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 události 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 nejohroženějších oblastech České republiky. Významnou roli v protipovodňové ochraně sehrává předpovědní a výstražná povodňová služba, kterou zabezpečuje Český hydrometeorologický ústav prostřednictvím svých předpovědních hydrologických pracovišť. Rozvoj služby a informace o nových výstupech a jejich správného 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“.

OSNOVA

1. **Jaké existují a jak vznikají hydrologické předpovědi**
2. **Manuální hydrometrické předpovědi**
3. **Modelové deterministické předpovědi**
4. **Pravděpodobnostní hydrologické předpovědi**
5. **Přívalové povodně a možnosti jejich predikce**
6. **Využití pravděpodobnostní předpovědi ve vodohospodářské praxi**

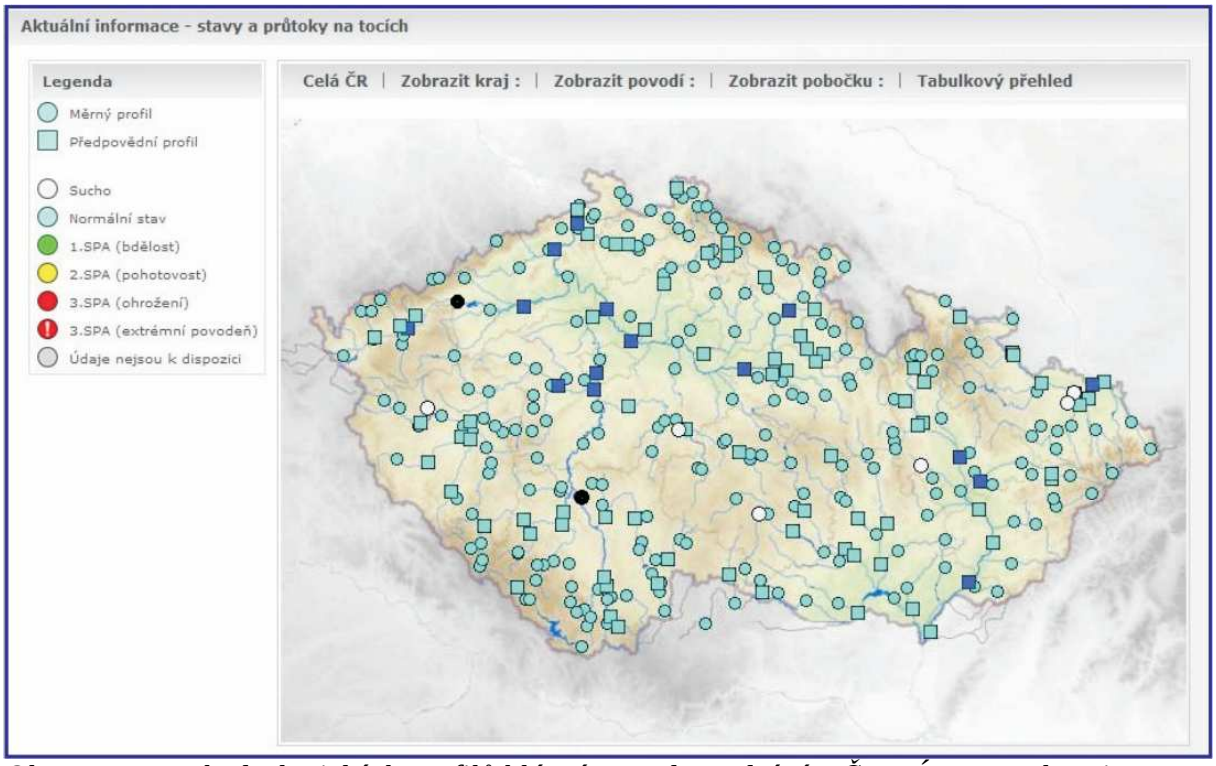
1. Jaké existují a jak vznikají hydrologické předpovědi

Velký rozvoj předpovědní služby v České republice začal zejména po katastrofální červencové povodni v roce 1997, z níž vyplynul 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 nabízí informací více.

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

Modelová hydrologická předpověď je výsledkem matematického výpočtu pohybu vody krajinou. Jelikož tento pohyb je velmi neuspořádaný, jsou fyzikální rovnice proudění vody v modelech značně zjednodušovány a z tohoto důvodu nejsou schopny reálně popsat výsledný vývoj predikovaného odtoku. Navíc zachování doby předstihu i u malých - zdrojových povodí předpokládá počítat hydrologickou předpověď na základě předpovědi srážek (v zimním a jarním období i předpovědi teploty vzduchu), které jsou v okamžiku výpočtu ve formě oblaků či vodní páry mimo území České republiky.

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



Obr. 1.2 Mapa hydrologických profilů hlásné a předpovědní sítě ČHMÚ, čtverečkem jsou označeny profily, pro které je počítána modelová hydrologická předpověď, tmavě modrou a černou barvou jsou označeny profily, pro které je počítána i manuální hydrologická předpověď (Tabulka 2.1)

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)
- Měřených průtoků (v hodinovém kroku)
- Měření sněhové pokrývky – výšky sněhu a vodní hodnoty (1-2x 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 leze kategorizovat různým způsobem:

- na základě způsobu vytvoření
  - manuální, vzniklé manuálním výpočtem
  - 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 (srážky) dat
  - sezónní, udávají výhled na delší období, většinou založený 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 jeden předpoklad vývoje vodního stavu/průtoku na predikované období. Jejich výhodou je srozumitelnost poskytovaných informací a s tím související snadná interpretace. Nevýhodou je, že nevíme dopředu 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 (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 hod.	Ohře	Karlovy Vary	15 hod.
Metuje	Jaroměř	3 hod.	Ohře	Přítok do VD Nechranice	22 hod.
Labe	Přelouč	14 hod.	Ohře	Louny	8 hod.
Labe	Brandýs n. Labem	12 hod.	Labe	Ústí n. Labem	24 hod.
Vltava	Přítok do VD Orlík	7 hod.	Labe	Děčín	27 hod.
Vltava	Vrané nad Vltavou	6 hod.	Odra	Bohumín	5 hod.
Berounka	Beroun	12 hod.	Morava	Olomouc	10 hod.
Vltava	Praha – Malá Chuchle	6 hod.	Bečva	Dluhonice	11 hod.
Labe	Mělník	12 hod.	Morava	Strážnice	24 hod.

Za mimořádné odtokové situace podle plošného 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.

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 koryta.

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 jako termínové předpovědi.

K základním metodám tohoto druhu předpovědí 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. Celkově rozeznáváme dva druhy extrapolace – lineární a nelineární (Hladný, 1970).

2.2 Metoda odpovídajících si průtoků

Princip této metody spočívá na možnosti přiřadit průtoku z horní stanice sdružený, geneticky stejnorodý průtok ve stanici dolní. Přiřazené průtoky jmenujeme odpovídajícími si průtoky a doba, která uplyne mezi jejich výskytem, se nazývá postupovou dobou průtoků. Z těchto termínů se také odvozuje název metody (Hladný, 1970).

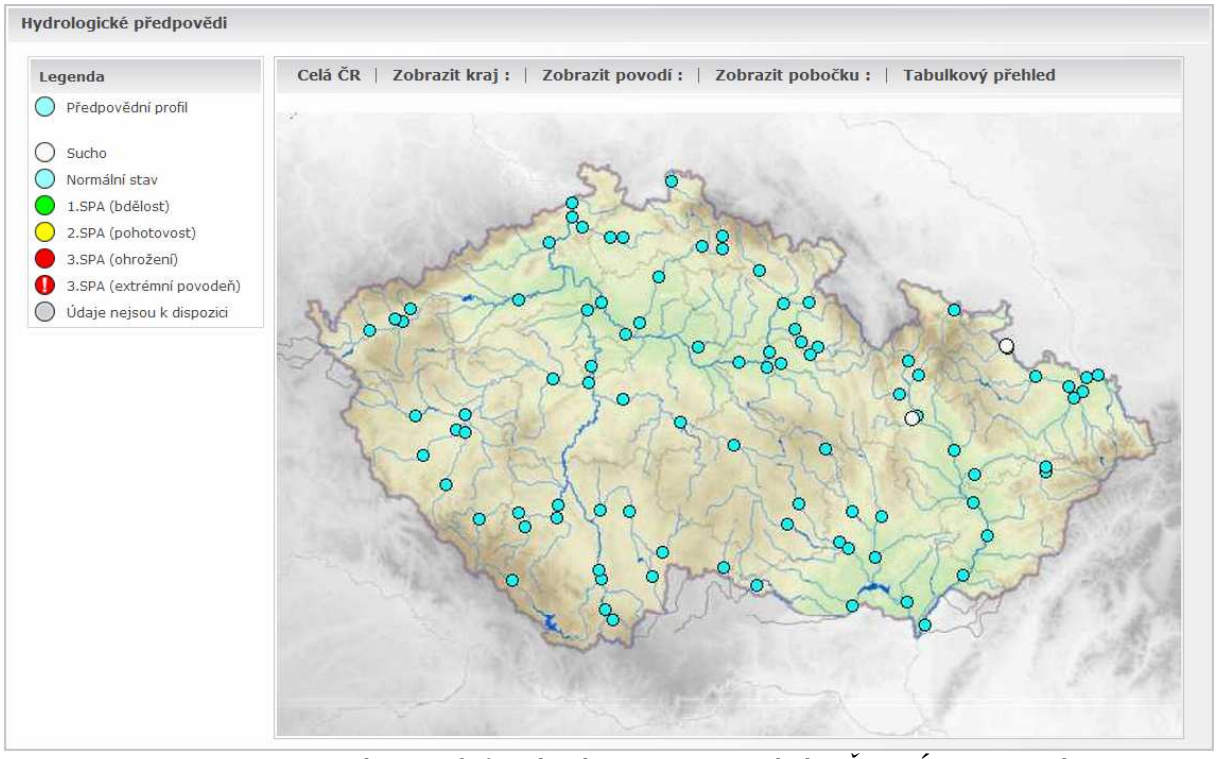
Ve skutečnosti však přitéká do úseku kromě množství z horního profilu obvykle další voda, pocházející z přítoků, výronu podpovrchových dob a při výskytu srážek i z povrchového odtoku z mezipovodí. Souhrnně se tento objem vody, který přitéká do koryta mezi horní a dolní stanicí, nazývá boční přítok.

Metoda postupových dob se pravidelně používá k předpovědi průtoků na území České republiky již od roku 1892, kdy byla nejprve používána na Labi (Harlacher, Richter; 1886). Její použití je omezeno pouze na střední a větší toky. Časový předstih této předpovědi je omezen postupovou dobou na našich tocích, tj. do 24 hodin (dolní tok Labe).

3. Modelové deterministické předpovědi

Modelové deterministické hydrologické předpovědi jsou počítány na předpovědních hydrologických pracovištích Českého hydrometeorologického ústavu pravidelně jednou denně. 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 2011 byly vydávány pro celkem 88 hydrologických profilů (Obr. 3.1).



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

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

Oba hydrologické předpovědní systémy počítají, jak velká část srážkové vody z krajiny odteče 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 dalších hydrologických procesů (například akumulace a tání sněhu, evapotranspirace, pohyb vody v korytech toků, vliv nádrží aj.).

3.1 Postup zpracování předpovědi

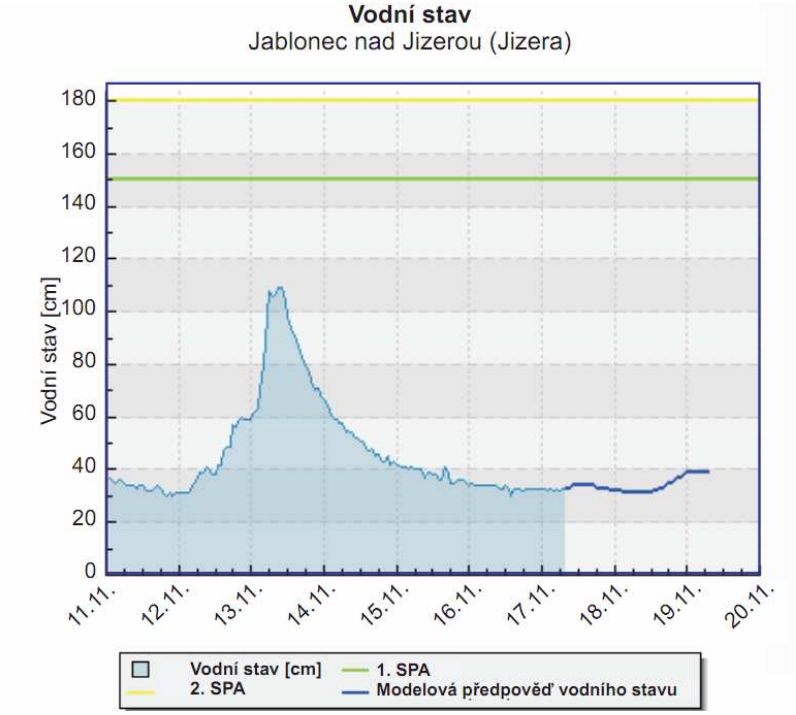
Prvním a velmi důležitým krokem při výpočtu modelové předpovědi je příprava a zpracování vstupních dat. To je prováděno v interní databázi obou předpovědních systému (u AQUALOGu se tato databáze nazývá AquaBase, u HYDROG-S to je databázová aplikace SOMDATA). Tyto databáze jsou napojeny na operativní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

Interní databáze umožňují kontrolu vstupních dat a 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. Chyby v průtokových datech bývají způsobeny poruchou měřících přístrojů nebo změnou průtočnosti koryta, která komplikuje odhad průtoku (například v zimě zámrz řeky). U meteorologických vstupních dat chyby

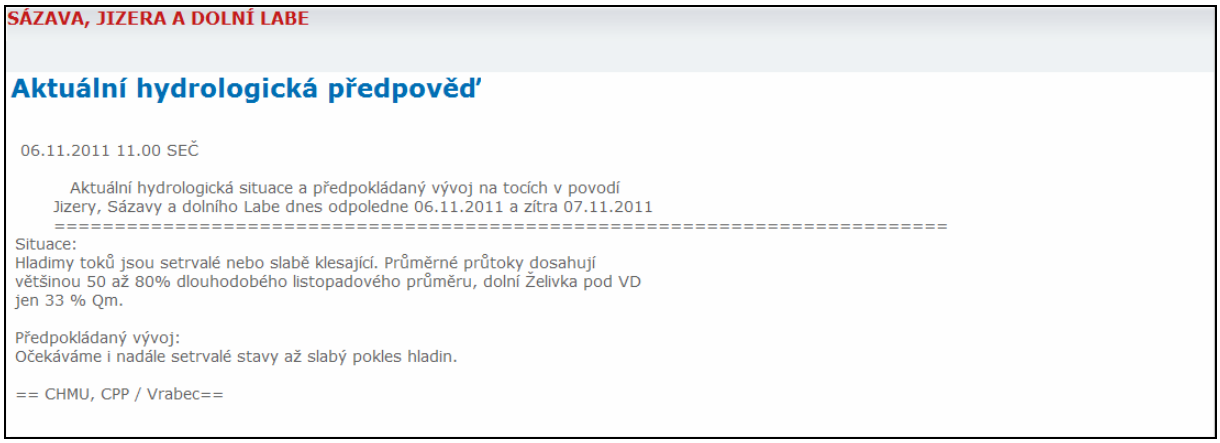
vznikají při automatickém měření srážek v důsledku jejich ucpání, namrzání apod. Hlavním zdrojem nejistoty hydrologických předpovědí jsou však nepřesné předpovědi srážek přebírané z meteorologických modelů. V praxi jsou většinou hodnoty udávané meteorologickými modely korigovány odbornými meteorology 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.

