

OČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



**APLIKACE ENSEMBLOVÉ PŘEDPOVĚDI
V HYDROLOGII**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bakalant: Josef Nekvinda

Vedoucí práce: Ing. Martin Vokoun

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Josef Nekvinda

Vodní hospodářství

Název práce

Aplikace ensemblové předpovědi v hydrologii

Název anglicky

Applications of Ensembles in Hydrologic Prediction

Cíle práce

Cílem práce je komplexní hodnocení využití ensemblové předpovědi v hydrologických předpovědích, zejména jejich přínos oproti deterministickým předpovědím. Popsány budou způsoby tvorby ensemblu, jeho nevhodnější varianty prezentace a možnosti přínosu pro hydrologické předpovědi do budoucna. Uvedeny budou konkrétní příklady aplikace a posouzení výhod oproti vyšší výpočetní náročnosti.

Metodika

1. Načtení dostupné odborné literatury a článků
2. Popsání tvorby ensemblové předpovědi
3. Konkrétní příklady využití ensemblové předpovědi v hydrologii
4. Diskuze na téma výhod a nevýhod ensemblové předpovědi

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

predikce, soubor předpovědí, srážky, průtok, modelová předpověď

Doporučené zdroje informací

Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting, Qingyun Duan, Florian Pappenberger, Jutta Thielen, Andy Wood, Hannah L. Cloke, John C. Schaake, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-642-39924-4



Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Martin Vokoun

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 7. 9. 2016

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 10. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 11. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením ing. Martina Vokouna, a že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 24.4.2017

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli Ing. Martinu Vokounovi za ochotný a vstřícný přístup při podávání odborných rad. Dále bych rád vyjádřil poděkování své rodině za její bezmeznou podporu v průběhu celého studia.

V Praze dne 24.4.2017

.....

Abstrakt

Obliba pravděpodobnostních, neboli ensemblových předpovědí, v hydrometeorologické praxi neustále roste a spolu s tím i tendence se v budoucích letech tomuto směru zcela přiklonit. Doposud zastávaný deterministický přístup by tak mohly postupem času zcela nahradit, i když se stále pro krátkodobé předpovědi jeví deterministické prognózy být efektivnějším nástrojem. Tato práce chce prohloubit povědomí a pochopení metody tvorby ensemblové předpovědi a její následné zasazení do hydrologické praxe. Chce dále racionálním způsobem ukázat její možný přínos v porovnání s deterministickými metodami, a to i oproti všeobecně vyšším nárokům na její vytvoření a způsob následné prezentace.

Klíčová slova:

Ensemblová předpověď, pravděpodobnostní předpověď, hydrologie, hydrometeorologie, soubor předpovědí

Abstract

Popularity of probability forecasts, i.e. ensemble forecasts in hydrometeorological perspective is constantly increasing, along with tendency to accept this direction for the following years. The deterministic approach hitherto supported might be in the course of time entirely supplanted, although short-range forecasts still appear to be more effective tool. This thesis intends to disseminate knowledge and comprehension of the method of creating an ensemble forecast and its inclusion to hydrologic practice. Further, it intends to show its possible benefit in comparison with deterministic methods, even though there are generally higher creating and presenting requirements.

Keywords:

Ensemble forecast, probabilistic prediction, hydrology, hydrometeorology, package of predictions

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. CÍLE PRÁCE	11
3. VLIV METEOROLOGICKÉHO VÝSTUPU NA HYDROLOGICKÝ MODEL	12
3.1 Základy vývoje předpovědi počasí	12
3.2 Determinismus vs. pravděpodobnost	13
4. PRAVDĚPODOBNOSTNÍ VYJÁDRĚNÍ FYZIKY ATMOSFÉRY	14
4.1 Statistické popsání stavu prostředí.....	14
4.1.1 Deskriptivní statistika	15
4.1.2 Inferenční statistika	15
4.2 Pravděpodobnostní teorie v praxi	15
4.2.1 Axiomy pravděpodobnosti.....	17
4.3 Pravděpodobnostní rozdělení.....	17
5. ENSEMBLOVÁ PŘEDPOVĚĎ A JEJÍ TVORBA	20
5.1 Vstupní data a zdroje nejistot.....	21
5.1.1 Nejistoty na vstupních datech	21
5.1.2 Modelová nejistota.....	22
5.2 Podmínky EPS v ČR.....	22
5.3 Verifikace a kalibrace modelu	24
6. HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ – ENSEMBLE STREAMFLOW PREDICTION (ESP)	26
6.1 Uplatnění a potenciál ESP	26
6.2 Klasifikace hydrologických modelů	27
6.3 Příklady aplikace ESP v hydrologických procesech.....	28
6.4 Podmínky ESP na ČHMÚ a metodika tvorby předpovědi	29
6.4.1 Metoda s historickou řadou dat.....	29
6.4.2 Metoda se stochastickou řadou dat	30
6.5 Analytické zhodnocení.....	32
6.5.1 Verifikace hydrologické předpovědi.....	33
6.6 Interpretace předpovědi a její management	33
6.6.1 Špagetový graf	35
6.6.2 Graf pravděpodobnostních hladin.....	36
6.6.3 Sloupcový graf.....	36
6.6.4 Čára překročení.....	36
6.6.5 Tabulka pravděpodobnosti překročení.....	37
7. DISKUSE	38
8. ZÁVĚR	40
9. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	42

1. ÚVOD

Tragické následky povodní v posledních letech uvedly do pohybu mnohé politické agendy, které si předsevzaly zlepšit schopnosti předpovědních orgánů a tím snížit i ekonomický dopad těchto škod na zatížení státu. Provozoschopné předpovědní systémy, které odhalí v dostatečné míře a předstihu budoucí hrozbu, se proto staly klíčovým nástrojem v přípravě strategií na aktivity zejména povodňového charakteru. S jejich pomocí lze varovat veřejnost v předstihu několika dní, zavést dostatečná opatření a snížit tak následné škody. Mnohé z těchto systémů jsou založeny na vstupu srážkových dat, která jsou získávána pozorováním současného stavu atmosféry – dnes nejčastěji sítí radarů (ČHMÚ, 2011). Omezujícím faktorem je ale v takovém případě tvorby předpovědi časové měřítko, jenž uvažuje předstih pouze pár desítek hodin. Pro střednědobé prognózy v horizontu 2-15 dní je proto nutné využít efektivnější metodu numerického modelu NWP (Numerical Weather Prediction), a to zejména nejsou-li k dispozici zdrojové údaje o průtocích řek a není možné je získat ani ze zařízení pro převod dat, což v době povodňového stavu bývá běžnou praxí.

Tendencí vědy 21. století je směřovat k jedinému společnému cíli, jímž je ensemblová předpověď. Ta bývá obecně označována jako EPS (Ensemble Prediction Systems) a v současnosti je vhodnějším nástrojem pro určování budoucího stavu počasí, než-li tomu je v případě jednotlivých deterministických prognóz. Konkrétním příkladem využití je hydrologická ensemblová předpověď ESP (Ensemble Streamflow Prediction). Na principu EPS s využitím v hydrologii již funguje většina významných celosvětových center buď zcela, anebo ze tří čtvrtin, přičemž zbytek světa se takovému přístupu nebrání, schvaluje jej a s jeho zavedením počítá v rámci budoucích let (Bürgi 2006).

2. CÍLE PRÁCE

Tato práce si klade za cíl vytvořit dokument, který přibližuje problematiku ensemblové předpovědi od jejího historického vzniku, přes samotný popis tvorby předpovědi, kterou se následně pokusí z pohledu použitelnosti v oblasti hydrologie komplexním způsobem zhodnotit. Jde zejména o posouzení přínosu ensemblových prognóz v hydrologii oproti deterministickým metodám určování budoucího stavu počasí, a to i přes to, že kladou daleko větší nároky na výpočet. Dalším nelehkým úkolem, který s sebou nese aplikování ensemblové předpovědi do reálných podmínek, pak čeká na samotné uživatele tohoto typu prognostických zpráv. Ti totiž nedostávají údaje s absolutními hodnotami parametrů atmosféry, naopak musí být schopni vyznat se ve statistických výkazech, jež jsou součástí formy prezentace této metody. Šestá část práce se proto bude věnovat nejvhodnějším formám interpretace ensemblových předpovědí a uvedeny budou konkrétní příklady aplikace. V závěru práce jsou představeny pilíře pro její další budoucí vývoj.

3. VLIV METEOROLOGICKÉHO VÝSTUPU NA HYDROLOGICKÝ MODEL

Ještě koncem 20.století nahlížela vědecká obec na předpověď počasí jako na, svou podstatou, neměnný systém. V překladu to znamenalo – „bezchybná“ počáteční pozorovaná data mohou produkovat pouze „špičkovou“ předpověď. Dnes se tento přístup nicméně považuje za mylný. Prakticky totiž není možné zaručit, že do výpočetního modelu vstoupí data totožná se stavem v čase, kdy dochází k výpočtu. Počáteční data vstupující do výpočtu modelu jsou zatíženy určitými nepřesnostmi, neboli takzvanými vstupními nejistotami. Ty pramení z nedokonale odečtených parametrů atmosféry jako je vlhkost, teplota, vítr, srážky a jejich rozložení v časoprostoru, dále pak lidským faktorem a v neposlední řadě nedokonale popsány stavy ochranného obalu Země ve výpočetním modelu. Znamená to tedy, že meteorologické výstupy, tedy předpovědi, nejsou správné v absolutní míře.

Pro hydrologické předpovědi, jež se věnují odtokovým parametrům z povodí, jsou jedním z hlavních faktorů srážky. Z již zmíněného tedy vyplývá, že do hydrologického modelu vstupují data značně ovlivněné nejistotami a nepřesnost výpočtu tak nadále znásobují. Z toho důvodu je požadavek alespoň předpovídat budoucí stav v širším měřítku ve smyslu eliminovat množství chyb.

I když tedy byla v minulosti předpovědní centra vybavena nejmodernější počítačovou technikou, pomocí níž sestrojovala důkladné výpočetní modely k vykonstruování budoucího, ale zároveň deterministického stavu počasí, samotná předpověď se výrazným způsobem transformovala kupředu, a to zavedením ensemblové prognózy (Gneiting a Raftery, 2005).

3.1 ZÁKLADY VÝVOJE PŘEDPOVĚDI POČASÍ

Od roku 1600, kdy Newton formuloval pohybové zákony, stal se základním pilířem předpovědi počasí deterministický přístup. Tyto zákony byly zároveň podnětem k domněnání, že budoucí stav atmosféry vychází ze znalosti současných podmínek. Jules Charney však byl v roce 1948 prvním, kdo tuto teorii podložil reálnými výsledky. Se svým týmem sestrojil soubor rovnic nazývaných Quasi-geostrofické přiblížení, jež braly v úvahu, že za změnami v atmosféře stojí

geostrofické větry. Po tomto zjištění se mu podařilo sestrojít dvě 24hodinové předpovědi, což po předchozích neúspěšných pokusech znamenalo velký příslib do budoucna. Způsob takového predikování tak měl rázem otevřenou cestu do celého světa a obecně se mělo za to, že se pomocí tohoto přístupu podaří nahlédnout několik dní dopředu.

