových zdrojů. Průměrné hodnoty  $K_s$  pro jednotlivé zrnitostní třídy, tzv. pedotransferové funkce založené na rozsáhlých půdních databázích, lze nalézt zejména v zahraniční literatuře (Wösten et al. 1999; Tóth et al. 2015), v českých podmínkách je k dispozici počtem analyzovaných vzorků značně omezená databáze HYPRES-CZ (Miháliková et al. 2013). Obecně se však jedná o velmi variabilní data, vzhledem k enormnímu rozptylu hodnot (jeden až dva řády, viz Obrázek 2) je pro snížení nejistot v hydrologickém modelování velmi žádoucí zajistit alespoň základní půdní rozbor v řešené lokalitě. Kromě dostupnosti prostorových dat a variability hodnot napříč jednotlivými databázemi do celého procesu určení hydraulických charakteristik vstupuje další komplikace v podobě nesouladu v klasifikaci půd na lesní půdě (USDA) a zemědělské (Nováková klasifikace). Syntéza těchto dat není triviální a jde za rámec této metodiky.



Obrázek 2: Střední hodnoty a rozptyly křivky hydraulické vodivosti hrubozrnné půdy v závislosti na sacím tlaku. Pro hodnotu  $h=0$  odpovídá nasycené hydraulické vodivosti, patrný je rozptyl v rozsahu stovek  $\text{cm/d}$ . Převzato z Wösten (1999).

## 2.3 Návrhové srážky a jejich prostorové zastoupení

Klíčovými údaji pro hydrologické modelování jsou úhrn srážky, její rozložení v čase a aktuální stav povodí. Velikost a tvar hydrogramu jsou výsledkem komplexního působení celé řady faktorů, takže obecně není možné předpokládat, že zátěžová srážka určité doby opakování vyvolá odtok o stejné době opakování. Pro nepozorované profily a opatření navrhovaná v ploše povodí je však právě modelování odezvy na srážky s určitou dobou opakování pro potřeby běžné inženýrské praxe prakticky jediným použitelným řešením.

Krátkodobé srážky jsou charakteristické svojí plošnou i časovou variabilitou. Území ČR není homogenní ani z hlediska statistického rozdělení úhrnů srážek, ani z hlediska variability jejich průběhů. Tato metodika proto charakterizuje návrhové srážky nejprve z hlediska jejich typických průběhů (kap. 2.3.1) s návazností na pravděpodobnost jejich výskytu v kombinaci s určitým stupněm předchozí srážkové činnosti (kap. 2.3.2). Poté popisuje plošné zastoupení charakteristických průběhů srážek (kap. 2.3.3) v závislosti na uvažované době opakování srážky (kap. 2.3.4). Odvození bylo provedeno na základě desetileté řady adjustovaných radarových dat, podrobný popis viz kapitola 3.1.2.

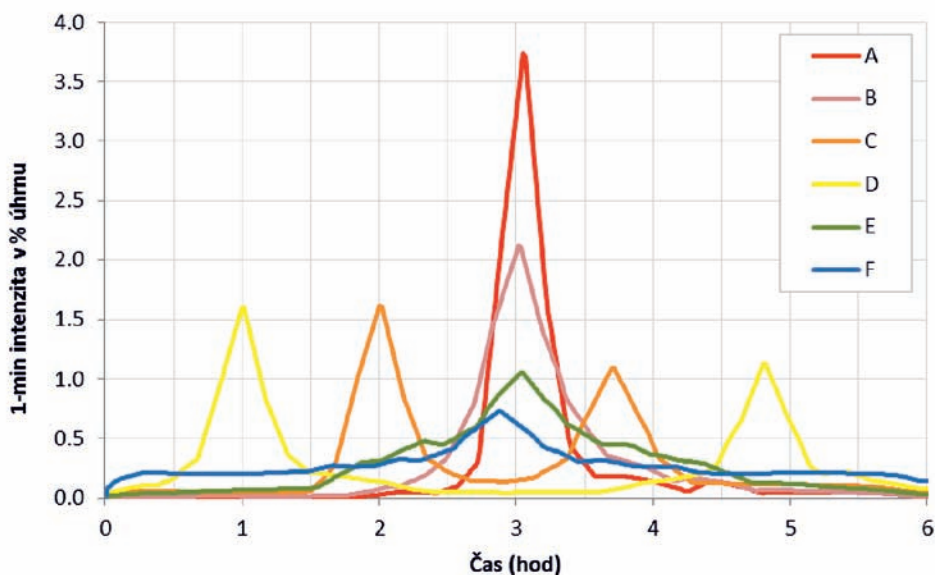
### 2.3.1 Průběh návrhových srážek

Průběh návrhové srážky zásadně ovlivňuje hydrologickou odezvu. Rozmanitost průběhu reálných srážek je natolik velká, že aproximace průběhu návrhové srážky jediným syntetickým diagramem je velmi zjednodušující. Metodika předkládá

řešení ve formě šesti syntetických hyetogramů (tvarů) šestihodinových srážek, které byly odvozeny z reálných srážkových epizod pro celé území ČR. Jako základní délka uvažované srážky bylo zvoleno šest hodin jako vhodný kompromis mezi denním úhrnem, který je z hlediska doby koncentrace v malém povodí příliš dlouhým časovým úsekem, a hodinovým úhrnem, který zpravidla nezahrnuje celou příčinnou srážku. Do šesti hodin navíc koncentruje denní návrhové úhrny dvojice tzv. UFA-hyetogramů, navržených Kulasovou a kol. (2004) pro území ČR s výjimkou horských oblastí (viz kapitola 3.1.1). Tvary návrhových srážek byly odvozeny pomocí trojice indexů, vyjadřujících míru koncentrace srážek v různě dlouhých časových úsecích. Detailní popis odvození návrhových hyetogramů je uveden v kapitole 3.1.2.

Šest syntetických průběhů šestihodinových srážek pro území ČR je zobrazeno na Obrázek 3 a tabelárně prezentováno v přílohách (Tabulka 16). Tvary hyetogramů jsou označeny písmeny A až F. Čtveřice tvarů A, B, E a F má jednoduchý průběh, přičemž tvar A reprezentuje epizody nejvíce koncentrované v čase a naopak tvar F nejméně koncentrované epizody.

Teoretické hyetogramy byly konstruovány tak, aby podíly maximálních úhrnů za 3, 2, 1 a 0,5 hodiny odpovídaly průměrným podílům během reálných srážkových epizod, a to včetně jejich načasování v rámci šestihodinového časového okna. V souladu s pozorováními byly odvozeny i tvary C a D, které se vyznačují dvěma vrcholy s různě dlouhým poklesem mezi nimi. Při jejich konstrukci byla uvažována dvojice krátkodobých maxim, naopak případná možnost výskytu tří nebo více vrcholů srážkové intenzity během šesti hodin není vyjádřena samostatným syntetickým tvarem kvůli zanedbatelné četnosti.



Obrázek 3: Šestice syntetických průběhů šestihodinových srážek pro území ČR.

Průběhy šesti uvažovaných variant jsou vyjádřeny jako relativní podíl množství srážek v jednotlivých minutách vůči šestihodinovému úhrnu, což umožňuje aplikovat dané tvary na srážku o libovolném úhrnu. Tabelárně jsou pak relativní průběhy agregované do 5minutového kroku součástí přílohy v kapitole 8. Pro šestihodinový úhrn srážky daného úhrnu, který odpovídá zvolené době opakování, je tak možné určit průběh srážkové intenzity. Takto konkretizované tvary návrhových srážek pro jednotlivá malá povodí ČR je možné získat v rámci webové služby "Tvary návrhových srážek" provozované na <http://rain.fsv.cvut.cz/>. V rámci této služby je možné návrhové tvary vizualizovat do grafu, nebo stáhnout v pětiminutovém rozlišení jako .csv soubor.

Metodika pokračuje v následující podkapitole zpřesněním průměrného stupně předchozí nasycenosti, které je založeno na zjištěné závislosti předchozí nasycenosti na tvaru a velikosti návrhové srážky.

### 2.3.2 Předchozí nasycenost na počátku návrhových srážek

Předchozí nasycenost je dalším důležitým parametrem ovlivňujícím reakci povodí na návrhovou srážku. Spoluurčuje aktuální infiltrační kapacitu půdy a retenční schopnost řešeného území. V metodě SCS-CN je tento parametr zahrnut v podobě indexu předchozí srážky určujícím úroveň hodnoty CN (IPS 1–3), ve fyzikálně založených modelech pak podle zvoleného infiltračního vztahu (Sorptivita v případě Philipovy rovnice, počáteční nasycenost a sací tlak u metody Green&Ampt atd.).

Vzhledem k podstatným rozdílům v časové distribuci intenzit mezi šesti syntetickými tvary návrhových srážek je třeba předpokládat i podstatné rozdíly v množství srážek před jejich počátkem, a to nejen v řádu hodin. Největší předchozí srážky lze očekávat u rovnoměrných srážek reprezentovaných návrhovým tvarem F, neboť ten se vyskytuje i ve srážkových událostech značně delších než šest hodin. U větší šestihodinové srážky pak bude v průměru větší i předchozí srážka, proto byla nasycenost analyzována zvlášť pro různé intervaly doby opakování srážek. Pro každý tvar a interval doby opakování byla určena průměrná předchozí nasycenost, a to na základě reálných srážkových epizod z celého území ČR (radarové a pozemní měření za deset let). Vyhodnoceny byly srážkové úhrny během 6, 24, 72 a 120 hodin (tedy ¼, 1, 3 a 5 dní) před počátkem uvažované epizody.

S ohledem na metodu SCS-CN, která využívá pro rozlišení stavů předchozího nasycení IPS 1–3 prahové hodnoty úhrnu za předchozích 5 dní s rozlišením typu sezony (Tabulka 4), byly pětidenní úhrny vybrány jako hlavní kritérium předchozího nasycení. Tabulka 5 uvádí průměrné pětidenní úhrny před srážkovými epizodami určitého tvaru pro různou dobu opakování, a to bez ohledu na místo výskytu v rámci ČR. Z porovnání s prahovými hodnotami pro vegetační období v Tabulka 4 by se mohlo zdát, že pouze srážkám tvaru F s dobou opakování

přes 15 roků přísluší hodnoty CN3, slabším srážkám téhož tvaru odpovídá CN2, kdežto všem ostatním tvarům CN1. Zcela pochybnou validitu intervalů pro přiřazení hodnot CN na území ČR prokazuje Tabulka 6, v níž jsou hodnoty z Tabulky 5 vyjádřeny relativně k velikosti průměrného pětidenního úhrnu v ČR ve vegetačním období. Jeho velikost (12 mm) byla stanovena z průměrných měsíčních úhrnů za normálové období 1961-1990. Z Tabulky 6 vyplývá, že pouze v případě nejvíce koncentrovaných srážek tvaru A a B s delší dobou opakování je předchozí nasycenost, vyjádřená pětidenním úhrnem srážek, mírně pod normálem, avšak zpravidla jen o 5 až 10 %. Pro návrhové srážky těchto tvarů proto doporučujeme používat průměrnou úroveň nasycení (např. u metody CN hodnoty pro IPS 2), stejně jako pro srážky tvaru C s dobou opakování do 25 roků (viz barevné rozlišení v Tabulce 6). Pro delší doby opakování srážek tvaru C a všechny ostatní tvary návrhových srážek bez ohledu na dobu opakování je třeba uvažovat i vyšší stupeň nasycení, přičemž v případě srážek tvaru F s dobou opakování 15 roků a více překračuje průměrná nasycenost normál více než pětinásobně.

Mimo celkový objem srážky byl také testován index předchozích srážek ( $API_5$ ) za 5 dní podle běžně využívané metody inverzní váhy srážek minulých dní. Pro hodnoty  $API_5$  vycházejí výsledky obdobně jako v případě pětidenních úhrnů.

V případě fyzikálně založených modelů, které využívají matematický popis infiltrace, je třeba zohlednit aktuální stav nasycení podle infiltrační rovnice příslušného modelu. Pro tyto účely jsou dále uvedeny v Tabulce 7 až Tabulce 9 procentuálně relativní průměrné úhrny předchozích srážek také pro časové úseky kratší než pět dní, a to opět ve vztahu k příslušným normálům a pro celé území ČR. Pomocí těchto průměrných šestihodinových, denních a třídních relativních předchozích úhrnů je možné vypočítat průměrný vývoj nasycenosti před návrhovou srážkou určitého tvaru a s danou dobou opakování. Vyplývá z nich, že v případě návrhových srážek tvaru A a B je šestihodinová předchozí srážka oproti normálu výrazně snižena, v případě tvaru A zhruba na 50%. Naopak 24hodinová srážka bývá oproti normálu mírně zvýšená, a to především u slabších epizod tvaru B. Toto zvýšení lze zřejmě vysvětlit opakováním odpoledních přivalových srážek v délce trvání kolem jedné hodiny dva nebo i více dní po sobě. Pro ostatní tvary je i krátkodobá nasycenost v průměru výrazně nadnormální, přičemž v případě srážkových epizod tvaru F s dobou opakování nad 25 let překračuje srážkový úhrn za předchozích šest hodin normál v průměru více než 20krát, neboť tyto srážkové události zpravidla podstatně přesahují uvažovanou délku trvání srážky šest hodin.

U fyzikálních modelů je třeba u rovnoměrného tvaru návrhové srážky (F) zohlednit vyšší stupeň nasycenosti na počátku simulace prakticky vždy. U ostatních tvarů je nutné zvážit vyšší stupeň počátečního nasycení v případě půd s nižší schopností infiltrace. Naopak žádný tvar nelze spojovat s podmínkami odpovídajícími suchému stavu.



Tabulka 4: Prahové hodnoty pro rozlišení stavů předchozího nasycení 1–3 v metodě SCS-CN pro mimo vegetační a vegetační období (Mishra, 2003).

Index předchozích srážek	Celkový úhrn v předcházejících pěti dnech (mm)	
	Mimo vegetační období	Vegetační období
IPS 1	< 13	< 36
IPS 2	13 - 28	36 - 53
IPS 3	> 28	> 53

Tabulka 5: Průměrné pětidenní úhrny (mm) před návrhovými srážkovými epizodami šesti tvarů a pro různé intervaly doby opakování.

Interval dob opakování	Tvary srážek					
	A	B	C	D	E	F
1,5 - 2,5	11,6	12,7	12,9	18,8	17,7	33,8
2,5 - 4	11,6	12,7	13,0	19,6	19,7	38,3
4 - 7,5	11,8	12,5	13,5	19,9	22,1	42,8
7,5 - 15	11,5	12,5	15,1	24,0	25,2	51,9
15 - 25	11,4	12,0	14,7	25,1	23,4	62,2
25 - 40	11,3	10,6	17,9	27,5	24,0	65,6
40 - 75	11,9	11,3	21,0	28,8	23,1	67,9
75 - 125	10,8	10,1	23,9	25,2	25,8	68,8

Tabulka 6: Relativní průměrná velikost (%) pětidenních úhrnů před návrhovými srážkovými epizodami šesti tvarů pro různé intervaly doby opakování, vztažená k normálu pětidenních úhrnů za měsíce květen až září. Žlutě jsou vyznačeny hodnoty blízké 100 % normálu, červeně hodnoty silně nadnormální.

Interval dob opakování	Tvary srážek					
	A	B	C	D	E	F
1,5 - 2,5	97	106	108	157	148	282
2,5 - 4	97	106	108	163	164	320
4 - 7,5	99	104	112	166	184	357
7,5 - 15	96	104	123	200	210	433
15 - 25	95	101	126	210	195	519
25 - 40	95	89	150	230	200	547
40 - 75	99	95	175	241	193	567
75 - 125	90	84	199	211	215	574

Tabulka 7: Průměrná relativní velikost (%) 6hodinových úhrnů před návrhovými srážkovými epizodami šesti tvarů pro různé intervaly doby opakování, vztažená k normálu 6hodinových úhrnů za měsíce květen až září. Zeleně jsou vyznačeny hodnoty silně podnormální, žlutě blízké normálu, červeně silně nadnormální hodnoty.

Interval dob opakování	Tvary srážek					
	A	B	C	D	E	F
1,5 - 2,5	54	89	139	340	263	1016
2,5 - 4	53	88	131	352	308	1168
4 - 7,5	49	74	143	333	308	1297
7,5 - 15	44	69	150	349	349	1690
15 - 25	51	71	143	406	320	1994
25 - 40	48	63	176	433	310	2321
40 - 75	53	60	214	465	287	2371
75 - 125	61	49	236	287	325	2160

Tabulka 8: Průměrná relativní velikost (%) 24hodinových úhrnů před návrhovými srážkovými epizodami šesti tvarů pro různé intervaly doby opakování, vztažená k normálu 24hodinových úhrnů za měsíce květen až září. Žlutě jsou vyznačeny hodnoty blízké normálu, červeně silně nadnormální hodnoty.

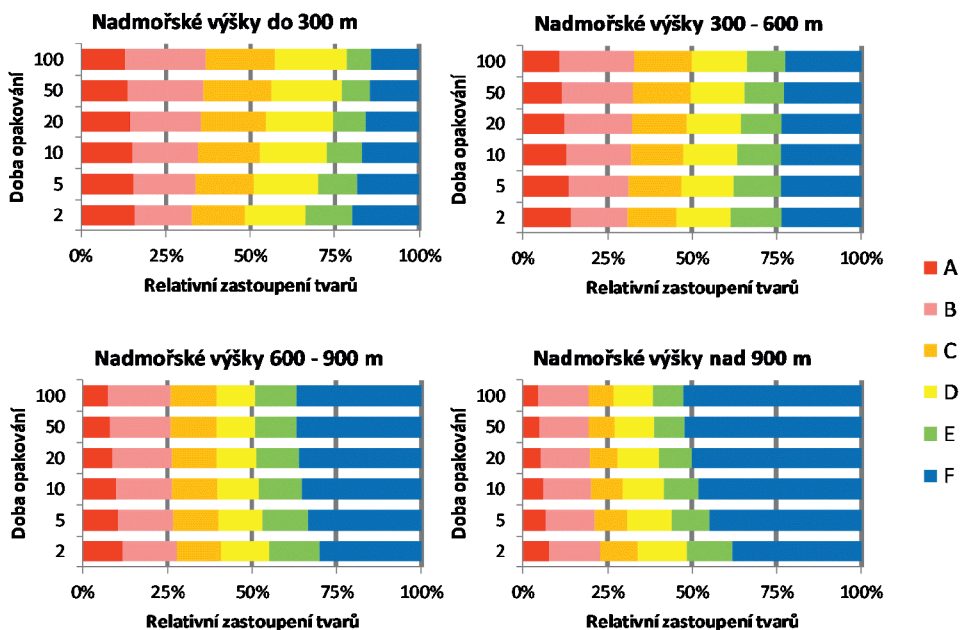
Interval dob opakování	Tvary srážek					
	A	B	C	D	E	F
1,5 - 2,5	108	132	134	254	259	698
2,5 - 4	108	136	139	266	279	770
4 - 7,5	118	127	153	276	281	858
7,5 - 15	115	117	168	333	321	1058
15 - 25	107	112	180	352	287	1241
25 - 40	101	106	225	374	288	1335
40 - 75	115	95	252	429	294	1355
75 - 125	106	87	294	384	380	1291

Tabulka 9: Průměrná relativní velikost (%) 72hodinových úhrnů před návrhovými srážkovými epizodami šesti tvarů pro různé intervaly doby opakování, vztažená k normálu 72hodinových úhrnů za měsíce květen až září. Žlutě jsou vyznačeny hodnoty blízké normálu, červeně silně nadnormální hodnoty.

Interval dob opakování	Tvary srážek					
	A	B	C	D	E	F
1,5 - 2,5	93	103	108	159	159	354
2,5 - 4	94	104	109	159	168	378
4 - 7,5	96	98	117	160	163	400
7,5 - 15	96	95	128	190	173	461
15 - 25	92	94	130	210	164	542
25 - 40	90	88	149	233	166	546
40 - 75	95	88	172	242	162	535
75 - 125	89	79	179	211	192	514

### 2.3.3 Zastoupení tvarů návrhových srážek na území ČR

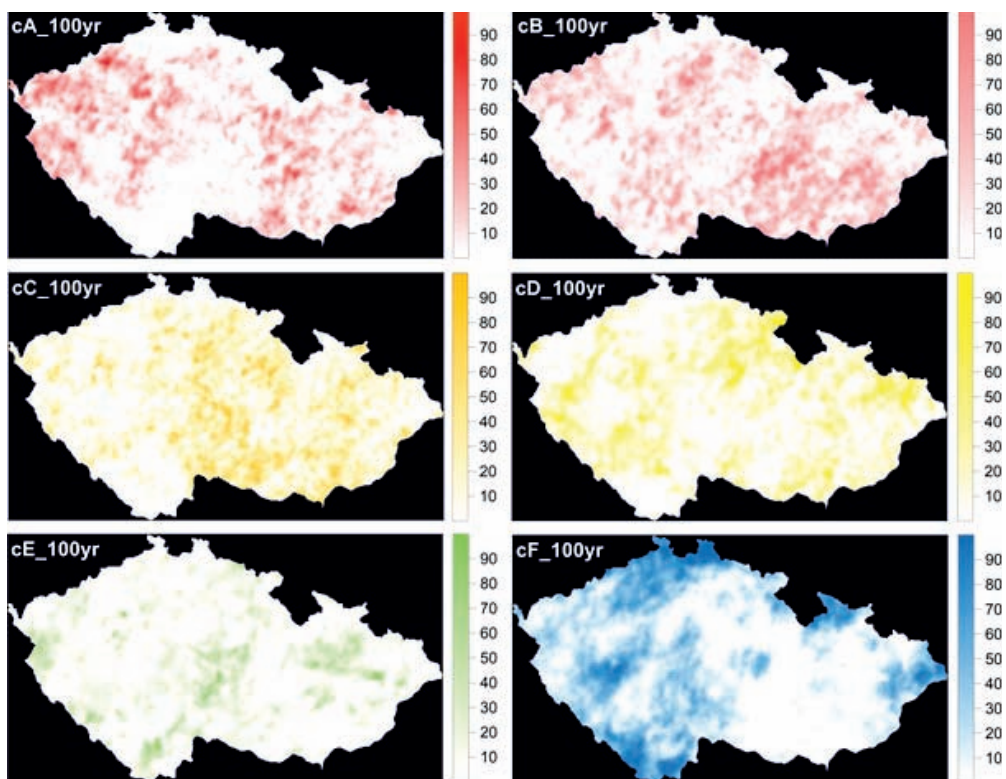
Syntetické tvary šestihodinových návrhových srážek (kap. 2.3.1) nejsou na území Česka zastoupeny rovnoměrně. Pravděpodobnost jejich výskytu je podmíněna především nadmořskou výškou, přičemž zastoupení syntetických tvarů v určité lokalitě je dále proměnné v závislosti na uvažované době opakování návrhové srážky. Bylo proto třeba důkladně analyzovat prostorovou distribuci zastoupení syntetických tvarů v rámci ČR, což je prezentováno v kapitole 3.1.2. Průměrné zastoupení syntetických tvarů návrhových srážek v ČR je zobrazeno na Obrázku 4, a to pro čtyři intervaly nadmořských výšek a šest vybraných hodnot doby opakování 6hodinových úhrnů. Je z něj zřejmé, že v nejnižších polohách do 300 m n. m. je zastoupení syntetických tvarů nejvíce rovnoměrné a s rostoucí dobou opakování dochází pouze k malému poklesu zastoupení tvarů s rovnoměrnou intenzitou srážek (E a F). Zastoupení tvaru F podle očekávání výrazně roste s rostoucí nadmořskou výškou lokality, přičemž ve vyšších polohách dále roste s dobou opakování srážky. Ve výškách nad 900 m podíl rovnoměrných srážek tvaru F pro doby opakování 20 a více roků přesahuje 50 %, nicméně nelze vyloučit ani koncentrované tvary srážek A a B (souhrnný podíl téměř 20 %).