Zkontrolovaná a opravená data vstupují do vlastního předpovědního systému, který při výpočtu postupuje stejně jako voda, tedy od povodí ležící 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 dokonalá shoda mezi simulací modelem a realitou není, kvůli nezbytnému zjednodušení popisu reality modelem, možná.

Posledním krokem v procesu tvorby hydrologické předpovědi je příprava a kontrola výstupů a jejich distribuce uživatelům. Kromě vlastních předpovědních hydrogramů (Obr. 3.2) je vytvářena i textová verze předpovědi pro jednotlivá povodí doplněná komentářem hydrologa o očekávaném vývoji hydrologické situace (Obr. 3.3).



Obr. 3.2 Ukázka modelové hydrologické předpovědi publikované na internetových stránkách ČHMÚ



SÁZAVA, JIZERA A DOLNÍ LABE

Aktuální hydrologická předpověď

06.11.2011 11.00 SEČ

Aktuální hydrologická situace a předpokládaný vývoj na tocích v povodí
Jizery, Sázavy a dolního Labe dnes odpoledne 06.11.2011 a zítra 07.11.2011

Situace:
Hladimy toků jsou setrvalé nebo slabě klesající. Průměrné průtoky dosahují
většinou 50 až 80% dlouhodobého listopadového průměru, dolní Želivka pod VD
jen 33 % Qm.

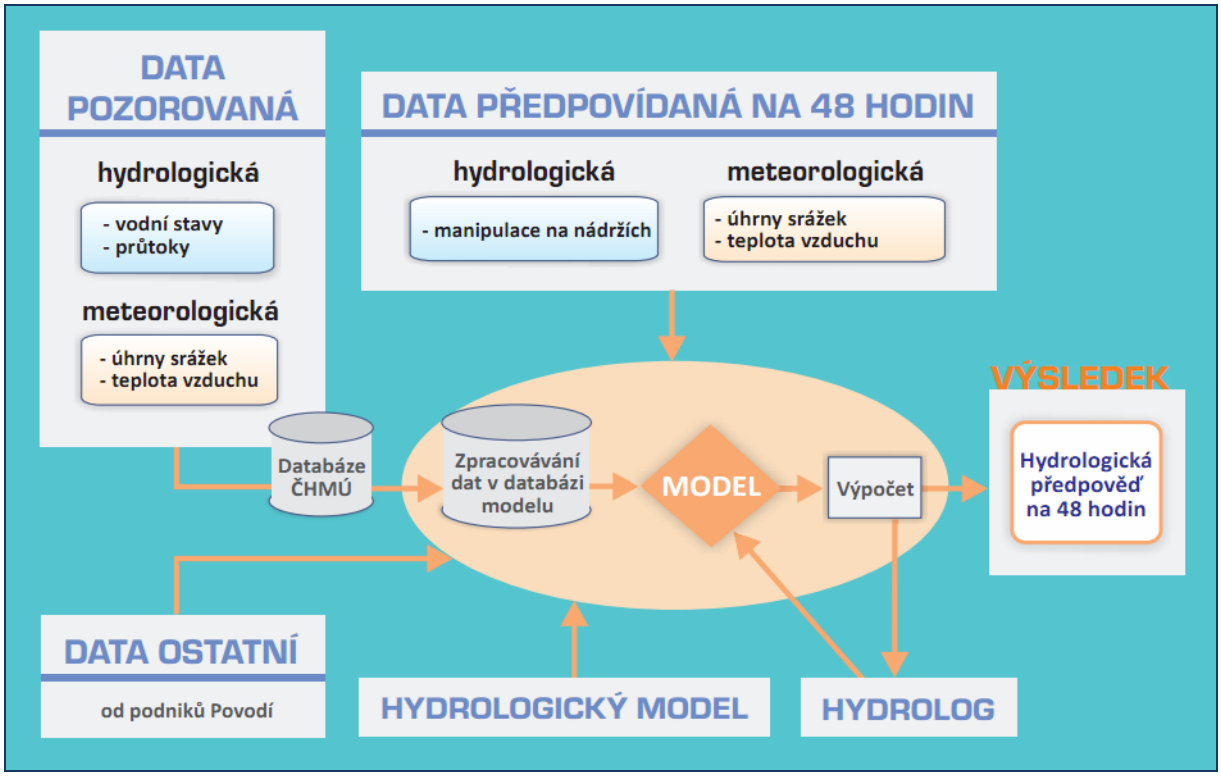
Předpokládaný vývoj:
Očekáváme i nadále setrvalé stavy až slabý pokles hladin.

== CHMU, CPP / Vrabec==

Obr. 3.3 Ukázka textové hydrologické předpovědi publikované na internetových stránkách ČHMÚ

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

Základní schéma postupu zpracování hydrologické předpovědi pomocí předpovědních systémů znázorňuje následující Obr. 3.4.



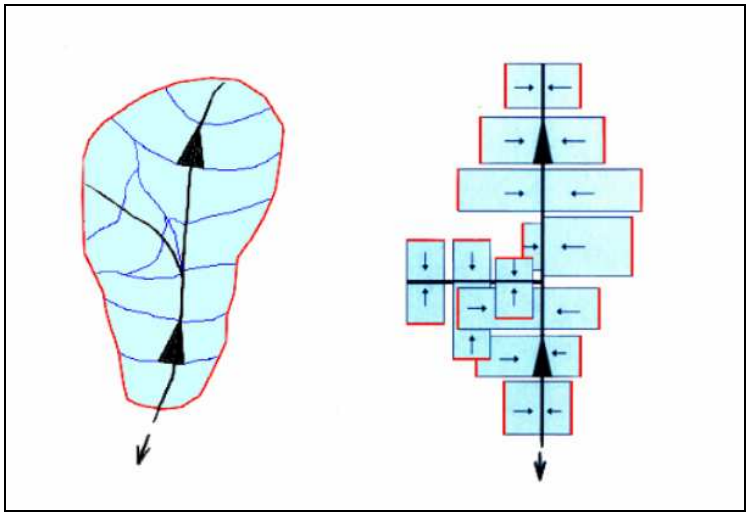
Obr. 3.4 Schéma hydrologických systémů AQUALOG a HYDROG-S

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 Moravy a Odry.

Model používá schematizaci povodí, které je popsáno prostřednictvím grafů s vyznačením tzv. zavěšených ploch, hran a vrcholů (Daňhelka, 2007), jejich pozice a funkce v grafu je dobře patrná z následujícího schématu (Obr. 3.5).



Obr. 3.5 Princip schématizace povodí modelem HYDROG-S

V grafu hrany představují koryta, vrcholy reprezentují uzly říční sítě nebo místa vodohospodářských zařízení, plochy odpovídají jednotlivým dílčím povodím (mezipovodím), z nichž je odtok realizován do příslušného úseku koryta toku. Schématizované 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 infiltrací. Ostatní srážky pak tvoří plošný odtok, který je 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 (Daňhelka, 2007).

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

Simulace tání sněhu je řešena kalibrovaným degree-day modelem.

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 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 Systém) americké National Weather Service (NWS, 2011).

Operativně je AQUALOG používán od roku 2001. Jednotlivé 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 akumulaci a tání sněhové pokrývky je používán model SNOW17. 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 (tání je dáno akumulací teploty a koeficientem intenzity tání v závislosti na ní). 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 (NWS, 2011)

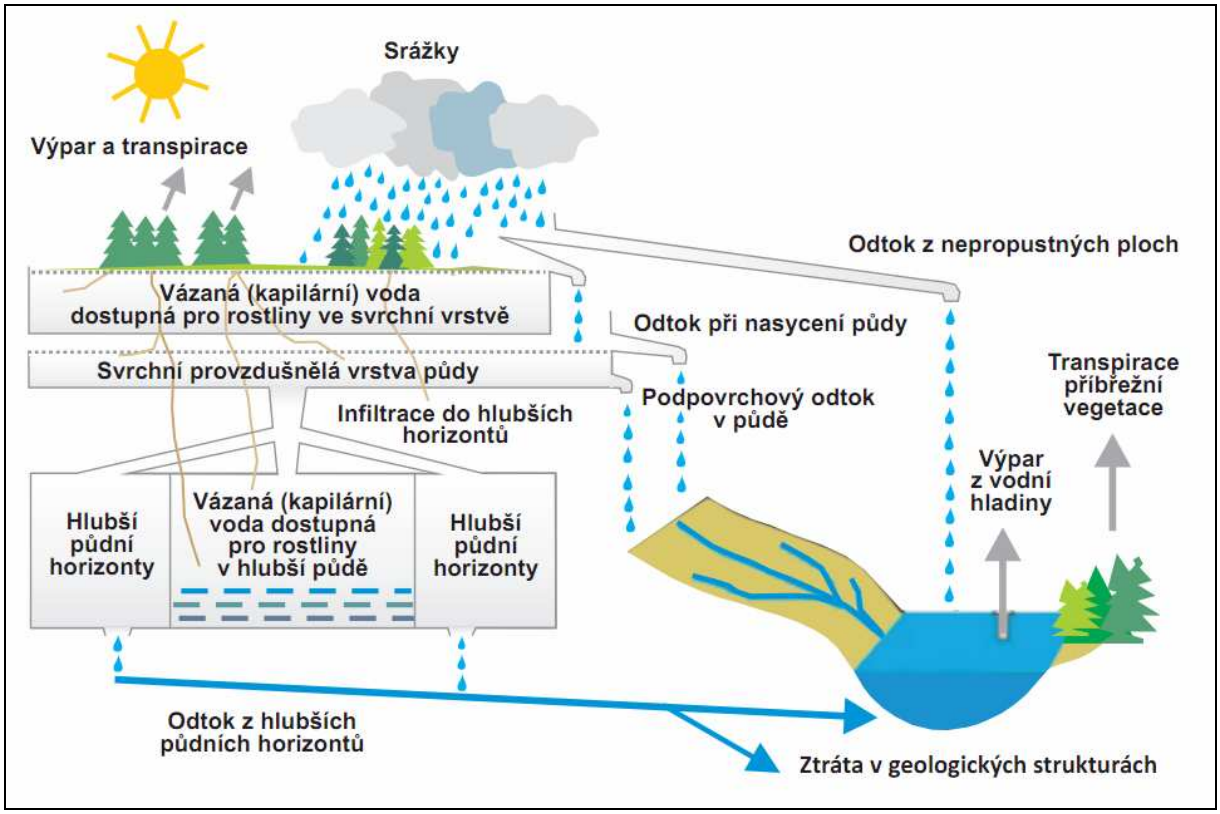
Pro potřeby modelu mohou být povodí rozdělena do několika výškových zón, pro něž je množství vody akumulované ve sněhové pokrývce simulováno odděleně. Model tak dokáže lépe vystihnout distribuci sněhových zásob v povodí. Modelované množství sněhu v povodí je aktualizováno podle pravidelného týdenního měření a vyhodnocování zásob vody ve sněhu.

- **Srážkoodtokový model**

Systém AquaLog používá srážkoodtokový model SACRAMENTO (SAC-SMA). Sacramento patří mezi nejznámější a nejrozšířenější modely ve 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 do v systému níže položených zón, anebo odtéká do říční sítě (Obr. 3.6). Odtok tvoří šest různých složek:

- přímý odtok, tj. odtok z ploch, jež jsou dočasně nepropustné - po dosažení nasycenosti půdní zóny,

• odtok z nepropustných ploch,
• povrchový odtok, míněn je odtok jako plošný jev,
• podpovrchový odtok, tj. odtok vytvořený přebytkem vody v zónách spojených s vegetačním krytem,
• dodatkový podzemní odtok, tj. sezónní 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).



Obr. 3.6 Struktura srážkoodtokového modelu SACRAMENTO

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. Model je v operativě ČHMÚ provozován kontinuálně v hodinovém výpočetním kroku. Počáteční podmínky (naplnění jednotlivých zón modelu) jsou přenášeny mezi jednotlivými výpočty modelu. V operativním provozu je prováděna jejich interaktivní optimalizace na základě asimilace pozorovaných průtoků (Daňhelka, 2007).

- **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 objemů na vodních dílech. ČHMÚ v operativním provozu tento model nevyužívá a vkládá do předpovědního systému hodnoty naměřeného a předpokládaného odtoku z nádrží poskytované s.p. 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 $km.h^{-1}$, K – intenzita deště v $mm.h^{-1}$, 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.

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 vzdutí, či průlomových vln.

Model FLDWAV je hydraulický model pro stromové i okružní říční sítě. Je standardním hydraulickým modelem nestacionárního proudění ve stromové říční síti, využívající implicitní schéma Preismana. Pracuje pro stromové i okružní sítě a umožňuje aktualizaci (updating) řešení v dolním uzávěrovém profilu.

3.3.1 Interaktivní nástroje systému AquaLog

Interaktivní režim předpovědi v systému AquaLog umožňuje hydrologům tři základní možnosti ovlivnění průběhu výpočtu a jeho výsledků: změnu (optimalizaci) počátečních podmínek výpočtu, změnu 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). Automatický optimalizační proces spočívá v iteračním pokusu o odhad počátečních podmínek (v jistých nastavených mezích) tak, aby simulovaná průtoková řada co nejlépe odpovídala řadě pozorované v prvních osmi dnech výpočtu.
• Modul MODS umožňuje manuální změnu některých počátečních podmínek (nasycení jednotlivých zón, množství sněhu) a vybraných parametrů (například 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. Updatováním 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.

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 budoucím vývoji pravděpodobnostní funkcí, ze které je například možné určit riziko překročení určitého povodňového stupně. V případě meteorologické předpovědi, se kterou jsme denně konfrontování, si lidé již zvykly na určitý subjektivní odhad nejistoty předpovědi (například, že předpovědi na pátý předpovědní den jsou méně spolehlivé než předpovědi na druhý den). U hydrologických předpovědí, které jsou „atraktivní“ pouze v době hrozících 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 mířit až k udání nepřesné předpovědi jako jejich příčiny. To je však zavádějící. Zodpovědnosti 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 svojí 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 (*Krzysztofowicz* [*2001a*]) do čtyř bodů:

1. Pravděpodobnostní 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.

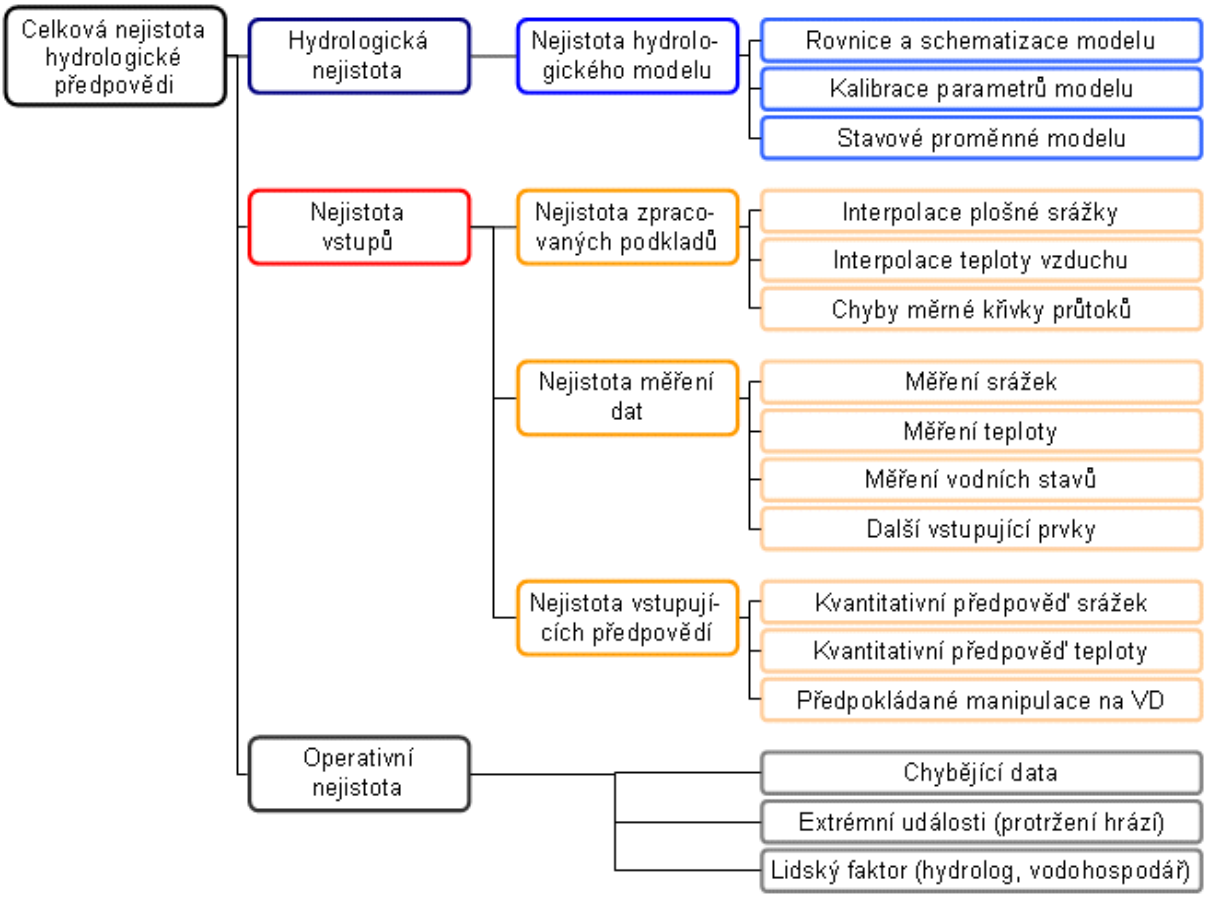
Vývoj pravděpodobnostních předpovědí a jejich zavedení mezi produkty prognózních služeb je velkým tématem operativní hydrologie v poslední dekádě. Je to nelehký úkol nejen pro vědce a pro prognózní službu, ale i pro samotné uživatele předpovědí. Nahradit bodový odhad průtoku pravděpodobnostní funkcí 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. Pravděpodobnostní hydrologické předpovědi jsou proto zacíleny především na odborníky vodohospodáře a lidi zapojené do řízení protipovodňové ochrany.