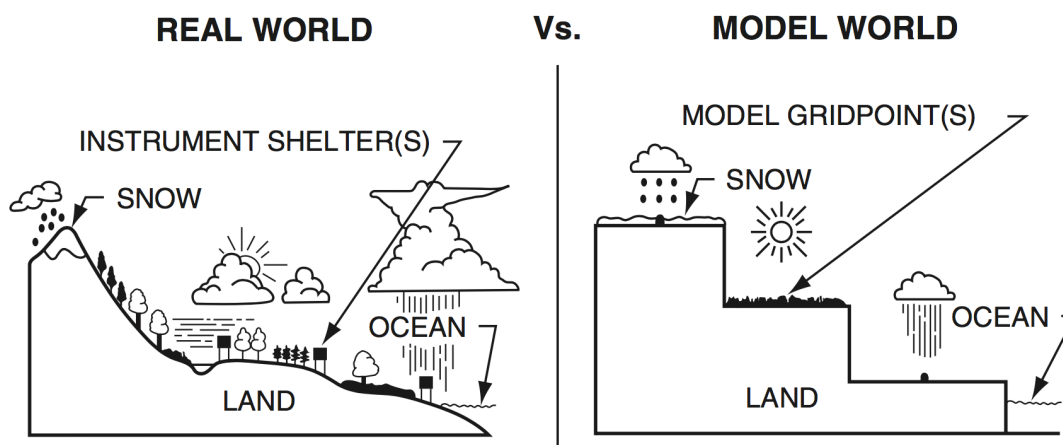
Po slibném začátku se ale začaly objevovat i otazníky ohledně limitů deterministické předpovědi. Pochybnosti byly důsledkem zvyšující chybovosti prognóz. Po příčinách začal pátrat Carl Gauss, který nakonec našel několik nesrovnalostí v parametrizaci počátečních podmínek. Koncem šedesátých let proto bylo upuštěno od Charneyho rovnic, což zároveň vrhlo na deterministický přístup k předpovídání počasí stín, a dalo tak podnět k rozvinutí nového směru.

Alternativní cesta nesla znaky determinismu spolu se znaky stochastickými a časem se pro tento kombinovaný přístup vžilo označení ensemblová předpověď. Podstatu této myšlenky vnuknul Edward Lorenz, který zjistil, že počasí je řízeno nelineárně-dynamickým během (Lewis, 2005).

3.2 DETERMINISMUS VS. PRAVDĚPODOBNOST

Za tradiční přístup v předpovědní praxi je označován determinismus – numerické vyjádření stavu atmosféry vycházející z vysoce sofistikovaných modelů. Od 90. let je nicméně zaznamenáván nástup pravděpodobnostních metod, neboli ensemblových systémů (Leutbecher a Palmer, 2008; Gneiting a Raftery, 2005). Ensemblová předpověď je souborem numerických předpovědí NWP (National Weather Prediction), jíž obvykle tvoří 5-100 členů s lišícími se počátečními hodnotami dat vstupujících do výpočetního modelu. Obě metody jsou ovšem omezeny jistými chybami, které ovlivňují přesnost výsledků a nelze je zcela odstranit. Jednu z primárních příčin tohoto faktu přibližuje *Obr. 1*, který ukazuje na nedokonalost popsaní modelovaného prostředí, jež se významným způsobem liší od skutečnosti. Hlavním rozdílem mezi oběma metodami na poli jejich působnosti pak tvoří způsob nakládání s těmito nejistotami. Zatímco deterministický přístup řeší pouze otázku spojenou s kvantifikací samotného predikovaného jevu, ensemblová metoda se snaží vyjádřit míru jeho pravděpodobnosti. Rozdíl lze shledat taktéž v délce předstihu předpovědi. Deterministická prognóza je jistější v krátkodobém výhledu, zatímco pro

střednědobé předpovědi je vhodnější využít ensemblové předpovědi (Krzysztofowicz, 2001; Gneiting a Raftery, 2005).



Obr. 1: Zdroj nejistot vstupujících do modelu. Na obrázku zobrazen skutečný stav Land use oproti modelovanému (Wilks, 2006)

4. PRAVDĚPODOBNOSTNÍ VYJÁDŘENÍ FYZIKY ATMOSFÉRY

4.1 STATISTICKÉ POPSÁNÍ STAVU PROSTŘEDÍ

Spousta dat nejen v předpovědní meteorologické a hydrologické praxi, jsou náhodného charakteru, tzn. chovají se v závislosti na náhodě (Hanel, 2014). Tyto náhodné, abstraktní veličiny, jsou jevy, které bývají rozdělovány na základě pravděpodobnosti. Náhodná veličina je tedy jinými slovy funkcí v systému elementárních jevů, kde každému jednomu jevu přiřadí z tohoto systému reálnou číselnou hodnotu. Díky tomu lze náhodné veličiny promítnout na číselnou osu a následně je zformovat do uspořádaného tvaru. Jevům je zároveň přisouzena pravděpodobnost s jakou se odehrají, přičemž z těchto dvou poznatků lze definovat pravděpodobnostní rozdělení (Tvrđík, 2010).

Pro lepší uchopení statistiky jako nástroje ji v základu lze rozdělit na dvě důležitá odvětví – statistiku popisnou a interferenční (Wilks, 2006). Pod oběma statistickými

celky se podepisují již zmiňované náhodné jevy. Ty vychází z poznání atmosféry, která se jeví jako nekonzistentní a v zásadě neperiodická. Pro splnění požadavku kvantitativně se vypořádat s těmito vyskytujícími se jevy, musí být užito dalších nástrojů k určení pravděpodobnosti.

4.1.1 DESKRIPTIVNÍ STATISTIKA

Popisná statistika je po sběru dat prvním nástrojem, který získané informace zpracovává. Zabývá se především sumarizací a tříděním dat, z nichž posléze vybírá důležitá fakta reprezentující pozorovanou veličinu. Že se jedná o velmi efektivní způsob zpracování dat dokazují kvantitativně údaje, které jsou z atmosféry získávány, neboť samotný předpovědní obor je doslova pod záplavou dat z celého světa. V důsledků pozorování a aktivit spojených s modelováním atmosféry jsou vědci pod velkým tlakem ze strany čísel, ze kterých se snaží vyčíst informace o přírodních jevech. Bývá proto nelehkým úkolem surová data smysluplně organizovat a následně reprezentovat tak, aby vykazovala známky racionality, ze kterých následně pro své závěry čerpají inferenční statistické prostředky (Wilks, 2006; Tvrdík, 2010).

4.1.2 INFERENČNÍ STATISTIKA

Inferenční statistická analýza bývá považována za metodu, s níž lze vyhodnotit zásadní procesy, které jsou v atmosféře přítomny a skrze vyzorovaná data i zaznamenány. Avšak z tohoto pohledu nejde o pouhé vyvození závěrů, nýbrž i o zhodnocení spolehlivosti těchto úsudků ve vztahu předpovědním, a k tomu se využívá pravděpodobnostních konceptů. Způsob takové práce s daty pak je považován za matematicky nejnáročnější odvětví celého statistického oboru, přičemž v současné době je nedílnou součástí operativního předpovídání počasí meteorologických center po celém světě (Casella a Berger, 2001; Jarušková, 2015).

4.2 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ TEORIE V PRAXI

Pomocí pravděpodobnostního vyjádření události X lze říci, s jakou jistotou lze tuto modelovanou událost očekávat. Spouštěčem tohoto přístupu v oblasti meteorologie se staly nejistoty vstupující do výpočtu, které se pojí s několika možnými

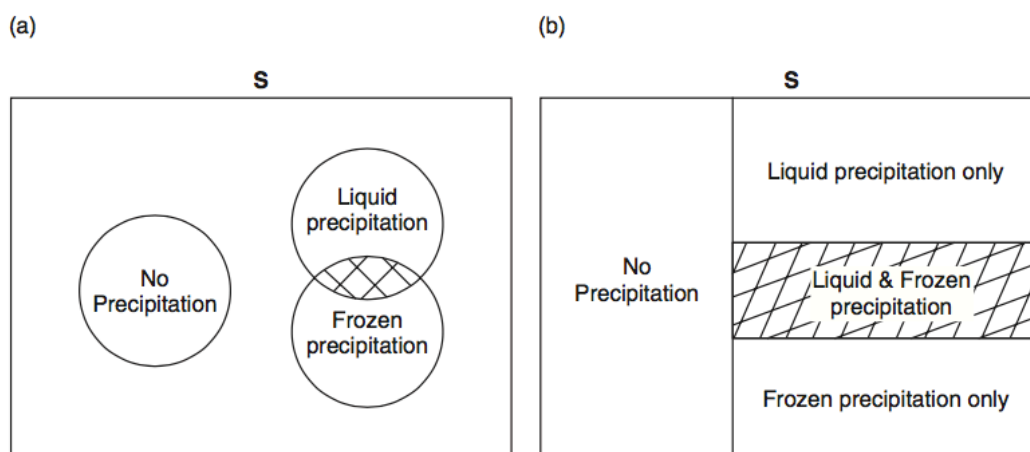
zdroji. Ve zjednodušeném slova smyslu tedy není pravděpodobnost nic jiného, než čistě teoretický matematický systém, který vznikl logickým rozvinutím axiomů pravděpodobnosti. Ty se ovšem sestávají na základě dalších elementů, jimiž jsou události s nejistými výsledky a modelová, neboli vzorová plocha (Casella a Berger, 2001, Jarušková, 2015).

Události s nejistotami

Jsou množinami scénářů s možnými nejistými výsledky. Wilks (2006) rozlišuje zejména dva druhy takových událostí – složené a jednoduché, přičemž složené se mohou skládat až z několika sub událostí, zatímco jednoduché nikoli.

Modelová plocha

Je místem, kde se vyskytují události. Vztah mezi plochou a událostmi pak nejlépe reprezentuje Vennův diagram, který již popisuje i problematiku složených událostí.



Obr. 2: Vennův diagram reprezentující srážkové události. Vyšrafovaná část představuje složenou událost sestávající se kapalných a zmrzlých srážek. Obrázek (a) i (b) jsou vyjádřením téhož, pouze jinou formou (Wilks, 2006)

Při pohledu na diagram je dobré si uvědomit, že se vzorová oblast obsahuje ne tři, nýbrž čtyři události, neboť i průnikem dvou jednoduchých událostí vzniká prostor pro zcela novou událost. Všechny tyto události si mezi sebe rozdělují procenta pravděpodobnosti, že jedna z nich nastane (Wilks, 2006).

4.2.1 AXIOMY PRAVDĚPODOBNOTI

Pokud je modelová plocha vyplněna dílčími událostmi, pak dalším krokem je určení pravděpodobnosti jednotlivých událostí, pro jejíž stanovení byly sestaveny určitá logická pravidla – axiomy pravděpodobnosti (Jarušková, 2015; Neubauer a kol, 2016).

1) Pravděpodobnost přiřazená k události bude vždy nenulová a matematicky vyjádřená jako:

$$0 \leq P(E) \leq 1 \quad (1)$$

2) Vzorová oblast vždy zahrnuje všechny možné události experimentu, z čehož vyplývá, že vždy nastane nějaký scénář. Z toho lze usuzovat, že pravděpodobnost pro celou vzorovou plochu bude vždy rovna 1 viz. rovnice (2).

