

PRŮVODCE

INFORMACEMI
PRO ODBORNOU
VODOHOSPODÁŘSKOU
VEŘEJNOST



Český hydrometeorologický ústav

**Průvodce informacemi
pro odbornou
vodohospodářskou
veřejnost**

www.hydro.chmi.cz





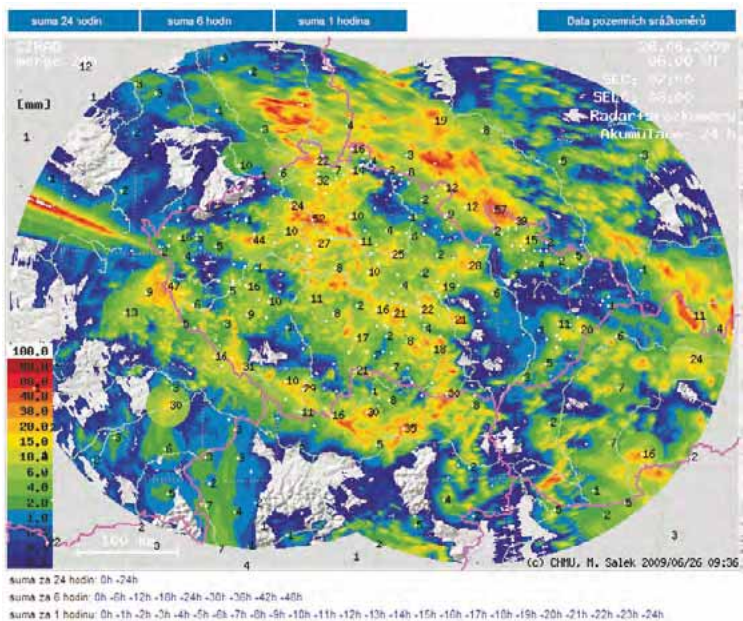
Český hydrometeorologický ústav

Průvodce informacemi pro odbornou vodohospodářskou veřejnost

Autorský kolektiv pod vedením Radka Čekala

Praha 2012

Tato publikace byla vytvořena v rámci grantového projektu SP/1c4/16/07 Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR. Projekt je řešen v programu věda a výzkum, jehož zadavatelem je Ministerstvo životního prostředí ČR. Doba řešení projektu byla 2007–2011.



Obsah

1. JAKÉ EXISTUJÍ A JAK VZNIKAJÍ HYDROLOGICKÉ PŘEDPOVĚDI	5
1.1 Předpovědi v ČHMÚ	6
2. MANUÁLNÍ HYDROMETRICKÉ PŘEDPOVĚDI	8
2.1 Metoda tendencí	8
2.2 Metoda odpovídajících si průtoků.....	9
3. MODELOVÉ DETERMINISTICKÉ PŘEDPOVĚDI	10
3.1 Postup zpracování modelové deterministické předpovědi	11
3.2 Předpovědní systém HYDROG-S	14
3.3 Předpovědní systém AquaLog	15
3.3.1 Interaktivní nástroje systému AquaLog.....	18
3.4. Jak odhadnout nejistotu deterministické předpovědi	18
4. PRAVDĚPODOBNOSTNÍ HYDROLOGICKÉ PŘEDPOVĚDI	22
4.1 Proč používat pravděpodobnostní předpovědi	22
4.2 Nejistota hydrologické předpovědi	23
4.3 Metody určení nejistoty kvantitativní předpovědi srážek	24
4.4 Krátkodobé pravděpodobnostní hydrologické předpovědi	27
4.4.1 Využití ansámblových výstupů ze stochastického běhu meteorologických modelů	27
4.4.2 Využití ansámblových výstupů složených z různých meteorologických modelů	28
4.4.3 Statistický postprocessing předpovědi srážek	28
4.5 Střednědobé pravděpodobnostní hydrologické předpovědi.....	29
4.6 Způsoby prezentace pravděpodobnostních předpovědí	30
5. PŘÍVALOVÉ POVODNĚ A MOŽNOSTI JEJICH PREDIKCE	34
5.1 Vznik přívalových povodní	34
5.2 Predikce přívalových povodní	34
5.3 Systém FFG-CZ – indikátor přívalových povodní	38
6. VYUŽITÍ PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘEDPOVĚDI VE VODOHOSPODÁŘSKÉ PRAXI	42
6.1 Využití pravděpodobnostních předpovědí při řízení nádrží.....	42
6.2 Střednědobá pravděpodobnostní předpověď	44
6.3 Krátkodobá pravděpodobnostní předpověď	47
6.3.1 Nejistota předpovědi – Index nejistoty IN.....	49
6.3.2 Minimální průměrný přítok do nádrže se zabezpečeností 90% – $Q_{\min 90}$	49

Průvodce informacemi pro odbornou vodohospodářskou veřejnost

Povodně představují nejvýznamnější přírodní riziko na území České republiky. Svědčí o tom nejen známé povodňové události z moderní doby, ale i četné historické záznamy. Z nich vyplývá, že velké povodně byly poměrně časté ve druhé polovině 19. století, poté nastalo povodňově chudé období, zejména ve druhé polovině 20. století. Avšak na přelomu tisíciletí došlo na našem území k několika katastrofálním povodním, zejména pak k událostem z července 1997 a srpna 2002, které patřily svou extremitou vůbec k největším povodním za celou dobu pozorování.

Zmiňované katastrofální povodňové události upozornily na nutnost protipovodňových opatření a zvyšování úrovně ochrany před povodněmi v nejhroženějších oblastech České republiky. Významnou roli v protipovodňové ochraně sehrává předpovědní povodňová služba, kterou zabezpečuje Český hydrometeorologický ústav prostřednictvím svých předpovědních hydrologických pracovišť. Moderní nástroje hydrologické předpovědní služby přinášejí novou kvalitu předpovědí a výstrah, která ale také klade větší nároky na uživatele těchto informací. Zejména vodohospodáři, na jejichž rozhodnutí závisí protipovodňová opatření s širokým dosahem, by měli v první řadě umět posoudit nejistotu vydané předpovědi, aby se snížilo riziko chybných interpretací předpovědí a protipovodňových opatření. Tato schopnost se získává praxí a zkušenostmi. Jednak proto, že povodně velkého rozsahu se vyskytují velmi zřídka, liší se od sebe průběhem a příčinami, a také proto, že nástroje předpovědní služby se neustále vyvíjejí. Znalost metod tvorby předpovědí, jejich úspěšnosti a možnosti interpretace různých typů předpovědí je pro vodohospodáře důležitá pro nejvhodnější rozhodnutí realizované v protipovodňové ochraně.

Rozvoj předpovědní služby a informace o nových výstupech a jejich správném použití byl mimo jiné realizován v rámci grantového projektu VaV – SP/1c4/16/07 Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR.

1. Jaké existují a jak vznikají hydrologické předpovědi

Velký rozvoj předpovědní služby v České republice nastal zejména po katastrofální červencové povodni v roce 1997, která vyvolala požadavek na zvýšení úspěšnosti a na prodloužení doby předstihu hydrologických předpovědí. Zatímco u manuálních hydrometrických předpovědí, které byly vydávány již od konce 19. století, lze poskytnout předpověď pouze pro větší toky, a to pro určitý termín, jehož předstih může v podmínkách České republiky dosáhnout doby 6 až 10 hodin, nejvíce však 24 hodin na dolním toku Labe a Moravy, předpovědi za pomoci matematických hydrologických modelů a předpovědí srážek nabízí informací více.

Pomocí modelů lze predikovat budoucí odtok i na malých povodích a výstupy mají formu ucelených hydrogramů, v podmínkách ČR na dobu až 48 hodin. Do zkušebního provozu hydrologických předpovědních pracovišť ČHMÚ byly hydrologické předpovědní modely nasazeny v roce 2001, operativně jsou pak používány od roku 2002.

Modelová hydrologická předpověď počítaná na předpovědních pracovištích ČHMÚ je výsledkem matematického výpočtu pohybu vody krajinou. Jelikož je tento pohyb neuspořádaný a krajina velmi heterogenní (v každém bodě má jiné odtokové vlastnosti), jsou skutečné fyzikální procesy proudění vody v hydrologickém modelu značně zjednodušeny. Schematizace má svojí horizontální složku, která spočívá v rozdělení krajiny do ploch s homogenními vlastnostmi (sklon, vegetace, propustnost) a vertikální složku, která definuje vrstvy (vegetace, půda, podloží) ve kterých dochází k akumulaci vody, výparu a odtoku. Pro hydrologický výpočet v zimní části roku je součástí také model, který počítá akumulaci a odtok vody ze sněhu.

Manuální i modelové hydrologické předpovědi průtoků pro vybrané vodoměrné stanice jsou denně počítány na hydrologických pracovištích ČHMÚ v Praze-Komořanech a regionálních předpovědních pracovištích (RPP) šesti poboček ČHMÚ (v Plzni, Českých Budějovicích, Ústí nad Labem, Hradci Králové, Ostravě a Brně).

Hydrologické předpovědi jsou výsledkem vyhodnocení dostupných informací o stavu povodí a měřených, případně předpovídaných prvků ovlivňujících hydrologický cyklus. Operativní předpovědi průtoků obecně vycházejí z následujících vstupních dat:

- Měřených srážek v hodinovém kroku (automatické srážkoměry, radarové odhady)
- Měřené teploty vzduchu v hodinovém kroku (klimatické stanice)
- Pozorovaných průtoků (v hodinovém kroku)
- Měření sněhové pokrývky – výšky sněhu a vodní hodnoty (1–2 × týdně, některé stanice denně)
- Předpovědi srážek (v 6hodinovém kroku) z meteorologických modelů
- Předpovědi teploty vzduchu (v 6hodinovém kroku) z meteorologických modelů
- Informací o stavu povodí (nasycenost) na základě vyhodnocení předchozích srážek, nebo na základě simulované vlhkosti půdy v modelech

Předpovědi lze kategorizovat různým způsobem:

- na základě způsobu vytvoření
 - manuální, vzniklé jednoduchým výpočtem bez použití hydrologických modelů,
 - modelové, které jsou výsledkem matematických hydrologických modelů,
- na základě časového určení předpovědi
 - termínové, udávající předpověď stavu, či průtoku k jednomu konkrétnímu času,
 - kontinuální, prezentující předpokládaný průběh stavu či průtoku v celém časovém období předstihu předpovědi,
- na základě doby předstihu předpovědi
 - krátkodobé, pokrývající období několika hodin až dnů na základě pozorovaných či předpovídaných dat (srážky),
 - střednědobé, či prodloužené udávají výhled na delší období, založený většinou na typickém průběhu prvků vodní bilance v delším období,
- na základě způsobu vyjádření spolehlivosti předpovědi
 - deterministické, které poskytují jedinou variantu budoucího vývoje odvozenou na základě pevně definovaného vztahu mezi příčinou (srážky, teplota aj.) a následkem (vodní stav, průtok),
 - pravděpodobnostní (stochastické), které uživatelům předkládají pole pravděpodobnosti realizace budoucího stavu daných veličin (vodní stav, průtok), a přinášejí tak i informaci o spolehlivosti odhadu budoucího vývoje.

Deterministické předpovědi mají na rozdíl od pravděpodobnostních hydrologických předpovědí pouze jednu variantu předpoklad vývoje vodního stavu / průtoku na predikované období. Jejich výhodou je srozumitelnost poskytovaných informací a s tím související snadná interpretace. Nevýhodou je, že nevíme nakolik je předpověď spolehlivá.

Uvedené způsoby dělení však nejsou úplné a lze nalézt i další možné způsoby dělení.

1.1 Předpovědi v ČHMÚ

Na hydroprognózních pracovištích ČHMÚ se denně zpracovávají dva druhy deterministických hydrologických předpovědí:

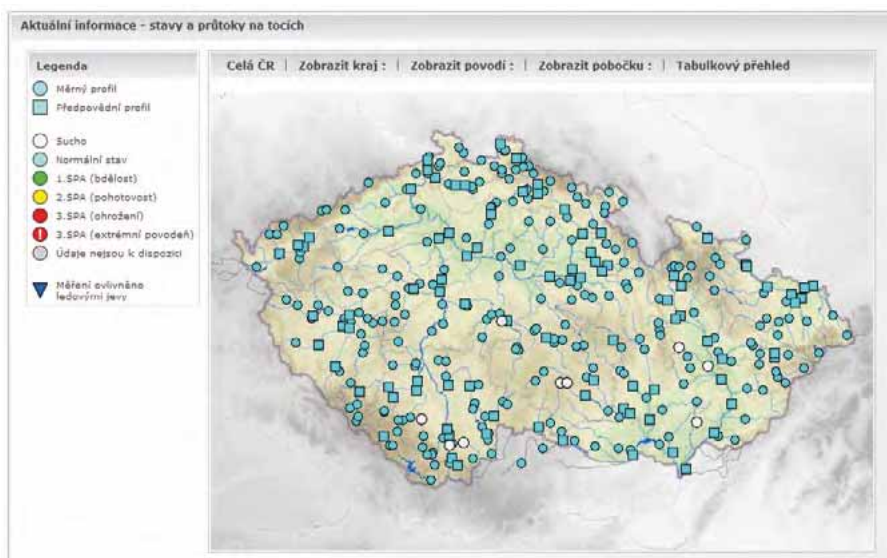
- Manuální hydrometrické předpovědi
- Modelové deterministické hydrologické předpovědi

Za normální odtokové situace vydává ČHMÚ jednou denně termínové manuální předpovědi stavů a průtoků pro 18 vybraných vodoměrných profilů (viz tab. 1.1) a 88 modelových předpovědí na 48 hodin ve vybraných profilech na tocích v celé ČR, stav 2. prosince 2012 (obr. 1.1).

Tab. 1.1 Seznam profilů, pro které jsou denně počítány manuální hydrologické předpovědi.

Tok	Předpovědní profil	Předstih předpovědi	Tok	Předpovědní profil	Předstih předpovědi
Labe	Jaroměř	3 h	Ohře	Karlovy Vary	15 h
Metuje	Jaroměř	3 h	Ohře	Přítok do VD Nechanice	22 h
Labe	Přelouč	14 h	Ohře	Louny	8 h
Labe	Brandýs n. Labem	12 h	Labe	Ústí n. Labem	24 h
Vltava	Přítok do VD Orlík	7 h	Labe	Děčín	27 h
Vltava	Vrané nad Vltavou	6 h	Odra	Bohumín	5 h
Berounka	Beroun	12 h	Morava	Olomouc	10 h
Vltava	Praha-Malá Chuchle	6 h	Bečva	Dluhonice	11 h
Labe	Mělník	12 h	Morava	Strážnice	24 h

Za mimořádné odtokové situace, v závislosti na plošném rozsahu a velikosti povodně se počet manuálních předpovědí může rozšířit až na 25 profilů a současně je zvýšena i četnost vydávání a upřesňování jak manuálních, tak i modelových předpovědí na dvakrát i vícekrát za den.



Obr. 1.1 Mapa hydrologických profilů hlásné a předpovědní sítě ČHMÚ, čtverečkem jsou označeny profily, pro které je počítána modelová hydrologická předpověď.

2. Manuální hydrometrické předpovědi

Manuální hydrometrické předpovědi vycházejí ze zákonitostí, jimiž se řídí pohyb vody v otevřených korytech. Umožňují takový předstih, jaký dovoluje postupová doba vody z horních do dolních profilů. Z tohoto důvodu je výhodnější jejich používání na větších nebo středních tocích s větší délkou.

K prodloužení předpovídaného intervalu dochází u manuálních hydrometrických předpovědí udáním tendence vývoje od termínu platnosti předpovědi do 7. hodiny ranní následujícího dne. Podle předpokladu očekávané změny vodního stavu se rozlišuje devět kategorií tendence:

Tendence	Předpokládaná změna vodního stavu
Velmi rychle stoupá (klesá)	+/- 120 cm a více
Rychle stoupá (klesá)	+/- 60–120 cm
Stoupá (klesá)	+/- 25–60 cm
Zvolna stoupá (klesá)	+/- 5–25 cm
Setrvalý stav	+/- 5 cm
Kolísá	(alespoň jeden pokles a jeden vzestup > 10 cm v předpovědním období)

Výsledkem manuálních hydrometrických předpovědí není, tak jako je tomu u modelových deterministických předpovědí, jedinečný průběh vodního stavu / průtoku v předpovědním období, ale pouze předpověď na konkrétní termín, proto se také někdy manuální hydrometrické předpovědi nazývají termínovými předpověďmi.

K základním metodám tohoto druhu předpovědi patří:

- Metoda tendencí
- Metoda odpovídajících si průtoků neboli metoda postupových dob

2.1 Metoda tendencí

Zakládá se na extrapolaci změn vodního stavu nebo průtoku v daném profilu na určitou dobu dopředu. Nejlepší podmínky pro její použití jsou na velkých rovinných řekách. Na menších tocích, u nichž celková doba trvání ustálené tendence stoupání nebo poklesu vodních stavů či průtoků nepřevyšuje pět dní, nemůže být tato metoda používána pro větší předstih, než je jeden den. Metoda extrapolace může být lineární i nelineární [1].

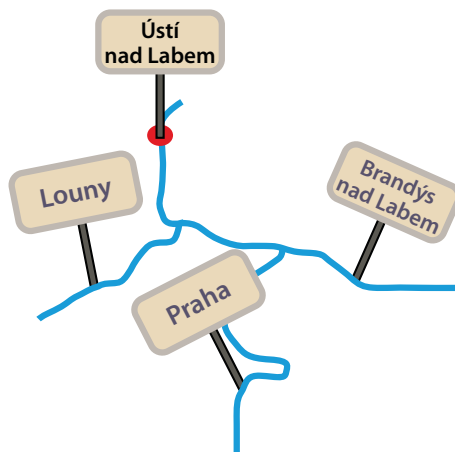
2.2 Metoda odpovídajících si průtoků

Princip této metody spočívá v možnosti přiřadit průtok z horní vodoměrné stanice sdružený, geneticky stejnorodý průtok ve stanici dolní. Přiřazené průtoky nazýváme *odpovídajícími si průtoky* a doba, která uplyne mezi jejich výskytem, se nazývá *postupovou dobou průtoků*. Z těchto termínů se také odvozuje název metody [1].

Metoda postupových dob se pravidelně používá k předpovědi průtoků na území České republiky již od roku 1892, kdy byla nejprve používána na Labi [19, 20]. Její použití je omezeno pouze na střední a větší toky. Časový předstih této předpovědi je omezen postupovou dobou na našich tocích, tj. do 24 h (dolní tok Labe).

Kromě omezení časového předstihu předpovědi je další nevýhodou této metody obtížné započtení tzv. *bočního přítoku* – objemu vody, který přitéká do řeky mezi horní a dolní vodoměrnou stanicí (ale také voda z výronu podzemních vod a při výskytu srážek i z povrchového odtoku z mezivodí) a také *neurčitá postupová doba a míra transformace povodňové vlny při velkých povodních*, kde dochází k rozsáhlým rozlivům. V takových situacích je spolehlivost metody odpovídajících si průtoků snížena.

Dotoková doba:	
Praha – Ústí nad Labem	19 h
Brandýs nad Labem – Ústí nad Labem	16 h
Louny – Ústí nad Labem	18 h



Obr. 2.1 Základem metody odpovídajících si průtoků je znalost dotokové doby v říční síti.