Cílem tohoto textu je seznámit odborníky, kteří pracují s hydrologickou předpovědí, s metodikou přípravy pravděpodobnostních hydrologických předpovědí, jejich limity a způsobem interpretace.

4.2 Nejistota hydrologické předpovědi

Pravděpodobnostní 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 rozptyl 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 například Daňhelka [2007] (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 dosud nebyly změřeny a musí být obsaženy v meteorologické předpovědi (QPF), (*Vlasák* [*2010*]). 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 (nasycenosti 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 (2000, 2001a, 2001b, Krzystofowitcz and Herr 2001) a dalších. O důležitosti QPF pro operativní hydrologické modelování svědčí řada studií a prací, problematice byla dokonce věnována speciální čísla Journal of Hydrology (Collier, Krzystofowitcz eds., 2000, Krzysztofowicz, Collier eds. 2004) a věnuje se jí například projekt HEPEX (Hydrological Ensemble Prediction Experiment – www.hepex.org).

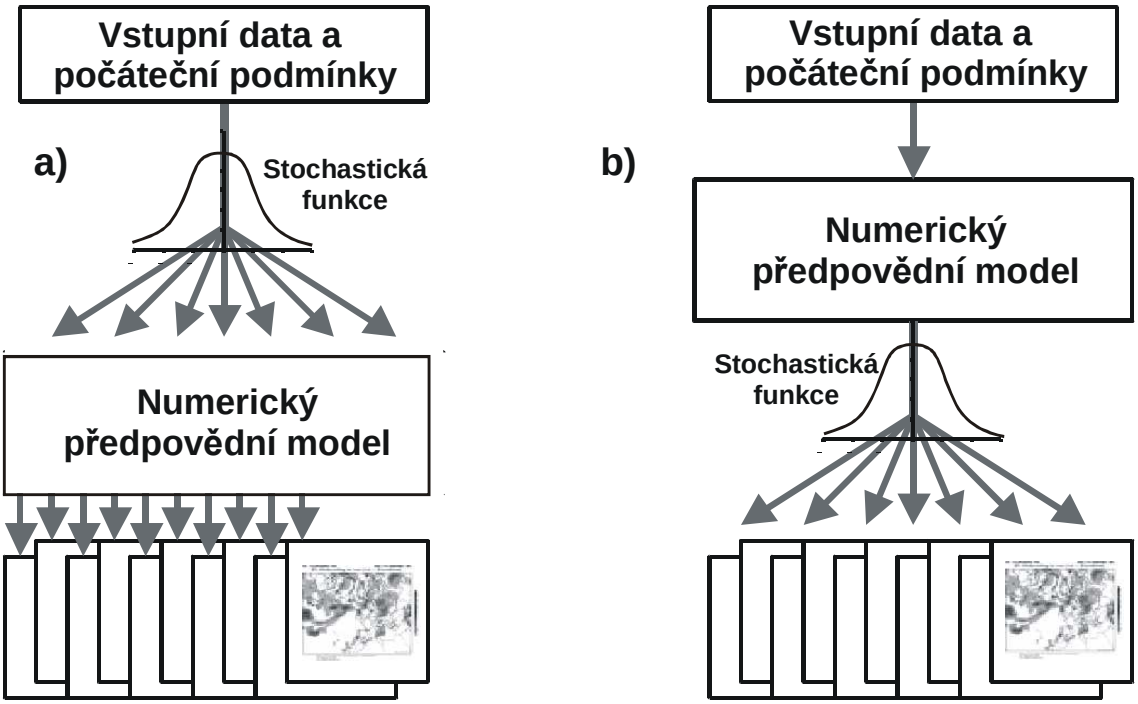
Obecně existuje několik různých přístupů k problematice využití QPF. Tyto přístupy lze v zásadě rozdělit do tří skupin:

- 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 km^2), kde je cílem předpověď povodní s předstihem 1 až 2 dny,

a jiný přístup bude zvolen pro povodí o velikosti okolo 100 000 km^2 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 ansámblů 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 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.



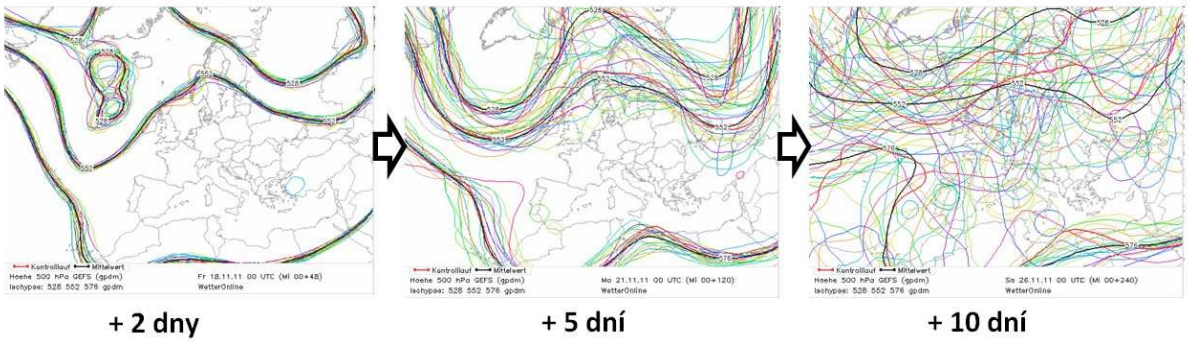
Obr. 4.2 – Principy tvorby variantních meteorologických předpovědí pro vstup do hydrologického modelu.

Za ideální postup tvorby pravděpodobnostní hydrologické předpovědi lze považovat kombinaci různých přístupů a využití jejich předností a možností. Pro předpověď na období následujících 1 až 3 dnů, tedy na dobu, která je předpovídána lokálními meteorologickými modely, je nejvhodnější využít přímo variantních výstupů (ansámblů), pokud jsou vytvářeny, nebo postprocessingu deterministické předpovědi těchto podrobných meteorologických modelů.

V delším výhledu, cca do 15 dnů, kam lokální modely již nezasahují, je nejvhodnější 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 zjistitelné 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. 4.3 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.

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 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 balónová 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. Jejich předpovědi mají zpravidla delší předstih (8 až 15 dní), ale také velmi hrubé prostorové rozlišení (řádově stovky km^2). Proto nejsou vhodné pro hydrologickou prognózu u většiny předpovídaných povodí v ČR. Vhodnější alternativou jsou lokální ansámblové systémy, které využívají výstupů z globálních modelů a zpřesňují je výpočtem (tzv. downscalling) na regionálním NWP s jemnějším prostorovým rozlišením. Příkladem je systém COSMO-LEPS (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 má v plánu zavést výpočet krátkodobé hydrologické pravděpodobnostní předpovědi do provozu v roce 2012. K tomuto účelu se budou využívat ansámbly předpovědního systému ALADIN – LAEF (http://www.rclace.eu). ALADIN – LAEF produkuje šestnácti členný 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 už 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 km^2, a 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

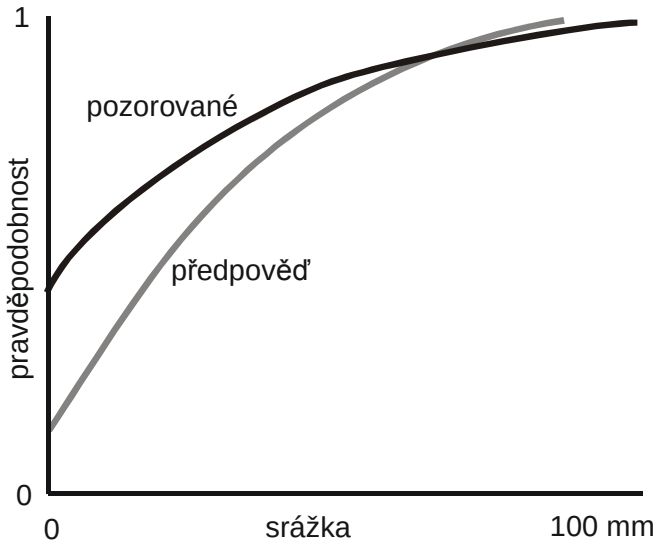
Pravděpodobnostní předpověď srážek a teploty vzduchu lze získat také kombinací výstupů deterministických běhů různých NWP, které se překrývají v zájmové oblasti. Tento přístup využívá skutečnosti, že v Evropě každá země provozuje jeden nebo i více NWP, které pokrývají zpravidla mnohem větší území než to, pro které je určena předpověď počasí. V současné době probíhá projekt PEPS, v rámci kterého jsou výstupy z NWP zúčastněných zemí shromažďovány a vyhodnocovány statisticky (zajišťuje německá meteorologická služba 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 ansámbly 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 lepších výsledků dosáhnout metodou získání pravděpodobnostních srážkových vstupů postprocessingem deterministických QPF předpovědí (viz Obr. 4.2b).

Základním principem při statistickém postprocessingu QPF je vyhodnocení úspěšnosti historických QPF za účelem získání pravděpodobnostního rozložení chyby předpovědi. Vyhodnocení předpovědí 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 výskyt srážek a malé srážkové úhrny a naopak většinou podhodnocují srážkové extrémy. Porovnání typických kumulovaných pravděpodobnostních funkcí velikosti pozorované a předpovídané srážky vypadá jako na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 – Kumulativní pravděpodobnostní funkce pozorovaných a předpovídaných srážek.

Na ČHMÚ byla testována metoda založená na vyhodnocení podmíněné pravděpodobnosti velikosti skutečné srážky, kdy jako podmínka se uvažuje srážková předpověď. (*Daňhelk*a [*2004*]) a metoda využívající stochastického generátoru náhodného pole srážek metodou Monte Carlo při stanoveném intervalu předpovědi srážek (*Březková* [*2010*]).

4.5 Střednědobé pravděpodobnostní hydrologické předpovědi

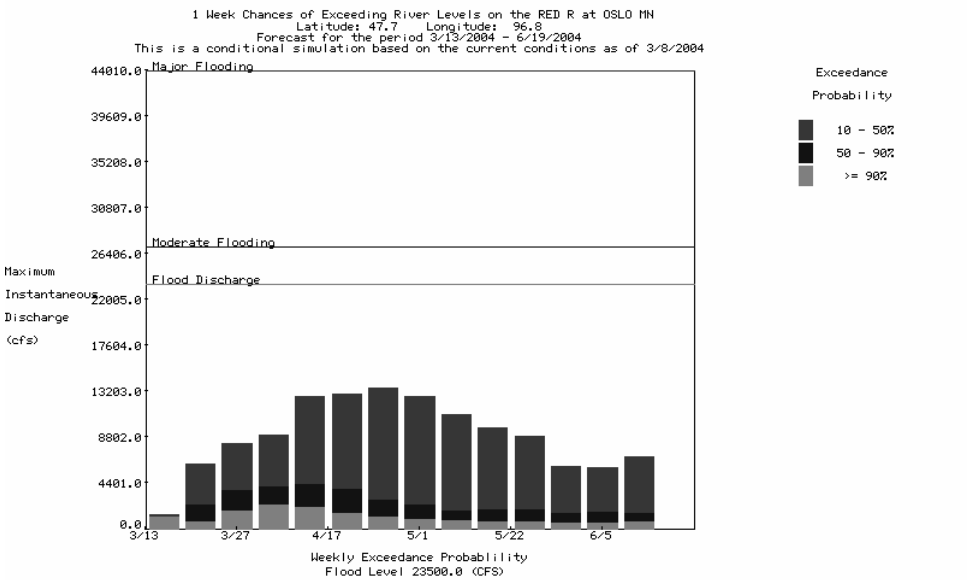
Předpovědi odtoku s předstihem deset a více dní jsou určeny zejména pro účely hospodaření s vodou. Jejich cílem není předpovědět konkrétní hodnotu průtoku, a proto tyto předpovědi nejsou ani vydávané v deterministické variantě. Střednědobé hydrologické předpovědi dosahují většinou mimo dosah předpovědního 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 rozptyl možných variant pravděpodobnostní meteorologické předpovědi se blíží rozptylu klimatických měření. Proto jsou střednědobé hydrologické předpovědi založené na historických meteorologických pozorováních.

Příkladem je v současnosti operativně používaný systém 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 jedním ze vstupujících členů ansámblů. Daný přístup nepoužívá předpověď srážek, ale jakousi statistickou „klimatickou“ předpověď. Vliv nasycení povodí přitom v čase klesá, takže třeba za měsíc se již nedá vystopovat. Úspěšnost výsledků tohoto přístupu je však srovnatelná s využíváním QPF ansámblu z dlouhodobých globálních modelů (*Clark, Hay,* [*2003*]).

V rámci řešení grantového úkolu MŽP SP/1c4/16/07 byla v ČHMÚ navržena metoda pro výpočet střednědobých hydrologických předpovědí ESP. Jejím základem je 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. Ta umožňuje korektnější výběr odtokových variant a také podmíněný výběr, determinovaný střednědobou předpovědi počasí. Krok výpočtu modelu byl zkrácen na 1 hodinu, ale výstupy budou pravděpodobně 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 v nádrži. I proto jsou předpovědi ESP vydávány nejen pro pravděpodobnost překročení průtoků, ale i pro pravděpodobnost překročení objemu odtoku. Předpovědi systému ESP jsou prezentovány na internetových stránkách NWS (http://nws.noaa.gov) – viz Obr. 4.5.



Obr. 4.5 - Ukázka výstupu ESP – pravděpodobnost překročení průtoku v týdenním kroku (http://nws.noaa.gov).