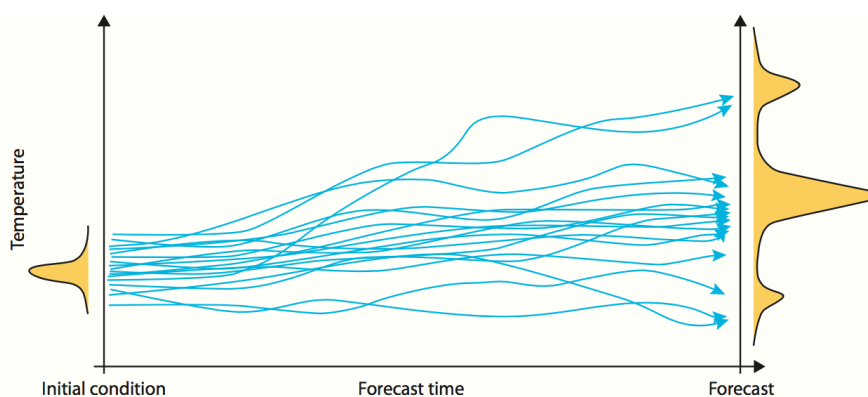
$$P(S) = 1 \quad (2)$$

3) Pravděpodobnost, že jeden nebo druhý z přirozeně se vylučujících se jevů nastane, je součtem pravděpodobností obou jednotlivých událostí. Neboli:

$$P(E \cup F) = P(E) + P(F) \quad (3)$$

4.3 PRAVDĚPODOBNOTNÍ ROZDĚLENÍ

Kompletní popsání problému tvorby předpovědi počasí by mohlo být vysvětleno tak, že se jedná o vývoj fyzikálních jevů atmosféry v čase a interpretován je za pomoci statistických prvků. Nejhojněji využívaným statistickým nástrojem pro tyto účely je graf hustoty pravděpodobnosti – Probability Density Function (PDF).



Obr. 3: Graf hustoty pravděpodobnosti na počátku tvorby předpovědi a na konci (Buizza, 2003)

Ensemblová předpověď stojí na základech deterministické předpovědi, avšak k vytvoření závěrů využívá několik variant výstupů, kterým přiřazuje pravděpodobnost. Jakýmsi vedlejším produktem ensemblové předpovědi je tedy pravděpodobnostní odhad (Buizza, 2003).

Rozptyl (Spread) pravděpodobnosti

Deterministický způsob předpovědi počasí má zásadní problém: nepočítá s nejistotami zanesenými do výpočetního modelu. Znamená to tedy, že i kdyby byl výpočet spuštěn několikrát, avšak se stejnými počátečními podmínkami, jeho výsledek bude neměnný (Palmer, 2001). Je ovšem známo, že fyzika atmosféry se řídí nelineárně-chaotickými zákonitostmi (Lorenz, 1963). Vhodnější způsob modelování budoucího stavu počasí se proto zásadně zakládá na teorii pravděpodobnosti.

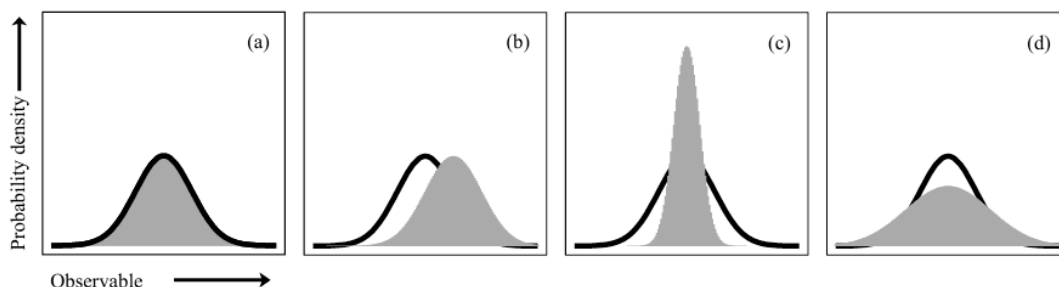
Obecně se má za to, že průměrná hodnota všech členů ensemblu vykazuje přesnější odhad, nežli samostatný deterministický výstup (Murphy, 1988). Avšak samotný průměr ensemblu může nabývat různých hodnot v závislosti na rozptylu rozdělení pravděpodobnosti a pro tyto případy platí následující:

- je-li na počátku tvorby předpovědi atmosféra ve stavu, kdy ji lze prakticky přesně popsat, je rozptyl předpovídaných hodnot na obrázku č. 1 menší
- pokud je pro pozorovatele atmosféra méně „čitelná,“ znamená to, že rozptyl predikovaných hodnot bude větší a předpověď méně přesná

Spolehlivost předpovědi

Za ukazatele kvality předpovědi lze označit hodnotu její spolehlivosti. Jde o vztah korespondence mezi pravděpodobnostmi a pozorovanými četnostmi výskytu jevu v případě, že je tato událost předmětem předpovědi. Hodnoty tohoto ukazatele představuje míra variability událostí. Samotná spolehlivost je pak variabilní ve vztahu k prostoru a času, závislá na bias modelu, ale i na omezeném množství dat vstupujících do výpočtu (Atger, 2003). V důsledku toho jsou předpovědi velkou výzvou v oblasti jejich samotné interpretace.

V kontextu ensemblové předpovědi termín spolehlivosti vychází z předpokladu, že všechny členy ensmbu a výstupy pozorování pochází z totožného pravděpodobnostního rozdělení, tj. jsou statisticky shodně zpracované.



Obr. 4: Ilustrace spolehlivosti, respektive nespolehlivosti ensemblových předpovědí (Wilks, 2006)

Jak ukazuje Obr. 4, spolehlivost závisí na několika faktorech. Pro všechny případy je uvažována stejná vstupující nejistota a předpokládanou metodou pro tvorbu předpovědi je skrze ensemblový systém. Situace (a) znázorňuje případ, kdy prognóza je spolehlivá a statisticky shodná s pozorovanou událostí. Jsou-li předpovědi zatížené systematickou chybou výpočetního modelu, budou jejich pravděpodobnostní rozdělení posunuta na ose zobrazující výsledky pozorování. Tento případ ukazuje situace (b). Je-li rozptyl ensmbu příliš malý, znamená to, že do výpočtu vstupují data, jež nezahrnují zásadní nejistoty (c), zatímco (d) naznačuje nadhodnocený stav nejistot (Weigl, 2012).

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že statistika se stala jakýmsi středobodem v předpovídání počasí. Její využití má své pádné opodstatnění, neboť ve svém jádru řeší otázky spojené s nejistotami. Zabývá se jejich kvantifikací a vyhodnoceními, utváří závěry a prognózy, které v sobě již tyto pochybnosti zahrnují a jejich uživatelé tak s nimi mohou operovat. Není proto překvapením, že i z tohoto důvodu statistika hraje velkou roli v atmosférických vědách (Wilks, 2006).

5. ENSEMBLOVÁ PŘEDPOVĚĎ A JEJÍ TVORBA

Ensemblová předpověď je svou povahou stále formou numerické předpovědi NWP (Numerical Weather Prediction). Tedy disciplínou, která je spojována s vyčíslováním nejistot v chaotickém prostředí atmosféry. Data vstupující do výpočetního modelu jsou svojí povahou nedokonalá, což do samotného výpočtu vnáší celou řadu nepřesností. Některé z těchto chyb posléze mohou v průběhu předpovědi nabýt na významu a výrazně tak ovlivnit přesnost predikovaného stavu. Nejčastějšími zdroji nejistot jsou numerické algoritmy popisující dynamické a fyzikální procesy atmosféry, zaokrouhlované pozorované hodnoty nebo chyby v určování dílčích měřítek při postupu z globálních modelů, tzv. downscalingu apod.

Reakcí na přirozeně se vyskytující chyby v předpovědní praxi se proto za poslední dvě dekády stala ensemblová předpověď. Cílem ensemblového přístupu k určování počasí je číselné vyjádření pravděpodobnosti budoucího stavu atmosféry, namísto kvantitativního vyčíslení určitého charakteristického jevu, kterým se zabývá deterministický způsob předpovědi (Leutbecher, 2008). Výhody spojené s využitím pravděpodobnostních předpovědí shrnuje (Krzysztofowicz, 2001):

- Pravděpodobnostní předpovědi jsou z vědeckého hlediska korektnější – neskrývají nejistotu předpovědi
- Nejistoty v předpovědích umožňují kvantifikovat
- Poskytují informace pro učinění rozhodnutí odpovídající míře rizika
- Mají hospodářský profit plynoucí z efektivnějšího managementu rizikových událostí

Od roku 1992 proto většina světových předpovědních center začala přecházet na ensemblový předpovědní systém EPS (Ensemble Prediction System). Každé ze středisek si navíc vytváří vlastní předpovědní systém, což přináší různé výsledky, které slouží k dalšímu rozvoji a k porovnání spolehlivosti (Wang, 2012).

V dnešní době již také existuje mnoho metod a modelů pro tvorbu ensemblové předpovědi, avšak jednou z prvních metod byla Monte Carlo. Dalším přístupem je za pomoci perturbace zdrojových výpočetních dat, k níž dochází analýzou těchto naměřených dat. Kombinací několika integrací výpočetních modelů a fyzikálních balíků pak lze získat četnější hodnotu počátečních podmínek, a tím vytvořit další ensemblovou předpověď. Tento způsob predikce je využíván například v Canadian Meteorological Centre (Callado, 2013).

Pravděpodobnostní meteorologické předpovědi vznikající perturbacemi počátečních podmínek jsou doménou zejména globálních modelů NWP. Ty jsou zároveň zpracovávány pro delší časový horizont 8-15 dní, avšak mají i hrubší měřítko (řádově stovky km²), kvůli čemuž se nedají aplikovat pro lokální modely. Pro účely regionálních předpovědí se proto využívá výstupů globálních modelů, které jsou následně zpřesňovány výpočty na měřítkem omezených NWP modelech. Tomuto postupu se nazývá downscaling a příkladem tohoto systému je COSMO-LEPS, který je v hojné míře využíván napříč evropskými předpovědními službami a pro své účely jej používá i ČHMÚ. Nevýhodou tohoto postupu však je časová náročnost modelování, což do výsledné předpovědi zanáší další nepřesnosti. (ČHMÚ, 2011)

5.1 VSTUPNÍ DATA A ZDROJE NEJISTOT

Numerická předpovědní praxe se i přes pokrok ve svém vývoji potýká s náročností úkolu popsání stavu atmosféry. Tato situace se tak promítá i ve výpočetních postupech, což do modelování vnáší nepřesnosti. Navíc chyby jsou do modelů zanášeny i samotnými vstupními daty (aktuální údaje o srážkách, vlhkosti, větru apod.), které jsou běžně zaokrouhlovány. Toto všechno lze nicméně označit jako přirozené, něco s čím se musí počítat a právě ensemblová předpověď skýtá možnosti, jak tyto nejistoty vyčíslit (Leutbecher, 2008).

V rámci numerické předpovědi NWP se v důsledku chaotické povahy počasí vyskytují zejména dva druhy nejistot – nejistota na vstupních datech a dále nejistota ve výpočetním modelu. Ze statistických analýz porovnávající míru vlivu jedné či druhé nejistoty vyplývá, že přesnost prognóz je daleko více citlivější na data, která předkládáme k výpočtu, přičemž nezáleží, který z výpočetních modelů je použit. Výsledky jsou totiž prakticky totožné a jejich rozdíly minimální (Lorenz, 1982).

5.1.1 NEJISTOTY NA VSTUPNÍCH DATECH

Nedokonalost vstupních dat pramení z několika zdrojů. Jednak se jedná o časově závislou proměnlivost jevů probíhajících v atmosféře, ale dalšími a možná i závažnějšími problémy jsou nedostatečně hustá celosvětová pozorovací síť a nepřímé techniky měření, což pro výpočet poskytuje značně omezené spektrum informací. Závažnost tohoto problému pak nabývá na své velikosti zejména pro předpovědní

centra regionálnějšího charakteru, která musí data pro své potřeby asimilovat. Zde vzniká prostor pro vnos dalších nejistot. Každý asimilační systém je totiž navíc zatížen charakteristickými chybami z pozorování a integračními rovnicemi výpočetních modelů. Otázkou přesnosti pak už zůstává samotný fakt, že chaotický stav atmosféry umocňuje tyto počáteční chyby v čase nelineárně (Callado a kol., 2013)

Tyto chyby jsou v ensemblové předpovědi zachyceny užitím perturbace dat, kdy dochází k jemným odchylkám od pozorovaných hodnot a vzniká tak prostor pro vývoj několika běhů budoucího stavu počasí. Existuje několik cest, jak data perturbovat. Například ECMWF model ESP kombinuje singulární vektory společně s asimilovanými daty, čímž získává přehled o počáteční hustotě pravděpodobnosti. NCEP zase naopak využívá metodu známou jako breeding (Buizza, 2003).

