

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie



# Návrh databanky povodní Otavy a její využití v protipovodňové ochraně

Disertační práce

Vypracoval: Mgr. Tomáš Vlasák

Školitel: Ing. Josef Hladný, CSc.

PRAHA, 2008



**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval sám, s použitím poskytnutých dat a pramenů uvedených v seznamu literatury. Předloženou práci ani její podstatnou část jsem nepoužil k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Praha, březen 2008





**Poděkování:**

Děkuji především svému školiteli, Ing. Josefu Hladnému, CSc. za jeho trpělivost, za rady a připomínky při zpracování disertační práce a RNDr. Jakubu Langhammerovi Ph.D. za podporu v zapojení výsledků práce do výzkumných projektů. Rovněž děkuji ČHMÚ za poskytnutí potřebných dat a informací.

## Obsah

<b>Abstrakt</b> .....	ix
<b>1. Úvod</b> .....	1
1.1 Stanovené cíle práce .....	2
1.2 Členění práce .....	2
<b>2. Literární rešerše</b> .....	3
2.1 Databanky povodní .....	3
2.2 Studium povodňového mechanismu .....	3
2.3 Metoda předpovědního analogu v hydrologické prognóze .....	5
<b>3. Fyzicko-geografické charakteristiky povodí Otavy po Písek</b> .....	7
3.1 Poloha a rozloha povodí .....	7
3.2 Morfometrické charakteristiky povodí .....	8
3.3 Geologická stavba a půdy .....	10
3.4 Klima, vegetace a land-use .....	10
3.5 Říční síť – hydrografické poměry .....	11
3.6 Hydrologický režim .....	13
3.7 Antropogenní transformace přírodní sféry .....	16
<b>4. Návrh databanky povodní</b> .....	18
4.1 Systém archivace .....	18
4.2 Přehled povodní .....	18
4.3 Zdroje a způsob zpracování dat .....	19
4.3.1 Data pro popis povětrnostních příčin povodní .....	20
4.3.2 Data pro popis meteorologických příčin .....	22
4.3.3 Data pro popis počátečního stavu povodí .....	24
4.3.4 Data pro popis odtokové odezvy .....	24
<b>5. Vlastnosti povodňového mechanismu povodí Otavy</b> .....	26
5.1 Výskyt povodní .....	26
5.2 Příčiny povodní na Otavě .....	27
5.3 Sezonální režim výskytu povodní .....	29
5.3.1 Metodika popisu sezonality .....	30
5.3.2 Vybrané aspekty sezonního režimu povodní na Otavě .....	32
5.4 Povětrnostní příčiny vzniku povodní .....	34
5.4.1 Frekvenční analýza výskytu povětrnostních typů .....	35
5.4.2 Atmosférické proudění při výskytu povětrnostních typů .....	36
5.4.3 Dráhy řídicích tlakových útvarů .....	39

5.5	Prostorové rozložení příčinných srážek	42
5.5.1	Příčinná srážky	42
5.5.2	Metodika zpracování prostorové distribuce srážek	42
5.5.3	Vliv atmosférického proudění na tvorbu srážkového pole.	43
5.6	Kategorizace povodní	47
5.6.1	Kategorie „Velké letní povodně“	48
5.6.2	Kategorie „Velké zimní povodně“	50
5.6.3	Kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“	51
5.6.4	Kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“	54
5.6.5	Kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, málo orograficky zesílených srážek“	56
5.6.6	Kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“	58
5.6.7	Kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“	60
5.6.8	Kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“	61
5.6.9	Kategorie „Letní povodně z bouřkového přívalu“	63
<b>6.</b>	<b>Metoda předpovědního analogu</b>	<b>65</b>
6.1	Metoda analogu jako předpovědní nástroj	66
6.2	Použitá data	68
6.3	Úprava vstupních dat	69
6.3.1	Definování vlivu sezón	71
6.3.2	Definování počátečních podmínek	71
6.3.3	Definování příčinných podmínek	71
6.4	Algoritmus pro vyhledávání povodňových analogů	73
6.4.1	Podobnosti u jednotlivých prediktorů	73
6.5	Kalibrace metody vyhledávání předpovědního analogu	74
6.6	Výsledky navržené předpovědní metody	80
<b>7.</b>	<b>Závěr</b>	<b>82</b>
	<b>Literatura</b>	<b>89</b>
	<b>Seznam obrázků, tabulek a příloh</b>	<b>91</b>
	<b>Přílohy</b>	
	<b>Katalog povodní na Otavě v letech 1890 - 2006</b>	



## **Abstrakt**

Study of historical flood events is important as a base for hydrological studies, as well as for proposal of flood control measures and real-time flood forecasting helping forecasters to support their decisions. This work deals with proposal of Flood Archive (database of flood events) and its application in the scope of flood protection of Otava river basin to Písek water gauge. The objective was to propose Archive of historical floods containing information about casual synoptical situation, connected weather phenomena (precipitation, temperature) and runoff response.

Flood formation mechanism in Otava river basin was described using this Archive. A forecasting technique based on analogue method was designed. This technique searches historical records for flood events of similar causes and estimates possible development of runoff response.

Archive consists of 72 flood events that occurred between 1890 and 2006 and their peak flow in all cases exceeded given threshold discharge in Písek closing profile (10-year return period for 1890-1961 and 1-year return period for 1961-2006). Available historical data was gathered and processed into graphic form (maps, graphs, tables). Flood Archive is part of the dissertation thesis.

The most outstanding features of flood formation mechanism in Otava river basin were described and explained in relation to geographical environment in the second part of the thesis. One of the distinctive features is the predominance of summer floods in Otava river basin, which is more obvious concerning floods of more than 10-years return period. The basin is not very sensitive to floods caused by mainly snow melt. Only in 4 out of 72 flood events the snowmelt contribution predominate rain precipitation.

Distinct difference was found naturally between weather causes of winter and summer floods. Winter floods are generally the consequence of strong western circulation with crossing frontal systems. On the other hand summer floods are caused mostly by cyclonic precipitation of stable low pressure formation in Central European area. Different air circulation type results in different wind ward effect of precipitation and consequently different runoff response. Analysis results were used create complex categorization of floods. It recognizes 9 patterns in Otava river basin based on common characteristics of causes as well as of runoff response.

In the third part of the thesis, an analogue technique based on archive was proposed to estimate flood response of the basin. The archive is searched for the most similar event in the meaning of causing factors: season of flood occurrence, antecedent saturation of the basin, precipitation totals and its spatial distribution pattern.

An index which expresses similarity of flood causes was developed using mathematical comparisons of causing factors and response (peak discharge and flood volume). Selection of historical analogues is based on the value of that index. The technique was

calibrated for forecasts of peak discharge and runoff volume during four days following the time of forecast issuing.

The method was verified using 56 flood events from the Archive. Each event was excluded from the archive and then its runoff volume and peak flow was estimated using the rest of the archive. Evaluation showed e.g. that for 44 out of 56 flood events the runoff volume was estimated with less than 30 % difference. Therefore even this simple technique has potential to be used for fast estimation of expected runoff response.

# 1. Úvod

Povodně jsou přírodní katastrofou, která působí v našich geografických podmínkách největší škody a nejvyšší ztráty na životech. Úkolem přírodních věd, které se zabývají tímto fenoménem, je přinášet poznatky, které je možné využít k prevenci a snižování povodňových škod. Moderní pojetí ochrany před povodněmi prosazuje komplexní řešení protipovodňových opatření na celém povodí namísto lokálních zásahů. Je zřejmé, že tato opatření není možné plánovat bez znalosti komplexního mechanismu vzniku povodní. Studium sezónní zatíženosti krajiny povodněmi, popis zdrojových oblastí povodní nebo charakteristického střetávání průtokových vln při určitém typu rozvodnění může nasměrovat technické protipovodňové opatření do těch částí povodí, u kterých zvýšení retence či zpomalení odtoku bude mít největší efekt na snížení povodňových škod.

Výskyt katastrofálních povodní v roce 2002 zvýšil zájem o rozšíření preventivních protipovodňových opatření, ale také vyvolal celou řadu diskuzí o vzniku povodní a potenciálním ohrožení tímto přírodním fenoménem. Byla tato událost shodou výjimečných okolností, může se v budoucnu opakovat? Výzkumy historických povodní ukázaly, že v různě vzdálené minulosti čelili lidé povodním srovnatelných rozměrů, pouze dopady na společnost nebyly tak velké a nešířily se tak daleko od oblastí záplav anebo nevyvolávaly tak rozsáhlé negativní řetězové reakce v hospodářské sféře. Z porovnání povodně z roku 2002 s historickými případy povodní v Čechách a na Moravě vyplynul ještě jeden důležitý aspekt. Povodně mají z hlediska příčin celou řadu společných znaků [Řezáčová, 2003]. Výsledky těchto výzkumů zdůrazňují důležitost studia povodňového mechanismu analýzou historických případů a zároveň vyvolávají otázku možnosti využití identifikovaných příčinných symptomů k předpovědi povodní.

Protože vznik povodní je geneticky úzce spojen s fyzicko-geografickým prostředím konkrétních povodí, opírá se studium mechanismu vzniku povodní většinou o historické záznamy povodní v konkrétním povodí. Přestože existuje celá řada prací, které tyto záznamy využívají, není dosud pro Českou republiku k dispozici ucelený katalog povodňových událostí s popisem povětrnostních příčin, srážek a odtokové odezvy. Tato studie předkládá návrh takového katalogu na příkladu 72 povodňově nebezpečných případů mezi lety 1890 – 2006 v povodí Otavy se závěrovým profilem Písek. Na základě informací o příčinách a průběhu těchto povodní jsou popsány společné rysy mechanismu vzniku extrémních srážko-odtokových situací. V druhé části byla s využitím výsledků této analýzy navrhována předpovědní metoda, která pomocí analogie mezi příčinami povodní odhaduje maximální průtok a objem odtoku Otavy ve vodoměrné stanici Písek.

## 1.1 Stanovené cíle práce

- Navrhnout databanku povodní a vyplnit ji pro všechny povodně na Otavě, které se vyskytly mezi lety 1890 – 2006 a kulminačním průtokem překročily v Písku 10letou vodu, jakož i pro povodně z období 1961 -2006 s kulminačním průtokem nad jednoletou vodou.
- Na základě informací z této databanky popsat nejzřetelnější znaky povodňového mechanismu Otavy.
- Navrhnout metodu předpovědního analogu, která využívá databanku povodní jako nástroje pro hydrologickou prognózu

## 1.2 Členění práce

Předložená disertační práce je rozdělena do čtyř návazných částí. První část obsahuje úvod s vymezením cílů práce, rešerši ke studiu povodňového mechanismu, využití metody předpovědního analogu v hydrologické a meteorologické prognóze a fyzickou-geografickou charakteristiku povodí.

Druhá část popisuje mechanismus vzniku povodní na Otavě z několika různých pohledů. Byl zkoumán výskyt povodní Otavy v Písku od konce 19. století a jejich příčiny podle podílu tání sněhu nebo výskytu lokálních přívalemových dešťů. Sezonální režim výskytu povodní a jeho příčiny, vyplývající z odlišných přírodních podmínek byl popsán nejen u celkového povodí Otavy v Písku, ale i v dalších sedmi dílčích povodích. Atmosférické příčiny povodní byly dány do souvislosti se sezónou výskytu extrémních průtoků a s časoprostorovým rozložením příčinných srážek. Syntézou těchto analýz byla vytvořena kategorizace povodní podle společných znaků v příčinách povodní i tvaru odtokové odezvy.

Třetí část obsahuje návrh metody předpovědního analogu, její kalibraci a testování úspěšnosti této metody.

V poslední čtvrté části je publikován Katalog povodňových případů, ve kterém jsou převážně grafickou formou popsány podmínky v atmosféře a v povodí, které předcházely povodním a hydrogramy průtokových vln z hlavních vodoměrných profilů povodí Otavy.

## 2. Literární rešerše

### 2.1 Databanky povodní

Pro pozorování a popis tak komplexních procesů jako je vznik povodně, je nejvhodnější místem pozorování přímo krajina. Studie, řešící problematiku vzniku povodní laboratorními prostředky, se týkají většinou testování procesů v lokálním měřítku (výpar, půdní infiltrace atd.) nebo hydraulických simulací ve zmenšených modelech říčních koryt. Ani matematické modelování hydrologických procesů se neobejde bez kalibrace parametrů modelu na historických datech naměřených v krajině. Variabilita krajiny a přírodních procesů je ovšem tak velká, že není možné při současných znalostech tyto procesy matematicky univerzálně vyjádřit. Z těchto důvodů se velká část hydrologických studií, zabývajících se povodněmi, opírá o historická měření meteorologických a hydrologických veličin.

Naprostá většina hydrologických studií používá informace o zaznamenaných povodních jako prostředek a nikoli jako cíl. Shromážděné informace o povodních se využívají většinou jednoúčelově a kromě souhrnných výsledků nebývají ani publikovány. Hydrologické instituce udržují databanky o povodních většinou pouze jako seznamy výskytu kulminačních průtoků, případně jako průtokové vlny, které se používají pro výpočet návrhových N-letých průtoků a vln. Tyto databanky však neposkytují informace o příčinách povodní. Potřebu komplexního řešení databanky povodní, včetně jejího návrhu publikoval *Hladný a kol.* [1993], [1995]. Databanka, kterou autoři navrhnou, obsahuje tři skupiny komponent: (1) meteorologické symptomy, (2) snímky rozložení srážek a teplot, (3) průtokové vlny ze stanic. Ještě komplexnější přístup k archivaci povodní, který kromě rozboru hydrometeorologických příčin zahrnuje i záznamy o zaplaveném území, rozsahy škod, seznam publikací, které se o dané povodni zmiňují, předkládá *Barnolas et.al* [2007]. Databanku navíc autoři implementovali do softwaru, který využívá propojení elektronické databáze s programy GIS. Jedinečnou celosvětovou databanku povodní v podobě „živé“ internetové aplikace udržují na Katedře geografie university v Dartmouth v USA [*Brakenridge, 1996*]. Součástí prezentace jsou kromě přehledu povodní na celé planetě Zemi také jejich analýzy, jako například sezonní výskyt či příčiny povodní ([www.dartmouth.edu/~floods/index.html](http://www.dartmouth.edu/~floods/index.html)).

### 2.2 Studium povodňového mechanismu

Databanka povodní je vhodným podkladovým materiálem pro studium mechanismu vzniku povodní v daném povodí. Jedinečnost fyzicko-geografického prostředí každého povodí vytváří podmínky pro zesílení nebo zeslabení srážkové činnosti, variabilitu odtoku vody a její koncentraci v síti říčních koryt. Identifikace těchto specifických podmínek, při kterých nejčastěji dochází ke vzniku povodní, je důležitá pro plánování protipovodňových opatření.

Práce, které se příčinami vzniku povodní zabývaly, se zpravidla opírají o informace o historických povodních.

Vliv přírodního prostředí je zpravidla patrný již z analýzy sezónálního aspektu výskytu povodní. V české i zahraniční literatuře byla publikována celá řada metod pro vyjádření sezonality výskytu povodní a její regionalizaci. Rešerši těchto prací a přehled uvedených metod uvádí *Hladný [2005]*. Sezónální režim řek v povodí Labe analyzovala na základě údajů o výskytu průměrných denních průtoků nad zvoleným průtokovým limitem *Chalušová [2004]*. Autorka kromě popisu sezónální orientace výskytu povodní kvantifikovala vliv vybraných fyzicko-geografických faktorů na tento režim. Ve své práci uvádí mimo jiné základní charakteristiky sezónálního režimu Otavy, mezi něž patří výrazná orientace na letní povodně povodí jak celku, tak i jeho dílčích mezipovodí.

Povětrnostní příčiny povodní byly sledovány od počátku systematického pozorování počasí a vodních stavů [*Augustin, 1891*]. Vztah vzniku povodní v souvislosti s cirkulačními typy počasí v oblasti severní Moravy prošetřoval jako jeden z prvních autorů v druhé polovině 20. století *Brádka [1967]*. Rozvoj znalostí a monitoringu procesů v atmosféře a zvyšující se počet povodňových epizod, u kterých byly exaktním způsobem popsány meteorologické příčiny, vedl ke studiu podrobnějších vztahů mezi příčinnými atmosférickými cirkulacemi a vznikem povodní. Stav atmosféry vytváří v interakci s přírodními podmínkami povodí charakteristické časoprostorové rozložení meteorologických prvků (srážek a teplot vzduchu), které pak vyvolávají odtokovou odezvu na řekách. Tyto procesy vytvářejí souvislý celek, který *Hladný [1997]* nazývá hydrosynoptickým kontinuem.

V publikovaných studiích byly u různých povodí identifikovány zřetelné vztahy mezi charakterem rozložení pole tlaku vzduchu a výskytem povodně. Například *Duckstein, Bardossy, Bogardi [1994]* sledovali povodně v pěti povodích střední Arizóny a zkoumali vztah k typu denní atmosférické cirkulace. Na základě statistického zpracování synoptických typů určili ke každému povodí předstih dne s výskytem určitého příčinného typu (obvykle 1 až 3 dny) a zároveň vyčlenili skupiny typů s podobnou cirkulací, které mají největší podíl na vzniku povodní ve sledovaných povodích. Typické trajektorie tlakových níží, které předcházely velkým povodním v povodí Labe, popsal *Kakos [1985]*.

Velmi často používaným nástrojem hydrosynoptické analýzy jsou různé klasifikační systémy typů povětrnostních situací. U nás je nejpoužívanější *Brádkova [1961]* klasifikace synoptických typů, kterou použil ve své práci například *Vavruška [1989]*. Na základě četnosti výskytu určitých synoptických typů porovnal meteorologické příčiny povodní na Otavě a Lužnici a zdůraznil poměrně velkou odlišnost těchto povodní z tohoto aspektu. Na základě vlastní objektivní klasifikace povětrnostních typů identifikoval v povodí Otavy povětrnostní příčiny povodní také *Stehlík [2002]*, který ale zároveň upozorňuje na jednosměrnost vztahu mezi výskytem povodní a synoptického typu. Většinu povodní sice

může v určitém povodí a sezóně předcházet jeden synoptický typ, ale zdaleka ne u všech výskytů tohoto synoptického typu vznikají povodně.

Souvislost mezi určitým typem atmosférického proudění a zesilováním srážek, zejména vlivem orografického efektu v prostoru České republiky popsali již *Brázdil et.al* [1986]. Vliv lokalizace jádra srážek na formování odtokové odezvy na povodí Ohře uvádí ve své studii také *Čekal* [2005]. V jiné práci, analyzující příčiny velkých povodní na Otavě s kulminací v Písku nad desetiletým průtokem [*Vlasák*, 2007] se uvádí, že jádro srážek se ve většině případů vyskytlo mezi Kašperskými Horami a Vimperkem, ačkoliv tato oblast má dlouhodobě menší úhrny srážek než hlavní (hraniční) hřeben Šumavy. Existence charakteristického rozložení srážek při různých povětrnostních podmínkách způsobujících povodně, je zřejmá a jeho znalost může být využita například pro signální odhad prostoru spadu jejich jádra a pro vylepšení kvantitativních předpovědí srážek produkovaných numerickým modelem. Příkladem aplikace znalosti typického rozložení srážek způsobujících povodně je metodika, kterou publikoval *Obled* [2007]. Uvedená metoda na základě hodnocení historických analogických situací rozložení srážek a aktuálních předpovědí srážek zvyšuje prostorové rozlišení a přesnost předpovědí srážek.

Většina povodí je citlivá na širší spektrum meteorologických příčin. V závislosti na sezóně tak vytváří různé typy odtokových reakcí, které lze popsat například pomocí specifického tvaru průtokové vlny. Tohoto jevu si všiml *Buchtele* [1972], který provedl jednu z prvních kategorizací povodňového režimu v povodí horní Vltavy.

Popis velkých historických povodní na území dnešní České republiky včetně přehledu dosavadních poznatků o povodních publikovali *Brázdil a kol.* [2005]. Vybrané povodňové epizody jsou zde podrobně popsány z hlediska jejich sezónálního výskytu, synoptických příčin, množství a extremity srážek.

### 2.3 Metoda předpovědního analogu v hydrologické prognóze

Existence povodňového režimu, který je vyjádřen omezeným souborem příčin povodňových případů, je důležitým faktorem k aplikaci metody předpovědního analogu pro signalizaci vývoje srážko-odtokové situace. Omezený soubor povodňových epizod a limitující znalosti příčin historických povodní by nedávaly velké šance pro nalezení analogické odtokové situace (kdy se na základě podobných příčin odhaduje charakter a průběh blížící se povodně), kdyby studium povodňového mechanismu nepotvrdilo, že příčiny a průběh povodní v konkrétním povodí vykazují společné znaky.

Metoda předpovědního analogu našla v hydrologii a meteorologii uplatnění tam, kde se z různých důvodů nedaří matematicky modelovat přírodní procesy. Je to klasická předpovědní

technika, která byla v minulosti využívána více než dnes, kdy ji povětšinou nahrazují fyzikální a deterministické modely.

V meteorologii metodu předpovědního analogu poprvé použili ke krátkodobé předpovědi počasí *Lorenz*, [1969] a *Martin*, [1972]. Postupem času se využití této metody měnilo především z důvodu rozvoje koncepčních modelů, které tyto klasické metody nahrazují jako například právě u krátkodobých předpovědí srážek. Dnes se používá v meteorologické prognózní službě, například ke střednědobým předpovědím, jejichž časový předstih přesahuje předpovědní horizont současných modelů.

Pro potřeby protipovodňové ochrany jednu z prvních studií, ve které byla použita metoda analogu, provedl *Kakos* [1974] v povodí Odry. Na základě pohybů středů tlakových níží na hladině 500 hPa navrhl jednoduchá pravidla pro výběr třídenního analogu. Při značném zjednodušení došel k závěru, že při výskytu uvedeného třídenního analogu lze za určitých podmínek očekávat následující den (nejvýše dva až tři dny) v Bohumíně kulminaci větší nebo rovnou jednoletému průtoku. Jinou, novější prací, ve které sice metoda předpovědního analogu není přímo zmiňovaná, nicméně její principy jsou v ní použity, je práce *Müllera a kol.* [2006]. Autoři na základě rozboru anomálií u vybraných meteorologických prvků ve dnech, které předcházely velkým povodním v ČR, definovali index, u kterého překročení určité hodnoty signalizuje blížící se výskyt extrémních srážek, a tedy i povodní.

Pro potřeby hydrometeorologických prognóz se v poslední době rozvíjí využití metody analogu ke zpřesnění (downscalingu) modelových výstupů, především srážek. *Wetterhall* [2004] a *Obled* [2007] například publikovali metody, které na základě shody mezi rozložením tlaku vzduchu u předpovídané a historické situace zpřesňují kvantitativní předpovědi srážek pomocí historických záznamů ze sítě srážkoměrných stanic.

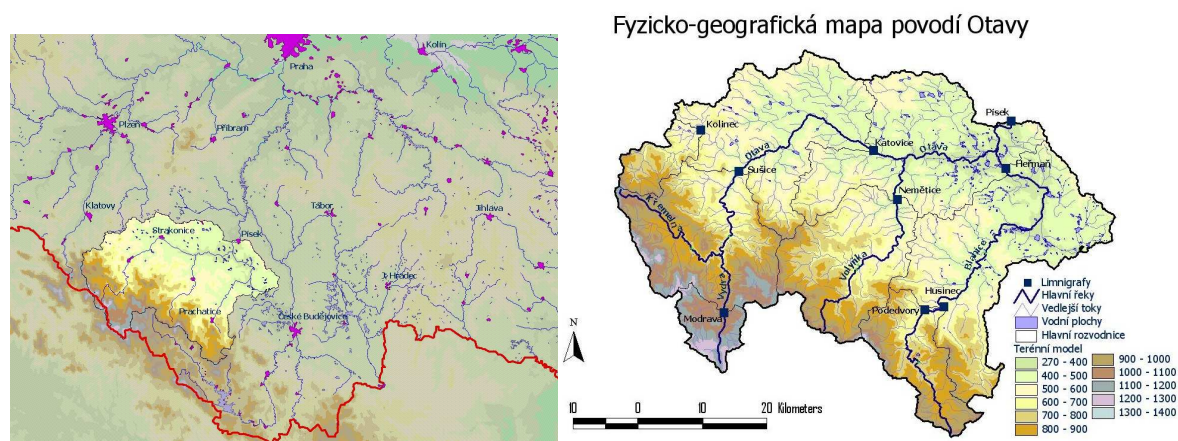


### 3. Fyzicko-geografické charakteristiky povodí Otavy po Písek

Přírodní podmínky povodí Otavy byly již popsány v několika odborných publikacích. Komplexní popis fyzicko-geografické sféry obsahují například diplomové práce *Běhalové [1995]*, *Lejskové [2000]* a *Vlasáka [2000]*). V publikacích zabývajících se hydrologií povodí Otavy uvádí popis přírodních podmínek například *Buchtele [1972]*. Ucelený popis lze najít i v několika populárně naučných publikacích (*Albrecht [2000]*, *Benešová [2005]*, *Šmíd [2005]*). Následující kapitoly proto uvádějí pouze stručný přehled fyzicko-geografických charakteristik povodí Otavy po Písek s důrazem na ty vlastnosti, které mají vliv na odtokové poměry.

#### 3.1 Poloha a rozloha povodí

Povodí Otavy se nachází v jihozápadní části České republiky (ČR), pouze velmi malá jeho část - nejvyšší partie Křemelné a Vydry (respektive Roklanského a Březnického potoka) leží na území Německa. Poloha povodí je velmi důležitá z hlediska vlivu typických cirkulací atmosféry nad střední Evropou a jejich interakcí s morfologií povodí, proto do značné míry determinuje výskyt a mechanismus vzniku povodní. V prostoru střední Evropy se směrem od západu k východu zvyšuje četnost povodní spojených s přechodem tlakové níže středomořského původu, směrem k západu se zase více uplatňují situace vyvolané postupem frontálních systému z Atlantiku [*Brázdil, 1986*]. V povodí Otavy se objevují oba tyto základní hydrosynoptické typy povodní, relativní četnost jejich výskytu se však různí podle extremity povodně (viz kapitola 5.2). Důležitá je také pozice povodí v rámci masivu Šumavy, jehož vliv na množství orografických srážek je pro vznik povodní v tomto prostoru značný.

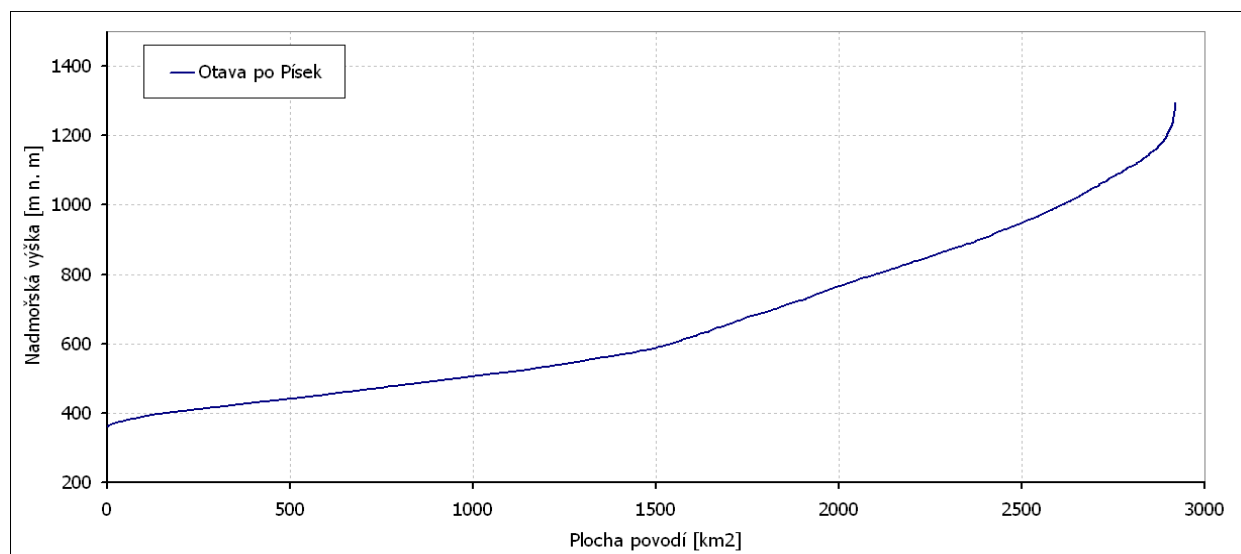


Obr. 3.1 Poloha povodí Otavy po vodoměrnou stanici Písek a fyzicko – geografická mapa

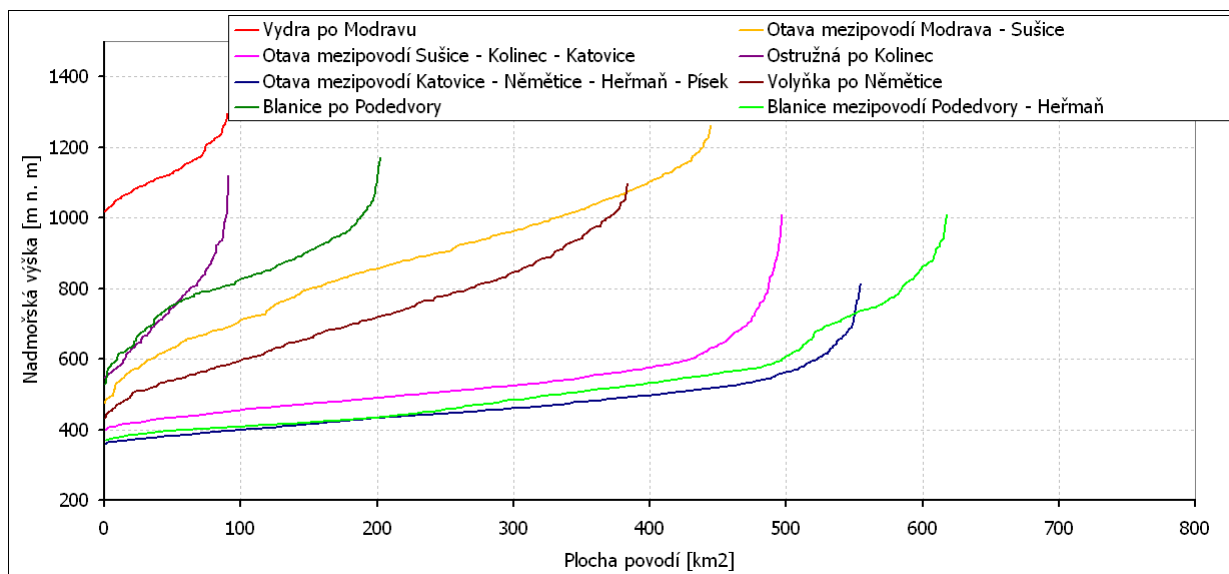
Rozvodnice Otavy po vodoměrnou stanici Písek (dále pouze povodí Otavy) směřuje od Písku k západu a prochází Blatenskou pahorkatinou, kde se postupně stáčí na jihozápad a Šumavským podhůřím stoupá směrem ke státní hranici. Dále rozvodnice sleduje vrcholové partie Šumavy (Pancíř 1 214 m n. m., Luzný 1 373 m n. m.) a přibližně kopíruje hranici s Německem. U vrchu Černá hora, ležícího v blízkosti pramenů Vltavy se odklání k severu a pak opět přes masív Boubína a Knížecího stolce k jihozápadu. Zde nabírá rozvodnice definitivně severní směr, sestupuje do Českobudějovické pánve a po hřbetu Píseckých hor uzavírá povodí v Písku. Plocha takto vymezeného povodí Otavy je 2 913 km<sup>2</sup>.