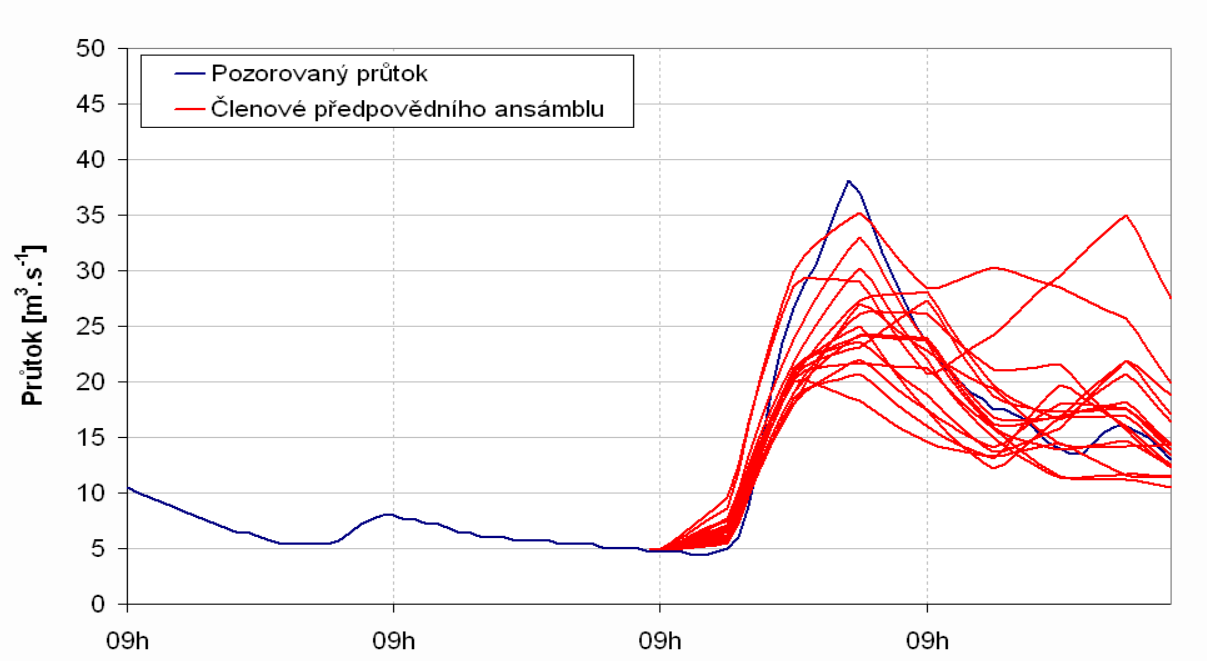
4.6 Způsoby prezentace pravděpodobnostních předpovědí

Všechny uvedené metody získání pravděpodobnostní hydrologické předpovědi jsou založené na opakovaném výpočtu hydrologického modelu. Výstupem je tedy několik časových řad (variant) průběhu průtoku. Tyto řady procházejí před publikováním procesem zpracování do grafického výstupu. Metod pro zobrazování pravděpodobnostní předpovědi je celá řada. V ideálním případě by výsledné zobrazení mělo obsahovat informaci o nejistotě předpovědi, mělo být 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.

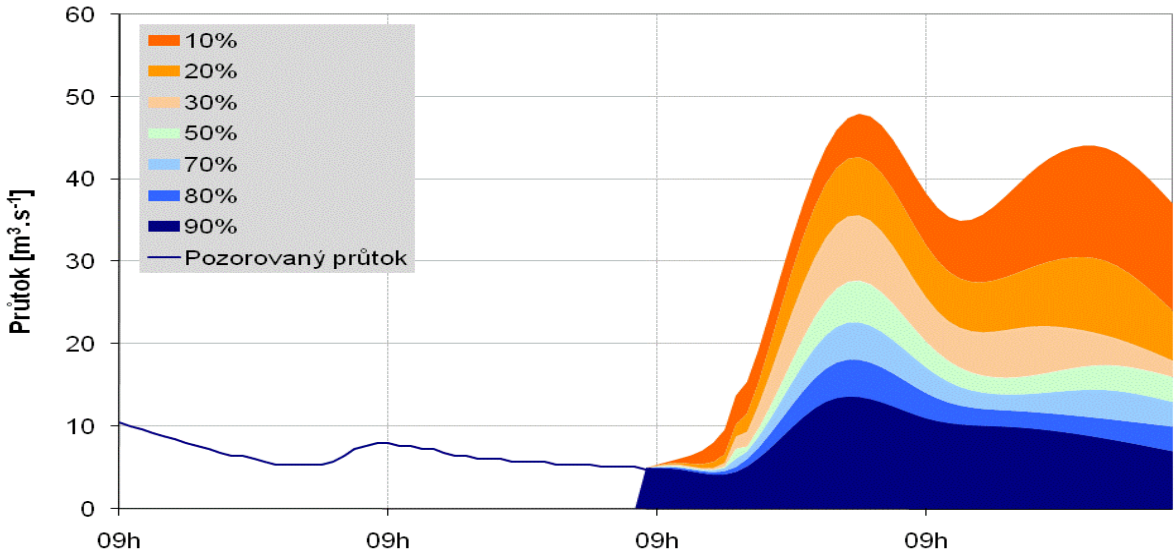
Nevýhody: - nelze odečíst pravděpodobnosti dosažení určitého průtoku,
- graf je hůře čitelný při velkém počtu členů ansámblu.



- **Graf pravděpodobnostních hladin** – pro každou časovou pořadnici výpočtu jsou vypočteny pravděpodobnostní hladiny, které jsou následně propojeny do linií nebo ploch.

Výhody: - je dobře čitelný,
- je možné odečíst pravděpodobnost překročení průtoku v konkrétní čas.

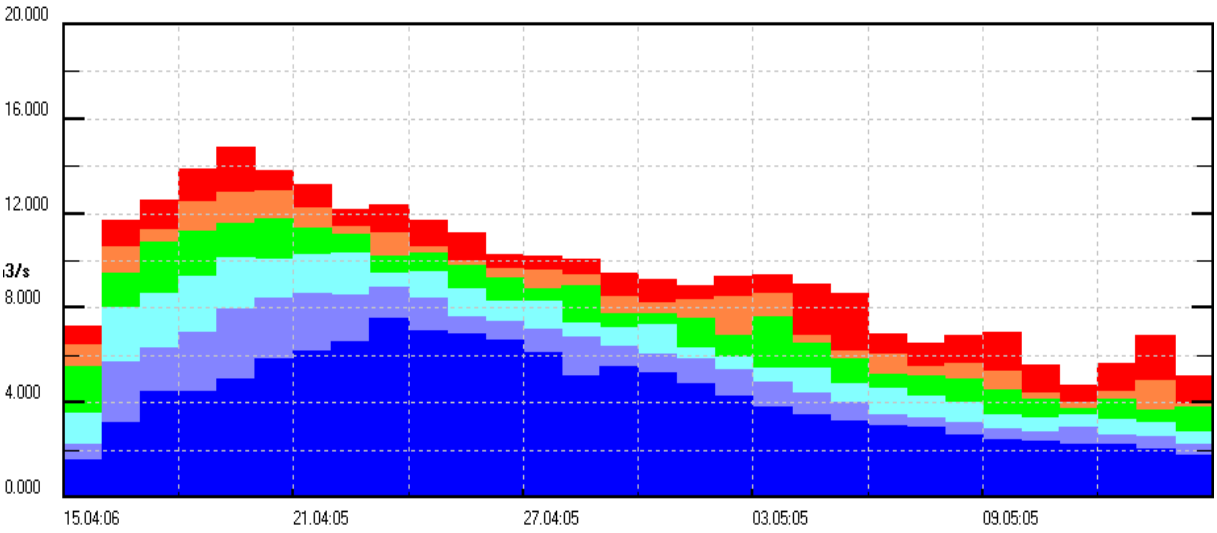
Nevýhody: - vytváří mylný dojem o časovém průběhu povodně – povodeň může kulminovat v jiný čas než je vrchol vlny v grafu.



- **Sloupcový graf** – používá se 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 časový interval.

Nevýhody: - hodí se spíše pro předpověď objemu odtoku.

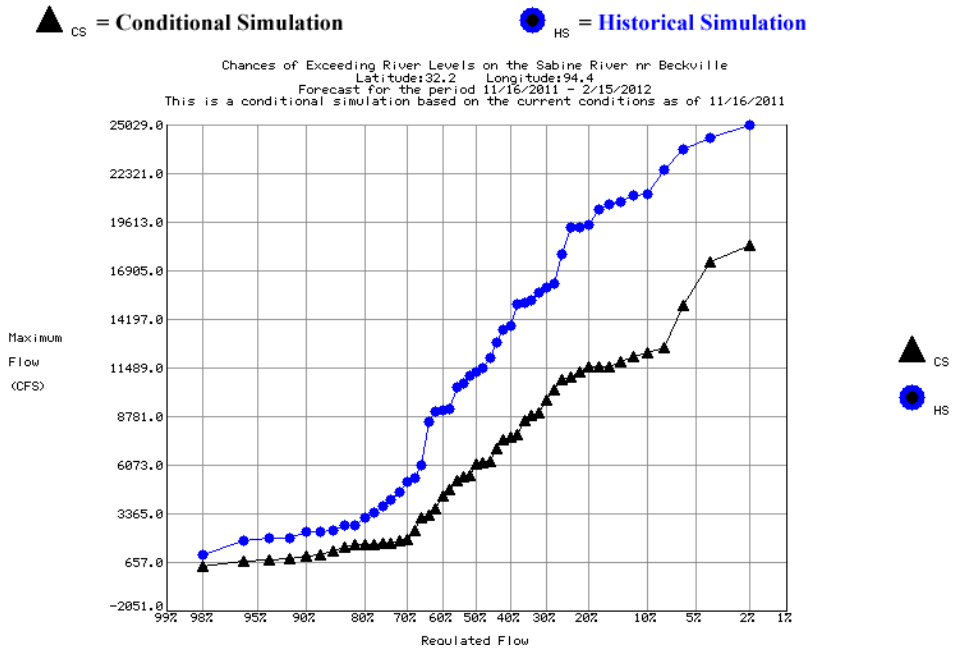


- **Čára překročení** – používá se pro střednědobé pravděpodobnostní předpovědi. Vyznačuje pravděpodobnost s jakou bude v celém v předpovědním horizontu překročen maximální průtok nebo celkový objem odtoku.

Výhody: - jednoduché odečítání pravděpodobnosti výskytu dané hodnoty,
- je možné zobrazit přes sebe více variant výběru ansámblů
- používá se u střednědobých předpovědí.

Nevýhody: - hůře čitelné pro lidi bez vyššího matematického vzdělání,
- nezobrazuje časový průběh předpovědi.

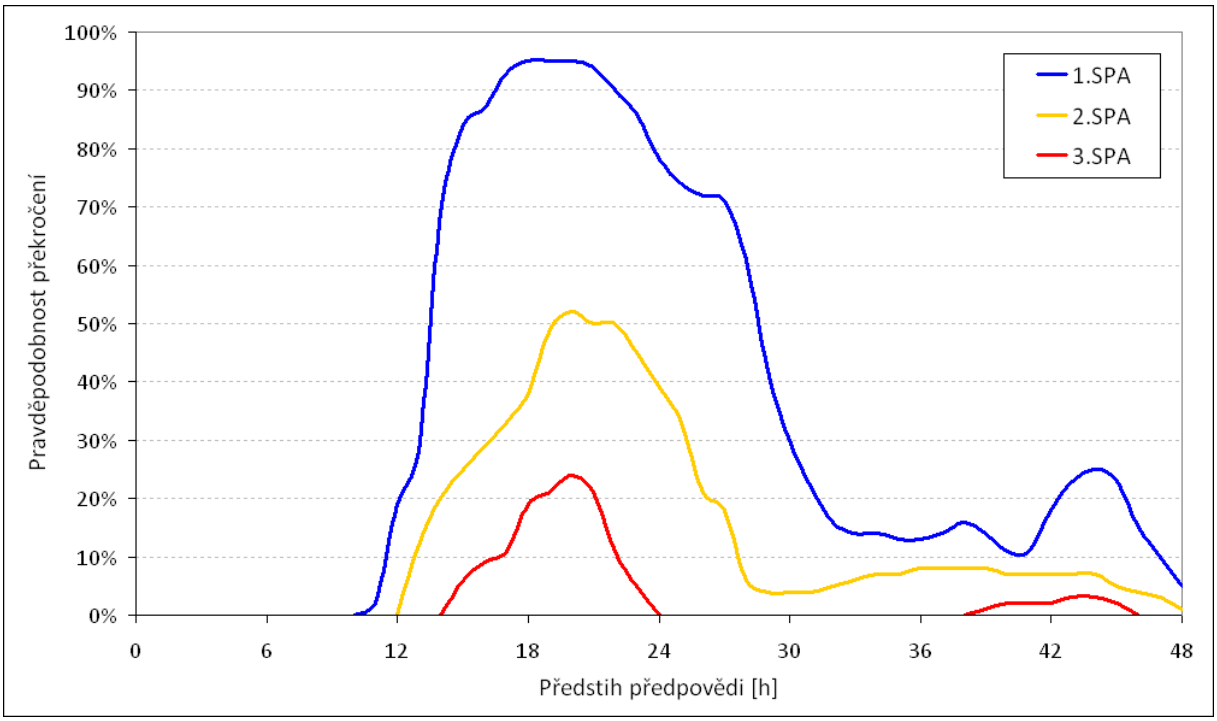
- zobrazení neumožňuje odečíst pravděpodobnost výskytu jiného prahového průtoku (stavu), než je v legendě uveden.



- **Graf časového vývoje pravděpodobnosti 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 průtoku (stavu), než je v legendě uveden.



- **Tabulka pravděpodobnosti překročení** – v tabulce jsou vypsány 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 několik intervalů,
- zobrazení neumožňuje odečíst pravděpodobnost výskytu jiného prahového průtoku (stavu), než je v tabulce uveden.