Obrázek 4: Průměrné zastoupení šesti syntetických hyetogramů návrhových srážek A–F s různou dobou opakování pro čtyři intervaly nadmořských výšek.

Vzhledem k tomu, že nadmořská výška daného místa není jediným faktorem, který podmiňuje zastoupení různých tvarů syntetických diagramů, nabízí metodika data pro jednotlivá povodí. Dalšími faktory totiž může být např. blízkost výrazné orografie, směr převládajícího proudění apod. Zastoupení tvarů se opět mění i v závislosti na uvažované době opakování návrhové srážky. Obecně platí, že s rostoucí dobou opakování dochází k větší koncentraci tvarů srážek ve specifických oblastech, což odpovídá průměrnému zastoupení na Obrázku 4. Na Obrázku 5 je prezentováno zastoupení pro stoletou srážku, výsledky pro různé uvažované doby opakování jsou pak uvedeny v mapových přílohách.

Přesnějším, vhodnějším a rychlejším způsobem je vyhledání příslušné lokality v rámci ČR ve webové aplikaci poskytované na [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz), kde je možné kromě úhrnu šestihodinové srážky získat i varianty jejího časového průběhu a relativní frekvenci jejich výskytu pro zvolenou dobu opakování.



Obrázek 5: Procentuální zastoupení šesti syntetických hyetogramů stoletých návrhových 6hodinových úhrnů srážek na území ČR.

### 2.3.4 Úhrny návrhových srážek kratší doby trvání

Korektní způsob získání úhrnu subdenní návrhové srážky dané doby opakování je úloha vyžadující frekvenční analýzu srážkových řad s velmi podrobným časovým

rozlišením. Tato data byla z historických a instrumentačních důvodů velmi vzácná, v současné době jsou dostupnější díky meteorologickým radarům a stále se zahušťující síti automatizovaných srážkoměrných stanic. V současné době lze uvažovat tři hlavní zdroje pro získání návrhových subdenních srážkových úhrnů.

Hlavním poskytovatelem v celorepublikovém měřítku je ČHMÚ, u nějž lze N-leté subdenní úhrny objednat jako nestandardní hydrologické údaje. Výhodou je teoreticky libovolná délka uvažované návrhové srážky a dále maximální možná délka časové řady, z níž jsou N-leté úhrny odvozovány, a tedy nejvyšší spolehlivost. Nevýhodou bývá zpravidla cena a absence návaznosti těchto úhrnů na časové rozložení srážky.

V rámci tvorby této metodiky byl využit přístup založený na analýze dat z meteorologických radiolokátorů adjustovaných srážkovými úhrny ze sítě srážkoměrných stanic. Výhodou této metody je prostorové rozlišení dat s horizontálním krokem 1 km, nejistotu vnáší krátké období radarových měření (10 let). Proto byl tento postup využit hlavně k určování zastoupení syntetických hyetogramů (kap. 2.3.3), popsany blíže v kap. 3.1.2.

Výhodou je snadná dostupnost a uživatelský komfort, poměrně aktuální datová základna a přímá návaznost na tvar hyetogramu.

Poslední možností je odvození subdenního návrhového úhrnu metodou redukce N-letých denních úhrnů (Hrádek a Kovář 1994). Tato metoda vychází z předpokladu, že existuje vazba mezi denními úhrny a úhrny srážek kratších. Metoda redukce podle Hrádka uvádí jednoduchý vztah:

$$H_{t,N} = H_{1d,N} \cdot a \cdot t^{-c} \quad (2.7)$$

kde:  $H_{t,N}$  N-letý úhrn srážky o době trvání  $t$ ,  
 $H_{1d,N}$  N-letý 24hodinový úhrn srážky,  
 $a, c$  koeficienty dle metodiky,  
 $t$  doba trvání srážky v minutách.

Hodnoty parametrů byly odvozeny na základě Truplovy analýzy (1958) intenzit krátkodobých dešťů, která byla provedena na poměrně starých a často velmi krátkých časových řadách. Aktuálnost této metody je tedy značně diskutabilní. Problematická je i regionálně proměnlivá platnost redukčních koeficientů. Průměrné hodnoty parametrů pro povodí Odry a Labe jsou uvedeny v následující Tabulce 10 v závislosti na době opakování a délce návrhového deště. Výhodou této metody je možnost výpočtu maximálního návrhového úhrnu za libovolně dlouhý časový interval, neobsahuje však žádnou vazbu na časový průběh srážky ani předchozí či následnou srážku a hodí se tedy spíše pro extrémní úlohy, v nichž rozhoduje maximální průměrná intenzita srážky.

Tabulka 10: Redukční koeficienty denních úhrnů na srážky kratší.

t (min)	N (roky)	1	2	5	10	20	50	100
10 - 40	a	0,169	0,166	0,171	0,163	0,169	0,174	0,173
	1 - c	0,227	0,299	0,312	0,344	0,352	0,362	0,375
40 - 120	a	0,227	0,237	0,265	0,280	0,300	0,323	0,335
	1 - c	0,197	0,197	0,197	0,197	0,197	0,197	0,197
120 - 1440	a	0,193	0,235	0,324	0,380	0,463	0,580	0,642
	1 - c	0,226	0,199	0,155	0,133	0,106	0,075	0,061

Tato metoda předpokládá známý denní úhrn srážky (získaný například od ČHMÚ). Veřejně dostupné informace o denních úhrnech uvádí pro síť pozorovacích stanic Šamaj (1985). Pro lokality mezi pozorovacími body se používaly různé jednoduché interpolační metody. Tento pracovní postup je možné nahradit využitím nástroje pro bodový výpočet návrhové srážky na serveru rain.fsv.cvut.cz. Tato webová služba umožňuje získat subdenní návrhovou srážku libovolné délky pro doby opakování deště 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let. Pozadím služby je základní mapa ČR pro určení hledané lokality a řízenou interpolací vytvořená rastrová vrstva denních úhrnů (Kavka et al. 2016). Po zadání bodu, výběru doby opakování deště a zadání délky požadovaného deště je na pozadí služby spočítán návrhový objem srážky (mm) z hodnoty denního úhrnu v daném bodě pomocí výše uvedené metody redukce.

## 2.4 Příklady řešení

### 2.4.1 Návrh hospodářského přejezdu - propustku

Vstupní data

*Informace o řešeném území:*

- Model reliéfu DMR4G,
- Vodní toky a nádrže,
- Půdní data a data o využití území stanovení hodnoty CN,
- Srážková data na adrese rain.fsv.cvut.cz,
- Informace z terénního průzkumu.

*Charakteristika území:*

Zemědělsky využívané území. Velmi malé povodí s drobným vodním tokem. Přes 90 % území tvoří zemědělská půda. Na severu je povodí prakticky ohraničeno komunikací (Obrázek 6). Místní komunikace do obce Třebešice významně neovlivňuje směřování odtoku v řešeném území. V zájmové lokalitě se nachází drobný vodní tok, který byl v minulosti narovnan a opevněn. Dále malá vodní

nádrž, která postrádá jakékoli bezpečnostní a ovládací prvky, a proto není v návrhu nijak uvažována transformace vody v nádrži.

- Plocha povodí 1,1 km<sup>2</sup>
- Průměrná hodnota CN CN<sub>2</sub> = 75,8; CN<sub>3</sub> = 88,1
- Průměrný sklon území 9,8 %
- Průměrná délka odtokové dráhy 0,754 km



Obrázek 6: Situace řešeného území.

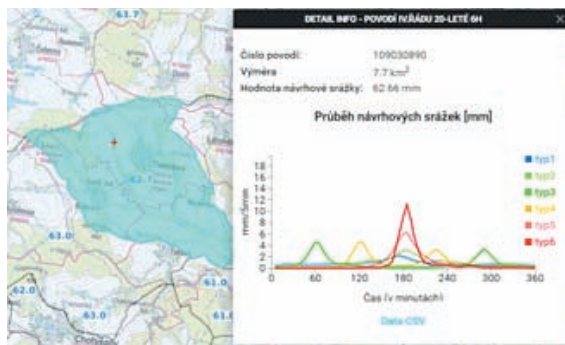
### Návrhové srážky

Návrhová šestihodinová srážka, stupeň ochrany Q20. Jedná se o drobný vodní tok, hospodářský přejezd, škody na majetku a na konstrukci odpovídají stupni ochrany, viz metodiku TPEO.

Objem návrhové šestihodinové srážky H<sub>20</sub> = 62,7 mm (denní úhrn 73 mm). Hodnota získána pro povodí IV. řádu v aplikaci „Návrhová šestihodinová srážka“ na rain.fsv.cvut.cz (Obrázek 7). Zde byly také získány pravděpodobnosti výskytu tvarů návrhových srážek.



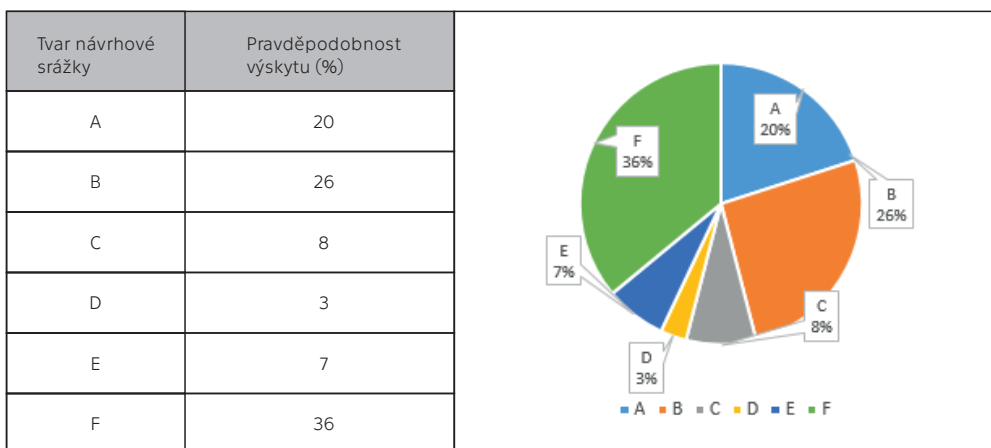
Určení zájmového povodí



Získání úhrnu a průběhu šestihodinové návrhové srážky.

Obrázek 7: Získání parametrů návrhové srážky ve webové aplikaci

Zdroj: rain.fsv.cvut.cz

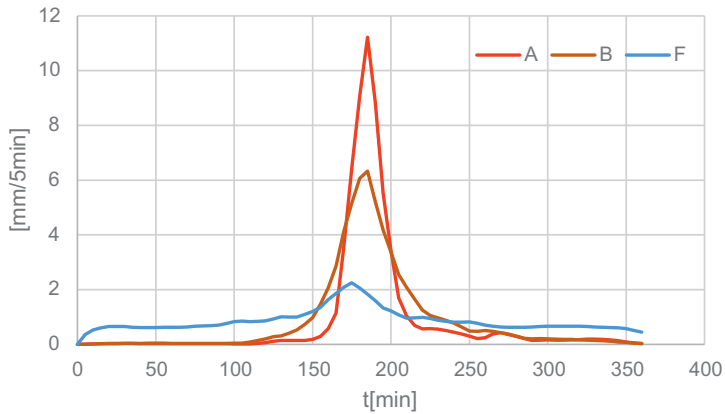


Obrázek 8: Zastoupení jednotlivých tvarů odvozeno na portálu rain.fsv.cvut.cz.

Tvary C, D, E, jsou významně méně zastoupeny, pro další hodnocení jsou využity jen tvary A, B, F. Jejich pětiminutový průběh ve formátu \*.csv získán také z webové aplikace „Návrhová šestihodinová srážka“, graficky uvedeno na Obrázek 9. Průběh návrhové srážky je také možné získat přenásobením objemu srážky jednotkovým tvarem (viz příloha metodiky v kapitole 8).



## Průběhy návrhových srážek



Obrázek 9: Tvary převažujících typů srážek.

Vzhledem k tabulce předchozích nasycení (kapitola 2.3.2) je pro tvar F zvolen vyšší stupeň nasycení, tedy hodnota  $CN_3$ , pro ostatní případy  $CN_2$ .

Výpočet odtokových charakteristik podle metodiky „Protierozní ochrana“ (Janeček 2012).

### Objem odtoku

Výpočet objemu odtoku pro  $CN_2$

$$A = 25,4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ ( mm )}$$

$$A_{CN_2} = 25,4 \cdot (1000 / CN - 10) = 25,4 \cdot (1000 / 75,8 - 10) = 81,1 \text{ mm}$$

$$I_{a_{CN_2}} = 0,2 A = 0,2 \cdot 81,1 = 16,2 \text{ mm}$$

$$H_e = \frac{(H - I_a)^2}{H - I_a + A} = \frac{(62,7 - 16,2)^2}{62,7 - 16,2 + 81,1} = 16,9 \text{ mm}$$

$$\text{Objem odtoku } V_{CN_2} = H_e \cdot P = 16,9 \text{ (mm)} \cdot 1,1 \text{ (km}^2\text{)} = 18\,629 \text{ m}^3$$

Výpočet objemu odtoku pro  $CN_3$

$$H_e = \frac{(H - I_a)^2}{H - I_a + A} = \frac{(62,7 - 6,9)^2}{62,7 - 6,9 + 34,3} = 34,6 \text{ mm}$$

$$\text{Objem odtoku } V_{CN_3} = H_e \cdot P = 34,6 \text{ (mm)} \cdot 1,1 \text{ (km}^2\text{)} = 38\,046 \text{ m}^3$$

## Kulminační průtok

Výpočet kulminačního průtoku pomocí modelu HEC-HMS

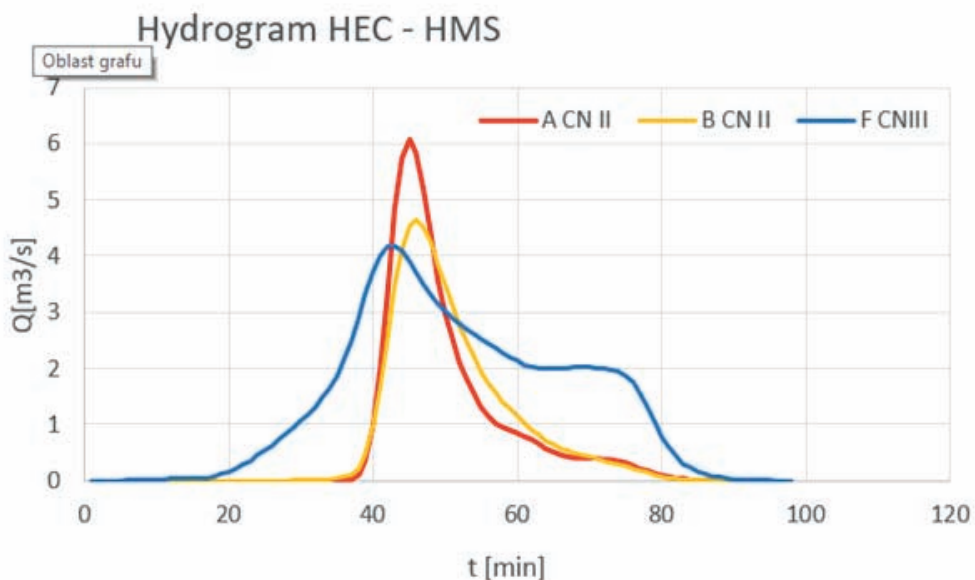
V modelu HEC-HMS byla zvolena kombinace metody CN a jednotkového hydrogramu. Parametry pro jednotkový hydrogram byly odvozeny v GIS na základě morfologie (DMR4G).

Celkové výsledky pro všechny srážkové scénáře (A–F) pro výpočet s CN<sub>2</sub> a CN<sub>3</sub>

Tabulka 11: Maximální průtoky a objemy odtoku z modelu HEC-HMS pro první vzorovou úlohu, uvažované srážkové scénáře jsou označeny šedě.

Typ srážky	CN <sub>tps</sub>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V(tis.m <sup>3</sup> )
A	CN2	6,07	20,41
B	CN2	4,64	20,41
C	CN2	3,80	20,41
D	CN2	3,92	20,41
E	CN2	2,91	20,41
F	CN2	2,01	20,41
A	CN3	12,21	38,83
B	CN3	9,40	38,84
C	CN3	6,22	38,85
D	CN3	6,13	38,84
E	CN3	5,90	38,84
F	CN3	4,19	38,85

Výsledné tvary hydrogramů uvažovaných srážkových scénářů (A, B, F) jsou uvedeny v následujícím grafu. Z Tabulky 11 je patrné, jak jsou hodnoty odvozených kulminačních průtoků závislé na výběru průběhu návrhové srážky a tedy jakou je třeba věnovat pozornost jejich výběru.



Obrázek 10: Hydrogramy vypočtené pomocí modelu HEC-HMS pro uvažované scénáře A, B a F.

### Dimenzování prvku

Je uvažován betonový kruhový profil ( $n = 0,013$ ,  $i = 0,6 \%$ , délka potrubí 10 m). Profil s volnou hladinou, zatopeným vtokem a volným výtokem.

Pro výpočet byla použita zjednodušená Manningova rovnice pro propustek uvedených parametrů ve tvaru:

$$D_{min} = [Q / (24 \cdot i^{1/2})]^{3/8}$$

Tabulka 12: Odhad nákladů na jednotlivé varianty navrhovaného propustku.

CN <sub>ps</sub>	Typ srážky	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	DN min (m)	DN (m)	Cena za 10 m propustku (Kč)
CN <sub>2</sub>	A	6,07	1,56	1,6	128 500
CN <sub>2</sub>	B	4,64	1,41	1,6	128 500
CN <sub>3</sub>	F	4,19	1,36	1,4	107 240

Investiční náklady vycházejí z ceníkových položek jednoho z výrobců betonových trub a jsou uvedeny bez DPH. Uvedeny jsou pouze náklady za trubní propustek vč. těsnění potrubí.

Uvažován je trubní profil, který bude uložen do cementového lože a obsypán.

Z posouzení vyplývá, že na uvažované scénáře vyhoví propustek D1600, který je na straně bezpečné pro všechny scénáře.

Doplňkově byl také proveden výpočet kulminačního průtoku podle metodiky „Protierozní ochrana“ (Janeček 2012). Tento doplňkový výpočet slouží jako ukázka určení  $q_{pH}$  z nomogramu, tedy bez využití tvarů návrhových srážek. Pokud to situace dovoluje, doporučují autoři použít i v případě metody CN modelovací prostředky

Výpočet kulminačního průtoku podle metodiky Janeček (2012)

Výpočet kulminačního průtoku pro CN<sub>2</sub>

Doba koncentrace převzata z výpočtu v modelu HEC-HMS:  $T_c = 62 \text{ min} \Rightarrow 1 \text{ hod}$

$$I_a/H_s = 0,26$$

určeno z nomogramu:  $q_{pH} = 420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$

$$Q_{CN2} = 0,00043 \cdot q_{pH} \cdot P_P \cdot H_O \cdot f = 0,00043 \cdot 420 \cdot 1,1 \cdot 16,9 \cdot 1 = 3,36 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výpočet kulminačního průtoku pro CN<sub>3</sub>

Doba koncentrace převzata z výpočtu v modelu HEC-HMS:  $T_c = 40 \text{ min} \Rightarrow 0,66 \text{ hod}$

$$I_a/H_s = 0,11$$

určeno z nomogramu:  $q_{pH} = 670 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$

$$Q_{CN3} = 0,00043 \cdot q_{pH} \cdot P_P \cdot H_O \cdot f = 0,00043 \cdot 670 \cdot 1,1 \cdot 34,6 \cdot 1 = 11,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 2.4.2 Studie pro umístění a posouzení transformačního účinku suché nádrže

Vstupní data:

Profil průtočné suché nádrže je uvažován na bezejmenném levostranném přítoku Býkovického potoka pod bývalým rybníkem u obce Třebešice (Divišov u Prahy), viz následující obrázek.

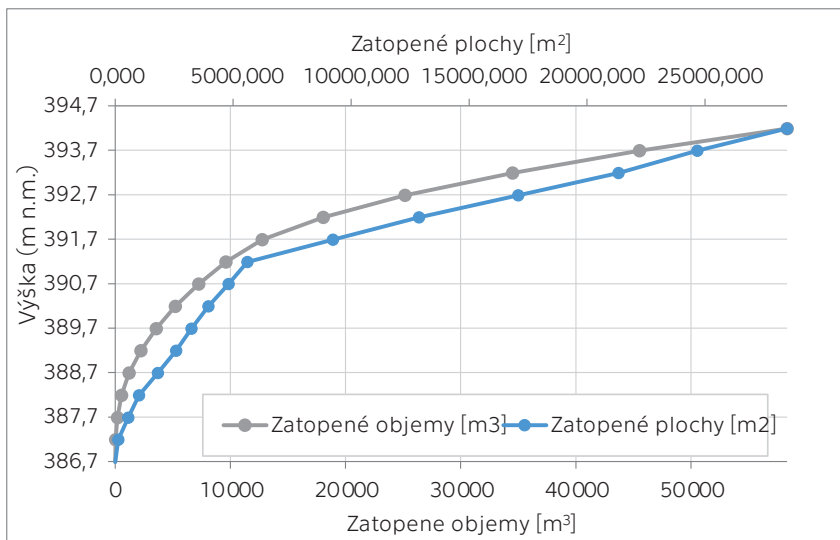


Obrázek 11: Povodí suché nádrže s vyznačeným profilem hráze.

Plocha povodí k uvažovanému profilu suché nádrže je 1,67 km<sup>2</sup>

Povodí je intenzivně zemědělsky využíváno, v povodí se vyskytuje minimální množství zpevněných ploch a existující cestní síť ovlivňuje odtokové poměry jen zanedbatelně.

Čáry zatopených objemů a ploch byly získány na základě podrobného digitálního modelu (DMR4G) s využitím běžných GIS technik.



Obrázek 12: Čáry zatopených objemů a ploch.

Nádrž byla navržena a posuzována na zachycení a transformaci povodňových odtoků z návrhové srážky s dobou opakování 20 let. Jedná se o velmi blízkou

lokalitu jako v příkladu č. 1; proto byly uvažovány identické úhrny srážek i průběhy intenzit.