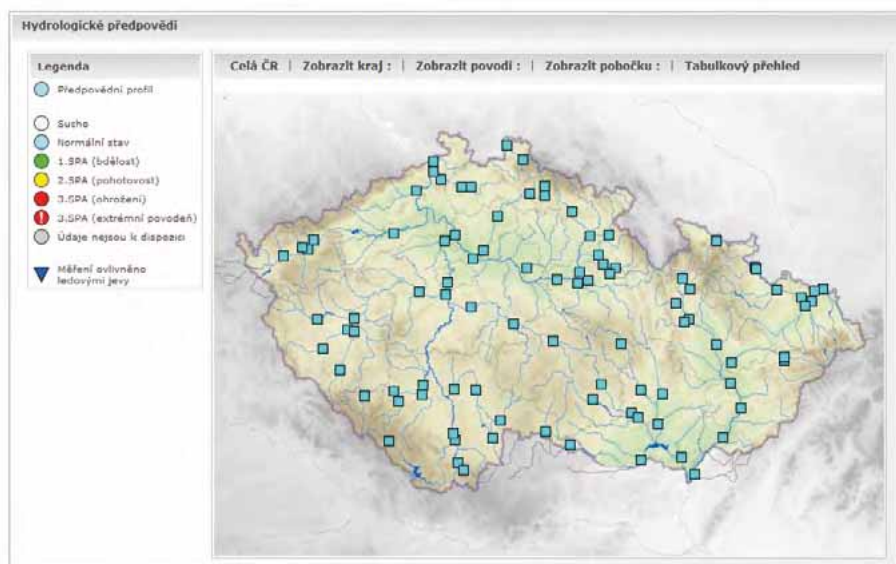
3. Modelové deterministické předpovědi

Modelové deterministické hydrologické předpovědi jsou nejdůležitějším výstupem předpovědních hydrologických pracovišť ČHMÚ. Za normální odtokové situace se počítají jednou denně a na stránkách hlásné a předpovědní povodňové služby (HPPS) jsou zveřejňovány nejpozději v 9:30. V případě nutnosti, při očekávaném výrazném vzestupu vodních hladin, či při povodňové situaci, je výpočet modelu prováděn několikrát denně a počítány jsou i různé možné varianty vývoje.

Předstih předpovědi dosahuje 48 hodin a v roce 2012 byly na portále ČHMÚ prezentovány modelové deterministické předpovědi pro celkem 88 hydrologických profilů (obr. 3.1).

Na území České republiky se v současné době využívají dva předpovědní systémy. V povodí Odry a Moravy je to předpovědní systém HYDROG-S, v povodí Labe a Vltavy se používá předpovědní systém AquaLog.

Oba hydrologické předpovědní systémy počítají, jak velká část srážkové vody z krajiny odečte bezprostředně po srážce a jak rychle se koncentruje do vodních toků. K tomu jsou použity matematické rovnice, které zjednodušeně popisují realitu procesů intenzity infiltrace do půdy, proudění vody po povrchu a v půdě a další hydrologické procesy (např. akumulace a tání sněhu, evapotranspirace, pohyb vody v korytech toků, vliv nádrží aj.).



Obr. 3.1 Mapa hydrologických profilů hlásné a předpovědní sítě ČHMÚ, pro které je počítána modelová hydrologická předpověď.

3.1 Postup zpracování modelové deterministické předpovědi

Výpočet modelových deterministických předpovědí trvá podle hydrologické odtokové situace od jedné hodiny (normální odtoková situace – období povodňového klidu) do cca dvou hodin (v období nástupu povodňové vlny a během povodní).

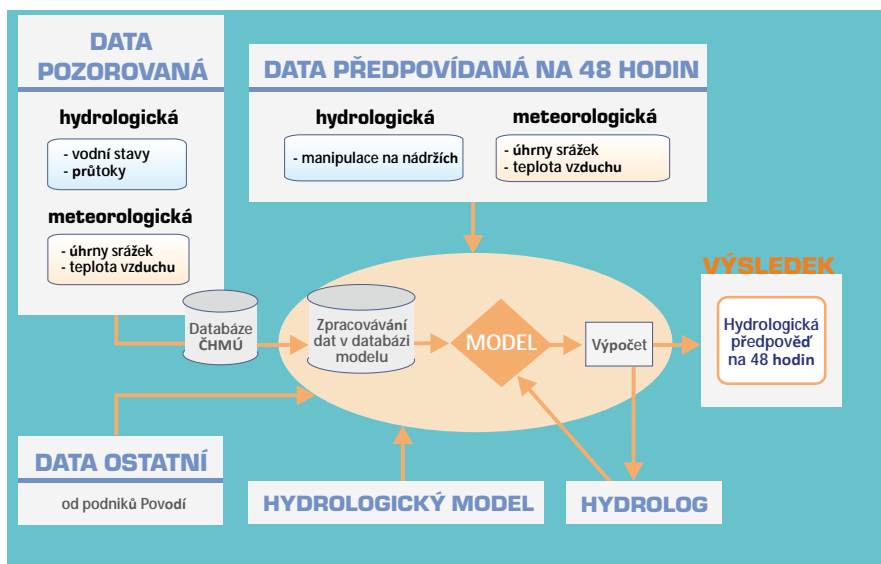
Celý proces tvorby modelových hydrologických předpovědí (obr. 3.2), od přípravy vstupních dat až po jejich distribuci, lze rozdělit do čtyř hlavních bodů:

1. Příprava a zpracování vstupních dat

Prvním a velmi důležitým krokem při výpočtu modelové předpovědi je příprava a zpracování vstupních dat. To je prováděno v interní databázi obou předpovědních systémů (u systému AquaLog se tato databáze nazývá AquaBase, u HYDROG-S to je databázová aplikace SOMDATA). Tyto databáze jsou napojeny na operativní datovou základnu ČHMÚ a zpracovávají potřebná data z různých zdrojů.

2. Kontrola a editace vstupních dat

Interní databáze umožňují kontrolu vstupních dat, jejich editaci a také vkládání hodnot předpovídaných prvků (srážky, teplota a předpokládané manipulace na nádržích). Obsluhující hydrolog při kontrole dat identifikuje chyby, nejčastěji vizuální kontrolou grafů průběhu jednotlivých veličin, opravuje a doplňuje chybějící data, obr. 3.3. Chyby v průtokových datech bývají často způsobeny poruchou měřících přístrojů nebo změnou průtočnosti koryta, která



Obr. 3.2 Schéma postupu zpracování hydrologické předpovědi u hydrologických systémů AquaLog a HYDROG-S.

komplikuje odhad průtoku (například v zimě zámrz řeky). U meteorologických vstupních dat chyby vznikají při automatickém měření srážek v důsledku ucpání srážkoměrů, namrzání apod. Hlavním zdrojem nejistoty hydrologických předpovědí jsou však nepřesné předpovědi srážek přebírané z meteorologických modelů. V praxi jsou většinou hodnoty udávané meteorologickými modely korigovány odbornými meteorology při zohlednění dalších meteorologických modelů a také podle vlastních znalostí regionu a zkušeností. Důležitým vstupem manuálně zadávaným do databáze jsou rovněž plánované manipulace na vodních nádržích, které hydrologům ČHMÚ předávají dispečinky státních podniků Povodí.

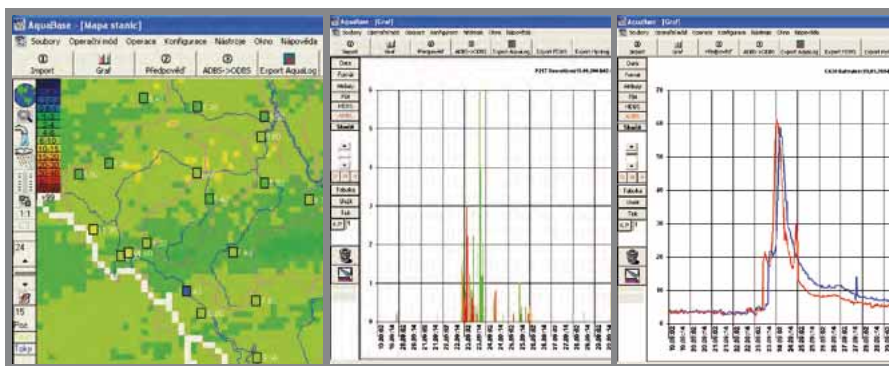
3. Výpočet modelové hydrologické předpovědi

Zkontrolovaná a opravená data vstupují do vlastního předpovědního systému, který při výpočtu postupuje stejně jako voda, tedy od povodí ležících v pramenné oblasti do dolních úseků řek. Výpočet probíhá interaktivně a hydrolog-prognostik na základě shody mezi výpočtem a realitou v minulém období upravuje nastavení modelu (úprava počátečních podmínek výpočtu jako je nasycenost povodí, množství sněhu, úprava vybraných parametrů modelu) nebo přímo edituje předpovědní hydrogram. Ani tak však nenastává dokonalá shoda mezi simulací modelem a realitou, a to kvůli nezbytnému zjednodušení popisu reality modelem, možná.

4. Kontrola a distribuce předpovědí uživatelům

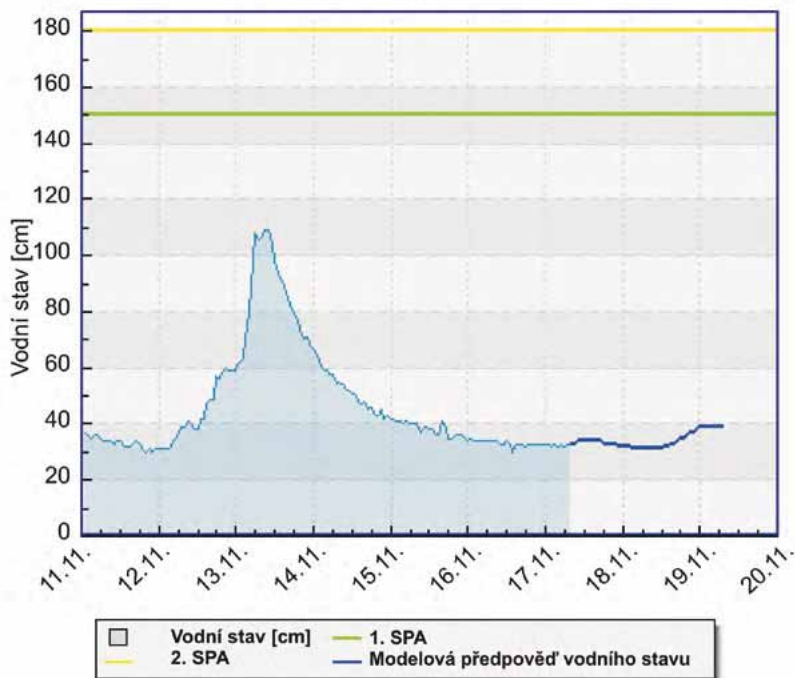
Posledním krokem v procesu tvorby hydrologické předpovědi je příprava a kontrola výstupů a jejich distribuce uživatelům. Kromě vlastních předpovědních hydrogramů (obr. 3.4) je vytvářena i textová verze předpovědi pro jednotlivá povodí, doplněná komentářem hydrologa o očekávaném vývoji hydrologické situace (obr. 3.5).

V době platnosti povodňové výstrahy jsou na jednotlivých regionálních pracovištích ČHMÚ vytvářeny také tzv. *Hydrologické Regionální Informační Zprávy – HRIZ*, které obsahují detailní popis aktuální hydrologické situace v daném regionu a hydrologickou předpověď s detailní specifikací zasažených povodí (jako je čas a velikost očekávané kulminace a tabulka dosažených stupňů povodňové aktivity. Na centrálním předpovědním pracovišti v Praze-



Obr. 3.3 Kontrola srážkoměrů s využitím radaru a kontrola průtoků srovnáním sousedních vodoměrných profilů.

Vodní stav Jablonec nad Jizerou (Jizera)



Obr. 3.4 Ukázka modelové hydrologické předpovědi publikované na internetových stránkách ČHMÚ.

SÁZAVA, JIZERA A DOLNÍ LABE

Aktuální hydrologická předpověď'
30.11.2012 11:00 SEČ

Aktuální hydrologická situace a předpokládaný vývoj na tocích v povodí Jizery, Sázavy a dolního Labe dnes odpoledne 30.11.2012 a zítra 01.12.2012
=====

Situace: Hladina horní Jizery vlivem včerejších srážek mírně stoupla (+35 cm Jablonec n.J.), ve večerních hodinách docházelo ke kulminaci a nyní již je na poklesu. Hladina Sázavy byla setvalá. Vřídenné denní průtoky se pohybují převážně v rozmezí 50 až 95 % dlouhodobého listopadového průměru, vyšší průtoky jsou v povodí horní Jizery (1,5 násobek % Qm).

Předpokládaný vývoj: Dnes během dne otekváme v horní části Jizery mírné poklesy hladiny, v dolní části Jizery ještě mírné vzestupy vlivem dotoku. Hladina Sázavy bude setrvávat na současných hodnotách.

== CHMÚ, CPP / Viznerová, A. ==

Obr. 3.5 Ukázka textové hydrologické předpovědi publikované na internetových stránkách ČHMÚ.

Komořanech jsou analogicky vytvářeny *Hydrologické Informační Zprávy – HIZ*, které podobně jako HRIZ podávají ucelené hydrologické informace a předpovědi pro celé území České republiky.

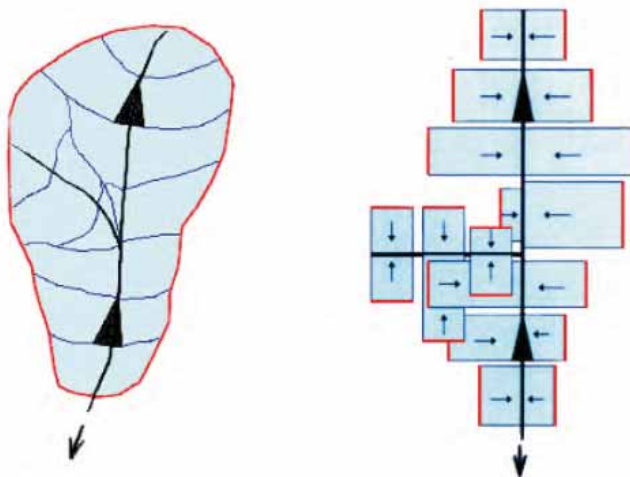
Předpovědi pro vybrané profily jsou poskytovány přímo dispečinkům státních podniků Povodí a pro ostatní uživatele jsou přístupny na internetových stránkách hlásné, předpovědní a povodňové služby ČHMÚ <<http://hydro.chmi.cz>>.

3.2 Předpovědní systém HYDROG-S

HYDROG-S je srážkoodtokový distributivní model určený k simulaci povodňových situací v povodí, vydávání operativních předpovědí průtoků v říční síti povodí a operativnímu řízení vodohospodářských děl. V ČHMÚ je používán pro výpočet předpovědí na regionálních předpovědních pracovištích v Ostravě a v Brně pro povodí Odry a Moravy.

Model používá schematizaci povodí, které je popsáno prostřednictvím grafů s vyznačením tzv. zavěšených ploch, hran a vrcholů [6], jejich pozice a funkce v grafu je dobře patrná ze schématu (obr. 3.6).

V grafu hrany představují koryta, vrcholy reprezentují uzly říční sítě nebo umístění vodohospodářských zařízení, plochy odpovídají jednotlivým dílčím povodím (mezipovodím), z nichž je odtok realizován do příslušného úseku koryta toku. Schématické plochy grafu zachovávají velikost plochy povodí a jsou jim přiřazeny i další parametry povodí (sklon, drsnost povrchu, délka povrchového odtoku a hydrologická vodivost), které jsou považovány za konstantní v dané ploše. Hodnota parametrů drsnosti a hydrologické vodivosti se mění v průběhu roku v závislosti na vývoji vegetace. HYDROG-S při srážkoodtokovém modelování respektuje počáteční ztrátu infilrací. Ostatní srážky pak tvoří plošný odtok, který je



Obr. 3.6 Princip schématické povodí modelem HYDROG-S.

transformován za použití jednotkového hydrogramu do koryta toku. Povrchový odtok z povodí se skládá z plošného odtoku ze zavěšených ploch a koncentrovaného odtoku v říční síti. Numericky je odtok řešen kinematickou vlnovou aproximací Saint-Venantových rovnic pro neustálené proudění. Podzemní (bazální) odtok je počítán koncepčním regresním modelem, který v povodí uvažuje jedinou podzemní nádrž. Velikost odtoku z této nádrže je v každém časovém kroku rozpočítána do dílčích povodí (ploch) na základě poměru jejich velikostí [6].

Pro simulaci chování vodních děl (nádrží) HYDROG-S využívá metodu Rungeho-Kutta IV. řádu.

Simulace tání sněhu je řešena kalibrovaným degree-day modelem (tání je dáno akumulací teploty a koeficientem intenzity tání v závislosti na ní).

Model HYDROG-S je koncipován tak, aby nevyžadoval kontinuální provoz a bylo ho možné spustit pouze v případě výskytu povodňové situace. Počáteční podmínkou výpočtu je proto znalost velikosti a rozdělení podzemního odtoku. Zároveň počáteční povrchový odtok vody na zavěšených plochách musí být roven nule. Počátek výpočtu tedy musí spadat do bezesrážkového období před vznikem povodně.

Při vlastním výpočtu se spouští algoritmus určený pro předpovědi průtoku vody ve vybraných profilech říční sítě. Model nejprve simuluje chování celého povodí (systému) v minulém období, jehož délka je závislá na situaci v povodí a nejbližším předchozím období. Simulace musí začínat v období ustáleného proudění a je ukončena v čase výpočtu předpovědi, kdy je znám průběh průtoků ve všech úsecích systému a stav hladin ve všech nádržích. HYDROG-S v tomto okamžiku provádí tzv. updating stavových proměnných v modelu dle aktuálního měření. Po updatování dojde ke spuštění výpočtu předpovědi průtoku (v budoucím období).

3.3 Předpovědní systém AquaLog

V povodí Labe je pro operativní předpovědi průtoků používán hydrologický předpovědní systém AquaLog, který byl do pravidelného provozu postupně uváděn mezi roky 1999 až 2001. Systém byl vyvinut pro ČHMÚ firmou AquaLogic a je inspirován předpovědním systémem NWSRFS (National Weather Service River Forecasting System) americké National Weather Service [2]. Operativně je AquaLog používán od roku 2001. Jednotlivá regionální předpovědní pracoviště ČHMÚ (v Plzni, Českých Budějovicích, Hradci Králové, Ústí nad Labem a Praze) provozují příslušné části modelu pro povodí v jejich správě. Vlastní systém AquaLog se skládá z dílčích modulů simulujících jednotlivé hydrologické procesy v povodí.

• Model sněhu

Pro simulaci akumulace a tání sněhové pokrývky je používán model SNOW-17. Model kombinuje oba hlavní přístupy k modelování sněhové pokrývky. Jednoduchá energetická bilance je používána v případě vypadávání kapalných srážek. V ostatních případech je používán přístup typu degree-day. Obě varianty vyžadují jako vstupy pouze teplotu vzduchu a množství srážek. Ostatní prvky energetických procesů jsou dopočítávány právě na základě

teploty, množství srážek a odvozených parametrů [2]. Modelované množství sněhu v povodí je aktualizováno podle pravidelného týdenního měření a vyhodnocování zásob vody ve sněhu.