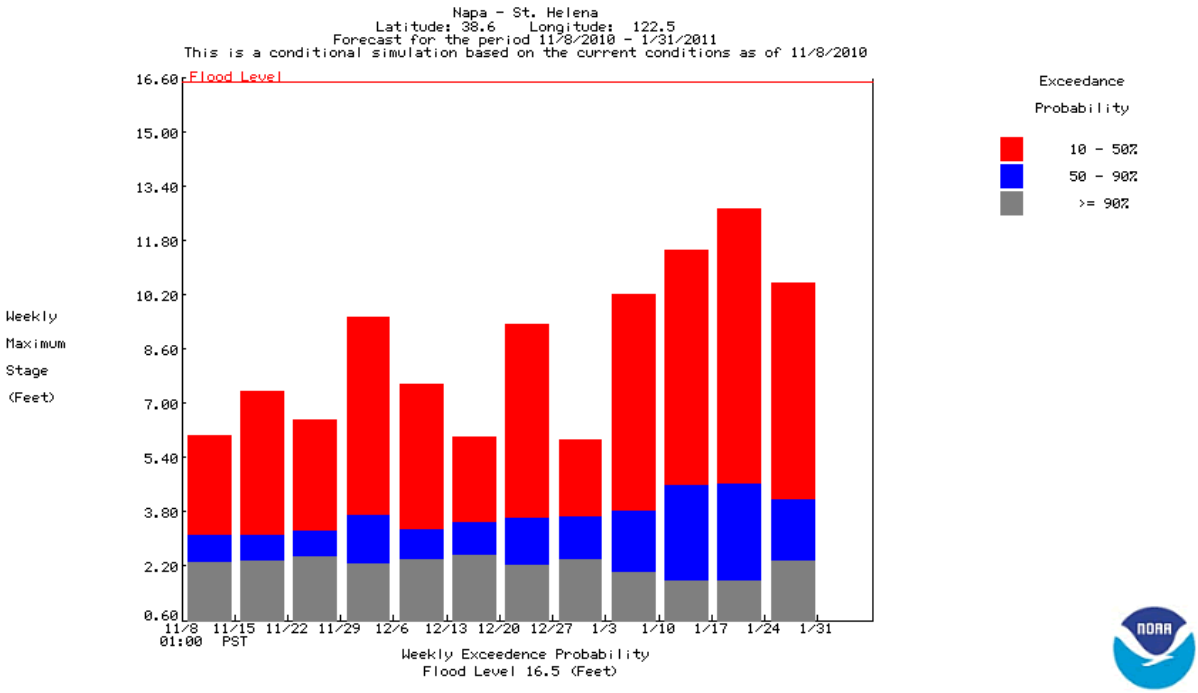
Pravděpodobnost překročení 1.SPA

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

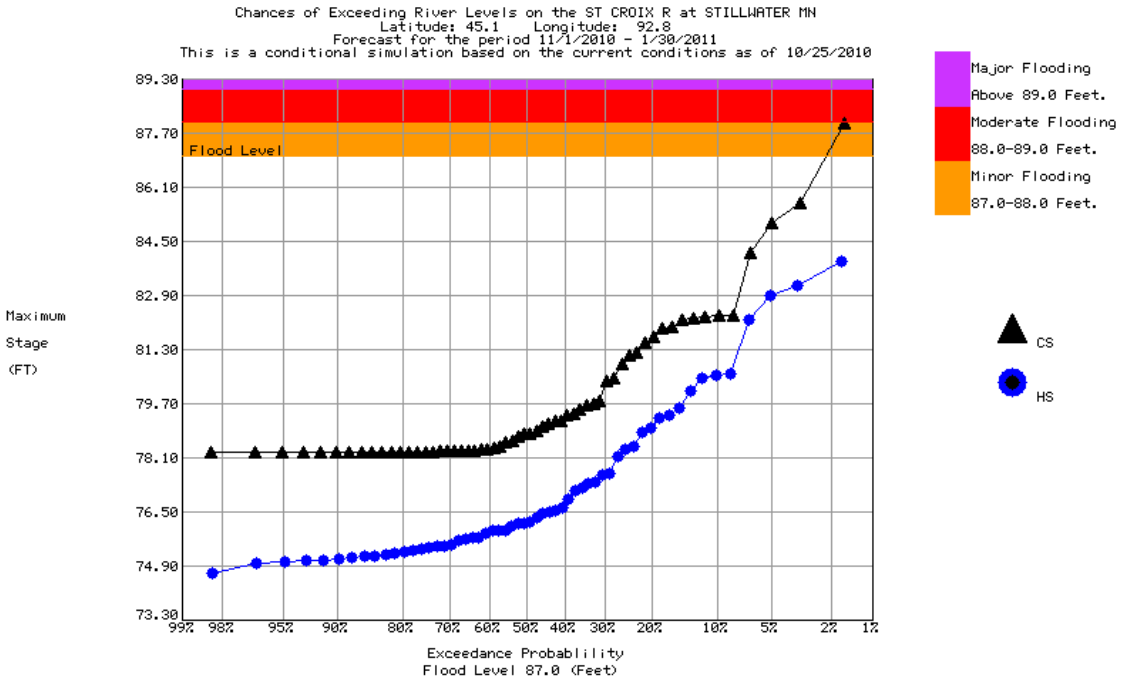
4.7 Pravděpodobnostní předpovědi ve světě

Pravděpodobnostní předpověď průtoků je prozatím převážně experimentální záležitostí odborných studií. Ve světě bychom tak našli pouze několik málo případů publikování pravděpodobnostních předpovědí pro veřejnost i pro řízení povodní.

Americká National Weather Service (http://nws.noaa.gov) dlouhodobě provozuje systém ESP, který je založen na simulaci variant historických výskytů a kombinací meteorologických prvků (teploty vzduchu a srážek), které jsou použity jako scénáře „co by se stalo když?“.

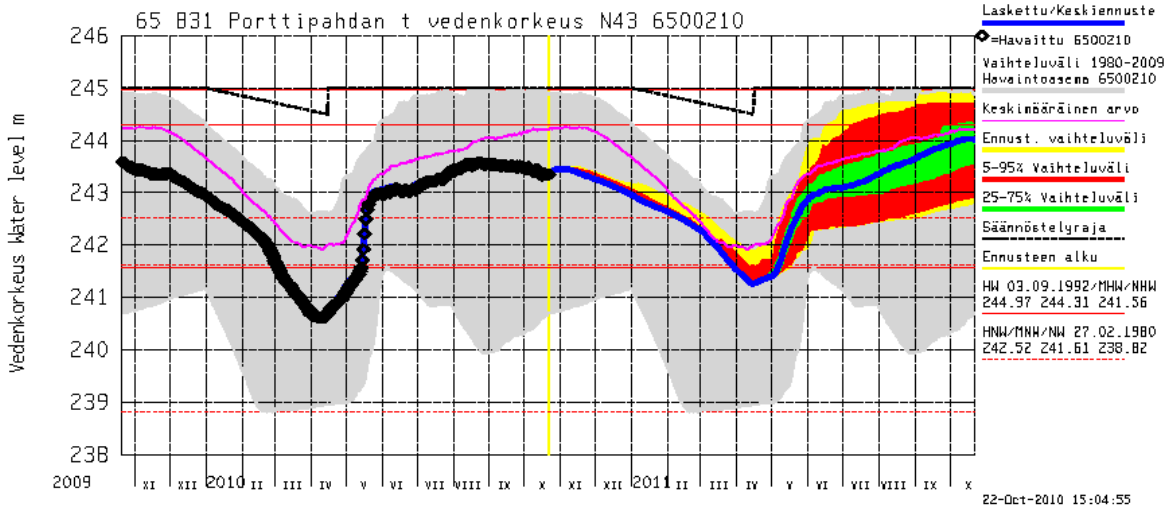


Obr. 4.6 Ukázka pravděpodobnostní předpovědi systému ESP americké služby NWS. Každý sloupec odpovídá očekávané pravděpodobnosti velikosti maximálního vodního stavu v průběhu daného týdne předstihu předpovědi, který dosahuje celkem 12 týdnů. (zdroj: http://nws.noaa.gov)



Obr. 4.7 Ukázka pravděpodobnostní předpovědi systému ESP americké služby NWS. Graf ukazuje pravděpodobnost výskytu maximálního vodního stavu v následujícím 90denním období. Na ose x je očekávaná pravděpodobnost, na ose y vodní stav. Černá čára ukazuje aktuální pravděpodobnost na základě stávajícího nasycení povodí, modrá čára ukazuje tzv. klimatický normál, čili skutečnost, která byla v dané části roku dlouhodobě pozorována. Takovouto předpověď lze tedy interpretovat tak, že následující období bude pravděpodobně nadprůměrné z hlediska dosažení vysokých vodních stavů. (zdroj: http://nws.noaa.gov)

Podobný přístup pro tvorbu pravděpodobnostních předpovědí na období až jednoho roku dopředu vydává Environmentální institut ve Finsku (http://www.ymparisto.fi) zejména pro výšku hladiny vybraných jezer, kde velkou roli hraje množství sněhu v předjaří a také počáteční výška hladiny na konci léta.

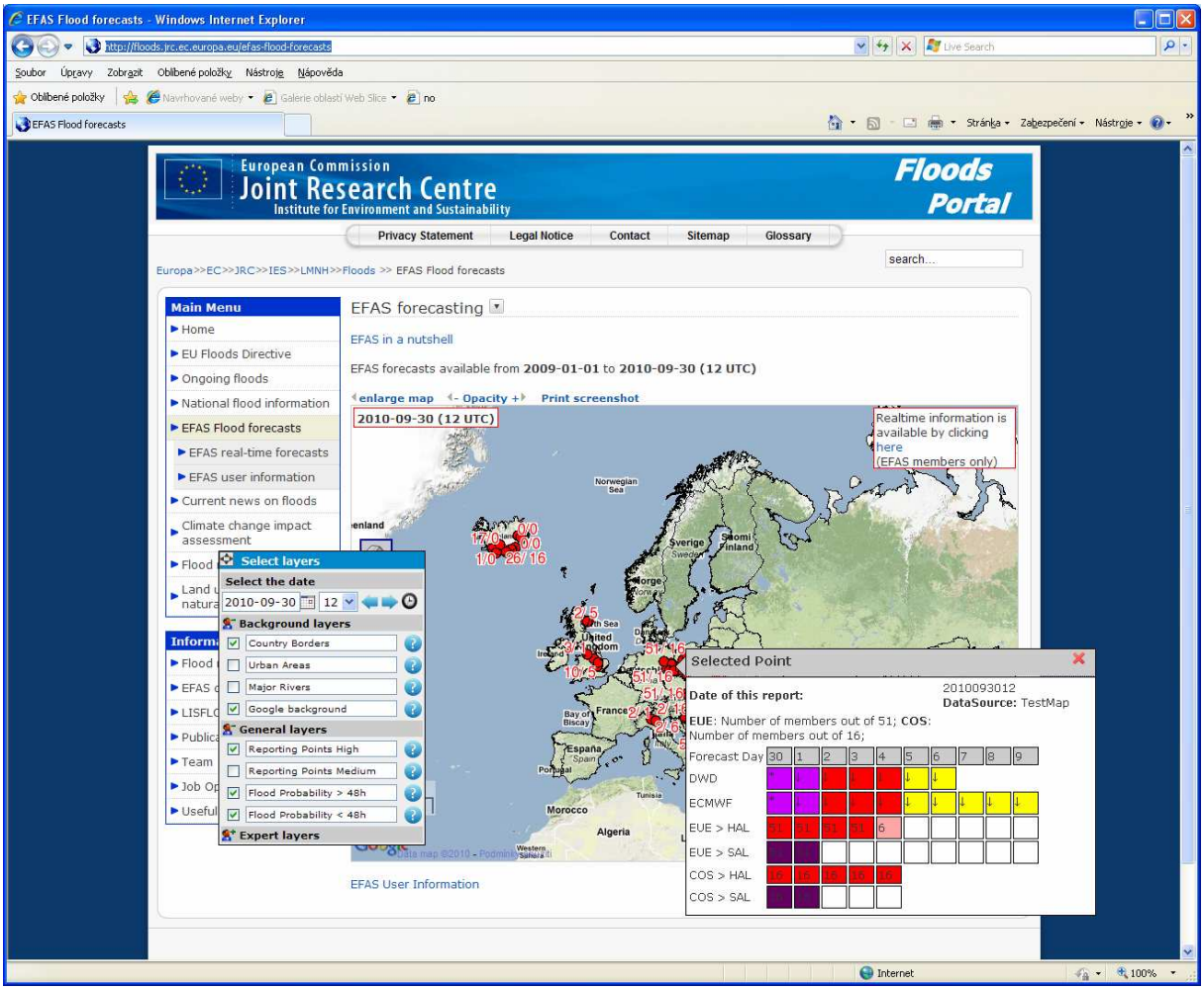


Obr. 4.8 Ukázka pravděpodobnostní předpovědi finského Environmenálního institutu. Roční predikce výšky hladiny v jezeře. Šedou barvou je naznačen historický pozorovaný rozptyl hodnot, barevně pak pravděpodobnostní odhad budoucího vývoje na základě současného stavu povodí. (zdroj: http://www.ymparisto.fi).

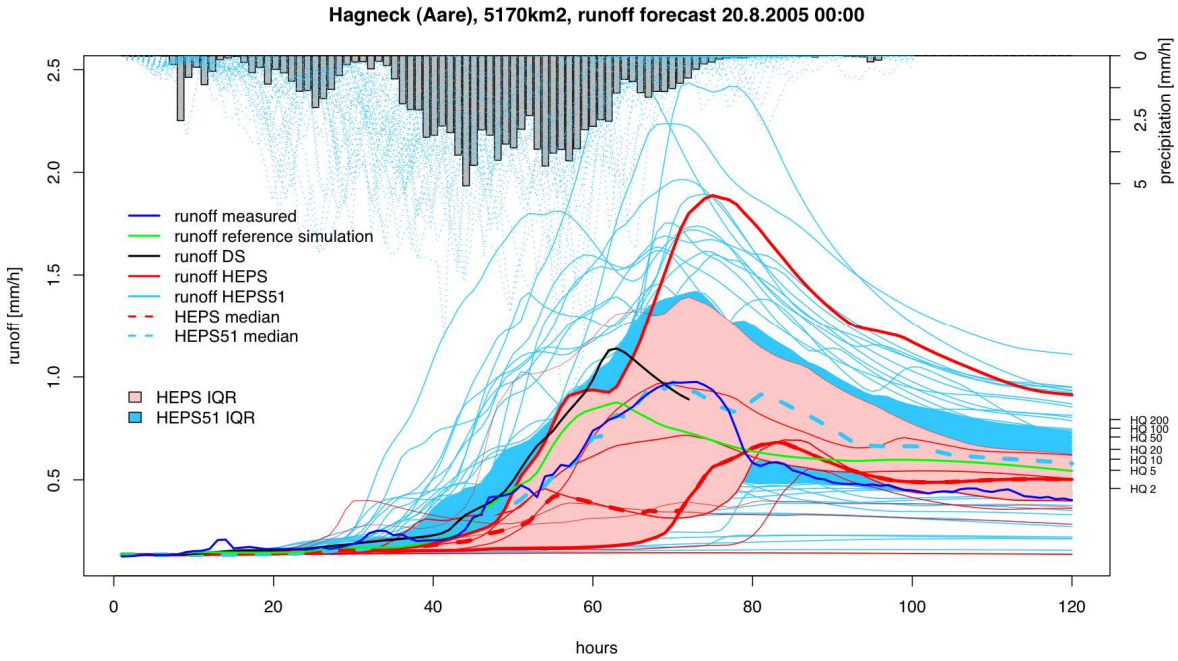
Odlišnou strategii tvorby pravděpodobnostní předpovědi, založenou na simulaci několika variant předpovědi srážek, které pocházejí z takzvaných ansámblových předpovědí některých meteorologických modelů, využívají dva mezinárodní projekty EFAS a MAP-DPHASE.

V podmínkách ČR, kde nástup povodně bývá většinou velmi rychlý dosud neposkytuje významnou přidanou hodnotu. Od roku 2006, kdy výstrahy EFAS jsou k dispozici OHP, byly zatím všechny při všech povodních výstrahy ČHMÚ vydány dříve, než výstrahy EFAS, nemluvě o tom, že řadu povodní systém EFAS vůbec nezachytil (například červen 3006 na Dyji, přívalové povodně v červnu a červenci 2009, nebo povodně na Liberecku v srpnu 2010).

Projekt MAP D-PHASE (http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/dphase/dphase_info.htm) podobnou strategii, tedy využití ansámblových předpovědí modelu COSMO-LEPS, aplikuje v oblasti Alp. Přístup k výsledkům předpovědí je však chráněn heslem pouze pro řešitele projektu.