### 3.2 Morfometrické charakteristiky povodí

Povodí Otavy má tvar obdélníkové mísy, ve které stěna reprezentovaná jižními a jihozápadními svahy mnohem převyšuje stěnu protější. Nejvyšší partie a zároveň pramenná oblast Otavy leží ve vrcholové části Šumavy a má charakter náhorní planiny tvořené zarovnaným povrchem v nadmořské výšce nad 1 000 m n. m. Podobný charakter má také horní Blanice po vodoměrnou stanici Blanický Mlýn. Směrem z pramenné oblasti do vnitrozemí České kotliny se zvyšuje sklonitost svahů, údolí řek se zahlubují a zvyšuje se spád říčních koryt. Tento charakter mají kromě Otavy nad Sušicí také horní části Volyňky a Blanice nad Husineckou přehradou. Nejvyšší sklonitosti terénu se vyskytují poblíž kaňonu Vydry a Křemelné a v okolí masívů Boubína a Libína na horní Blanici (viz obr. 3.3). Při úpatí Šumavy se hornatý ráz krajiny mění na pahorkatinný, který má také severní a severovýchodní část povodí. Na úseku mezi Strakonícemi a soutokem Otavy s Blanicí řeka protéká plošším územím místy s charakterem roviny, před Pískem se údolí opět zahlubuje až k ústí Otavy do Vltavy protékající v této části hlubokým kaňonem.

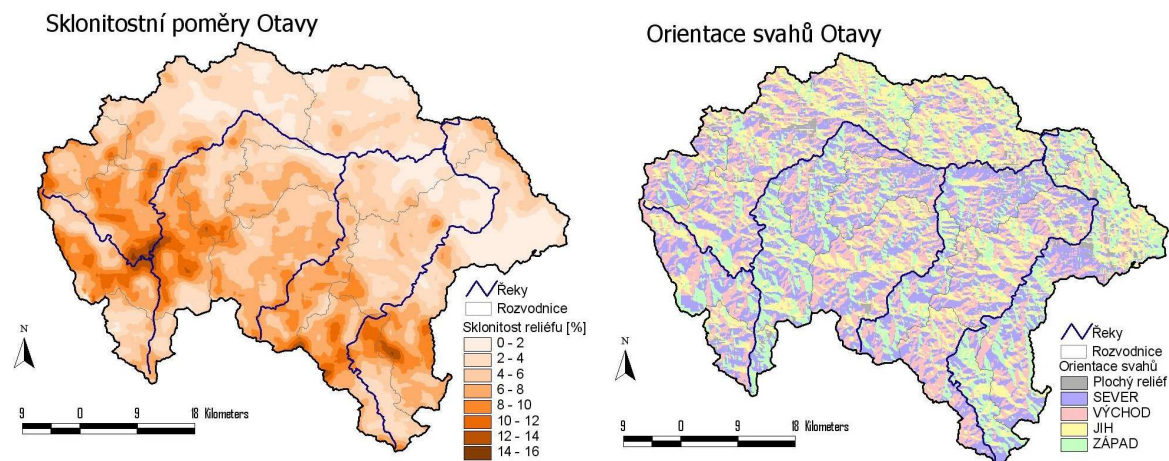


Obr. 3.2 Hypsografická křivky povodí Otavy



Obr. 3.3 Hypsografické křivky dílčích povodí a mezipovodí v povodí Otavy

Sklonitostní a výškové poměry ovlivňují především rychlost a koncentraci odtoku a také citlivost povodí na povodně z tání sněhu. Nástupy povodňových průtoků v povodích odvodňující Šumavské podhůří bývají zpravidla mnohem rychlejší než na dolní Otavě, kde se kromě pomalejšího odtoku ze střední a dolní části povodí uplatňuje i výraznější transformace vlny v korytě toku. Vliv morfologie povodí na sezónní režim je popsán v kapitole 5.3.



Obr. 3.4 Sklonitostní poměry a orientace svahů v povodí Otavy

Většina povodí Otavy leží na území geomorfologických celků Šumava a Šumavské podhůří. Částečně mezi ně zasahuje sever Českokubějovické pánve a jih Blatenské pahorkatiny. Před Pískem vtéká Otava do Táborské pahorkatiny. Průměrná nadmožská výška

povodí je 639 m n. m. Nejvyšším bodem je vrch Luzný (1 373 m n.m.) na německo – české hranici, v Písku pak Otava opouští povodí v nadmořské výšce 355 m n.m.

### 3.3 Geologická stavba a půdy

Geologická stavba území v kombinaci s klimatickými podmínkami určují výsledek procesu zvětrávání, což mimo jiné znamená vytvoření propustných či nepropustných vrstev v podloží.

Povodí Otavy leží převážně v prostoru šumavského moldanubika ohraničeného ze severu středočeským plutonem, který také částečně zasahuje do prostoru povodí. Z jihozápadu je hranicí moldanubický pluton. Budované je převážně pararulami a migmatity. Na jeho okrajích, kde zasahují v podloží plutony, se vyskytuje žula. Zajímavostí jsou poměrně mocná, i když plošně málo rozsáhlá ložiska krystalického vápence na Sušicku.

Mladší sedimentární formace se vyskytují v rovinatém terénu dolní Otavy a Blanice, kde třetihorní písčité až štěrkové sedimenty převážně říčního původu dosahují mocnosti 20 až 30 m. V oblastech těchto fluviálních sedimentů vyčlenili *Olmer, Kessler [1990]* dva hydrogeologické rajóny, kde ve zvodních mocných od 5 do 30 metrů, maximálně až 100 m u Vodňan jsou výborné podmínky pro akumulaci mělkých podzemních vod.

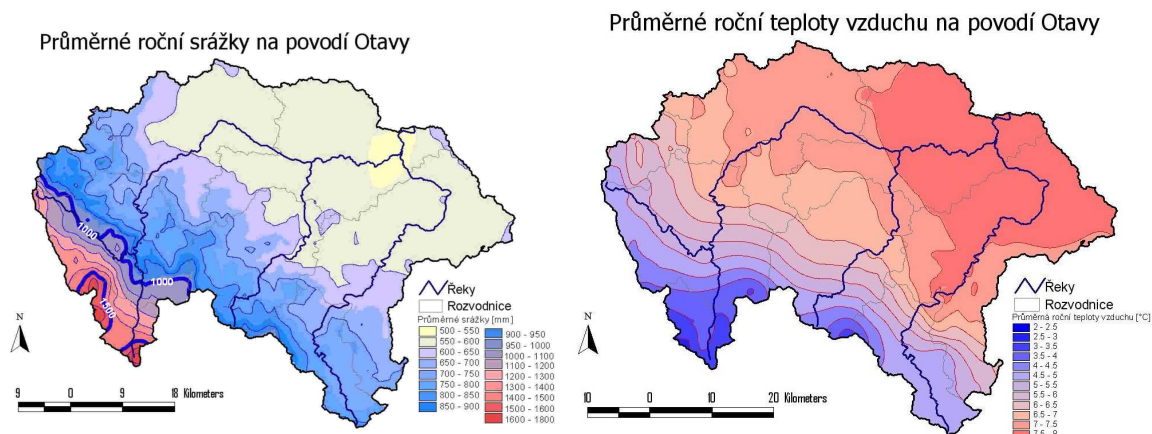
Z hlediska výskytu půdních typů je v horských polohách nejrozšířenější podzol kambizemní a v údolích bystřin glej typický. V podhůří je většina povrchu pokryta luvizeměmi a rankery, na které v rovinatých částech povodí navazuje kambizem typická a v blízkosti hlavních toků povodí půdy náležící do skupiny fluvizemí. Lokálně se v povodí vyskytují vápenité rendziny a v horských oblastech Šumavy pak rašelinné organosoly.

### 3.4 Klima, vegetace a land-use

Rozdíly v klimatických podmínkách jednotlivých částí povodí Otavy jsou dány především topografií terénu. Klima oblasti z různých pohledů je znázorněno pomocí map v Atlasu podnebí Česka [*Tolasz, 2007*].

Nejchladnější oblast s roční průměrnou teplotou 2 °C leží ve vrcholových partiích Šumavy, absolutní minima se ale vyskytují ve sníženinách na náhorní plošině v okolí Kvildy, kde i v letních měsících mohou teploty klesat pod bod mrazu [*Křivancová, 1999*]. Dlouhodobě nejvyšší úhrny srážek se nacházejí v oblasti centrálního hřebene Šumavy, kde průměrné roční množství srážek přesahuje 1600 mm proti 550 mm v okolí Písku. Směrem k severovýchodu od centrálního hřebene srážek zřetelně ubývá, a to i přes to, že se zde vyskytuje podružný hřeben s masivy Popelné, Boubína a Libína, které se svojí maximální nadmořskou výškou téměř vyrovnají centrálnímu hřebeni Šumavy. Převažující vliv závětrí centrálního hřebenu Šumavy

na rozložení průměrných úhrnů srážek v centrální části povodí Otavy je způsoben tím, že většina srážek spadlých přechází na frontách v západním proudění od Atlantiku (viz kapitola 5.5). Zmiňovaný podružný hřeben ovšem způsobuje výrazné návětrí při severovýchodním proudění, které je mnohem typičtější pro letní povodně na Otavě, což vytváří prostorovou nesourodost mezi maximem dlouhodobých a extrémních srážek.



Obr. 3.5 Průměrné roční srážky a průměrné roční teploty vzduchu v povodí Otavy

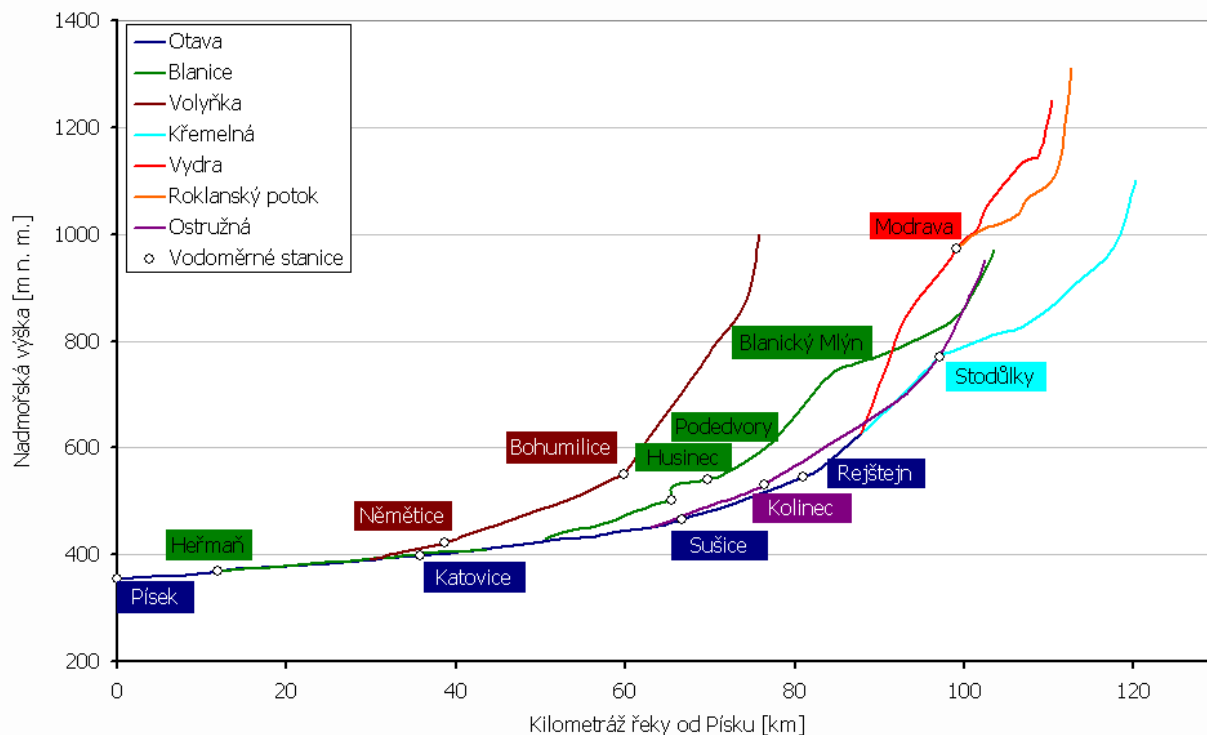
Vegetačně patří povodí Otavy do oblasti střeoevropské lesní flóry (Hercynium, podoblast Euhercynium), v níž převažuje rostlinné lesní společenstvo. Většina povodí je v oblasti klimaxu bukového až bukovovo-jedlového lesa. Smrkový les, který dnes v povodí dominuje, je klimaticky původní pouze v nejvyšších partiích Šumavy.

Struktura využití půdy v povodí Otavy se zásadně neliší od průměru v České republice. Mezi jednotlivými částmi povodí ale existují výrazné rozdíly v podílu zastoupení lesa. Některé přítoky Vydry a Křemelné mají lesnatost až 100 %, Otava u Čeňkovy pily 83 %, Otava po Sušici 73 %, u menších přítoků Otavy na dolním toku se lesnatost pohybuje od 0 do 30 %. Celková lesnatost povodí Otavy stejně jako jeho dvou hlavních přítoků Blanice a Volyňky je přibližně 40 % [Kašpárek, 1999].

### 3.5 Říční síť – hydrografické poměry

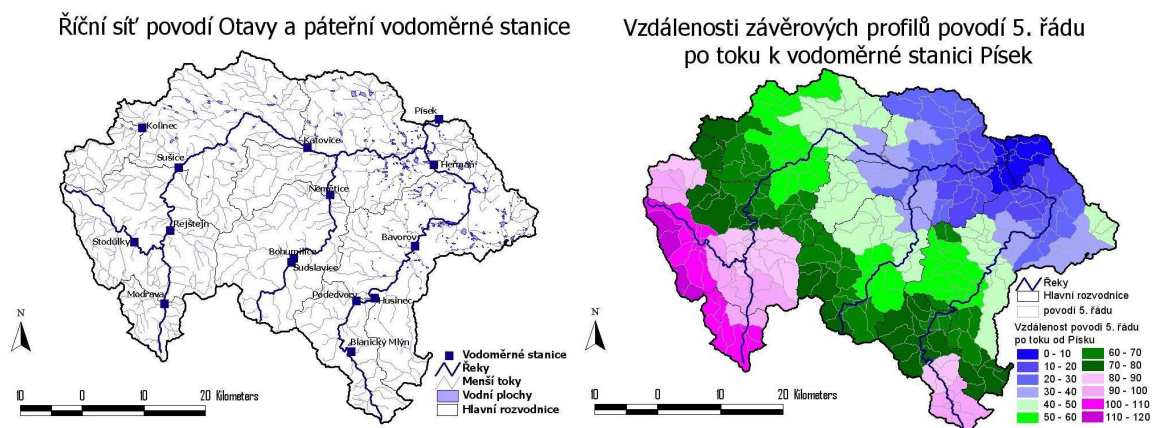
Otava vzniká soutokem Vydry a Křemelné nedaleko osady Svojše v nadmořské výšce 627 m n. m. Dále Otava protéká Šumavským podhůřím a pod Horažďovicemi vstupuje do Českobudějovické pánve, kterou po soutoku s Blanicí opouští při zahlabování koryta v členitějším reliéfu Táborské pahorkatiny. S výjimkou Volyňky tekou všechny významné přítoky Otavy (Vydra, Křemelná, Blanice) ve svých nejvyšších úsecích šumavskými pláněmi, kde vytvářejí meandrující koryta s poměrně malým spádem. Následující říční úseky jsou pak

zpravidla mnohem divočejší, sklon koryta toku se pohybuje kolem 10° a řeky mají charakter horské bystřiny s kamenitým korytem. Pod Sušicí Otava výrazně mění charakter koryta, sklon se snižuje pod 2° a řeka začíná meandrovat ve vlastních nánosech. Stejně tak se mění tok Blanice pod Strunkovicemi nad Blanicí. Sklonitostní poměry jsou znázorněny na grafu spádových křivek Otavy a jejích přítoků.



Obr. 3.6 Spádové křivky hlavních toků v povodí Otavy

V horní polovině toku má říční síť vějířovitý tvar, v dolní pak spíše asymetrický s převahou pravostranných přítoků, které pramení v podhůří nebo horských částech Šumavy (viz obr. 3.7). Podle indexu charakteristiky tvaru povodí pro celou Otavu, který je roven 0.23 jde o vějířovité povodí (podle *Duba [1957]*). Tato vlastnost je ještě zřetelnější z rozložení říčních vzdáleností (podle kilometráže řek) jednotlivých částí povodí po toku do závěrového profilu stanice Písek (viz obr. 3.7). Nárůst plochy s říční vzdáleností závěrového profilu je největší ve střední části povodí. Mezi 40 až 80 kilometrem, což je jedna třetina maximální délky toku Otavy, se nachází 60 % celkové plochy povodí. S určitým zjednodušením (důležitější vzdálenost než délková je časová) je možné tvrdit, že z této části povodí se při zasažení plošně rovnoměrnými srážkami bude vytvářet v Písku průtokové maximum.



Obr. 3.7 Říční síť a vzdálenosti závěrových profilů povodí 5. řádu po toku k vodoměrné stanici Písek

V celém povodí je 1 453 rybníků o celkové ploše 3 312 hektarů a objemu 35,3 miliónů m<sup>3</sup>. Na Šumavě odvodňuje Otava také dvě ledovcová jezera Laka a Prášilské jezero. Přírozený vodní režim je na střední a dolní Blanici a na Otavě pod soutokem s Blanicí ovlivňován manipulováním na nádrži Husinec a hospodařením vodou na rybnících v okolí Vodňan, Horažďovic a Kestřan.

### 3.6 Hydrologický režim

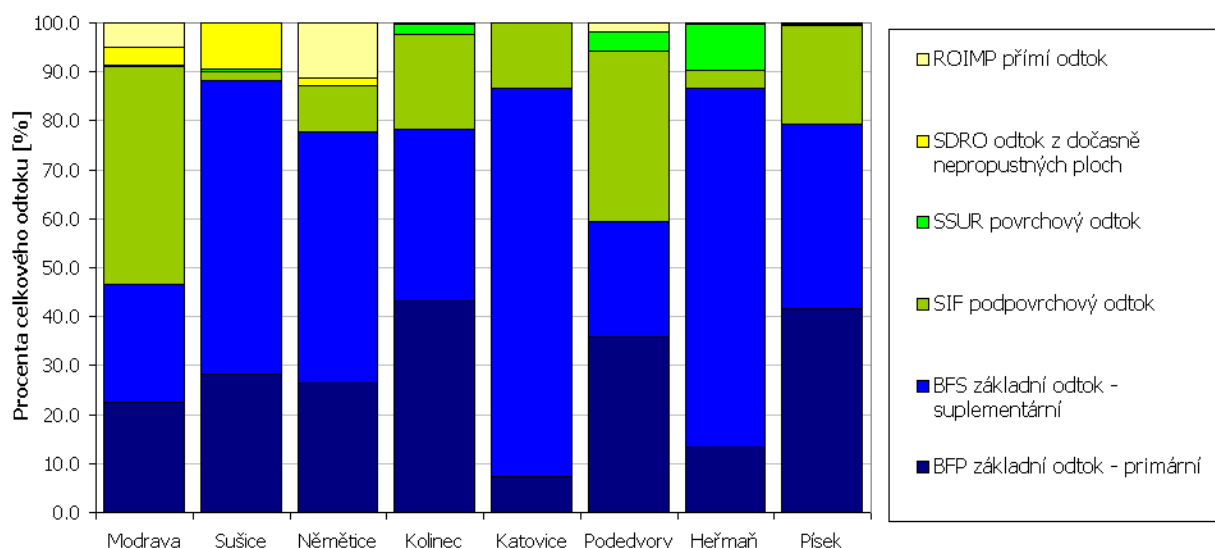
Z průměrných ročních charakteristik pro dílčí povodí Otavy se potvrzuje obecný trend vzrůstu hydrologických charakteristik - odtokového koeficientu, a specifického odtoku - s nadmořskou výškou. Horní část povodí Otavy uzavřená profilem Sušice je jednoznačně hlavní zdrojnicí vody, na 19 % celkové plochy povodí zde vzniká 47 % ročního odtoku vody (viz. tabulka 4.1). V pramenných oblastech – zejména v povodí Vydry po Modravu jsou odtokové poměry ovlivňovány vysokým procentem organosolů, které mají specifický vodní režim – na jedné straně velkou potenciální kapacitu pro akumulaci vody, na druhé schopnost chovat se při nasycení jako nepropustná plocha. Hydrologická funkce šumavských slatí a rašelinišť je předmětem dalšího výzkumu [Kocum, Janský, [2008].

Pro popsání struktury odtoku byla využita modelová simulace z hydrologického předpovědního systému AQUALOG, používaného v operativním provozu na ČHMÚ. Srážko-odtokový proces je zde počítán modelem SACRAMENTO Soil-Moisture-Accounting (např. Fiedler [2000]), který pro účely výpočtu schematizuje povodí na svrchní a spodní půdní zóny a umožňuje tak na základě těchto zón separovat odtok. Přestože parametry (vlastnosti půdních zón) modelu nejsou určeny podle přírodních podmínek, ale z kalibrace, která vlastnosti půd nezohledňuje, ukazují modelové simulace zhruba na strukturu odtoku (viz obr. 3.8).

Tabulka 3.1 Vybrané hydrologické charakteristiky pro dílčí povodí Otavy [Kašpárek, 1999]

Název stanice	Vodní tok	Povodí [km <sup>2</sup> ]	Srážka [mm]	Ztráta [mm]	Odtok [mm]	Odtokový koeficient	Specifický průměrný průtok [l.s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup> ]	Průměrný průtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
<b>Modrava</b>	Vydra	90,4	1297	140	1157	0,89	36,68	3,32
<b>Rejštejn</b>	Otava	334,6	1197	428	767	0,64	24,35	8,15
<b>Sušice</b>	Otava	536,2	1062	455	606	0,57	19,22	10,3
<b>Katovice</b>	Otava	1134,5	864	478	386	0,45	13,89	13,9
<b>Písek</b>	Otava	2913	732	476	256	0,35	8,12	23,6
<b>Husinec</b>	Blanice	216,2	790	497	293	0,37	9,29	1,97
<b>Heřmaň</b>	Blanice	839,6	652	483	169	0,26	5,35	4,49
<b>Němětice</b>	Volyňka	383,4	722	492	230	0,32	7,28	2,79
<b>Kolinec</b>	Ostružná	91,1	877	439	438	0,50	13,89	1,26

Struktura odtoku z let 2002 -2005 podle modelu SAC - SMA



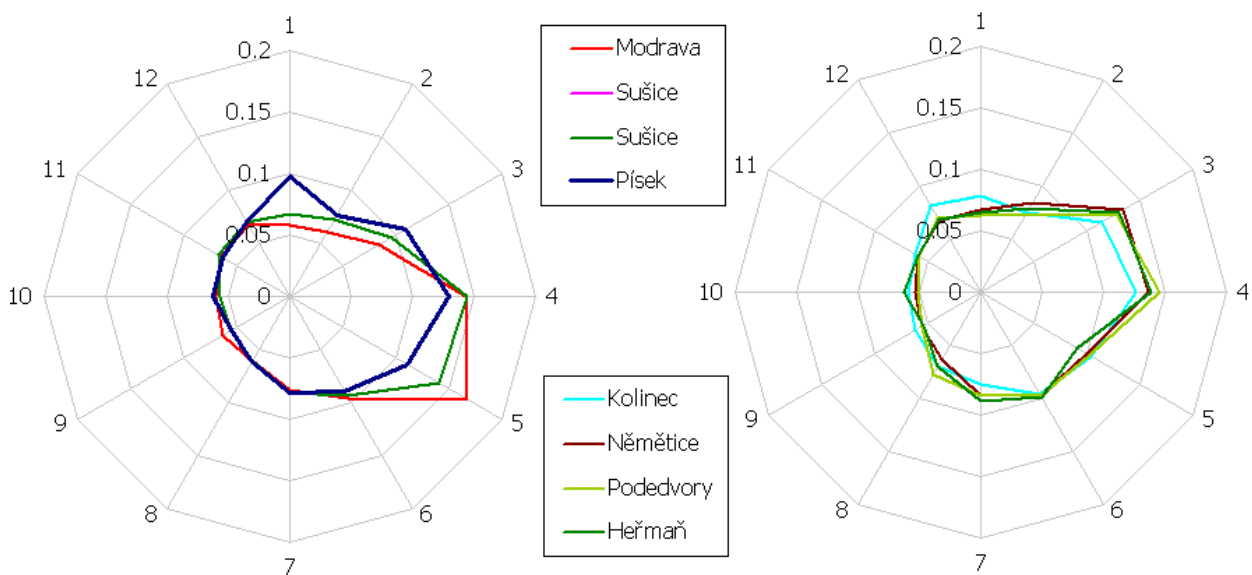
Obr. 3.8 Struktura odtoku Otavy a jejich přítoků podle srážko-odtokového modelu SAC – SMA.

V povodích, jejichž plochy leží většinou na hornaté části Šumavy, se na celkovém objemu odtoku více podílí rychlý povrchový a hypodermický odtok ze svrchních půdních horizontů. To zvyšuje povodňové ohrožení rychlými nástupy povodňových průtoků a vysokými specifickými kulminační průtoky, na druhou stranu tato povodí po povodni rychle ztrácejí svojí vysokou nasycenost a snižují riziko opakování povodní. Ve středních a dolních partiích Otavy a Blanice díky sklonitostním a půdním poměrům naopak narůstá podíl základního odtoku a s ním se mění i charakter průtokových vln.

Povodí Otavy jako celek i jeho jednotlivé části s výjimkou nejvyšších partií Šumavy mají pluvio – nivální režim s převažujícím objemem odtoku z dešťových srážek a maximálním objemem v jarních měsících, kdy dochází k tání sněhu. Režim niválně – pluviální mají pouze



menší toky v pramenné oblasti Otavy resp. Křemelné a Vydry, kde jarní maximum je posunuto až do května a je výraznější než u ostatních povodí. Sezonální režim povodňových průtoků je v mnoha ohledech odlišný a zabývá se jím samostatná kapitola (5.3)



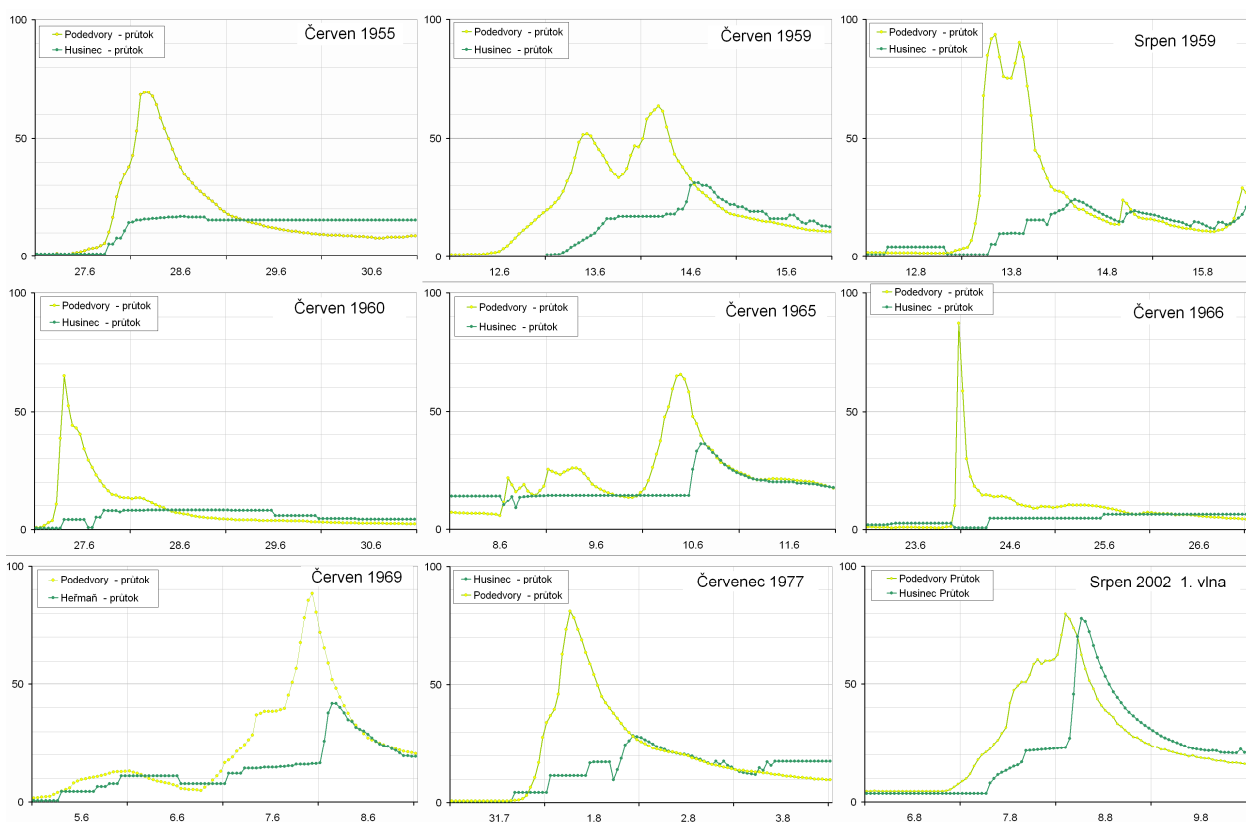
Obr. 3.9 Rozložení relativního množství odtoku z let 1961 – 2005 v jednotlivých povodích Otavy

Díky absenci velkých vodních nádrží se v povodí Otavy vyskytují relativně často ledové jevy. V Písku se za období pozorování 1922 – 1965 vyskytly ledové jevy nejdříve 26. 11. a nejpozději zmizely až 25. 3. [ČHMÚ, 1968]). Místa vzniku ledových bariér, které mohou vést až k lokálním záplavám, se nacházejí nejčastěji tam, kde výrazně klesá rychlost proudu – například na počátcích vzduť jezů (Velké Hydčice, Střelské Hoštice atd.). Profil vodoměrné stanice Písek, ze kterého byly použity záznamy povodňových vodních stavů, je situován v místě, kde se ledové bariéry tvoří jen ojediněle, a proto naprostá většina povodní je zde způsobena zvýšeným průtokem. V Otavě nad Sušicí a ve Vydře, kde je proudění v balvanitém korytě silně turbulentní, vzniká při velmi nízkých teplotách také vnitrovodní led.