• Srážkoodtokový model

Systém AquaLog používá srážkoodtokový model Sacramento (SAC-SMA). Sacramento patří mezi nejznámější a nejrozšířenější modely na světě. Jde o koncepčně fyzikální model založený na principech pohybu vody v povodí. Model operuje se soustavou vertikálně a horizontálně uspořádaných zón, resp. nádrží. Voda vstupující do systému v podobě srážek je v jednotlivých zónách buď zadržována, odčerpávána vegetací při evapotransporaci, infiltruje se do systému níže položených zón, anebo odtéká do říční sítě (obr. 3.7). Odtok tvoří šest různých složek:

- přímý odtok, tj. odtok z ploch, jež jsou dočasně nepropustné – po dosažení nasycenosti půdní zóny,
- odtok z trvale nepropustných ploch,
- povrchový odtok, míněn je odtok jako plošný jev,
- podpovrchový odtok, tj. odtok vytvořený přebytkem vody v mělkých půdních zónách spojených s vegetačním krytem,
- dodatkový podzemní odtok, tj. sezonní složka celkového podzemního odtoku; relativně proměnlivý, vytvářený z mělkých kolektorů podzemních vod (zóna mělkého proudění),
- primární podzemní odtok, vytvářený ze zásob s dlouhou dobou zdržení v povodí, tj. odtok především z hlouběji uložených kolektorů (zóna hlubokého proudění).

Úspěšnost modelu je závislá na kvalitě vstupních dat a na dobré kalibraci hodnot parametrů, které je možné v operativním provozu v případě nutnosti dále upravovat. Nasycenost povodí, neboli počáteční podmínky (naplnění jednotlivých zón modelu), jsou přenášeny mezi jednotlivými výpočty modelu. Protože skutečná nasycenost povodí se od modelovaného stavu může časem odchýlit, je obvykle potřeba v operativním provozu provádět interaktivní optimalizaci počátečních podmínek na základě srovnání modelovaných a pozorovaných průtoků [6].

• Model nádrží

Model pro operativní simulaci provozu nádrží MAN na tocích je hydrostatický model operující s přítokem, odtokem, výškou hladiny v nádrži a křivkou objemových charakteristik příslušné nádrže. Model může být dále rozšířen o definování odtokových objektů na vodních dílech. ČHMÚ v operativním provozu tento model nevyužívá a vkládá do předpovědního systému hodnoty naměřeného a předpokládaného odtoku z nádrží poskytované státním podnikem Povodí.

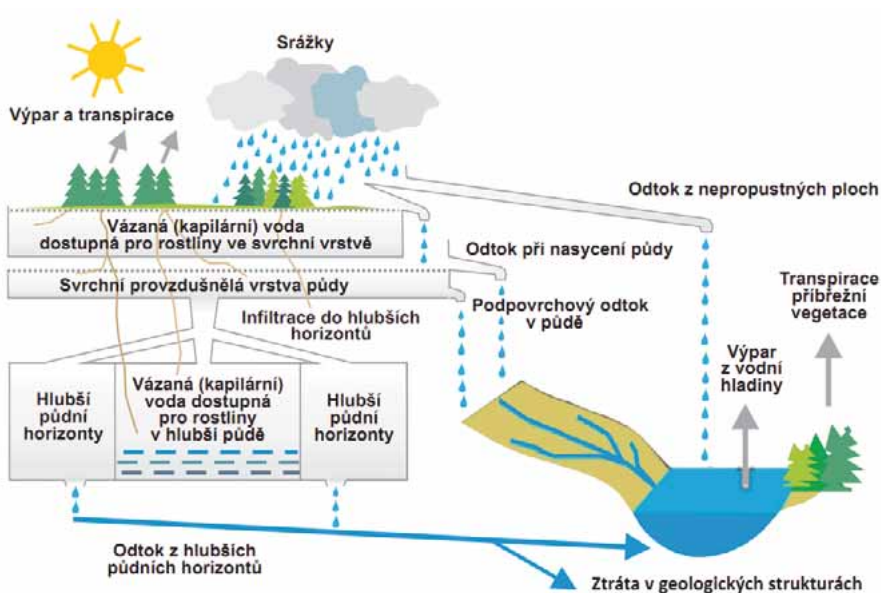
• Modely pohybu vody korytem toku

Simulace pohybu vody v korytě toku je v systému Aqualog řešena většinou modely TDR a Muskingum-Cunge, nebo ve vybraných úsecích 1D hydraulickým modelem FLDWAV.

Model TDR využívá translačně-difusní rovnici se třemi parametry (C – postupivost v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, K – podélná difuzivita v $\text{km}^2\cdot\text{hod}^{-1}$, D – délka říčního úseku v km). Tyto parametry je možné definovat pro několik intervalů velikosti průtoku. Lze tedy zjednodušeně postihnout efekt změny rychlosti postupu a postupové doby mezi jednotlivými profily právě v závislosti na velikosti průtoku. Přestože model je velmi jednoduchý, poskytuje dostatečně přesné výsledky pro situace, kdy voda proudí korytem toku nebo jeho bezprostředním okolím.

Model Muskingum-Cunge využívá linearizovanou kombinaci klasické rovnice kontinuity a zjednodušeného tvaru rovnice momentů. Tato kombinace umožňuje řešení, včetně transformace povodňové vlny, avšak není použitelná pro speciální jevy typu zpětného vzduť, či průlomových vln.

Model FLDWAV je standardním hydraulickým modelem nestacionárního proudění ve stromové říční síti, využívajícím implicitní schéma Preismana. Hydraulické modely jsou výrazně složitější a náročnější na konstrukci, než je tomu u modelů typu TDR. V případě velkých povodní, kdy dochází k značným rozlívům, však poskytují mnohem spolehlivější údaje o postupu a transformaci povodňové vlny.



Obr. 3.7 Struktura srážkoodtokového modelu Sacramento.

3.3.1 Interaktivní nástroje systému AquaLog

Hydrologické modely se u nás i ve světě provozují v poloautomatickém režimu, při kterém významnou roli hraje také osoba hydrologa prognostika. Ten, kromě kontroly vstupů, také modifikuje samotný výpočet a finální podobu deterministické předpovědi. V obou modelech AquaLog i HYDROG-S bylo pro tento účel vyvinuto několik nástrojů. V prostředí modelu AquaLog existují tři základní možnosti ovlivnění průběhu výpočtu a jeho výsledků: změna (optimalizace) počátečních podmínek výpočtu, změna parametrů modelu a interaktivní updating předpovědi.

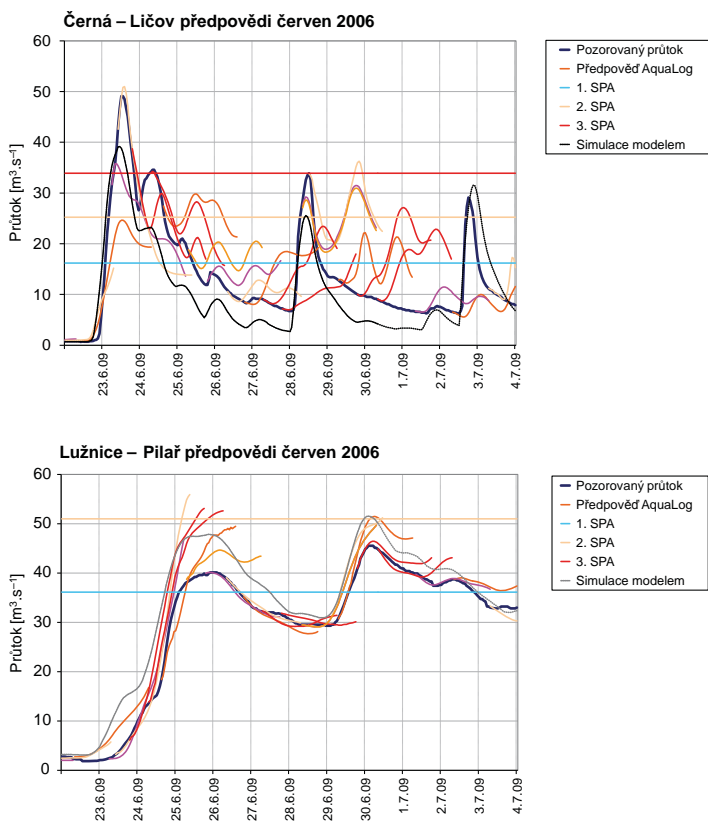
- Optimalizace počátečních podmínek je založena na předpokladu, že předchozí výpočet není zcela přesný. Jeho výsledky jsou však použity jako počáteční podmínky pro následující výpočet modelu. Výpočet modelu je prováděn pro 10denní období (osm dní před okamžikem výpočtu a dva dny vlastní předpovědi). Optimalizační proces spočívá v iteračním pokusu o změnu počátečních podmínek nasycení půdy (v jistých nastavených mezích) tak, aby simulovaná průtoková řada co nejlépe odpovídala řadě pozorované v posledních dnech.
- Modul MODS umožňuje manuální změnu některých počátečních podmínek (nasycení jednotlivých zón, množství sněhu) a vybraných parametrů (např. velikost faktoru tání sněhu) modelu hydrologem. Změny jsou prováděny na základě vyhodnocení aktuální situace, když hydrolog usoudí, že modelem předpokládané počáteční podmínky nejsou v souladu s reálnou situací v povodí, nebo že je nezbytné učinit dočasnou změnu parametrů modelu, protože se situace odlišuje od „typického“ stavu či průběhu hydrologických procesů, na něž je model nakalibrován.
- Modul Update slouží k řešení problematiky updatingu. Udatováním se rozumí úprava předpovědi takovým způsobem, aby plynule navazovala na poslední naměřenou hodnotu. Úprava je nezbytná zejména z pohledu plynulého průběhu průtoku v níže ležících profilech. Updating je většinou prováděn prostým vertikálním posunem celé předpovídané řady. V některých specifických případech však prostý vertikální posun hydrogramu může být zavádějící a hydrolog má proto možnost editovat celý průběh předpovědního hydrogramu.

3.4. Jak odhadnout nejistotu deterministické předpovědi

Jednou z výhod deterministických předpovědí z modelů AquaLog a HYDROG-S je jejich čitelnost. To znamená, že je možné lehce zjistit například očekávanou kulminaci, její čas a rychlost nástupu povodně. Skutečný průběh průtoku se ovšem od předpovědi vždy více nebo méně liší a v tom leží i jejich nevýhoda. A právě informace o tom, jak se skutečnost od předpovědi může lišit, zde chybí. Tuto skutečnost by měly řešit pravděpodobnostní předpovědi (viz kapitola 4), ale i při jejich absenci je možné subjektivně odhadnout celkovou nejistotu deterministické předpovědi. Faktory ovlivňující spolehlivost předpovědi jsou následující:

• Doběhová doba povodí

Delší doběhovou dobu (čas, za který se voda dostane z pramenné oblasti k závěrovému profilu) mají velká povodí, např. Labe po Ústí nad Labem, nebo povodí s pomalým odtokem (rovinatá povodí, např. Cidlina, Lužnice). Pomalý odtok způsobuje, že předpověď na 48 hodin vychází převážně z již naměřených srážek a vliv nejistoty srážkové předpovědi se zmenšuje. Proto **povodí s delší doběhovou dobou mají většinou lepší úspěšnost předpovědi**. Toto pravidlo nemusí platit, pokud se povedeň formuje v dolní části povodí blízko předpovědní stanice. Doběhovou dobu řádově v jednotkách hodin mají malá povodí (plocha do 300 km²) nebo středně velká horská povodí (plocha do 800 km²) s rychlým odtokem. U předpovědních profilů, které uzavírají tato malá povodí, ovlivňuje kvantitativní předpověď srážek zásadním způsobem téměř celý předpovědní interval.



Obr. 3.8 Hydrologické předpovědi z června 2009 na dvou fyzickogeograficky odlišných povodích, které spolu sousedí a byly během povodně zasaženy stejnou srážkovou situací. Povodí Černé po Ličov – plocha 127 km², obvyklé doběhové doby 3 až 8 hodin. Povodí Lužnice po Pilař – plocha 942 km², obvyklé doběhové doby 20 až 50 hodin. Patrná je větší úspěšnost předpovědi v povodí Lužnice proti odtokově rychle reagující Černé po stanici Ličov.

- **Předstih předpovědi**

S prodlužujícím se předstihem hydrologické předpovědi klesá úspěšnost předpovědi srážek. Tato ověřená skutečnost se promítá také do spolehlivosti hydrologických předpovědí, zejména u zdrojových povodí. V mnohem menší míře u povodí, která nejsou tak závislá na kvantitativní předpovědi srážek (zmíněná velká a odtokově pomalá povodí). U plošně malých povodí je pokles úspěšnosti předpovědi s prodlužujícím se předstihem podstatně výraznější.

- **Odtok z tání sněhové pokrývky**

Předpovídání povodní, které jsou z větší části způsobeny odtáváním sněhových zásob, má specifika, která ovlivňují úspěšnost předpovědí. Nespornou výhodou je, že teplotu vzduchu, což je hybný faktor odtávání sněhu, meteorologické modely předpovídají úspěšněji i na delší předstih než 48 hodin. **Proto u těchto hydrologických předpovědí odtoku z tání sněhu nedochází k rychlému poklesu úspěšnosti předpovědi s jejím předstihem.** Na druhé straně je samotný proces tání sněhu komplikovaný, a tak pro modelování musí být značně zjednodušen. Navíc je nejistý odhad sněhových zásob a vliv radiace, větru a vlhkosti vzduchu. Velké povodně z tání jsou také spojeny s deštěm v době oblevy, který je těžko předpověditelný a výrazně ovlivňuje rychlost tání sněhu. To jsou důvody, proč **modelování tání sněhu a následně odtoku je více nejisté než modelování odtoku srážkové vody.**

- **Počáteční stav povodí**

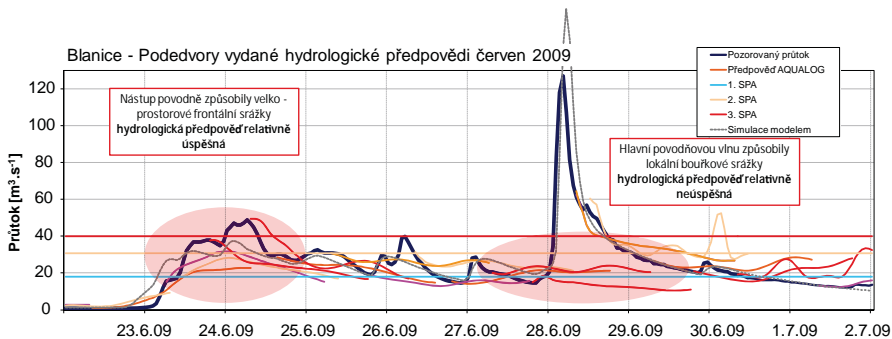
Stanovení optimálních počátečních podmínek (nasyčenosti) povodí v hydrologickém modelu je klíčovým úkolem hydrologa. V modelu AquaLog je základním nastavením nasycenosti výstup z předchozího výpočtu, u modelu HYDROG-S je nasycenost stanovena podle základního odtoku. V obou případech je ale často nutné tyto podmínky různými metodami korigovat (optimalizovat) a tato korekce je mnohem úspěšnější, pokud v nedávné době před výpočtem předpovědi došlo již k jedné nebo více významnějším odtokovým epizodám a nastavení modelu je možné ověřit na již proběhlé průtokové vlně. **Proto na konci delšího bezsrážkového období by úspěšnost předpovědi měla být nižší než v průběhu srážkového období.**

- **Antropogenní ovlivnění odtokového režimu**

Přestože mnohé zásahy do odtokového režimu se provádějí za účelem ochrany před povodněmi, pro modelování hydrologických procesů představují většinou komplikace. **Leptších výsledků dosahují hydrologické předpovědní modely zpravidla na povodích, kde chybí významná vodní díla a rozsáhlé rybníční soustavy.** V povodí, kde leží velké vodní nádrže, jsou předpovědi zpracovány na základě hlášených manipulací, které jsou však často následně upraveny právě na základě již vydané předpovědi. Navíc řízení důležitých vodohospodářských objektů podléhá z velké části lidskému faktoru, a proto ho lze velmi těžko predikovat.

- **Trend předpovědi**

Také tento faktor souvisí z velké části s předpovědi srážek jako hlavním zdrojem nejistoty. **Vyšší úspěšnosti je dosahováno u předpovědi v bezsrážkovém období, tedy při setrvalém vodním stavu, nebo při poklesu hladin.** Předpověď nástupu povodně je obtížná také z hlediska hydrologického modelování, při kterém často dochází k časovému (fázovému)



Obr. 3.9 Povodňově aktivní období z konce června roku 2009 začalo situací, kdy vzestupy způsobily plošné frontální srážky, které meteorologické modely předpověděly poměrně úspěšně. Následovaly dny se silnou konvekcí, kdy sice bylo zřejmé riziko výskytu vydatných lokálních bouřek, ale nebylo možné je přesněji časově a prostorově lokalizovat. Z tohoto důvodu také kritická bouřková srážka z 28. června v povodí horní Blanice nebyla uspokojivě předpovězena a následně i hydrologická předpověď nebyla úspěšná.

posunu vzestupné větve a velké odchylce předpovědi při nástupu povodně. Disproporce na vzestupné větvi povodně ovšem nemusí vždy znamenat, že maximální průtok nebude předpovězen úspěšně.

• Charakter předpovídaných srážek

Srážky velkoprostorového charakteru jsou vyvolávány procesy, které meteorologické modely predikují úspěšněji, než je tomu u bouřkových srážek. Hydrologický model byl navržen a kalibrován právě pro odtoky z velkoprostorových srážek. Bouřkové (konveční) srážky jsou velmi špatně předpověditelné z hlediska jejich množství i prostorové lokalizace. Předpovědi srážek vstupující do modelu při těchto situacích jsou většinou průměrem pro rozsáhlejší oblast. Ve skutečnosti pak většinou prší mnohem silněji na omezené ploše, na zbytku území je předpověď srážek naopak nadhodnocená. Tomu odpovídají také hydrologické předpovědi, které **při bouřkových situacích na většině malých povodí průtok nadhodnocují, ale v místech s výskytem silných bouřek mohou být naopak značně podhodnocené**. Obecně platí, že hydrologické modely, jejichž výstupy jsou zde komentovány, nejsou zcela vhodné pro předpověď lokálních povodní z přivalových srážek.

• Extremita odtoku

Obecně platí, že extrémní jevy se předpovídají hůře, než jevy průměrné, tedy velké povodně budou zatíženy větší nejistotou než ty menší. Jednou z příčin je obtížnější odhad pozorovaného průtoku v oblasti vysokých stavů a také mnohem komplikovanější proces postupu a transformace povodňové vlny korytem toku. Při vybřežování řek a zejména při rozsáhlých rozlivech je v současné době používaná metoda výpočtu nedostačující a bylo by potřeba počítat postup povodně pomocí hydraulických modelů, které ale v současnosti nejsou součástí hydrologického předpovědního systému. Proto u řek, kde dochází při povodních k rozlívům, je nutné počítat s větší nejistotou předpovědi.