Vstupní návrhové povodňové vlny (NPV 20) byly odvozeny pomocí modelu Mike-SHE s následujícími vstupními daty a počátečními podmínkami:

- Infiltrace byla řešena metodou Green&Ampt s redistribucí vlhkosti v době poklesu intenzity infiltrace. Jako podklad pro stanovení hydraulických parametrů půd nebyly provedeny půdní rozborů, pro účely studie byla použita data KPP pro stanovení zrnitostních tříd a průměrné hodnoty nasycených hydraulických vodivosti  $K_s$  a sacího tlaku na čele zvlhčení  $\psi$  uváděné ve volně dostupných evropských databázích o půdách (EU-HYDI, HYPRES). Na povodí se vyskytují dvě dominantní zrnitostní třídy: Písčitohlinitá půda (57 %), hlinitopísčítá (42 %), zbylé 1% připadá na hlinitou půdu. Hodnoty  $K_s$  pro tyto zrnitostní třídy dle publikovaných pedotransferových funkcí byly použity v rozsahu 3,6–18,5 mm/h.
- Počáteční stupeň saturace půdy byl uvažován ve výši 50 %, počáteční vlhkost tedy byla zvolena v polovině rozsahu mezi reziduální a nasycenou objemovou vlhkostí  $\theta_r$  a  $\theta_s$  pro danou zrnitostní třídu.
- Pro výpočet povrchového odtoku byly použity průměrné hodnoty Manningovy drsnosti povrchu uváděné v dostupné literatuře, vztažené k základním kategoriím půdního pokryvu dle ZABAGED. Dominantními skupinami zde byla orná půda (uvažována průměrná varianta drsnosti pro různé druhy plodin), travní a lesní porosty.
- Povrchová retence byla stanovena opět z dostupné literatury pro totožné druhy povrchů, použité hodnoty byly v rozmezí 5–10 mm.

Tato kombinace vstupů a počátečních podmínek představuje střední stav nasycení a drsnosti povodí.

Parametry výpustních a bezpečnostních objektů byly navrženy tak, aby nádrž byla schopna transformovat spodní výpustí do úrovně hladiny bezpečnostního přelivu NPV 20 odvozenou pro průběh návrhové srážky B (převažující typ srážky), při uvažovaném středním stavu povodí. Bezpečnostní přeliv byl navržen tak, aby převedl do výšky přepadového paprsku 25 cm všechny průběhy NPV 20 vyvolané všemi zbylými pěti typickými průběhy návrhové srážky.

Takto navržená nádrž má následující parametry:

dno suché nádrže	386,7 m n. m.
kóta koruny hráze	394,1 m n. m.
teoretická max. hladina	394,1 m n. m.
kóta hrany bezpečnostního přelivu	392,3 m n. m.

Pro spodní výpust je navržena DN 300.

Bezpečnostní přeliv je navržen jako stálý, obdélníkový s délkou přelivné hrany 32,8m.

Objem nádrže po hranu bezpečnostního přelivu je 19 470 m<sup>3</sup>.

## Transformace NPV 20

Schopnost transformace NPV v suché nádrži byla posuzována z hlediska snížení kulminačního průtoku. Pro výpočet transformace návrhových povodňových vln v nádrži bylo zvoleno tabelární řešení úlohy. Tak jak je využito například ve volně dostupném software „Numerická metoda pro posouzení efektivity suché nádrže“ (dostupné na [storm.fsv.cvut.cz](http://storm.fsv.cvut.cz)).

Kromě výše popsaného „průměrného“ scénáře byly posuzovány další možné teoretické scénáře zohledňující jiný stupeň předchozího nasycení povodí a nejistoty určení hydraulických vlastností půd.

### Počáteční nasycení

V metodě Green&Ampt je počáteční nasycení zohledněno pomocí počáteční objemové vlhkosti  $\theta$  a sacího tlaku na čele zvlhčení  $\psi$ . Uvažovány byly tři varianty IC1–IC3. Počáteční vlhkost byla stanovena na úrovni 10, 50 a 90 % saturace pro každou zrnitostní třídu (50 % odpovídá výše použitému střednímu scénáři) a jim odpovídající sací tlak na čele zvlhčení být vypočten podle Clapp-Hornbergerova vztahu.

### Nejistoty v určení $K_s$

Protože nebyl proveden terénní průzkum a laboratorní rozbor hydraulických vlastností půd, byly použity hodnoty  $K_s$  uvedené v dostupných půdních databázích. Pro zohlednění nejistot byly kromě publikované průměrné hodnoty (použité ve středním scénáři popsaném výše) použity i dvě krajní varianty: Pro podmínky nadprůměrně propustných půd byly hodnoty  $K_s$  zvýšeny o směrodatnou odchylku podle databáze HYPRES (označeno jako m+STD) a pro podmínky podprůměrně propustných půd bylo  $K_s$  sníženo o směrodatnou odchylku (označeno jako m-STD). Vhodnějším způsobem určení infiltračních vlastností půd, zejména v případě kdy se nejedná jen o studii ale o návrh pro provedení stavby, je základní pedologický průzkum (viz problematika půdních dat uvedených v kapitole 2.2.3). Všechny teoretické kombinace uvažovaných scénářů uvádí Tabulka 13 včetně stručné charakteristiky výsledného scénáře.

Tabulka 13: Možné kombinace uvažovaných počátečních podmínek a úrovní propustnosti půd.

m+STD	IC1	nadprůměrně propustné půdy, suché počáteční podmínky
m+STD	IC2	nadprůměrně propustné, středně nasycené půdy
m+STD	IC3	nadprůměrně propustné půdy, vlhké počáteční podmínky
stř. hodnota	IC1	průměrně propustné půdy, suché počáteční podmínky
stř. hodnota	IC2	průměrně propustné, středně nasycené půdy

stř. hodnota	IC3	průměrně propustné půdy, vlhké počáteční podmínky
m-STD	IC1	podprůměrně propustné půdy, suché počáteční podmínky
m-STD	IC2	podprůměrně propustné, středně nasycené půdy
m-STD	IC3	podprůměrně propustné půdy, vlhké počáteční podmínky

Aplikace těchto 9 teoretických scénářů, pokud by byly kombinovány se všemi šesti typickými průběhy návrhových srážek, představuje značné množství výpočtů. Celkem by se jednalo o 54 scénářů. Pro praktické využití však je možné počet scénářů zredukovat. Po zohlednění počátečního stavu nasycenosti charakterizovaného průměrnými úhrny předchozích srážek (Tabulka 6 až Tabulka 9 této metodiky) jsou uvažovány scénáře průměrného předchozího nasycení (IC2) pro průběhy srážek typu A a B. Pro ostatní průběhy srážek je nezanedbatelně častý zvýšený stav přechodního nasycení (IC3). Snížený stav nasycení povodí (IC1) nebyl ve výpočtech uvažován ze dvou důvodů. V první řadě je jeho vyřazení na straně bezpečné, pro něj odvozené NPV vykazují vždy nižší objem i kulminační průtok než u dalších dvou stavů. Druhým důvodem je nedostatečná prozkoumanost pravděpodobností výskytu suchých podmínek a jejich nejasná vazba na hydraulické vlastnosti půd. Z původních 54 teoretických scénářů zůstalo po vyřazení nepravděpodobných nebo nerelevantních scénářů k posouzení 18 tvarů NPV.

Dále by se dalo uvažovat i o vyřazení scénářů se zvýšenou infiltrační schopností půd (scénáře m+STD), ve kterých jsou NPV menší a s nižším maximálním průtokem. Z hlediska pravděpodobnosti výskytu tvarů (viz Příklad č. 1) by bylo možné uvažovat o vyřazení scénářů (C, D a E), jelikož pravděpodobnost výskytu pro úhrny s dobou opakování 20 let nepřekračuje u žádného z těchto průběhů 8 %, jsou tedy velmi málo pravděpodobné. Touto redukcí scénářů by pak bylo hodnoceno pouze 6 průběhů NPV, pro ukázkou je uvedeno všech 18 variant NPV, které zohledňují všechny průběhy návrhových srážek.



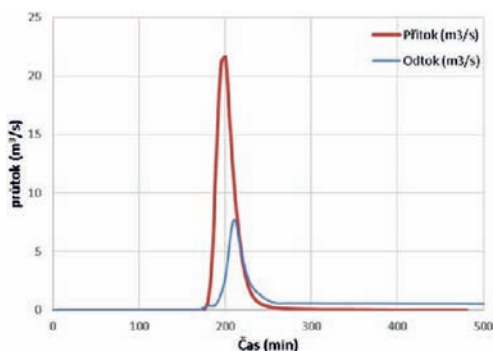
Tabulka 14: Maximální průtoky vstupní a transformované NPV 20 uvažovaných scénářů. Žlutě zvýrazněný scénář NPV20, na kterou byla nádrž navržena. Šedou barvou jsou pak označeny scénáře, kdy dojde k zapojení odtoku přes bezpečnostní přeliv, tmavší šed odlišuje scénáře, kde je transformační účinek pod 25%.

Úroveň propustnosti půd	Průběh srážky	Stav nasycení	Maximální průtok NPV 20 (m <sup>3</sup> /s)	Maximální odtok z nádrže (m <sup>3</sup> /s)	Míra transformace kulminace nádrží (%)	Objem NPV 20 (m <sup>3</sup> )
m+STD	A	IC2	2,47	0,39	84	8 973
m+STD	B	IC2	1,65	0,38	77	8 990
m+STD	C	IC3	1,06	0,34	68	8 710
m+STD	D	IC3	1,01	0,31	69	7 771
m+STD	E	IC3	0,88	0,35	60	8 813
m+STD	F	IC3	0,60	0,31	48	8 155
mean0	A	IC2	21,60	7,69	64	64 658
mean0	B	IC2	8,59	0,57	93	44 313
mean0	C	IC3	5,54	0,57	90	48 425
mean0	D	IC3	5,72	0,53	91	33 380
mean0	E	IC3	5,60	0,57	90	47 112
mean0	F	IC3	3,31	0,52	84	30 882
m-STD	A	IC2	38,63	22,74	41	121 710
m-STD	B	IC2	24,88	15,71	37	121 445
m-STD	C	IC3	15,73	11,80	25	133 514
m-STD	D	IC3	15,12	11,81	22	113 037
m-STD	E	IC3	13,93	11,09	20	135 515
m-STD	F	IC3	9,28	7,72	17	123 015

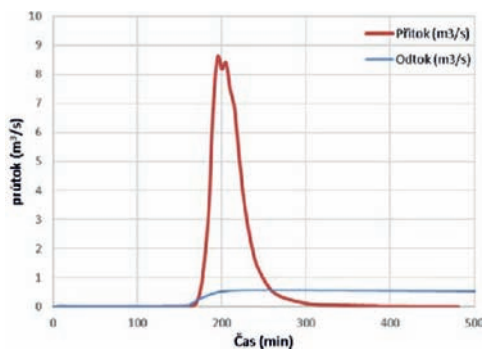
Tabulka 14 uvádí v předposledním sloupci transformační účinek nádrže jako poměr mezi maximálním průtokem na vstupu a výstupu z nádrže. Světle šedě jsou označeny scénáře s odtokem přes bezpečnostní přeliv. Tmavě šedě jsou zvýrazněny scénáře, kdy je transformační účinek nádrže pod 25 %. Protože byla nádrž navržena na NPV odvozené pro průměrné vodivosti půd, nedojde v případě scénářů se zvýšenou infiltrační schopností (m+STD) k zaplnění retenčního prostoru nádrže a transformovaný odtok je určen kapacitou navržené spodní výpusti a úrovní maximální dosažené hladiny v nádrži.

V případě scénářů s průměrnou vodivostí půd jsou výsledky mírně odlišné. Protože byla nádrž navržena na NPV odvozenou pro druhý nejkonzentrovanejší průběh srážky typu B, nedochází u tohoto (viz Obrázek 13-b) a všech méně koncentrovaných typů srážek k odtoku přes bezpečnostní přeliv. Proto je odtok z nádrže určen kapacitou dolní výpusti a redukční účinek nádrže je vysoký. Absolutní hodnoty průtoků jsou vyšší než v případě scénářů m+STD kvůli vyšší dosažené maximální hladině v nádrži, ale značně redukované oproti netransformované NPV. Pouze u NPV s nejvyšším objemem, vyvolané nejkonzentrovanejším průběhem srážky typu A dojde k přelítí bezpečnostního přelivu (viz Obrázek 13-a), velikost kulminace transformované vlny je pak dána okamžikem naplnění nádrže (na vzestupné či sestupné větvi vstupní NPV) a charakteristikami retenčního prostoru nad úrovní přelivu.

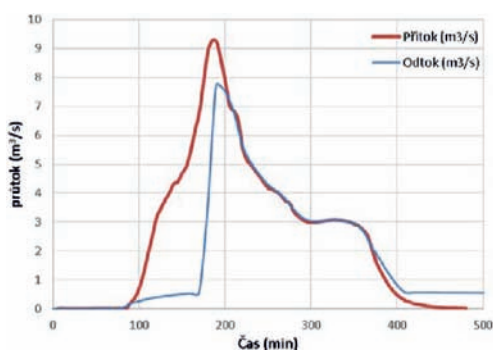
Pro posouzení transformačního účinku nádrže a velikost kulminačního odtoku v případě NPV pro scénáře s podprůměrnou vodivostí půd (m-STD) je průběh srážky a potažmo NPV zcela klíčový, neboť objem NPV je vždy vyšší než u průměrné varianty, na kterou byla nádrž navrhována a ve všech případech tedy dojde k přelítí bezpečnostního přelivu. Nejmenší transformační účinek je v případě NPV vyvolaných dvěma rovnoměrnými průběhy návrhové srážky (E a F) a srážkami se dvěma vrcholy (C a D). Absolutní hodnoty transformovaných kulminačních průtoků jsou však menší než u nejkonzentrovanejších průběhů A a B a to i přesto, že pro ně je uvažován pouze průměrný stav předchozího nasycení IC2. Průběh návrhové srážky je zde tedy dominantní nad počátečními podmínkami. Především u srážek se dvěma vrcholy se jedná o vyčerpání kapacity prostoru nádrže v reakci na první vrchol, viz obrázek transformačního účinku. U velmi koncentrovaných srážek je účinek transformace z hlediska redukce maximálního průtoku větší.



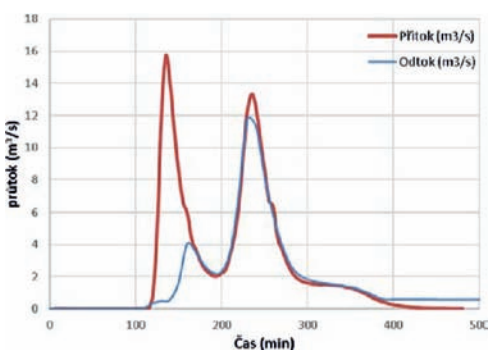
a) Průměrné propustnosti půd, střední stav nasycení IC2, průběh srážky A.



b) Průměrné propustnosti půd, střední stav nasycení IC2, průběh srážky B.



c) Podprůměrně propustné půdy, nasycený stav IC3, průběh srážky F.



d) Podprůměrně propustné půdy, nasycený stav IC3, průběh srážky C.

Obrázek 13: Vybrané ukázky transformačního účinku suché nádrže na NPV 20.

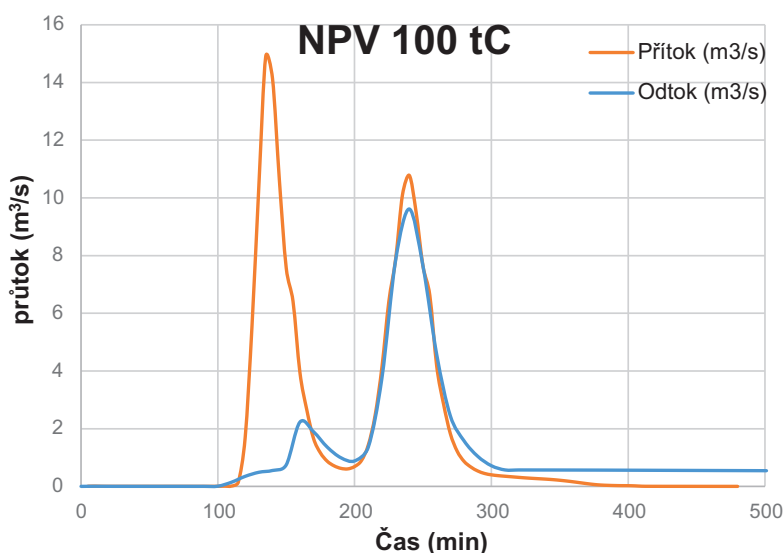
## Transformace NPV 100

Z hlediska bezpečnosti nádrže bylo provedeno posouzení nádrže na stoleté návrhové průtoky. Uvažovány jsou jen tři scénáře. Jedná se o čtyři převažující tvary srážek (A, B, C a F), viz příklad č.1. Uvažovány byly průměrně propustné půdy. Počáteční nasycenost povodí je pro scénáře A a B uvažována jako střední (IC2), pro scénáře C a F zvýšená (IC3).

Výsledky transformačního účinku jsou uvedeny v následující Tabulce 15. Graf na Obrázku 14 ukazuje průběh vstupní a transformované NPV vyvolané návrhovou srážkou se dvěma vrcholy (průběh typu C), kde se projevuje vyčerpání retenční kapacity nádrže již v poklesové části prvního vrcholu a jen omezené obnovení retenční kapacity před nástupem druhého vrcholu NPV.

Tabulka 15: Maximální průtoky vstupní a transformované NPV 100 uvažovaných scénářů.

Úroveň propustnosti půd	Průběh srážky	Stav nasycení	Maximální průtok NPV 100 (m <sup>3</sup> /s)	Maximální odtok z nádrže (m <sup>3</sup> /s)	Míra transformace kulminace nádrží (-)
stř. hodnota	A	IC2	44,53	25,86	0,57
stř. hodnota	B	IC2	24,40	13,92	0,58
stř. hodnota	C	IC3	14,89	9,61	0,65
stř. hodnota	F	IC3	6,05	1,76	0,29



Obrázek 14: Vstupní a transformovaná NPV vyvolaná srážkou s dobou opakování 100 let a průběhem typu C.

### Zhodnocení transformačního účinku nádrže

Z hlediska bezpečnosti nádrže je maximální průtok přes navržený bezpečnostní přeliv převáděn přepadovým paprskem o výšce 62 cm, tedy pod korunu a nehrozí tak přelítí tělesa hráze.

Celkově je možné zhodnotit, že pro střední stavy povodí, na něž byla suchá nádrž dimenzována, splňuje svoji transformační úlohu u všech variant NPV 20. Nádrž vyhovuje i z hlediska bezpečnosti při NPV 100, kde se také významně uplatňuje transformační účinek suché nádrže. Kritickým faktorem pro návrh zůstává zpřesnění propustnosti půd.

## 3 Srovnání novosti postupů

### 3.1 Problematika návrhových srážek v Česku

#### 3.1.1 Přehled dosavadního řešení problematiky návrhových srážek

Výzkum doby opakování srážek a jejich návrhových hodnot je nejčastěji realizován na denních úhrnech srážek, měřených od 7 hodin místního času do 7 hodin následujícího dne. Dlouhodobé průměry ročních maxim denních úhrnů srážek dosahují v rámci ČR hodnot mezi 30 a 75 mm (Tolasz et al. 2007). Tomu odpovídá i prostorové rozdělení návrhových denních úhrnů srážek, kdy např. stoletý jednodenní úhrn na velké většině území nedosahuje 100 mm, v exponovaných horských oblastech je však odhadován i přes 200 mm např. (Kulasová et al. 2004; Brázdil et al. 2005). Stanovení návrhových denních úhrnů s dlouhou dobou opakování pro jednotlivé stanice je nicméně zatíženo značnou nejistotou v důsledku výskytu případných odlehlých hodnot, proto se v poslední době při řešení tohoto úkolu uplatňují metody regionální frekvenční analýzy (Kyselý et al. 2011).

Určení návrhových subdenních úhrnů je ještě obtížnějším úkolem, neboť síť automatických srážkoměrů byla donedávna podstatně řidší než síť klasických srážkoměrů. Klasickou prací v tomto směru vytvořil Trupl (1958), který excerpoval data 98 ombrografů a konstatoval nezávislost velmi krátkodobých srážkových intenzit na nadmořské výšce. Podobně komplexní studie nebyla od té doby v Česku provedena, na rozdíl např. od Německa, kde byla v rámci projektů KOSTRA (Bartels a Malitz 2006) vytvořena podrobná klimatologie krátkodobých srážkových intenzit již od 5 minut, a to nejprve interpolací staničních dat, nověji za pomoci radarových dat. Metodou, která však nevyžaduje datové řady subdenních srážkových úhrnů, je metoda odvození subdenních návrhových srážek z denních úhrnů (Hrádek a Kovář 1994). Tato metoda také byla implementována do programu DES RAIN (Vaššová a Kovář 2011).

Velmi málo informací je k dispozici ohledně časového průběhu vysokých denních úhrnů. Pro účely hydrologického modelování se často využívají zjednodušené geometrické tvary hyetogramu jako např. obdélník (tzv. bloková srážka) nebo trojúhelník. Pokročilejší návrhové hyetogramy jsou konstruovány tak, aby maximální úhrny srážek za 1 až 24 hodin odpovídaly hodnotám na křivce IDF (Intensity-Duration-Frequency). Obdobu takto pojatého tzv. Chicago hyetogramu pro české území vytvořila Kulasová (2004) návrhem tzv. hyetogramu ČHMÚ. Návrhový denní úhrn je v něm disagregován do hodinových úseků s maximem intenzity během 12. hodiny, přičemž prudkost předchozího nárůstu i následného poklesu intenzity se zmenšuje směrem od tohoto maxima. Tvar hyetogramu je jednotný pro celé území ČR s jediným parametrem, totiž špičatostí, která v průměru klesá s nadmořskou výškou.

V práci Kulasové je prezentován i alternativní přístup k tvorbě návrhových hyetogramů, odvozených přímo ze srážkoměrných záznamů. Autoři navrhli čtveřici tzv. hyetogramů ÚFA a jim odpovídající čtyři oblasti ČR. Hyetogramy se navzájem podstatně liší svým tvarem. Dva z nich, reprezentující spíše horské oblasti, připomínají hyetogram ČHMÚ, přičemž časový úsek, do něhož je denní úhrn rozdělen, je zkrácen na 20, resp. 14 hodin. Maximální hodinová intenzita činí cca 25, resp. necelých 30 % denního úhrnu. Druhé dva hyetogramy mají charakterizovat srážkové epizody v nižších nadmořských výškách; návrhový denní úhrn je v nich soustředěn do pouhých šesti hodin, přičemž ve třetí z nich spadne 60, resp. více než 65 %, během druhé a třetí hodiny je to pak v součtu 80, resp. dokonce 90 % celkového úhrnu.

### **3.1.2 Postupy zpracování problematiky návrhových srážek**

Navržená metodika rozlišuje šest syntetických tvarů hyetogramů návrhových úhrnů srážek (kapitola 3.1.2.1), přičemž počítá se závislostí mezi zastoupením jednotlivých tvarů a dobou opakování úhrnů. Proto byla současně provedena frekvenční analýza srážkových úhrnů (kapitola 3.1.2.2) a na jejím základě bylo analyzováno prostorové rozdělení tvarů návrhových srážek (kapitola 3.1.2.3).

### **Zobecnění variant průběhu intenzit při silných srážkách v ČR**

Jako vstupní data sloužily hodnoty 10minutových srážkových intenzit z měsíců květen až září za desetileté období (2002 až 2011) s horizontálním rozlišením 1 km. Intenzity byly určeny z radarových měření jejich adjustací denními úhrny srážek ze srážkoměrných stanic v ČR metodou Sokola (2003). Podrobný popis tvorby vstupního datového souboru byl publikován Bližňákem a kol. (2017). Tvary návrhových srážek byly studovány pro časový úsek šest hodin. Jde o kompromis mezi denním úhrnem, který je z hlediska doby koncentrace v malém povodí příliš dlouhý, a hodinovým úhrnem, který zpravidla nezahrnuje celou příčinnou srážku a neumožňuje postihnout případné kolísání intenzity srážek v čase.