5.1.2 MODELOVÁ NEJISTOTA

Numerické modely NWP jsou produkcí lidského chápání probíhajících fyzikálních jevů v atmosféře. Ovšem nedokonalá znalost tohoto prostředí neumožňuje tyto zákonitosti v absolutní míře matematicky obsáhnout (Leutbecher, 2008). Procesy v počítačových modelech proto podléhají zjednodušením, jako je například parametrizace prostředí. NWP centra disponují několika výpočetními modely, přičemž si při tvorbě předpovědi ten který den vybírají nejvhodnější z nich, jenž nejlépe vystihuje současný vývoj prostředí. V současnosti se k parametrizaci takovýchto nejistot využívá zejména tři technik – ensemblový multi-model, perturbace parametrů ensemblu, stochasticko-dynamická parametrizace (Palmer a kol., 2005).

Od první numerické předpovědi v roce 1950, byl v rámci zpřesňování modelů učiněn obrovský pokrok. Velký podíl na tom má skutečnost neustále se vyvíjející počítačové techniky (dnes výpočty zajišťují tzv. superpočítače), což v dalším kroku umožnilo rozvoj v oblasti prostorového řešení. Příští vývoj bude pokračovat v tomto trendu, tedy zpřesňování měřítek a dále skrze úpravy v reprezentaci interakce oceánografických a pevninských procesů (Leutbecher, 2008).

5.2 PODMÍNKY EPS V ČR

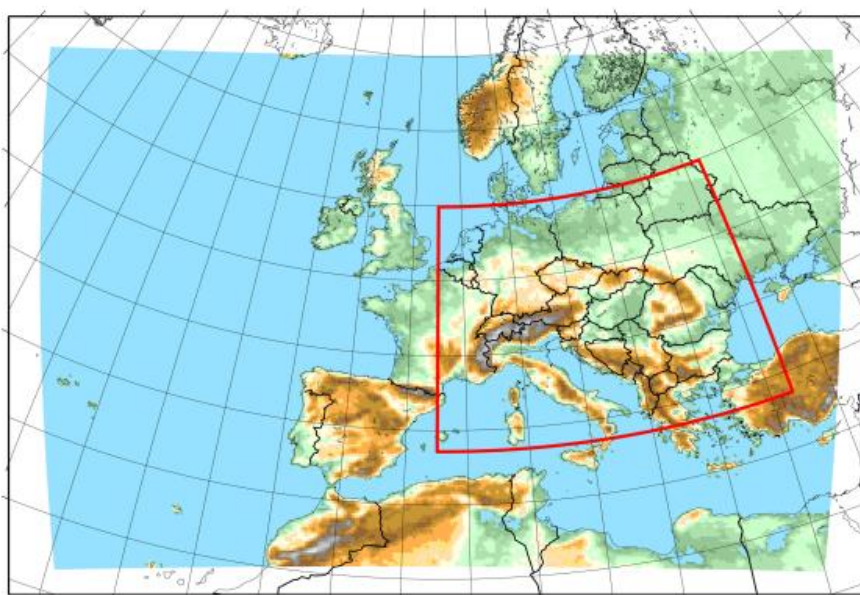
Modelování pomocí ensemblových metod najde své využití zejména pro střednědobé předpovědi (přibližně 14denní výhled). Jak již bylo dříve naznačeno,

vstupem do modelů regionálního charakteru jsou výstupy z globálních modelů, jejichž provoz již zajišťuje více jak desítky světových předpovědních center. Pro výpočet z globálního modelu je nutné určit pouze počáteční podmínky, okrajové podmínky v tomto případě vypadávají, neboť se jedná o periodický systém. To neplatí pro modely regionálních měřítek, pro které je nutné určit i okrajové podmínky a ty lze získat několika metodami zpřesnění výstupů z globálního modelu (Sopko a Sandev, 2003).

Česká republika se po dlouhém úsilí stala novým členem ECMWF, což panelu ČHMÚ umožnilo dostat se k zajímavým datům pro tvorbu pravděpodobnostních předpovědí (ČMES, 2016). Na našem území tak dále roste význam modelu ALADIN-LAEF (Limited Area Ensemble Forecast), který pro svou potřebu čerpá data právě z globálního modelu ECMWF EPS (European Centre for Medium-Range Weather Forecast, Ensemble Prediction System). Aby se dala pro potřeby regionálního modelu data využít, je užíváno několika metod zpřesňování, neboli perturbací. Patří mezi ně metody:

- Singulárních vektorů (využíváno ECMWF)
- Breeding (NCEP – dále popisuje Toth a Kalnay, 1993)
- Ensemblové asimilace dat (CMC – Canadian Meteorology Centre)
- Multi-model analýzy
- Ensemblové transformace (relativně moderní techniky)

Více o tématu pojednává (Burgi, 2006)



Obr. č.5: Červený rámeček uvnitř topografického výřezu ukazuje oblast regionálního modelu ALADIN-LAEF s pokrytím Střední Evropy (Wang a kol., 2011)

Pro model ALADIN-LAEF, který pro své výpočty využívá výstupů ECMWF a PEARP/ARPAGE, je logickou volbou technika singulárních vektorů. Ta je nicméně ve svém vývoji stále prakticky v začátcích, navíc je náročná na čas, který potřebuje pro výpočet a v neposlední době jde také o nákladný způsob zisku dat. Z toho důvodu přistupují modely LAMEPS (Limited Area Model Ensemble Systém) k produkci počátečních podmínek skrze breedingové a blendingové (nový typ) metody, které jsou jednoduché, efektivní a méně nákladné. Blendingový přístup je navíc propojen s prvky digitálního filtrování a spektrální analýzy a tedy kombinuje nejistoty hrubých měřítek ECMWF vyčíslené singulárními vektory se středněměřítkovými nejistotami generovanými breeding metodami modelu ALADIN. S tímto inovačním přístupem jsou také spojena některá očekávání jako: redukování nevyrovnaných výsledků jednotlivých perturbačních metod; přesněji vystihnou nejistoty i ve vyšším rozlišení; obsáhnou i nejistoty singulárních vektorů a breedingu (Wang a kol., 2011).

5.3 VERIFIKACE A KALIBRACE MODELU

Ensemblová předpověď je již dnes široce využívaným nástrojem nejen v meteorologii, ale i v operativní hydrologii (Brown a kol., 2010) Ve své podstatě nejsou pravděpodobnostní předpovědi správné nebo špatné, z čehož plyne požadavek, aby byly statisticky věrohodné a zároveň na větším množství druhů skóre rozlišené. Další praktickou znalostí je nemožnost postihnout každý zdroj nejistoty, přičemž mnohé z nich je těžké být jen kvantifikovat. Verifikace ensemblových předpovědí je pro účely číselného vyjádření nejistot nezbytností, stejně tak, jako je přínosem pro zpětnou vazbu či rozvoj schopností předvídat různé situace s větší jistotou.

Verifikace je dále proces, který určuje hodnotu výsledné předpovědi a poskytuje důležité informace širokému spektru uživatelů. S ohledem na požadavky, jaké pro verifikaci panují, bylo vyvinuto hned několik hodnotících nástrojů, které pokrývají jak deterministický, tak i ensemblový přístup (Jolliffe a Stephenson, 2003). Dobrou předpověď bychom zároveň mohli identifikovat podle Murphyho (1988), podle něhož musí splňovat tyto náležitosti:

- Konzistentnost – panuje shoda mezi rozhodnutím meteorologa a jeho předpovědí
- Kvalita – shoda mezi předpovědí a pozorováním
- Hodnota – zvyšující se ekonomická a další hodnota pramenící z rozhodnutí managementu při využití předpovědi

Během posledních padesáti let došlo k rozvoji obzvláště v oblasti vyhodnocení rozdělení pravděpodobnosti jako jednoho z možných výstupů ensemblové předpovědi. K atributům hodnotícím pravděpodobnostní předpovědi patří přesnost, spolehlivost nebo též kalibrace, rozlišení, špičatost a další. K nejrozšířenějším nástrojům patří:

- BS (Brier Score), RPS (Rank Probability Score)
- BSS (Brier Skill Score), RPSS (Ranked Probability Skill Score)
- Talagrand Histogram (Rank Histogram)
- ROC diagramy (Relative Operating Characteristic)
- RMSE (Root Mean Square Error)
- BIAS (Systematická chyba)

6. HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ – ENSEMBLE STREAMFLOW PREDICTION (ESP)

Hlavním smyslem existence hydrologických předpovědních systémů je poskytování odhadu budoucího vývoje, který se zakládá na pozorování a skladbě meteorologické předpovědi. Některé z aplikovaných systémů dokáží určit i následky hrozících záplav, vymodelovat počátek a průběh nastupujícího suchého období, čímž pomáhají i v rozvržení dodávek vody. Z pohledu dlouhodobého výhledu poskytují informace pro management řečišť nebo zmírnění dopadů klimatických změn (Cloke a Pappenberger, 2009).

Mnoho z těchto systémů je založeno na principu zpracování srážkového vstupu. Tyto informace se pro výpočet získávají pozorováním a dnes nejčastěji také radarovým měřením. Pro sestavení střednědobé předpovědi však musí být použito numerických modelů NWP. Za nejvhodnější variantu numerického modelování bývá označována ensemblová předpověď s potenciálem efektivního využití času za hrozby povodňové události, ale také lepší kvantifikaci srážek (Cloke a Pappenberger, 2009).

6.1 UPLATNĚNÍ A POTENCIÁL ESP

Klimatické změny na Zemi jsou pro člověka přímým ohrožením. Výstrahou jsou zejména proto, že se dějí příliš rychle. V důsledku toho je nutností na tyto změny včas a adekvátně reagovat, neboť docházet bude k výskytům stále extrémnějších jevů, jako je sucho, přívalové deště a s nimi spojeným záplavám. Zajistit základní funkci pro obyvatelstvo, zemědělství, průmysl, ale i samotné životní prostředí se proto stane nejzákladnějším požadavkem moderní doby (ČHMÚ, 2011).