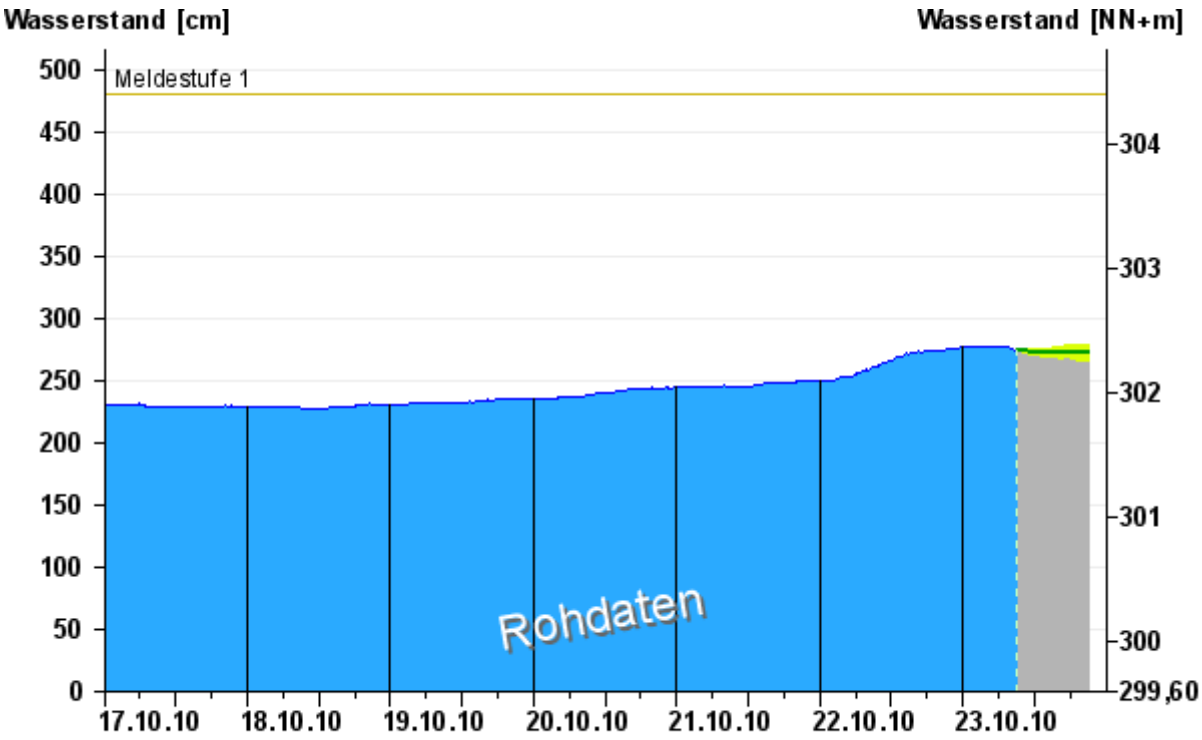


Obr. 4.9 - Ukázka mapového uživatelského rozhraní pro prezentaci výstupů systému EFAS. Tabulkově jsou vyjádřeny pravděpodobnosti překročení povodňové úrovně v jednotlivých dnech na základě jednotlivých použitých vstupních meteorologických modelů (DWD – německý předpovědní model, ECMWF – hlavní varianta modelu Evropského centra ECMWF, EUE pravděpodobnostní předpověď ECMWF 51 variant, COS – pravděpodobnostní model COSMO 16 variant). Čísla uvádějí kolik z variant modelu úroveň překračuje. (zdroj: http://floods.jrc.ec.europa.eu).



Obr. 4.10 Ukázka výstupu projektu MAP DPHASE s rozptylem možných variant průběhu průtoku v závislosti na vstupující srážkové předpovědi. (zdroj: http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/dphase/dphase_info.htm).

V Německu je vydávání předpovědí v kompetenci jednotlivých spolkových republik, v Bavorsku (http://www.hnbd.bayern.de) přitom vydané předpovědi na následující den doplňují u vybraných významnějších profilů o odhad spolehlivosti v rozmezí 10 až 90 %. Tento odhad je založen na historickém vyhodnocení procentuálních chyb předpovědí pro jednotlivé časové kroky předstihu předpovědi.



Obr. 4.11 Předpověď vodního stavu s naznačenou předpokládanou spolehlivostí používaná v Bavorsku. Žlutá plocha okolo vlastní linie předpovědi ukazuje rozmezí v němž by se s 80% pravděpodobností (pravděpodobnost překročení mezi 10 a 90 %) měla nacházet skutečnost. (zdroj: http ://www.hnd.bayern.de).

Použité zkratky

EFAS	Evropský výstražný povodňový systém (European Flood Alert System)
QPF	Kvantitativní předpověď srážek
NWP	Matematické modely pro předpověď počasí
ESP	Ansámblové předpovědi předpovědní služby v USA (NWS)
NWS	Národní meteorologická služby v USA

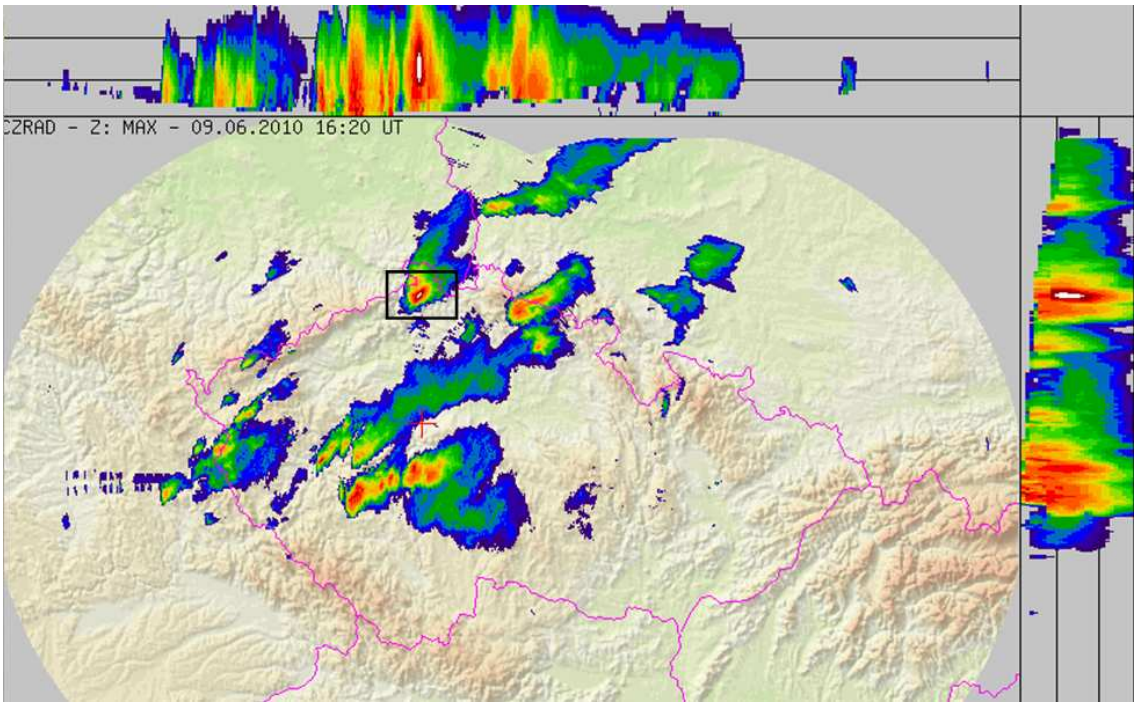
5. Přívalové povodně a možnosti jejich predikce

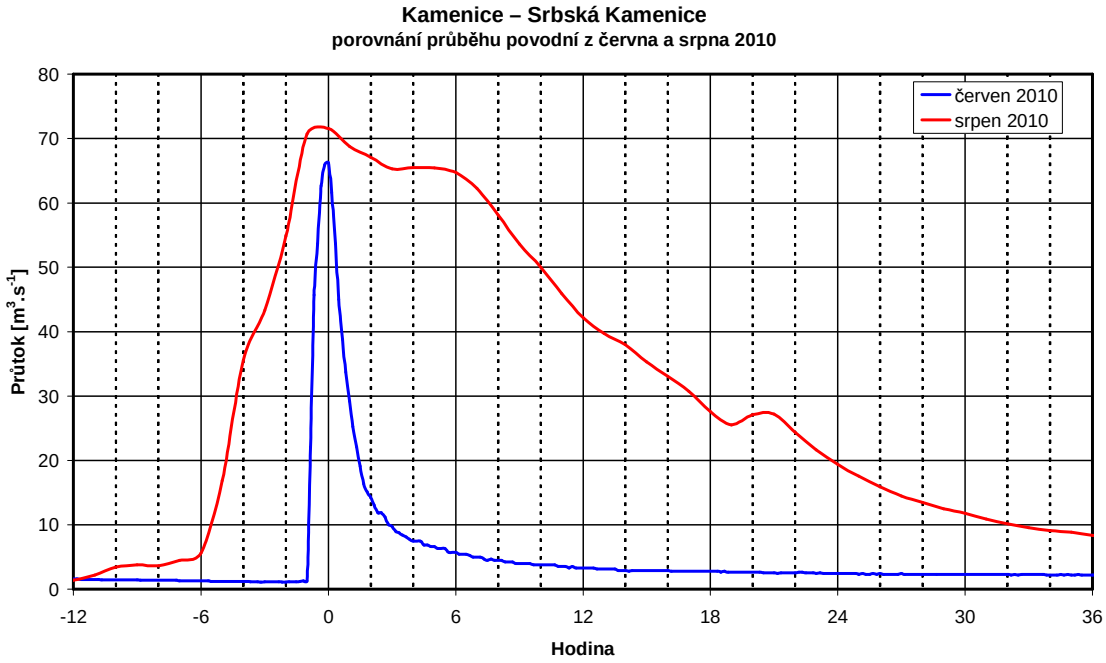
5.1 Vznik přívalových povodní

Přívalová povodeň vzniká nejčastěji následkem rychlého povrchového odtoku způsobeného přívalovými srážkami. Přívalové srážky jsou srážky o velmi silné intenzitě, zpravidla více než 30 $mm.h^{-1}$. Projevuje se 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 jak způsobem využívání území, tak i 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 (NOAA, 2010).

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 vedle okolí malých vodotečí rovněž za normální situace suchá údolí, příp. území, kde dochází ke soustředění povrchového odtoku 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 riziko zvýšeného odtoku a doprovodné eroze během přívalových srážek velmi zvyšuje (Janeček, 1998).

Příčiny a průběh přívalové povodně jsou ilustrovány na následujícím obrázku, kdy přívalové srážky s odhadovanými úhrny více než 100 mm za hodinu způsobily povodeň s dobou vzestupu cca 1 hodina na povodí o velikosti cca 98 km^2.





Obr. 5.1 Situace s výskytem silných přívalových 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).

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 předpověděny, přesnou lokalizaci výskytu, trvání a intenzitu 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 fyzicko-geografických charakteristik území (např. sklonových poměrů) směrodatný pro určení potenciálních rizikových srážek daného trvání, např. v USA označovaných jako hodnoty FFG (Flash Flood Guidance). Hodnoty FFG jsou definovány jako množství srážek za určitý časový interval, které může způsobit naplnění koryt menších vodotečí (NOAA, 2010).

Určitou možností pro predikci výskytu přívalových 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 a menších povodích (s plochou do cca 100 km^2) stanovit

míru rizika výskytu přívalové povodně, a to i na povodích, které nebyly přímo přívalovou srážkou zasaženy.

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.

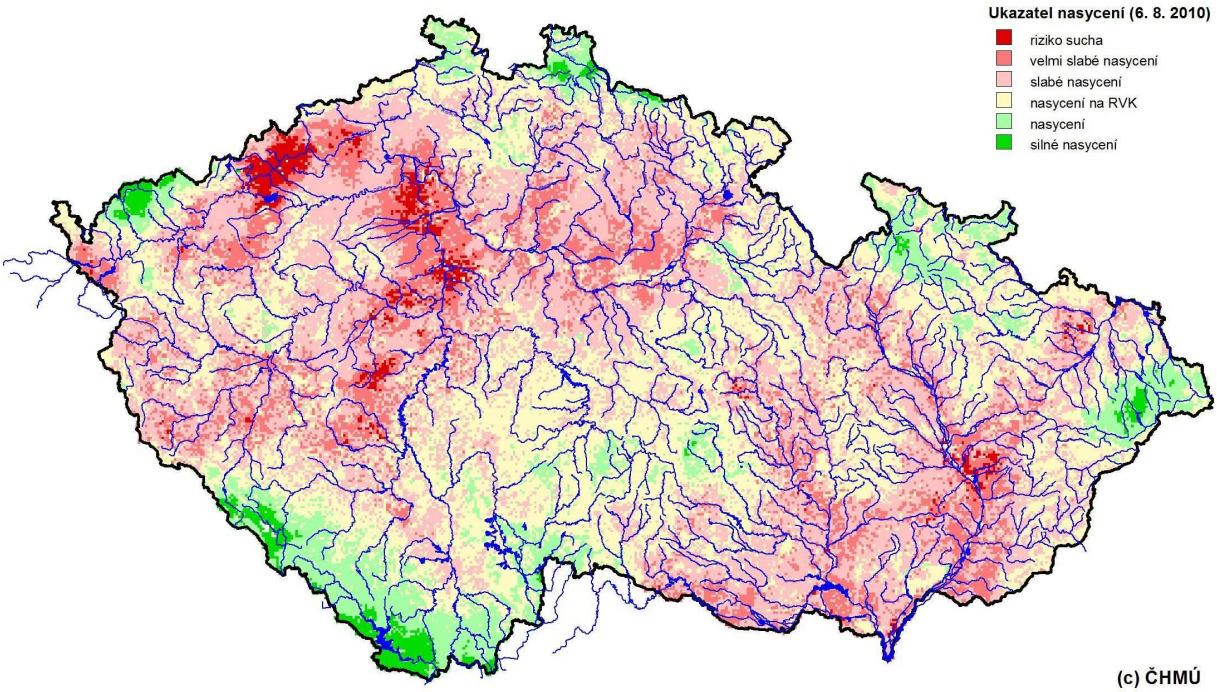
Hlavním výstupem procedury výpočtu aktuální nasycenosti území je tzv. index nasycení, jehož hodnota vyjadřuje relativní odchylku od stavu nasycení na retenční vodní kapacitu. Je odvozován v rastru 1x1 km, a to na základě jednoduché bilance srážek, odtoku a aktuální evapotranspirace. Základem výpočtu je metoda *CN* (Janeček, 1998), 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. 5.2 je uvedeno rozložení indexu 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.

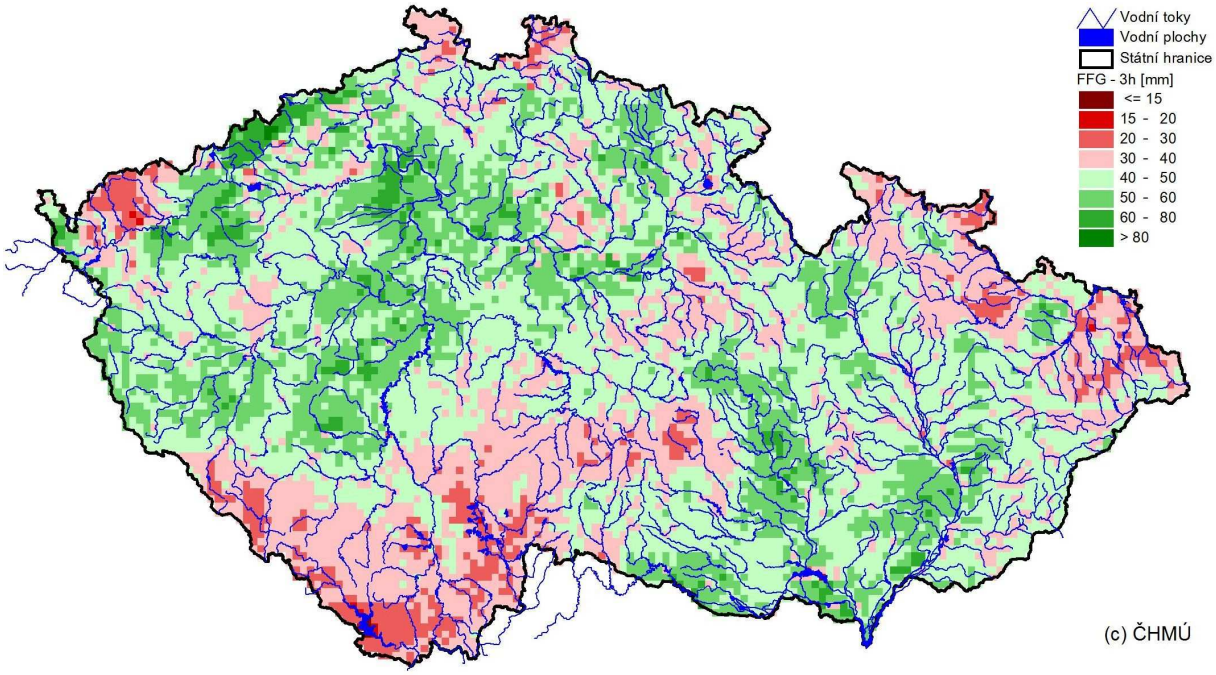
Hodnoty potenciálně rizikových srážek (FFG) s dobou trvání 1, 3 a 6 hodin jsou odvozovány ve čtverci území 3x3 km pomocí jednoduchého srážkoodtokového modelu (SCS) s nastavenou prahovou hodnotou odpovídající specifickému odtoku s dobou opakování 2–5 let, a to na základě aktuálního nasycení. Je nutné 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.