Časové rozlišení datového souboru umožnilo neuvažovat fixní počátky 6hodinových úseků, nýbrž klouzavě s krokem 10 minut. Byl vytvořen soubor 1950 epizod, sestávající z 50 největších 6hodinových úhrnů ve 39 uzlových bodech kilometrové sítě, které odpovídají poloze synoptických meteorologických stanic na území Česka, aby bylo možno ověřit případné nesrovnalosti v datech pomocí synoptických hlášení. Při pěti kalendářních měsících a desetiletém studovaném období se tyto epizody vyskytly v každém z uvažovaných bodů v průměru jednou za měsíc, přičemž velikosti úhrnů byly zpravidla v řádu 10 mm. Výběr uzlových bodů byl motivován snahou o jejich rovnoměrné rozdělení v rámci ČR, a to jak plošné, tak i z hlediska nadmořské výšky, neboť byl předpokládán rozdílný průběh srážkových intenzit v závislosti na geografické poloze.

Referenční epizody byly nejprve jednotlivě analyzovány z hlediska časového průběhu během šesti hodin. Za tímto účelem byly pro každou z epizod kromě 6hodinového srážkového úhrnu ( $R_6$ ) stanoveny i maximální 3hodinový ( $R_3$ ), 2hodinový ( $R_2$ ), 1,5hodinový ( $R_{1,5}$ ), hodinový ( $R_1$ ) a půlhodinový úhrn ( $R_{0,5}$ ), a to tak, aby kratší časový úsek zcela spadl do delšího úseku. Z úhrnů byly vypočteny hodnoty tří indexů, označovaných jako  $C_6$ ,  $C_{3,2}$  a  $C_1$ . Indexy vyjadřují koncentraci srážek během určitého časového úseku pomocí normovaných podílů srážkových úhrnů, kdy

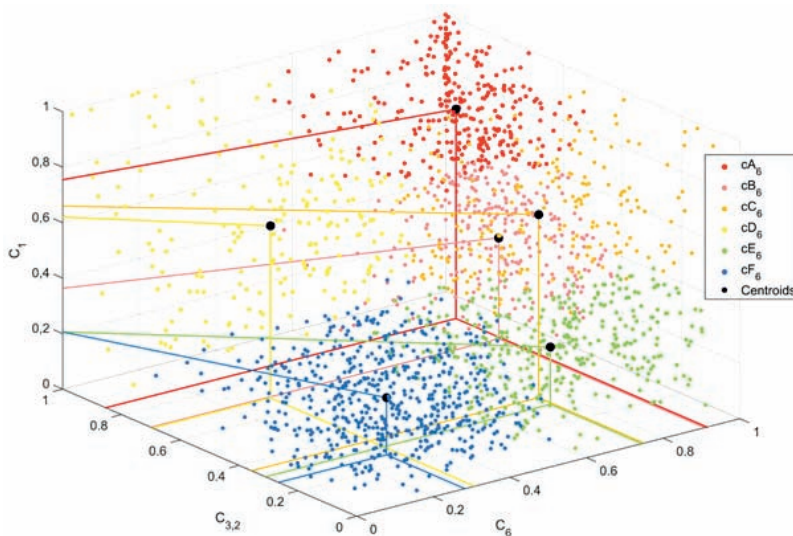
$$C_6 = 2(R_3/R_6 - 0,5) \quad (3.1)$$

$$C_{3,2} = [2(R_{1,5}/R_3 - 0,5) + 2(R_1/R_2 - 0,5)]/2 = R_{1,5}/R_3 + R_1/R_2 - 1 \quad (3.2)$$

$$C_1 = 2(R_{0,5}/R_1 - 0,5) \quad (3.3)$$

Indexy nabývají hodnot od nuly do jedné, přičemž nula odpovídá zcela rovnoměrnému rozdělení srážek za příslušný časový úsek, naopak jednička vyjadřuje, že srážka byla zcela koncentrována do polovičního nebo ještě kratšího časového úseku. Každá epizoda je tak charakterizována trojicí indexů, které určují její polohu v rámci virtuálního 3D prostoru.

Referenční epizody byly následně shlukovány na základě vzájemné proximity v uvedeném 3D prostoru. Jako nástroj shlukování byla zvolena shluková analýza metodou k-means, která umožňuje seskupit prvky do předem zvoleného počtu shluků. Shlukování bylo prováděno opakovaně s rostoucí hodnotou k, přičemž jako optimální byla vybrána hodnota  $k = 6$ . Rozdělení referenčních šestihodinových srážek do šesti skupin je znázorněno na Obrázku 15.



Obrázek 15: Třírozměrný graf shlukování referenčních 6hodinových úhrnů srážek. Na osách jsou zobrazeny hodnoty tří indexů použitých jako kritéria podobnosti. Shluky jsou rozlišeny barvami a reprezentovány svými centroidy.

Aby bylo možné zkonstruovat tvary návrhových srážek, byly nejprve všechny referenční epizody příslušného shluku disagregovány na tzv. hlavní a vedlejší srážky. Jako hlavní srážky označujeme jeden (pro varianty A, B, E, F) nebo dva (pro varianty C a D) půlhodinové úseky s největší srážkovou intenzitou  $R_{0.5}$ . K vymezení úseků vedlejších srážek byly použity časové úseky, v nichž byla dosažena maxima  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$ ; každý úsek vedlejších srážek je vymezen jako doplněk kratšího úseku v rámci delšího, tedy např. zbylých 30 minut v rámci hodiny s  $R_1$  (vedlejší srážky tedy mohou hlavní srážky předcházet, navazovat na ně, nebo být rozděleny do dvou kratších úseků před a po nich). Každá srážková epizoda je tak charakterizována jedním nebo dvěma hlavními úseky o délce 30 minut a sekvencí vedlejších srážek před hlavními srážkami a/nebo po nich, v případě variant C a D i mezi nimi. V každém úseku byly pro každou srážkovou epizodu stanoveny procentuální podíly srážek v jednotlivých 10 minutách každého úseku k celkové 6hodinové srážce; dále je označujeme jako relativní srážky, neboť jejich součet za epizodu je 100 %.

Následně bylo na základě průběhů referenčních epizod zkonstruováno šest návrhových hyetogramů. V každém shluku byly spočteny průměrné délky všech úseků a průměrné relativní úhrny srážek v 10minutových intervalech. Z nich pak byl zkonstruován zobecněný hyetogram dané varianty, a to postupným doplňováním hlavního úseku o úseky vedlejších srážek v 10minutovém kroku. Aplikací 10minutového klouzavého průměru v minutovém kroku byly zobecněné hyetogramy shlazeny, čímž došlo k odstranění jejich stupňovitosti.

Prostým shlazením by bylo 10minutové průměrné maximum vztaženo jen k jediné minutě, proto bylo minutové maximum návrhového hyetogramu stanoveno jako průsečík lineární interpolace nárůstu srážkové intenzity v prvních 10 minutách a poklesu srážkové intenzity v posledních 10 minutách hlavních srážek.

Výsledné tvary návrhových hyetogramů pro jednotlivé shluky jsou znázorněny na Obrázku 3 v kapitole 2.3.1. Je z něj zřejmé, že v případě srážek koncentrovaných do půl nebo jedné hodiny (tvary A a B) nastávají případně vedlejší srážky spíše po hlavní srážce než před ní. V případě kratšího či delšího přerušování srážek (tvary C a D) bývá častěji silnější první dílčí epizoda srážek. Především v případě rovnoměrného tvaru F je často trvání srážkové události delší než uvažovaných šest hodin, což silně ovlivňuje předchozí nasycenost povodí, viz kapitola 2.3.2.

### **Odhad návrhových srážkových úhrnů z adjustovaných radarových dat**

Pro účely studia zastoupení tvarů návrhových srážek bylo třeba zpracovat pomocnou frekvenční analýzu 6hodinových srážkových úhrnů za studované období, a to v síti pixelů radarové domény s horizontálním rozlišením 1 km. V jednotlivých pixelech byly odvozeny distribuční funkce, které popisují rozdělení pozorovaných vysokých srážkových úhrnů, a to pro každý z tvarů srážek zvlášť.



Z procesu odvození těchto tvarů bylo známo zařazení maxim z 39 uzlových bodů sítě; pro všechny ostatní body ČR byla příslušnost srážkových epizod ke shlukům stanovena výpočtem indexů  $C_6$ ,  $C_{3,2}$  a  $C_1$  a porovnáním vzdáleností epizody k šesti centroidům, charakterizujícím odvozené varianty srážek (Obrázek 15). Epizodě pak byl přiřazen ten syntetický tvar, k jehož centroidu byla její vzdálenost, standardizovaná střední vzdáleností v odpovídajícím shluku, nejmenší.

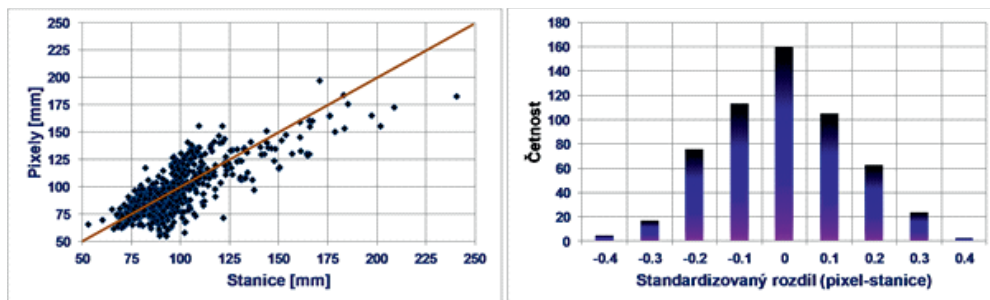
Pro popis rozdělení vysokých srážkových úhrnů bylo zvoleno tříparametrické zobecněné rozdělení extrémních hodnot (dále jen GEV; Coles, 2001), u něhož bylo prokázáno, že je vhodným parametrickým modelem pro srážkové extrémy na území ČR (Kyselý a Píček 2007). Parametry GEV byly určeny z hodnot výběrových L-momentů rozdělení ročních maxim adjustovaných úhrnů srážek standardizovaných střední hodnotou maxim v období 2002 až 2011 tak, že se první tři výběrové L-momenty položí rovny jejich teoretickým vyjádřením pro GEV (Hosking 1990). Odhady parametrů GEV pomocí L-momentů pro malé a střední výběry dat mohou mít lepší vlastnosti než v případě metody maximální věrohodnosti a metody konvenčních momentů (Hosking et al. 1985).

Výběrové L-momenty pro daný pixel byly spočteny tzv. ROI metodou („region-of-influence“; Burn, 1990) z bodových odhadů L-momentů v pixelech uvnitř statisticky homogenní oblasti příslušející tomuto pixelu. Statisticky homogenní oblast, kde se předpokládá stejné rozdělení standardizovaných extrémních hodnot, byla sestavována iteračním způsobem doporučeným a popsáným v práci (Kyselý et al. 2011) a její homogenita testována podle (Lu a Stedinger 1992).

Výběrové L-momenty pak byly odvozeny z průměrné hodnoty L koeficientu rozptylu a L šikmosti v oblasti (Hosking et al. 1997). Použití výše zmíněného regionálního přístupu pomocí metody ROI umožňuje provést robustnější odhad parametrů GEV, který je vhodný zejména s uvážením poměrně krátkého referenčního období (Kyselý et al. 2011).

Aplikovaná metoda frekvenční analýzy byla testována na analogickým způsobem odvozených distribučních funkcích vysokých jednodenních srážkových úhrnů ve více než pěti stech pixelech, v nichž se nacházejí srážkoměrné stanice. Návrhové úhrny v pixelech pro vybrané doby opakování byly porovnány s návrhovými úhrny na stanicích spočtenými s využitím stejného regionálního přístupu, avšak z měření v podstatně delším období 1961 až 2010 (Müller a Kašpar 2014). Výsledky porovnání potvrdily validitu aplikované metody frekvenční analýzy. I přes robustnost metody bylo přistoupeno k její dílčí optimalizaci minimalizací střední kvadratické chyby a maximalizací korelačního koeficientu mezi oběma soubory dat. Porovnání se omezilo na návrhové úhrny s dobou opakování 100 roků, pro kterou jsou rozdíly obecně největší a nejcitlivější na změny volitelných parametrů metody. Při optimalizaci se využily možnost měnit nastavení iteračního algoritmu

sestavování statisticky homogenní oblasti, zejména počáteční velikost oblasti a váha jednotlivých pixelů v oblasti (Kyselý et al. 2011), a vzhledem k vysokému prostorovému rozlišení též potřeba hladit parametry GEV vhodným prostorovým filtrem. Obrázek 16 shrnuje výsledky porovnání po optimalizaci pro parametry GEV shlazené dvoudimenzionálním Gaussovým filtrem s obecně různými vahami pro horizontální a vertikální vzdálenosti (Haddad a Akansu 1991). Střední kvadratická chyba standardizovaná návrhovými úhrny na stanicích dosahuje hodnoty 15,6 % a korelační koeficient hodnoty 0,8.



Obrázek 16: Hodnoty návrhových jednodenních úhrnů srážek s dobou opakování 100 roků na stanicích a v odpovídajících pixelech radarové domény (vlevo) a histogram četností rozdílů návrhových úhrnů mezi pixely a stanicemi standardizovaných úhrnem na stanicích (vpravo).

### Analýza zastoupení tvarů návrhových srážek na území ČR

Na základě znalosti parametrů GEV příslušejících jednotlivým tvarům srážek bylo následně stanoveno procentuální zastoupení každého z tvarů pro danou velikost nebo dobu opakování návrhového 6hodinového úhrnu. Odhad zastoupení byl proveden v každém pixelu radarové domény pro vybrané velikosti úhrnů a vybrané doby opakování úhrnů delší než 1 rok a ne delší než 100 roků s ohledem na pouze desetileté řady vstupních dat.

Pro velikost úhrnu  $R$  je procentuální zastoupení tvaru srážky  $i = i_0$  definováno jako stonásobek pravděpodobnosti výskytu  $P_{i0}$  úhrnu  $R$  při tvaru  $i_0$ . Pro jednoduchost lze  $P_{i0}$  odhadnout s dostatečnou přesností podle vztahu

$$P_{i0} \cong \left( N_{i0} \sum_{i=1}^6 \frac{1}{N_i} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

V (3.4)  $N_i$  označuje dobu opakování úhrnu  $R$  v rocích pro tvar  $i$ , která je určena vztahy

$$N_i = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( 1 - \gamma_i \frac{R - \beta_i}{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{\gamma_i}} \right] \right\}^{-1} \cdot \left( \gamma_i < 0 \wedge R > \beta_i + \frac{\alpha_i}{\gamma_i} \right) \vee \left( \gamma_i > 0 \wedge R < \beta_i + \frac{\alpha_i}{\gamma_i} \right) \quad (3.5)$$

$$N_i = \left\{ 1 - \exp \left[ - \exp \left( \frac{R - \beta_i}{\alpha_i} \right) \right] \right\}^{-1}, \gamma_i = 0 \quad (3.6)$$

kde  $\alpha_i$  je parametr měřítka,  $\beta_i$  parametr polohy a  $\gamma_i$  parametr tvaru GEV. Přesnost odhadu podle (3.4) se zvyšuje s rostoucími dobami opakování  $N_i$ .

Pro šestihodinový návrhový úhrn s dobou opakování  $N$  v rocích bylo procentuální zastoupení daného tvaru srážky určeno analogicky pomocí (3.4) s tím rozdílem, že bylo nejdříve nutné stanovit velikost tohoto úhrnu  $R$  a jeho doby opakování  $N_i$  pro jednotlivé tvary srážek. Velikost  $R$  byla odhadnuta iteračním způsobem s přesností 0,01 mm s využitím (3.5) a (3.6) tak, aby byla s co nejmenší chybou splněna rovnice

$$N = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^6 \left( 1 - \frac{1}{N_i} \right) \right\}^{-1} \quad (3.7)$$

kteřá předpokládá, že celková pravděpodobnost nepřekročení návrhového úhrnu  $R$  určená dobou opakování  $N$  je rovna součinu dílčích pravděpodobností nepřekročení určených dobami opakování  $N_i$ .

### 3.1.3 Porovnání s jinými řešeními problematiky návrhových srážek

Pokud byl ve starších pracích kromě velikosti návrhových srážkových úhrnů uvažován i tvar návrhového hyetogramu, byl vždy unifikován pro celou ČR, případně pro její jednotlivé oblasti. Navržená metodika naproti tomu zohledňuje koexistenci silných trvalých i přivalových srážek na většině lokalit Česka, a proto navrhuje šest syntetických hyetogramů platných pro celé území ČR. Prostorové rozdíly v klimatologii subdenních úhrnů srážek jsou vyjádřeny procentuálním zastoupením šesti hyetogramů pro jednotlivá malá povodí. Toto zastoupení je navíc vyjádřeno jako proměnné s ohledem na zvolenou dobu opakování srážky, což lépe odpovídá skutečnosti. Zvolené šestihodinové okno umožnilo nejen rozlišit koncentrované a rovnoměrné srážkové epizody, nýbrž zjistit také procentuální zastoupení případů se dvěma vrcholy intenzity srážek, a to ve dvou variantách syntetického hyetogramu.

Dalším zjevným přínosem navržené metodiky je kvantitativní analýza nasycenosti povodí, která je v průměru dosahována před návrhovými srážkami a může podstatně ovlivnit odtokovou odezvu. Novost přístupu je v rozlišení průměrné nasycenosti pro šest syntetických hyetogramů návrhových srážek i různé doby opakování jejich úhrnů. Nasycenost je vyjádřena jako procento normálu, což umožňuje využití těchto údajů v hydrologickém modelování. Jakkoliv je relativní nasycenost stanovena jen průměrně pro celou ČR, ukazují dosažené výsledky značný potenciál tohoto přístupu, který může být dále rozvíjen.

Předložená metodika je první prací tohoto druhu pro české území, která využívá velkého prostorového (1 km) a časového (10 min) rozlišení radarových měření, která jsou navíc adjustována daty z husté sítě srážkoměrů. Pouze desetiletá

datová základna sice neumožnila zcela přesný odhad parametrů rozdělení extrémních srážek, kvalita odhadu však byla podstatně zvýšena použitím progresivních metod regionální frekvenční analýzy. Také zde existuje potenciál pro další zpřesnění poznatků s prodlužujícím se obdobím pokrytým současně daty ze srážkoměrů a meteorologických radarů.

### 3.2 Přehled souvisejících metodik

Využitím hydrologického modelování se v minulosti zabývala celá řada dokumentů. Pro malá povodí a pro opatření v ploše povodí se často jedná o kombinaci hydrologického modelování a řešení protierozních opatření. V různých metodikách jsou vhodné modely často jen zmíněny bez konkrétního návodu na jejich využití. Některé modely, které jsou uváděny, lze jen obtížně promítnout do praxe, protože se jedná v podstatě o autorské softwary bez detailnějšího popisu. Jiné uváděné modely jsou naopak pro svou komplexnost velmi náročné na získání relevantních vstupních dat, detailní znalost problematiky a v neposlední řadě bývají relativně drahé.

Vývoj v modelovacích nástrojích jde rychle dopředu. Soudobé a stále platné dokumenty, které jsou dále popsány a vztahují se k modelování, aktuální stav příliš neodrážejí.

Metodika MŽP – odboru ochrany vod (MŽP ČR 2008) stanovuje postup komplexního řešení protipovodňové a protierozní ochrany pomocí přírodně blízkých opatření. Pro stanovení odtokových poměrů explicitně jmenuje metodu CN v klasické podobě a v modifikaci modelu MaxQ-DesQ. Jako na hlavní metodický podklad se odvolává na starší metodiku ochrany zemědělské půdy (Janeček et al. 2007). V kapitole hodnocení účinnosti navržených opatření pak metodika MŽP pro detailní posouzení efektů uvádí model HYDROG.

Doporučený standard technický – Hrazení bystřin (Hrázdil, 2016) se věnuje zejména technickému návrhu koryt a objektů, pracuje pouze s termínem návrhového průtoku jako zadaného vstupu.

Doporučený standard technický – Protierozní ochrana (Váška, 2000) jmenuje mezi empirickými modely USLE a dva z ní odvozené modely. RUSLE představuje pouze zpřesnění výpočtu některých faktorů původní univerzální rovnice, MUSLE potom univerzální rovnicí kombinuje s metodou CN. Mezi modely erozních procesů jsou doporučeny modely AGNPS, EPIC, SMODERP, a EROSION 2D a 3D.

Doporučený standard technický – Hydrologické výpočty v protierozní ochraně půdy (ČKAIT, 2001) v případech, kdy není nutné či možné použít hydrologické podklady podle ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod (Kulasová a Fremrová 2014) uvádí jako vhodný model metodu CN pro výpočet objemu přímého odtoku. Pro stanovení kulminačního průtoku pak udává nomogram založený na době koncentrace. Poněkud problematická může být kombinace této na empirickém základě založené metody stanovení kulminačního průtoku s uváděným přístupem pro výpočet doby

koncentrace. Totožný přístup jako předchozí je podrobněji rozveden v metodice Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček 2012), která jej doplňuje o simulační modely HYDROCAD, SMODERP, KINFIL, EROSION 2D a 3D a WEPP. Modely jsou uvedeny bez bližšího popisu. Získání vstupních dat metodika nezahrnuje.

Česká technická norma ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních (Kaisler et al. 2014) pracuje s termínem Kontrolní povodňová vlna, kterou má zpracovávat ČHMÚ nebo jiné odborné pracoviště. Tato norma se ale spíše vztahuje k významným vodním dílům a většina staveb v krajině vyjma několika málo významných rybníků a suchých nádrží do ní nikterak nespadá. Nicméně tato norma uvádí, že kromě statistického přístupu je k jejímu odvození možné využít deterministický model a jako příklad norma uvádí HEC-1 nebo frekvenční verzi TOP-modelu.

Metodika „Navrhování technických protierozních opatření“ (Kadlec et al. 2014) se soustřeďuje především na umístění prvků z hlediska protierozní ochrany a vlastní dimenzování konkrétních prvků je omezeno na metodu SCS-CN a částečně na model SMODERP. Metodika obsahuje především přehled technických protierozních opatření. Získání relevantních podkladů není v této metodice nijak do detailu řešeno.

Odvětvová technická norma TNV 75 2102 – Úpravy potoků (Havlík a Fremrová 2010) pak umožňuje využití hydrologické modely do povodí o ploše 5 km<sup>2</sup>.

## 4 Popis uplatnění certifikované metodiky

Tato metodika najde své uplatnění ve vodním hospodářství, např. při zpracování studií sloužících k ochraně půdního fondu, pozemkových úprav, ke zvýšení retence krajiny, protierozních a protipovodňových opatření. Potenciálními uživateli jsou projektanti hydrotechnických staveb v ploše povodí a malých povodích, dále autoři studií odtokových poměrů v povodích, které mají za cíl identifikovat kritické body infrastruktury, navrhnout zlepšení stavu povrchových vod a zkvalitnit ochranu povodí. Kvalitně zpracované studie předkládající variantní řešení jsou důležitým vstupem pro navrhování plánu společných zařízení v rámci komplexních pozemkových úprav, které se tak mohou stát základem dlouhodobě udržitelné stabilní krajiny.