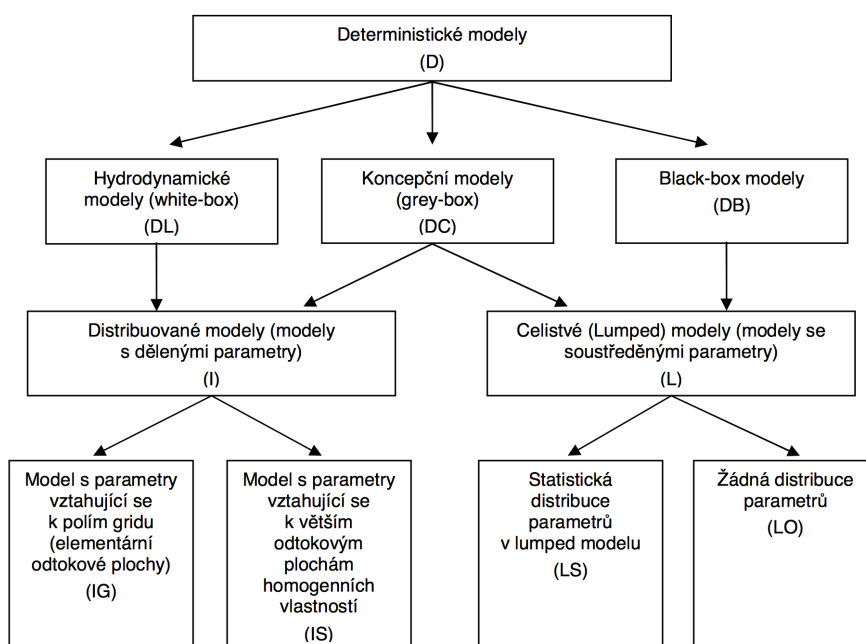
Racionálním postojem v této výzvě je sofistikovaný management při nakládání s vodními zdroji. V podmínkách České republiky to znamená efektivně spravovat režim řečišť a nádrží, které jsou povětšinou koncipovány jako víceúčelové. Mají tedy jednak funkci zásobní, ale zachytit dokáží i povodňové vlny. Tento účel plní zásobní prostor, se kterým je manipulováno s ohledem na budoucí stav počasí. Z toho vyplývá, že nelze jakkoliv upravovat poměry v nádrži bez znalosti budoucího počasí v rámci několika nadcházejících dní. I proto se v současnosti klade důraz na zvýšení přesnosti

predikovatelnosti jevů atmosféry, a to krátkodobých i dlouhodobých, i z pohledu odtokových poměrů z povodí, jimiž se zabývá právě ESP.

6.2 KLASIFIKACE HYDROLOGICKÝCH MODELŮ

Matematická reprezentace srážko-odtokového procesu má dlouhou historii a svým významem je mocným nástrojem vodohospodářů a hydrologů ať už pro operativní předpovědi nebo návrhové účely (Jeniček, 2005). Mnoho hydrologických modelů je extrémně komplexních, nicméně i tak tento komplexní systém událostí reprezentují velmi zjednodušeným způsobem (Chong-yu, 2002). V průběhu let byla vyvinuta celá řada modelů, které srážko-odtokový proces na povodí popisují různými přístupy z důvodu jejich odlišného záměru využití nebo oblasti budoucí potřeby. S postupem času řada modelů vykazovala známky podobnosti, a proto se začaly modely členit do kategorií. Dle klasifikace WMO jsou hydrologické modely v současnosti tříděny do 5 kategorií podle:

- Účelu aplikace modelu
- Typu systému, který je simulován
- Modelovaného hydrologického procesu
- Principu kauzality
- Míry časové a prostorové diskretizace

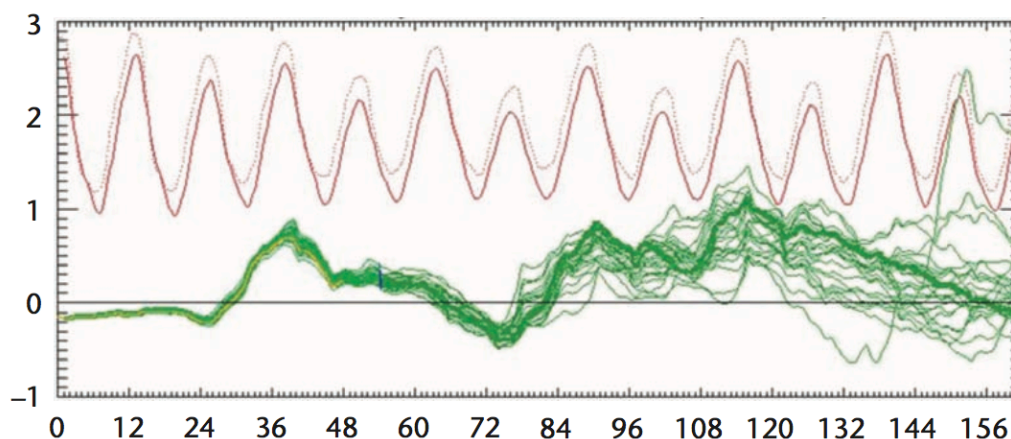


Obr. 7: Členění modelů dle principu kauzality - deterministické modely (Becker a Serban, 1990)

6.3 PŘÍKLADY APLIKACE ESP V HYDROLOGICKÝCH PROCESECH

Hlavní záměr vývoje hydrologických předpovědních systémů obvykle směřuje k cíli poskytnout odhad budoucích podmínek. Ten se zakládá na pozorování a následném doplnění meteorologickými předpověďmi. Typickými příklady použití jsou varování před hrozícími povodněmi, odhad počátku a vývoje období sucha a tedy pomoc při zásobování vodou apod. Z dlouhodobějšího pohledu jde o správu říčních režimů nebo dopady na životní prostředí a obecně klima (Sene, 2010).

Z výše uvedeného je patrná odvislost předpovědi na čase a zejména na její předstih, což ve World Meteorological Organisation (WMO) definují jako interval času mezi vydáním předpovědi nebo výstrahy a očekávaným nástupem předpovídané události (WMO, 2012b).



Obr. 8: Ensemblová předpověď pro Lowestoft ze dne 2.října 2011. Plná a tečkovaná červená linie představuje úroveň pohotovosti, při jejímž dosažení jde o riziko záplav. Proměnná je v závislosti na přítokových a odtokových poměrech. Zelené linie představují ensemblovou předpověď (jednotlivé deterministické). K potenciálnímu ohrožení dochází tehdy, když dojde k dosažení úrovně pohotovosti. (WMO, 2012a)

Příklady využití ESP předpovědí s největším dopadem na lidstvo:

- dodávka pitné vody
- dlouhodobé přítoky do nádrží
- povodňové aktivity
- energetika
- analýza hydrologicky extrémních období
- rybochovné účely
- zemědělství

6.4 PODMÍNKY ESP NA ČHMÚ A METODIKA TVORBY PŘEDPOVĚDI

Metoda ESP umožňuje pracovat s velkým množstvím nejistot, které doprovází už samotný odhad současného stavu atmosféry a jejichž hodnoty rostou se zvětšující se časovou řadou, pro kterou jsou vyhotovovány. To je v kontrastu s předpověďmi deterministickými (NWP), které se soustřeďují na kratší časový úsek, zpravidla pro maximální dobu dvou dní, zato pomíjejí kovarianci s nejistotami při určování výchozího stavu atmosféry popřípadě jsou zpřesňovány výstupy z více modelů NWP. Pro získání předpovědi v horizontu větším jak dva dny už nelze použít pouze deterministické metody, které v takovém případě přesahují míru přijatelnosti nejistot vstupujících do systému. Nezbytné je nasazení pravděpodobnostních metod předpovědi. V hydrologii známou jako Ensemble Streamflow Prediction.

Technika určení ESP – 1) stanovení nejpravděpodobnějšího počátečního stavu povodí; 2) stanovení nejpravděpodobnější odhad vývoje směru budoucího počasí; 3) spojit první dva body a získat tak vícenásobné odhady budoucích odtoků z hydrologických modelů (ČHMÚ, 2011).

6.4.1 METODA S HISTORICKOU ŘADOU DAT

Stanovení se provádí na základě historických dat nebo využitím stochastických srážkových a teplotních dat. Pro hydrologické modely se používají počáteční podmínky všech proměnných, u srážkoodtokových jsou to údaje o nasycení půd a u sněhového servisu jsou to vodní hodnoty. Pro předpovědi ve velkém předstihu se používají tzv. alternativní data, která jsou výsledkem řady historických pozorování v daném kalendářním období předpovědi, kde se předpokládá určitý rozptyl možného stavu.

Jednotlivé kroky pro metodu s použitím historických dat:

1. Předpovědní modely provozované na bázi pro kontinuální simulace nahrají počáteční podmínky k datu a hodině vydávání předpovědi. Jako vstup jsou použita pozorovaná data.
2. Jsou připraveny vstupy z historické databáze, především teploty a srážky k datu a času počátečních podmínek, získaných v bodu 1.

3. Scénář připravený v bodě 2 je aplikován do předpovědních modelů a je provedena simulace předpovědi s historickými daty.
4. Výsledkem simulace je jeden hydrogram, nebo časová řada dalších hydrologických dat.
5. Postup v bodech 2 až 4 se opakuje pro všechny historické roky v databázi, nebo v případě podmíněné předpovědi pro vybrané roky, které splňují požadované kritérium.

Výsledným produktem je hydrogram, který slouží pro další zpracování v podobě pravděpodobnostních předpovědí. Tato metoda má spoustu nesporných výhod, přičemž mezi hlavní patří její jednoduchost a v předpokladu, že historická data mohou nahradit budoucí stav počasí, nicméně je potřeba mít dostatečně dlouhý záznam takových dat (mnohdy tedy nevýhoda). Dalším pozitivem je, že ji lze aplikovat na libovolný charakter povodí. Problémem naopak může nastat v rozdílnosti časového kroku historických pozorování a předpovědními systémy. Pro „přesnou“ simulaci je potřeba dosáhnout hodinového kroku a to za období minimálně 10 let (ČHMÚ, 2011).

6.4.2 METODA SE STOCHASTICKOU ŘADOU DAT

Pro vytvoření spojitého průběhu průtoku je tedy třeba mít k dispozici dostatek historických dat, ve vhodném časovém kroku (dají se případně interpolovat z naměřených průměrných hodnot). Pokud srážková data k dispozici nejsou (jsou pouze v denním časovém kroku, ze kterého nelze interpolovat), přichází v úvahu metoda zastávající stochastický přístup k získání vstupních dat (ČHMÚ, 2011).

Jednotlivé kroky pro metodu s použitím stochastických dat:

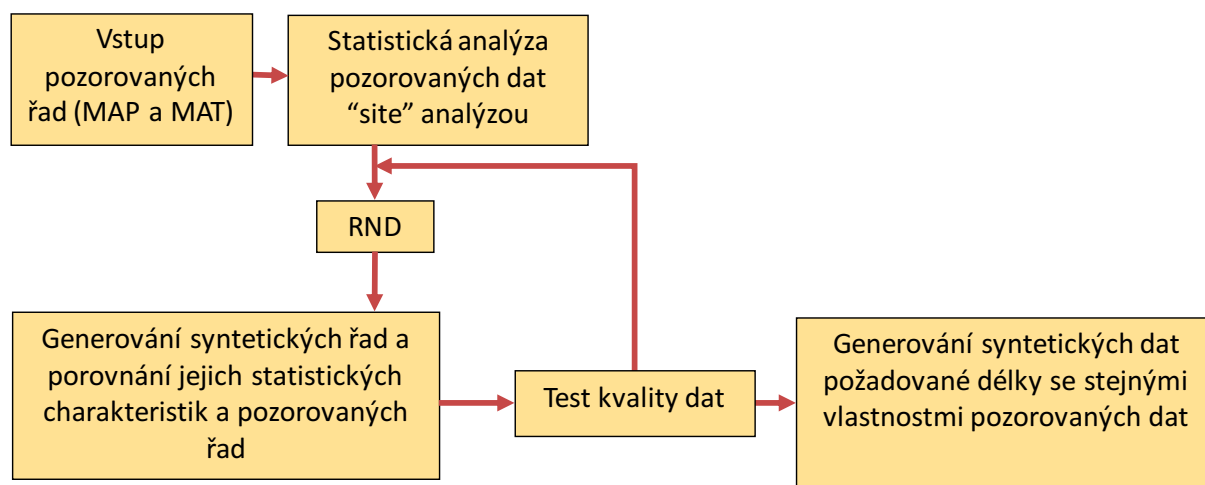
1. Předpovědní modely provozované na bázi pro kontinuální simulace nahrají počáteční podmínky k datu a hodině vydávání předpovědi. Jako vstup jsou použita pozorovaná data.
2. Jsou vybrány členy ansámblu na základě specifikovaných kritérií z 1000leté vygenerované řady teplot a srážek k datu a času počátečních podmínek, získaných v bodu 1.
3. Scénář připravený v bodě 2 je aplikován do předpovědních modelů a je provedena simulace předpovědi se stochastickými daty.