Ovlivnění hydrologického režimu velkými vodohospodářskými stavbami jako jsou přehradní nádrže 1. a 2. kategorie na Vltavské kaskádě na Otavě není, a proto si odtokové poměry Otavy udržují dostatečnou kontinuitu s nedávnou minulostí, což je důležitá vlastnost pro další analýzy povodňových epizod.

Nejvýznamnější strukturální prvek protipovodňové ochrany představuje v povodí Otavy přehradní nádrž Husinec. Leží na Blanici nad městem Husinec a plní dnes především ochrannou funkci. Svým objemem 6,5 mil. m<sup>3</sup> patří sice mezi menší nádrže (např. Římov -

Malše 34,5 mil. m<sup>3</sup>, Lipno - Vltava 306 mil. m<sup>3</sup>), ale je zde ponechán relativně velký retenční prostor 3,7 mil. m<sup>3</sup>, díky kterému se daří výrazně zachycovat vlny s malým objemem a zmenšit velké kulminační průtoky z letních přívalů, které v této části povodí jsou poměrně časté. Při velkých plošných povodních však může dojít k rychlému naplnění nádrže a přelití přes korunu hráze. V období od roku 1955 až do povodně v srpnu 2002, pro které byl zpracován katalog povodní na Blanici [Vlasák, 2005] se podle těchto údajů dařilo na Husinci úspěšně zachycovat povodně a k přelití hráze docházelo zpravidla až na sestupné části přítokové vlny. Při povodni v srpnu 2002 se u první vlny povedlo pouze zpozdít nástup povodňových průtoků, vliv nádrže na průběh druhé větší vlny byl pak zanedbatelný (viz obr. 3.10)



Obr. 3.10 Transformace povodňových vln přechodem přes přehradní nádrž Husinec (limnigraf Podedvory leží poblíž ústí Blanice do Husinecké nádrže)

### 3.7 Antropogenní transformace přírodní sféry

Krajina povodí Otavy přechází od přírodně blízké, která se nejvíce vyskytuje na Šumavě, k intenzivně obhospodařované v střední a dolní části povodí, kde se také v blízkosti toku nacházejí větší sídla – potenciální zdroje největších povodňových škod. Přírodně nejcecnější lesní porosty na Šumavě byly v posledních letech vážně narušeny kůrovcovou

kalamitou, která v některých oblastech vedla až k odlesnění velkých ploch a k ovlivnění odtokového režimu řek.

Pro porovnání příčin a průběhu starších povodní mohou být překážkou výrazné změny ve využívání krajiny, které ovlivňují srážko-odtokový vztah. Naštěstí v posledních 150 let došlo v tomto směru v povodí Otavy pouze k mírným změnám. Vzrostla celková lesnatost povodí, naopak výrazně klesla rozloha trvalých travních porostů, které byly většinou přeměněny na zemědělskou půdu a narostla také zastavěná plocha [Bičík, 2004].

Vliv na odtokové poměry má také činnost člověka v bezprostředním okolí toků. Údolní niva je zde zpravidla obhospodařovaná, koryto toku na některých místech doznalo výrazných zásahů. Langhammer [2004] uvádí například, že téměř polovina ploch údolních niv v povodí Otavy je nevhodně využívána jako orná půda, která snižuje schopnost transformace povodňové vlny a zvyšuje erozi. Z mapování upravenosti říčních toků a následků povodně 2002 v povodí Otavy vyplynulo, že za posledních 150 let došlo v povodí Otavy ke zkrácení délky toků z 612 km na 556 km, tedy o 9 %, některé úseky jako například Blanice od Bavorova po ústí a částečně i Otava od Horažďovic po soutok s Blanicí byly zkráceny místy až o 40 %. Takovýto zásah urychluje postup povodňové vlny a snižuje její transformaci. Při mapování následků povodně ze srpna roku 2002 se také zjistilo, že téměř 90 % následků se nachází na úsecích se středně a vysoce intenzivní upraveností koryta toku, a tedy že výskyt projevů činnosti povodně je těsně svázán s upraveností vodních toků a příbřežní zóny [Langhammer, 2004].

## 4. Návrh databanky povodní

### 4.1 Systém archivace

Nové možnosti ukládání dat do digitálního formátu a s tím spojené výhody změnilы přístup ke shromažďování informací mimo jiné i o povodňových situacích. Databázové systémy umožňují rychlý selektivní výběr požadovaných dat a jejich export do jednotného formátu, který je potřebný pro další zpracování. Funkční počítačové databáze historických meteorologických a hydrologických dat se proto staly nejpoužívanějším zdrojem primárních dat pro analýzy povodní. V České republice tyto databáze provozuje Český hydrometeorologický ústav. Jsou do nich ukládány všechna nově naměřená data a průběžně se doplňují i starší data z historických záznamů.

Je pravděpodobné, že všechny současné i budoucí práce, které se týkají povodní, se o tyto databáze jako zdroje dat budou opírat. Přesto je možné uvést důvody, proč za tohoto stavu má v této práci navrhovaná databanka povodní své opodstatnění:

- V databázích chybějí informace o starších povodňových případech.
- Databanka poskytuje ucelený přehled o výskytu a příčinách povodní.
- Primární data ze stanic jsou zpracovány do snáze interpretovatelných grafických výstupů.
- Databanka povodní slučuje záznamy z více informačních zdrojů do jednoho místa.
- Některé údaje v databázích jsou autorsky chráněny pořizovatelem dat a grafická forma databanky umožňuje přístupný náhled na tyto data.

Cílem sestavení databanky povodňových událostí není vytvoření alternativního zdroje primárních dat o povodních, ale předložení přehledu o příčinách a průběhu povodní v jednotné, převážně grafické formě. Databanka povodní je tvořena listy (kartami), které obsahují základní informace o povětrnostních příčinách, srážkách a odtokové odezvě ke každé zpracovávané povodni. Data jsou v těchto listech zobrazena graficky ve formě map, grafů nebo průtokových hydrogramů. Způsoby zobrazení a mapové legendy jsou u všech listů jednotné, aby bylo možné povodně vzájemně porovnávat.

### 4.2 Přehled povodní

Seznam všech významných povodňových situací, které se v uceleném povodí vyskytly, je klíčovým souborem vstupních informací. Odvívá se od něj všechny další postupy, například sezónní nebo frekvenční analýzy, u kterých by nejednoznačný výběr epizod ovlivnil výsledky. Proto je třeba při tvorbě tohoto souboru dodržovat jasná kritéria výběru povodní.

Jako vhodné kritérium pro výběr povodní byl zvolen průtok, který již vede k rozlivům a stává se zdrojem potenciálního nebezpečí. Protože tento průtok je místně proměnlivý, byla zvolena jako separační mez hydrologická charakteristika 1letého průtoku, která mimo jiné umožňuje porovnávat soubory povodní z různých povodí. Směrodatným kritériem pro vytváření souboru byl zvolen výskyt průtoku ve vrcholu povodňové vlny Otavy ve stanici Písek nad hodnotou 1letého průtoku, tzn.  $146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . U vícevrcholových vln byly za samostatné povodně považovány ty vlny, jejichž vrcholy byly vzdáleny od sebe alespoň tři dny a kdy průtok v těchto dnech poklesl na polovinu kulminačního průtoku první vlny. Proto například povodeň ze srpna roku 2002 je zde zpracována jako dvě samostatné epizody. Podle zvoleného kritéria byly vybrány všechny povodně mezi roky 1961 – 2006. Tento soubor byl rozšířen o velké povodně z let 1890 až 1961, u kterých maximální průtok v Písku překročil hranici 10leté povodně ( $395 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Do souboru nebyly zařazeny povodně vzniklé zmenšením průtočnosti koryta Otavy v Písku. Mezi lety 1961 – 2006 se vyskytly minimálně dvě takové povodně (v lednu 1968 a lednu 1991), u kterých se projevil v záznamu vodoměrných pozorování zřetelně výrazný vliv ledové bariéry na výšku vodní hladiny a vodní stavy zároveň překročily hodnotu pro 1letou povodeň. Žádná z těchto povodní ale nevyvolala v Písku významnější rozvodnění. Na základě uvedených kritérií bylo vybráno 72 povodní, jejichž přehled je uveden v tabulce č. 4.1.

### 4.3 Zdroje a způsob zpracování dat

Povodeň je výsledkem střetu výjimečných faktorů jak v atmosféře, tak i v povodí. Na každou epizodu je proto nutné nahlížet režimově i dynamicky jako na ucelený systém, k jehož pochopení jsou potřeba meteorologické i hydrologické znalosti. Tomu odpovídá i struktura komponent předložené databanky povodní, které vychází z návrhu databanky povodní, který publikoval *Hladný [1993]*. Mezi komponenty jsou meteorologické parametry popisující atmosférické příčiny povodní, charakteristiky srážek, teplot vzduchu, stav povodí před povodní a vlastnosti odtokové odezvy na řekách.

K identifikaci jednotlivých dnů během povodně byl použit obvyklý způsob [*Wehry, 1968*], kdy se den výskytu kulminace nazývá jako DD, dny, které mu předcházely jsou D-1, D-2...,D-5 a dny, které následovaly D+1 a D+2. Pro usnadnění práce při analýzách příčin jednotlivých povodní byly povodně označeny osmimístným číselným kódem, který vyjadřuje datum kulminace Otavy v Písku. Například povodeň, která kulminovala 26.5.2006, má kód 20060526.

Tabulka 4.1 Přehled povodní zařazených do databanky povodňových událostí

<i>kód povodně</i>	<i>Datum kulminace</i>	<i>Průtok [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]</i>	<i>Kód povodně</i>	<i>Datum kulminace</i>	<i>Průtok [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]</i>
20060529	<b>29.5.2006</b>	<b>176</b>	19790313	<b>13.3.1979</b>	<b>155</b>
20060329	<b>29.3.2006</b>	<b>241</b>	19770823	<b>23.8.1977</b>	<b>308</b>
20030103	<b>3.1.2003</b>	<b>258</b>	19770801	<b>1.8.1977</b>	<b>300</b>
20021231	<b>31.12.2002</b>	<b>167</b>	19770521	<b>21.5.1977</b>	<b>163</b>
20020813	<b>13.8.2002</b>	<b>1175</b>	19770209	<b>9.2.1977</b>	<b>163</b>
20020808	<b>8.8.2002</b>	<b>558</b>	19760728	<b>28.7.1976</b>	<b>177</b>
20020322	<b>22.3.2002</b>	<b>267</b>	19750702	<b>2.7.1975</b>	<b>255</b>
19981102	<b>2.11.1998</b>	<b>211</b>	19741230	<b>30.12.1974</b>	<b>187</b>
19981030	<b>30.10.1998</b>	<b>200</b>	19741209	<b>9.12.1974</b>	<b>187</b>
19980916	<b>16.9.1998</b>	<b>154</b>	19740719	<b>19.7.1974</b>	<b>165</b>
19970317	<b>17.3.1997</b>	<b>169</b>	19720423	<b>23.4.1972</b>	<b>170</b>
19970227	<b>27.2.1997</b>	<b>184</b>	19711119	<b>19.11.1971</b>	<b>173</b>
19961021	<b>21.10.1996</b>	<b>176</b>	19700513	<b>13.5.1970</b>	<b>183</b>
19950902	<b>2.9.1995</b>	<b>168</b>	19690608	<b>8.6.1969</b>	<b>249</b>
19950627	<b>27.6.1995</b>	<b>178</b>	19671224	<b>24.12.1967</b>	<b>190</b>
19950602	<b>2.6.1995</b>	<b>180</b>	19670917	<b>17.9.1967</b>	<b>178</b>
19950127	<b>27.1.1995</b>	<b>174</b>	19660809	<b>9.8.1966</b>	<b>163</b>
19931222	<b>22.12.1993</b>	<b>518</b>	19660723	<b>23.7.1966</b>	<b>173</b>
19910803	<b>3.8.1991</b>	<b>247</b>	19660630	<b>30.6.1966</b>	<b>152</b>
19891216	<b>16.12.1989</b>	<b>153</b>	19660418	<b>18.4.1966</b>	<b>186</b>
19880326	<b>26.3.1988</b>	<b>166</b>	19660209	<b>9.2.1966</b>	<b>150</b>
19871220	<b>20.12.1987</b>	<b>274</b>	19650611	<b>11.6.1965</b>	<b>290</b>
19870702	<b>2.7.1987</b>	<b>189</b>	19650601	<b>1.6.1965</b>	<b>250</b>
19870329	<b>29.3.1987</b>	<b>181</b>	19650520	<b>20.5.1965</b>	<b>167</b>
19861023	<b>23.10.1986</b>	<b>161</b>	19640814	<b>14.8.1964</b>	<b>158</b>
19860613	<b>13.6.1986</b>	<b>228</b>	19630701	<b>1.7.1963</b>	<b>152</b>
19860530	<b>30.5.1986</b>	<b>269</b>	19620515	<b>15.5.1962</b>	<b>185</b>
19840917	<b>17.9.1984</b>	<b>161</b>	19620401	<b>1.4.1962</b>	<b>171</b>
19820131	<b>31.1.1982</b>	<b>199</b>	19610609	<b>9.6.1961</b>	<b>188</b>
19820106	<b>6.1.1982</b>	<b>199</b>	19540709	<b>9.7.1954</b>	<b>800</b>
19811016	<b>16.10.1981</b>	<b>192</b>	19400531	<b>31.5.1940</b>	<b>440</b>
19811012	<b>12.10.1981</b>	<b>160</b>	19151008	<b>8.10.1915</b>	<b>500</b>
19810721	<b>21.7.1981</b>	<b>500</b>	18990914	<b>14.9.1899</b>	<b>560</b>
19810311	<b>11.3.1981</b>	<b>213</b>	18960505	<b>5.5.1896</b>	<b>560</b>
19800723	<b>23.7.1980</b>	<b>338</b>	18941005	<b>5.10.1894</b>	<b>600</b>
19791212	<b>12.12.1979</b>	<b>205</b>	18900904	<b>4.9.1890</b>	<b>800</b>

#### 4.3.1 Data pro popis povětrnostních příčin povodní

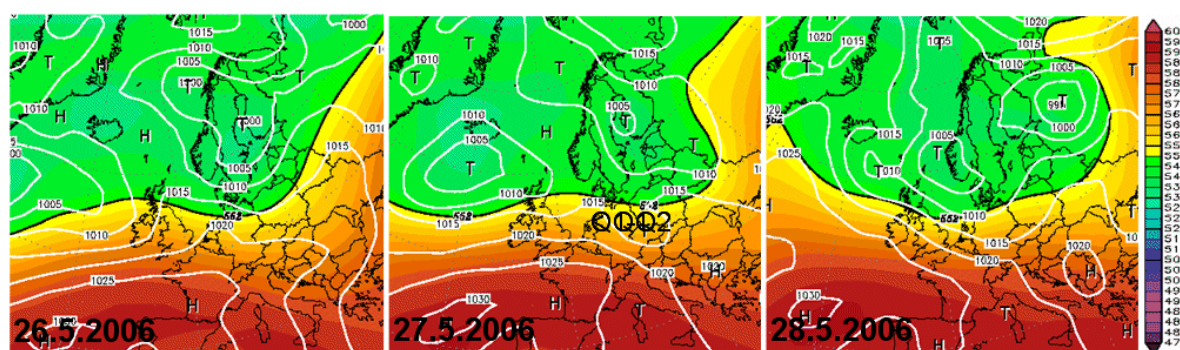
Pro popis základního charakteru atmosférické cirkulace byla použita klasifikace povětrnostních typů podle *Brádky [1961]*, dostupná od roku 1946. Výskyt jednotlivých typů je

uveden u dní D-5 až D+1. Tato typizace bohužel nepřihlíží k detailnějším synoptickým objektům – rozměrů mezo  $\beta$  a menším [Brázdil, Štekl, 1986], a proto také její interpretace na počasí v menších oblastech, řádově odpovídajících sledovanému povodí, je volnější.

Vhodnější pro tyto účely by byla typizace podle Končeka a Reina [1971] nebo Brázdila a Štekla [1986], ale k oběma chybí kalendář typů za delší období. Z těchto důvodů byly pro upřesnění povětrnostních podmínek, zejména směru proudění přidány do Katalogu snímky přízemního a výškového tlakového pole ve dnech D-3 až D-1 stažené z internetového archivu serveru <http://www.wetterspiegel.de/de/archiv/> (obr 4.1). Mapy tlakového pole jsou k dispozici i pro povodně z konce 19. století a první poloviny 20. století, což neplatí pro synoptické typy podle Brádky.

### Povětrnostní situace

Dny před a po kulminaci DD:	D-5	D-4	D-3	D-2	D-1	DD	D+1
Synoptická situace :	Ap1	Wc	Wc	Wc	Wc	Wc	Wc
Churáňov směr větru [°]:	260	260	260	270	270	260	280
Churáňov rychl. větru [m.s <sup>-1</sup> ]:	3,7	5,3	5,7	5,7	6,3	2,7	3,7



Tlak vzduchu přepočtený na hladinu moře [hPa] a výška hladiny 500 hPa [gpm]

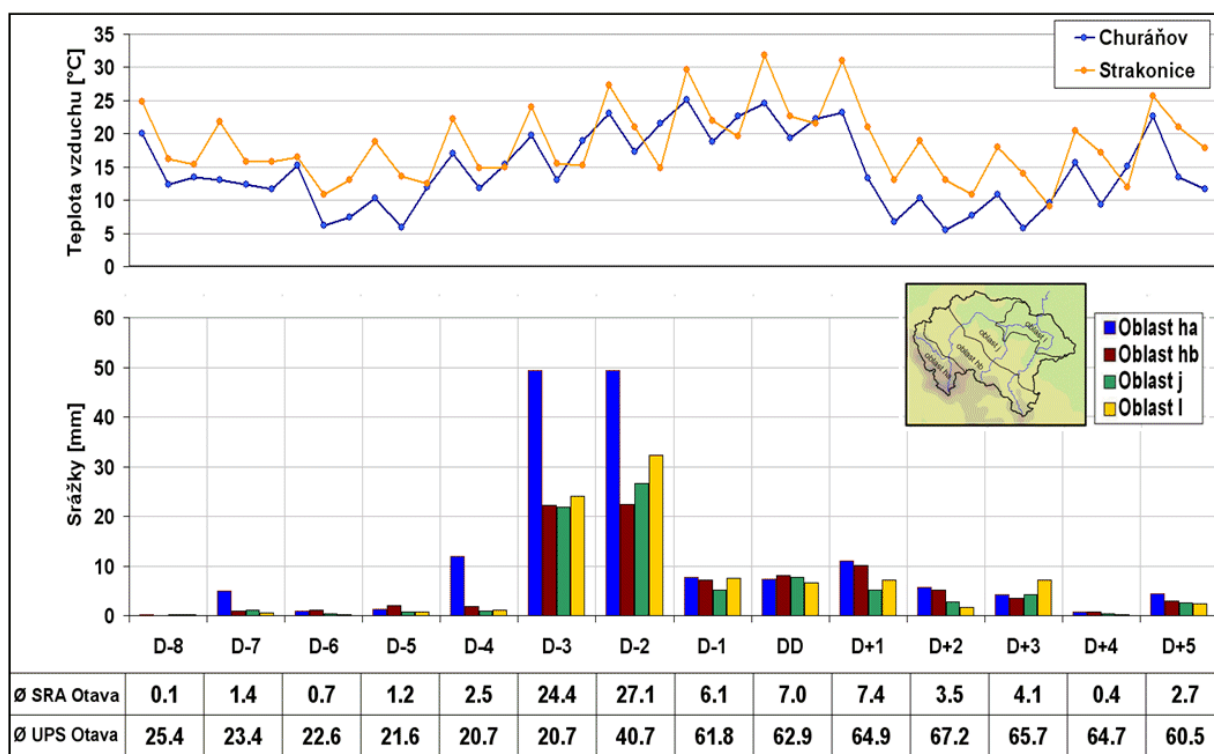
Obr. 4.1 Ukázka informací o povětrnostních příčinách pro povodňovou epizodu 20060529

Pro potřeby analýzy povětrnostních příčin povodní byly určeny polohy a trajektorie řídících tlakových útvarů pomocí analýzy tlakového pole z periodicky publikovaných *Denních přehledů počasí*. Ty ale nejsou součástí databanky povodní.

Projevy atmosférické cirkulace přímo v povodí Otavy jsou v databance popsány pomocí směru a rychlosti větru v meteorologické stanici Churáňov. Tato stanice, díky své poloze v nadmořské výšce 1 108 m, v otevřeném terénu dobře reprezentuje proudění na hladině 850 hPa, která se blíží geostrofickému větru. Údaje z Churáňova, průměrované z měření v klimatických termínech (07h, 14h a 21h) do denních hodnot jsou u každé povodně uvedeny také pro dny D-5 až D-1. U povodní, které se vyskytly před rokem 1940, byly použity stejné údaje z klimatologické stanice České Budějovice, která má delší časovou řadu.

#### 4.3.2 Data pro popis meteorologických příčin

Protože naprostá většina povodní na Otavě byla vyvolána vydatným deštěm (viz kapitola 5.2), byla popisu srážek věnována velká pozornost. Vzhledem k rychlosti odtoku v povodí Otavy by bylo vhodnější srážky analyzovat v hodinovém kroku, bohužel systematické měření srážek v tomto časovém intervalu začalo být prováděno až na konci 20. století. Proto bylo nutné omezit se na denní úhrny srážek, které byly již při dostatečné hustotě stanic měřeny od konce 19. století. Množství srážkoměrných stanic v povodí Otavy, které byly použity pro hodnocení povodní, kolísalo od 8 u povodně 1894/1005 do 39 u povodně 2006/0526. Údaje o srážkách byly od roku 1961 získány z klimatické databáze ČHMÚ, starší data byla digitalizována ze srážkoměrných ročenek Československa a Rakouska – Uherska.



Souhrnné charakteristiky srážek, teplot vzduchu + průměrné srážky a UPS na povodí Otavy

Obr. 4.2 Charakteristiky srážek a teplot pro povodňovou epizodu 2006/0526

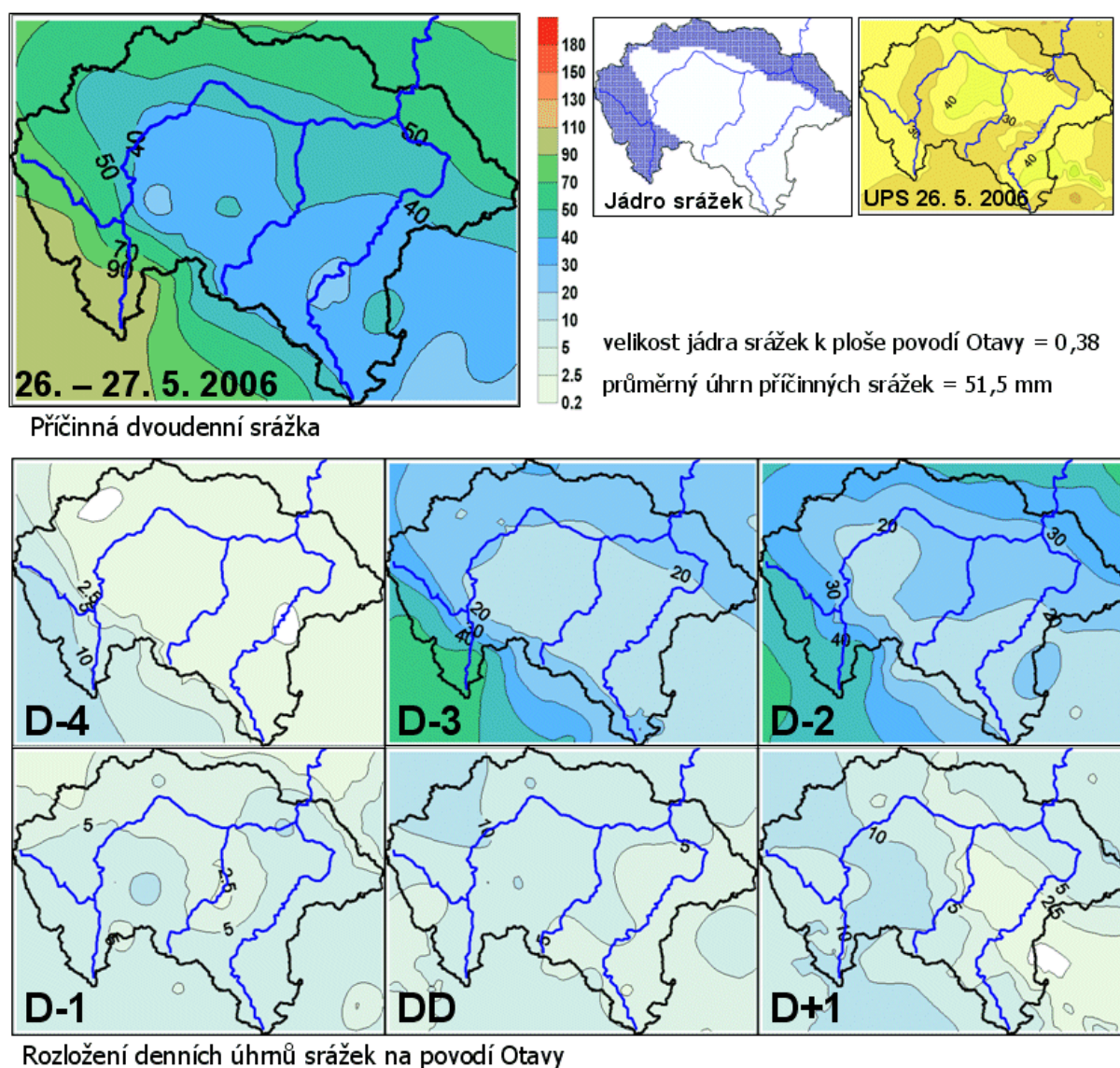
Aby bylo možné analyzovat časoprostorovou dynamiku srážek, byla bodová měření přepočítána pomocí interpolační metody univerzálního krigingu s lineárním variogramem do gridových souborů. Tato metoda je standardním vybavením programů GIS a pro interpolaci srážkových úhrnů ji doporučuje například *Lupikasza [2006]*. Ze souborů v gridovém formátu byly vypočteny průměrné úhrny srážek na celé povodí Otavy a pro čtyři oblasti ( $H_a$ ,  $H_b$ ,  $J$ ,  $L$ ),



použité pro potřeby aplikace metody předpovědního analogu (kapitola 6). Zmíněné údaje jsou pro každou povodeň znázorněny v grafu pro dny D-8 až D+5 (viz obr. 4.2)

Gridy srážkových polí se pro dny D-14 až D+1 vyexportovaly do map izolinií a jsou součástí databanky povodní (obr. 4.3). Samostatně je v databance zobrazena mapa dvoudenní příčné srážky a lokalizace jádra nejsilnějších srážek (viz. kapitola 5.5).

Pro vznik povodní, u kterých docházelo k tání nebo akumulaci sněhu, jsou důležité teploty vzduchu. Průběh teploty vzduchu byl získán pouze převzetím měření této veličiny z meteorologických stanic Churáňov a Strakonice, respektive České Budějovice u starších povodní. Teploty vzduchu změřené v klimatických termínech jsou zobrazeny v grafech s průměrnými úhrny srážek (obr. 4.2)



Obr. 4.3 Mapy rozložení srážek a indexu UPS u povodňové situace 20065026

### 4.3.3 Data pro popis počátečního stavu povodí

Některé dynamicky proměnné vlastnosti přírodního prostředí jako například nasycenost, zámrz půdy, rozsah a charakter sněhové pokrývky anebo stav vegetace mají neopomenutelný vliv na vznik povodně. Vybrané základní ukazatele stavu povodí se proto v databance povodní rovněž uvádějí.

Půdní nasycenost byla kvantifikována pomocí indexu UPS (v zahraniční literatuře označovaný jako API – Antecedent Precipitation Index), který je velmi hojně používaný pro svou jednoduchost a nenáročnost na vstupy. Index je založen na váženém součtu srážek za předchozích 30 dní, kdy váha srážkového úhrnu klesá s narůstající časovou vzdáleností od dne, pro který je výpočet prováděn. Vzorec s optimálním evapotranspiračním koeficientem 0,93 pro vážení srážek upraven pro prostor České republiky *Hladný [1962]*:

$$UPS_{30}(D) = \sum_{i=1}^{i=30} SRA_i * 0,93^i \quad 4.1.$$

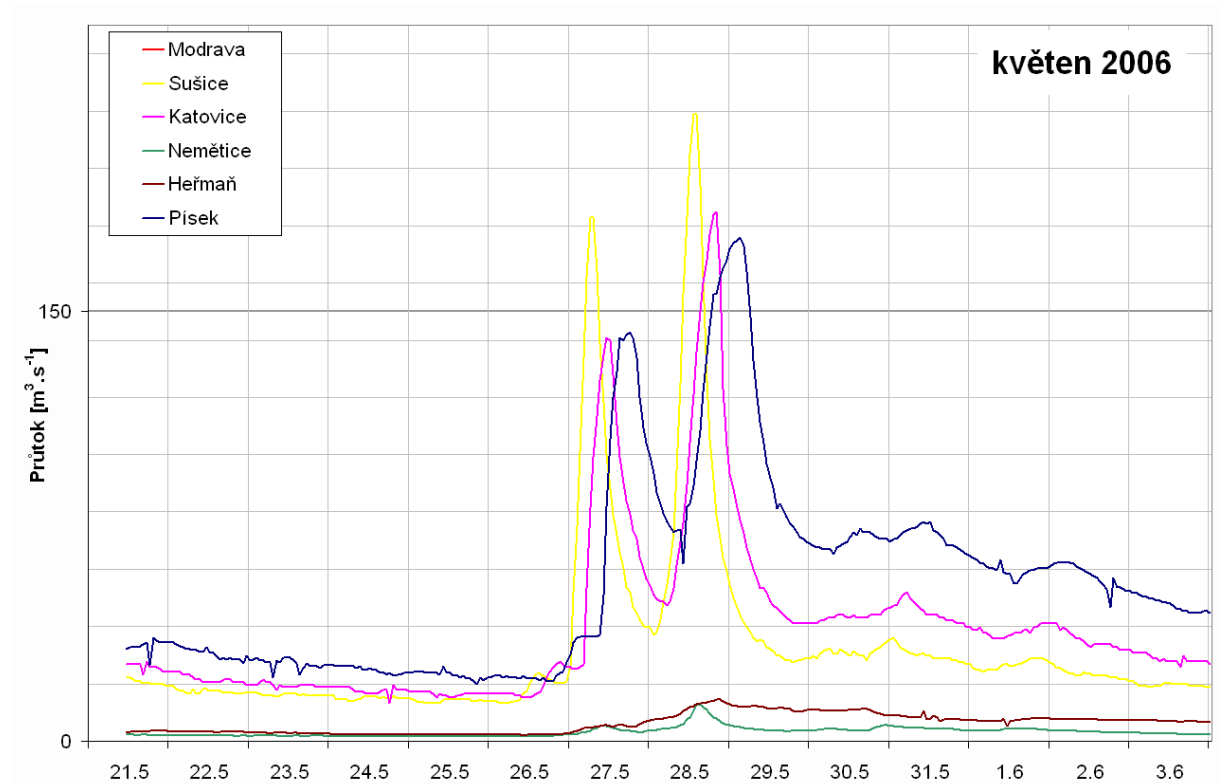
kde  $i$  je počet dnů ve zpětném časovém pořadí ode dne, k němuž se počítá index nasycenosti UPS, a  $SRA_t$  je denní úhrn srážek v den  $t$ . Rozložení indexu UPS na povodí Otavy v podobě mapy izolinií ke dni před počátkem příčinné srážky je zobrazeno u každé povodně (obr 4.3).