4. Pravděpodobnostní hydrologické předpovědi

4.1 Proč používat pravděpodobnostní předpovědi

Nejistota budoucího vývoje počasí a průtoků ve vodních tocích a jejich potenciální dopad na lidské aktivity je důvodem pro tvorbu hydrologických předpovědí. Předpověď ovšem tuto nejistotu neodstraňuje, pouze se jí pokouší nějakým způsobem vyjádřit. Přirozené lidské chápání přírodních procesů, jako řetězce příčin a následků, vedlo nejdříve k rozvoji deterministických předpovědí, jejichž výstupem je jeden scénář budoucího vývoje. Mohlo by se zdát, že s rozvojem našich znalostí a prostředků, které vedou postupně ke zvyšování spolehlivosti deterministických předpovědí, bude vliv předpovědní nejistoty postupně redukován a že není důvod pro zavádění jiné formy predikce. Uživatelé však vyžadují podrobnější časové a prostorové rozlišení předpovědi, prodloužení jejího časového předstihu aj., což není možné bez nárůstu nejistoty u takových předpovědí (předpověď průtoku pro Labe na 6 hodin je téměř jistá, předpověď pro horní Litavku na 3 dny je naopak velmi nejistá).

Pravděpodobnostní předpovědi ve své podstatě nahrazují konkrétní údaje o očekávaném budoucím vývoji pravděpodobnostní funkcí, ze které je například možné určit riziko překročení určitého povodňového stupně. V případě meteorologické předpovědi, se kterou jsme denně konfrontováni, si lidé již zvykli na určitý subjektivní odhad nejistoty předpovědi (např. že předpovědi na pátý předpovědní den jsou méně spolehlivé než předpovědi na druhý den). U hydrologických předpovědí, které jsou atraktivní pouze v době hrozičích povodní, tato zkušenost často i u odborníků chybí.

Špatná interpretace předpovědí může vést k celé řadě chybných rozhodnutí. V případě řízení protipovodňové ochrany jde o rozhodnutí, která mají značné hospodářské důsledky. Po povodni pak analýza škod a jejich vzniku může vést až k udání nepřesné předpovědi jako jejich příčiny. To je však zavádějící. Zodpovědnost za rozhodování je kompetencí lidí, kteří organizují ochranná opatření (povodňové orgány). Použití deterministické předpovědi bez zohlednění rizika jejího nenaplnění je snaha o přenesení rozhodovací zodpovědnosti na předpovědní službu, která však pouze dodává podklad bez možnosti hodnotit jeho dopady na rozhodovací proces. Jinými slovy, pouhá deterministická předpověď není dostatečná informace pro rozhodování bez znalosti potenciálních konsekvencí a škod, či nákladů na ochranná opatření. Pravděpodobnostní hydrologické předpovědi pomáhají odhadnout riziko odlišného budoucího vývoje od deterministické předpovědi, a tím usnadňují správnou interpretaci předpovědi.

Dalším důvodem pro zavedení pravděpodobnostních předpovědí je zvyšující se ekonomická hodnota předpovědí. Výstupy meteorologických a hydrologických předpovědních služeb se v moderní společnosti více promítají do rozhodovacích procesů socioekonomické sféry a mají svou vyčíslitelnou peněžní hodnotu, která není zanedbatelná. Kvantifikace rizika vývoje odchýleného od deterministické varianty má proto pro mnohá odvětví stále větší význam.

Výhody spojené se zavedením pravděpodobnostních předpovědí shrnuje [8] do čtyř bodů:

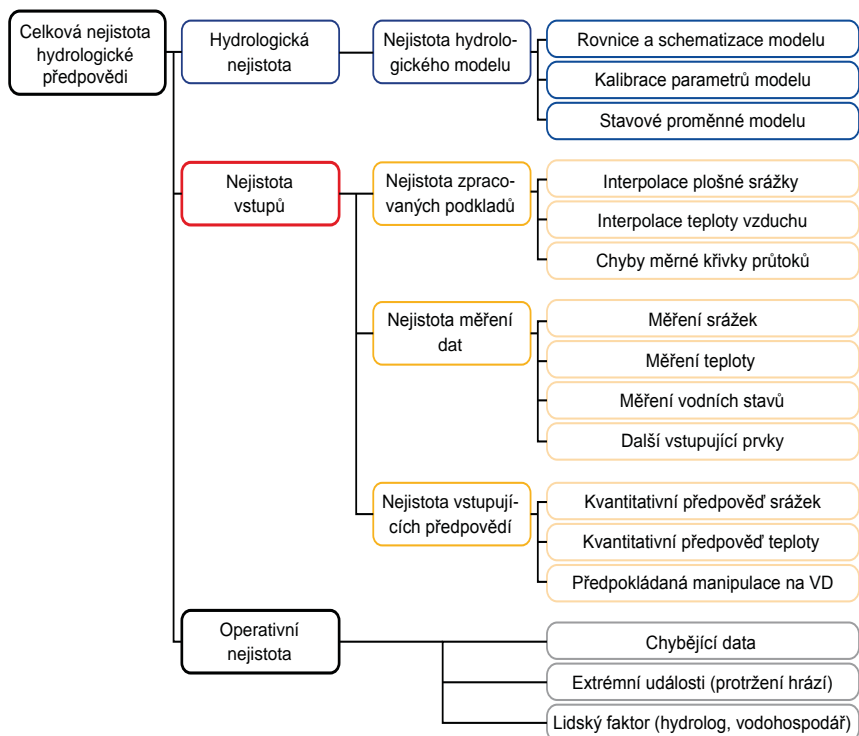
1. Praviděpodobnostní předpovědi jsou z vědeckého hlediska korektnější než deterministické, protože neskrývají nejistotu předpovědi.
2. Umožňují protipovodňové ochraně stanovit riziková kritéria pro povodňové stupně a hydrologům dovolují kvantifikovat nejistotu předpovědi.
3. Poskytují informace pro racionální rozhodnutí – provádět pouze taková opatření, jejichž náklady odpovídají míře rizika.
4. Přinášejí společnosti hospodářský profit plynoucí z efektivnější protipovodňové ochrany.

Vývoj pravděpodobnostních předpovědí a jejich zavedení mezi produkty prognózních služeb je velkým tématem operativní hydrologie v posledních letech. Je to nelehký úkol nejen pro vědce a pro prognózní službu, ale i pro samotné uživatele předpovědí. Nahradiť bodový odhad průtoku pravděpodobnostní funkcí vyžaduje ze strany uživatelů základní znalosti statistické teorie a především schopnost tuto předpověď interpretovat a následně využít. Pouhá znalost průtoku nebo vodního stavu, při kterém vznikají povodňové škody, nestačí. Je potřeba mít povědomí o možném rozsahu škod, nákladech spojených s ochrannými opatřeními a tyto informace vážit s rizikem jejich vzniku. Praviděpodobnostní hydrologické předpovědi jsou proto zacíleny především na odborníky vodohospodáře a lidi zapojené do řízení protipovodňové ochrany.

4.2 Nejistota hydrologické předpovědi

Praviděpodobnostní předpovědi vznikají metodami exaktního matematického vyjádření nejistoty předpovědi. Těchto metod může být celá řada a všechny jsou založeny na teorii pravděpodobnosti. Na základě této teorie je pro určitý zdroj nejistoty zkonstruována křivka hustoty pravděpodobnosti výskytu jevu. Z křivky jsou vybrány varianty, které dále vstupují do procesu tvorby hydrologické předpovědi, na jehož konci je stejný počet variant průtokových řad (tzv. ansámbl (ensemble)). Rozložení a rozptýl členů předpovědního ansámblu reprezentuje nejistotu hydrologické předpovědi, respektive alespoň její části.

Zdrojů nejistoty v hydrologickém modelování je velké množství. Jejich genetické členění včetně podrobného popisu jednotlivých prvků uvádí např. [6], viz obr. 4.1. Úplné kvantitativní vystižení celkové nejistoty není možné. Proto se většina prací, zabývajících se touto problematikou, omezuje pouze na jednotlivé zdroje nejistoty nebo na výběr několika nejvýznamnějších faktorů. Vyhodnocením úspěšnosti hydrologických předpovědí, bylo v mnoha studiích potvrzeno, že největším zdrojem nejistoty je kvantitativní předpověď srážek (QPF). V podmínkách ČR toto platí ještě výrazněji, protože většina předpovědních profilů uzavírá povodí, které leží v pramenných oblastech. Při zachování předstihu předpovědi 48 hodin pochází většina objemu odtoku v tomto časovém horizontu ze srážek, které v době výpočtu předpovědi nebyly změřeny a musí být obsaženy v meteorologické předpovědi (QPF), [11]. Z těchto důvodů je při tvorbě pravděpodobnostní hydrologické předpovědi nejčastěji uvažována pouze nejistota QPF. Existují sice metody na určení nejistoty parametrů modelu nebo jeho počátečních podmínek (nasyčenosti povodí na počátku výpočtu), ale v současné době se v operativní hydrologii prakticky nepoužívají.



Obr. 4.1 Genetické členění zdrojů celkové nejistoty hydrologické předpovědi.

4.3 Metody určení nejistoty kvantitativní předpovědi srážek

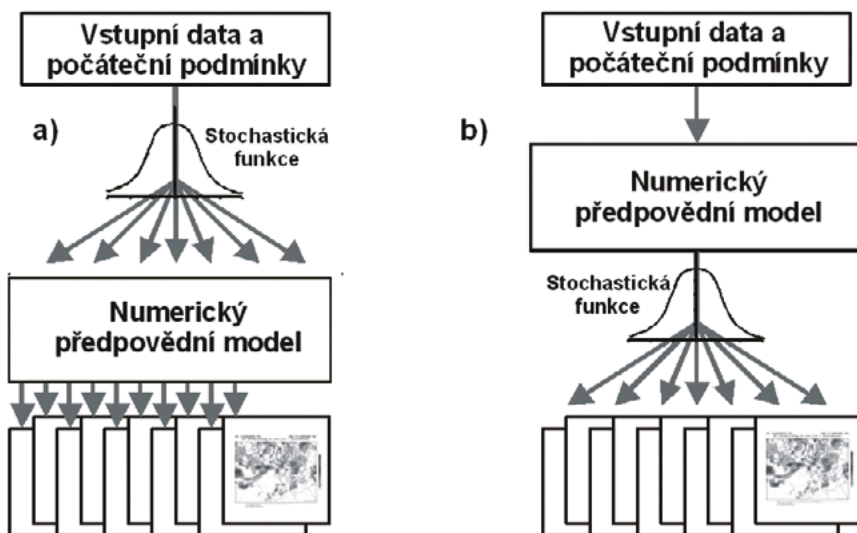
Problematika pravděpodobnostních hydrologických předpovědí na základě pravděpodobnostních nebo statisticky zpracovaných vstupů QPF je velmi často diskutována v pracích Krzystofowitcze [5, 8, 9, 10] a dalších. O důležitosti QPF pro operativní hydrologické modelování svědčí řada studií a prací, problematice byla dokonce věnována speciální čísla Journal of Hydrology [5, 18] a věnuje se jí například projekt HEPEX (Hydrological Ensemble Prediction Experiment <www.hepex.org>).

Obecně existuje několik různých přístupů k problematice využití QPF. Tyto přístupy lze v zásadě rozdělit do tří skupin:

- využití ansámblových srážkových předpovědí meteorologických modelů,
- statistický postprocessing předpovědi srážek (dodatečné zpracování výstupů numerických modelů),
- využití historických meteorologických analogů.

Výběr přístupu je závislý na účelu a požadovaném předstihu předpovědi. Rozdílné řešení vyžaduje malé povodí (stovky km²), kde je cílem předpověď povodní s předstihem 1 až 2 dny, a jiný přístup bude zvolen pro povodí o velikosti okolo 100 000 km², s cílem předpovídat pro účely dlouhodobého hospodaření s vodou.

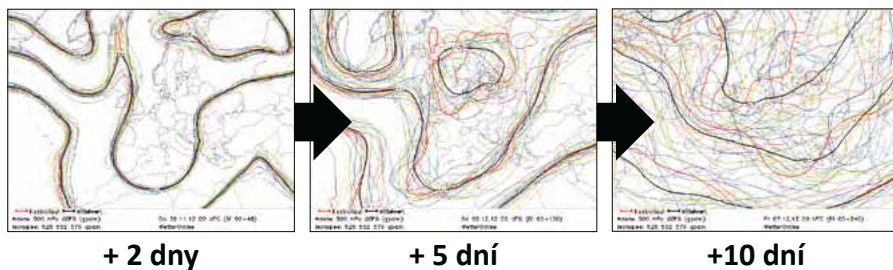
Každý z uvedených přístupů také vyjadřuje poněkud odlišnou nejistotu. Příklad je na obr. 4.2, kde jsou porovnány metody použití ansámblových předpovědí meteorologického modelu (a) a postprocessing výstupů modelu (b). Při tvorbě ansámbků meteorologickým modelem (NWP) je nejistota řešena na úrovni vstupů modelu, kdy jsou generovány odlišné počáteční podmínky pro výpočet modelu a na jejich základě dochází k variantním realizacím modelu. V případě postprocessingu je nejistota řešena až při interpretaci vlastního deterministického výstupu modelu, kdy na základě vyhodnocení dřívějších realizací modelu a jejich odlišnosti od skutečného vývoje jsou generovány variantní výstupy zohledňující



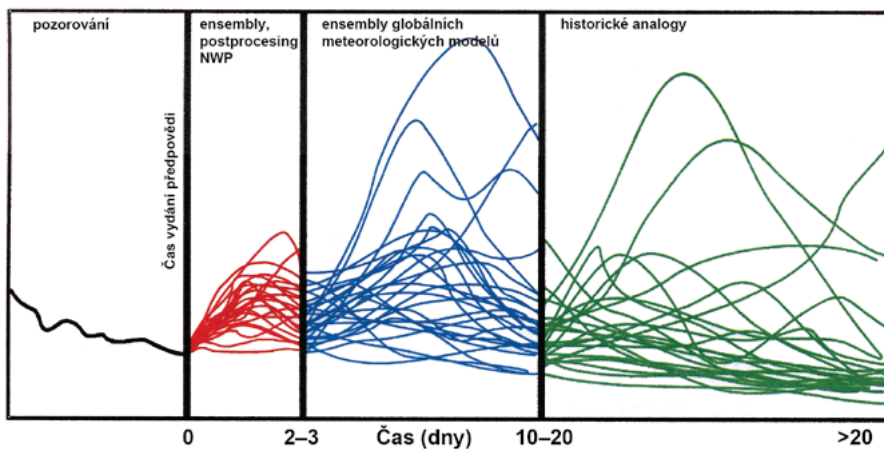
Obr. 4.2 Principy tvorby variantních meteorologických předpovědí pro vstup do hydrologického modelu.

dřívější úspěšnost modelu. V prvním případě tedy výstupy reprezentují nejistotu danou nepřesným odhadem počátečního stavu atmosféry, zatímco v druhém případě je vyjádřena nejistota celého meteorologického předpovědního procesu, včetně nejistoty vlastního meteorologického modelu.

Za ideální postup tvorby pravděpodobnostní hydrologické předpovědi lze považovat kombinaci různých přístupů a využití jejich předností a možností. Pro předpověď na období následujících jednoho až tří dnů, tedy na dobu, která je předpovídána lokálními meteorologickými modely, je nejvhodnější využít přímo variantních výstupů (ansámbků), pokud jsou vytvářeny, nebo postprocessingu deterministické předpovědi těchto podrobných meteorologických modelů.



Obr. 4.3 Předpovědní ansámbly meteorologického modelu GFS pro výšku tlakové hladiny 500 hPa a různé předstihy předpovědi. Shoda členů předpovědního ansámblu v krátkém časovém předstihu předpovědi se postupně mění ve značný rozptyl variant.



Obr. 4.4 Kombinace různých přístupů tvorby pravděpodobnostních předpovědí v závislosti na předstihu předpovědi.

V delším výhledu, cca do 15 dnů, kam lokální modely již nezasahují, je nejnvhodnější možností využití ansámblů globálních meteorologických modelů. Jejich podrobnost a přesnost je pochopitelně menší (často vyžadují korekci předpovídaného množství srážek na základě vyhodnocení historických odchylek jejich předpovědí), přesto většinou dobře definují pravděpodobný ráz počasí a jeho změny v předpovědním období.

S prodlužujícím se časovým předstihem klesá informační hodnota předpovědních ansámblů z NWP. Jejich rozptyl je tak velký, že se blíží klimatickým charakteristikám, které jsou lépe zjištělné z historických pozorování (viz obr. 4.3). Proto se pro střednědobé hydrologické předpovědi používají spíše historické analogy, které na základě klimatických charakteristik popisují možný rozptyl vývoje meteorologických podmínek v daném období roku (obr. 4.4).

4.4 Krátkodobé pravděpodobnostní hydrologické předpovědi

4.4.1 Využití ansámblových výstupů ze stochastického běhu meteorologických modelů

Některé meteorologické modely produkují pravděpodobnostní předpovědi ve formě ansámblu – variantních výstupů. Příkladem takového modelu je model ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast). Každý člen ansámblů představuje jednu realizaci modelu, které se vzájemně odlišují nepatrně rozdílnými počátečními podmínkami. Počáteční stav atmosféry pochází z interpolace hodnot tlaku, vlhkosti, teploty aj. mezi body, v nichž dochází k jejich měření (sondážní balonová měření vertikálního profilu atmosféry). Rozdíly v odhadu stavu atmosféry vedou v průběhu výpočtu často k naprosto odlišným výsledkům.

Pravděpodobnostní meteorologické předpovědi, které vznikají uvedeným způsobem, jsou doménou zejména globálních NWP (Numerical Weather Prediction). Jejich výstupy přebírají a zpřesňují některé regionální NWP s jemnějším prostorovým rozlišením (tzv. downscaling). Příkladem je systém COSMO-LEPS (Limited Area Ensemble Prediction) <<http://www.cosmo-model.org>>, používaný v několika evropských předpovědních službách. Lokální NWP však z důvodu časové náročnosti ansámblového výpočtu a současně nutnosti brzkého poskytnutí výsledků mají většinou relativně malý počet členů ansámblu.

Hydrologická předpovědní služba ČHMÚ předběžně testuje výpočet krátkodobé hydrologické pravděpodobnostní předpovědi. K tomuto účelu se využívají ansámblы předpovědního systému ALADIN-LAEF (Limited Area Ensemble Forecasting) <<http://www.rclace.eu>>. ALADIN-LAEF produkuje 16členný předpovědní ansámbl s horizontálním prostorovým rozlišením 18 × 18 km a maximálním časovým předstihem +60 hodin. Hydrologickým výstupem bude proto 16 variant průběhu průtoku v předpovědních profilech, který bude dále zpracován do srozumitelnějších grafických výstupů.