4. Výsledkem simulace je jeden hydrogram, nebo časová řada dalších hydrologických dat.
5. Postup v bodech 2 až 4 se opakuje pro všechny vybrané členy ansámblu dat z WG.

GENERÁTORY POČASÍ

Stochastická metoda získu vstupních dat. Je užito tzv. generátorů počasí a to tehdy, chybí-li historické údaje o počasí. Jde o numerický nebo pravděpodobnostní model generující denní časové řady, které mohou nahrazovat krátké historické řady. Umožňují modelovat vývoj počasí na základě klimatologické proměnné, jimiž jsou zejména teplota a srážky. To znamená, že ostatní proměnné s těmito daty korelují a lze je následně dopočítat podle pravděpodobnostní funkce, přičemž nejčastěji jsou data korelována se srážkami (*pro danou srážku, stanici a den*).

Nevýhodou generátorů je nutnost vytvoření korelačních vztahů, k čemuž je zapotřebí velké množství historických dat a dále generátory počasí jen v minimálním měřítku uvažují prostorovou informaci. To znamená, že jsou vhodné pouze pro lokální potřeby (Fodor a kol., 2013).



Obr. 9: Schéma generování dat WG (ČHMÚ, 2011)

LARS-WG – nejčastěji využívaný generátor, který byl vyvinut v Hadley centre ve Velké Británii. Připravuje umělé řady meteorologických prvků, přičemž každé z této řad uděluje stejnou pravděpodobnost výskytu jakou mají statisticky zanalyzovaná vstupní pozorovaná data. Přidělení takové pravděpodobnosti probíhá

většinou pro každý kalendářní měsíc zvlášť, a navíc jen pro jednotlivou lokalitu (meteorologickou stanicí).

Významným parametrem simulace hydrologickým modelem je časový krok výpočtu a časových řad. Nejčastěji užívaným výpočetním krokem pak je hodinový až denní, v závislosti na tom, jaké jsou požadavky na výstupy a jaká vstupní data jsou k dispozici. V minulosti se ale ukázalo, že pro simulaci v hodinovém kroku postačují i data 6hodinového kroku vstupních dat (Semenov a Barrow, 2002).

6.5 ANALYTICKÉ ZHODNOCENÍ

Analýza vyprodukované předpovědi, ať už hydrologické či meteorologické, je poháněna zejména zdroji chyb, které do ni vstupují. Bez adekvátního vyhodnocení by predikce ztratila svou hodnotu. Je proto nasnadě otestovat, zda k tvorbě bylo užito správných nástrojů k modelování, zhodnotit nejistoty na vstupu a ty následně pomocí relevantních dat redukovat (Hall a Beven, 2014). K popsání spolehlivosti předpovědi bylo navrženo již mnoho přístupů – procesy od bias korekcí až po downscaling. Vesměs všechny metody ale mají společný základ v korekci vydaných předpovědí s předpověďmi jim předcházejícím a jim korespondujícím pozorováním. Důležitý závěr ve své práci shrnul (Hamill, 2001), kde poukázali na nemožnost odkázat se při analýze předpovědi pouze na jednu z metod. Techniky hodnotící věrohodnost jsou totiž mnohdy vázány na specifickou lokaci, kterou jim přidělil jejich vývoj. Je proto obtížné posoudit výkonnosti těchto jednotlivých technik v globálním měřítku.

Z pohledu hydrologického musí modely v co největší míře eliminovat meteorologické aspekty a zároveň postihnout nejhlavnější zdroje nejistot hydrologického charakteru. Mezi ně patří ekvivalenty půdní vlhkosti a vodní hodnoty sněhu, parametry modelu nebo lidský faktor. Přes implementaci nejlepší dostupné vědy a technologií se očekává, že nadále bude zbývat určitý nepokrytý prostor náležící nejistotám, které je nutno vyčíslit skrze statistické modelování. Takové vyhodnocení umožňují postupy asimilace dat, post processingu nebo multi ensemblového modelu a tím pomáhají zlepšit spolehlivost, skill či závěry plynoucí z interpretace hydrologických předpovědí.

6.5.1 VERIFIKACE HYDROLOGICKÉ PŘEDPOVĚDI

Klíčovými vlastnostmi v oblasti kvality prognóz jsou kalkulace s bias hydrologických modelů a porovnání předpovědi spolu s observovaným stavem (Jolliffe a Stephenson, 2003; Wilks, 2006). Je taktéž zřejmé, že produkty verifikace budou pro každou sféru uživatelů jiné. Odlišné výstupy bude požadovat vědecká obec, jiné samotní prognostici, manažeři hydrologických software, lidé, co mají na starosti krizové situace apod. Výsledky verifikace proto ve většině případů budou i odlišnými formami prezentovány.

Obvyklým přístupem v procesu ověření spolehlivosti předpovědi, je vybrat jeden nebo několik hodnotících parametrů, v závislosti na požadavcích, a tyto hodnoty statisticky porovnávat s nastalou situací (Sene, 2010). Postup tvorby verifikace člení (Brown a kol., 2009) do tří fází:

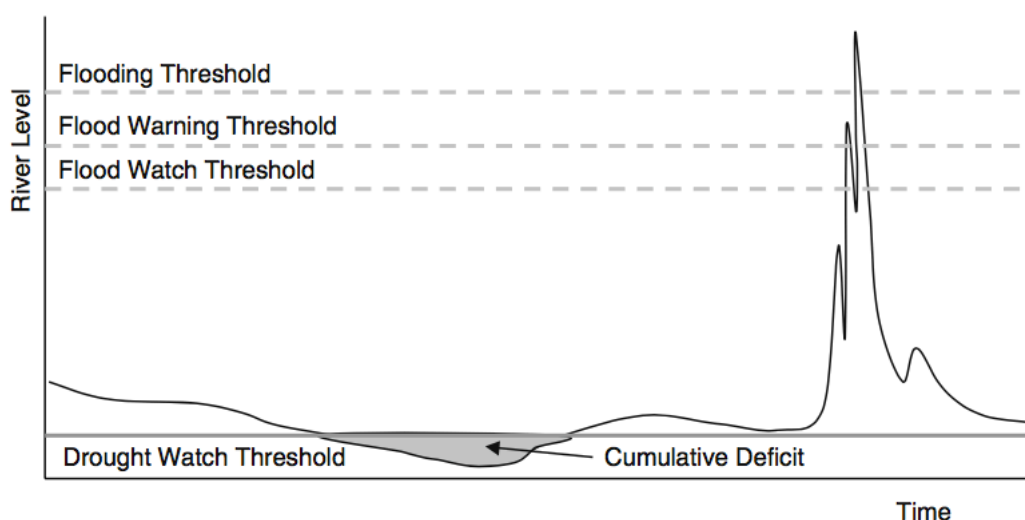
1. Verifikace – proces identifikace jednotek k verifikování, spojování předpovědi s pozorováním a následný výpočet kontrolních ukazatelů.
2. Agregace – výběr jednotek k agregování. Každá agregovaná jednotka obsahuje minimálně dvě verifikační jednotky a tento postup je využíván k vyjádření průměrné výkonnosti těchto jednotek. Tento stupeň verifikace je volitelný.
3. Výstup – produkce grafických a numerických výstupů skrze statistický rozbor verifikačních a agregačních jednotek.

6.6 INTERPRETACE PŘEDPOVĚDI A JEJÍ MANAGEMENT

Hydrometeorologické předpovědi mají široké spektrum uplatnění, přičemž jejich pravděpodobnostní vyjádření má potenciál k tomu, aby vedly ke zlepšení v rozhodovacích procesech (Hall, 2014). Surové výstupy z hydrologických předpovědních modelů se obvykle sestávají ze sady numerických informací ve vybraných bodech podél řek nebo gridové sítě. Soubor takových informací již má pro jistou skupinu odborníků značnou hodnotu. Nicméně pro tzv. přátelštější a srozumitelnější výstupy je pro uživatele nezbytné provést navazující post-processing, jehož výsledkem jsou mapové formáty, grafy, tabulky a z nichž lze interpretovat výsledky předpovědi daleko jasněji (Sene, 2010). Pro jakoukoli předpovědní aplikaci je pak za ideální přístup považován ten, kdy společné úsilí o vývoj v oblasti

interpretace vynakládají prognostici a koncoví uživatelé (Rogers a kol., 2007). To je klíčovým tématem mezinárodního projektu Hydrologic Ensemble Prediction Experiment (HEPEX), který vznikl právě za účelem propojené komunikace meteorologů, hydrologů a uživatelů předpovědí v roce 2004 na setkání evropského centra ECMWF.

Pro management krizových situací jsou hojně zobrazovanými informacemi vně předpovědi prahové hodnoty (thresholds) sledovaných veličin, jejichž překročení indikuje stav, který vyžaduje odezvu – řízení rizik (Sene, 2010).



Obr. 10: Ukázka prahových hodnot povodní a sucha pro říční stanici nebo oblast zájmu na blíže nespécifikované časové ose (Sene, 2010)

Uživatel však stále nakládá s informací podléhající značné nejistotě, pod jejíž tíhou je nucen se rozhodovat. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že srozumitelná interpretace je v managementu rizik základním předpokladem vedoucí ke správným rozhodnutím (Hall, 2006). V hydrologii se nejčastěji jako prahová hodnota uvádí kritický průtok na povodí řek, při jehož překročení je následkem stav povodňové aktivity anebo sucha. (Hall, 2003) definuje risk management záplav jako „proces sběru dat a informací, vyhodnocení rizik, posouzení možností, učinění a implementace rozhodnutí vedoucí k snížení, regulaci a přijetí rizika povodní.“ Tabulka 1 pak ukazuje některé příklady využití pravděpodobnostních předpovědí.

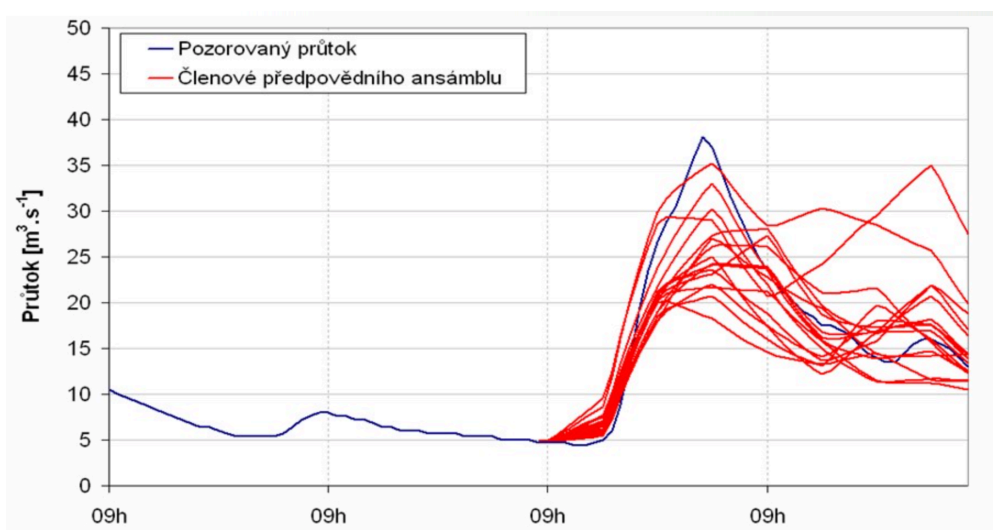
Tab. 1: Možnosti využití pravděpodobnostních

Technique	Description
Visualisation techniques	Spaghetti plots, plumes, histograms, box-and-whisker plots, stamp plots (i.e. multiple maps on a single page), time-lagged ensembles and other outputs showing different aspects of the forecast such as confidence intervals, clustering/tubing of ensembles, probability distributions and spatial variations
Probabilistic thresholds	The definition of threshold values in probabilistic terms, such as to provide a warning if there is more than a 60 % probability of rainfall exceeding 50 mm in 2 h
Decision theory	Evaluation of the costs and losses (or utility) of different probabilistic or ensemble scenarios to help to identify optimum solutions and the use of more complex techniques (see below)

Výstupem z pravděpodobnostních hydrologických předpovědí se rozumí několik časových řad s průběhy průtoků, které procházejí procesem zpracování do grafické podoby. Metod pro zobrazování takových předpovědí je celá řada. Každá z metod by v ideálním případě měla obsahovat informaci o míře nejistoty předpovědi, zobrazení by mělo být snadno čitelné a nedávat podněty k chybné interpretaci. Nejpoužívanějšími výstupy v praxi a rámci ČR jsou:

6.6.1 ŠPAGETOVÝ GRAF

Diagram zobrazující předdefinované isolinie pro specifickou hodnotu geopotenciálu nebo teplotu. Zpočátku předpovědi je vidět zhuštěný stav těchto linií, zatímco s rostoucí dobou se rozšiřuje jejich rozsah, což reprezentuje sílící nejistotu předpovědi. Nevýhodami této varianty je nemožnost odečíst pravděpodobnost dosažení určitého průtoků a dále horší čitelnost při velkém množství členu ensambli.