Metodika poskytuje dostatečný návod na využití srážkových dat pro navrhování opatření v krajině tak, aby řešená lokalita byla využita co nejefektivněji. Dále pak poskytuje ucelený náhled na problematiku hydrologického modelování s návazností na realizaci staveb.

Tato publikace je v tištěné podobě vydána v omezeném nákladu a bude nabídnuta odborné veřejnosti. Elektronická verze bude umístěna na stránkách [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz), případně na jiném místě na stránkách hlavního řešitele.

Propagace této metodiky bude po jejím vydání šířena jak mezi projektanty komory krajinných inženýrů, tak na pracoviště pozemkového úřadu, dotčená ministerstva, pracoviště podniků povodí a vybraných orgánů státní správy a samosprávy, případně dalších zainteresovaných organizací a profesních svazů, jako jsou ČKAIT nebo ČSKI. Dále se předpokládá propagace při příležitosti workshopů a na tematicky blízkých konferencích, aplikována bude i v rámci výuky předmětů spojených s problematikou hydrologického modelování, protierozní ochrany a pozemkových úprav. Metodika bude poskytnuta jako podklad pro výuku odborným vysokým a středním školám v oblasti vodního hospodářství a krajinného inženýrství.

## 5 Ekonomické aspekty

Tato metodika se zaměřuje především na variabilitu návrhových srážek a jejich dopad na výsledky hydrologických modelů, které slouží jako nástroje pro navrhování technických úprav odtokových poměrů, případně protierozních opatření v ploše povodí.

Snahou předkládané metodiky je minimalizace nákladů spojených s předprojektovou přípravou a variantním řešením úprav v ploše povodí nebo na drobných tocích. Pro zavedení této metodiky nejsou nutné žádné další přímé investice. Naopak snahou autorů je zpřístupnit odborné veřejnosti nová a jinak obtížně získatelná data. Uplatnění této metodiky spočívá také ve zefektivnění vlastního procesu návrhu a projektování. Metodika poskytuje kvalitnější podklady a návody, které umožní efektivnější a účinnější návrh opatření v krajině. Tuto úsporu nelze reálně finančně ohodnotit. Celková úspora je závislá na počtu realizovaných projektů.

Účinnější opatření v krajině se mohou projevit zvýšením retence vody v krajině. Kvalitní návrh pak umožní lepší funkci daného opatření a zároveň sníží možné škody na vlastní konstrukci a okolí způsobené nevhodným návrhem. Na straně druhé zbytečně předimenzované stavby znamenají větší zábor půdy, což například při tvorbě plánu společných zařízení může znamenat zásadní problém, anebo zvýšení investice na straně pořizovatele. Všechny tyto benefity jsou zřejmé, ale jejich ekonomické vyčíslení by nutně vedlo k příliš hrubým a nejistým odhadům.

Důležitou součástí předkládané metodiky je datový portál [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz), který bude do budoucna provozovat pracoviště řešitele. Portál je navržen tak, aby nevyžadoval žádné zásadní nutné výdaje. Zvolené řešení není licencováno žádným komerčním softwarem, se kterým by byly spojeny další náklady. Na tomto webovém portálu jsou dostupné geoprocessingové služby a nástroje, které slouží k rychlému a efektivnímu získání návrhových srážek.

## 6 Seznam použité související literatury

AG BODEN, 1994. Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. ed. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter.

BARTELS, Hella a Gabriele MALITZ, 2006. KOSTRA-DWD-2000: An update of the nation-wide information on heavy-precipitation depths in Germany. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. 50(2), 78–80.

BLIŽŇÁK, V., Marek KAŠPAR a Miloslav MÜLLER, 2017. Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. *International Journal of Climatology* [online]. B.m.: John Wiley and Sons Ltd [vid. 2017-12-09]. ISSN 08998418. Dostupné z: doi:10.1002/joc.5202

BRÁZDIL, R., P. DOBROVOLNÝ, L. ELLEDER, V. KAKOS, O. KOTYZA, V. KVĚTOŇ, J. MACKOVÁ, M. MÜLLER, J. ŠTĚKL, R. TOLASZ a H. VALÁŠEK, 2005. Historické a současné povodně v České republice. Brno, Praha: Masarykova univerzita a ČHMÚ.

BURN, Donald H., 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research* [online]. 26(10), 2257–2265 [vid. 2018-02-13]. ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/WR026i010p02257

COLES, Stuart, 2001. An Introduction to statistical modeling of extreme values. London: Springer Verlag. ISBN 1-85233-459-2 CN - B 12692.

HADDAD, R A a A N AKANSU, 1991. A Class of Fast Gaussian Binomial Filters for Speech and Image Processing. *Trans. Sig. Proc.* [online]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 39(3), 723–727. ISSN 1053-587X. Dostupné z: doi:10.1109/78.80892

HAVLÍK, Aleš a Lenka FREMROVÁ, 2010. TNV 75 2102 Úpravy potoků [online]. 2010. Praha: MZe ČR. Dostupné z: [http://eagri.cz/public/web/file/104408/TNV\\_\\_75\\_\\_2102.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/104408/TNV__75__2102.pdf)

HOSKING, J R M, 1990. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* [online]. B.m.: [Royal Statistical Society, Wiley], 52(1), 105–124. ISSN 00359246. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/2345653>

HOSKING, J R M, James R WALLIS a Cambridge University PRESS., 1997. Regional Frequency Analysis : an Approach Based on L-Moments [online]. 1997. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780511529443 0511529449. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511529443>

HOSKING, J R M, J R WALLIS a E F WOOD, 1985. Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments. *Technometrics* [online]. B.m.: [Taylor & Francis, Ltd., American Statistical Association, American Society for Quality], 27(3), 251–261. ISSN 00401706. Dostupné z: doi:10.2307/1269706

HRÁDEK, F a P KOVÁŘ, 1994. Výpočet náhradních intenzit přívalových dešťů. Vodní hospodářství. 11,49. ISSN 1211-0760.

HRAZDIL, J, ČSN 75 2106-1 (752106) - Hrazení bystřin a strží - Část 1: Obecně, 2016, Český normalizační institut. JANEČEK M., VÁŠKA, J, 2001, DOS T 4.06 – Hydrologické výpočty v protierozní ochraně, ČKAIT, ISBN 80–86364–40–2

JANEČEK, Miloslav, 2012. Ochrana zemědělské půdy před erozí- Metodika. 2012. Praha: Česká zemědělská univerzita Praha. ISSN 978-80-87415-42-9.

JANEČEK, Miloslav, Martin BEČVÁŘ, Jaroslav BOHUSLÁVEK, Jana DUFKOVÁ, Miroslav DUMBROVSKÝ, Tomáš DOSTÁL, Josef HŮLA, Alena JAKUBÍKOVÁ, Václav KADLEC, Josef KRÁSA, Eliška KUBÁTOVÁ, Ivan NOVOTNÝ, Jana PODHRÁZSKÁ, Martin TIPPL, František TOMAN, Jan VOPRAVIL a Karel VRÁNA, 2007. Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. 2007. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. ISBN 978-80-254-0973-2.

KADLEC, Václav, Tomáš DOSTÁL, Karel VRÁNA, Petr KAVKA, Josef KRÁSA, Jan DEVÁTÝ, Jana PODHRÁZSKÁ, Michal POCHOP, Petra KULÍŘOVÁ, Darina HEŘMANOVSKÁ, Ivan NOVOTNÝ a Vladimír PAPAJ, 2014. Navrhování technických protierozních opatření. 2014.

KAISLER, Jiří, Radek VESELÝ, Libor MACHÁČEK, Miloš SEDLÁČEK, Petr SMRŽ a Stanislav ŽATECKÝ, 2014. ČSN 75 2935 – Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. 2014. B.m.: Český normalizační institut.

KAVKA, P, L STROUHAL, LANDA M. a V DAVID, 2016. Nástroj pro odvození návrhových srážkových úhrnů na území ČR. Vodní hospodářství. 66(8), 9–15. ISSN 1211-0760.

KRÁSA, J, P ROSENDORF, J HEJZLAR, J BOROVEC, T DOSTÁL, V DAVID, L ANSORGE, J DURAS, B JANOTOVÁ, M BAUER, J DEVÁTÝ, L STROUHAL, VRÁNA K. a D FIALA, 2013. Hodnocení ohrožení vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy. 2013.

KULASOVÁ, Bohuslava a Lenka FREMROVÁ, 2014. ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod. 2014. Praha: Český normalizační institut.

KULASOVÁ, Bohuslava, Petr ŠERCL a Miloň BOHÁČ, 2004. Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní.

KYSELÝ, Jan, Ladislav GAÁL a Jan PICEK, 2011. Comparison of regional and at-site approaches to modelling probabilities of heavy precipitation. International Journal of Climatology [online]. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd., 31(10), 1457–1472 [vid. 2018-02-13]. ISSN 08998418. Dostupné z: doi:10.1002/joc.2182

KYSELÝ, J a J PICEK, 2007. Regional growth curves and improved design value estimates of extreme precipitation events in the Czech Republic. Climate Research [online]. 33, 243–255. Dostupné z: doi:10.3354/cr033243



LU, Li-Hsiung a Jerry R. STEDINGER, 1992. Sampling variance of normalized GEV/PWM quantile estimators and a regional homogeneity test. *Journal of Hydrology* [online]. B.m.: Elsevier, 138(1–2), 223–245 [vid. 2018-02-13]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/0022-1694(92)90166-S

MACKŮ, J., 2012. Problematika stanovení hydrologických skupin půd v lesích. In: *Krajinné inženýrství 2012*. Praha: Ministerstvo zemědělství, s. 15–22. ISBN 978-80- 87384-03- 9.

MIHÁLIKOVÁ, Markéta, Svatopluk MATULA a František DOLEŽAL, 2013. HYPRESCZ - Database of soil hydrophysical properties in the Czech Republic. *Soil and Water Research*. 8(1), 34–41. ISSN 18015395.

MÜLLER, Miloslav a Marek KAŠPAR, 2014. Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* [online]. 14(2), 473–483. Dostupné z: doi:10.5194/nhess- 14-473-2014

MŽP ČR, 2008. Metodika odboru ochrany vod, která stanovuje postup komplexního řešení protipovodňové a protierozní ochrany pomocí přírodně blízkých opatření. *Věstník ministerstva životního prostředí*. XVIII. ISSN 0862-9013.

ROSENDORF, P, T DOSTÁL, J KRÁSA, M HANEL, M BAUER, V DAVID, B JÁCHYMOVÁ, J DEVÁTÝ, STROUHAL L. a M DOČKAL, 2016. Metodika stanovení území potenciálně ohrožených dopady přívalových srážek spojených s erozí půdy při zohlednění očekávané změny klimatu [online]. 2016. Praha: VÚV T. G. Masaryka, v.v.i. Dostupné z: <http://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/eroznismyv/default.asp>

SCS, 1986. *Tech. Rep. 55: Urban hydrology for small watersheds*.

SOKOL, Z, 2003. The Use of Radar and Gauge Measurements to Estimate Areal Precipitation for Several Czech River Basins. *Studia Geophysica et Geodaetica* [online]. 47(3), 587–604. ISSN 1573-1626. Dostupné z: doi:10.1023/A:1024715702575

ŠAMAJ, F, Š VALOVIČ a R BRÁZDIL, 1985. Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901 - 1980. In: F ŠAMAJ, ed. *Zborník prác Slovenského hydrometeorologického ústavu*. Bratislava: ALFA, s. 9.

TOLASZ, Radim, Rudolf BRÁZDIL, Otto BULÍŘ, Petr DOBROVOLNÝ, Martin DUBROVSKÝ, Lenka HÁJKOVÁ, Olga HALÁSOVÁ, Jiří HOSTÝNEK, Michal JANOUCHE a Mojmír KOHUT, 2007. *Atlas podnebí Česka* [online]. 1. vydání. Praha, Olomouc: Český hydrometeorologický ústav, Universita Palackého. ISBN 978-80-86690-26-1. Dostupné z: <http://www.chmi.cz/meteo/ok/atlas/uvod.html>

TÓTH, B., M. W EYNANTS, A. N EMES, A. M AKÓ, G. B ILAS a G. T ÓTH, 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science* [online]. B.m.: Blackwell Publishing Ltd, 66(1), 226–238. ISSN 13652389. Dostupné z: doi:10.1111/ejss.12192

TRUPL, J, 1958. *Intenzity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Praha: VÚV Praha.

VÁŠKA, J, 2000, *DOST 3.17 – Protierozní ochrana*, Informační centrum ČKAIT, Praha

VAŠŠOVÁ, Darina a Pavel KOVÁŘ, 2011. Program DES\_\_RAIN [online]. 2011. Praha: ČZU v Praze. Dostupné z: [http://fzp.czu.cz/vyzkum/programs/des\\_\\_rain/des\\_\\_rain.pdf](http://fzp.czu.cz/vyzkum/programs/des__rain/des__rain.pdf)

VON WERNER, Michael, 2006. Erosion-3D User manual. Ver. 3.1.1.

WÖSTEN, J.H.M, A LILLY, A NEMES a C LE BAS, 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma [online]. 90(3–4), 169–185 [vid. 2016-08-14]. ISSN 00167061. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-7061(98)00132-3

## 7 Seznam publikací, které předcházely metodice

BLIŽŇÁK, V., Kašpar, M., Müller, M., 2017: Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. Int. J. Climatol., published online. DOI: 10.1002/joc.5202

Mapa výskytu krátkodobých dešťů na kategorizovaných povodí IV řádu, ČVUT v Praze, 2017

BLIŽŇÁK, V., Kašpar, M., Müller, M., 2015. Comparison between radar derived precipitation estimates and rain gauge data in a sub-daily resolution. In: Molnar, P. and Peleg, N. (Eds.), Rainfall in urban and natural systems. Proceedings of the 10th International Workshop on Precipitation in Urban Areas (UrbanRain15), Pontresina, 1-5 December 2015 (Paper UR15-02). ETH-Zürich, Institute of Environmental Engineering, doi: 10.3929/ethz-a-010549004.

LANDA, M., et al. BUILDING A COMPLETE FREE AND OPEN SOURCE GIS INFRASTRUCTURE FOR HYDROLOGICAL COMPUTING AND DATA PUBLICATION USING GIS.LAB AND GISQUICK PLATFORMS [online]. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. FOSS4G-EU 2017. Paris | Marne-la-Vallée, 18.07.2017 - 22.07.2017. Munich: ISPRS. 2017, s. 101-105. sv. XLII-4/W2. ISSN 2194-9034. Dostupné z: <https://www.int-archphotogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W2/101/2017/>

MULLER, M., et al. Precipitation intensity during heavy rains in various altitudes.. In: Rainfall in urban and natural systems: Proceedings of the 10th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. Urban Rain 2015. Pontresina, 01.12.2015 - 05.12.2015. Zürich: ETH. 2015

STROUHAL, L., et al. CLASSIFICATION OF SMALL WATERSHEDS IN CZECH REPUBLIC FOR HYDROLOGICAL MODELLING. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, Conference Proceedings. 2017, 17(31), s. 121-128. ISSN 1314-2704. Dostupné z: <https://sgemworld.at/sgemlib/spip.php?article9496>

KAVKA, P., et al. Kategorizace povodí IV. řádu pro potřeby srážko-odtokového modelování. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace. 2018, 2018ISSN 0322-8916.

KAVKA, P., et al. Nástroj pro odvození návrhových srážkových úhrnů na území ČR. Vodní hospodářství. 2016, 66(8), s. 9-15. ISSN 1211-0760.

NYVLT, O. N. a KAVKA, P. Řídicí systém mobilního simulátoru deště. AUTOMA - časopis pro automatizační techniku. 2016, 2016s. 29-34. ISSN 1210-9592. Dostupné z: [http://automa.cz/cz/casopis-clanky/ridici-system-mobilniho-simulatoru-deste-2016\\_07\\_54961\\_07766/](http://automa.cz/cz/casopis-clanky/ridici-system-mobilniho-simulatoru-deste-2016_07_54961_07766/)

STROUHAL, L., KAVKA, P. a WEYSKRABOVÁ, L. Variabilita odezvy vybraných hydrologických modelů na typické průběhy krátkodobých srážek. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace. 2018, 2018ISSN 0322-8916.

LANDA M., KAVKA, P., STROUHAL, L. a CAJTHAML J. Webové služby pro poskytování návrhových srážek. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace. 2018, 2018ISSN 0322-8916.

BAUER, M., et al. Rainfall simulators - innovations seeking rainfall uniformity and automatic flow rate measurements [online]. In: Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union General Assembly 2016. Vienna, 17.04.2016 - 22.04.2016. Göttingen: Copernicus GmbH. 2016, Dostupné z: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-936.pdf>

BLIŽŇÁK, V., Kašpar, M., Müller, M.: Radar-based diurnal cycle of summer precipitation in the Czech Republic. 17th EMS Annual Meeting – European Conference for Applied Meteorology and Climatology, Dublin (Ireland), 4-8 September 2017.

BLIŽŇÁK, V., Kašpar, M., Müller, M.: Radar-based precipitation climatology of the Czech Republic in the warm part of the year. 16th EMS Annual Meeting & ECAC, Trieste (Italy), 12–16 September 2016

BLIŽŇÁK, V., Kašpar, M., Müller, M.: Radar-based precipitation climatology of the Czech Republic in the warm part of the year. European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Antalya (Turkey), 10–14 October 2016.

BLIŽŇÁK, V., Kašpar, M., Müller, M.: Sub-daily temporal reconstruction of historical extreme precipitation events using NWP model simulations. 9th European Conference on Severe Storms, Pula (Croatia), 18–22 September 2017.

BLIŽŇÁK, V., Müller, M., Kašpar, M., 2017. Radarová klimatologie letních srážek s ohledem na orografii České republiky. In: Lysá hora – 120 let meteorologických měření a pozorování. Sborník příspěvků z konference ČHMÚ a ČMeS, Lysá hora, 14. – 15. června 2017, s. 162-165.

BLIŽŇÁK, V., Müller, M., Kašpar, M.: Radarová klimatologie letních srážek s ohledem na orografii České republiky. Lysá hora – 120 let meteorologických měření a pozorování. Konference ČHMÚ a ČMeS, Lysá hora, 14. – 15. 6. 2017.

Gvoždíková, B., Müller, M., Kašpar, M.: The spatial and seasonal variability of extreme precipitation events in Central Europe. 17th EMS Annual Meeting – European Conference for Applied Meteorology and Climatology, Dublin (Ireland), 4-8 September 2017.

Kašpar, M., Bližňák, V., Müller, M.: High resolution spatial analysis of short-term rainfall time structure variability. 17th EMS Annual Meeting – European Conference for Applied Meteorology and Climatology, Dublin (Ireland), 4-8 September 2017.

Kašpar, M., Müller, M., Bližňák, V.: Analysis of heavy rains with respect to precipitation intensity course. 16th EMS Annual Meeting & ECAC, Trieste (Italy), 12–16 September 2016.

KAVKA, P., et al. Exploring the Variability of Short-term Precipitation and Hydrological Response of Small Czech Watersheds [online]. In: Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union General Assembly 2017. Vienna, 23.04.2017 - 28.04.2017. Göttingen: Copernicus GmbH. 2017, EGU General Assembly 2017. sv. 19. ISSN 1607-7962.

KAVKA, P., et al. Problematika návrhových srážek v hydrologických modelech. In: Odborná konference s mezinárodní účastí Vodní toky 2016 : správa vodních toků, financování, legislativa, výzkum, extrémní hydrologické jevy (sucho, povodně), plánování v oblasti vod, technická opatření na vodních tocích. Kostelec nad Černými Lesy: Lesnická práce. 2016, s. 134-138. ISBN 978-80-7458-091-8.

KAVKA, P., et al. Variabilita krátkodobých srážek jako zdroj nejistot v hydrologickém modelování v malých povodích České republiky. In: BRYCH, Karel a TESAŘ, Miroslav, eds. HYDROLOGIE MALÉHO POVODÍ 2017. Hydrologie malého povodí 2017. Praha, 18.04.2017 - 20.04.2017. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i.. 2017, ISBN 978-80-87117-15-6.

KAVKA, P., et al. Variability of Short-term Precipitation and Runoff in Small Czech Drainage Basins [online]. In: Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union General Assembly 2016. Vienna, 17.04.2016 - 22.04.2016. Göttingen: Copernicus GmbH. 2016

KAVKA, P., JEŘÁBEK, J., a STROUHAL, L. Numerical model SMODERP [online]. In: AGU Fall meeting 2016. AGU Fall meeting. San Francisco, 12.12.2016 - 16.12.2016. Baltimore: AGU. 2016

KAVKA, P., LANDA, M., a STROUHAL, L. Využití GIS pro geostatistické zpracování srážkových podkladů [online]. In: PAVELKA, K., et al., eds. Sborník w orkshopu R PAS a SVK, T elč 2015. Workshop fotogrammetrie, DPZ, laserového skenování a GIS - Telč 2015. Telč, 09.11.2015 - 11.11.2015. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. 2015, ISBN 978-80-01-05828-2.

LANDA, M. a KAVKA, P. A GIS Tool for Reduction Day Precipitation to Subday [online]. In: Geomatics WorkBooks. FOSS4G Europe 2015. Como, 14.07.2015 - 17.07.2015. Politecnico di Milano. 2015, s. 725. sv. 1 2. I SSN 1 591-092X. Dostupné z: [http://geomatica.como.polimi.it/workbooks/n12/GW12\\_FOSS4G-eu15.pdf](http://geomatica.como.polimi.it/workbooks/n12/GW12_FOSS4G-eu15.pdf)

LANDA, M., et al. GIS.lab: Hydrological modelling on the Web. In: FOSS4G 2016. FOSS4G 2016. Bonn, 24.08.2016 - 26.08.2016. OSGeo. 2016

MÜLLER, M., Bližňák, V., Kašpar, M.: Analysis of short-term rainfall time structure by concentration indexes. 9th European Conference on Severe Storms, Pula (Croatia), 18–22 September 2017.

MÜLLER, M., Kašpar, M., Bližňák, V.: Quantification of precipitation intensity variations during heavy rains. European Geosciences Union, General Assembly, Wien (Austria), 18–22 April 2016.

NEUMANN, M. a KAVKA, P. VYUŽITÍ DVOU METOD MĚŘENÍ RYCHLOSTI POVRCHOVÉHO ODTOKU KE KALIBRACI SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH M ODELŮ. In: L ABURDA, T ., e t a l., e ds. Voda a krajina 2015. Voda a krajina 2015. Praha, 23.09.2015. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliiorací a krajinného hospodářství. 2015, s. 81-89. ISBN 978-80-01-05794-0.

STROUHAL, L., ZUMR, D., a KAVKA, P. Investigating runoff generation on compacted subsoil using a field rainfall simulator [online]. In: Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union General Assembly 2016. Vienna, 17.04.2016 - 22.04.2016. Göttingen: Copernicus GmbH. 2016, Dostupné z: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-1135.pdf>

WEYSKRABOVÁ, L., KAVKA, P., a STROUHAL, L. Návrhové srážky pro inženýrskou praxi. In: CAJTHAML, J., et al., eds. GIS a životní prostředí 2015. GIS a životní prostředí 2015. Týnec nad Sázavou, 09.06.2015 - 10.06.2015. 2015, s. 30. 1. vydání. ISBN 978-80-01-05717-9.