Příkladem již několik let fungujícího praktického využití pravděpodobnostních předpovědí v hydrologickém modelu je systém EFAS (European Flood Alert System) <<http://efas-is.jrc.ec.europa.eu/>> vyvíjený v Evropském výzkumném centru JRC (Join Research Center) v Ispře v Itálii. EFAS byl projektován se záměrem pokrýt hydrologickým modelem většinu evropských povodí s využitím ansámblových předpovědí evropského ECMWF pro simulaci s předstihem 10 dnů a COSMO-LEPS pro předstih 5 dnů. Předpovědi EFAS jsou vydávány dvakrát denně pouze pro větší toky uzavírající povodí s plochou v řádu tisíců km², ale nejsou určeny pro předpověď rizika dosažení konkrétních vodních stavů v určitých úsecích řek. Zamýšleným účelem bylo vytvořit systém včasné výstrahy o potenciálním nebezpečí výskytu povodně v delším předpovědním období pro aktivizaci národní hydrologické služby a orgánů civilní ochrany ohrožených států. Operativní výstupy EFAS jsou přes webové rozhraní přístupné také prognózní službě ČHMÚ a HZS ČR.

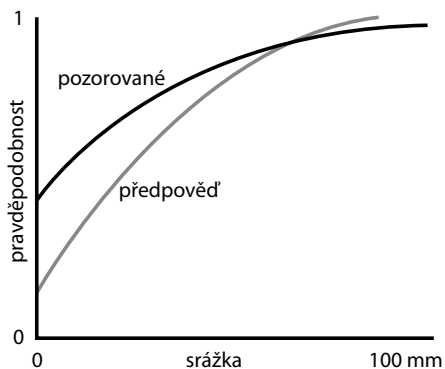
4.4.2 Využití ansámblových výstupů složených z různých meteorologických modelů

Pravděpodobnostní předpověď srážek a teploty vzduchu lze získat také kombinací výstupů deterministických běhů různých NWP, které se překrývají v zájmové oblasti. Tento přístup využívá skutečnosti, že v Evropě každá země provozuje jeden nebo i více NWP, které pokrývají zpravidla mnohem větší území než to, pro které je určena předpověď počasí. V současné době jsou tímto způsobem výstupy z NWP zúčastněných zemí shromažďovány a kombinovány Německou meteorologickou službou (DWD). Jednotlivé země však neuvolňují pro ostatní výsledky svých modelů v digitální podobě, což je pro provedení operativního hydrologického výpočtu nezbytné. Výsledné stochastické předpovědi srážek a teploty jsou k dispozici pouze v grafické podobě ve formě pravděpodobnostních map.

4.4.3 Statistický postprocessing předpovědi srážek

Předpovědní ansámby z NWP jsou pro mnohé meteorologické služby menších států, jako je ČR, obtížně přístupné, protože na jejich výpočet nemají počítačovou kapacitu. Existující pravděpodobnostní modely NWP, které se počítají například ve Francii, Německu nebo Velké Británii, také nejsou schopné produkovat předpovědi s podrobným prostorovým rozlišením jako národní NWP. Proto pro malá a horská povodí je možné lepší výsledky dosáhnout metodou získání pravděpodobnostních srážkových vstupů postprocessingem deterministických QPF (Quantitative Precipitation Forecasts) předpovědí (viz obr. 4.2b).

Základním principem při statistickém postprocessingu QPF je vyhodnocení úspěšnosti historických QPF za účelem získání pravděpodobnostního rozložení chyby předpovědi. Vyhodnocení předpovědi srážek je komplikováno nespojitým charakterem výskytu srážek. Proto se musí skládat ze dvou kroků. Prvním z nich je vyhodnocení úspěšnosti předpovědi výskytu samotných srážek, druhým pak vyhodnocení úspěšnosti předpovědi množství vyskytnuvších se srážek. Meteorologické modely mají obecně tendenci nadhodnocovat četnost výskytu malých srážek a malé srážkové úhrny, a naopak většinou podhodnocují srážkové extrémy. Porovnání typických pravděpodobnostních funkcí výskytu velikosti pozorované a předpovídané srážky vypadá jako na obr. 4.5.



V ČHMÚ byla testována metoda založená na vyhodnocení podmíněné pravděpodobnosti velikosti skutečné srážky, kdy jako podmínka se uvažuje srážková předpověď [7], a metoda využívající stochastického generátoru náhodného pole srážek metodou Monte Carlo při stanoveném intervalu předpovědi srážek [3].

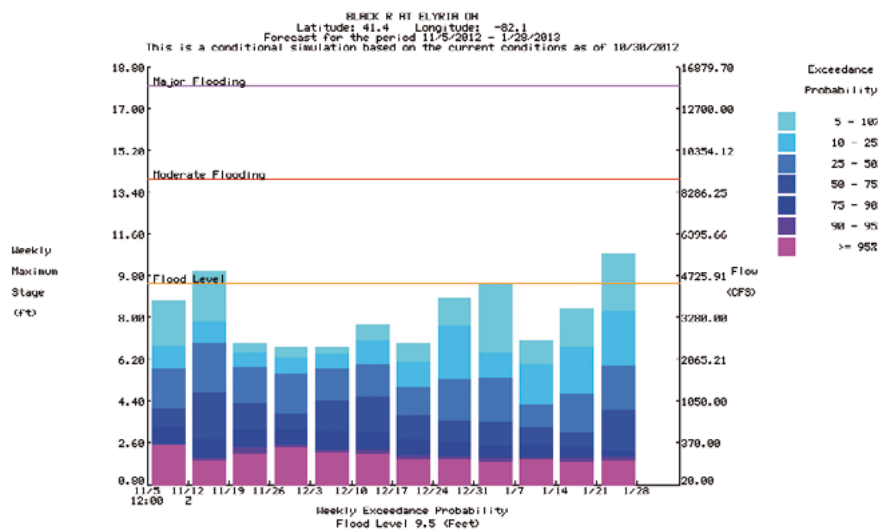
Obr. 4.5 Kumulativní pravděpodobnostní funkce pozorovaných a předpovídaných srážek.

4.5 Střednědobé pravděpodobnostní hydrologické předpovědi

Předpovědi odtoku s předstihem deset a více dní jsou určeny zejména pro účely hospodaření s vodou. Jejich cílem není předpovědět konkrétní hodnotu průtoku v daném čase, a proto tyto předpovědi nejsou ani vydávány v deterministické variantě. Střednědobé hydrologické předpovědi dosahují většinou mimo dosah předpovědního horizontu i globálních NWP. Na časovém úseku, kde se tento časový horizont překrývá (předstih 10–15 dní), je nejistota QPF srážek tak velká, že deterministickou předpověď NWP použít nelze a rozptýl možných variant pravděpodobnostní meteorologické předpovědi se blíží rozptylu klimatických měření. Proto jsou střednědobé hydrologické předpovědi založené na historických meteorologických pozorováních.

Příkladem je operativně používaný systém střednědobých pravděpodobnostních předpovědí ESP (extended streamflow prediction) provozovaný americkou National Weather Service (NWS). Jeho principem je použití historických meteorologických dat pro pravděpodobnostní předpověď na období většinou několika měsíců až let.

Pro každý den v roce jsou zpracovány historické záznamy o srážkách a teplotě vzduchu. Například pro padesátiletou řadu pozorování existuje pro 10. červenec 50 různých teplotních a srážkových dat z předchozích let. Podobným způsobem jsou data zpracována pro další dny v zájmovém období předpovědi. Vlastní výpočty pak uvažují současné počáteční podmínky (nasycení, průtoky, množství sněhu v povodí atd.) a v daném případě padesát variant pro jednotlivé analyzované roky. Průběh srážek a teploty v každém z vyhodnocených roků je tedy



Obr. 4.6 Ukázka výstupu ESP – pravděpodobnost překročení průtoku v týdenním kroku <<http://water.weather.gov>>.

jedním ze vstupujících členů ansámblů. Daný přístup nepoužívá předpověď srážek, ale jakousi statistickou klimatickou předpověď. Vliv nasycení povodí přítom v čase klesá, takže třeba za měsíc se již v některých povodí nedá vystopovat. Úspěšnost výsledků tohoto přístupu je však srovnatelná s využíváním QPF ansámblu z dlouhodobých globálních modelů [4].

Využitelnost střednědobých předpovědí s popsanou metodikou je vyšší u velkých povodí a povodí s pomalým odtokem, kde aktuální stav nasycenosti ovlivňuje průběh odtoku po dobu několika dní až týdnů. U všech povodí bez ohledu na jejich plochu a rychlost odtoku jsou tyto předpovědi důležité v zimním období, kdy zásoby vody ve sněhu vytvářejí odtokový potenciál, který se může realizovat po dobu několika dní i týdnů.

V rámci řešení grantového úkolu MŽP SP/1c4/16/07 byla v ČHMÚ navržena metoda pro výpočet střednědobých hydrologických předpovědí M-ESP (monthly extended streamflow prediction). Jejím základem je již výše uvedený postup používaný v NWS v USA, který byl upraven pro potřeby modelování na relativně menších povodích v České republice. Historické řady srážek byly stochastickým generátorem rozšířeny na teoretickou tisíciletou řadu. To umožňuje korektnější výběr odtokových variant a také podmíněný výběr, determinovaný střednědobou předpovědí počasí. Krok výpočtu modelu byl zkrácen na jednu hodinu, ale výstupy budou agregovány v denním kroku.

Vzhledem ke svému charakteru a poskytovanému předstihu jsou výsledky využívány především v oblasti hospodaření s vodou v nádržích – výsledkem může být např. předpověď, zda při současných podmínkách je dostatečná pravděpodobnost doplnění zásob vody v nádrži. I proto jsou střednědobé předpovědi vydávány nejen pro pravděpodobnost překročení určitého vodního stavu, ale i pro pravděpodobnost překročení objemu odtoku. Střednědobé pravděpodobnostní předpovědi v USA jsou prezentovány na internetových stránkách NWS <<http://water.weather.gov>>, viz obr. 4.6.

4.6 Způsoby prezentace pravděpodobnostních předpovědí

Všechny uvedené metody získání pravděpodobnostní hydrologické předpovědi jsou založené na opakovaném výpočtu hydrologického modelu. Výstupem je tedy několik časových řad (variant) průběhu průtoku, které se v grafu při překrytí jeví například jako vějíř mnoha čar (viz špagetový graf). V ideálním případě by výsledné zobrazení mělo obsahovat informaci o nejistotě předpovědi, mělo by být dobře čitelné a nemělo by umožňovat chybnou interpretaci předpovědi. Mezi nejpoužívanější výstupy patří:

ŠPAGETOVÝ GRAF ▶

Je základním způsobem zobrazení. Výstupy z hydrologického modelu jsou zobrazeny v čárovém grafu.

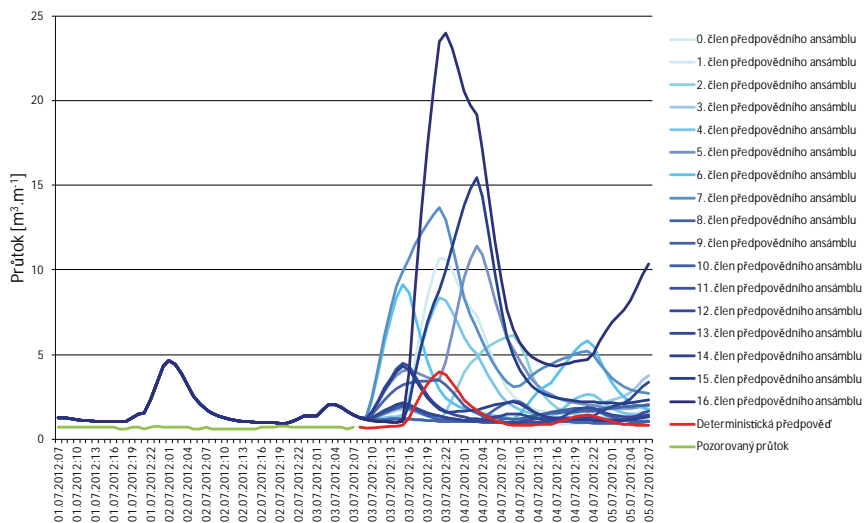
Výhody:

- obsahuje nezjednodušenou informaci o možných variantách vývoje odtoku.

Nevýhody:

- nelze odečíst pravděpodobnosti dosažení určitého průtoku,
- graf je hůře čitelný při velkém počtu členů ansámblu.

Pravděpodobnostní předpověď pro stanici Nemětice (Volyřika) vypočtená k 3.7.2012



SLOUPCOVÝ GRAF ▼

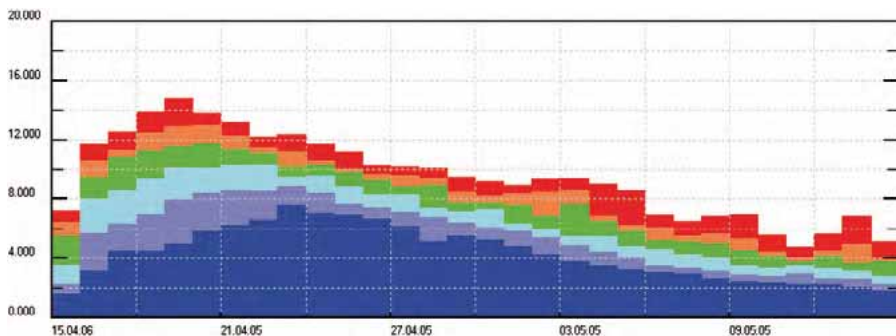
Používá se spíše pro střednědobé pravděpodobnostní předpovědi. Vyznačuje pravděpodobnost překročení průměrného průtoku za určitý časový interval. Tento interval je delší než časový krok výpočtu modelu.

Výhody:

- je dobře čitelný,
- je možné odečíst pravděpodobnost překročení průtoku v časovém intervalu.

Nevýhody:

- hodí se spíše pro předpověď objemu odtoku.



ČÁRA PŘEKROČENÍ ▼

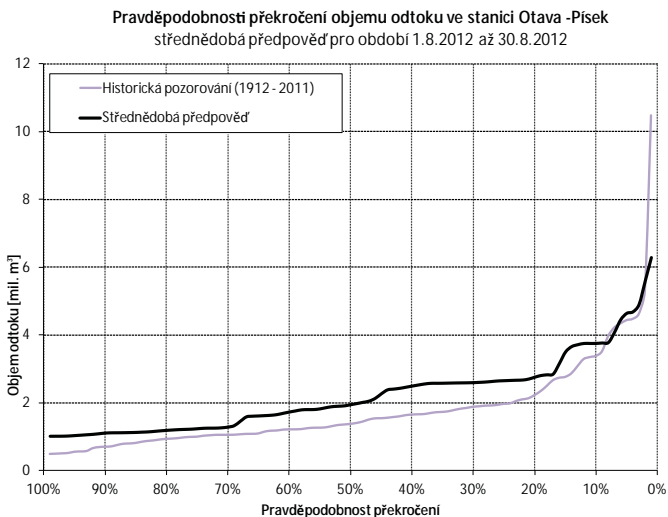
Vyznačuje pravděpodobnost, s jakou bude v průběhu celého předpovědního horizontu překročen maximální průtok nebo celkový objem odtoku.

Výhody:

- jednoduché odečítání pravděpodobnosti výskytu dané hodnoty,
- je možné zobrazit přes sebe více variant výběru ansámbků,
- u střednědobých předpovědí je možné zobrazit společně s čarou překročení historických hodnot a jejich porovnáním zjistit, jestli je očekáváno relativně vodnější nebo sušší období.

Nevýhody:

- hůře čitelné pro lidi bez dostatečného matematického vzdělání,
- nezobrazuje časový průběh předpovědi.



GRAF ČASOVÉHO VÝVOJE PRAVDĚPODOBNOСТИ PŘEKROČENÍ ►

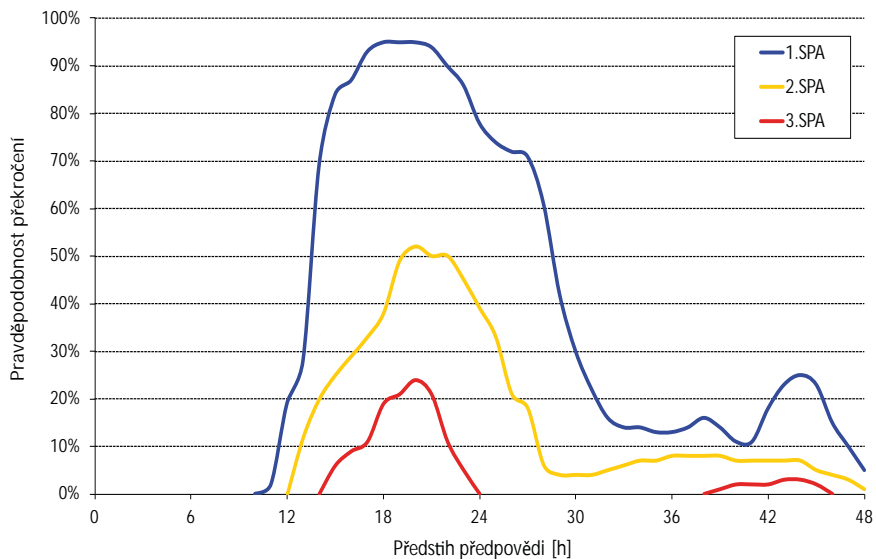
Graf zobrazuje časový průběh pravděpodobnosti překročení prahových průtoků nebo vodních stavů.

Výhody:

- umožňuje odečítat pravděpodobnosti překročení zvolených prahových hodnot v konkrétním čase,

Nevýhody:

- zobrazení neumožňuje odečíst pravděpodobnost výskytu jiného prahového průtoků (stavu), než je uvedeno v legendě.



TABULKA PRAVDĚPODOBNOSTI PŘEKROČENÍ ▼

V tabulce jsou vypsané pravděpodobnosti překročení prahového průtoku (nebo vodního stavu) ve zvolených časových intervalech předpovědního horizontu; tabulka může obsahovat výsledky několika po sobě jdoucích modelových výpočtů.

Výhody:

- jednoduché a dobře čitelné zobrazení pravděpodobnostní předpovědi,
- zobrazení více předpovědí umožňuje zhodnotit kontinuitu předpovědi.

Nevýhody:

- časový vývoj předpovědi je zde omezen do několika intervalů,
- zobrazení neumožňuje odečíst pravděpodobnost výskytu jiného prahového průtoku (stavu), než je uvedeno v tabulce.

Pravděpodobnost překročení 1. SPA

Datum vydání předpovědi	1. 8. 2011		2. 8. 2011		3. 8. 2011		4. 8. 2011	
	0 h–12 h	12 h–24 h	0 h–12 h	12 h–24 h	0 h–12 h	12 h–24 h	0 h–12 h	12 h–24 h
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 %

5. Přívalové povodně a možnosti jejich predikce

5.1 Vznik přívalových povodní

Přívalová povodeň vzniká nejčastěji následkem rychlého povrchového odtoku způsobeného přívalovými srážkami. Přívalové srážky jsou srážky o velmi silné intenzitě, zpravidla více než $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Povodeň se projevuje velmi rychlým vzestupem hladiny vody a následně i velmi rychlým poklesem. Vedle intenzity srážek zde sehrává velmi důležitou úlohu schopnost půdního povrchu vsakovat srážkovou vodu. Tato schopnost infiltrace je primárně ovlivněna způsobem využívání území a jeho morfologickými charakteristikami, zejména sklonitostí svahů. Podstatný je rovněž aktuální stav nasycení půdního povrchu předchozími srážkami, kdy se zvyšujícím se stupněm nasycení, nad retenční vodní kapacitu půdy, schopnost absorpce dalších srážek půdou rychle klesá. Je však důležité zdůraznit, že přívalová povodeň se může vyskytnout i za stavu sucha, kdy na povrchu půd se silnou jílovitou příměsí, příp. na některých polních pozemcích, dochází k tvorbě krusty, která je téměř nepropustná. Přívalová povodeň je pak doprovázena i velmi silnou erozí, což znásobuje škody na majetku. Na trvale nepropustném půdním povrchu, vyskytujícím se hojně v areálech městské či průmyslové zástavby, je riziko přívalových povodní samozřejmě stálé a neměnné [13].