Vývoj povodní, u kterých se na tvorbě odtoku významně podílelo tání sněhu, bývá pochopitelně více ovlivněn množstvím sněhových zásob než stavem půdy. Proto u epizod, které podle analýzy příčin byly zařazeny do kategorie povodní s převládajícím vlivem tání sněhu, byly počáteční podmínky povodí popsány na základě rozložení vodních hodnot sněhu. Ty měří vybrané srážkoměrné stanice ČHMÚ pouze každé pondělí, a proto den s údaji o sněhových zásobách má u jednotlivých povodní různý předstih před dnem kulminace. Před rokem 1970 byla hustota stanic, které měřily vodní hodnotu sněhu poměrně řídká, a proto se pro tvorbu map použila orograficky podmíněná interpolace s využitím digitálního modelu terénu [*Šercl, 2002*], která zejména v jarních měsících, kdy nabývá na významu vztah mezi zásobami sněhu a nadmořskou výškou, poskytuje lepší výsledky než například kriging i při menším počtu měřících bodů.

### 4.3.4 Data pro popis odtokové odezvy

V databance povodní je odtoková odezva popsána pomocí průtokových hydrogramů z nejvýznamnějších vodoměrných stanic v povodí Otavy (obr. 3.1.). V ideálním případě byl úplný záznam pořízen v hodinovém kroku v rozsahu dní D-8 až D+5 (obr. 4.4). U většiny povodní je ale z důvodu horší dostupnosti historických dat záznam kratší a u některých vodoměrných stanic chybí úplně. Uváděné průtoky v naprosté většině nebyly součástí hydrologické databáze ČHMÚ. Vznikly převodem vodních stavů digitalizovaných

z limnigramů nebo raportů (hlášení pozorovatelů) přes platnou měrnou křivku na průtoky. U některých případů musela být volba vhodné měrné křivky změněna tak, aby průtoky ve vodoměrných stanicích na sebe bilančně navazovaly. Protože nové techniky hydrometrování umožňují zpřesňovat křivky v pásmu vysokých stavů, je třeba počítat s tím, že u některých, zejména velkých povodní, mohou být průtoky v budoucnu ještě přehodnoceny a upraveny.

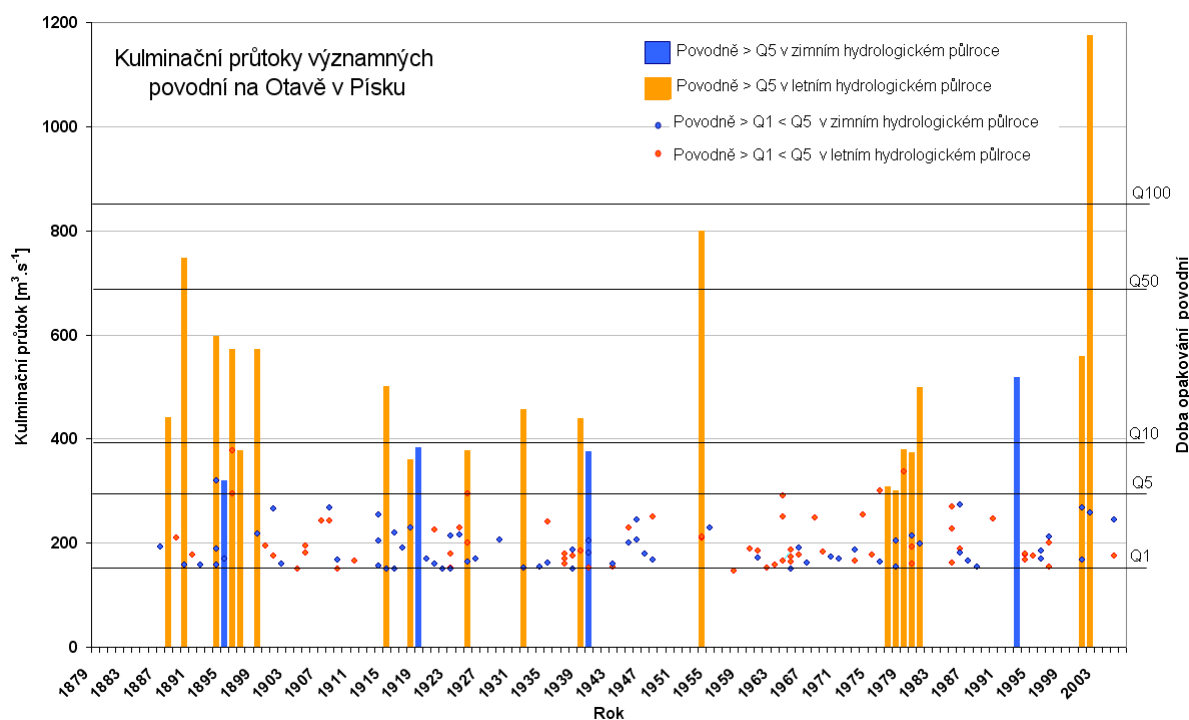


Obr. 4.4 Pozorovaný průtok v hlavních vodoměrných profilech povodí Otavy

## 5. Vlastnosti povodňového mechanismu povodí Otavy

### 5.1 Výskyt povodní

Výskyt otavských povodní od roku 1888 do 2006 je zobrazen na obrázku 5.1. Graf obsahuje všechny známé povodně s kulminačním průtokem přesahujícím hodnotu 1letého průtoku ( $146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). U velkých povodní s kulminací nad 5letým průtokem je patrná zvýšená četnost jejich výskytu na konci 19. století, kdy bylo zaznamenáno několik velkých povodní po celém povodí Vltavy (Kakos [2001]). Chudé na velké povodně bylo období 1940 – 1976, kdy Otavou prošla pouze jediná velká povodeň 19540709 (v pořadí v daném referenčním období největší až do výskytu povodně 20020813). Tato epizoda byla považována za 100letou povodeň až do přehodnocení hydrologického katastru po roce 2002. Za zmínku stojí převaha výskytu velkých letních povodní, jež je dobře patrná z obrázku 5.1. Sezonální výskyt otavských povodní nejen v profilu Písek je podrobněji popsán v kapitole 5.3.



Obr. 5.1 Kulminační průtoky Otavy v Písku mezi lety 1888 až 2006 podle průtoku a sezónního výskytu.

Výskyt malých povodní s kulminačním průtokem mezi 1letou a 5letou vodou je více rovnoměrný. Z pohledu sezónního aspektu ve frekvenci výskytu povodní je zajímavá zvýšená

četnost zimních povodní mezi lety 1914 – 1925, kdy šlo převážně o jarní povodně a naopak převaha letních povodní v letech 1960 – 1970.

## 5.2 Příčiny povodní na Otavě

Z hlediska příčin se povodně obvykle dělí podle zdroje zvýšeného odtoku na povodně dešťové, sněhové a smíšené. (V oblastech s ledovci se někdy vyčleňují i povodně ledovcové) Povodně vzniklé zmenšením průtočnosti koryta, například bariérou z ledových ker, nebyly uvažovány. Z dostupných záznamů o pozorování hladiny z vodoměrné stanice Písek vyplývá, že od roku 1960 byl pouze u dvou povodní (v prosinci 1991 a lednu 1968 s kulminacemi nad úrovní 1leté vody) vzestup vodních stavů nepochybně způsoben vzdušným vlivem ledu, u dalších zimních povodní ovlivňoval zámrz převážně vzestupné části povodňových vln. Zvláštní povodně způsobené umělými vlivy (např. protržením hráze vodního díla) se na Otavě v daném časovém období nevyskytly. Pro zařazení povodní na Otavě do kategorií podle příčin je tedy rozhodující zjištění vlivu tání sněhové pokrývky na vznik povodně.

Stanovení podílu vody z tání sněhu na objemu povodňové vlny není vždy jednoznačné, protože na objemu vlny se podílí větší či menší měrou podpovrchový a základní odtok, u nichž nelze vždy přesně určit, z jakých zdrojů byl plněn. Například povodně vzniklé následkem relativně menší dešťové srážky v jarních měsících, kdy už v povodí neleží sníh, ale existuje vysoká nasycenost půdy v povodí, budou zařazeny do kategorie dešťové, přestože vliv předcházejícího tání sněhu je u nich nepopíratelný.

Vybraná metodika pro kategorizaci povodní podle příčin je založená na porovnání objemu vody z tání a objemu dešťových srážek spadlých na povodí Otavy ve dnech D-3 až DD, které lze označit za příčinné dny povodně. Tuto metodu použil pro kategorizaci povodní Loukas [2000]. Podílový index sněhu byl vypočten podle vzorce:

$$\frac{V_{ms}\langle D-3, DD \rangle}{V_{lsra}\langle D-3, DD \rangle + V_{ms}\langle D-3, DD \rangle} * 100 \quad [\%], \quad 5.1$$

kde  $V_{ms}\langle D-3, DD \rangle$  je objem vody z tání sněhu za dny D-3 až DD a

$V_{lsra}\langle D-3, DD \rangle$  je objem kapalných srážek spadlých ve dnech D-3 až DD.

Z definice vyplývá, že hodnota indexu označuje podíl tání sněhu na příčinách povodně, nikoliv na samotném odtokovém procesu. Z tohoto důvodu například povodeň 19880326, která podle tvaru vlny vypadá jako typická sněhová povodeň a také v komplexní kategorizaci

povodní byla zařazena mezi povodně s převažujícím vlivem tání sněhu, byla uvažovanou metodikou řazena mezi povodně smíšené s převahou vlivu dešťových srážek.

Ke zjištění objemu vody odtáté ze sněhové pokrývky byl využit model SNOW – 17, který je provozován jako sněhová komponenta hydrologického předpovědního systému Aqualog na hydrologických předpovědních pracovištích ČHMÚ. SNOW – 17 je koncepční model vyvinutý pro simulaci akumulace a tání sněhu (Anderson,[1973]). Model pomocí energetické bilance sněhové pokrývky počítá na základě srážek a teplot vzduchu vlastnosti sněhové pokrývky včetně množství vody odtáté ze sněhu za daný časový interval. Výpočet byl proveden se vstupy denních průměrných teplot a denních průměrných srážek ze stanic měřicí sítě ČHMÚ mezi lety 1961 - 2006. Množství kapalných srážek bylo určeno ze stejných datových vstupů pomocí modelu RSNWELEV (Krejčí [1999]), který na základě změřených teplot vzduchu a nadmořských výšek rozděljuje srážky spadlé na povodí podle skupenství, ve kterém padaly.

Výpočet objemu tání sněhu a dešťových srážek byl prováděn pro nakalibrovaná povodí a mezipovodí mezi vodoměrnými stanicemi Modrava, Sušice, Katovice, Němětice, Heřmaň a Písek. Souhrnný podílový index sněhu na celé povodí Otavy pro všechny dny od roku 1961 – 2006 byl zjištěn váženým součtem těchto hodnot vložených do rovnice (5.1.). Protože velké povodně před rokem 1961 se všechny vyskytly v měsících, kdy sníh neleží ani v nejvyšších polohách, byla u nich bez výpočtu přiřazena indexu hodnota nula.

Kritéria pro rozdělení povodní do čtyř kategorií byla stanovena subjektivně na základě velikosti podílového indexu sněhu (tabulka 5.1.).

Tabulka 5.1 Typy povodní podle příčin

<b>Typ povodně</b>	<b>Podílový index sněhu</b>	<b>Počet povodní</b>	<b>Kód typu povodně</b>
<i>Sněhové povodně</i>	$\geq 80$	0	S
<i>Smíšené povodně s převahou vlivu tání sněhu</i>	$50 \leq \leq 80$	4	SD
<i>Smíšené povodně s převahou vlivu dešťových srážek</i>	$20 \leq \leq 50$	11	DS
<i>Dešťové povodně</i>	$\leq 20$	56	D

Z výsledků vyplývá, že povodí Otavy po Písek jako celek je velmi málo citlivé na povodně způsobené převážně táním sněhové pokrývky. Žádná ze známých povodní zařazených do Katalogu nemá charakter čistě sněhové povodně a povodně, kde se tání sněhu podílelo na příčině alespoň 50 %, jsou pouze čtyři. Největší zjištěný podíl tání sněhu (70 %) měla vykazovat povodeň 19870329. Nevýraznou orientaci na jarní povodně potvrzuje i sezónální analýza uvedená v kapitole 5.3. Naprostá většina povodní (56 případů) byla zařazena do kategorie dešťových povodní s minimálním nebo žádným podílem vody ze sněhu. Pokud by toto porovnání bylo provedeno pouze pro povodně s kulminací nad 10letým průtokem v Písku,

je převaha dešťových povodní ještě výraznější. Z 11 velkých povodní od roku 1890 je smíšenou povodní jediná - 19931223.

Tabulka 5.2 Typy povodní podle podílového indexu sněhu.

<i>Povodeň</i>	<i>Pod. index sněhu</i>	<i>Kód typu povodně</i>	<i>Povodeň</i>	<i>Pod. index sněhu</i>	<i>Kód typu povodně</i>	<i>Povodeň</i>	<i>Pod. index sněhu</i>	<i>Kód typu povodně</i>
20060529	0	D	19861023	0	D	19700513	19	DS
20060329	61	SD	19860613	0	D	19690608	0	D
20030103	0	D	19860530	0	D	19671224	22	DS
20021231	0	D	19840917	0	D	19670917	0	D
20020813	0	D	19820131	37	DS	19660809	0	D
20020808	0	D	19820106	58	SD	19660723	0	D
20020322	42	DS	19811016	3	D	19660630	0	D
19981102	0	D	19811012	0	D	19660418	7	D
19981030	0	D	19810721	0	D	19660209	16	DS
19980916	0	D	19810311	57	SD	19650611	0	D
19970317	3	D	19800723	0	D	19650601	0	D
19970227	13	D	19791212	6	D	19650520	8	D
19961021	0	D	19790313	41	DS	19640814	0	D
19950902	0	D	19770823	0	D	19630701	0	D
19950627	0	D	19770801	0	D	19620515	0	D
19950602	0	D	19770521	1	D	19620401	36	DS
19950127	43	DS	19770209	40	DS	19610609	0	D
19931222	7	D	19760728	0	D	19540709	0	D
19910803	0	D	19750702	0	D	19400531	0	D
19891216	15	D	19741230	20	DS	19151008	0	D
19880326	21	DS	19741209	12	D	18990914	0	D
19871220	3	D	19740719	0	D	18960505	0	D
19870702	0	D	19720423	1	D	18941005	0	D
19870329	70	SD	19711119	9	D	18900904	0	D

### 5.3 Sezonální režim výskytu povodní

Rozdíly v množství odtoku v průběhu roku a také různá četnost výskytu povodní jsou ovlivněny nejen ročním chodem počasí v oblasti, ale také fyzicko – geografickými vlastnostmi povodí. Ty jsou příčinou jeho citlivosti na určité typy rozvodnění. Změny velikosti odtoku v průběhu roku se používají jako jedna za základních charakteristik hydrologického režimu řek. Sezonální režim výskytu povodní, který se nemusí shodovat s rozložením objemu odtoku v roce, je zase důležitou informací pro protipovodňovou ochranu z několika důvodů:

- určuje míru rizika vzniku povodně pro určitá období v roce,
- umožňuje regionalizaci povodňového zatížení na ploše daného území,
- může sloužit jako užitečný podklad při návrzích hospodaření s vodou v nádržích,
- sezónálním výskytem je možné podmínit frekvenční analýzu při výpočtu návrhových N-letých průtoků.

Základní charakteristiky sezónálního režimu výskytu povodní mimo jiné i v povodí Otavy již byly publikovány v práci *Chalušové [2004]*. Jak se liší sezónální režim jednotlivých dílčích povodí Otavy a především jak tento režim souvisí s mechanismem vzniku povodní od povětrnostních příčin až po koncentraci odtoku, bylo předmětem analýzy uvedené v předložené práci.

### 5.3.1 Metodika popisu sezonality

Pro potřeby popisu sezónálního režimu povodní na Otavě byla použita grafická metoda polárních grafů publikovaná *Hladným [1995]*. Do grafů byla vynášena hodnota sezónálního indexu  $P_i$ , který byl vypočten podle rovnice:

$$P_i = \frac{KQ_m}{KQ_n} \quad 5.2$$

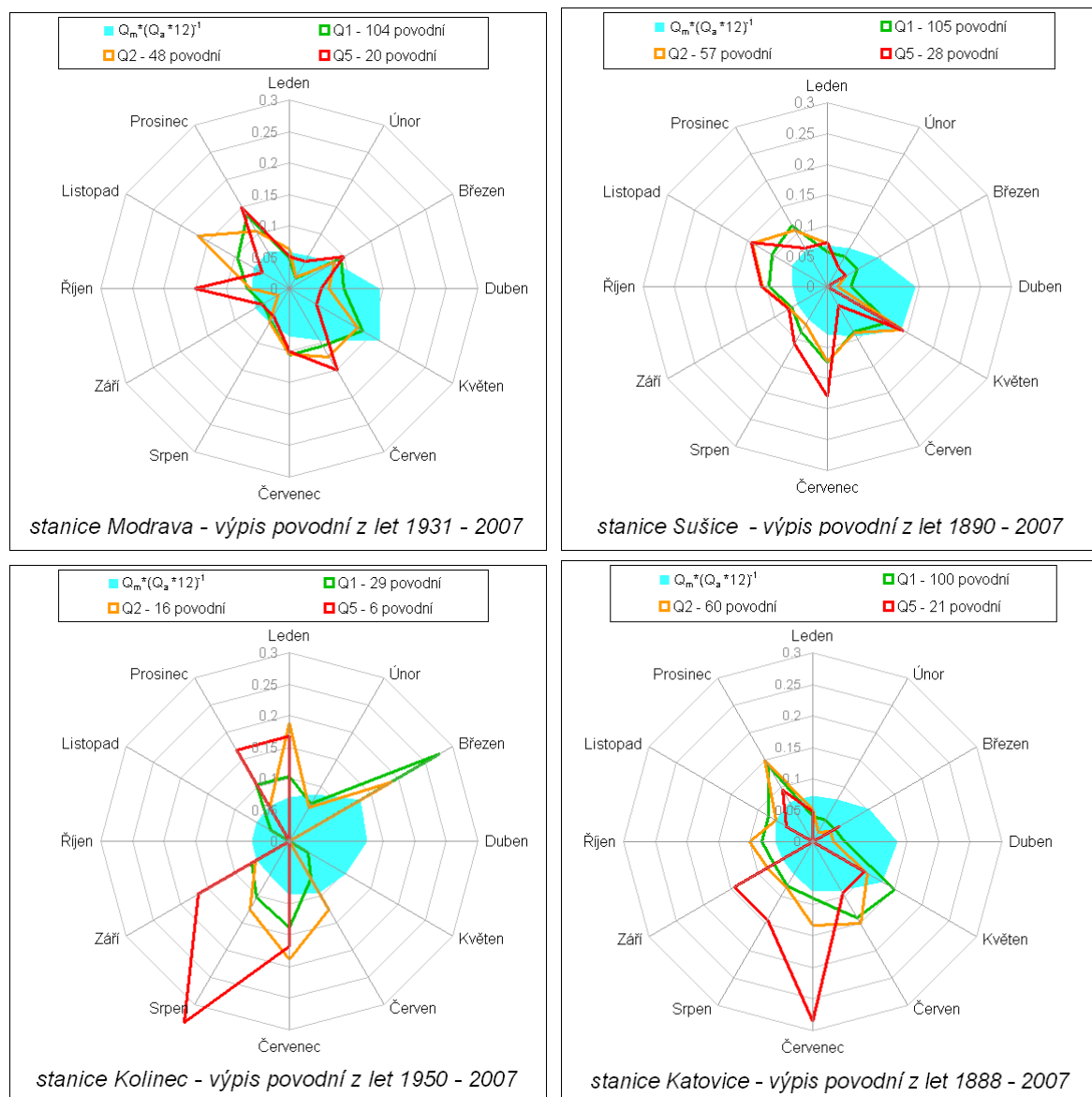
kde  $KQ_m$  je součet výskytu povodní přesahující v kulminaci prahový průtok  $Q$  v daném měsíci  $i$  v referenčním období a  $KQ_n$  je součet výskytu povodní přesahujících v kulminaci prahový průtok  $Q$  v celém roce v referenčním období. Do polárních grafů byly zároveň vyneseny hodnoty podílu průměrného měsíčního průtoku  $Q_m$  na průměrném ročním průtoku  $Q_a$ , které označují rozložení celkového objemu odtoku v průběhu roku (hodnoty  $Q_m/Q_a$  byly vyděleny dvanácti, abych jejich součet byl jedna a údaje tak mohly být zobrazeny na stejné stupnici jako sezónální index  $P_i$ ).

Index  $P_i$  byl vypočten pro 8 vodoměrných profilů, ve kterých byly četnosti výskytu povodní analyzovány pro tři různé prahové kulminační průtoky definované podle hodnot pravděpodobnosti překročení povodní na 1, 2, a 5letou povodeň.

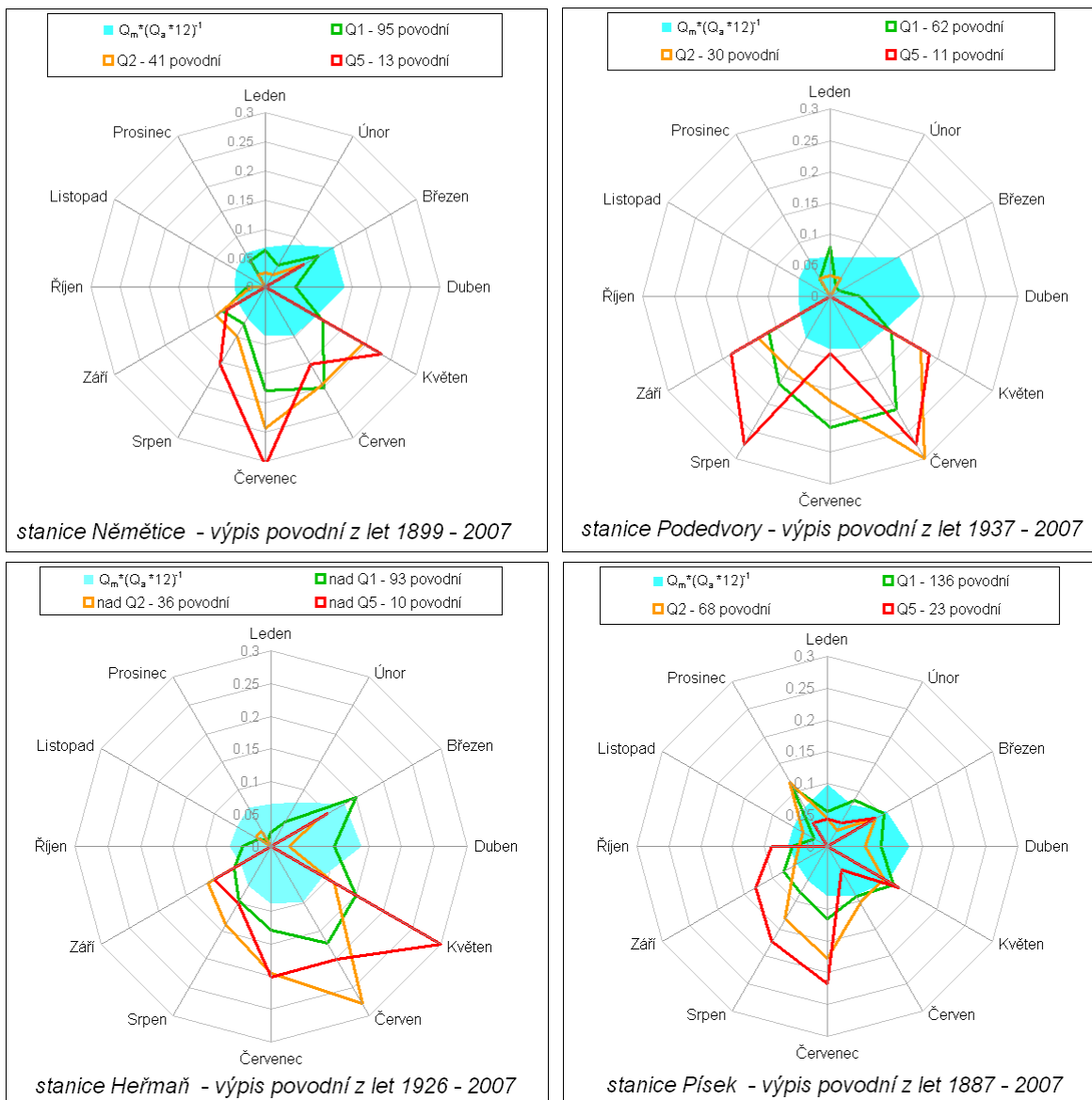
Pro výpočet povodňového indexu byly použity záznamy napozorovaných kulminačních průtoků, které se používají pro výpočet hydrologického katastru (návrhových N-letých průtoků). Nedostatkem použitých řad maximálních průtoků pro sezónální frekvenční analýzu je jejich nehomogenita způsobená nahodilými výpadky v pozorování a rozdílnou délkou referenčního období. Proto je u každé popsané stanice v polárním grafu uváděn kromě referenčního období, ze kterého byly kulminace vypsány, také počet použitých záznamů. Výhodou proti spojitým řadám průměrných denních průtoků, které použila například *Chalušová [2004]*, je především spolehlivější podchycení krátkodobých vzestupů hladin



z letních přivalových lijáků, které v jednotkovém pojetí denního průměrného průtoku mohou být neidentifikovány na rozdíl od objemově velkých, ale kulminačně menších průtoků například z jarního tání sněhu. Použitím denních průměrných průtoků se proto může fiktivně citlivost povodní u malých povodí více přesouvat do jarních měsíců než při použití pouze hodnot okamžitých průtokových kulminací.



Obr. 5.2 část 1. Polární grafy sezónního výskytu povodní s pravděpodobností výskytu Q1 (1letá povodeň), Q2 (2letá povodeň) a Q5 (5letá povodeň). Hodnoty vyjadřují relativní četnost výskytu kulminačních průtoků podle rovnice 5.2. Řada  $Q_m \cdot (12 \cdot Q_a)^{-1}$  označuje relativní podíl objemu odtoké vody v daném měsíci na celkovém ročním objemu odtoku.



Obr. 5.2 část 2. Polární grafy sezónního výskytu povodní s pravděpodobností výskytu Q1 (1letá povodeň), Q2 (2letá povodeň) a Q5 (5letá povodeň). Hodnoty vyjadřují relativní četnost výskytu kulminačních průtoků podle rovnice 5.2. Řada  $Q_m^*(12*Q_a)^{-1}$  označuje relativní podíl objemu odtoké vody v daném měsíci na celkovém ročním objemu odtoku .

### 5.3.2 Vybrané aspekty sezónního režimu povodní na Otavě

Z rozložení dlouhodobých průměrných měsíčních průtoků zobrazených v grafech na obrázku 5.2 je zřetelné, že největší objemy odtoku se ve všech analyzovaných vodoměrných profilech Otavy vyskytují v jarních měsících. V dílčích povodích, která zasahují do nejvyšších partií Šumavy (Modrava, Sušice), a kde dochází k intenzivnímu tání často až v pozdním jaru, se maximum objemu odtoku vyskytuje v dubnu a květnu, v ostatních částech povodí Otavy se maximum vyskytuje spíše v březnu a dubnu. Minima připadají na konec léta nebo první podzimní měsíc. Rozložení objemu odtoku v průběhu roku je mnohem více ovlivněno

klimatem, a proto je v povodí Otavy stejné jako u většiny povodí v České republice [Červený, 1984].

Roční chod výskytu povodní na Otavě a na jejích přítocích již vykazuje specifické vlastnosti. Sezonální režim povodní na Otavě v Písku (viz obr. 5.2) má například dva nejzřetelnější rysy:

- S narůstající extremitou povodní danou kulminačním průtokem se pravděpodobnost jejich výskytu zvyšuje v letních měsících a snižuje v období jarního tání.
- U menších povodní se v ročním cyklu vyskytuje také zvýšená četnost povodní v prosinci.

Orientace velkých povodní na letní měsíce se projevuje prakticky u všech zpracovaných profilů pouze různě velkou intenzitou. Nejsilněji u povodí, které leží z velké části na úpatí Šumavy (z analyzovaných povodí jsou pro tuto oblast nejreprezentativnějšími profily Němětice na Volyňce a Podedvory na Blanici). Ty mají drtivou většinu velkých průtoků situovaných právě do letních měsíců a jarní povodně i povodně na přelomu podzimu a zimy jsou zde spíše ojedinělé. Příčinou je kombinace tří faktorů:

- Velké výškové rozdíly na úpatí Šumavy mají za následek vyšší diferenci mezi intenzitou odtávání sněhové pokrývky v jednotlivých výškových pásmech povodí a způsobují, že tání sněhu probíhá obvykle postupně.
- Vyšší svažítost terénu napomáhá rychlejší koncentraci vody z intenzivních dešťů, a to zvyšuje odtokovou citlivost těchto povodí na intenzivní deště.
- V letních měsících jsou silné deště častěji vázané na severovýchodní až severní proudění spojené s výskytem povětrnostních situací typu C, Cv, Ec, SEc, NEc, B a Bp, při kterých úpatí Šumavy ve směru do České republiky tvoří návětrný svah, kde bývají srážky nejintenzivnější (více v kapitole 5.5) .