## 8 Přílohy

Tabulka 16: Rozložení procentuálních pětiminutových úhrnů pro jednotlivé typy hyetogramů.

Čas (min)	Procentuální (jednotkové) pětiminutové úhrny pro typy srážek A - F [%]					
	A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	0	0	0
5	0,02	0,02	0,11	0,23	0,09	0,58
10	0,03	0,03	0,18	0,35	0,13	0,84
15	0,05	0,05	0,26	0,45	0,16	0,97
20	0,06	0,05	0,30	0,52	0,18	1,04
25	0,07	0,05	0,31	0,56	0,19	1,04
30	0,06	0,06	0,30	0,73	0,20	1,03
35	0,06	0,06	0,26	1,08	0,22	1,01
40	0,05	0,07	0,24	1,46	0,24	0,99
45	0,04	0,08	0,23	2,42	0,27	0,99
50	0,04	0,08	0,23	0,40	0,29	0,99
55	0,04	0,08	0,25	5,63	0,30	1,00
60	0,04	0,07	0,25	7,34	0,32	1,00
65	0,04	0,07	0,24	7,17	0,33	1,01
70	0,04	0,07	0,23	5,14	0,34	1,02
75	0,04	0,06	0,23	3,54	0,35	1,05
80	0,05	0,06	0,24	2,36	0,37	1,07
85	0,05	0,07	0,24	1,59	0,38	1,09
90	0,04	0,07	0,26	1,22	0,40	1,12
95	0,04	0,07	0,56	1,03	0,47	1,21
100	0,03	0,08	1,12	0,97	0,73	1,33
105	0,03	0,08	2,32	0,91	1,01	1,35
110	0,03	0,14	4,17	0,83	1,26	1,32
115	0,07	0,22	5,89	0,76	1,48	1,34
120	0,11	0,32	7,47	0,70	1,52	1,37
125	0,17	0,44	7,27	0,63	1,69	1,49
130	0,22	0,50	5,27	0,51	1,92	1,61
135	0,23	0,65	3,63	0,39	2,13	1,60
140	0,23	0,85	2,34	0,32	2,32	1,60
145	0,22	1,17	1,54	0,26	2,32	1,75
150	0,29	1,57	1,22	0,24	2,27	1,92
155	0,46	2,34	0,98	0,24	2,50	2,15
160	0,92	3,30	0,81	0,24	2,77	2,61
165	1,83	4,56	0,72	0,23	3,09	2,97
170	5,71	6,60	0,71	0,22	3,80	3,34
175	10,21	8,21	0,69	0,22	4,39	3,59
180	14,47	9,69	0,71	0,22	4,88	3,28
185	17,90	10,1	0,77	0,22	5,17	2,92
190	14,11	8,32	0,88	0,23	4,66	2,55
195	8,82	6,67	1,15	0,23	4,10	2,13
200	5,49	5,40	1,41	0,23	3,63	1,94
205	2,71	4,07	1,83	0,23	3,08	1,72
210	1,68	3,33	2,87	0,23	2,80	1,53

215	1,10	2,65	3,79	0,23	2,51	1,55
220	0,91	2,00	4,73	0,27	2,27	1,58
225	0,92	1,69	5,33	0,35	2,25	1,51
230	0,89	1,55	4,53	0,45	2,24	1,40
235	0,81	1,40	3,60	0,57	2,09	1,34
240	0,72	1,24	2,69	0,65	1,88	1,29
245	0,61	1,02	1,70	0,71	1,78	1,30
250	0,48	0,78	1,31	0,77	1,67	1,31
255	0,34	0,77	0,96	0,85	1,57	1,23
260	0,38	0,82	0,66	0,95	1,50	1,11
265	0,61	0,77	0,62	1,07	1,40	1,05
270	0,69	0,69	0,61	1,45	1,22	1,02
275	0,58	0,60	0,59	2,40	1,03	1,01
280	0,47	0,48	0,58	3,26	0,83	1,01
285	0,34	0,35	0,57	4,42	0,66	1,01
290	0,23	0,32	0,57	5,46	0,63	1,02
295	0,24	0,34	0,59	4,72	0,61	1,04
300	0,25	0,32	0,59	3,57	0,59	1,05
305	0,24	0,30	0,57	2,57	0,57	1,06
310	0,24	0,29	0,55	1,50	0,54	1,06
315	0,25	0,28	0,52	1,08	0,50	1,06
320	0,27	0,26	0,51	1,04	0,46	1,05
325	0,30	0,24	0,52	1,07	0,42	1,03
330	0,30	0,22	0,51	1,00	0,39	1,02
335	0,29	0,20	0,49	0,82	0,37	1,01
340	0,26	0,18	0,44	0,70	0,34	0,99
345	0,20	0,15	0,39	0,63	0,30	0,98
350	0,14	0,12	0,32	0,54	0,25	0,92
355	0,09	0,08	0,26	0,45	0,19	0,81
360	0,05	0,06	0,22	0,38	0,15	0,72

Tabulka 17: Informativní hodnoty středních hodnot vybraných hydro-pedologických parametrů ( $K_s$ , počáteční vlhkost pro tři stavy nasycení, tlak na čele zvlhčení pro průměrný stav nasycení). Jedná se o průměrné střední hodnoty, odchylky těchto hodnot se pohybují v jednom i více řádech).

Kód	Půdní druh dle FAO	$K_s$		Vlhkost IC1 cm <sup>3</sup> / cm <sup>3</sup>	Vlhkost IC2 cm <sup>3</sup> / cm <sup>3</sup>	Vlhkost IC3 cm <sup>3</sup> / cm <sup>3</sup>	PSI <sub>IC2</sub> m
		mm/h	m/s				
P	sand	3,6	1,000E-06	0,061	0,236	0,411	-0,187
hP	loamy sand	3,6	1,000E-06	0,052	0,264	0,475	-0,142
pH	sandy loam	18,5	5,139E-06	0,005	0,223	0,441	-0,352
H	loam	6	1,667E-06	0,005	0,248	0,491	-0,783
rH	silt loam	0,5	1,389E-07	0,005	0,215	0,424	-1,283
R	silt	0,5	1,389E-07	0,009	0,237	0,465	-1,283

pJH	sandy clay loam	18,5	5,139E-06	0,005	0,207	0,409	-0,509
jH	clay loam	6	1,667E-06	0,079	0,261	0,442	-1,093
rjH	silty clay loam	0,5	1,389E-07	0,005	0,234	0,463	-0,612
pJ	sandy clay	18,5	5,139E-06	0,192	0,358	0,523	-0,270
rJ	silty clay	7	1,944E-06	0,005	0,230	0,455	-0,870
J	clay	0,5	1,389E-07	0,005	0,252	0,499	-0,726

*Ks – nasycená hydraulická vodivost*

*IC – počáteční vlhkost*

*PsIC2 – tlak na čele zvlhčení pro stav středního nasycení*

*Tabulka 18: Průměrné fyzikální parametry pro vybrané kategorie půdního pokryvu.*

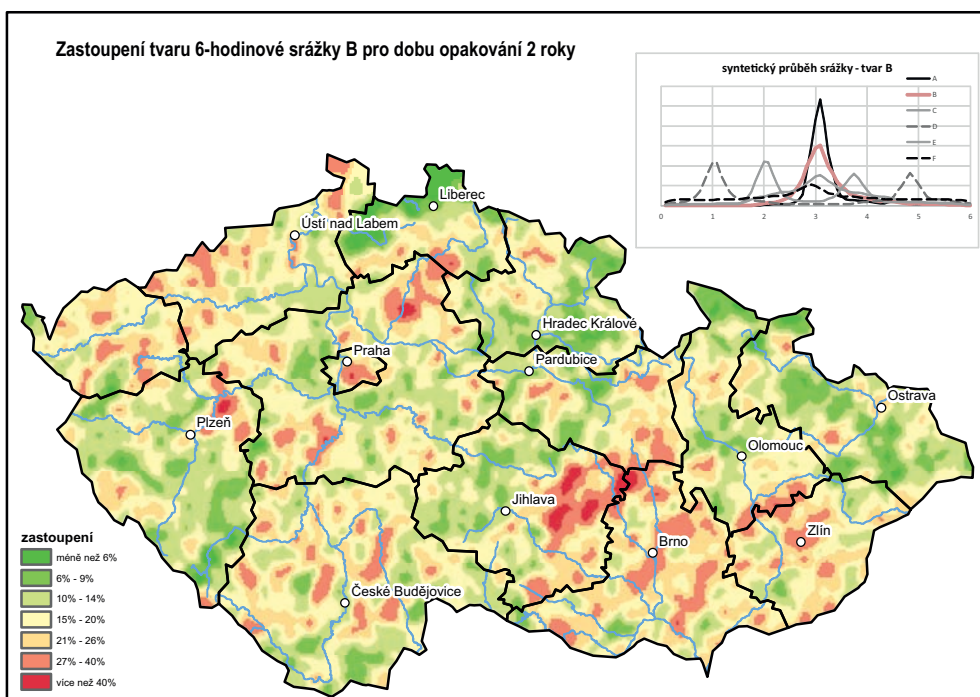
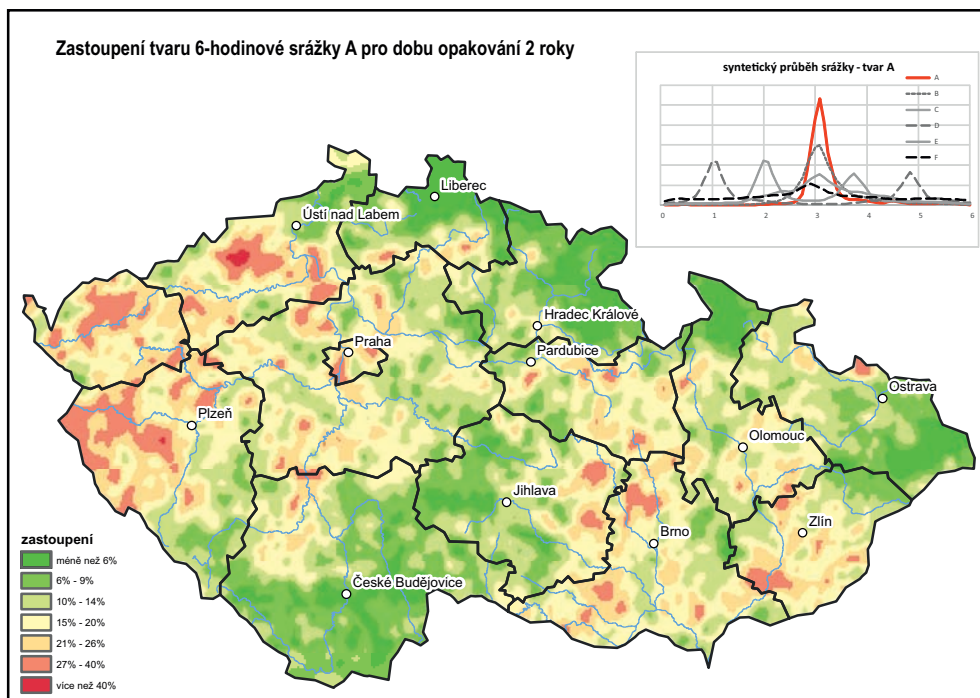
Charakteristiky využití území		Pi (mm)	Ppl (-)	Povrchová Manningova drsnost			Povrchová retence (mm)
				Nízká	Střední	Vysoká	
Popis	Kód			nL	nO	nH	Retence
Ostatní zeleň	OZ	1,00	0,40	0,08	0,12	0,18	8,0
Vodní plochy	VP	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,0
Sady	S	1,10	0,40	0,04	0,075	0,12	8,0
Křovinaté porosty	KP	1,00	0,40	0,08	0,12	0,18	8,0
Lesní porosty	LP	1,80	0,90	0,06	0,09	0,12	10,0
Antropogenní a zpevněné	AZP	0,00	0,00	0,011	0,011	0,011	2,0
Zahrady	Z	1,10	0,40	0,04	0,075	0,12	8,0
Travní porosty	TP	1,00	0,40	0,04	0,05	0,06	8,0
Orná půda	OP	0,16	0,13	0,025	0,035	0,045	5,0

*Pi - potenciální intercepce – množství vody, které je daný povrch (typ vegetace) zachytit*

*Ppl - poměrná plocha listová – poměr zachycení příčné srážky příslušnou vegetací do vyčerpání potenciální intercepce*

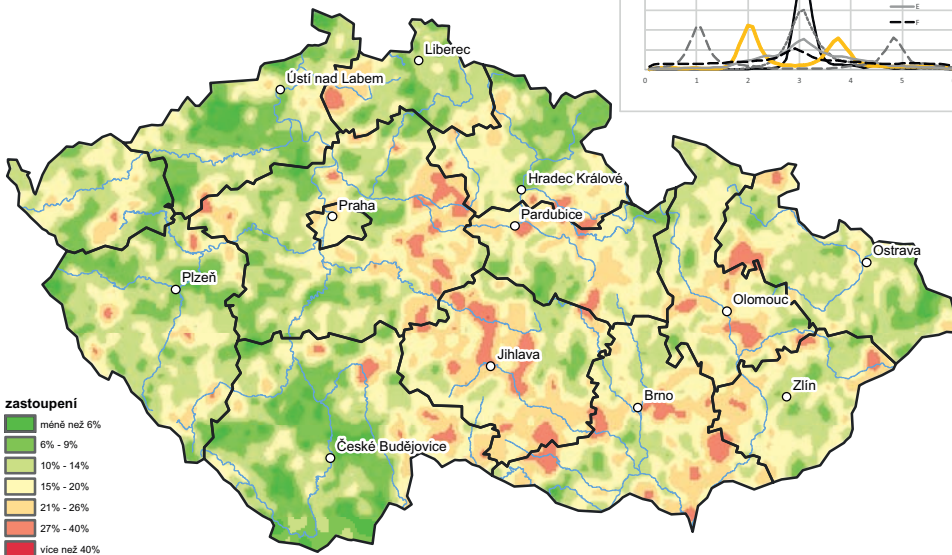
*Povrchová retence – zde udávané hodnoty jsou střední hodnoty povrchové retence pro daný typ využití území. V některých případech u lesních porostů a při specifických agrotechnických operacích (např. hluboká orba), mohou být hodnoty povrchové retence i řádově vyšší. Potenciál povrchové retence je závislý na aktuálním stavu a přechozích srážkách. V některých modelech se jedná o jeden z kalibračních parametrů.*

Obrázek 17: Zastoupení výskytu tvarů srážek pro doby opakování 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let.

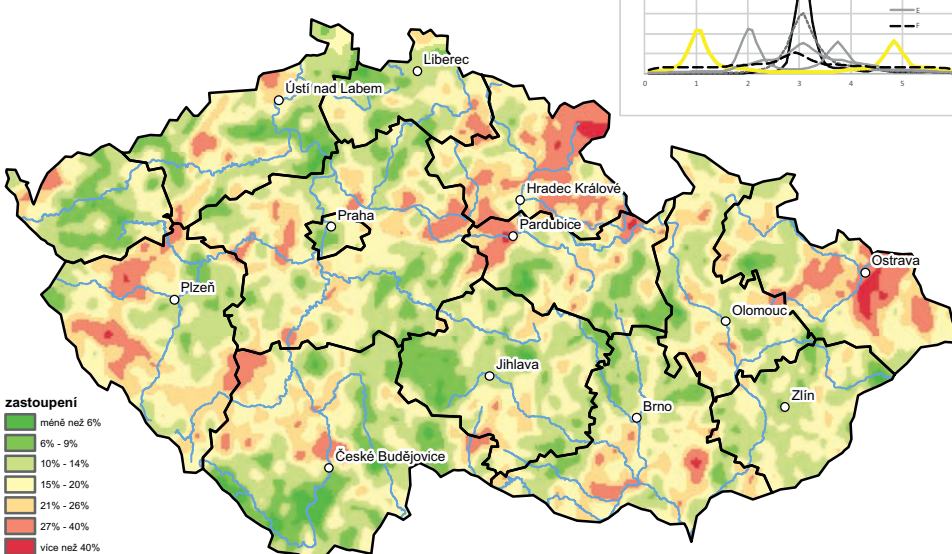




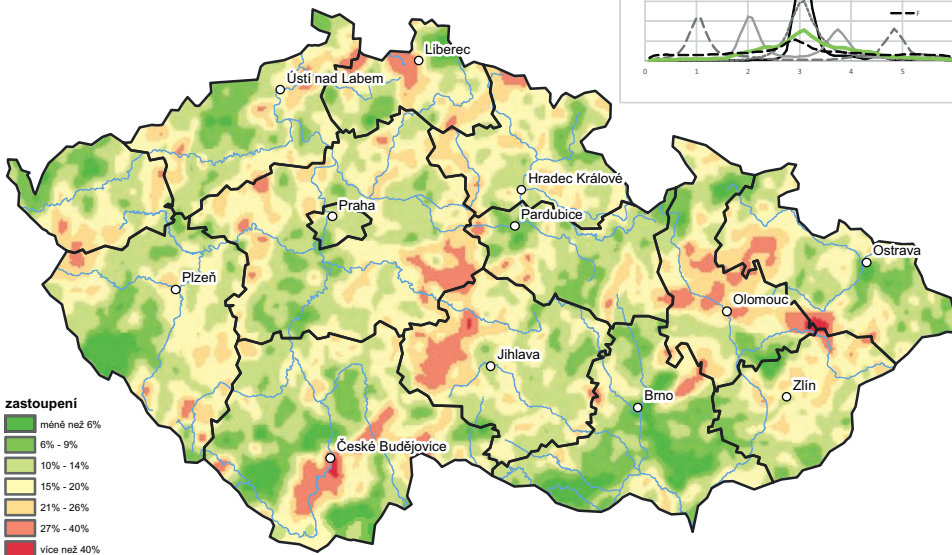
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky C pro dobu opakování 2 roky



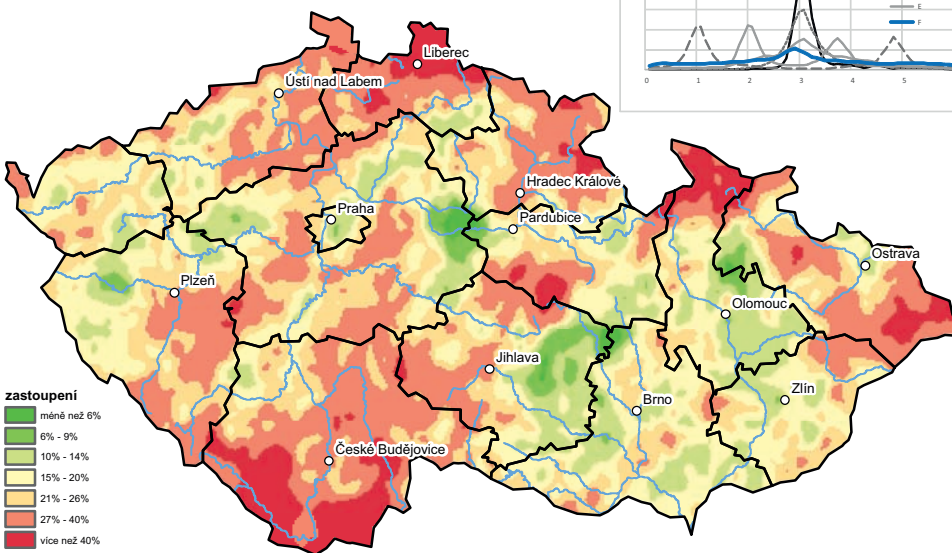
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky D pro dobu opakování 2 roky



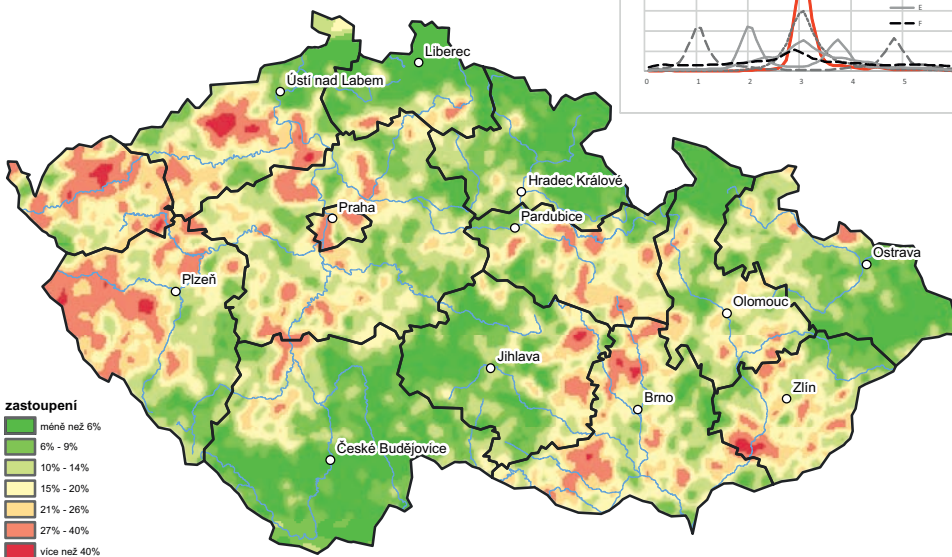
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky E pro dobu opakování 2 roky



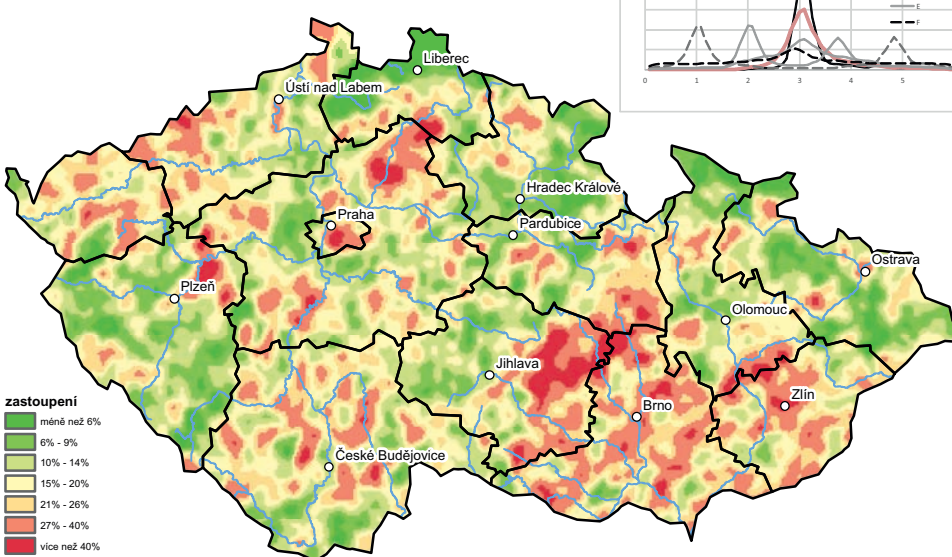
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky F pro dobu opakování 2 roky