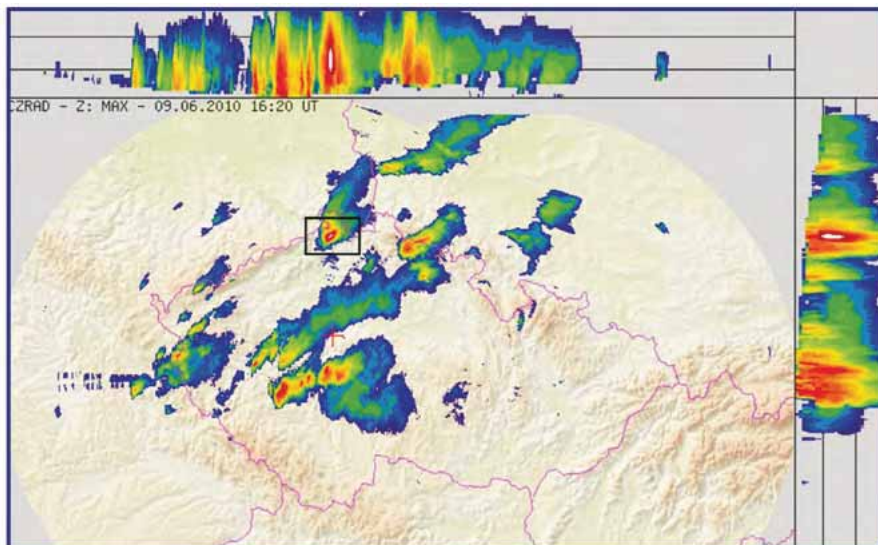
Přívalové srážky postihují zpravidla území od několika km^2 po několik desítek, vzácně stovek km^2 . Mohou s kolísavou intenzitou trvat od několika málo minut až po několik hodin. Pro přívalovou povodeň je proto charakteristické to, že může zasáhnout jak okolí malých vodotečí, tak i údolí za normální situace suchá, příp. území, kde dochází k soustředění povrchového odtoku vody z okolních svahů. Území pod delšími svahy jsou proto nejrizikovější z hlediska možného vzniku přívalových povodní, a proto např. nevhodný způsob obhospodařování pozemků na těchto svazích velmi zvyšuje riziko zvýšeného odtoku a doprovodné eroze během přívalových srážek [12].

Příčiny a průběh přívalové povodně jsou ilustrovány na obr. 5.1, kdy přívalové srážky s odhadovanými úhrny více než 100 mm za hodinu způsobily povodeň s dobou vzestupu cca jedna hodina na povodí o velikosti cca 98 km^2 .

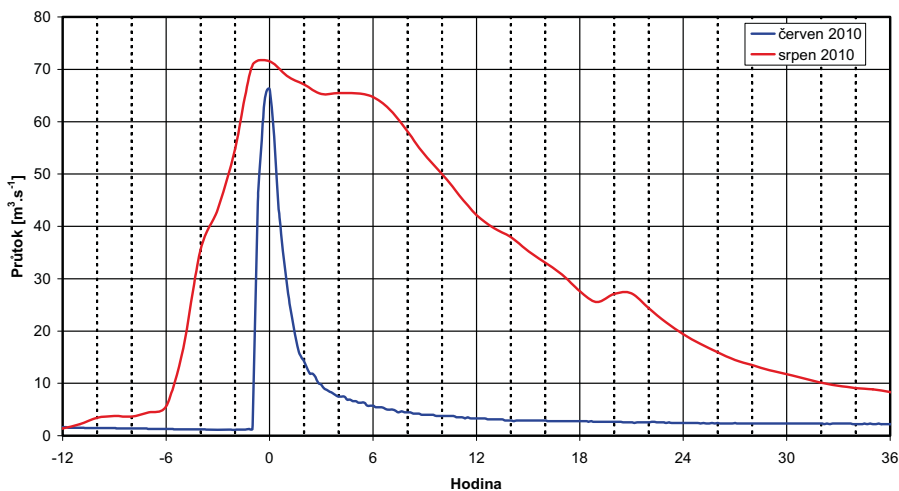
5.2 Predikce přívalových povodní

Možnosti předpovídání přívalových povodní jsou velmi silně omezeny, a to vzhledem k prudké dynamice vývoje konvekční oblačnosti, ze které vypadávají přívalové srážky. I když meteorologické podmínky pro vznik silných přívalových srážek mohou být poměrně úspěšně předpovězeny, přesnou lokalizaci výskytu, trvání a intenzity přívalových srážek, a tím i oblast eventuálního výskytu přívalových povodní, pomocí standardních meteorologických modelů (např. ALADIN) predikovat v podstatě nelze.

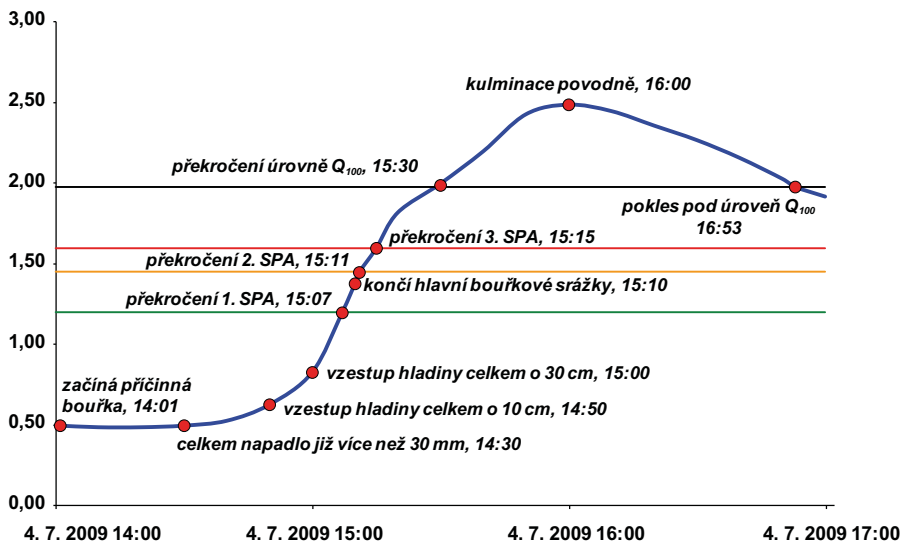
Z výše uvedených důvodů se předpovědní služba omezuje na stanovování tzv. potenciální míry rizika vzniku přívalových povodní. Vychází se z aktuálního stavu nasycenosti území (povodí), který je vedle fyzickogeografických charakteristik území (např. sklonových poměrů) směrodatný pro určení potenciálních rizikových srážek daného trvání, v angličtině označované jako hodnoty FFG (Flash Flood Guidance). Hodnoty FFG jsou definovány jako množství srážek za určitý časový interval, které může způsobit naplnění koryt menších vodotečí [13].



Kamenice – Srbská Kamenice
porovnání průběhu povodní z června a srpna 2010



Obr. 5.1 Situace s výskytem silných přivalových srážek v povodí Kamenice z 9. června 2010 (snímek měření meteorologického radaru, území vyznačeno černým obdélníkem) a odtoková odezva v profilu Srbská Kamenice na Kamenici (graf, modrá čára). Pro ilustraci je zobrazen i průběh povodně ze 7. srpna 2010, která byla způsobena vydatným déletrvajícím deštěm (červená čára).

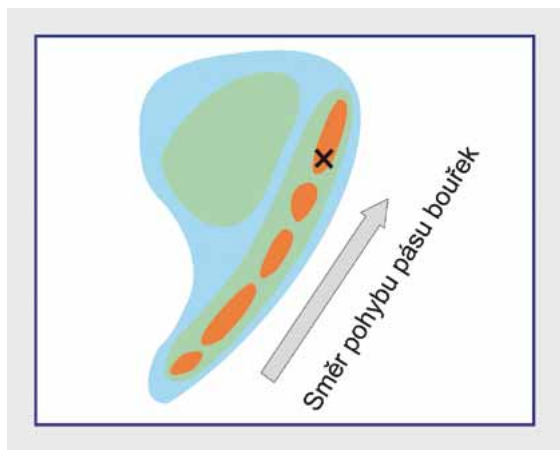


Obr. 5.2 Komentovaný průběh jiné přivalové povodně na Kamenici v roce 2009.

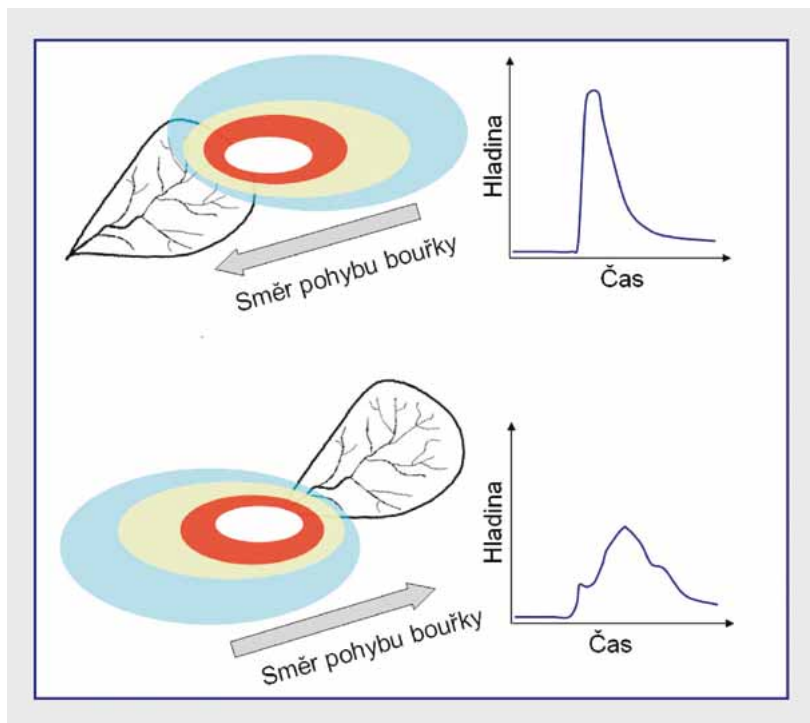
Určitou možností pro predikci výskytu přivalových povodní, avšak s poměrně malou dobou předstihu (od několika minut až po cca 2 hodiny), je využívání aktuální informace o spadlých srážkách z meteorologického radaru, jehož měření pokrývá plošně celé území ČR, a může tudíž podchytit i významné srážky, které nebyly zachyceny sítí srážkoměrných stanic. S využitím jednoduchého srážkoodtokového modelu a krátkodobé předpovědi srážek (tzv. nowcastingu) je možné na malých povodích (s plochou do cca 100 km²) stanovit míru rizika výskytu přivalové povodně, a to i na povodích, které nebyly přímo přivalovou srážkou zasaženy.

Identifikace nebezpečí vzniku přivalové povodně však není jednoduché. Rizikovými faktory jsou zejména:

- **Intenzita srážek**
- **Rychlost pohybu bouřek** – čím pomalejší pohyb, tím větší riziko.
- **Řetězový efekt** – přechod několika bouřek v těsném sledu přes jedno povodí. Tyto bouřky nemusí být ani extrémně silné, viz obr. 5.3.
- **Synergie pohybu bouřek se směrem odtoku vody v povodí** – postupují-li bouřky po směru odtoku vody z povodí, je riziko vzniku povodně výrazně vyšší než při jejich opačném pohybu, viz obr. 5.4.



Obr. 5.3 Typické uspořádání bouřkových jader při řetězovém efektu.



Obr. 5.4 Rozdíl tvaru povodňové vlny při různém pohybu bouřky přes povodí.

5.3 Systém FFG-CZ – Indikátor přívalových povodní

V rámci výzkumného projektu SP/1c4/16/07 Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR byl vyvinut systém procedur s názvem FFG-CZ (Indikátor přívalových povodní), jehož hlavním úkolem je detekce potenciálního rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně.

Systém FFG-CZ sestává z těchto hlavních částí:

- výpočet aktuální nasycenosti území v denním kroku,
- výpočet potenciálně rizikových srážek o době trvání 1, 3 a 6 hodin, které mohou vyvolat povrchový odtok o dané periodicitě výskytu,
- odhad aktuálního rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně na základě 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek (včetně nowcastingu) a definovaných prahových hodnot odtoku.

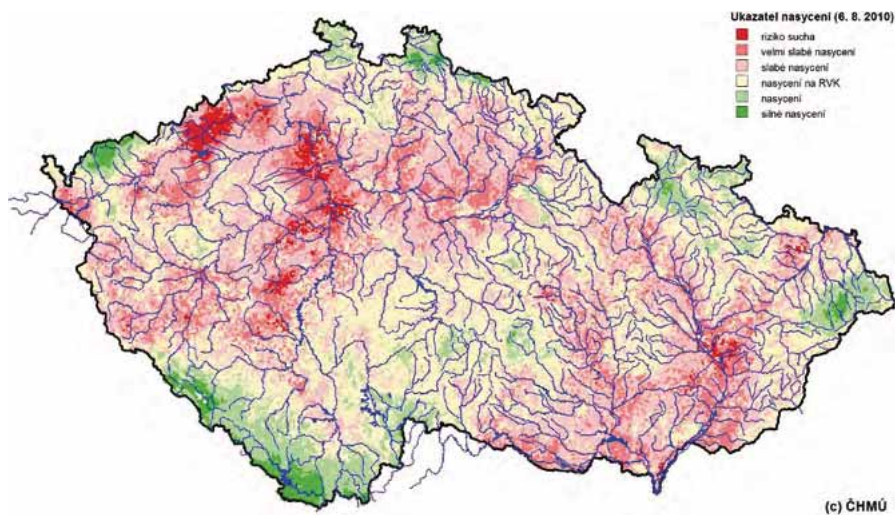
Hlavním výstupem procedury výpočtu aktuální nasycenosti území je tzv. ukazatel nasycení, jehož hodnota vyjadřuje relativní odchylku od stavu nasycení na retenční vodní kapacitu. Je odvozován v rastru 1×1 km, a to na základě jednoduché bilance srážek, odtoku a aktuální evapotranspirace. Základem výpočtu je metoda CN [12], pomocí níž je na základě spadlých srážek odhadována velikost přímého odtoku. Srážková voda, která neodteče přímým odtokem, se částečně vypaří a částečně vsákne do půdy. Velikost odtoku z podpovrchových vod je řízena stupněm nasycení půdy.

Na obr. 5.5 je uvedeno rozložení ukazatele nasycení pro 6. srpen 2010 k 8:00 SELČ, tj. den před výskytem extrémních srážek a následných extrémních povodní na Liberecku. Z mapky je patrné, že Liberecko bylo nasyceno nad retenční vodní kapacitu, z čehož je možné usuzovat na menší schopnost půdy a půdního povrchu infiltrovat srážkovou vodu.

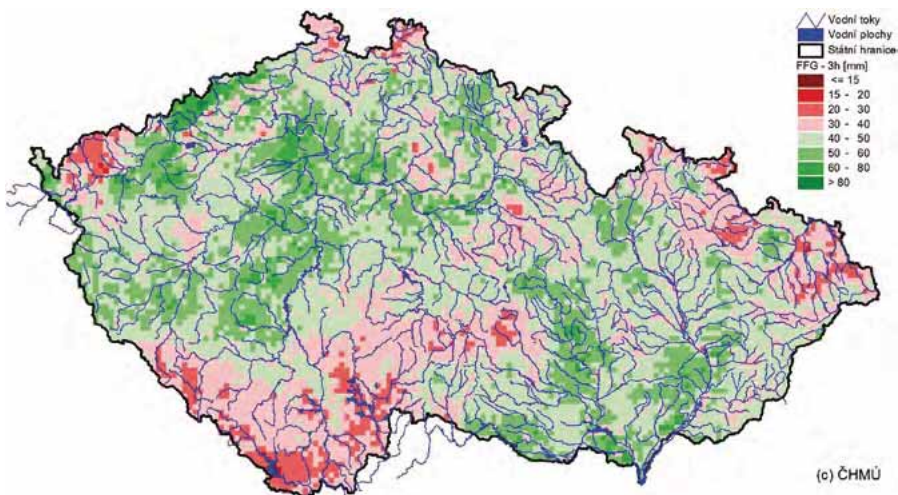
Hodnoty potenciálně rizikových srážek (FFG) s dobou trvání 1, 3 a 6 hodin jsou odvozovány ve čtverci území 3×3 km pomocí jednoduchého srážkoodtokového modelu (SCS) s nastavenou prahovou hodnotou odpovídající specifickému odtoku s dobou opakování 2–5 let, a to na základě aktuálního nasycení. Je nutné si uvědomit, že hodnoty potenciálních rizikových srážek mohou být vzhledem k místním podmínkám i výrazně nižší, a to zvláště na povodích s významným podílem zemědělsky obhospodařovaných pozemků, kde dochází ke změnám infiltračních podmínek v závislosti na druhu pěstovaných plodin a jejich vývojové fáze.

Na obr. 5.6 jsou uvedeny hodnoty potenciálně rizikových srážek s dobou trvání 3 hodiny pro 6. srpen 2010 k 8:00 SELČ. Z mapky je zřejmé, že se tyto hodnoty na Liberecku pohybovaly od 20 do 50 mm. Maximální 3hodinové intenzity srážek z 6. na 7. srpna, a zejména 7. srpna dopoledne, tento limit výrazně překonaly.