U povodí, které větší částí plochy odvodňují centrální část Šumavy (Modrava a Sušice), narůstá podružné listopadové a prosincové maximum četnosti výskytu povodňových průtoků. V této části roku způsobují povodně převážně západní cyklonální situace, které doprovází silné proudění jihozápadního až západního směru s výrazným návětrným a závětrným efektem šumavského hřebenu. Povodí Volyňky a Blanice se při těchto situacích nacházejí v závětrném srážkovém stínu, a proto u nich ke zvýšení výskytu povodní v této části roku nedochází.

Zvýšená četnost povodní v jarním období se vyskytuje u stanic Písek, Heřmaň, ale také Modrava. Společným rysem těchto povodí je velký podíl plochy povodí s malou výškovou členitostí, která je příznivá pro rychlejší tání sněhu z relativně velké plochy. U povodí Vydry po Modravu, ležícího v nejvyšších částech Šumavy, je malá výšková členitost daná existencí geomorfologicky zarovnaného povrchu. Zde se navíc sníh udržuje až do pozdního jara, kdy může intenzita tání dosahovat vysokých hodnot a zároveň s blížícím se létem se zvyšuje

možnost kombinace tání sněhu (případně i pouze nasycenosti povodí po odtání sněhu) se silným deštěm.

#### 5.4 Povětrnostní příčiny vzniku povodní

Práce zabývající se hydrosynoptickou analýzou vzniku povodní v České republice prokázaly, že významné plošné srážky frontálního nebo cyklonálního původu jsou spojeny s výskytem určitého typu atmosférické cirkulace. Měřítko těchto procesů přesahuje rozlohu České republiky a jejich meteorologické příčiny probíhají na území ještě mnohem větším. Přesto vznik povodní spojený s jejich výskytem je i v rámci České republiky často regionálně omezen pouze na určitá území. Příčinou tohoto stavu jsou různé fyzicko-geografické vlastnosti jednotlivých povodí, které jednak ovlivňují srážkovou činnost v přízemních vrstvách atmosféry (prostřednictvím orografického efektu) a působí také na transformaci srážek na odtok a jeho koncentraci do podoby průtokové vlny. Z uvedeného vyplývá, že citlivost konkrétních povodí na určité typy povětrnostních příčin vyvolávající povodně je různá. Identifikace a popis příčinných povětrnostních podmínek pro každé povodí je součástí pochopení komplexního mechanismu vzniku povodní.

Povětrnostní příčiny povodní na Otavě jsou v této práci popsány na základě výskytu synoptických typů a podle dráhy pohybu řídicích tlakových útvarů. Oba ukazatele patří mezi klasické nástroje využívané pro hydrosynoptickou analýzu a byly použity při analýze příčin povodní například *Kakosem* [1985] pro povodí Labe, nebo *Čekalem* [2005] pro povodí Ohře.

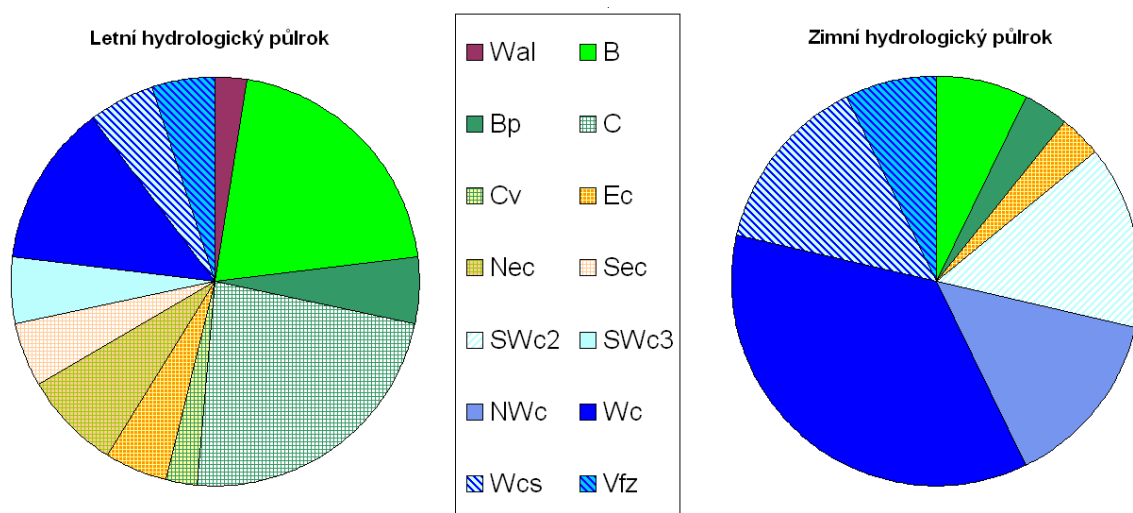
Synoptické typy odvozené z velkoprostorové atmosférické cirkulace bez detailní analýzy vzduchových mas vytvářejí v závislosti na sezóně a lokalitě určité spektrum charakteru počasí. Většina meteorologických prvků, mezi něž patří také množství srážek nebo teplota vzduchu, dosahují u jednotlivých typů značného rozptylu, a proto pouhý výskyt povětrnostního typu je slabým indikátorem vzniku povodní. Na druhé straně charakter proudění (především jeho směr) patří mezi prvky, které mají u jednotlivých typů menší rozptyl, a protože proudění ovlivňuje rozložení srážek, vytvářejí jednotlivé synoptické situace typické rozložení srážek, které ovlivňuje například tvar průtokové vlny povodní. Proto i jednoduché hydrosynoptické symptomy, i když nejsou zárukou vzniku povodně, poskytují důležité informace nejen o pravděpodobnosti vzniku povodní, ale také o charakteru vývoje povodní.

Vliv povětrnostních příčin na výskyt povodní s ohledem na sezónu a na atmosférické proudění doprovázející příčinné srážky je součástí této kapitoly, jejich souvislost s rozložením srážek a s charakterem odtokové odezvy je popsána v kapitolách 5.5 a 5.6.

### 5.4.1 Frekvenční analýza výskytu povětrnostních typů

Pro posouzení základního charakteru meteorologických podmínek byl použit Katalog cirkulačních typů, pro který metodiku kategorizace publikoval Brádka [1961]. Katalog popisuje 28 typů, které byly definovány především na základě rozložení tlakových útvarů. Obsahuje povětrnostní typy pro každý den od roku 1946 do současnosti a je stále aktualizován. Stručný popis jednotlivých situací je k dispozici na internetových stránkách [www.chmi.cz](http://www.chmi.cz). Ke zpracovaným povodním počínaje epizodou povodně 19540709 byl určen příčinný synoptický typ na základě výskytu srážek před dnem kulminace. Srážky ve dnech s výskytem příčinného typu tvořily většinu objemu srážek spadlých na povodí mezi dny D-3 až DD. U některých typů meteorologických situací v tomto intervalu dochází i k jejich přestavbě. V tom případě byl vybrán ten typ, který produkoval největší množství srážek. Úplný přehled synoptických typů u jednotlivých povodní je zobrazen v tabulce P.2 v příloze práce.

Četnost výskytu synoptických typů způsobujících povodně na Otavě v Písku se výrazně sezónně liší. V letním hydrologickém půlroce převládají cyklonální situace C, Cv, Ec, NEc, SEc anebo brázdy nízkého tlaku B, Bp. V zimě naopak je těchto situací minimum a převažují západní cyklonální situace zejména Wc, NWc, SWc2 a Wcs (viz obr. 5.3). Pravděpodobnost výskytu uvedených synoptických typů před povodněmi je u některých (C, B, Wc, Wcs) až několikanásobně vyšší než pravděpodobnost vyplývající z jejich dlouhodobého výskytu. Jejich význam pro vznik povodně dokresluje fakt, že spektrum výskytu synoptických typů v předstihu 8 dní před povodní je výrazně pestřejší než u dní D-2 a D-1, kde už se jasně prosazují uvedené dominantní typy (viz obr. 5.4 a 5.5).



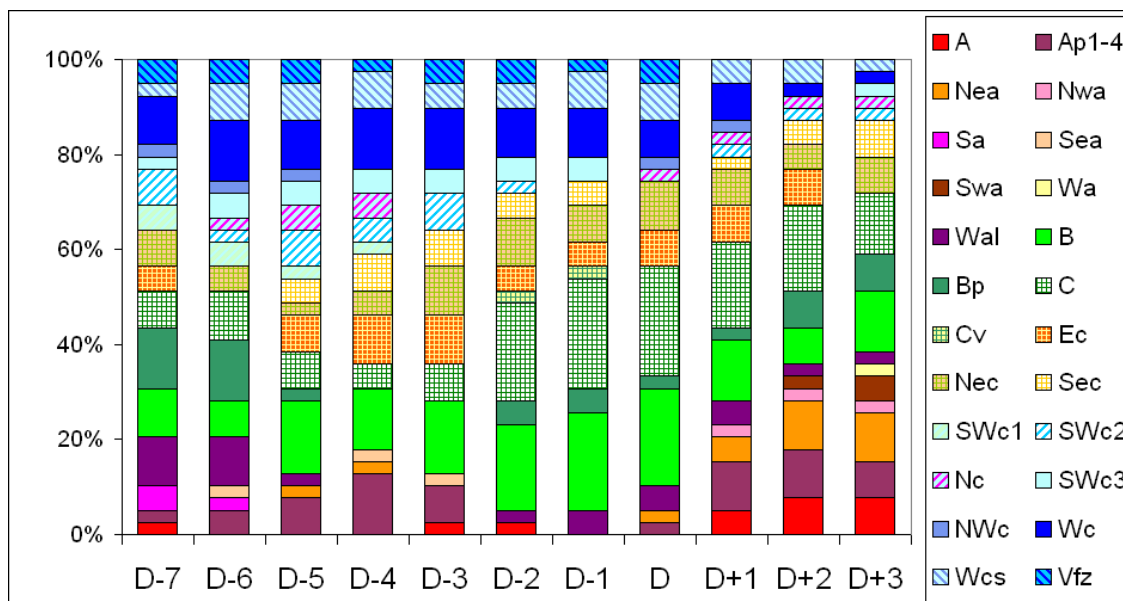
Obr. 5.3 Procentuální četnost výskytu příčinných synoptických typů v povodí Otavy v letním a zimním hydrologickém půlroce

Všechny uvedené příčinné synoptické typy, které způsobují povodně na Otavě, patří mezi srážkově nejvydatnější na celém území ČR jak v teplé, tak i v chladné části roku *Křivancová [1997]*. Absence výskytu situací C, Ec, NEc, SEc při vzniku zimních povodní je způsobena tím, že v tomto ročním období vypadávají vydatné srážky vázané na tyto typy většinou ve formě sněhu. V porovnání s průměrnými povětrnostními projevy jednotlivých synoptických typů v letní polovině roku je pozoruhodný relativně malý podíl západních cyklonálních situací, na vzniku letních povodní, ačkoliv tyto situace jsou v průměru pro ČR bohaté na srážky po celý rok. Navíc povodně jimi způsobené patří z hlediska velikosti kulminace v Písku mezi ty menší povodňové epizody. Příčina tohoto jevu spočívá zřejmě v tom, že se západní cyklonální situace projevují srážkově nejvíce ve vrcholové části Šumavy, kde však orografické zesílení při labilnějším zvrstvení, které je v této části roku běžnější, nedosahuje takové intenzity jako v chladné části roku, kdy naopak stabilní zvrstvení orografický efekt podporuje (viz kapitola 5.5).

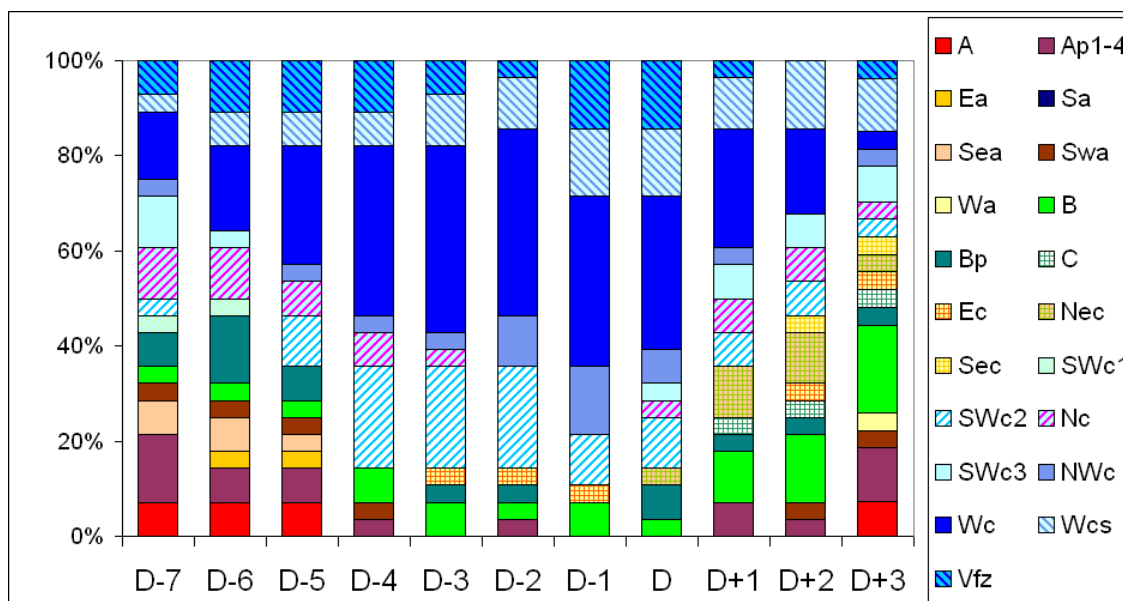
Vliv zonálního proudění z Atlantiku na vznik velkých letních povodní zřejmě existuje a probíhá jiným mechanismem než u zimních povodní. V chladném a vlhkém západním proudění v letním půlroce se vytvářejí v závětrří Alp tlakové níže, které při postupu směrem k severovýchodu přinášejí vlhkost do prostoru České republiky. Tato přestavba západních cyklonálních situací Wc, Wcs atd. do synoptických typů C, Ec, NEc, Sec, B, a Bp je zřetelná z obrázku 5.4, kde jsou uvedeny relativní četnosti výskytu synoptických situací v různých dnech předstihu před povodní v letním hydrologickém půlroce. V den D-5 je podíl synoptických typů Wc, Wcs atd. ještě 50 %, s blížícím se dnem DD však klesá na úkor nárůstu četností výskytu typů C, Ec, NEc atd. V chladném půlroce, kde z povětrnostních příčin dominují západní cyklonální typy, dochází často k jejich vzniku přestavbou z anticyklonální situací A, Ap<sub>1-4</sub> nebo SEa.

#### 5.4.2 Atmosférické proudění při výskytu povětrnostních typů

Charakter proudění vzduchu patří k povětrnostním projevům, které mají užší souvislost s výskytem synoptického typu, protože kategorizace synoptických typů je založena převážně na rozložení velkoprostorové cirkulace vzduchu. Proudění vzduchu ovlivňuje časoprostorové rozložení srážek, a je proto vhodným symptomem pro určení typu povodní. Proto byla u zpracovaných povodní sledována rychlost a směr proudění vzduchu v době vypadávání příčinných srážek. Pro tento účel byly použity výsledky měření rychlosti a směru větru na meteorologické stanici Churáňov. Protože údaje ze stanice Churáňov byly k dispozici jen od roku 1953, mohly být vlastnosti větru analyzovány pouze u 66 povodní.

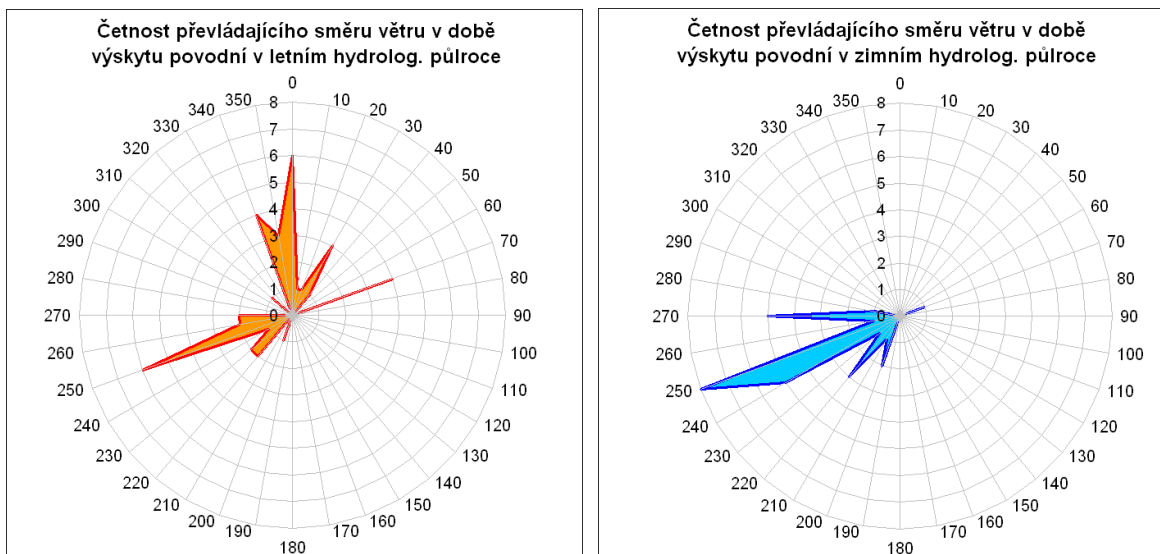


Obr. 5.4 Relativní četnosti výskytu synoptických typů během povodní na Otavě v Písku v letním hydrologickém půlroce



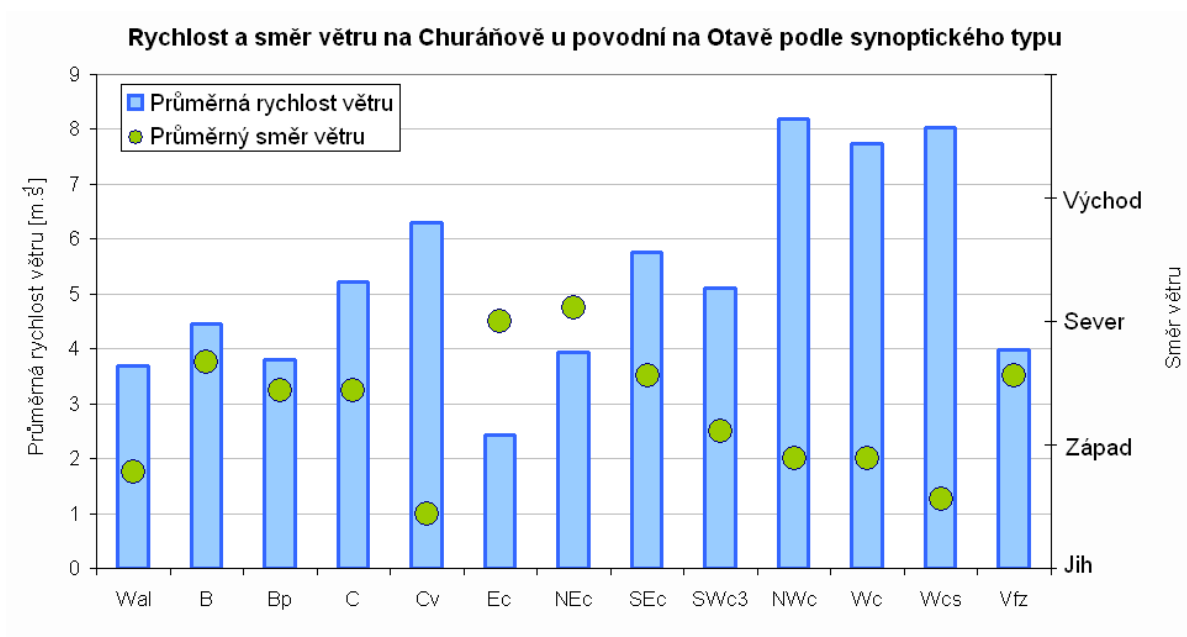
Obr. 5.5 Relativní četnosti výskytu synoptických typů během povodní na Otavě v Písku v zimním hydrologickém půlroce

Z obrázku 5.6 vyplývá, že se mezi analyzovanými povodněmi nevyskytla ani jedna, která by měla v době vypadávání příčných srážek převládající směr proudění ze sektoru  $80^\circ - 190^\circ$  a že četnost výskytu u ostatních směrů se výrazně koncentruje do intervalu  $220^\circ - 270^\circ$  a  $340^\circ - 360^\circ$ .



Obr. 5.6 Četnosti výskytu větru určitého směru u povodní na Otavě podle sezóny.

Až na výjimky byly západní směry větru spojené se synoptickými typy Wc, Wcs, NWc, SWc<sub>2</sub> a SWc<sub>3</sub>, dosahovaly vyšších rychlostí a byly dominantní u zimních povodní. Některé letní povodně provázely také vítr ze západních směrů, ale převládal směr ze severního kvadrantu. Byl spojen s výskytem synoptických typů C, Cv, Ec, NEc, Sec, B, a Bp a rychlosti větru byly relativně menší, i když vzhledem k dlouhodobému průměru také velké (viz obr. 5.7).



Obr. 5.7 Průměrná rychlost a převládající směr větru ve stanici Churáňov v době vypadávání příčných srážek



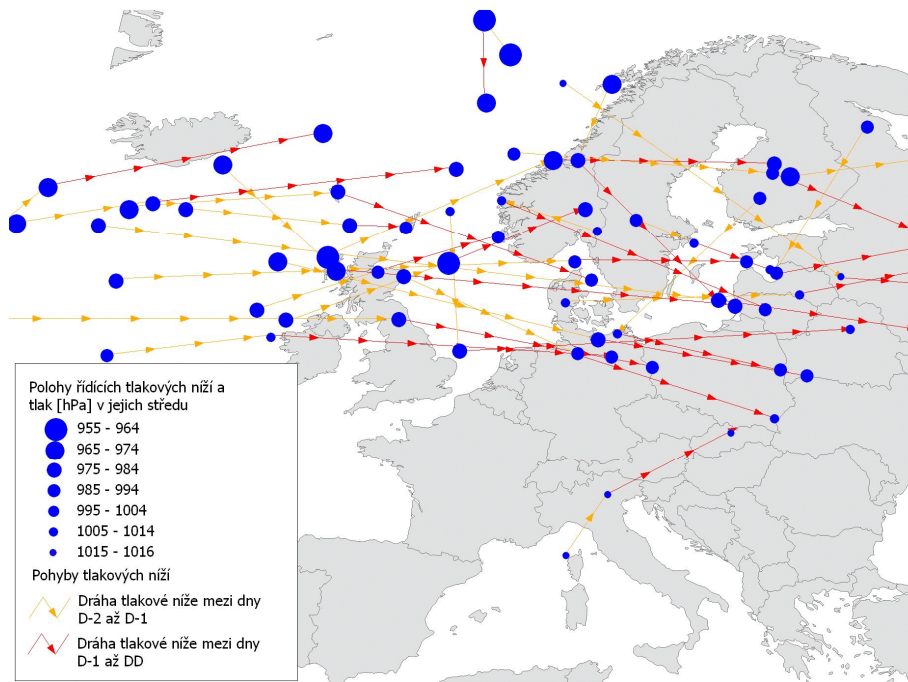
Z termínových měření větru (07h, 14h, 21h) mimo jiné vyplynulo, že u situací s výrazným západním prouděním byl směr větru stabilní, naopak u povětrnostních situací s pohybem oblasti nízkého tlaku v prostoru střední Evropy se směr větru přetáčel nejčastěji z východu přes sever, někdy až do západních směrů. Výsledný převládající směr u povětrnostních typů C, Cv, Ec, SEc, NEc, B a Bp proto reprezentuje širší interval a navíc může být ovlivněn stříhem větru s výškou, který je u těchto situací poměrně častý.

#### 5.4.3 Dráhy řídicích tlakových útvarů

Ke zpracovaným povodním byly určeny polohy řídicích tlakových níží, které měly zásadní vliv na počasí ve střední Evropě. Jejich lokalizace byla provedena analýzou přízemního tlakového pole z map publikovaných v periodických bulletinech *Denní přehled počasí* a z internetových stránek <http://www.wetterspiegel.de/de/archiv/> pro dny D-2 až DD. Tím bylo možné popsat také trajektorii pohybu tlakových útvarů.

Poloha tlakové níže je důležitá zejména u letních situací, kdy srážková činnost je nejsilnější v její bezprostřední blízkosti, a také se u těchto cyklón často vyskytuje velký rozdíl mezi vzduchovými hmotami v jejich přední a týlové části. Pohyb cyklóny ve vztahu k povodí Otavy má také svým směrem proudění vliv na orografický efekt, zejména na zesilování srážek. Určení středu tlakové níže může být u letních cyklón středomořského původu nejednoznačné, protože tlakové pole při zemi se u těchto situací velice často liší od tlakového pole ve výšce, které má větší vliv na pohyb vlhkosti vzduchu. Touto nerovnoměrností vzniká stříh větru s výškou, který je sám o sobě indikátorem plošných intenzivních srážek (tzv. stříhové srážky). U tlakových níží ze zimního pololetí jsou zase spíše než polohy tlakové níže rozhodující přechody front, které bývají ve značné vzdálenosti od centra řídicího tlakového útvaru.

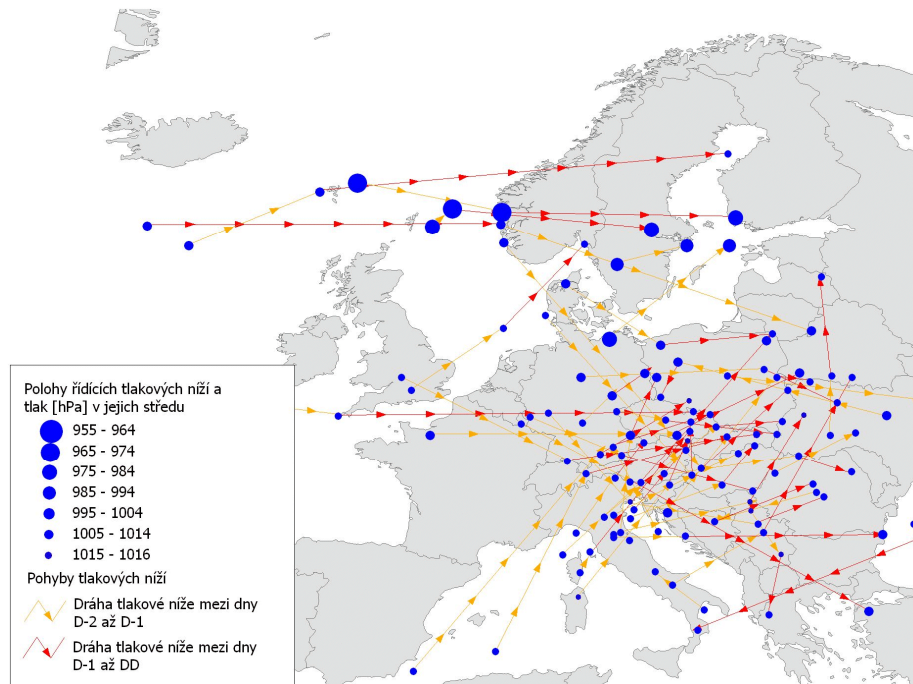
Trajektorie pohybu středů řídicích tlakových níží u povodní na Otavě se výrazně liší v letním a zimním hydrologickém půlroce, a to například i u povodní, kterým předcházela stejná typ příčinné synoptické situace. Povodně, které se vyskytly v zimním hydrologickém půlroce, jsou vázány na rychlý pohyb často velmi hlubokých tlakových níží ze západu k východu v pásu mezi 50. a 65. rovnoběžkou. Po jižní straně těchto útvarů se do střední Evropa dostává vlhký a v zimě také relativně teplý oceánský vzduch. Dráhy tlakových níží mají u všech těchto povodní velmi podobný směr a jedinou výjimkou je povodeň 19720423, která podle polohy tlakové níže i podle synoptického typu Ec patří mezi spíše mezi letní typ.



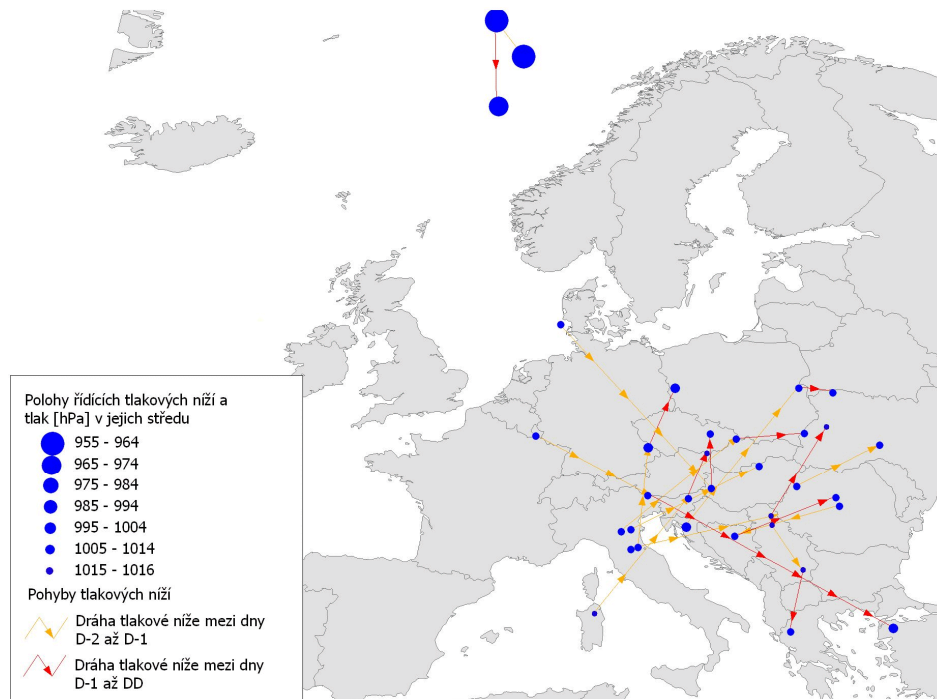
Obr. 5.8 Poloha a trajektorie řídicích tlakových níží před povodněmi v zimním hydrologickém půlroce na Otavě

Řídící tlakové níže, které se vyskytly před povodněmi na Otavě v letním hydrologickém půlroce, jsou mělké a jejich poloha ve dnech, kdy vypadávaly příčné srážky, je blíže České republice. Ve dnech D-2 se jejich středy nacházely často jižně od našeho území a dráha pohybu směřovala k severovýchodu, což svědčí o středomořském původu těchto cyklón. V skupině s výskytem povodní v letním pololetí jsou ale také případy, které provází západní proudění. Proti zimním povodním vedou u těchto epizod dráhy cyklón postupujících od Atlantiku zpravidla jižněji.