Na Obr. 5.3 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.

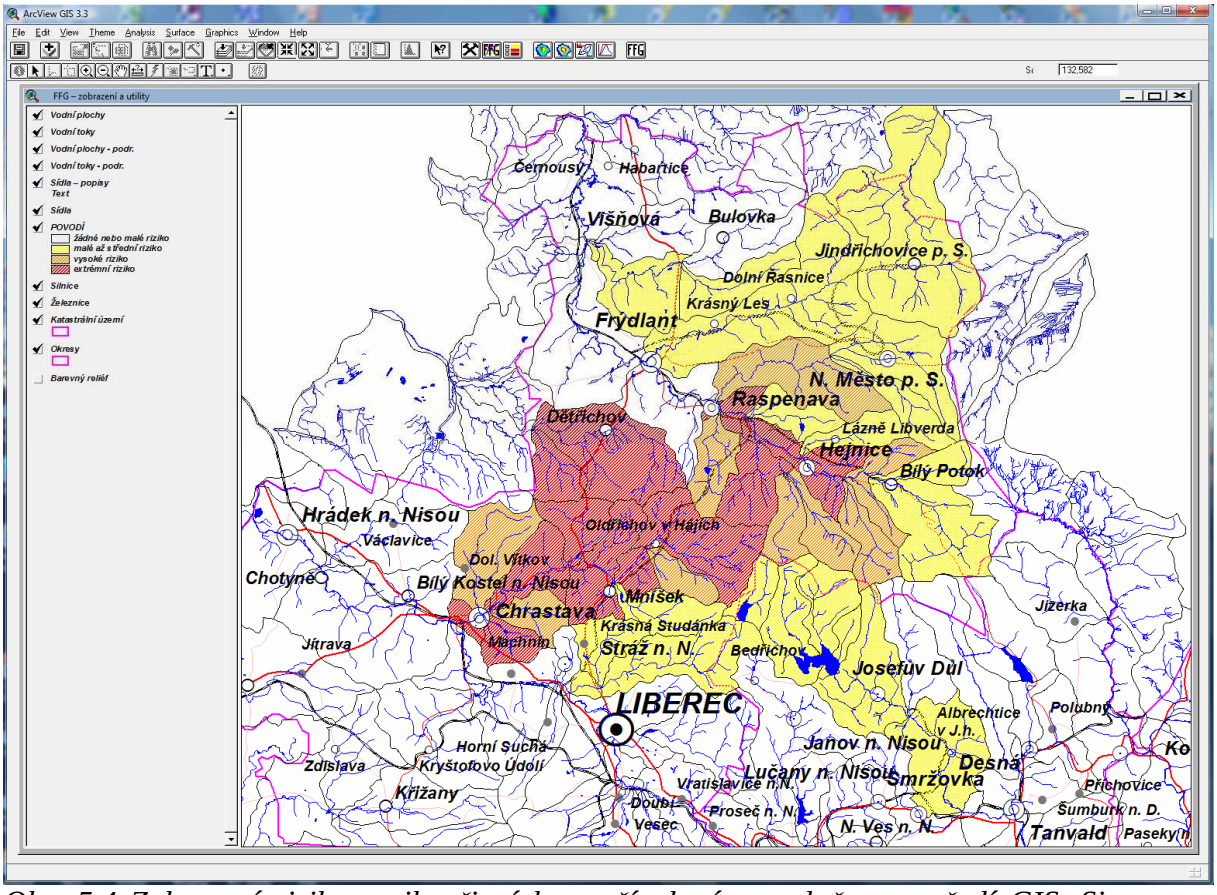
Odhad aktuálního rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně je prováděn na základě 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek a jejich krátkodobé předpovědi (tzv. nowcastingu). Při výpočtu je používán jednoduchý srážkoodtokový model založený na metodě jednotkového hydrogramu (Clark, SCS) a metodě Muskingum pro odhad postupu povodňové vlny (US Army Corps of Engineers, 1994). Hodnoty parametrů srážkoodtokového modelu byly odhadnuty z fyzicko-geografických charakteristik základních povodí (povodí IV. řádu), přičemž tato dílčí povodí jsou v rámci systému FFG-CZ hydrologicky a hydraulicky propojena až do velikosti povodí max. 100 km^2. 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. 5.4.



Obr. 5.2 Ukazatel nasycení jako index stavu nasycení území ke dni 6. srpna 2010 8:00 SELČ.

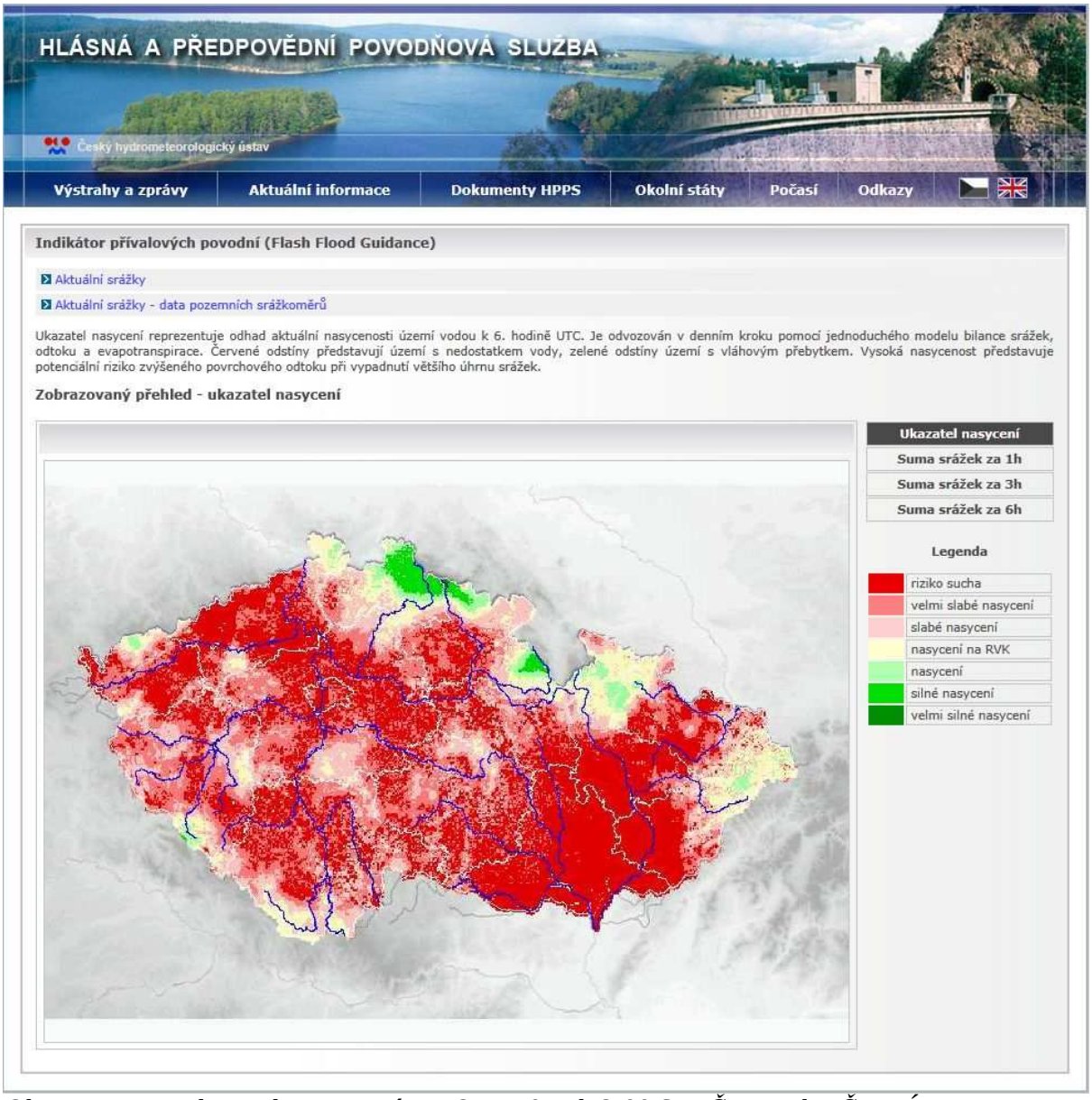


Obr. 5.3 Hodnoty potenciálně rizikových srážek (FFG) s dobou trvání 3 hodiny pro 6. srpen 2010 8:00 SELČ.

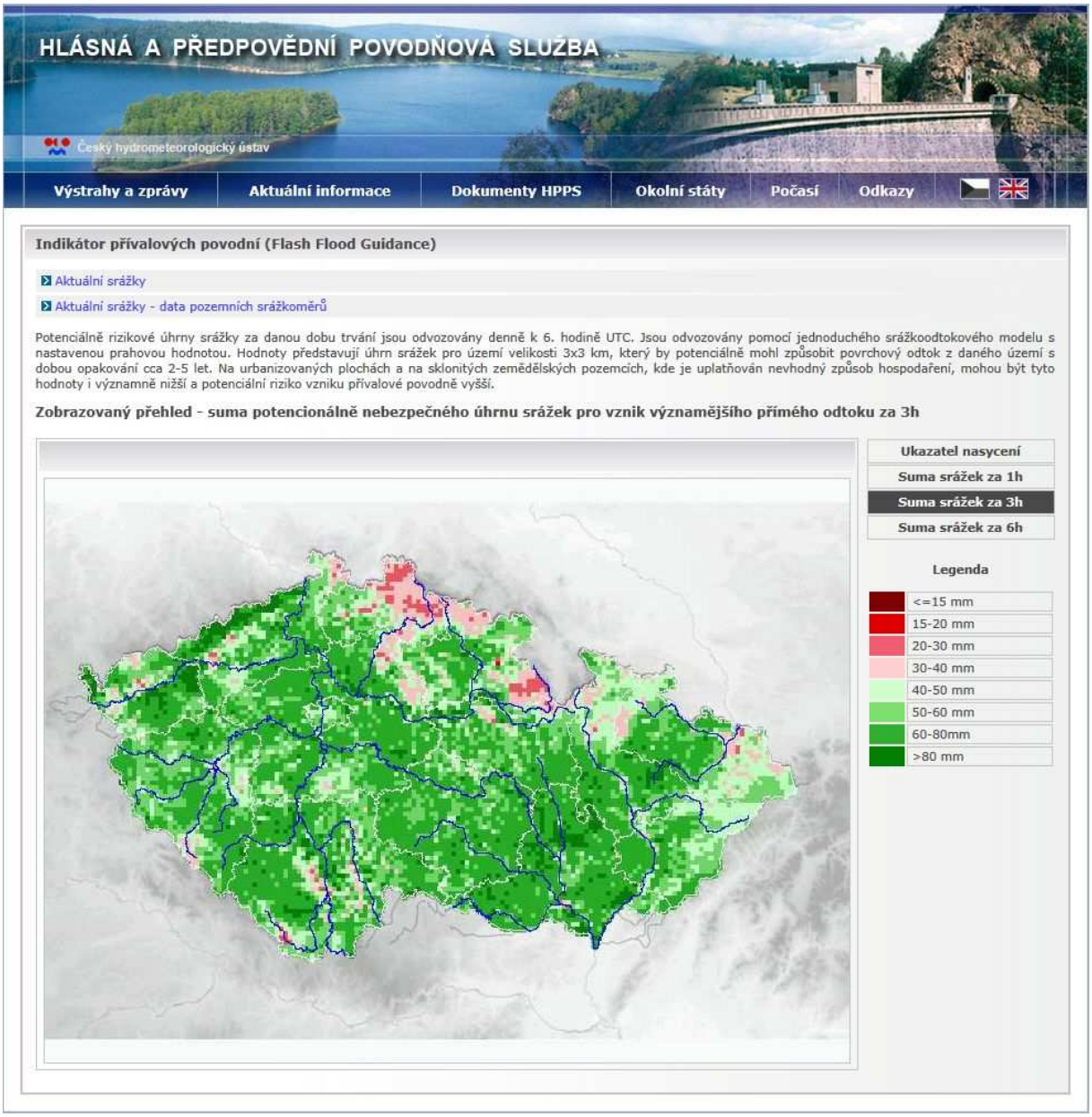


Obr. 5.4 Zobrazení rizika vzniku či výskytu přívalové povodně v prostředí GIS. Situace ze 7. 8. 2010, kde vstupem byly adjustované radarové odhady z časové periody 8:45–11:30 a hodnoty ukazatele nasycení (resp. CN) pro 7. 8. 2010 k 8:00 SELČ.

Aktuální mapy ukazatele nasycení a potenciálně rizikových srážek je možné zobrazit na webu ČHMÚ na adrese: http://hydro.chmi.cz/hpps/main_rain.php?mt=ffg, viz Obr. 5.5 a 5.6. Aplikace je v provozu každoročně vždy od poloviny dubna do poloviny října.



Obr. 5.5 Mapa ukazatele nasycení pro 8. 9. 2011 k 8:00 SELČ na webu ČHMÚ.



Obr. 5.6 Mapa potenciálních rizikových srážek o trvání 3 hodiny pro 8. 9. 2011 na webu ČHMÚ.

6. Využití pravděpodobnostní předpovědi ve vodohospodářské praxi

Vodní díla (nádrže) jsou většinou víceúčelová, a musí proto při hospodaření s vodou zajišťovat účely, které mají často protichůdné požadavky. Hospodaření s vodou v nádržích je zásadním úkolem vodohospodářů a hydrologická předpověď je požadovaným a možná nejdůležitějším vstupem pro rozhodování. Pravděpodobnostní předpověď je jednou z možností jak zlepšit a rozšířit podklady pro řízení hospodaření s vodou v nádržích v České republice.