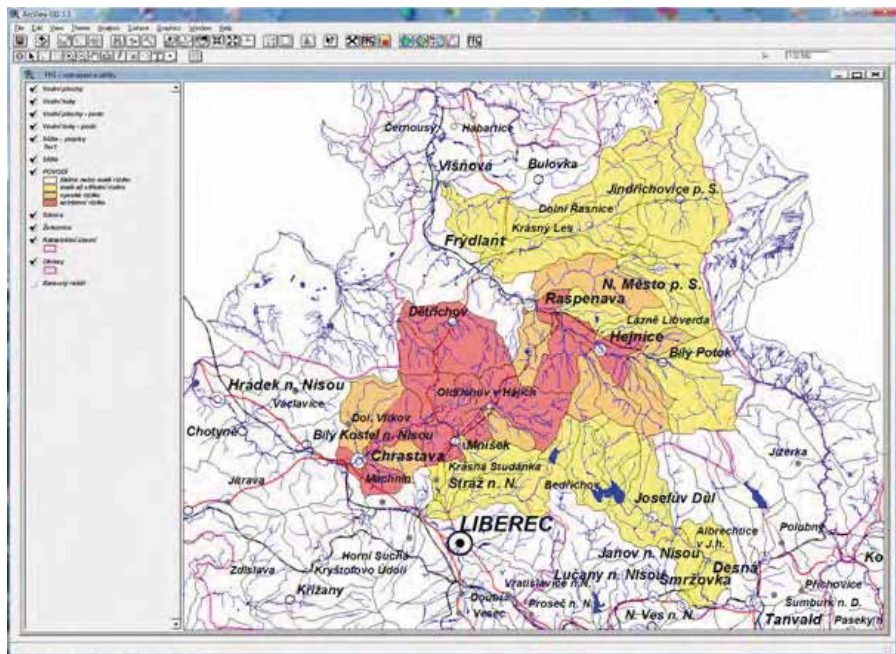
Odhad aktuálního rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně je prováděn na základě 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek a jejich krátkodobé předpovědi (tzv. nowcastingu). Při výpočtu je používán jednoduchý srážkoodtokový model, založený na metodě jednotkového hydrogramu [4] a metodě Muskingum pro odhad postupu povodňové vlny [14]. Hodnoty parametrů srážkoodtokového modelu byly odhadnuty z fyzicko-geografických charakteristik základních povodí (povodí IV. řádu), přičemž tato dílčí



Obr. 5.5 Ukazatel nasycení jako index stavu nasycení území ke dni 6. srpna 2010 8:00 SELČ.



Obr. 5.6 Hodnoty potenciálně rizikových srážek (FFG) s dobou trvání 3 hodiny pro 6. srpen 2010 8:00 SELČ.

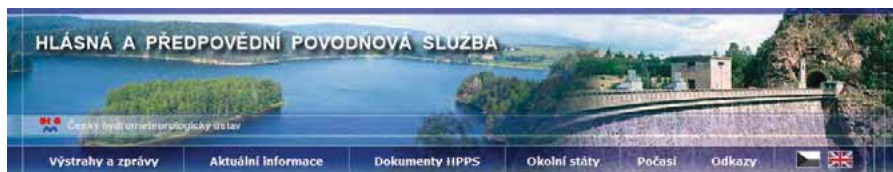


Obr. 5.7 Zobrazení rizika vzniku či výskytu přívalové povodně v prostředí GIS. Situace ze 7. 8. 2010, kde vstupem byly adjustované radarové odhady z časové periody 8:45–11:30 a hodnoty ukazatele nasycení (resp. CN) pro 7. 8. 2010 k 8:00 SELČ.

povodí jsou v rámci systému FFG-CZ hydrologicky a hydraulicky propojena až do velikosti povodí max. 100 km². Při stanovení rizika povodně se vychází z porovnání odhadu velikosti maximálního specifického odtoku generovaného modelem na základě spadlých srážek a nowcastingu vůči definovaným prahovým hodnotám odtoku. Příklad je na obr. 5.7.

Aktuální mapy ukazatele nasycení a potenciálně rizikových srážek s dobou trvání 1, 3 a 6 hodin jsou od června 2011 veřejně publikovány na webu ČHMÚ, na adrese: <http://hydro.chmi.cz/hpps/main_rain.php?mt=ffg>, viz obr. 5.8. Aplikace je v provozu každoročně vždy od poloviny dubna do poloviny října, tedy v době sezony výskytu přívalových srážek.

Výstupy aplikace počítané na základě 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek (včetně nowcastingu) a definovaných prahových hodnot odtoku – odhad aktuálního rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně, jsou zatím provozovány v testovacím režimu na centrálním předpovědním pracovišti v Praze-Komořanech.



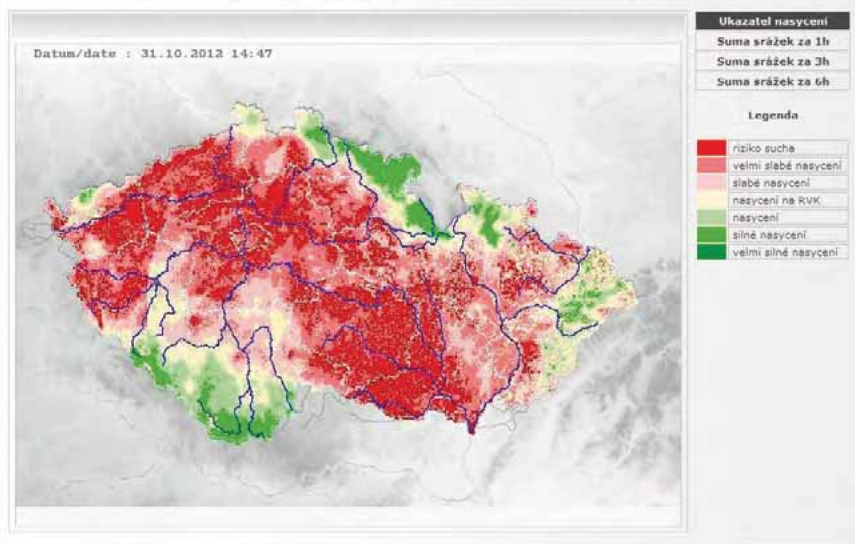
Indikátor přívelových povodní (Flash Flood Guidance)

- Aktuální srážky
- Aktuální srážky - data pozemních srážkoměrů

Ukazatel nasycení reprezentuje odhad aktuální nasycenosti území vodou k 8. hodině místního času. Je odvozen v denním kroku pomocí jednoduchého modelu bilance srážek, odtoku a evapotranspirace. Červené odstíny představují území s nedostatkem vody, zelené odstíny území s vláhovým přebytkem. Vysoká nasycenost představuje potenciální riziko zvýšeného povrchového odtoku při výpadnutí většího úhrnu srážek.

Zobrazovaný přehled - ukazatel nasycení

APLIKACE JE PROVOZOVÁNA POUZE V KONVEKTIVNÍ SEZÓNĚ (DUBEN - ŘÍJEN)



Obr. 5.8 Mapa ukazatele nasycení pro 8. 9. 2011 k 8:00 SELČ na webu ČHMÚ.

6. Využití pravděpodobnostní předpovědi ve vodohospodářské praxi

Pravděpodobnostní hydrologické předpovědi přinášejí nové možnosti pro zvýšení efektivity při hospodaření s povrchovou vodou. V USA, kde hydrologická služba počítá pravděpodobnostní předpovědi již od konce 20. století, se tyto předpovědi používají nejen při řízení vodních děl, ale také při plánování lodní dopravy, v energetice nebo v pojištnictví. Znalost rizika určité situace umožňuje odborníkům v uvedených sférách se lépe na tuto situaci připravit a zvýšit ekonomické výnosy ze své práce. Pro vodohospodáře v České republice jsou pravděpodobnostní hydrologické předpovědi potenciálem pro zlepšení organizace protipovodňové ochrany a zvýšení efektivity řízení manipulací na vodních nádržích, a to nejen při povodňovém ohrožení.

Při práci s krátkodobou a střednědobou hydrologickou pravděpodobnostní předpovědí se aplikuje odlišný přístup, protože předpovědi obsahují odlišné informace. Předpokládá se, že krátkodobá pravděpodobnostní předpověď bude vydávána pro většinu předpovědních profilů, tedy i pro zdrojová – malá povodí. Předstih předpovědi i časový krok bude stejný jako u předpovědi deterministické (48 hodin, krok 1 hodina). Střednědobá pravděpodobnostní předpověď, jejíž využitelnost má z principu své limity, dané především rychlostí odtoku z povodí, bude zpracovávána pouze pro větší řeky a přítoky do nádrží uzavírající povodí v řádu několika tisíc km². Plánovaný předstih střednědobé předpovědi bude 30 dní. Časový krok prezentovaných výsledků bude roven nebo delší než jeden den.

6.1 Využití pravděpodobnostních předpovědi při řízení nádrží

Vodní díla (nádrže) jsou v naprosté většině případů víceúčelová, a proto se při hospodaření s vodou musí zajišťovat funkce, které mají často protichůdné požadavky. Zároveň kvantifikace ekonomických ztrát (nebo zisků), vyplývajících z manipulace podmíněné pravděpodobnostní předpovědí je složitá. Proto je pro provozovatele (dispečery) vodních děl také složité i využití pravděpodobnostních hydrologických předpovědí. Komplexní řešení, které obsahuje všechny účely nádrže se neobejde bez zavedení sofistikovaného rozhodovacího systému. Alternativní možností je zjednodušení celé problematiky stavu nádrže do několika kategorií možných variant se stanovenými stupni rizika.

Pravděpodobnostní koncept řízení nádrží je teoreticky znám a rozvíjen od 50. let 20. století [16]. Používání pravděpodobnostních předpovědí přítoku do nádrží k rozhodování o manipulacích se již v praxi uplatňuje v řadě případů. Příkladem může být software Socrates [17] pro řízení produkce elektrické energie v podmínkách nejistoty, vyvinutý pro Pacific Gas and Electric Company. Její využitelnost je snadnější v oblastech s výrazným oddělením srážkové a suché části roku, kde je velký význam nádrží zejména v zásobování vodou v suchém období.

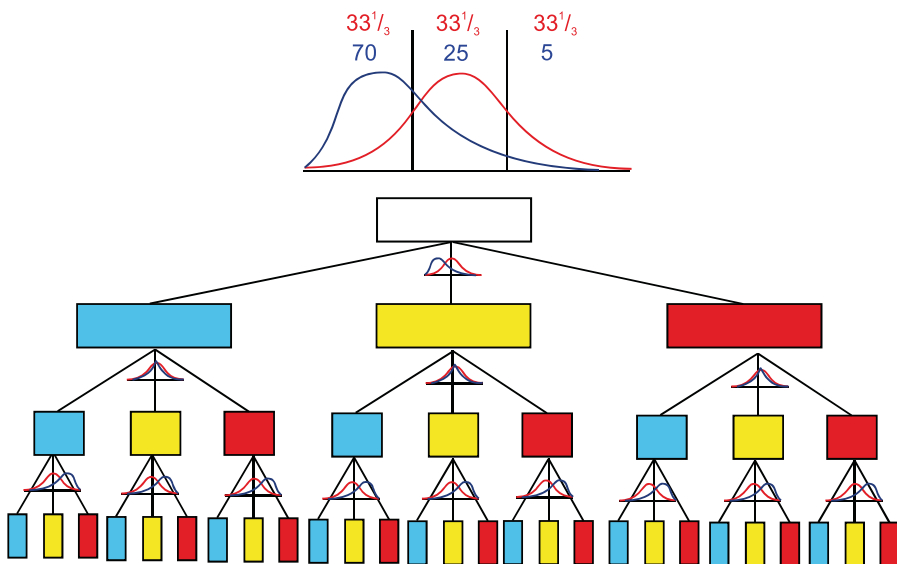
Teoretických přístupů k rozhodovacímu procesu řízení nádrží na základě pravděpodobnostních informací o očekávaném přítoku je celá řada a zahrnují stochastické lineární programování (které minimalizuje potenciální dopady činěného rozhodnutí, jež

by mohlo mít v dalších krocích vývoje), nebo stochastické dynamické modelování (které postupuje od budoucího časového kroku v budoucnosti směrem k současnému času s cílem maximalizovat benefity v každém kroku rozhodování), nebo mohou být v podobě Bayesiánského stochastického dynamického modelování [15].

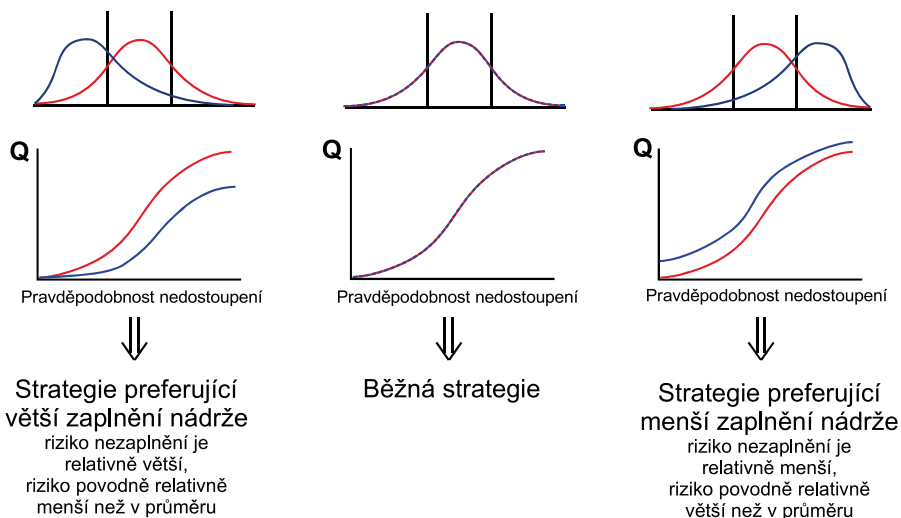
Problém řešení rozhodování na základě pravděpodobnostní předpovědi přítoku lze popsat jako rozhodovací strom rozhodnutí činěných v diskrétních časových krocích. V jeho finální sekvenci je možné vyhodnotit pravděpodobnost jednotlivých variant řetězce rozhodnutí. Podle strategie a cíle (minimalizace ztrát v produkci energie, minimalizace povodňových škod aj.) operátora lze preferovat v rozhodnutích jednotlivé větve, čímž lze zvýšit celkovou pravděpodobnost vyhovujících výsledků na konci manipulace.

Rozhodovací systémy jsou v takových případech většinou řešeny specializovanými softwary, založenými na sofistikovaných statistických metodách (Markovovy rozhodovací systémy, Monte Carlo optimalizace, umělé neuronové sítě aj.).

Relativně jednodušší rozhodovací proces lze aplikovat při řešení jediného dostatečně krátkého časového intervalu a současně uvažování jediného kritéria. Příkladem může být rozhodování o provedení určitého opatření v závislosti na míře předpovědané pravděpodobnosti jeho nutnosti. Například dojde-li při dosažení určitého průtoku k zaplavení



Obr. 6.1 Ukázka rozhodovacího stromu pro tři stupně (budoucí období). Rozhodování je založeno na předpovědi pravděpodobnosti výskytu nadprůměrného, průměrného či podprůměrného přítoku do nádrže. Zatímco bez předpovědi by bylo uvažováno klimatické pozadí (červená čára) předpokládající stejné pravděpodobnosti rozložení průtoku, předpověď (modrá čára) podává informaci o aktuálních šancích výskytu uvedených kategorií na základě stavu povodí a očekávaném vývoji meteorologických podmínek.



Obr. 6.2 Při jednostupňovém rozhodování může být informace o tom, zda je očekávané období (modře) spíše méně vodné (vlevo) než dlouhodobý průměr (červeně), nebo naopak vodnější (vpravo).

části města s očekávanou škodou 100 mil. korun, jemuž však lze předejít vybudováním dočasných bariér, což vyžaduje náklad 10 mil. korun, vyplatí se z dlouhodobého hlediska vystavět bariéry vždy, když je predikovaná pravděpodobnost překročení limitního průtoku větší než 10 %. Ve většině případů samozřejmě provedené opatření nebude vlastně potřeba, protože povodeň tak vysoko nevystoupí a peníze na jeho provedení by tak byly vynaloženy zbytečně, ale každý případ, kdy uvedená ochranná opatření před škodami náklady vyváží. V případě znalosti výše potenciálních škod a nákladů na předejití jejich vzniku lze rozhodování založit na v podstatě prostých naznačených ekonomických analýzách.

Úlohu je však možno transformovat do jednoduššího kategorického schématu, kdy míra pravděpodobnosti předpovědi určitých limitních průtoků (či objemů odtoku) může být podkladem pro volbu předpřipravených strategií (konzervativní vers. aktivní aj.).

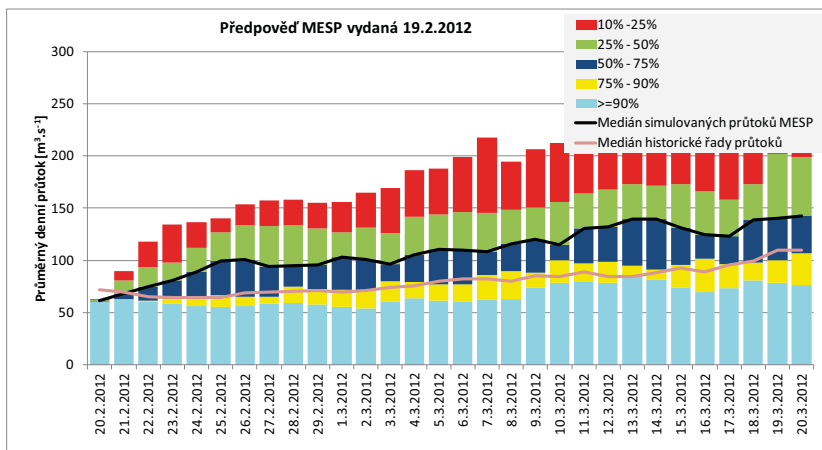
6.2 Střednědobá pravděpodobnostní předpověď

Primární modelové výstupy krátkodobé a střednědobé pravděpodobnostní předpovědi se zdánlivě od sebe neliší – v obou případech jde o několik variant odtoku pro konkrétní předpovědní profily. Jejich interpretace a následné využití však vyžadují odlišný přístup. Při použití střednědobých pravděpodobnostních předpovědí je třeba mít na paměti zejména tyto základní předpoklady:

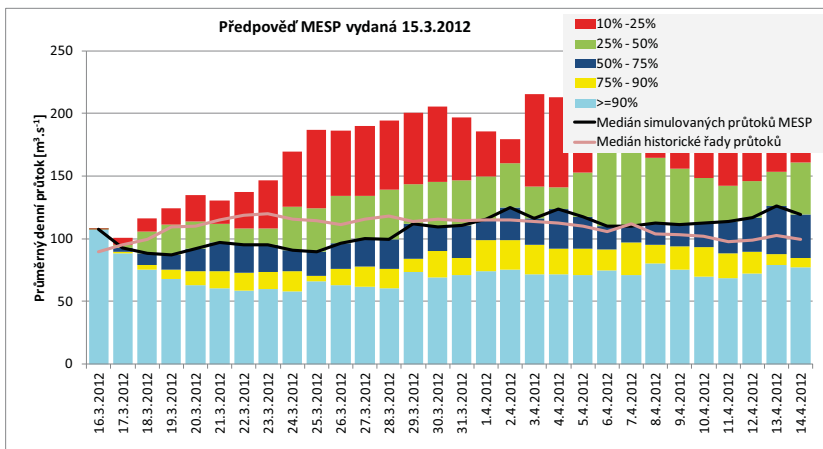
- Střednědobé pravděpodobnostní předpovědi využívají pouze v omezené míře předpověď počasí vydanou v reálném čase, proto v krátkém předpovědním horizontu (do 48 hodin) nemohou nahradit krátkodobou předpověď.
- Jejich cílem není předpovědět nejpravděpodobnější průběh průtoku, ale riziko výskytu určitých odtokových variant.
- Časový průběh odtoku jednotlivých předpovědních variant je natolik variabilní, že vhodnější je využívat střednědobé pravděpodobnostní předpovědi pro objem odtoku než pro riziko dosažení okamžitých průtoků.