U trajektorií tlakových níží náležících velkým povodním s kulminací Otavy v Písku nad 10letou vodou je zřetelná dominance povětrnostních příčin spojených s pohybem tlakové níže jižně od území ČR (viz obr. 5.10). Cyklóny se do tohoto prostoru dostaly tak, že se generovaly přímo v severním Středomoří nebo vznikaly oddělením z brázd nízkého tlaku, která postupovala do střední Evropy od severo-západu.



Obr. 5.9 Poloha a trajektorie řídicích tlakových níží před povodněmi v letním hydrologickém půlroce na Otavě



Obr. 5.10 Poloha a trajektorie řídicích tlakových níží před velkými povodněmi s kulminací v Písku nad desetiletou vodou

Podstatné je, že se při těchto situacích dostává povodí Otavy v týlové části tlakové níže do silného severovýchodního proudění, ve kterém na úpatí Šumavy zesilují srážky. Do tohoto mechanismu vzniku povodní samozřejmě nenáleží povodeň 1993/223, která je v mnohých dalších ohledech ojedinělá.

## 5.5 Prostorové rozložení příčinných srážek

U rozboru srážek předcházejících analyzovaným povodním bylo hlavní úsilí soustředěno na aspekty prostorového rozložení srážkové činnosti, protože ta je silně ovlivňována fyzicko-geografickými vlastnostmi povodí. Nerovnoměrnost srážkových úhrnů je především výsledkem spolupůsobení morfologie terénu a cirkulace atmosféry při srážkově vydatných situacích. Za předpokladu, že povětrnostní podmínky způsobující povodně mají typické proudění (kapitola 5.4), lze očekávat, že i rozložení příčinných srážek povodní může vykazovat charakteristické symptomy.

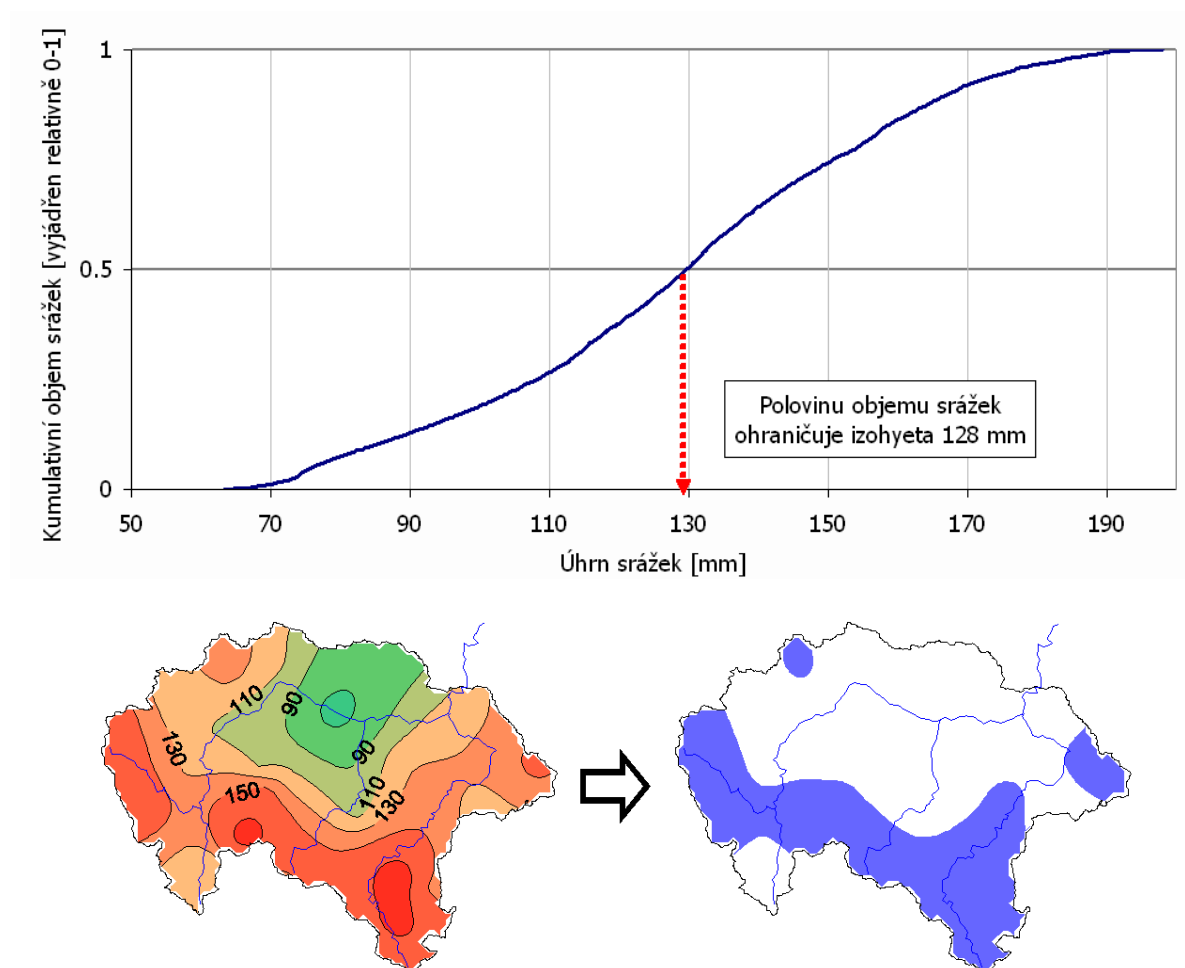
### 5.5.1 Příčinné srážky

Zkoumání potenciálních schopností jednotlivých meteorologických situací produkovat obdobné typy rozložení srážek na povodí lze uskutečnit pouze na základě jednotně definované srovnatelné veličiny. Proto bylo rozhodnuto u každé povodně určit příčinné srážky o stejné době trvání. Rozborem průběhů průměrných denních úhrnů srážek na povodí Otavy ve dnech předcházejících povodním se došlo k závěru, že optimálním postupem bude: považovat za příčinné srážky jejich maximální dvoudenní úhrn spadlý v průběhu dnů D-3 –DD. U tří čtvrtin známých povodní spadlo v takto definovaných dvou dnech více než 75 % čtyřdenního úhrnu srážek v době (D-3 – DD), a proto lze oprávněně předpokládat, že srážky ve vybraných dvou dnech věrohodně reprezentují celkový objem spadlých srážek.

### 5.5.2 Metodika zpracování prostorové distribuce srážek

Pro účely porovnání prostorového rozložení srážek u situací s různě velkými úhrny bylo třeba prvořadě vyvinout metodiku pro lokální určení jádra spadlých srážek. Zvolený přístup byl založen na vymezení nejmenší možné oblasti, kde se koncentrovalo 50 % celkového objemu srážek spadlých na celé povodí Otavy. V pravidelné síti bodů s údaji o množství srážek (gridu srážkového pole) byly kumulativně načítány objemy srážek pro každý bod, počínaje místem s největším množstvím srážek k místu s nejmenším množstvím srážek. Úhrn srážek, u kterého kumulativně načítaný objem překročil polovinu celkového objemu určuje izohyetu, která obepíná jádro srážkové činnosti (viz obr. 5.11).

Ke každému jádru srážek byla vypočtena hodnota míry koncentrace srážek, která se rovná podílu plochy jádra srážek na celkové ploše povodí. Například míra koncentrace 25 % znamená, že polovina objemu příčných srážek v oblasti s nejvyššími úhrny spadla na čtvrtině celkové plochy povodí. Tento ukazatel byl použit pro hodnocení rovnoměrnosti rozložení příčných srážek.



Obr. 5.11 Ukázka metody určení jádra srážkové činnosti pro povodeň 20020813

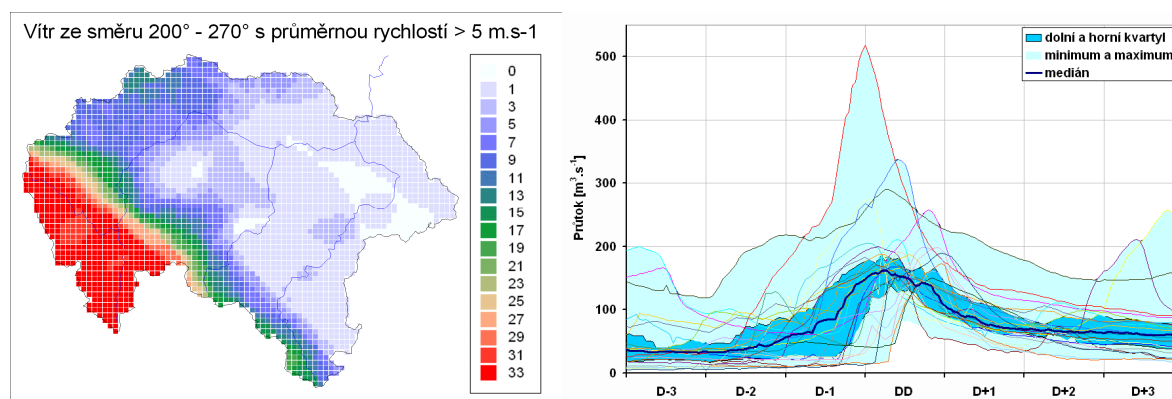
### 5.5.3 Vliv atmosférického proudění na tvorbu srážkového pole

Návětrný efekt je poměrně komplikovaným procesem zesilování srážek vlivem nucených vstoupných pohybů a konvergence proudění. Vlivem orografické členitosti terénu nejde však pouze o vytváření klasického návětrí a závětrí. [Řezáčová a kol., 2007]. Orografické zesilování spojeno rovněž se specifickými vlastnostmi povětrnostních situací. Mezi nejdůležitější obecné parametry jejich vlastností patří rychlost a směr proudění vzduchu.

Poloha jader příčných srážek byla u analyzovaných povodní dána do souvislosti se směrem a rychlostí větru naměřených ve stanici Churáňov ve dvou dnech, kdy příčné srážky

vypadávaly na povodí Otavy. I přesto, že se použilo k popisu atmosférického proudění pouze bodové měření větru v jedné stanici, je efekt vlivu proudění na rozložení srážek dobře identifikovatelný a je možné jej rozdělit do dvou jasně oddělených skupin. Hlavním kritériem pro jejich vyčlenění byl směr větru na Churáňově. Jedna skupina byla ještě rozdělena na dvě podskupiny podle rychlosti větru.

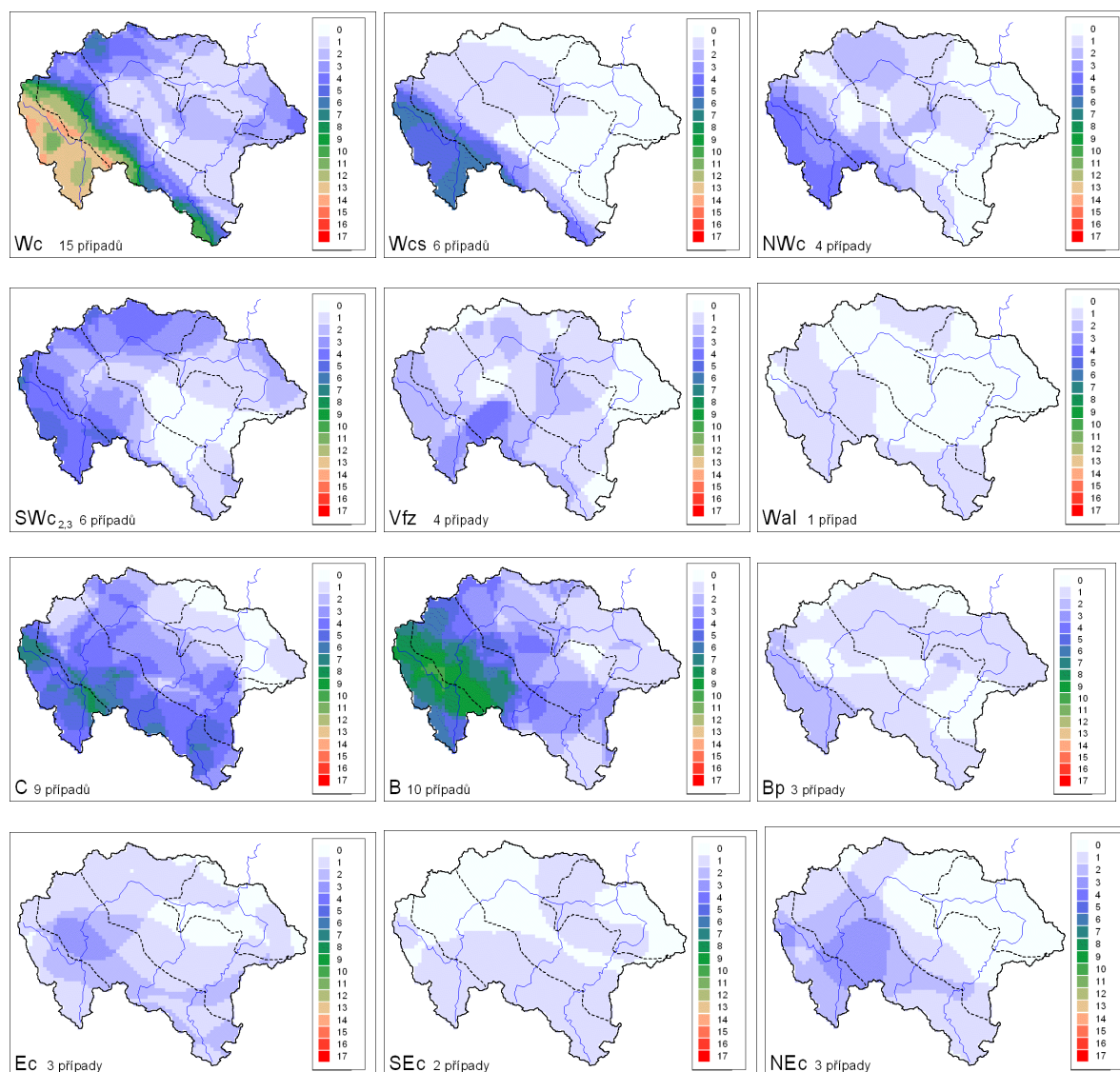
Nejvýraznější orografický efekt vzniká u situací se silným prouděním z jihozápadního kvadrantu. Podle dvou kritérií: (1) směr větru ze sektoru  $200^{\circ}$  -  $270^{\circ}$ , (2) průměrná rychlost větru větší než  $5 \text{ m.s}^{-1}$ , bylo do této skupiny zařazeno 36 ze všech 66 povodní, u kterých byly k dispozici údaje z Churáňova. Srážky u těchto případů jsou výrazně zesilovány na hraničním hřebeni Šumavy a jejich úhrny směrem do podhůří rychle klesají. Jádra srážek bývají také relativně malá (průměrná míra koncentrace je 28 %), protože hlavní objem srážek se koncentruje na malé ploše vrcholové části Šumavy. S posunem směru větru od jihu k západu se jádro srážek v povodí Otavy mírně posouvá stejným směrem a také se rozšiřuje i na povodí levostranných přítoků Otavy až po Horažďovice.



Obr. 5.12 Četnosti výskytu jádra srážkového pole při situacích s převládajícím směrem větru ze sektoru  $200^{\circ}$  -  $270^{\circ}$  a průměrnou rychlostí větší než  $5 \text{ m.s}^{-1}$ . Průtokové vlny v Písku, které vznikly následkem těchto situací.

Kromě charakteristického rozložení srážek má skupina další výrazné odlišnosti. Patří do ní 25 ze všech 28 povodní, které se vyskytly v zimním hydrologickém půlroce, a 26 ze všech 31 povodní, které měly jako příčinnou povětrnostní charakteristiku některou ze západních cyklonálních situací  $Wc$ ,  $Wcs$ ,  $NWc$ , nebo  $SWc_2$  a  $SWc_3$ . Výskyt tohoto orografického zesílení i u některých situací typu C (4 případy) je způsoben tím, že tlakové níže u těchto případů nevznikaly v severním Středomoří a do střední Evropy postupovaly po jiné dráze než  $Vb$  a v době vypadávání příčných srážek byly západně až severně od povodí Otavy.

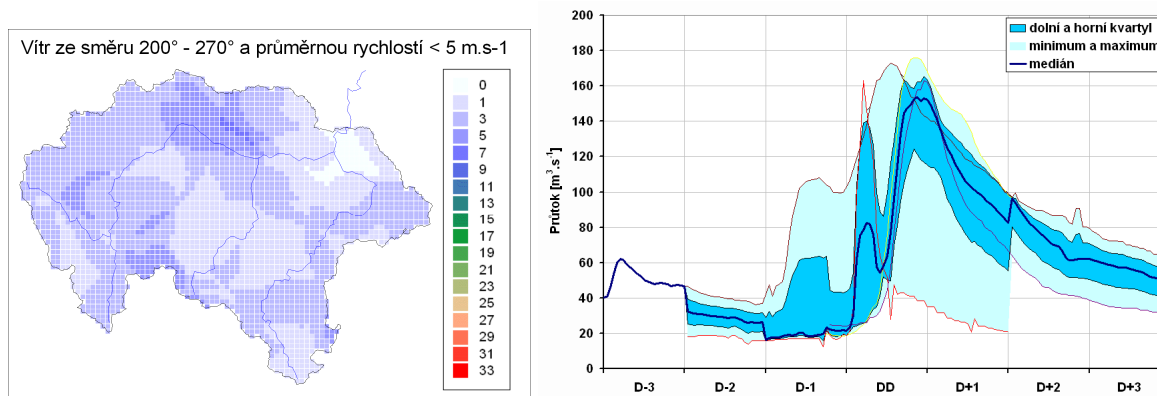
Do této skupiny s jedinou výjimkou (povodeň 19931223) nepatří velké povodně na Otavě v Písku. Pro tvar vlny je typický rychlý nástup průtoků a častá zkosení průtokové vlny v Písku vlivem transformace na dolním toku a malého přítoku ze střední a dolní části povodí ležící ve srážkovém stínu. Tento přítok z mezipovodí je u několika případů dokonce tak nevýznamný, že kulminační průtoky v Sušici převyšují kulminace v Písku jako například u povodně 20060529.



Obr. 5.13 Poloha srážkových jader u příčinných synoptických typů povodní na Otavě v Písku

Samostatně byla vyčleněna kategorie, u které má vítr na Churáňově sice stejný směr jako u předchozí skupiny, ale průměrné rychlosti větru jsou menší než  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Patří sem pouze 7 z celkového počtu uvažovaných povodní a jejich hlavní odlišností od předchozích je mnohem slabší srážkový orografický efekt. To je částečně způsobeno faktem, že s klesající rychlostí

větru se zmenšuje i intenzita orografického efektu, avšak u těchto povodní se také vyskytuje jiný mechanismus jejich vzniku. Poměrně velká, nerovnoměrná členitost srážkového pole a složené povodňové vlny s více vrcholy ukazují na větší podíl konvektivních srážek na vzniku povodní.

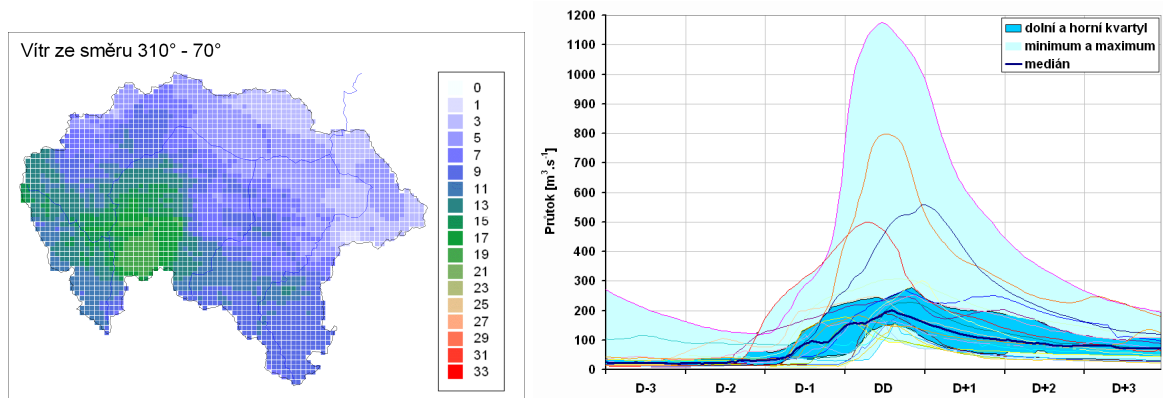


Obr. 5.14 Četnost výskytu jádra srážkového pole při situacích s převládajícím směrem větru ze sektoru 200° - 270° a průměrnou rychlostí menší než 5 m.s<sup>-1</sup>. Průtokové vlny v Písku, které vznikly následkem těchto situací

Třetí početnou skupinou rozdělenou na základě charakteru proudění jsou povodně, u kterých v době vypadávání příčných srážek převládalo na Churáňově proudění větru ze směru 310° - 70°. Bylo do ní zařazeno 24 z 67 povodní. Povodním předcházely nejčastěji povětrnostní situace, při kterých dochází v průběhu vypadávání srážek k přetáčení větru, a proto uváděný směr není tak reprezentativní jako u stabilního západního proudění. Stejně jako směr větru se u těchto situací výrazněji mění i jeho rychlost. V průměru jsou rychlosti menší (v naprosté většině pod 5 m.s<sup>-1</sup>), ale stává se, že ke konci srážkového období dochází k výraznému zesilování rychlosti větru, a to především u velkých povodní (20020813, 19770801, 19540709). To je charakteristický jev, který ve své práci popisuje Müller [2006] při rozboru meteorologických prvků předcházejících velkým povodním v České republice.

Jádro srážek se nejčastěji vyskytuje v oblasti mezi Kašperskými Horami a Vimperkem. V této oblasti se při severním až severovýchodním proudění vytváří specifické návětrí, které se projevuje zesilováním srážek právě na úpatí vedlejšího šumavského hřebene na linii Libín – Boubín – Popelná hora. Kolem Kašperských Hor navíc masív Šumavy vybíhá výrazněji do vnitrozemí, což způsobuje orografický srážkový efekt při proudění z více směrů. Srážky bývají v této skupině rovnoměrněji rozložené na celé území Otavy - průměrná míra koncentrace srážkového pole je 38 %.





Obr. 5.15 Četnosti výskytu jádra srážkového pole při situacích s převládajícím směrem větru ze sektoru 310° - 70°. Průtokové vlny v Písku, které vznikly následkem těchto situací.

Výskyt jádra srážek v popsané oblasti je i u všech velkých povodní před rokem 1954, u kterých nejsou k dispozici srovnatelné údaje o proudění větru, a proto je pravděpodobné, že i tyto povodně patří do této skupiny. Povodně v takto zařazené skupině se s jedinou výjimkou (19720423) vyskytly v letním hydrologickém půlroce a mezi příčinnými povětrnostními situacemi převládají typy C, Ec, NEc, B a Bp, u kterých dochází v týlové části tlakového útvaru k severnímu proudění vytvářející na Otavě toto specifické návětrí (viz obr. 5.15).

Povodňové vlny mají v Písku většinou mírnější nástup povodňových průtoků a mezi výskytem paty vlny a kulminací uplyne doba rovná jednomu až dvěma dnům. To je způsobeno jednak delším trváním srážek a také plošně rovnoměrnějším rozložením srážek, které zasahují i do oblasti podhůří, kde jsou pro odtokové poměry charakteristické delší doby koncentrace odtoku.

## 5.6 Kategorizace povodní

Provedené analýzy povodňového režimu Otavy prokázaly, že sezónní aspekt výskytu povodní na Otavě a s ním spojený určitý typ atmosférické cirkulace vytvářejí charakteristické rozložení srážek, které pak ovlivňuje i průběh odtokové odezvy povodní. Proto bylo ke kategorizaci povodní přistoupeno tak, aby kategorie tvořily skupiny povodní, které se podobají nejen podle vlastností průtokových vln, ale také meteorologickými příčinami, které je vyvolaly.

Hlavními kritérii pro kategorizaci byly sezóna výskytu povodní, jejich extremita a poloha jádra příčinných srážek. Rozdělení na letní a zimní typ bylo provedeno podle teplé a studené poloviny hydrologického roku. Poloha jádra srážek jako dalšího kritéria kategorizace byla vybrána proto, že u ní lze vysledovat souvislost jak s odtokovou odezvou, tak i s meteorologickými příčinami. Tímto postupem bylo definováno 9 typů povodní:

- velké letní povodně,
- velké zimní povodně,
- zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu,
- zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek,
- zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, málo orograficky zesílených srážek,
- letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy,
- letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy,
- letní povodně bez orografického zesílení srážek,
- letní povodně z bouřkového přívalu.

U uvedených kategorií byl upřesněn nejpravděpodobnější výskyt povodní v rámci dané sezóny. Byly popsány typické povětrnostní příčiny podle výskytu příčinných synoptických typů, směru a rychlosti proudění vzduchu, a lokalizace v jaké části povodí se nejčastěji vyskytují maximální úhrny srážek. Dále byly brány do úvahy nejzřetelnější vlastnosti odtokové odezvy podle tvaru průtokové vlny Otavy v Písku a podílu kulminací Blanice a horní Otavy na jejím kulminačním průtoku.

#### 5.6.1 Kategorie „Velké letní povodně“

Jde o povodně, které se vyskytly v letním hydrologickém půlroce a kulminačním průtokem překročily v Písku úroveň 10leté vody ( $395 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Všechny významně zasáhly do života lidí v tomto regionu, a proto existují četné historické zprávy o jejich průběhu včetně odborných publikací popisujících meteorologické a hydrologické příčiny. Přehled těchto povodní včetně jejich základních charakteristik je uveden v tabulce 5.3.

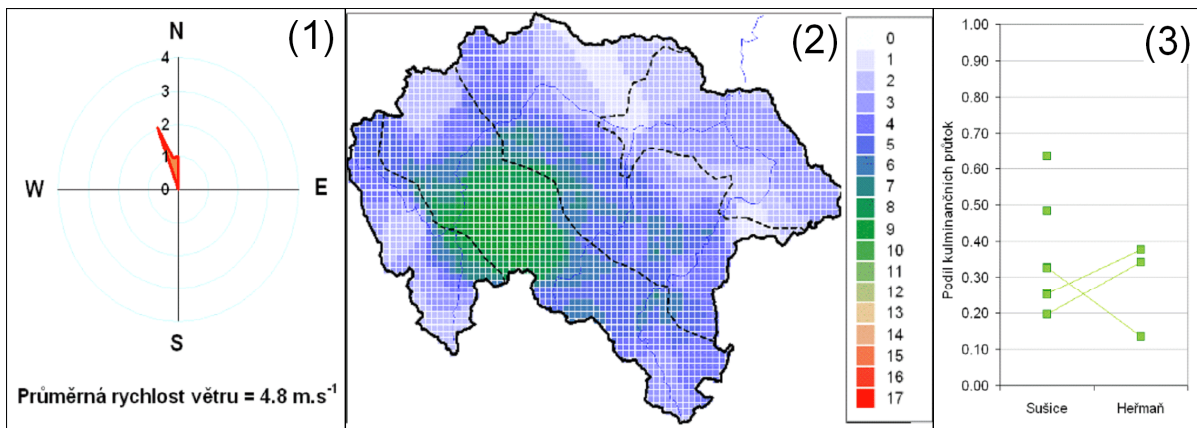
Protože jde z části o povodně, které se vyskytly před více než 100 lety, bylo nutné při jejich porovnávání pracovat se soubory dat, která jsou dostupná jak pro povodňové případy v omezené míře z konce 19. století, tak i pro poslední zaznamenanou velkou povodeň ze srpna 2002. Přesto jsou patrné společné charakteristiky, které dokládají význam specifických podmínek pro vznik velkých povodní na Otavě. Většina z těchto symptomů byla již publikována v práci zabývající se hydrometeorologickými příčinami pouze těchto velkých otavských povodní [Vlasák, 2004] Patří mezi ně:

- Poloha tlakové níže v době vypadávání příčinných srážek jižně nebo jihovýchodně od povodí Otavy, což signalizuje podíl vlhkosti středomořského původu na vzniku srážek (obr. 5.16)

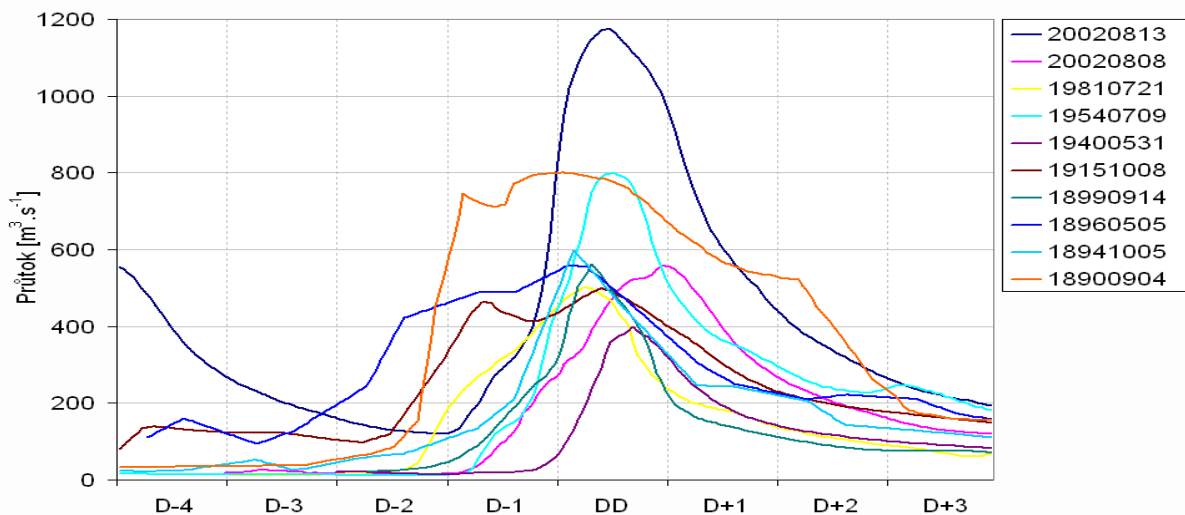
- Společný výskyt těchto povodní na Otavě i na Vltavě v Praze (s výjimkou povodně 19400531), který dokazuje, že velké povodně na Otavě vznikly jako následek plošně rozsáhlých srážek, které zasáhly i okolní povodí.
- Převaha vlivu příčinných srážek nad počátečními podmínkami v povodí. Podle indexu UPS byla nasycenost před nástupem povodně u většiny epizoda průměrná nebo dokonce podprůměrná a proto není možné tvrdit, že i relativně suché období je zárukou, že se velká povodeň nemůže vyskytnout.
- Rozložení příčinných srážek bylo u těchto povodní dosti rovnoměrné. Jejich maximum se u většiny případů nacházelo v oblasti mezi Kašperskými Horami a Vimperkem, podružné maximum na horní Blanici nad Husineckou nádrží. Z charakteru tohoto orografického zesílení srážek lze usuzovat na výskyt severního až severovýchodního proudění během vypadávání srážek (viz obr. 5.16).
- Stejně jako u srážek je i rozložení maximálních odtokových výšek rovnoměrné. To potvrzují záznamy kulminačních průtoků ve stanicích Sušice a Heřmaň u případů, kde jsou údaje k dispozici. U povodní 20020813 a 19540709 byl kulminační průtok Blanice dokonce vyšší než Otavy v Sušici (viz obr. 5.16), což je situace, která se u menších povodní prakticky nevyskytuje.