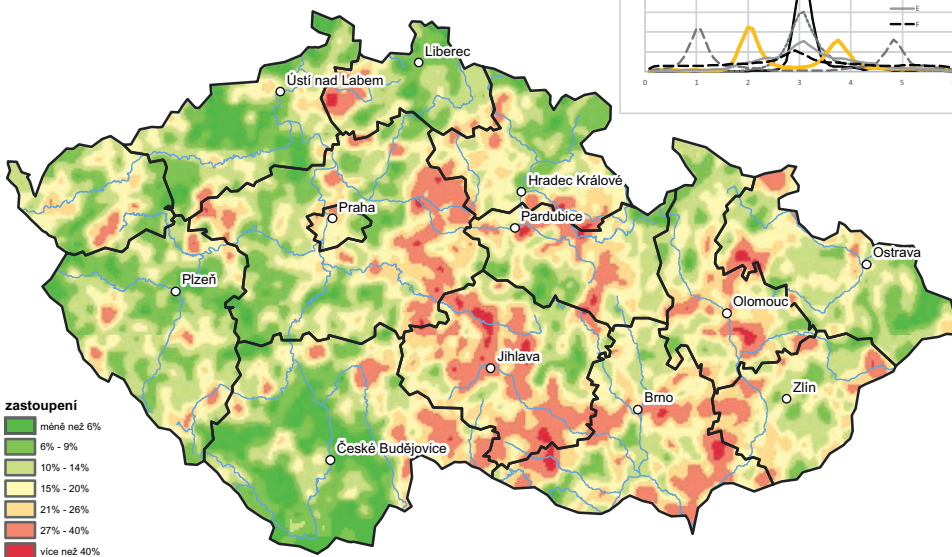
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky A pro dobu opakování 5 let



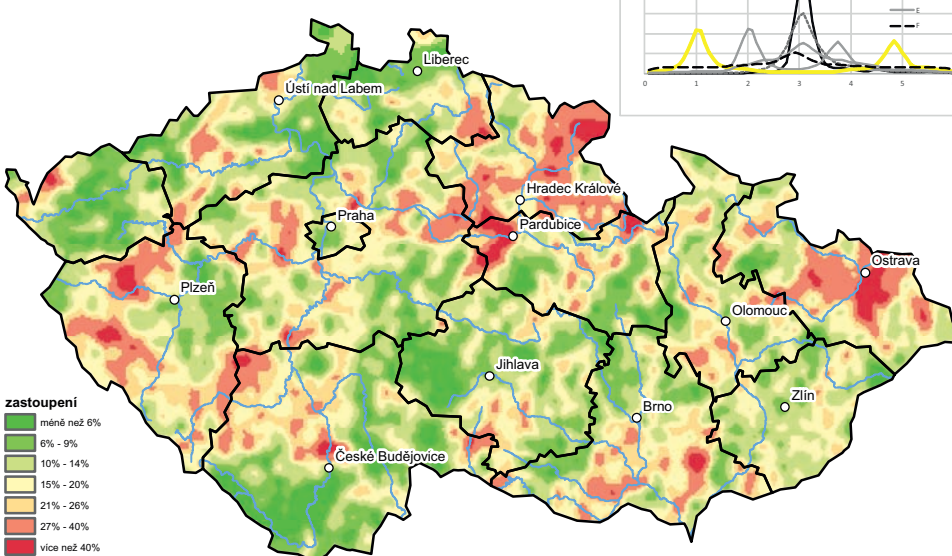
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky B pro dobu opakování 5 let



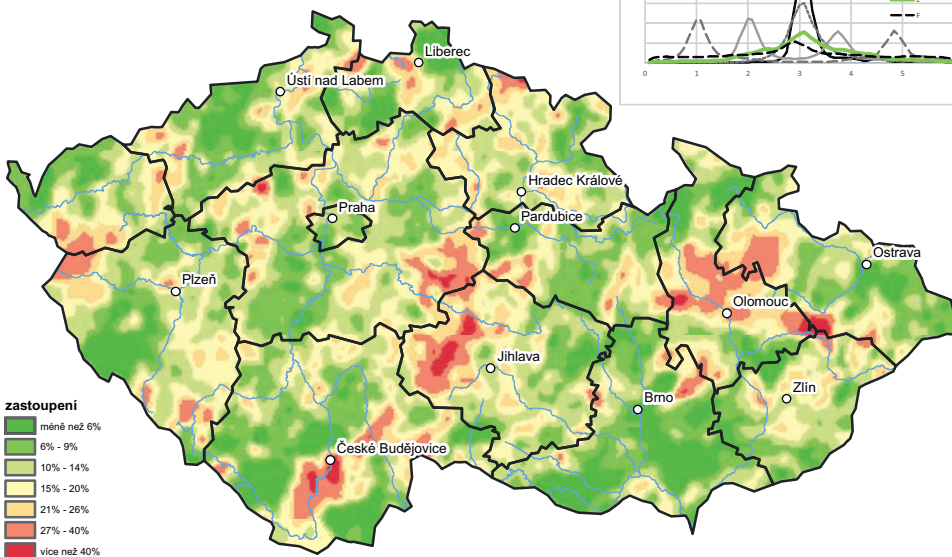
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky C pro dobu opakování 5 let



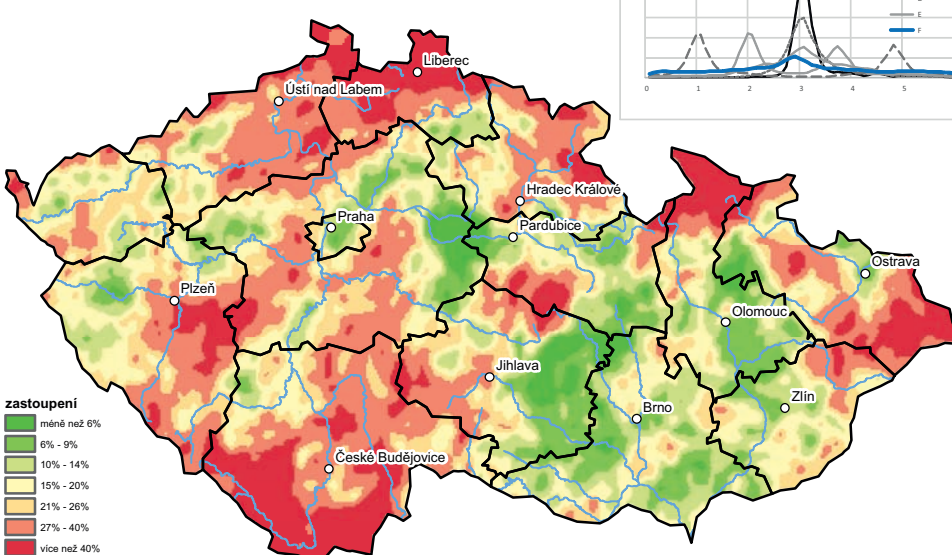
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky D pro dobu opakování 5 let



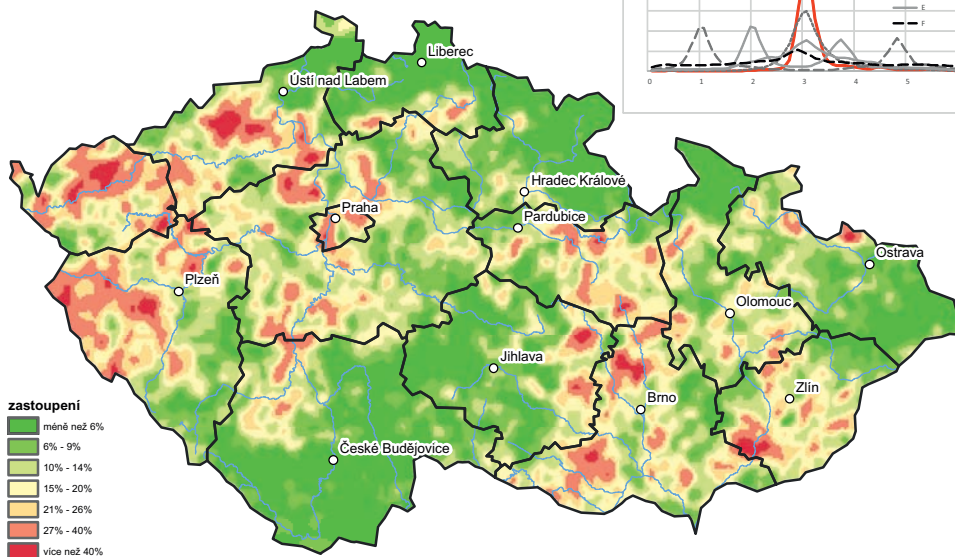
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky E pro dobu opakování 5 let



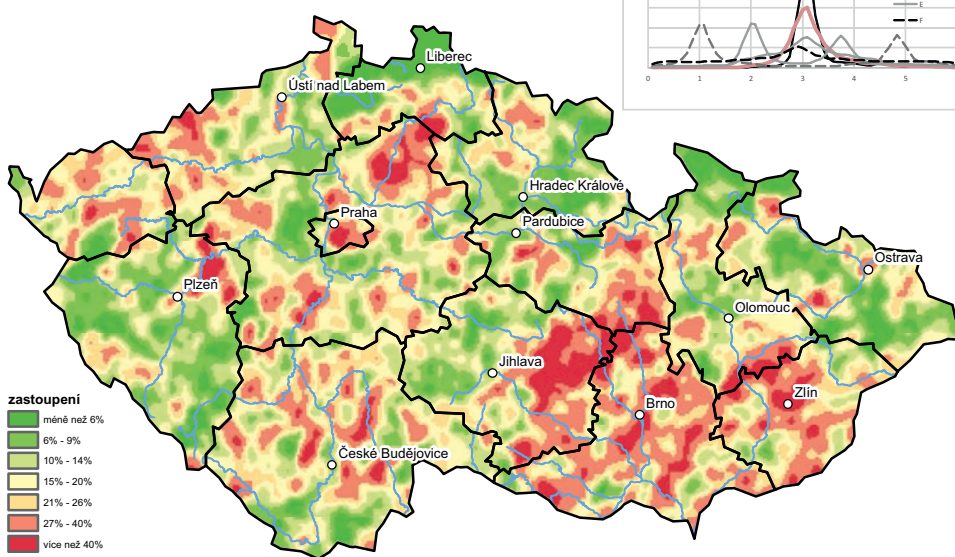
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky F pro dobu opakování 5 let



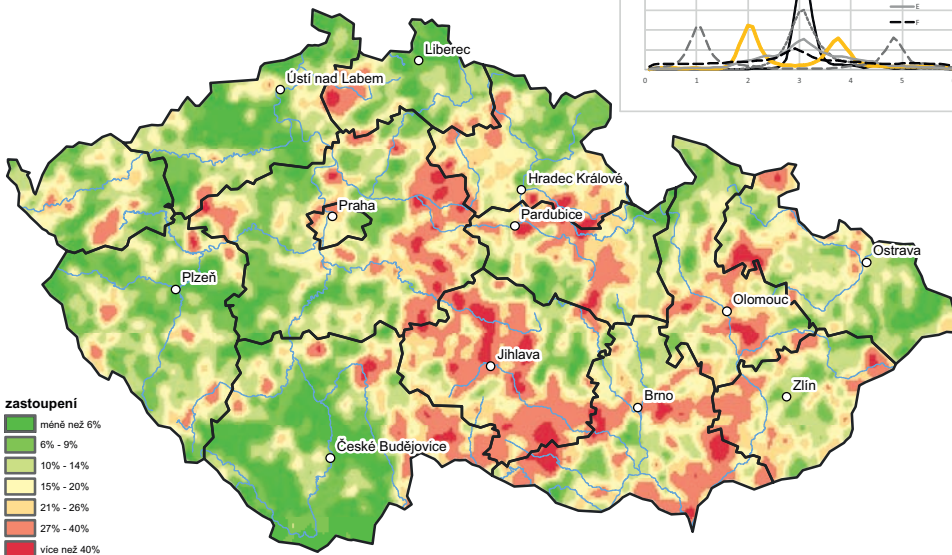
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky A pro dobu opakování 10 let



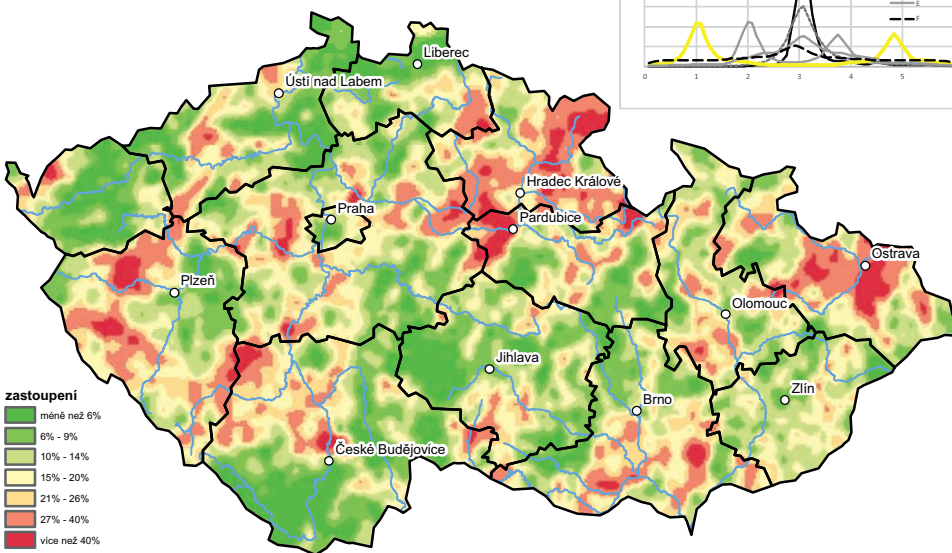
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky B pro dobu opakování 10 let



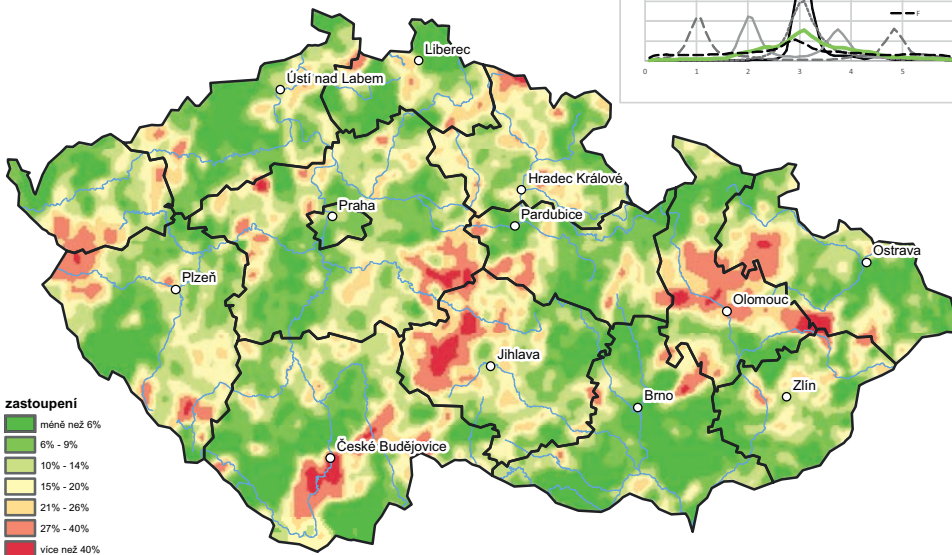
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky C pro dobu opakování 10 let



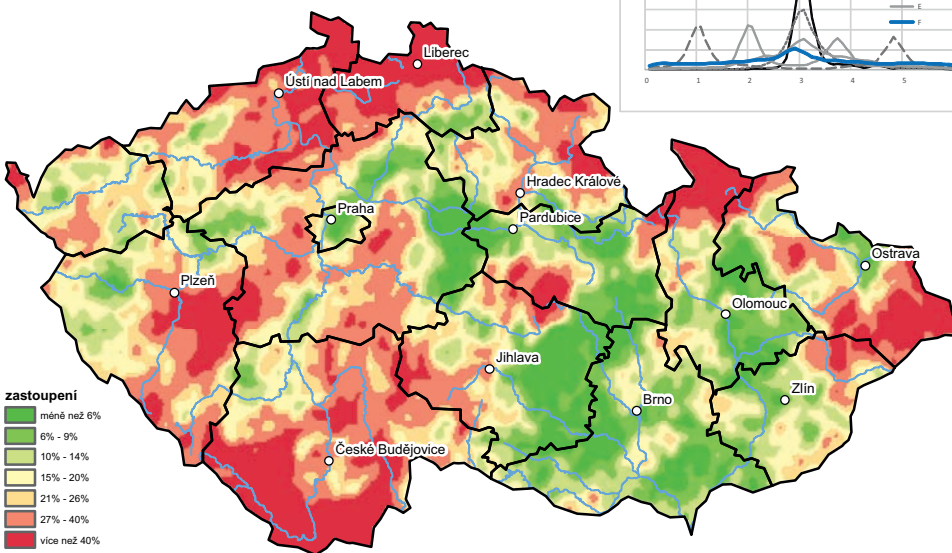
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky D pro dobu opakování 10 let



Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky E pro dobu opakování 10 let

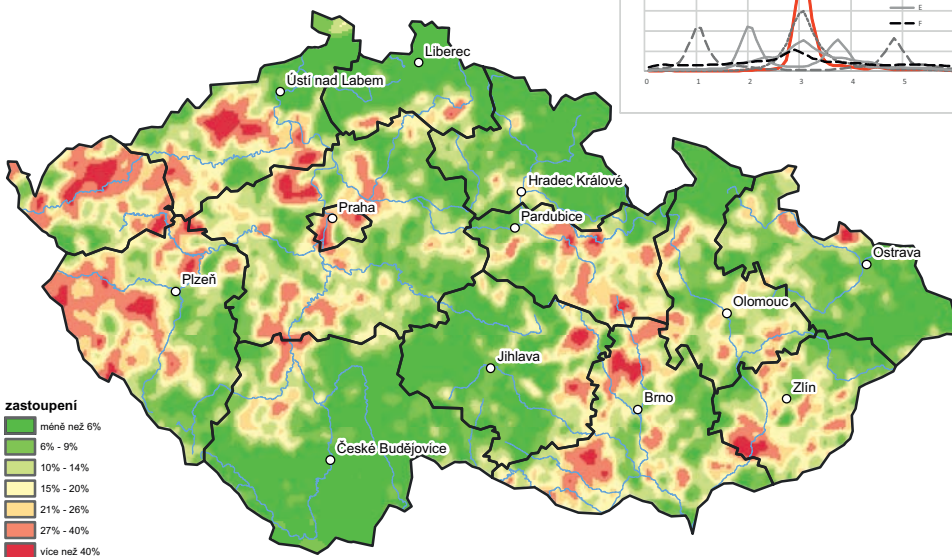


Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky F pro dobu opakování 10 let

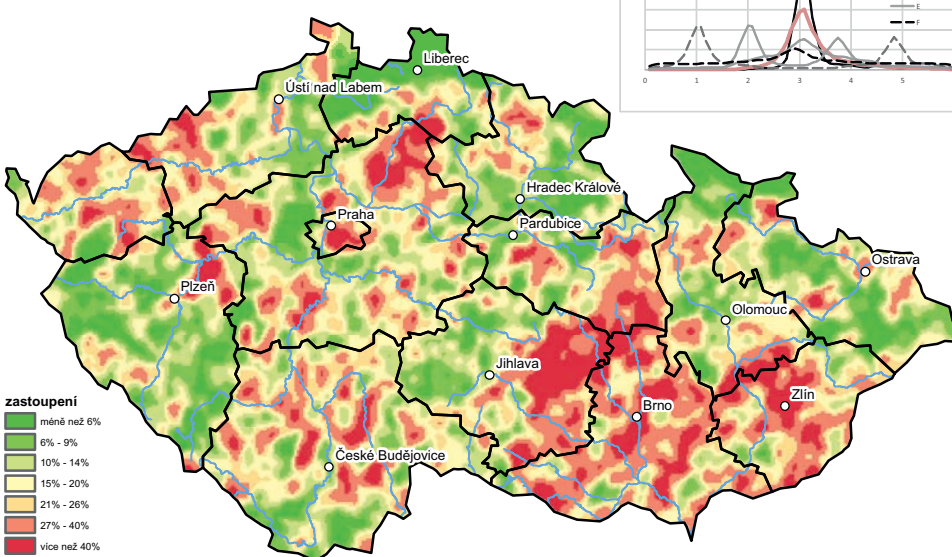




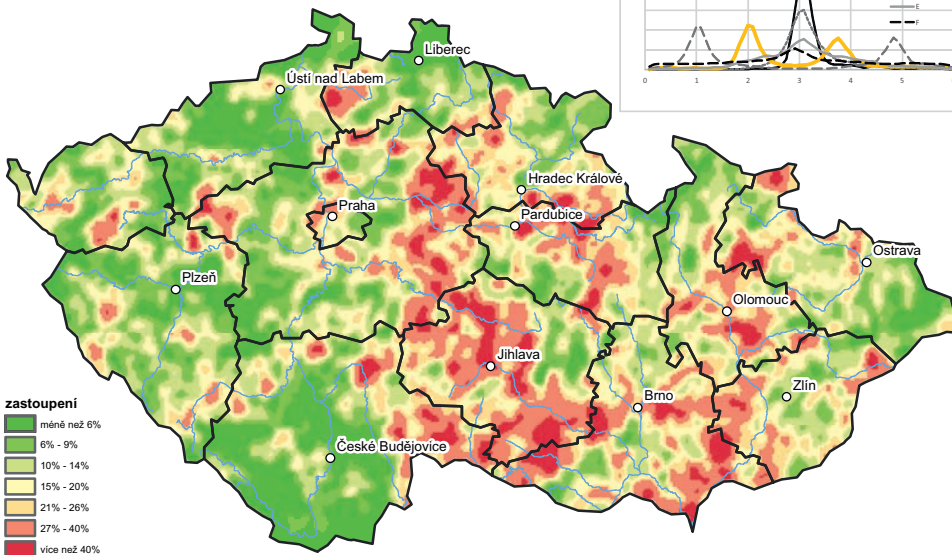
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky A pro dobu opakování 20 let



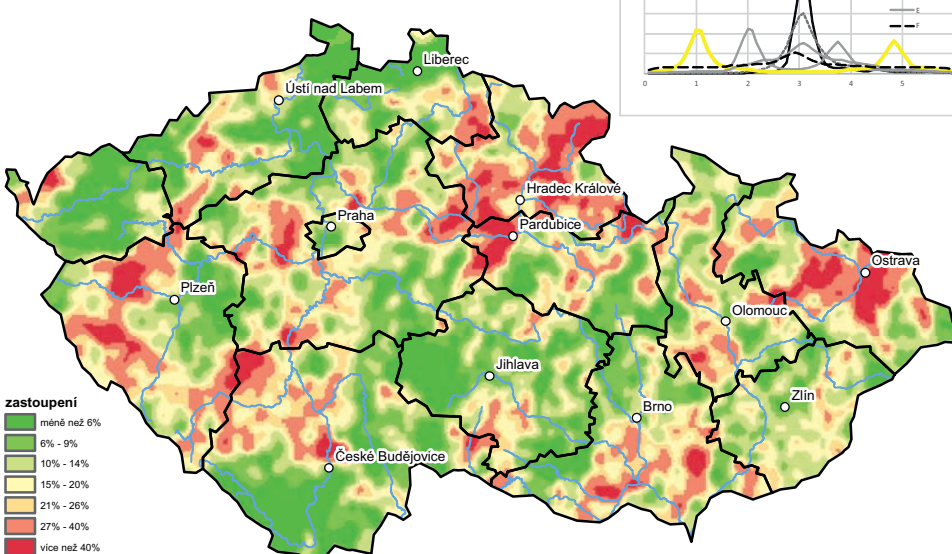
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky B pro dobu opakování 20 let