Ze střednědobé pravděpodobnostní předpovědi lze například určit, je-li očekáváno spíše vodnější, či sušší období. Popřípadě s jakou pravděpodobností dotече do nádrže ve stanoveném předpovědním období určitý nebo vyšší objem vody. Pro dlouhodobou bilanci nádrže se uplatní zejména předpověď minimálního zajištěného přítoku do nádrže. Podle této bilance pak lze optimalizovat plánované manipulace tak, aby se účinně hospodařilo s vodou a předešlo se negativním dopadům sucha.

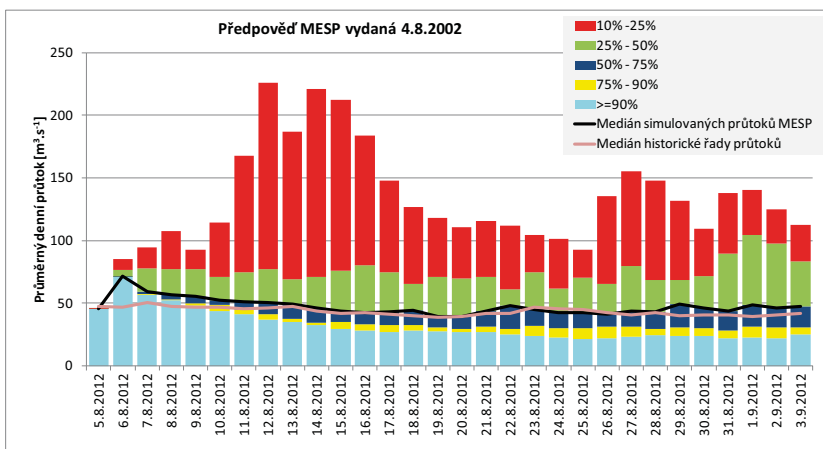
Následují čtyři ukázky střednědobé pravděpodobnostní předpovědi přítoku do nádrže Orlík. Předpovědi vycházejí z reálného nasycení povodí k uvedeným dnům výpočtu. Pod každým obrázkem je uvedeno několik příkladů interpretací těchto předpovědí.



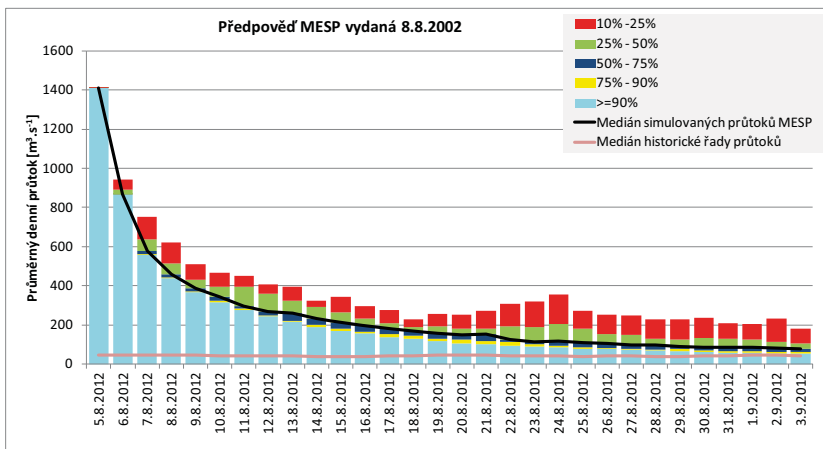
- Předpovědní období (20. 2.–20. 3. 2012) bude s vysokou pravděpodobností nadprůměrně vodné (což v tomto případě souvisí s nadprůměrnými zásobami vody ve sněhové pokrývce).
- S 90% pravděpodobností přiteče do nádrže Orlík více než 172 mil. m³ vody, podle průměrných průtoků za dobu pozorování by tento objem měl být pouze 109 mil. m³.
- Pokud by se zohledňoval pouze protipovodňový efekt nádrže Orlík, pak by bylo možné uvolnit v nádrži takový prostor, který by i při minimální variantě přítoku (172 mil. m³ za 30 dní), zajišťoval během následujícího měsíce doplnění nádrže na optimální hladinu k dané sezoně.



- V první polovině předpovědního období se očekávají celkově menší vodnosti než průměrné za toto období (což je způsobeno odtáním většiny sněhové pokrývky již v první polovině března a celkově menšími sněhovými zásobami v daném povodí, už je obvyklé).
- S 50% pravděpodobností přiteče do nádrže Orlík více než 272 mil. m³ (podle průměrných průtoků za dobu pozorování by tento objem měl být 281 mil. m³).



- Přestože tato předpověď byla vydána krátce před výskytem vydatných srážek, které způsobily první vlnu povodně ze srpna 2002, není zde o blížící se povodni žádný signál.
- Podle předpovědi se očekává z hlediska vodnosti průměrné období.



- Předpověď je vydaná krátce po první povodňové vlně v srpnu 2002, signál o příchodu druhé vlny zde chybí.
- Z důvodu extrémní nasycenosti se očekávají výrazně nadprůměrné průtoky po celý srpen. S 90% pravděpodobností přiteče do nádrže Orlik celkový objem větší než 581 mil. m^3 , což je desetkrát více, než je obvyklý objem přítoku pro toto období.
- Předpověď dává jasný signál pro nutnost uvolnění retenčních kapacit nádrží.

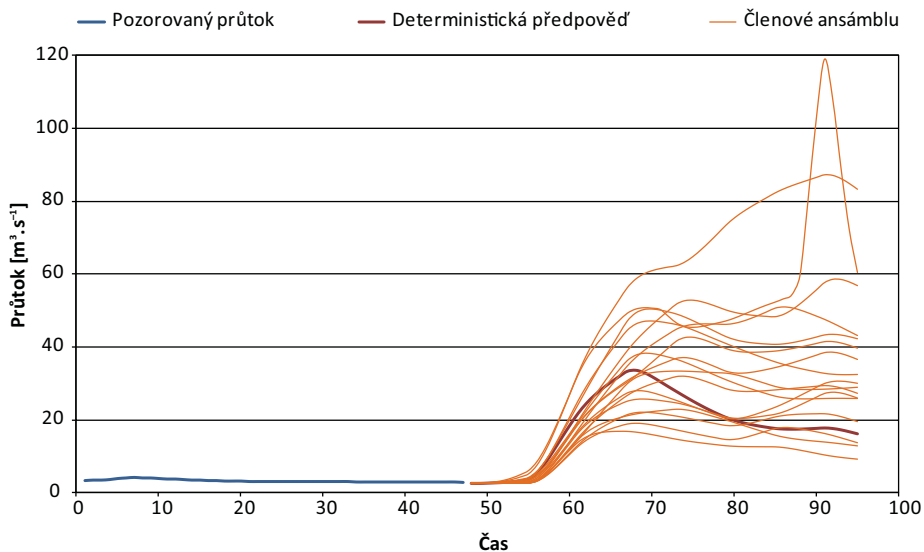
6.3 Krátkodobá pravděpodobnostní předpověď

Krátkodobá pravděpodobnostní předpověď na 48 hodin doplňuje stávající deterministickou předpověď. Dodává informaci o nejistotě předpovědi srážek a na ní závisící nejistotě hydrologické předpovědi. Při stejné deterministické předpovědi se může pravděpodobnostní předpověď pro jednotlivé situace lišit v závislosti na stavu počasí.

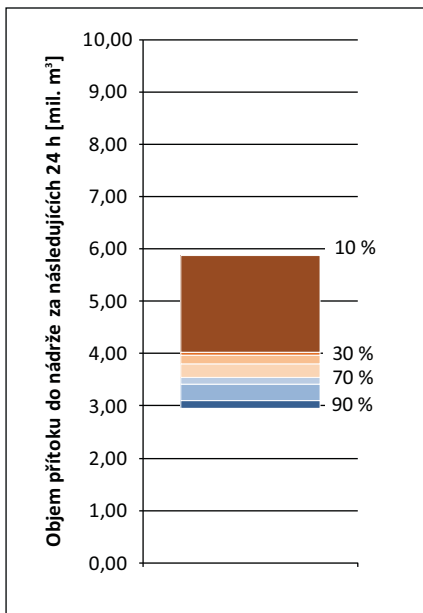
Pro vodo hospodářské dispečinky je pravděpodobnostní předpověď využitelná především jako doplněk deterministické předpovědi přítoku do nádrže. Hydrogram s deterministickou předpovědí a jednotlivými členy ansámbly pravděpodobnostní předpovědi je pro potřeby dispečerů doplněn o statistické vyhodnocení objemu přítoku do nádrže na následujících 48 hodin. Ze členů ansámbly jsou spočteny hodnoty objemu přítoku za 48 hodin, s pravděpodobností překročení 10 %, 20 %, ..., 90 %. Tyto hodnoty jsou uvedené v přehledné tabulce a zároveň jsou zobrazené ve sloupcovém grafu.

Z takto prezentované pravděpodobnostní předpovědi lze vyčíst dvě podstatné informace. První informací je rozptyl jednotlivých členů ansámbly, ze kterého lze vyčíst nejistotu předpovědi. Druhou je minimální průměrný přítok do nádrže s určitou zabezpečeností (např. 90 %), ze kterého lze určit minimální odtok z nádrže tak, aby na konci předpovědního období byla zajištěna požadovaná hladina.

Pravděpodobnostní předpověď přítoku do Husince – varianta zvětšený rozptyl



Pravděpodobnost překročení	Objem přítoku za následujících 48 hodin [m ³]
90 % – P_{90}	2 960 897
80 % – P_{80}	3 103 026
70 % – P_{70}	3 423 033
60 % – P_{60}	3 543 527
50 % – P_{50}	3 549 722
40 % – P_{40}	3 807 808
30 % – P_{30}	3 965 964
20 % – P_{20}	4 029 053
10 % – P_{10}	5 862 164
Deterministická	3 219 271



Obr. 6.3 Pravděpodobnostní předpověď přítoku do VD Husince.

6.3.1 Nejistota předpovědi – Index nejistoty IN

Z rozptylu, šíře vějíře, členů ansámblu pravděpodobnostní předpovědi lze získat informaci o nejistotě předpovědi. Hydrologická pravděpodobnostní předpověď vychází z výsledků meteorologické pravděpodobnostní předpovědi srážek, a přebírá tak její nejistotu. Pokud je předpověď srážek jednoznačná (bezesrážkové období) je šíře vějíře malá, a tedy i hydrologická předpověď více jistá. Naopak, pokud je předpověď srážek nejistá (bouřky, přívalové deště, ...) zobrazí se nejistota hydrologické předpovědi ve velké šířce vějíře.

Pro zhodnocení velikosti rozptylu, šíře vějíře, pravděpodobnostní předpovědi byl zaveden bezrozměrný index nejistoty předpovědi *IN*. Lze ho snadno spočítat z hodnot statistického vyhodnocení objemu přítoku do nádrže za následujících 48 hodin, které je součástí pravděpodobnostní předpovědi, podle následujícího vzorce:

$$IN = \frac{P_{10} - P_{90}}{P_{50}}$$

Hodnotu tohoto indexu lze jednoduše spočítat pro každou pravděpodobnostní hydrologickou předpověď a dlouhodobým sledováním a zpětným porovnáním pravděpodobnostní předpovědi s nastalou skutečností lze určit intervaly hodnot indexu, kdy je předpověď jistá, méně jistá, či nejistá. Pro každý předpovědní profil budou meze těchto intervalů jiné, protože i úspěšnost předpovědi je pro každý profil jiná v závislosti na charakteristikách daného povodí. Dostatek dat pro vytvoření rozhodovacích intervalů indexu nejistoty předpovědi lze získat ze zpětně simulovaných pravděpodobnostních předpovědí, nebo postupně při standardním používání pravděpodobnostních předpovědí v reálném čase.

Index nejistoty hydrologické předpovědi lze přidat jako jedno z kritérií do rozhodování o manipulacích na vodním díle. Proces rozhodování o manipulaci na vodním díle se tedy bude skládat z posouzení aktuální úrovně hladiny, aktuálních a výhledových provozních podmínek na vodním díle (omezení hladiny a odtoku) a předpovědi přítoku a její nejistoty.

6.3.2 Minimální průměrný přítok do nádrže se zabezpečeností 90 % – $Q_{\min 90}$

Minimální průměrný přítok do nádrže se zabezpečeností 90 %, lze získat převedením objemu přítoku do nádrže s pravděpodobností překročení 90 % v m^3 za 48 h na průtok $Q_{\min 90}$ v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Na rozdíl od dlouhodobého minimálního průměrného průtoku získaného ze střednědobé předpovědi, lze tento krátkodobý minimální průměrný průtok použít především při manipulacích během povodní, kdy nám určuje spodní meze odtoku z vodního díla, při které je vysoká pravděpodobnost, že se nádrž nebude prázdnit.

Závěr

Tato publikace přináší základní informace o stávajícím způsobu vytváření hydrologických předpovědí a nových produktů předpovědní povodňové služby ČHMÚ, kterými jsou pravděpodobnostní hydrologické předpovědi a Indikátor přívalových povodní.

Předkládané informace slouží jako podklad zejména pro uživatele z okruhu odborné vodohospodářské veřejnosti, kteří by měli informace dále zpracovávat, vyvinout a provozovat metody, postupy a nástroje, které by umožnily účelné využití těchto nových produktů. V budoucnosti lze předpokládat například rozhodování o manipulacích na nádržích již s matematickým, či alespoň semikvantitativním vyhodnocování pravděpodobnostní předpovědi a návazných ekonomických dopadů činěných rozhodnutí.

Literatura

- [1] HLADNÝ, J., 1970. Hydrologická prognóza. Učební texty pro maturitní studium, sv. 10. Praha: HMÚ, 118 s.
- [2] NWS, 2011. NWSRFS User Manual. Dostupné na WWW: <http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/htm/xrfsdocpdf.php>.
- [3] BŘEŽKOVÁ, L. – STARÝ, M. – DOLEŽAL, P., 2010. The Real – time Stochastic Flow Forecast. *Soil and Water Reseach*, Vol. 5, 2010 (2), s. 49–57. ISSN 1801-5395.
- [4] CLARK, M. P. – HAY, L. E., 2004. Use of Medium-Range Numerical Weather Prediction Model Output to Produce Forecasts of Streamflow. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, No. 1, s. 15–32.
- [5] COLLIER, C. G. – KRZYSTOFOWITCZ, R. (Eds.), 2000. Special Issue: Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, Vol. 239, s. 1–340. ISSN 0022-1694.
- [6] DAŇHELKA, J., 2007. Operativní hydrologie: Hydrologické modely a nejistota předpovědí. In: *Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu*. Praha: ČHMÚ, sv. 51, s. 104. ISBN 978-80-86690-48-3, ISSN 0232-0401.
- [7] DAŇHELKA, J., 2004. Use of QPF for hydrological modelling – a source of error. Sborník 22. konference podunajských států, Brno, 31. srpna až 4 září 2004, Brno: ČHMÚ, 10 s.
- [8] KRZYSTOFOWITCZ, R., 2001a. The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology*, Vol. 249, s. 2–9. ISSN 0022-1694.
- [9] KRZYSTOFOWITCZ, R., 2001b. Integrator of uncertainties for probabilistic river stage forecasting: precipitation dependent model. *Journal of Hydrology*, Vol. 249, s. 69–85. ISSN 0022-1694.

- [10] KRZYSTOFOWITCZ, R. – HERR, H. D., 2001. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting: precipitation dependent model. *Journal of Hydrology*, Vol. 249, s. 46–68. ISSN 0022-1694.
- [11] VLASÁK, T. – DAŇHELKA, J., 2010. Vyhodnocení hydrologických předpovědí povodní v povodí Labe. *Meteorologické Zprávy*, roč. 63, č. 1., s. 5–12. ISSN 0026-1173.
- [12] JANEČEK, M., 1998. Použití metody čísel odtokových křivek CN k navrhování protierozních opatření. Praha: VÚMOP.
- [13] NOAA, 2010. Flash Flood Early Warning System Reference Guide. University Corporation for Atmospheric Research. ISBN 978-0-615-37421-5.
- [14] US Army Corps of Engineers, 1994. Flood-Runoff Analysis, Engineer manual EM 1110-2-1417. Washington, DC 20314-1000.
- [15] MUJUMDAR, P. P. – NIRMALA, B., 2007. A Bayesian Stochastic Optimization Model for a Multi-Reservoir Hydropower System. *Water Res. Management*. 21, s. 1465–1485.
- [16] LITTLE, J. D. C., 1955. The Use of Storage Water in a Hydroelectric System. *Journal of the Operations Research Society of America*, Vol. 3, No. 2, s. 187–197.
- [17] JACOBS, J. – FREEMAN, G. – GRYGIER, J. – MORTON, D. – SCHULTZ, G. – STASCHUS, K. – STEDINGER, J., 1995. SOCRATES: A system for scheduling hydroelectric generation under uncertainty. *Annals of Operation Research*, Vol. 59, Issue 1, s. 99–133. ISSN 0254-5330.
- [18] KRZYSTOFOWITCZ, R. – COLLIER, C. G. (Eds.), 2004. Special Issue: Quantitative precipitation forecasting II. *Journal of Hydrology*, Vol. 288 (2004), s. 1–236. ISSN 0022-1694.
- [19] RICHTER, J., 1893. Způsob předchozích výpočtů stavů vody hořeniho Labe. Technická kancelář rady zemědělské, Praha, 28 s.
- [20] RICHTER, J. – NĚMEC, A., 1892. Zařízení služby prognosní o stavu vody na Labi v Čechách. Technická kancelář rady zemědělské, Praha, 37 s.



Další informace a produkty hydrologické předpovědní služby České republiky jsou dostupné na stránkách hlášené a předpovědní povodňové služby <<http://hydro.chmi.cz>>, a to pod záložkou: Jak rozumět přepovědi, v menu dokumenty HTPPS. Na těchto stránkách lze mimo jiné nalézt vyhodnocení významných povodňových událostí v České republice.

PRŮVODCE INFORMACEMI PRO ODBORNOU VODOHOSPODÁŘSKOU VEŘEJNOST

Vydalo nakladatelství Český hydrometeorologický ústav
Praha 2012

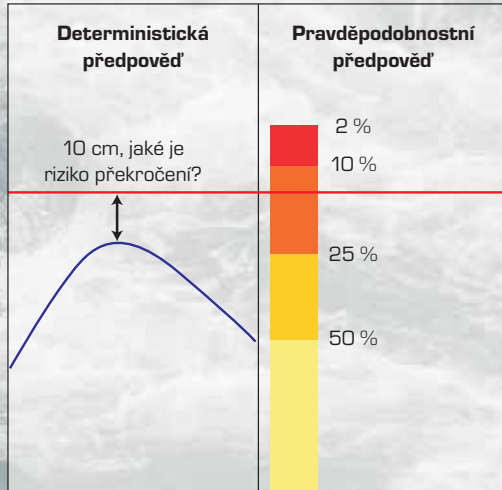
Odpovědný redaktor RNDr. Radek Čekal, Ph.D.

Grafická úprava Hana Stehlíková

1. vydání, 52 stran

Vytiskla tiskárna Kaliba s. r. o., U Domu služeb 166/5, 143 00 Praha 4-Modřany

ISBN 978-80-87577-13-4



Ukázka rozdílu deterministické a pravděpodobnostní předpovědi.





ISBN 978-80-87577-13-4