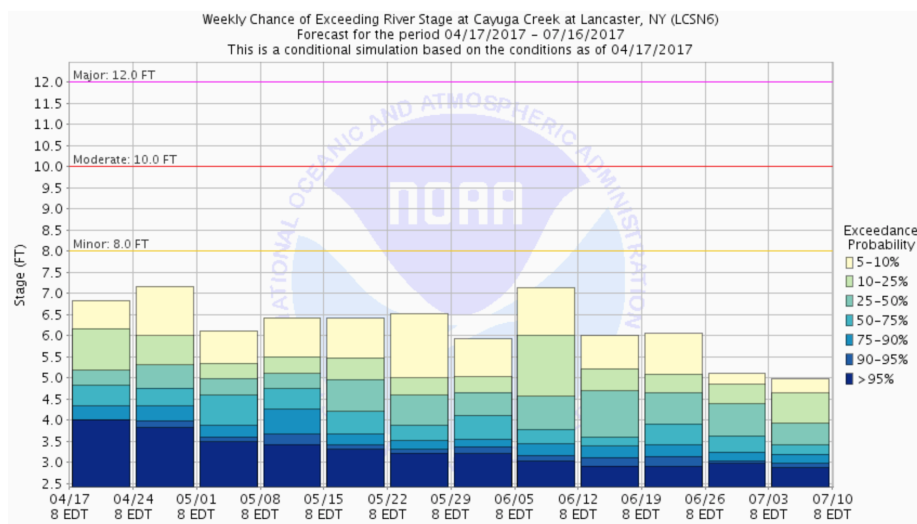
Obr. 11: Ukázka možného výstupu ESP – špagetový graf (ČHMÚ, 2012)

6.6.2 GRAF PRAVDĚPODOBNOSTNÍCH HLADIN

Pro každý výpočetní krok ensamble jsou vypočteny pravděpodobnostní hladiny, které se posléze propojují do linií nebo ploch. Svou přehledností pokrývá nedostatky špagetového grafu, ale je mírně zavádějící v rovině časového průběhu události – například povodeň může kulminovat v jiný čas, než ukazuje vrchol grafu.

6.6.3 SLOUPCOVÝ GRAF

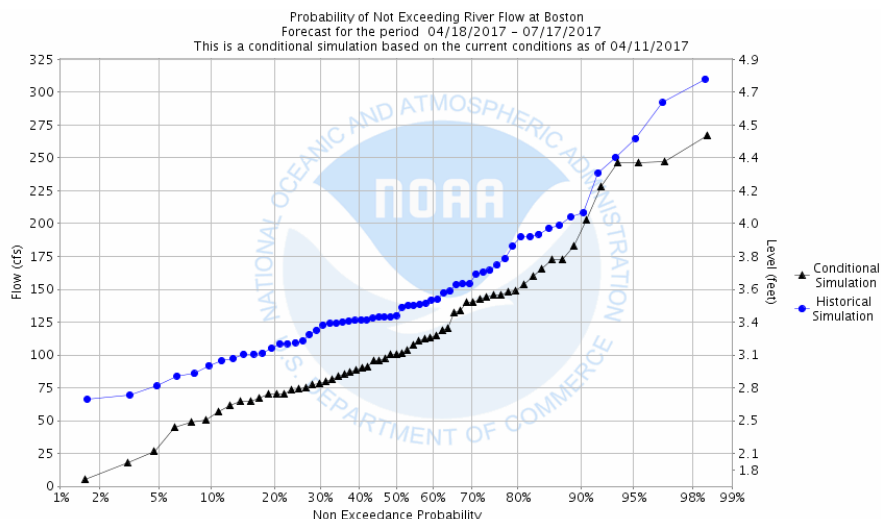
Velmi užitečným nástrojem při zobrazování střednědobých předpovědí. Zobrazuje pravděpodobnost možnosti překročení průtoku za určitý čas. Je upřednostňován při předpovědi hodnot objemu odtoku.



Obr. 12: sloupcový graf s pravděpodobnostmi překročení určité hladiny na řece Cayuga Creek (NWS, 2016)

6.6.4 ČÁRA PŘEKROČENÍ

Čára překročení nezobrazuje časovou osu předpovědi, avšak umožňuje zobrazení více variant výběrů ansámblů. Jednoduchá je na odečet pravděpodobnosti výskytu dané hodnoty, ovšem zároveň hůře čitelná pro uživatele bez vyššího matematického vzdělání. Nevýhodou je také nemožnost odečíst jinou prahovou hodnotu, než je uvedena v legendě.



Obr. 13: Graf čáry překročení průtoků (NWS, 2016)

6.6.5 TABULKA PRAVDĚPODOBNOСТИ PŘEKROČENÍ

Výstupem ESP je tabulka, v níž jsou zobrazeny pravděpodobnosti překročení prahové hodnoty v časových intervalech. Oproti dobré čitelnosti jsou nevýhodami omezený časový vývoj předpovědi a nemožnost odečíst informace pro jiné prahové hodnoty, než je uvedeno v tabulce.

Pravděpodobnost překročení 1.SPA

Datum vydání předpovědi	1.8.2011		2.8.2011		3.8.2011		4.8.2011	
	0h - 12h	12h-0h	0h - 12h	12h-0h	0h - 12h	12h-0h	0h - 12h	12h-0h
1.8.2011 7:00				30%	50%			
1.8.2011 19:00			10%	70%	100%	100%		
2.8.2011 7:00				30%	95%	80%	20%	
2.8.2011 19:00				60%	90%	70%	60%	5%

Obr. 14 – tabulka vyjadřující pravděpodobnost překročení 1. Stupně povodňové aktivity (ČHMÚ, 2012)

7. DISKUSE

Obecně platí, že široká veřejnost si neuvědomuje složitost a sofistikovanost předpovědního oboru (Kalnay, 2003). Meteorologické predikování budoucího stavu atmosféry vždy začíná problémem na vstupních datech a tyto aspekty se přenáší od globálních center s nejvýkonnější počítačovou technikou světa až po střediska menšího, regionálnějšího významu. Původcem „chybných dat“ vstupujících do výpočtu je hned několik, avšak jako nejpodstatnější se jeví zjednodušení, kterými je fyzikální komplex atmosféry, hydrosféry, kryosféry, geosféry popsán a zanesen do modelu. S postupem času se zásluhou vědeckého přístupu meteorologů dokázaly tyto chyby eliminovat, nicméně na základě nelineárně chaotického chování atmosféry, jež ve své práci popsal Lorenz (1963), se dá s jistotou tvrdit, že se ani v budoucnu nepodaří otázku spojenou s nejistotami zcela vyřešit. V posledních několika dekadách se proto ukazuje sílící význam pravděpodobnostních metod určování budoucího počasí oproti metodám deterministickým. Ty se efektivněji vypořádávají s těmito problémy, zahrnují výše zmíněné nejistoty ve svých výstupech a lépe tak informují veřejnost o možných výskytech blížících se událostí. Obecně je tento přístup označován jako ensemblová předpověď. Ta je ve své podstatě rovněž nepravděpodobnostní metodou a lze ji lépe popsat jako konečnou řadu deterministických předpovědí, z nichž lze následně určit míru pravděpodobnosti.

Otázkou je, zda má ensemblový přístup šanci uspět i mezi veřejností. Stále je totiž cítit jakýsi dozvuk deterministického trendu, zatímco pravděpodobnostní vyjádření je pro mnoho lidí, už jen co do jejich pochopení, méně familiárnějším způsobem prezentace. Jako příčiny se jeví dva zásadní problémy. Prvním možným faktem, proč pravděpodobnostní předpovědi ve světě zatím nezaujímají tolik prostoru je, že se uživatelé na jejich základě bojí nebo neumí učinit těžké rozhodnutí typu ano nebo ne. Druhým takovým bodem jsou již zmiňované formy podoby výstupů ensemblových prognóz. Ty ve své podstatě navozují pocit obtížného posouzení – pravděpodobnostní předpověď není nikdy nesprávná (Richardson, 2006). K podobnému závěru dochází i (Mládek, 2007), který poukazuje na nutnost vychovat uživatele k používání pravděpodobnostních předpovědí a zejména pak jejich porozumění.

Jak již bylo zmíněno, deterministické předpovědi svým uživatelům poskytují „pouhé“ ano nebo ne v otázce toho, zda událost X nastane či nikoliv. Užití takových

informací pro cost-loss modely v rozhodovacích procesech je proto ve své podstatě rovněž zcela neústupné a říká – přijměte opatření kdykoliv, kdy je událost předpovídána, anebo nedělejte nic. V kontrastu s tím se mohou pravděpodobnostní metody na první pohled jevit jako nevhodné. Cost-loss modely nicméně ukazují, že je tomu naopak. Pravděpodobnostní informace v tomto konkrétním případě určuje prahovou míru, po jejímž překročení, je dobré učinit ochranná opatření. Z analýzy od (Zhu a kol., 2002) navíc vyplývá, že větší skupina uživatelů bude profitovat z ensemblových předpovědí, a to v mnohem více případech, než kdyby použila jedno variantní výstup. Z toho je zřejmé, že tento typ předpovědí má z hlediska ekonomického významnější hodnotu, přičemž k podobným závěrům došel i (Mylne, 1999).

Forem prezentace pravděpodobnostních předpovědí, jak bylo v práci poukázáno, je několik a každý z výstupů má specifickou hodnotu pro určitou skupinu uživatelů. Například vhodnou formou pro běžného člověka s neodborným vzděláním v oblasti hydrologie bude výstup s informací o pravděpodobnosti dosažení určitého stupně povodňové aktivity. Takovou úroveň informovanosti nabízí například tabulka pravděpodobností překročení prahové hodnoty na *obr. 14*. Druhou skupinu tvoří hydrologové, kteří od předpovědi budou očekávat údaje o průtocích. Tuto informaci naleznou například ve špagetovém nebo sloupcovém grafu, jak představují *Obr. 11* a *12*. Podobným způsobem třídí výstupy ze svých předpovědí i ČHMÚ.