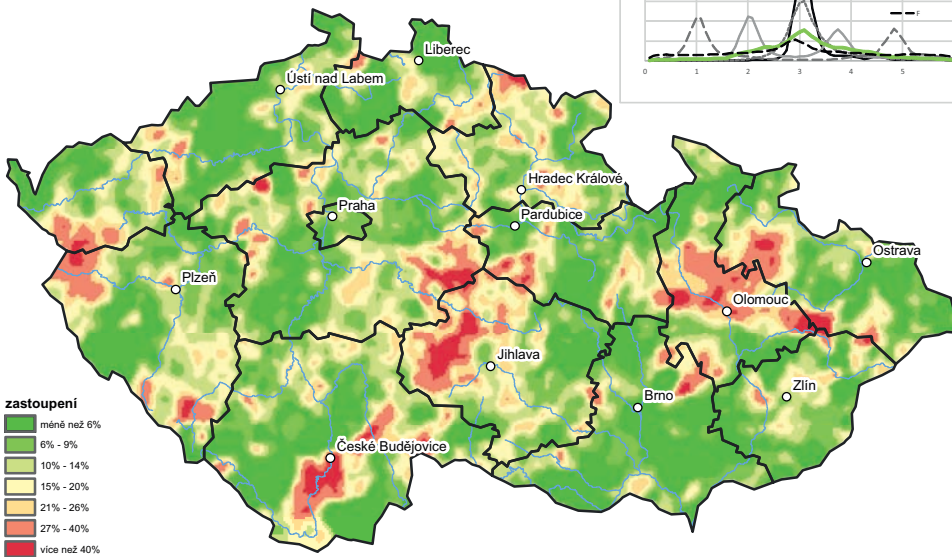
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky C pro dobu opakování 20 let



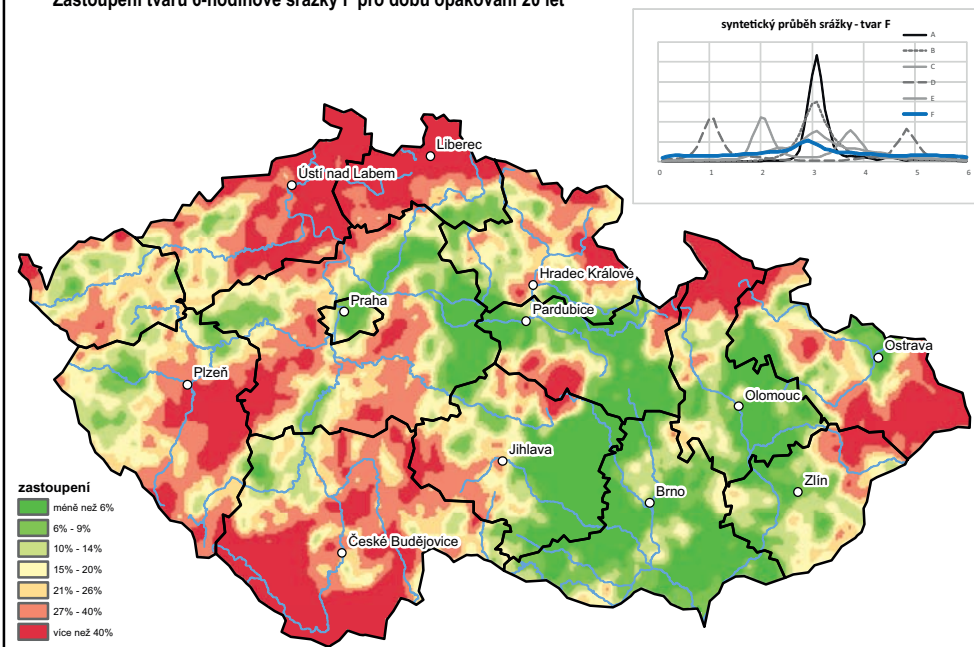
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky D pro dobu opakování 20 let



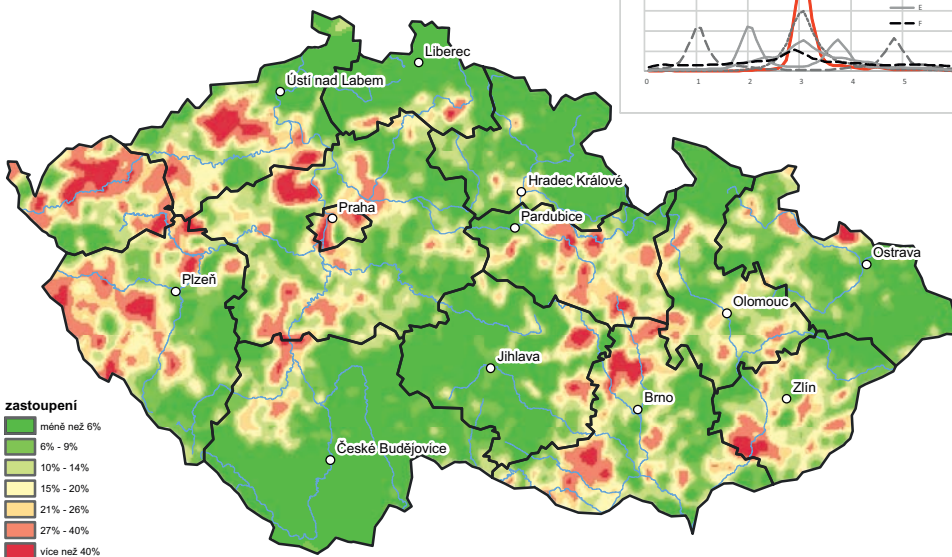
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky E pro dobu opakování 20 let



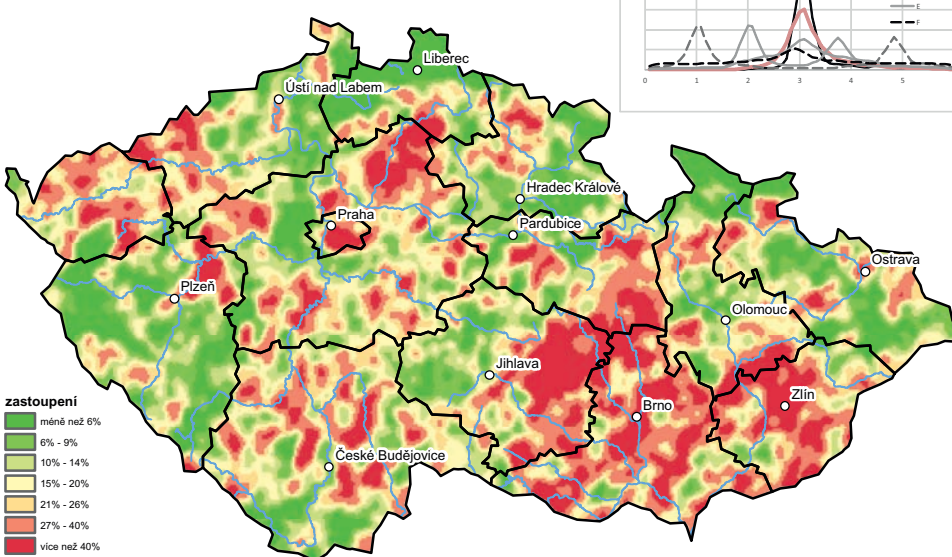
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky F pro dobu opakování 20 let



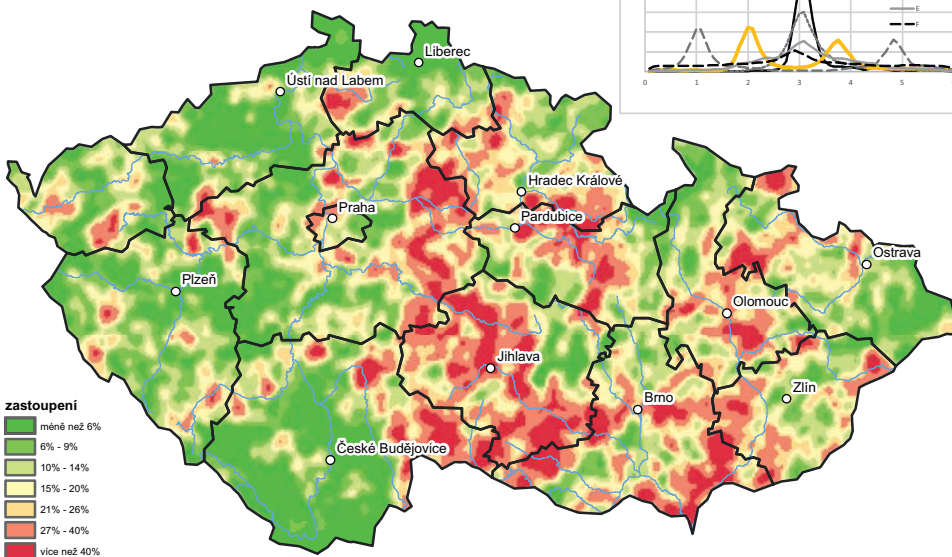
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky A pro dobu opakování 50 let



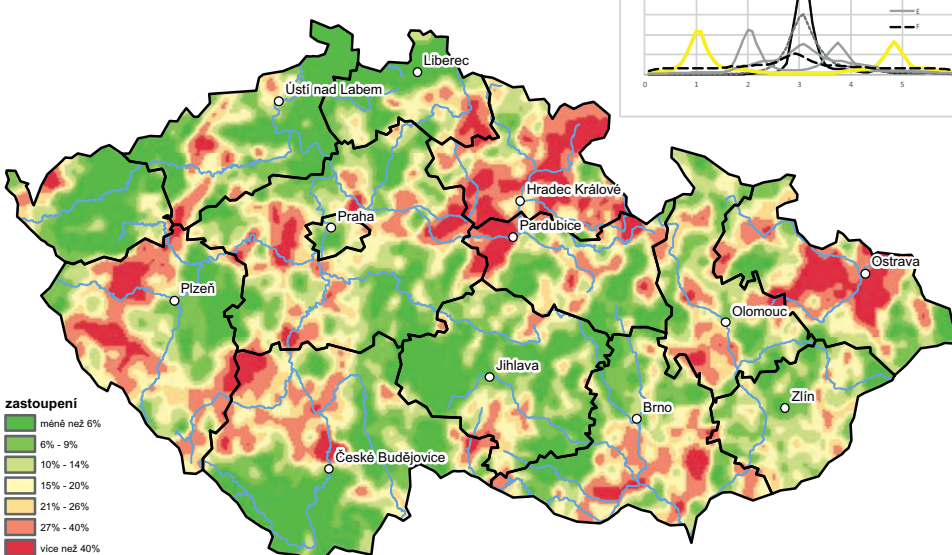
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky B pro dobu opakování 50 let



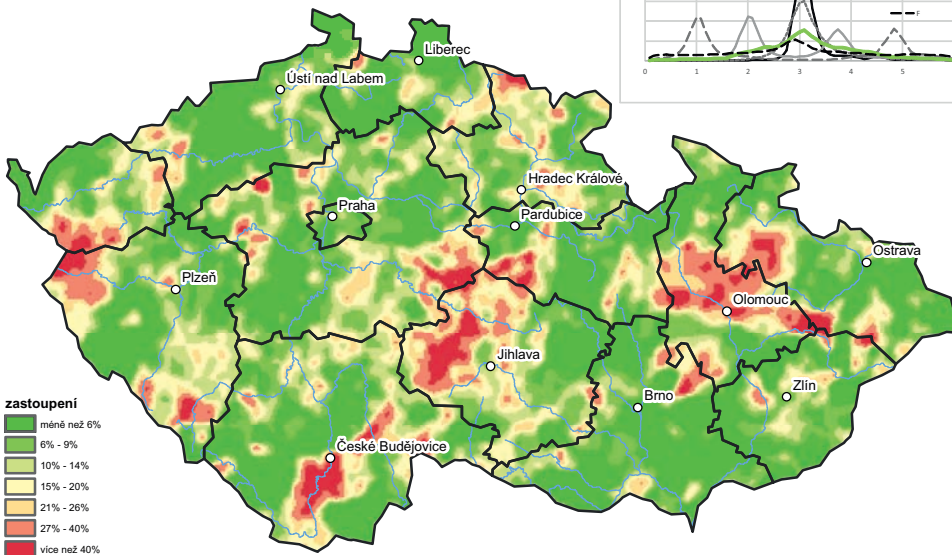
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky C pro dobu opakování 50 let



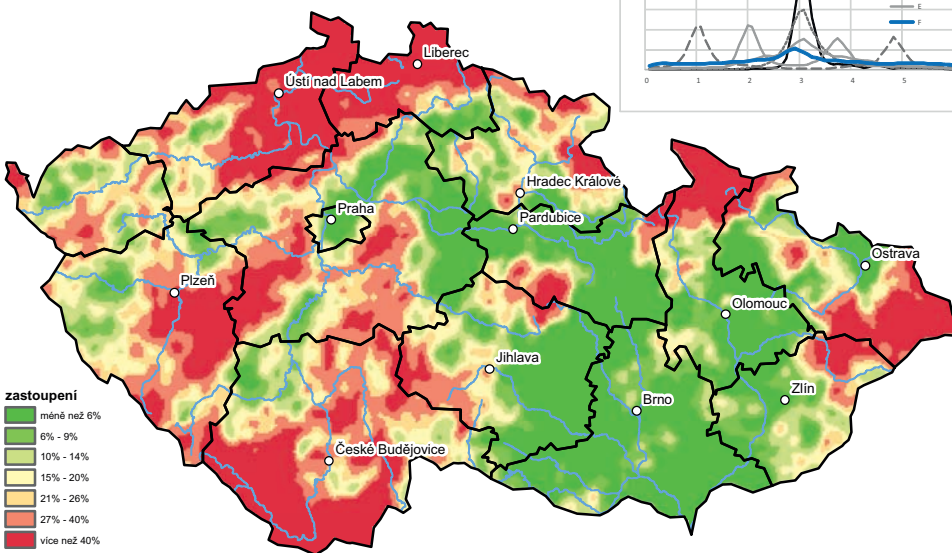
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky D pro dobu opakování 50 let



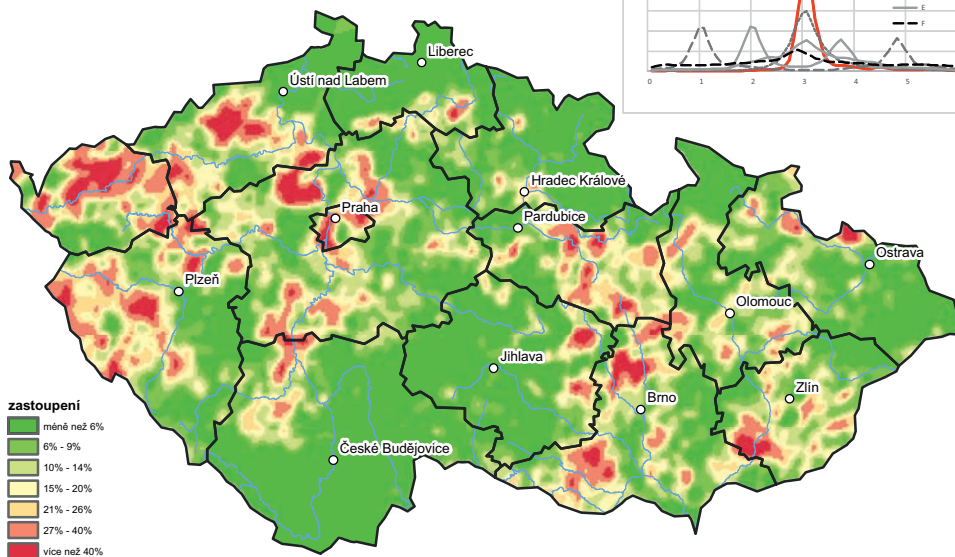
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky E pro dobu opakování 50 let



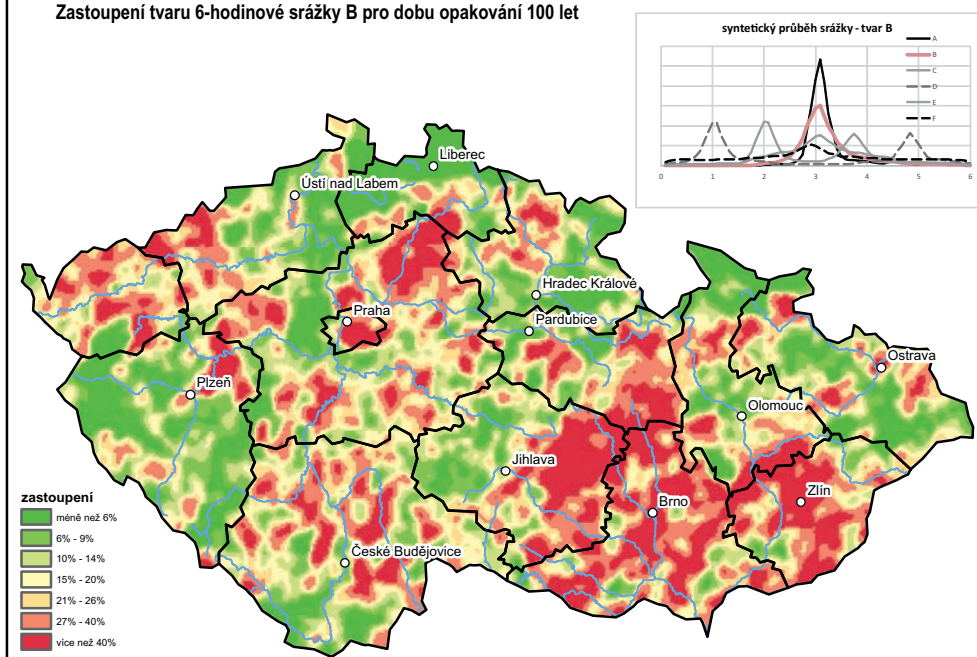
Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky F pro dobu opakování 50 let



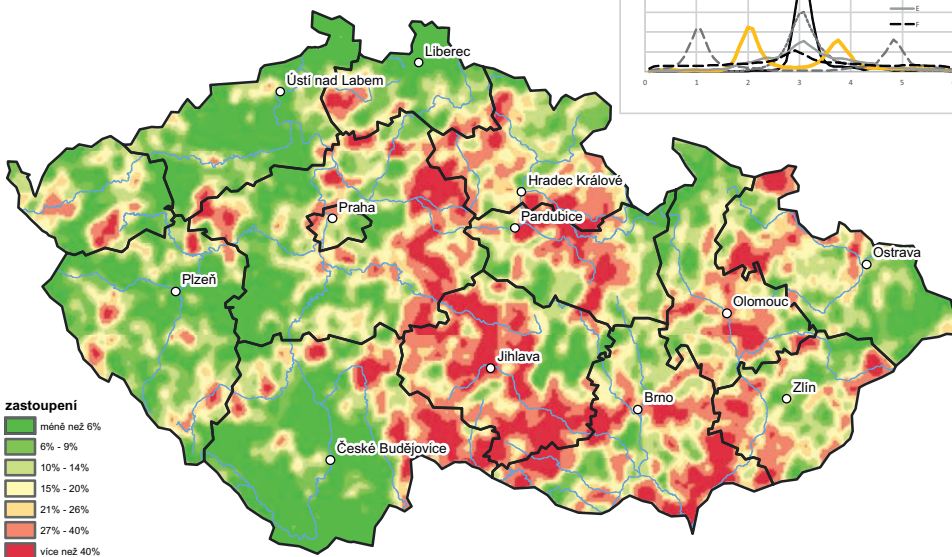
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky A pro dobu opakování 100 let



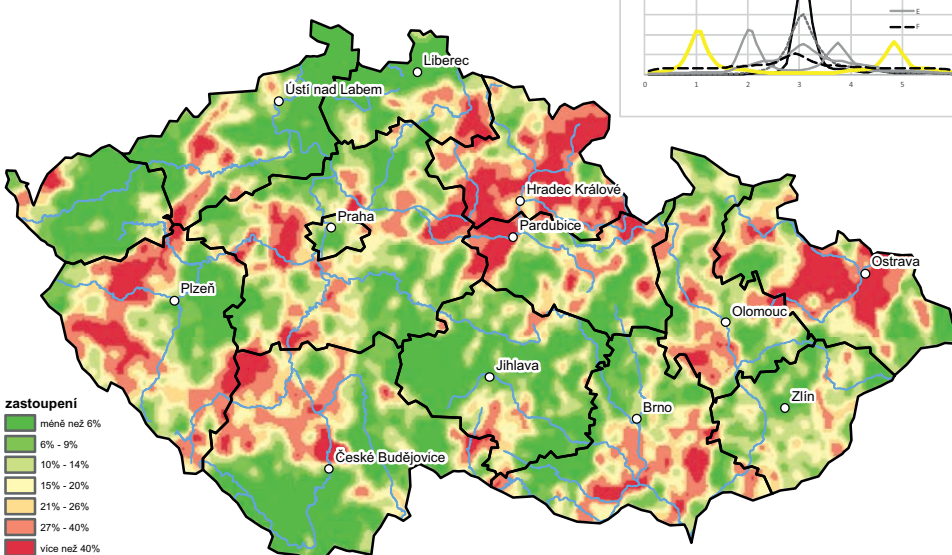
### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky B pro dobu opakování 100 let



### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky C pro dobu opakování 100 let

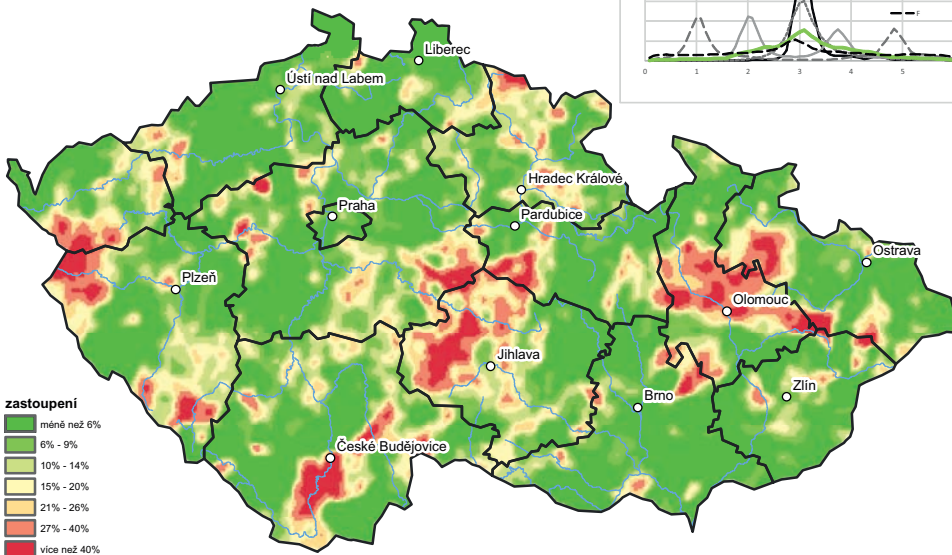


### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky D pro dobu opakování 100 let





### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky E pro dobu opakování 100 let



### Zastoupení tvaru 6-hodinové srážky F pro dobu opakování 100 let