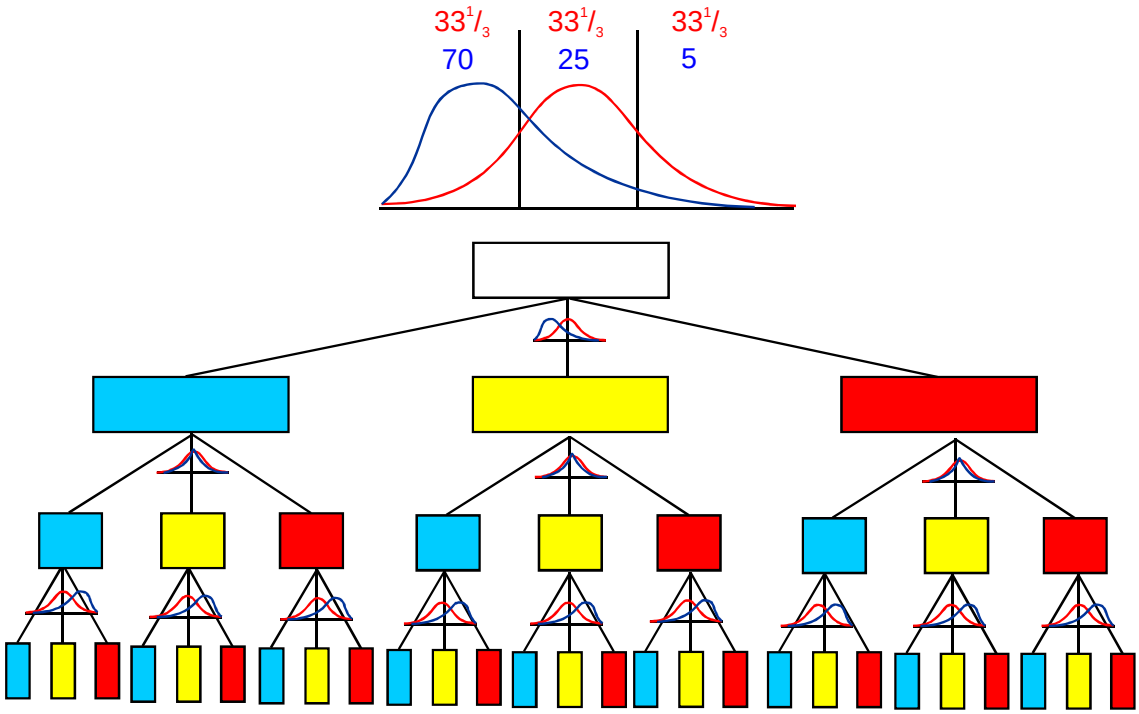
Pravděpodobnostní předpověď bude především využívána pro předpověď přítoku do významných nádrží a rozhodování o manipulacích na odtoku. Pracovníky ČHMÚ bude vydávána krátkodobá pravděpodobnostní předpověď na 48 hodin, která doplní stávající deterministickou předpověď, a dlouhodobá 30-denní předpověď.

6.1 Využití pravděpodobnostních předpovědí při řízení nádrží

Pravděpodobnostní koncept řízení nádrží je teoreticky znám a rozvíjen od 50. let 20. století (Little, 1955). Používání pravděpodobnostních předpovědí přítoku do nádrží k rozhodování o manipulcích se již v praxi uplatňuje v řadě případů. Příkladem může být software SOCRATES (Jacobs et al. 1995) 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 význam nádrží zejména v zásobování vodou v suchém období.

Teoretických přístupů k rozhodovacímu procesu řízení nádrží na základě pravděpodobnostních informacích 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 v podobě Bayesiánského stochastického dynamického modelování (např. Mujumdar, Nirmala, 2007).

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.

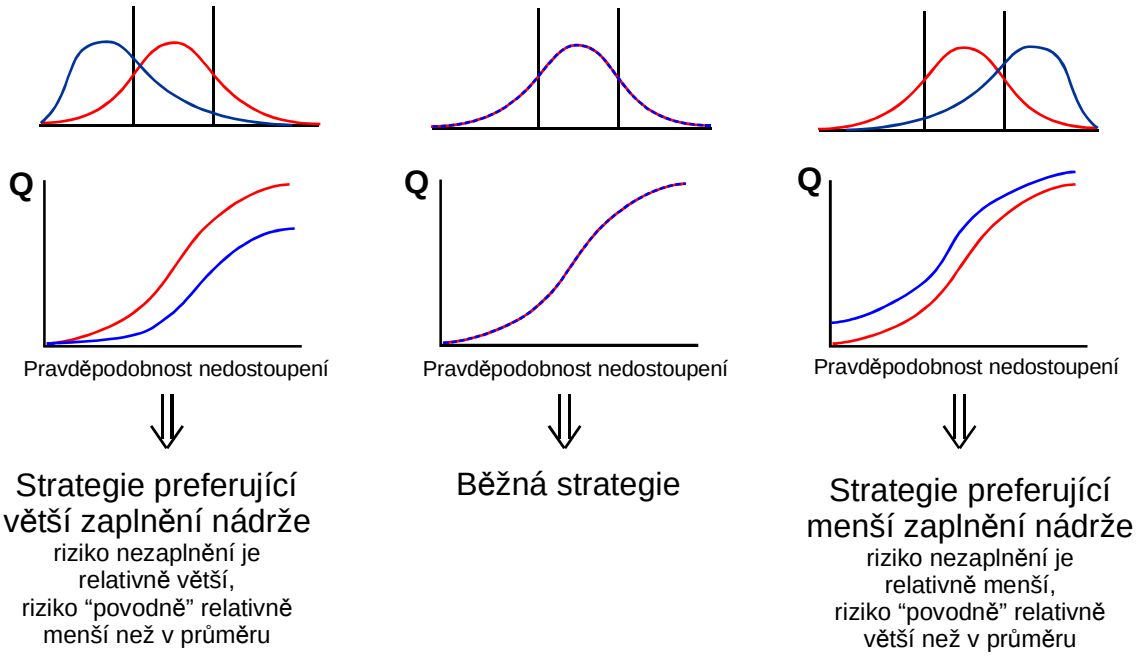


Obr. 6.1 Ukázka rozhodovacího stromu pro tři stupně (budoucí období). Rozhodování je založeno na předpovědi pravděpodobnosti výskytu "nadprůměrného", "průměrného" či "podprůměrného" přítoku do nádrže. Zatímco bez předpovědi by bylo uvažováno "klimatické pozadí" (červená čára) předpokládající stejné pravděpodobnosti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

Rozhodovací systémy jsou v takových případech většinou řešeny specialiovanými 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 předpovídané pravděpodobnosti jeho nutnosti. Například dojde-li při dosažení určitého průtoku k zaplavení 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 tak budou vynaloženy "zbytečně", ale každý případ, kdy opatření ochrání před škodami náklady vyváží. V případě znalosti výše potenciálních škod a nákladů na jejich předejití 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.).



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).

6.2 Dlouhodobá pravděpodobnostní předpověď

Z dlouhodobé 30denní pravděpodobnostní předpovědi lze především vyčíst minimální průměrný průtok v daném profilu s určitou zabezpečeností, např. 90 %. Pro dlouhodobou bilanci nádrže se uplatní hlavně předpověď minimálního zajištěného přítoku do nádrže. Podle této bilance pak lze optimalizovat plánované manipulace tak, aby se účinně hospodařilo s vodou a předešlo tak negativním dopadům sucha.

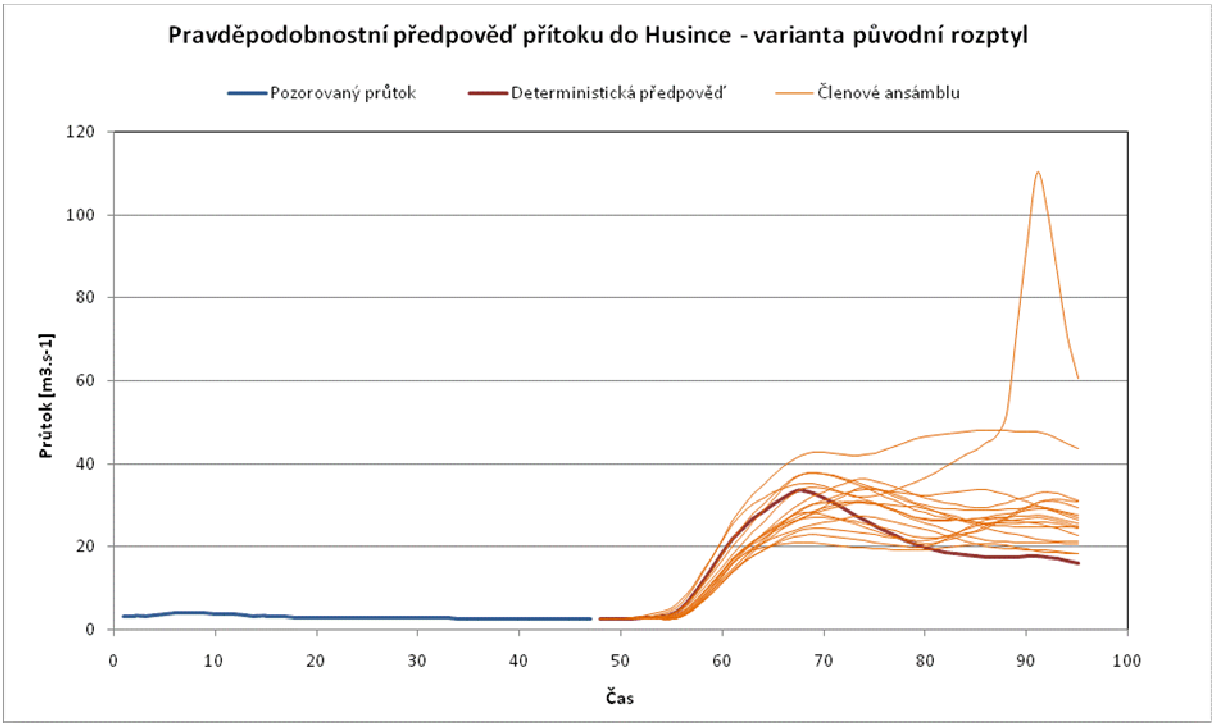
Maximální průtok v daném profilu však z dlouhodobé pravděpodobnostní předpovědi vyčíst nelze. V tomto směru není dlouhodobá předpověď v našich klimatických podmínkách dostatečně vypovídající a nedá se bez rizika využít například k předvypouštění nádrží.

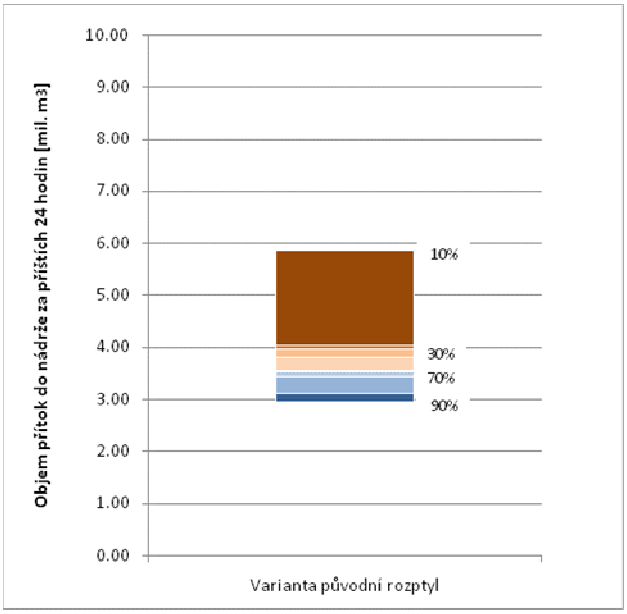
6.3 Krátkodobá pravděpodobnostní předpověď

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

Pro vodohospodářské dispečinky je pravděpodobnostní předpověď využitelná především jako doplněk deterministické předpovědi přítoku do nádrže. Hydrogram s deterministickou předpovědí a jednotlivými členy ansámblu pravděpodobnostní předpovědi je pro potřeby dispečerů doplněn o statistické vyhodnocení objemu přítoku do nádrže na následujících

48 hodin. Ze členů ansámblu 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.





Pravděpodobnost překročení	Objem přítoku za následujících 48 hodin
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 Husinec

Z takto prezentované pravděpodobnostní předpovědi lze vyčíst dvě podstatné informace. První informací je rozptyl jednotlivých členů ansámblu, 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.

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 předpovědí je pro každý profil jiná v závislosti na charakteristikách daného povodí. Dostatek dat pro vytvoření rozhodovacích intervalů indexu nejistoty předpovědi lze získat, buď 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_{min90}

Minimální průměrný přítok do nádrže se zabezpečeností 90 %, lze získat převedením objemu přítoku do nádrže s pravděpodobností překročení 90 % v m^3 za 48 hod. na průtok Q_{min90} v $m^3.s^{-1}$. Na rozdíl od dlouhodobého minimálního průměrného průtoku získaného z dlouhodobé předpovědi, lze tento krátkodobý minimální průměrný průtok použít především při manipulacích během povodní. Kdy nám určuje spodní mez odtoku z vodního díla, při které je vysoká pravděpodobnost, že se nádrž nebude prázdnit.

Literatura

- **Hladný, J. [*1970*]: Hydrologická prognóza**. HMÚ sv. 10. HMÚ, Praha, 118 s.
- **NWS (2011):** NWSRFS User Manual, (http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/htm/xrfsdocpdf.php)
- **Březková, L., Starý, M., Doležal, P. [*2010*]: The Real –time Stochastic Flow Forecast,** Soil and Water Ressource, 5, 2010(2) , s 49 -57
- **Clark, M.P., Hay, L.E. [*2003*]: Use of Medium-Range Numerical Weather Prediction Model Output to Produce Forecasts of Streamflow,** Journal of Hydrometeorology, vol. 5, No.1, AMS, Washington D.C., USA, s. 15 - 32
- **Collier, C.G., Krzystofowitcz, R. (Eds.) [*2000*]: Special Issue: Quantitative precipitation forecasting,** Journal of Hydrology, vol. 239 (2000), Elsevier, Amsterdam, Holandsko, s. 1 – 340
- **Daňhelka, J.** [*2007*]**: Operativní hydrologie: Hydrologické modely a nejistota předpovědí**, Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu. Praha: ČHMÚ, sv. 51, s. 104, ISBN 978-80-86690-48-3, ISSN 0232-0401
- **Daňhelka, J. [*2004*]: Use of QPF for hydrological modelling – a source of error, Sborník 22. konference podunajských států,** Brno, 31. srpna – 4 září 2004, ČHMÚ, Brno, 10 p
- **Krzystofowitcz, R.** [*2001a*]: **The case for probabilistic forecasting in hydrology**. Journal of Hydrology, Vol. 249, s. 2-9
- **Krzystofowitcz, R. [*2001b*]: Integrator of uncertainties for probabilistic river stage forecasting: precipitation dependent model,** Journal of Hydrology, vol. 249 (2001), Elsevier, Amsterdam, Holandsko, p. 69 – 85
- **Krzystofowitcz, R., Herr, H.D. [*2001*]: Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting: precipitation dependent model,** Journal of Hydrology, vol. 249 (2001), Elsevier, Amsterdam, Holandsko, s. 46 – 68
- **Vlasák, T., Daňhelka, J. [*2010*]: Vyhodnocení hydrologických předpovědí povodní v povodí Labe,** Meteorologické zprávy, ročník 63, číslo 1, Praha 2010
- **Janeček, M. [*1998*]: Použití metody čísel odtokových křivek CN k navrhování protierozních opatření,** Praha, VÚMOP
- **NOAA [*2010*]: Flash Flood Early Warning System Reference Guide,** ISBN 978-0-615-37421-5, University Corporation for Atmospheric Research
- **US Army Corps of Engineers [*1994*]: Flood-Runoff Analysis**, Engineer manual EM 1110-2-1417. Washington, DC 20314-1000
- **Mujumdar, P.P., Nirmala, B. [*2007*]: A Bayesian Stochastic Optimalization Model for aa Multi-Reservoir Hydropower System**, Water Res. Management. 21, pp. 1465-1485
- **Little J.D.C. [*1955*]: The Use of Storage Water in a Hydroelectric System**, Journal of the Operations Research Society of Americe, vol. 3 No. 2, pp. 187-197
- **Jacobs, J., Freeman, G., Grygier, J., Morton, D.,Schultz, G., Staschus, K. and Stedinger, J. [*1995*]: SOCRATES: A system for sheduling hydroelectric generation under uncertainty**, Annals of Operation s Research, 59, pp. 99-133