Tabulka 5.3. Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Velké letní povodně“

Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhrn
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[°]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
20020813	13.8.2002	1175	299	442.8	210.3	C	340	4	135.3
20020808	8.8.2002	558	109	191	102.5	C	360	2.2	122.8
19810721	21.7.1981	500	163	67.2	79.9	B	350	5.2	118.7
19540709	9.7.1954	800	262	181	125.1	C	340	7.7	135.6
19400531	31.5.1940	400	254	34.2	55.7				84.8
19151008	8.10.1915	500	125		134.1				68.5
18990914	14.9.1899	560	270		73.7				102.7
18960505	5.5.1896	560			157.7				54.5
18941005	5.10.1894	600			102.8				82.6
18900904	4.9.1890	800	260		227.5				120.7



Obr. 5.16 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Velké letní povodně“.



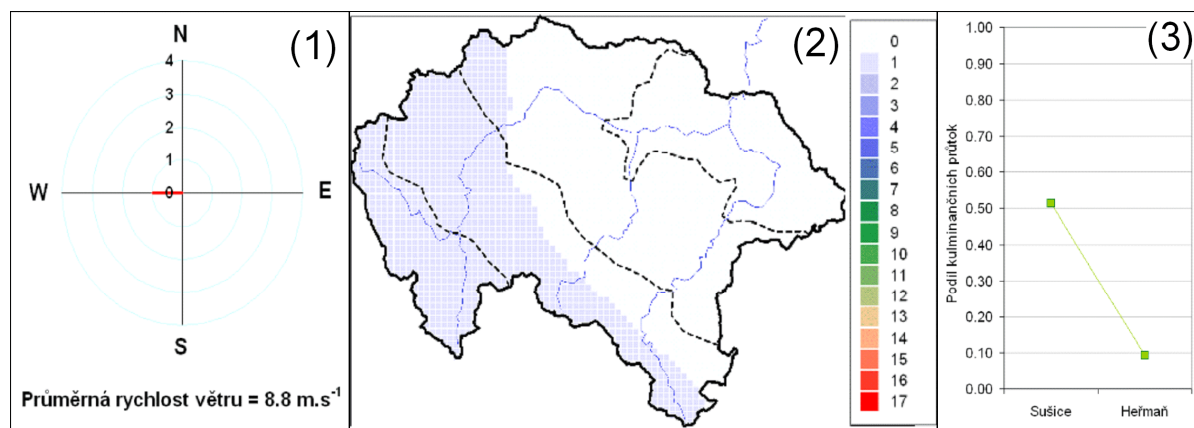
Obr. 5.17 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek zařazené do kategorie „Velké letní povodně“.

### 5.6.2 Kategorie „Velké zimní povodně“

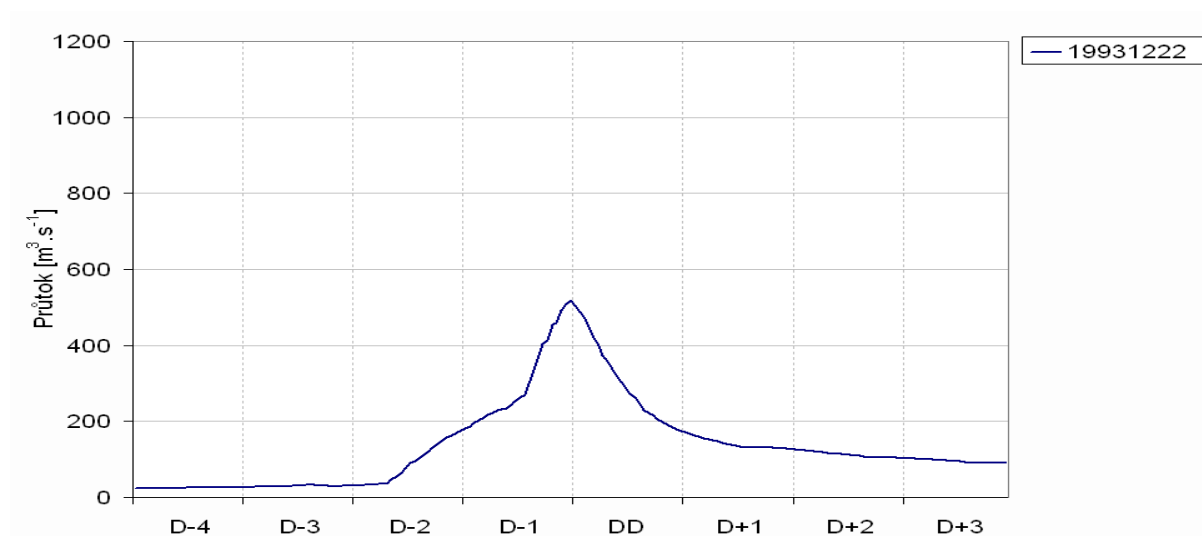
Do této skupiny byla zařazena pouze jediná povodeň z prosince roku 1993, která je z několika pohledů výjimečná. Atmosférické fronty přicházející ze západní Evropy byly spojené s neobvykle hlubokou tlakovou níží (955 hPa) nad Norským mořem. Příčinou povodně byly intenzivní srážky, které zasáhly nejen Šumavu, jak je u povodní v tomto ročním období obvyklé, ale celé povodí. Na Šumavě překročil dvoudenní úhrn na několika stanicích 100 mm (nejvíce Kvilda 136 mm). Vliv na vznik povodně měla také sněhová pokrývka, která v polovině prosince dosahovala na Šumavě nadprůměrných hodnot. Největší extremity dosáhla povodeň na Otavě v Sušici, ale ani přítok z ostatních částí povodí nebyl zanedbatelný. Například podíl kulminačního průtoků v Sušici na kulminačním průtoků v Písku patří u této epizody mezi nejmenší z povodní, které se vyskytly v zimním hydrologickém půlroce.

Tabulka 5.4 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Velké zimní povodně“

Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhm
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[ $^{\circ}$ ]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
19931222	22.12.1993	518	266	48.1	77.5	Wc	270	8.8	61.3



Obr. 5.18 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) poloha srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Velké zimní povodně“.



Obr. 5.19 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Velké zimní povodně“.

### 5.6.3 Kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“

Do této kategorie byly zařazeny povodňové epizody, u nichž tání sněhu mělo zřetelně větší vliv na vznik povodně než dešťové srážky. Patří sem všechny povodně, které byly zařazeny v kapitole 5.2. mezi smíšené povodně s převahou vlivu tání sněhu a také další smíšené povodně, u kterých se tání sněhu výraznou měrou podílelo na nasycenosti povodí.

Tato skupina obsahuje osm povodní, které se většinou vyskytly v březnu, výjimečně je zde také jedna epizoda ze začátku ledna (viz tabulka 5.5). Další výjimkou je povodeň dokonce z poloviny května, která sice datem svého výskytu náleží do letního půlroku, ale vliv tání sněhu ji logicky řadí mezi zimní povodně. Šest z osmi těchto případů připadá na deset sněhově nejbohatších let z období 1961 – 2006, což vypovídá o zvýšeném riziku vzniku povodně při nadprůměrných sněhových zásobách. Na druhé straně extremita těchto povodní nebývá velká. Tři sněhově nejbohatší zimy 2006, 1988, 1987 způsobily na Otavě v Písku povodně s dobami opakování 2 až 5, 1 až 2, 1 až 2 let. Pro porovnání ve stejných obdobích vykazovaly kulminační průtoky Lužnice v Bechyni dobu opakování 50 až 100, 10 a 5 let.

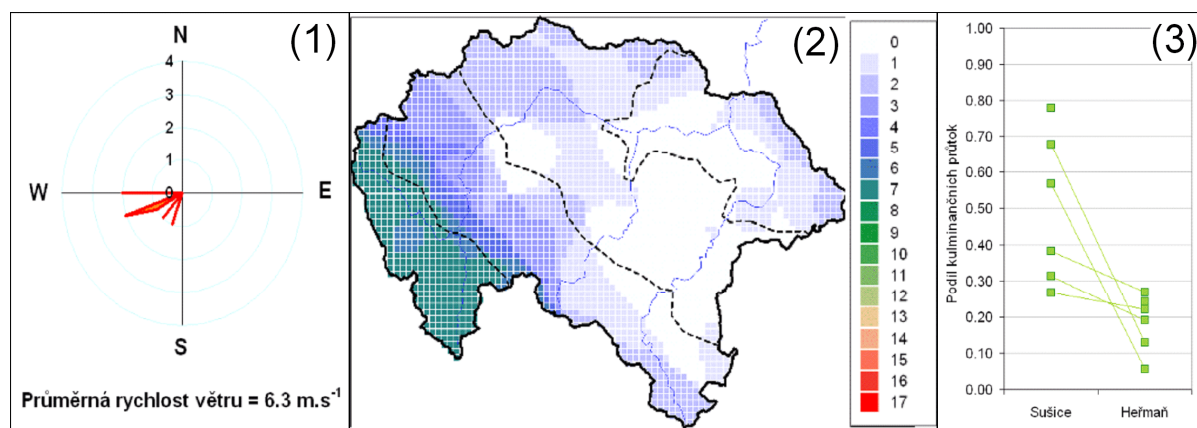
Povětrnostní situace předcházející těmto povodním je charakteristická poměrně silným západním nebo jihozápadním prouděním přinášejícím výrazné oteplení a srážky především do vrcholové části Šumavy. Protože ve všech případech se v průběhu tání vyskytovaly dešťové srážky, lze usuzovat, že nebezpečí vzniku extrémní odtokové situace povodňového typu při výskytu anticyklonálního bezoblačného počasí, kdy sníh přijímá nejvíce tepelné energie pouze z krátkovlnného záření v povodí Otavy nehrozí. Dešťové srážky padaly do povodí v době, kdy už tání bylo v pokročilém stádiu a byla omezena retenční kapacita sněhové pokrývky. Důležitost vlivu množství srážek na extremitu povodně je patrná, na epizodě 20020322, u které zásoby sněhu nebyly tak významné, ale z důvodu většího množství dešťových srážek vykazovala v dané kategorii největší kulminační průtok Otavy v Písku.

Tabulka 5.5 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“

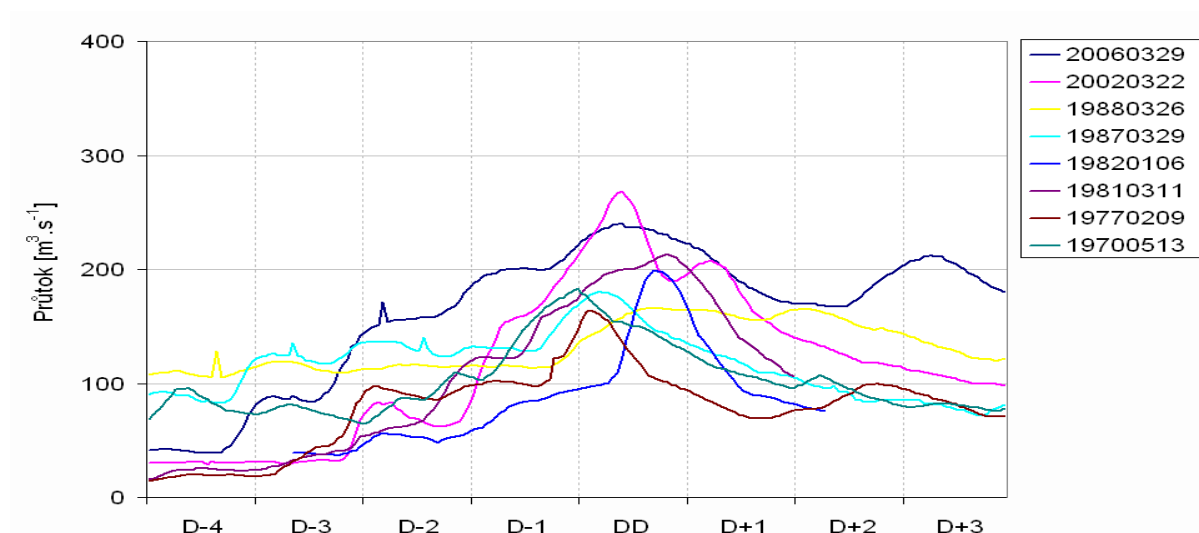
Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhrn
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[ $^{\circ}$ ]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
20060329	29.3.2006	241	92.2	65.1	82.7	SWc2	250	3.5	22.2
20020322	22.3.2002	267	180.6	34.6	69.5	Wc	270	5.8	46.0
19880326	26.3.1988	166	44.3	36.7	60.8	Wc	240	6	27.5
19870329	29.3.1987	180.8	56.6	34.5	55.2	B	270	6.7	7.8
19820106	6.1.1982	199	75.1	12.5	39.4	Wc	240	8.8	13.5
19810311	11.3.1981	213.2	121	9.41	51.3	SWc2	220	6.8	11.1
19770209	9.2.1977	163	-	39.5	41.5	Wc	250	7.5	13.2
19700513	13.5.1970	183.4	143	-	49.9	C	200	7.8	16.8

Z tvarů průtokových vln vyniká pozvolný nárůst průtoků s charakteristickým vlněním odpovídajícím dennímu chodu teploty a intenzitě tání sněhu. Přírůstek průtoků mezi vrcholy dílčích vln v Písku v jednotlivých dnech se pohyboval bez přispění deště maximálně do  $50 m^3 \cdot s^{-1}$ . Pro nárůst průtoku nad kritickou mez jednoleté vody vlivem tání sněhu je potřeba minimálně tří dnů, kdy denní průměry teplot na celé ploše povodí výrazně překračují bod mrazu.

Z výskytu a charakteru povodní s významným podílem tání sněhu vyplývá, že při nadprůměrných zásobách sněhu v povodí Otavy je pravděpodobné, že při jarním tání dosáhnou na řece maximální vodní stavy povodňových stupňů, ale bez výrazného přispění dešťových srážek, které v jarním období nejsou naštěstí časté, je riziko vzniku velkých povodní malé. V důsledku pozvolných vzestupných i sestupných větví průtokových hydrogramů se tyto povodně vyznačují poměrně velkým objemem, který sice není srovnatelný s objemem velkých letních povodní, přesto může výrazně ovlivnit hospodaření s vodou v nádržích Vltavské kaskády.



Obr. 5.20 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“.



Obr. 5.21 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“.

#### 5.6.4 Kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“

Tato kategorie obsahuje 14 povodní, z nichž většina se na Otavě vyskytla v měsících listopad, prosinec a leden. Příčinným synoptickým typem byly u těchto povodňových případů nejčastěji situace Wc, Wcs a NWc, při kterých přes povodí Otavy přecházely ve velmi silném západním proudění jednotlivé frontální systémy. Průměrné denní rychlosti větru ve dnech D-2 až DD přesahovaly na Churáňově u všech epizod  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , u třech dokonce  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Převládající směr větru pocházel vždy z úzkého sektoru  $200^\circ - 270^\circ$ . U povodní vázaných na tento typ povětrnostní situace se často stává, že dochází v krátkém sledu po sobě k opakování silných srážek, které jsou v obou případech spojené se stejnými meteorologickými příčinami. V této kategorii tvoří takové dvojice povodní epizody *19981030* a *19981102*, *20021231* a *20030103*, (další podobné dvojice jsou popsány v kategorii „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“).

Dešťové srážky, které tvoří dominantní příčinu těchto povodní, byly výrazně orograficky zesílené a dosahovaly ve všech případech maxima na hraničním hřebenu Šumavy v oblasti náhorní plošiny kolem Kvildy a Modravy. Jádra největších srážek jsou u všech případů malá a jsou ostře vyhraněná na severovýchodních svazích Šumavy (viz obr. 5.22).

Charakteristické rozložení srážek způsobuje, že povodňová vlna se ve všech případech formovala z větší části na horní Otavě. V Písku tyto povodně patří mezi ty menší (až na jednu výjimku *20030103* nepřesahují úroveň 2leté povodně), na Otavě v Sušici však ve dvou případech kulminační průtoky přesáhly hodnotu 5leté povodně.

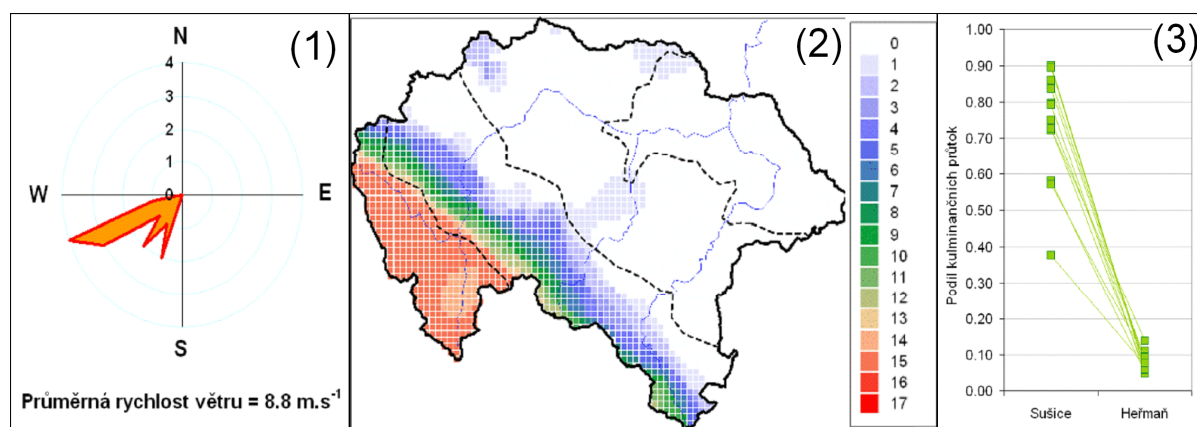
Naopak povodí Blanice při těchto situacích leží ve srážkovém stínu. Kulminační průtoky na dolní Blanici jsou malé, a proto také podíl mezi maximálním průtokem v Heřmani a v Písku patří mezi nejmenší.

Průtokové vlny Otavy v Písku mají charakteristický tvar, s velmi rychlým vzestupem průtoků až do úrovně zhruba kolem  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , kdy dochází ke zpomalení vzestupu a po kulminaci zpravidla následuje opět velmi rychlý pokles. Tento tvar nesouvisí s chodem srážek, protože není znatelný na průběhu průtoků Otavy v Sušici. Vytváří se až při pohybu povodňové vlny korytem řeky a údolní nivou na úseku mezi Sušicí a Pískem, kde při určité vyšší úrovni již dochází k menším rozlivům, a tedy k větší transformaci průtokové vlny. Celkově je objem povodňových vln Otavy v Písku u tohoto typu v porovnání s ostatními povodněmi malý.

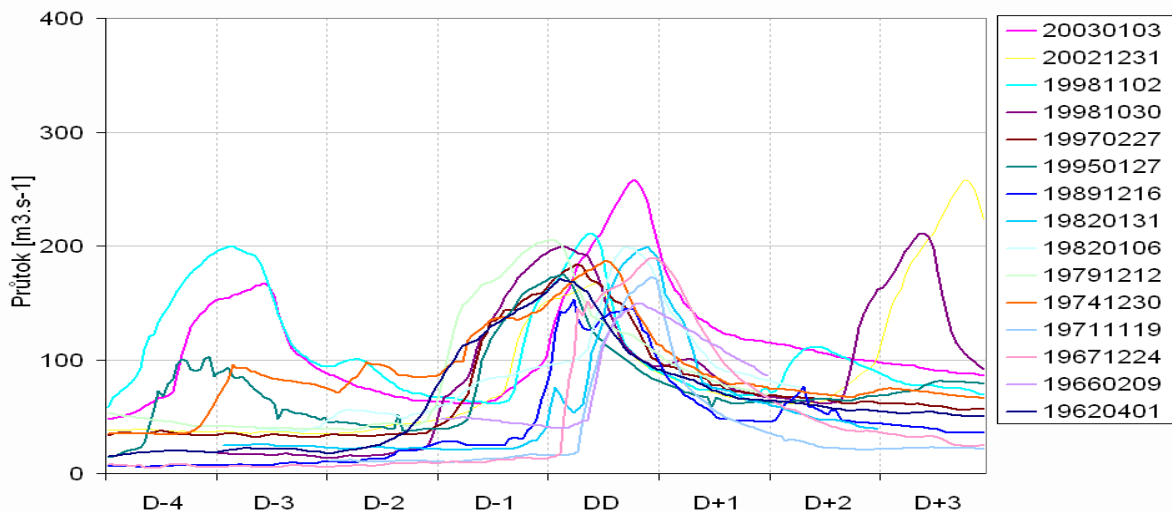


Tabulka 5.6 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“

Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhm
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[ $^{\circ}$ ]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	
20030103	3.1.2003	258	187	35.6	51.1	Wcs	240	6.3	27.7
20021231	31.12.2002	167	133	18.3	34.8	Bp	250	5.5	15.2
19981102	2.11.1998	211	190	13.4	42.9	Wcs	250	6.2	19.2
19981030	30.10.1998	200	169	9.5	40.7	Wc	260	7.8	56.0
19970227	27.2.1997	184	137.9	17.5	36.9	SWc2	250	9.2	28.5
19950127	27.1.1995	174.4	150	13.9	35.7	Wc	240	6.7	24.9
19891216	16.12.1989	153	115	10.4	26.8	Wc	220	10.3	30.4
19820131	31.1.1982	199	-	10.8	26.6	NWc	250	8.8	16.7
19791212	12.12.1979	204.8	117	19	43.1	Wcs	210	12	30.7
19741230	30.12.1974	187.4	135	-	44.9	Wc	270	8.3	12.2
19711119	19.11.1971	173	137	8.25	16.5	NWc	220	10.8	28.5
19671224	24.12.1967	190	170	9	25.2	Wc	200	11.5	16.1
19660209	9.2.1966	150	109	9	30.6	Vfz	230	9.2	19.5
19620401	1.4.1962	171	143	13.2	34.3	Wcs	200	10	14.1



Obr. 5.22 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“



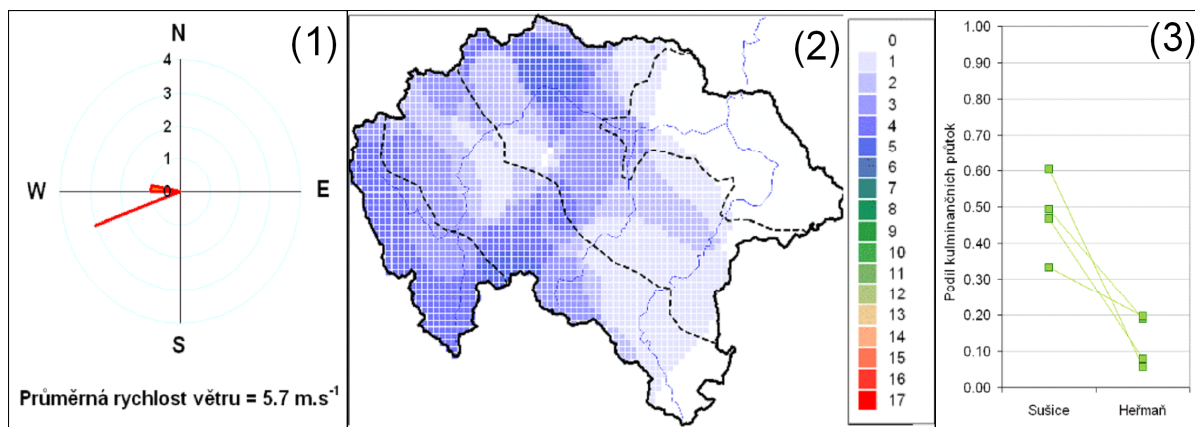
Obr. 5.23 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“

### 5.6.5 Kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, málo orograficky zesílených srážek“

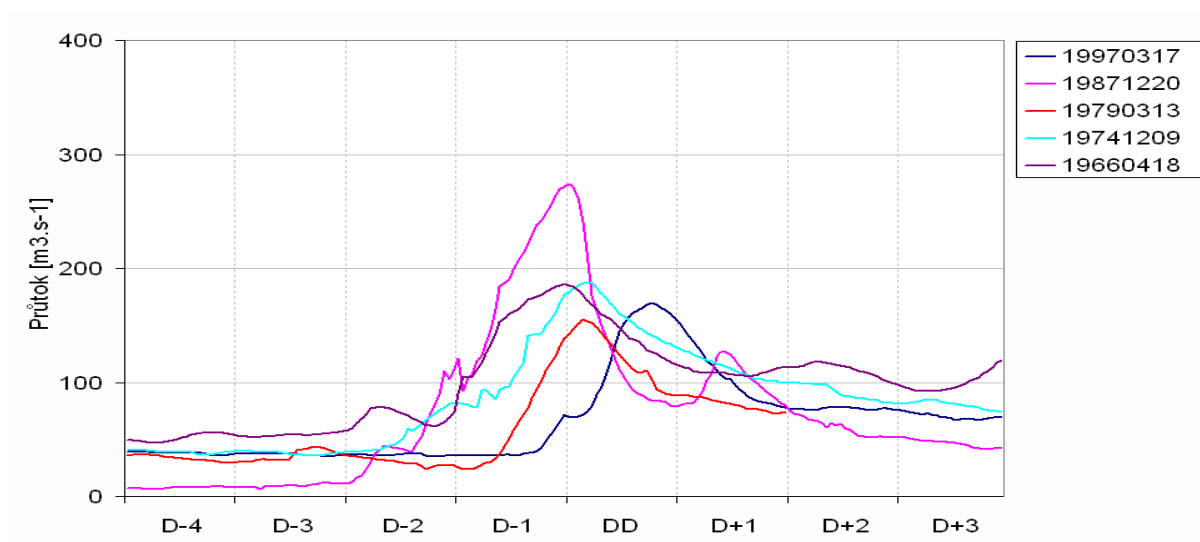
Povodně zařazené do této skupiny se na rozdíl od zimních povodní s výrazným orografickým zesílením srážek vyskytovaly i v druhé polovině zimního hydrologického půlroku. Jejich meteorologické příčiny charakterizuje také západní proudění, se směry větru na Churáňově 250° – 280°. Rychlosti větru, doprovázející srážkovou činnost však nedosahovaly tak vysokých hodnot a zřejmě i z tohoto důvodu orografické zesílení srážkové činnosti není tak výrazné. Z rozložení jader srážek je patrné, že se nejvyšší úhrny vyskytly u několika epizod i v podhůří Šumavy, k čemuž u předchozí kategorie nedošlo ani v jednom případě.

Tabulka 5.7 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, málo orograficky zesílených srážek“

Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhrn
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[°]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
19970317	17.3.1997	169.4	83.5	31.8	33.6	NWc	280	6.7	29.2
19871220	20.12.1987	274.4	165.8	15.4	43.9	SWc2	250	5.8	39.6
19790313	13.3.1979	155	-	-	32.2	B	250	5.7	19.9
19741209	9.12.1974	187.4	87.5	14.6	44.6	NWc	270	6.5	31.2
19660418	18.4.1966	186.4	62	36.5	51.4	Vfz	250	3.7	35.2



Obr. 5.24 (1)Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, málo orograficky zesílených srážek“.



Obr. 5.25 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, málo orograficky zesílených srážek“.

Odtoková odezva Otavy v Písku se liší mírnějším nástupem průtoků. Mezi patou a kulminací vlny v Písku uběhlo u všech těchto povodní více než 24 hodin. U vzestupných větví vln se také častěji vyskytují podružné vrcholy, které svědčí o postupném zapojování jednotlivých částí povodí.

### 5.6.6 Kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“

Do této kategorie byly zařazeny povodně, které se vyskytly v letním hydrologickém půlroce a z rozložení srážek vykazují výrazné zesílení srážkové činnosti v centrální části Šumavy. Povodně ze září a října (19811012, 19811216, 19861023) vykazují zejména v důsledku silného proudění při západní cyklonální situaci vlastnosti, na základě kterých by zároveň mohly být zařazeny do kategorie „Zimních povodní s výrazným orografickým efektem na rozložení srážek“.

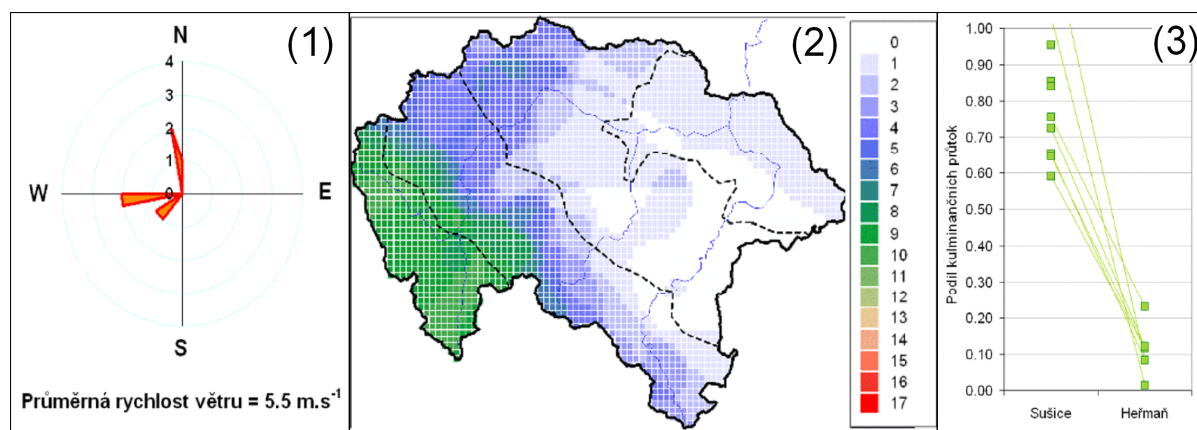
Společným znakem povodní v této kategorii je převládající směr proudění, který má západní nebo severozápadní složku. Toto proudění zde však není vyvoláno pouze synoptickými typy západních cyklonální situací, ale vyskytují se u něho i případy s příčinným synoptickým typem C, NEc, nebo B a Bp. Na rozdíl od ostatních letních povodní, způsobených stejnými synoptickými typy, byla u těchto případů poloha tlakové níže nebo brázdy v době vypadávaní příčinných srážek situována západně nebo severozápadně. Proto se povodí Otavy dostávalo do severního až západního proudění, při kterém se vytvářelo orografické zesílení srážek typické spíše pro zimní povodně. Koncentrace srážek do oblasti centrální Šumavy však v některých případech nebývá tak výrazná a následkem severní složky v proudění se poloha jader často vyskytuje častěji v severozápadní části povodí již mimo pohoří Šumava. Jako následek několikanásobného přechodu frontálních systémů se také zde vyskytují povodně s dvěma vlnami jdoucími bezprostředně po sobě (20060529 a 19910803, 19811012 a 19811216).