8. ZÁVĚR

Tato práce představila ensemblovou předpověď, potažmo i její základy v pravděpodobnostní teorii, v kontextu možného budoucího potenciálu. Ani s touto metodou určování budoucích podmínek se s určitostí, i přes rozmach a exponenciálně dynamický růst počítačové techniky, nepodaří odstranit množství nejistot v předpovědní praxi. Potenciální síla pravděpodobnostních prognóz nicméně spočívá v jejich možnosti kalkulace s těmito nejistotami a pro účely vyjádření, jak zdroje nejistot ovlivňují kvalitu a výkonnost ensemblu, byla například založena celosvětová databáze TIGGE. Pro simulaci zdrojů chyb již také bylo vyvinuto několik metod, což nadále vede k zpřesňování tohoto druhu předpovědí. V návaznosti na to, je neodmyslitelnou náležitostí pravděpodobnostních předpovědí jejich spolehlivost, pro kterou bylo vytvořeno rovněž několik druhů metrik.

Zasazení ensemblové předpovědi do hydrologických procesů velmi úzce souvisí s oborem meteorologie. Jakožto hlavní zdroj srážko-odtokového procesu jsou označovány srážkové úhrny. Hydrologické ensemblové modely proto v navazujícím průběhu přejímají nejistoty vstupující do modelování atmosférických procesů a znásobují je vlastními nepřesnostmi. Nejčastějšími důvody, proč předpovědi ve svém vyjádření selhávají pak jsou – nedostatečná přesnost vstupních dat nebo přítomnost pouze asimilovaných dat aktuálního stavu atmosféry.

V současné hydrologické praxi roste z důvodu častějších výskytů extrémních událostí poptávka po informacích spojených s mírou rizika. To znamená, že se do budoucna otevírá prostor pro zvýšení předpovědního paradigma. K dosažení tohoto cíle je nicméně zapotřebí společného úsilí o rozvoj, a to zejména v několika stěžejních oblastech. Jimi jsou výzkum metod pro tvorbu pravděpodobnostních předpovědí a metod pro jejich následnou verifikaci. Dále je třeba se zasadit o neustálý vývoj prognostických produktů, které by komunikovaly nejistoty a v neposlední řadě je nutností vzdělávat veřejnost, hydrology a meteorology v oblasti nejen samotné tvorby předpovědi, ale i jejich interpretace, která není jednoduchá.

Hlavním přínosem práce je zjištění, že pro účely předpovídání hydrologických událostí se ensemblové prognózy jeví v porovnání s deterministickým přístupem jako efektivnější nástroj. Takový závěr lze vyvodit ze samotného poznání podstaty metody. Ta se ve výpočtech dokáže vypořádat s nejistotami a ve svých výstupech je kvantitativně formulovat skrze jejich hustotu pravděpodobnosti. Další devízou ensemblu je pak i variabilita zobrazení na výstupech podle požadavků uživatele. Jak již ale bylo zároveň popsáno výše, stále existují jisté výzvy pro budoucí vývoj, což v současnosti ensemblové předpovědi nečiní zcela unikátním přístupem.

9. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

- ATGER F.**, (2003): *Spatial and Interannual Variability of the Reliability of Ensemble-Based Probabilistic Forecasts: Consequences for Calibration*, Monthly Weather Review, 131: 1509-1523.
- BECKER, A., SERBAN, P.**, (1990): *Hydrological models for water – resources system design and operation*, Operational Hydrology Report, WMO, Ženeva, 80 s.
- BROWN D. J., DEMARGNE J., DONG-JUN S., YUQIONG L.**, (2010): *The Ensemble Verification System (EVS): A software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations*, Environmental Modelling & Software, 25: 854-872.
- BROWN D. J., DEMARGNE J., LIU, Y., WU, L., SEO, D. J.**, (2009): *Ensemble Verification System, Users manual*, online: http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/hsmb/docs/hydrologic_ensembles/EVS_2.0_MANUAL.pdf, cit. 22.3.2017
- BUIZZA R.**, (2003): *Weather Prediction: Ensemble Prediction*, Encyclopaedia of Atmospheric Sciences, Academic Press, Londýn: 2546-2557.
- BÜRGI T.**, (2006): *Ensemble Predictions and Uncertainties in Flood Forecasting*, World Meteorological Organization - Sub Group on Flood Forecasting and Warning, Bern, online: <http://www.chr-khr.org/en/event/workshop-ensemble-prediction-and-uncertainties-flood-forecasting>, cit. 14.2.2017
- CALLADO, A., ESCRIBA, P., GARCÍA-MOYA, J. A., MONTERO, J., SANTOS, C., SANTOS-MUNOZ, D., & SIMARO, J.**, 2013: *Ensemble Forecasting*, InTech, Rijeka, 56 s.
- CASELLA, G., BERGER, L. R.**, (2001): *Statistical Inference*, Duxbury, Pacific Grove, 649 s.
- CLOKE, H., PAPPENBERGER, F.**, (2009): *Ensemble flood forecasting: A review*. Journal of Hydrology: 613-626.
- ČHMÚ**, (2011): *ESP Teorie a referenční příručka*, ČHMÚ, Praha, 136 s.
- ČHMÚ**, (2012): *Interpretace pravděpodobnostních předpovědí*, online: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/interpretace_pravdepodobnostnich_predpovedi.htm, cit. 20.4.2017
- ČMES**, (2016): *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*, online: <http://slovník.cmes.cz>

- DAÑHELKA, J.**, (2008): *Operativní hydrologie: Hydrologické modely a nejistota předpovědi*. Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu, Praha: ČHMÚ.
- FODOR, N., DOBI, I., MIKA, J., SZEIDL, L.**, (2013): *Applications of the MVWG Multivariable Stochastic Weather Generator*, The Scientific World Journal, Budapešť, 6 s.
- GNEITING T., RAFTERY A. E.**, (2005): *Weather Forecasting with ensemble methods*, Science, 310, 248-249.
- GORINI C.**, (2011): *Master Math Probability*. CENGAGE Learning, Boston, 368 s.
- HALL, J.**, (2014): *A framework for uncertainty analysis*. In: Hall, J., Beven, K.: *Applied uncertainty analysis for flood risk management*, Imperial College Press, Londýn: 39-59.
- HALL, J., BEVEN, K.**, (2014): *Applied uncertainty analysis for flood risk management*, Imperial College Press, Londýn, 672 s.
- HAMILL, T. M.**, (2001). *Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts*. Monthly Weather Review 129: 550-560.
- HANEL, M., VIZINA, A.**, (2014). *Metody vyhodnocování vodohospodářských dat*, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha: 140 s.
- CHONG-YU X.**, (2002): *Textbook of Hydrologic models*, Uppsala University, Uppsala: 1-11.
- JARUŠKOVÁ, D.**, (2015): *Pravděpodobnost a matematická statistika*, České vysoké učení technické v Praze, Praha, 138 s.
- JENÍČEK M.**, (2005): *Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích*. In: Langhammer J.: *Vliv změn přírodního prostředí, povodí a údolní nivy na povodňové riziko*, PŘF UK, Praha: 112-126.
- JOLLIFFE, I. T., STEPHENSON, D. B.**, (2003): *Forecast Verification A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. John Wiley & Sons Ltd., England, 231 s.
- KALNAY, E.**, (2003): *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*, Cambridge University Press, Cambridge, 328 s.
- KRZYSZTOFOWICZ, R.**, (2001): *The case for probabilistic forecasting in hydrology*. Journal of Hydrology 249: 2-9.
- LEUTBECHER M., PALMER T. N.**, (2008): *Ensemble forecasting*. Journal of Computational Physics 227, 3515-3539.

- LEWIS J. M.**, (2005): *Roots of ensemble forecasting*, Monthly Weather Review, 133: 1865-1885.
- LORENZ E. N.**, (1963): *Deterministic nonperiodic flow*, Journal of the Atmospheric Sciences, 20: 130-141.
- LORENZ E. N.**, (1982): *Atmospheric predictability experiments with a large numerical model*. Tellus, 505-513.
- MURPHY, J. M.**, (1988): *The impact of ensemble forecasts on predictability*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 114: 463-493.
- MYLNE, K. R.**, (1999): *The use of forecast value calculations for optimal decision making using probability forecasts*, 17th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Denver: 235-239.
- NAKATSU R.**, (2009): *Reasoning with Diagrams: Decision Making and Problem-solving with Diagrams*, John Wiley & Sons Ltd., England: 320 s.
- NEUBAUER, J., SEDLAČÍK, M., KRÍŽ, O.**, (2016): *Základy statistiky*, Grada Publishing, Praha, 272 s.
- NWS**, (2016): *Probability Information*, online:
http://water.weather.gov/ahps2/probability_information.php?wfo=buf&gage=icsn6, cit. 15.4.2017
- PALMER T.N., SHUTSS G. J., HAGEDORN R., DOBLAS-REYES F. J., JUNG T., LEUTBECHER M.**, (2005): *Representing Model Uncertainty In Weather And Climate Prediction*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences: 163-195.
- PALMER, T. N.**, (2001): *A nonlinear dynamical perspective on model error: A proposal for non-local stochastic-dynamic parametrization in weather and climate prediction models*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 127: 279-304.
- RICHARDSON, D. S.**, (2006): *Predictability and economic value*. In: Palmer, T., Hagedorn, R.: *Predictability of Weather and Climate*, Cambridge University Press, Cambridge: 628-644.
- ROGERS, D. P., CLARKE, S., CONOR, S. J., DEXTER, P., DUBUS, L., GUDDAL, J., KORSHUNOV, A. I., LAZO, J. K., SMETANINA, M. I., STEWART B., TANG, X., TSIRKUNOV, V. V., ULATOV, S. I., WHUNG, P., WILHITE, D. A.**, (2007): *Deriving societal and economic benefits from meteorological and hydrological services*, WMO Bulletin, 56: 15-22.
- SEMENOV, M. A., BARROW, E. M.**, (2002): *LARS-WG. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User manual*, Rothamstead Research, Hertfordshire, 27 s.

- SENE K.**, (2010): *Hydrometeorology - forecasting and applications*. Springer Science Business Media B.V., Londýn, 351 s.
- SOPKO, F., SANDEV, M.**, (2003): *Předpovědní systém ECMWF, produkty a jejich využití v předpovědní službě ČHMÚ*, MZ 2003/4., Praha: 119-123.
- TVRDÍK, J.** (2010). *Základy pravděpodobnosti a statistiky*, Přírodovědecká fakulta Ostravské univerzity, Ostrava: 113 s.
- WANG Y., BELLUS M., WITTMANN C., STEINHEIMER M., WEIDLE F., KANN A., IVATEK-ŠAHDAN S., TIAN W., MA X., TASCU S., BAZILE E.**, (2011): *The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF*, Q. J. R. Meteorol. Soc. 137 (655): 483-502.
- WANG Y., TASCU S., WEIDLE F., SCHMEISSER K.**, (2012): *Evaluation of the Added Value of Regional Ensemble Forecasts on Global Ensemble Forecasts*, Weather and Forecasting, 27: 972-987.
- WEIGL A. P.**, (2012): *Ensemble Forecast*. In: Hall, J., Beven, K.: *Forecast Verification A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. John Wiley & Sons Ltd., England: 141-166 s.
- WILKS D.**, (2006): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, Londýn, 611 s.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION**, (2012a): *Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting*. Publications Board World Meteorological Organization, WMO, 1091, Ženeva.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION**, (2012b): *WMO International Glossary of Hydrology*, WMO, 385, Ženeva.
- ZHU, Y., TOTH, Z., WOBUS, R., RICHARDSON, D., MYLNE, K.**, (2002): *The Economic value of ensemble-based weather forecast*, American Meteorology Society, Boston: 73-83.