Tabulka 5.8 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“

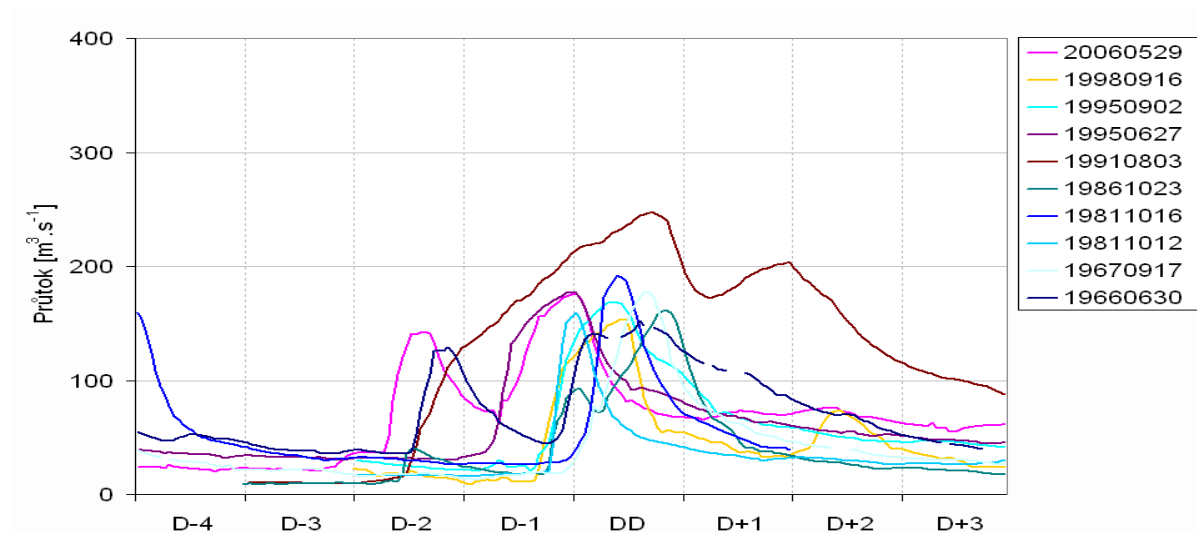
Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhrn
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[ $^{\circ}$ ]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
20060529	29.5.2006	176	219	14.4	38.4	Wc	270	5.7	51.5
19980916	16.9.1998	154	147	?	22.1	C	260	7.7	27.9
19950902	2.9.1995	168	110	13.8	28.6	C	270	6.2	50.3
19950627	27.6.1995	178	152	?	32.8	NEc	350	2.2	41.8
19910803	3.8.1991	247.2	159.9	28.8	76.6	Vfz	360	0.7	68.5
19861023	23.10.1986	160.8	166	2.3	22.5	Wc	220	10.3	32.8
19811016	16.10.1981	192	113.4	22.1	20.6	Wcs	230	5	30.5
19811012	12.10.1981	159.5	134	?	15.9	Wcs	240	8.7	32.7
19670917	17.9.1967	178	129	21.7	20.6	Bp	350	2.2	36.2
19660630	30.6.1966	152	115	30	37.4	B	260	6.7	31.9

Tvar průtokových vln Otavy v Písku se podobá zimním povodním s orografickými srážkami. Objemem i kulminací patří tyto povodně spíše k menším, podíl Blanice na maximálním průtoku Otavy je malý a u tvarů průtokových vln Otavy v Písku je zřetelný vliv

transformace průtoku v korytě Otavy mezi Sušicí a Pískem. Intenzivní transformační účinek trati střední a dolní Otavy je patrný u povodní 19861026 a 20060529, kdy byl kulminační průtok v Sušici dokonce větší než v Písku. Také u povodně 19910803, u které jsou ještě v Katovicích patrné tři samostatné vlny vzniklé jako následek rychle po sobě jdoucích srážkových epizod, ale v Písku jsou tyto vlny již spojené do jedné, která má charakteristické zkosení na vzestupné větvi.



Obr. 5.26 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“



Obr. 5.27 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“

### 5.6.7 Kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“

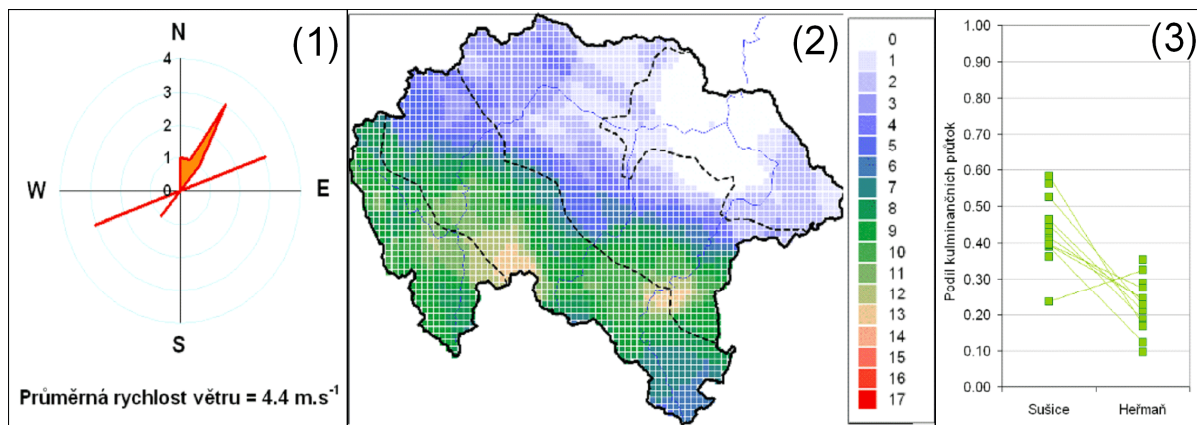
Tyto povodně se vyskytly v letním hydrologickém půlroce a maxima srážek dosahovaly na severovýchodních svazích Šumavy. Do této skupiny bylo zařazeno 14 povodní. Vydatné příčinné srážky souvisely ve většině případů s tlakovou níží anebo s brázdou nízkého tlaku, které se pohybovaly v kritických dnech jižně nebo jihovýchodně od povodí Otavy. Atmosférické proudění na ně vázané mělo v naprosté většině severovýchodní složku, u některých případů, kdy poloha řídicího tlakového útvaru byla velmi blízko Otavy, se směr větru přetáčel v průběhu vypadávání srážek na sever až západ.

Srážky u těchto povodní byly plošně rovnoměrněji rozložené než u západních cyklonálních situací. Nejvyšší úhrny byly naměřeny nejčastěji v oblasti mezi Kašperskými Horami a Vimperkem, druhé maximum pak bylo identifikováno mezi masivem hor Boubín a Libín. Tyto oblasti jednak tvoří návětrí při severovýchodním proudění, ale také doběhové doby vody do závěrového vodoměrného profilu Písek jsou z obou oblastí podobné (viz kapitola 3.5) a dochází tak ke střetávání průtokových vln. To je jeden z dalších důvodů, proč je toto rozložení srážek tak příznivé pro vznik povodní.

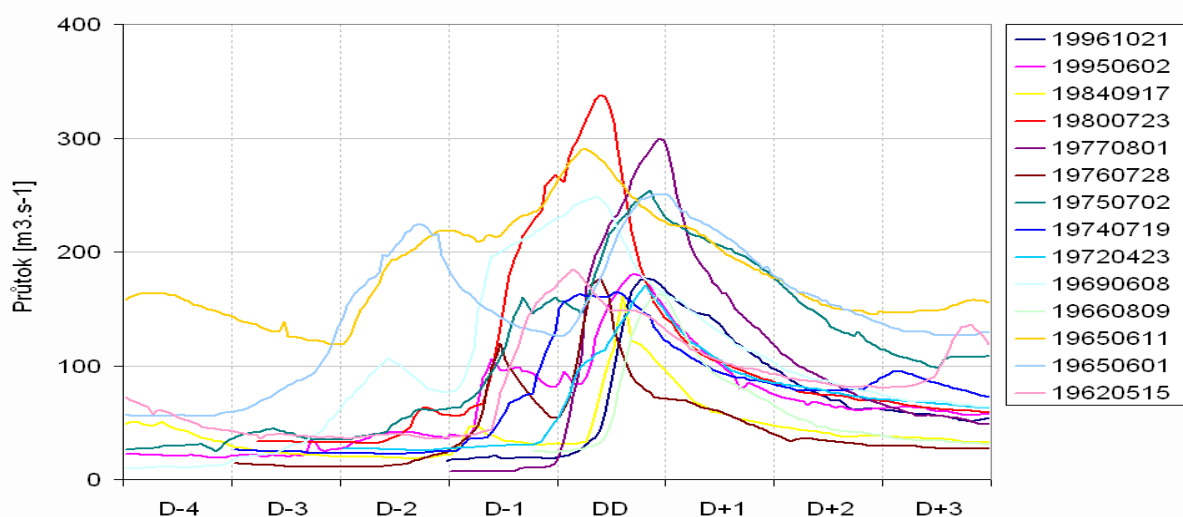
Stejně jako srážky jsou u těchto povodní rovnoměrně rozloženy i odtokové výšky. Kulminační průtoky Blanice v Heřmani jsou pouze o málo menší než v Sušici na Otavě a významný je také přítok ze střední a dolní části povodí. Tvary průtokových vln jsou rozmanité, u některých se opět projevuje zkosení vlny vlivem transformace v údolní nivě Otavy.

Tabulka 5.9 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“

Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhrn
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[ $^{\circ}$ ]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
19961021	21.10.1996	176	73.1	42.7	29.2	Wc	250	4.7	48.2
19950602	2.6.1995	180.4	78	63.8	36.6	B	70	1.8	49.5
19840917	17.9.1984	161	63	19.9	18.9	C	40	3.2	31.3
19800723	23.7.1980	338	190	32.3	56.4	Cv	220	6.3	48.7
19770801	1.8.1977	300	135.2	55.7	43.2	Sec	30	7.2	97.2
19760728	28.7.1976	176.8	103	30.3	23.4	Ec	30	2.5	52.7
19750702	2.7.1975	255	60.2	82.7	61.3	NEc	360	5.3	42.5
19740719	19.7.1974	165.2	59.6	27.7	35.2	B	10	2.7	49.0
19720423	23.4.1972	170.4	-	49.3	31.4	Ec	70	2.5	32.3
19690608	8.6.1969	249	98.4	61.5	58.3	NEc	30	4.3	58.4
19660809	9.8.1966	163	66	-	21.8	Wal	250	3.7	35.7
19650611	11.6.1965	290	115	74.9	88.8	C	250	5.8	43.8
19650601	1.6.1965	250	116	47.5	76.7	B	70	5.3	26.3
19620515	15.5.1962	185	97.3	42	38.4	B	20	6.3	41.9



Obr. 5.28 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“



Obr. 5.29 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“

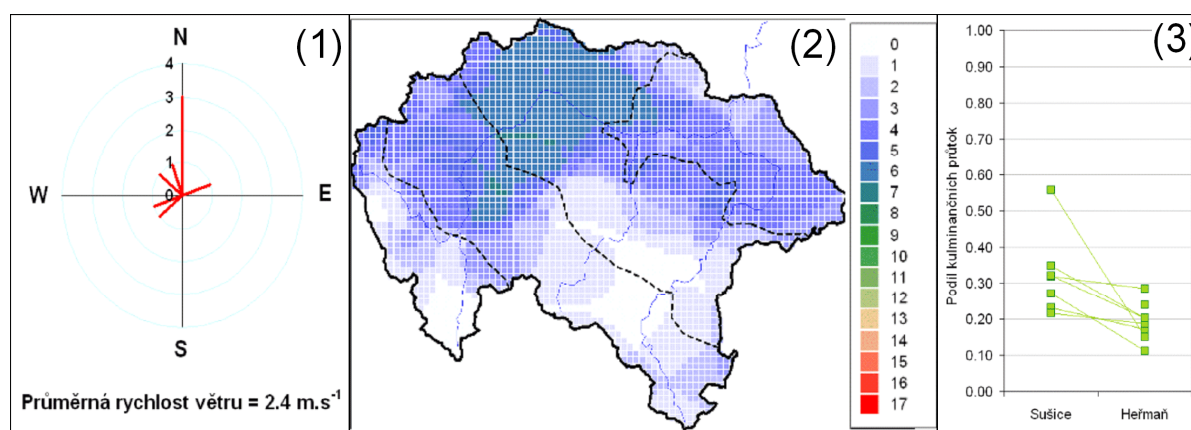
### 5.6.8 Kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“

Hlavním kritériem pro zařazení do této kategorie byla poloha jádra srážek v severní polovině povodí. Všechny povodně této skupiny se vyskytovaly v nejteplejší části roku v období od konce května do začátku září. Z hlediska meteorologických příčin lze najít společné znaky pouze v relativně slabém proudění, které se vyznačovalo na Churáňově častěji ve spojení se severní složkou. Přímá souvislost s určitým typem příčinné synoptické situace není u této kategorie však zřejmá.

Jádro srážek leželo nejčastěji ve středním Pootaví nebo na dolní Blanici. Rozloha jader byla poměrně velká, a proto i rozložení srážek na celé území Otavy bylo u těchto povodní velmi rovnoměrné. Tím docházelo k rovnoměrnému rozložení odtokových výšek, zesilovanému ještě srážko-odtokovými vlastnostmi jednotlivých částí povodí. Nižší srážky na horní Otavě a vyšší na středním a dolním úseku vyvolávají podobné odtokové výšky, díky rozložení odtokových koeficientů, který bývá obvykle podmíněn hlavně různou svažitostí terénu a odlišnými vlastnostmi půd. Velikost kulminačních průtoků Otavy v Sušici byla proto srovnatelná s Blanicí v Heřmaní a významné byly i přítoky z ostatních částí povodí. Do této skupiny patří dvě povodně, kde se maximální průtoky v Písku pohybovaly na úrovni 5letých vod. Také objem vln u těchto povodní je větší zejména relativně k velikosti jejich kulminačních průtoků.

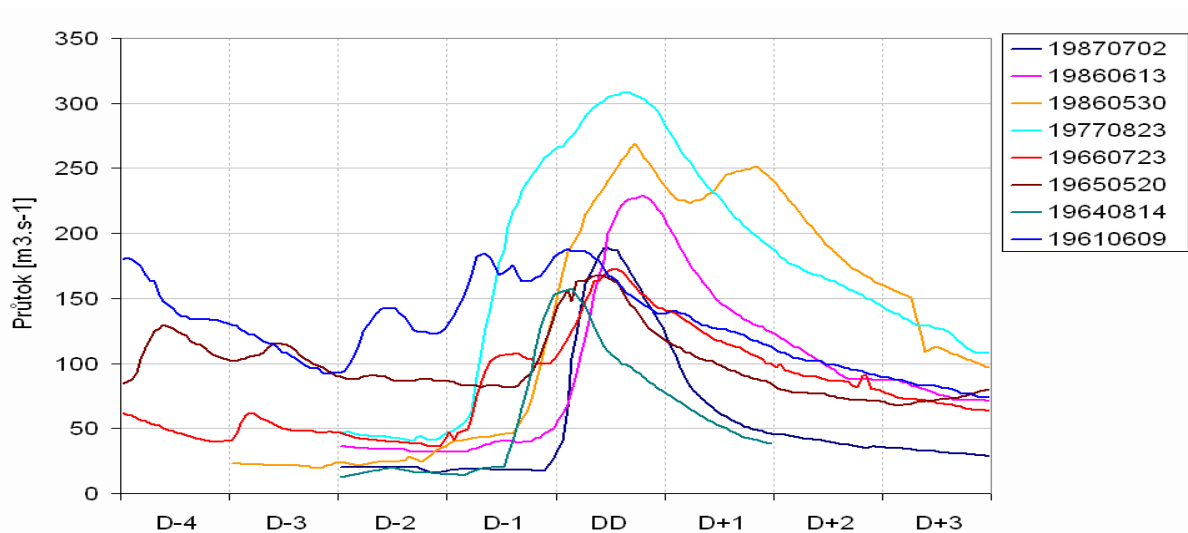
Tabulka 5.10 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“

Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhrn
		Kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[ $^{\circ}$ ]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
19870702	2.7.1987	188.8	60.2	53.7	24.1	Wc	70	1.3	30.6
19860613	13.6.1986	228.4	49	42.5	40.5	Bp	340	3.7	40.6
19860530	30.5.1986	269	73	30.1	60.2	B	310	2.7	56.1
19770823	23.8.1977	308	?	73.2	73.8	SWc3	360	2.8	59.6
19660723	23.7.1966	173	55.6	30	39.9	Ec	250	2.3	32.7
19650520	20.5.1965	167	93	21.6	41.3	SWc3	360	2.5	20.2
19640814	14.8.1964	157.8	55	27.8	20.5	C	360	2.3	73.9
19610609	9.6.1961	188	43.5	32.22	56.0	B	230	1.5	26.0



Obr. 5.30 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“





Obr. 5.31 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“

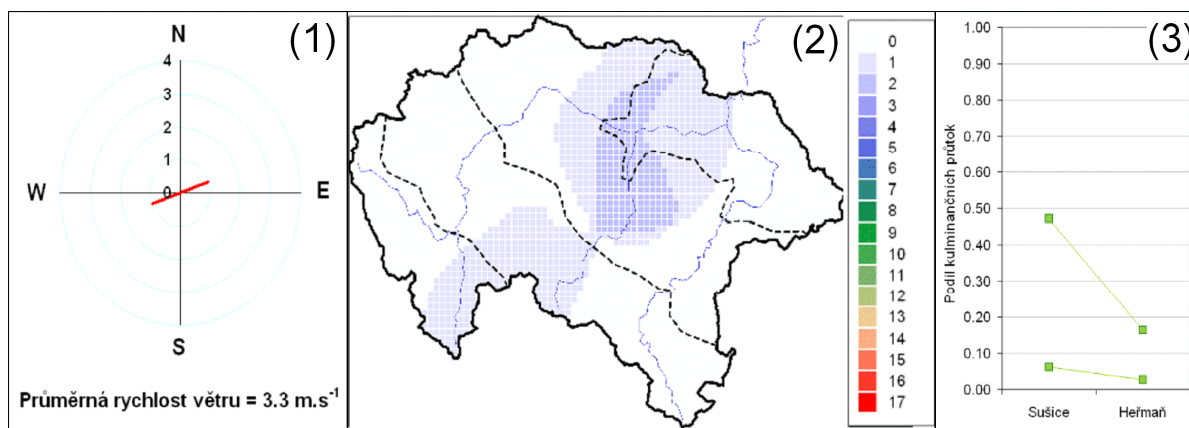
#### 5.6.9 Kategorie „Letní povodně z bouřkového přívalu“

Povodí Otavy je příliš velké na to, aby bylo citlivé na povodně vzniklé následkem lokálních přívalových srážek. Bouřkové mraky, které je vyvolávají, mají rozměr řádově v kilometrech, a proto způsobují povodně hlavně na povodích, jejichž plocha se počítá v desítkách maximálně stovkách kilometrů čtverečních. Přesto byly do této kategorie zařazeny dvě povodně, které překročily průtokovou kulminací v Písku průtok  $146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a u kterých lze z rozložení srážkového pole a průtokových vln usuzovat na přívalový charakter povodně. Vliv povětrnostních podmínek popsanych velkoprostorovou cirkulací vzduchu na vznik tohoto typu povodně není určující, a proto ani není možné ze zpracovávaných dat popsat typické meteorologické příčiny těchto povodní.

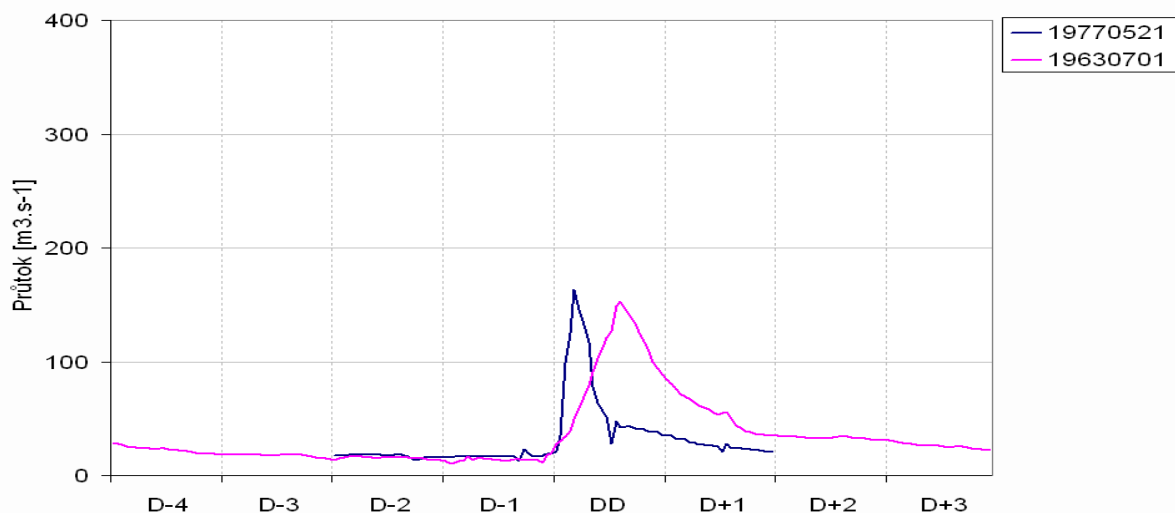
Bouřková jádra se v obou případech vyskytla hlavně v povodí Volyňky. Nejvyšší naměřené denní úhrny srážek přesáhly na některých stanicích 80, respektive 100 mm. U povodně 19770521 byla pozoruhodná rychlost vzestupů průtoků na Volyňce v Němčicích, kde průtok během dvou hodin dosáhl kulminace na úrovni mezi 10letou a 20letou vodou. Také v Písku vykazovaly obě povodně poměrně rychlý vzestup hladin, stejně tak i rychlý pokles a proto objemy povodňových vln jsou poměrně velmi malé.

Tabulka 5.11 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie letní povodně z bouřkového přívalu

Kód povodně	Datum kulminace	Písek	Sušice	Heřmaň	Objem povodňové vlny v D-3 až DD	Příčinný synoptický typ	Směr větru ve dnech D-2 až DD	Rychlost větru ve dnech D-2 až DD	Maximální dvoudenní úhrn
		kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]			[mil. $m^3$ ]		[ $^\circ$ ]	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	[mm]
19770521	21.5.1977	163	10.1	4.51	11.1	SEc	250	4.3	25.4
19630701	1.7.1963	153	72	21.2	16.1	Vfz	70	2.3	36.8



Obr. 5.32 (1) Četnost převládajícího směru větru na Churáňově ve dnech D-3 až DD, (2) prostorová četnost výskytu srážkového jádra, (3) poměr kulminačních průtoků ve stanicích Sušice - Písek a Heřmaň - Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně z bouřkového přívalu“



Obr. 5.33 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně z bouřkového přívalu“

## 6. Metoda předpovědního analogu

V provozní hydrologii se často vyskytují potřeby stanovit určité charakteristiky odtokového režimu na území, kde nejsou k dispozici napozorovaná data o odtoku. Ještě častěji se však praxe setkává s problémem určit v daném povodí charakteristiky hydrologického jevu v daném povodí na základě jevů předcházejících. U obou úloh lze, mimo přímé genetické způsoby výpočtu, dosáhnout i nepřímého řešení pomocí metody analogu.

Prakticky to v prvním případě znamená, že z množiny povodí, která jsou odtokově monitorována, se vybere povodí-analog, jehož fyzicko-geografické a klimatické poměry se co nejvíce přibližují přírodnímu prostředí daného nepozorovaného povodí. Cíl, tzn. rozměrově přizpůsobený přenos dat, se pak opírá o předpoklad, že odtokový režim na nepozorovaném povodí bude konformní s režimem probíhajícím na povodí-analogu. Ve druhé úloze se provádí rovněž výběr analogu, tj. v tomto případě však reprezentovaného nalezeným seskupením takových předcházejících podmínek, které lze označit nejen za příčinu vzniku následného jevu (např. povodně), ale o které zároveň platí i kauzální axiom, že stejné příčiny vyvolávají stejné následky. Druhý případ představuje v podstatě jeden z klasických přístupů pro předpovídání budoucích hydrologických jevů.

Zatímco aplikace metody analogu pro nepozorovaná povodí se v hydrologické praxi široce uplatnila, metoda analogu jako předpovědního nástroje pro srážko-odtokový vztah se příliš nerozvíjela. Příčinami při manuálním zpracování byly její pracnost, obtíže s pojetím komplikovaných interakcí mezi uvažovanými procesy, i poměrně malý počet vstupních případů pro výběr analogu, a to vše za cenu velmi hrubých výsledků. Dnes, kdy pokrok ve výpočetní technice umožňuje nové přístupy, zejména v časoprostorových analýzách zkoumaných jevů, se stává metoda předpovědního analogu znovu předmětem pozornosti. Její ambiciosnost, pokud jde o povodně, nespočívá ani tak v samostatné prognóze (kde má velkou konkurenci v podobě předpovědních modelů), jako spíš v možnostech jejího dalšího potenciálního využití pro:

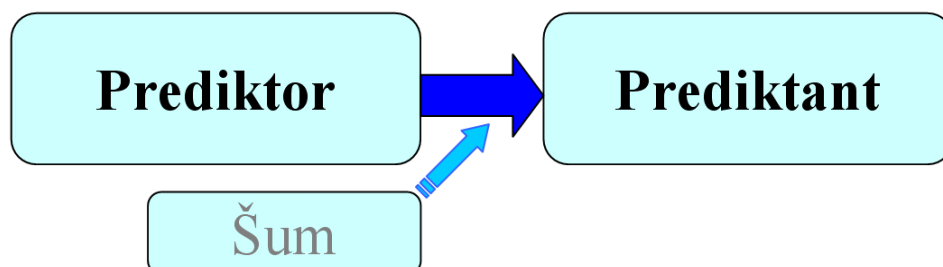
- poznávání specifického mechanismu, jímž se řídí vznik a vývoj povodňových situací v daném povodí,
- produkci výstupů, které mohou být užitečné pro regionalizaci území podle jeho zátěže povodňovým nebezpečím,
- nabývání poznatků, které mohou posloužit ke zdokonalování efektivnosti hydrologických modelů.

Metoda předpovědního analogu se z principu vždy musí opírat o dostatečně velký soubor historických událostí. Navržená databanka povodní na Otavě je proto vhodným podkladovým nástrojem pro její testování. Metoda předpovědního analogu byla v této práci testována z hlediska její možnosti odhadnout vývoj odtokové situace na základě naměřených nebo předpovězených úhrnů příčinných srážek, nasycenosti povodí a podle sezóny výskytu.

## 6.1 Metoda analogu jako předpovědní nástroj

Metodu předpovědního analogu je výhodné používat tam, kde je obtížné matematicky popsat procesy vedoucí k výskytu sledovaného jevu, a kde jsou známé a zjištěné příčiny toho jevu. Použití této metody je možné při platnosti dvou základních podmínek:

- 1) Kauzální vztah mezi příčinou (prediktorem) a následkem (prediktantem) musí zahrnovat většinu těch procesů, které vyvolávají následek. Ostatní vlivy, které nejsou uvažovány, tzv. šum, jsou malé (viz obr. 6.1).
- 2) Existuje dostatečný počet popsanych případů, u kterých jsou známé vlastnosti prediktorů a predikantů.



Obr. 6.1 Použité termíny při aplikaci metody předpovědního analogu

Princip aplikace metody jako předpovědního nástroje spočívá v nalezení analogické situace z hlediska příčin a předpokládá se, že stejné budou i následky. Je zřejmé, že u přírodních procesů, které jsou velmi složité a komplexní, není možné najít absolutně identický analog, a proto se hledá analog nikoliv na základě shody, ale podobnosti. Kvantifikace podobnosti mezi prediktory a stanovení jejich limit je hlavním předmětem různých metodických přístupů a diskuzí pro aplikaci této metody.

Z uvedeného vyplývá, že metoda předpovědního analogu se uplatňuje především v těch případech, kdy nelze přírodní procesy uspokojivě modelovat anebo kdy nejistota

výstupů ze současných modelů je příliš velká. U hydrologických srážko-odtokových modelů analýzy úspěšnosti předpovědí prokázaly, že na celkové nejistotě hydrologické předpovědi se větší měrou podílejí kvantitativní předpovědi srážek z numerických meteorologických modelů než samotné srážko-odtokové modelování [Daňhelka, 2005]. Úspěšnost hydrologických předpovědí u povodňových epizod má ale k dokonalosti stále daleko, a to i při nahrazení předpovídaných srážek naměřenými, kdy se hodnotí pouze schopnost hydrologického modelu povodeň simulovat.

Přestože není obvyklé, aby byla metoda předpovědního analogu aplikovaná namísto srážko-odtokových vztahů, je možné uvést několik důvodů, proč i v dnešní době představuje tento přístup potenciální možnost pro využití v hydrologické prognóze:

- S prodlužující se dobou, kdy dochází k systematickému měření srážek a vodních stavů se zvětšuje i soubor popsanych povodní a zvyšuje se tedy šance pro nalezení vhodného předpovědního analogu.
- Nalezením většího počtu předpovědních analogů je možné předpověď rozšířit o pravděpodobnostní rozměr – vytvářet tzv. předpovědní ansámby, [Daňhelka, 2005].
- Digitalizace a ukládání dat do elektronických databází usnadňuje shromáždění historických údajů a výpočetní technika také dovoluje velmi rychlé vyhledání předpovědního analogu i v rozsáhlém souboru za použití matematicky komplikovanějších vyhledávacích algoritmů.
- Rozvoj GIS umožňuje zakomponovat prostorovou i časovou informaci o rozložení sledovaných prvků.
- Předpovědi na základě porovnání analogických povodní jsou pro hydrologa prognostika „průhlednější“ než „skrytý“ výpočet modelem a umožňuje větší zapojení hydrologa a lepší zpětnou kontrolu výstupů.
- Studie zabývající se povodňovým mechanismem konkrétních povodí prokázaly, (např. Buchtele [1972], Loukas [2000]), že vliv přírodních podmínek každého povodí na odtokový režim zapříčiňuje, že povodně jsou způsobovány omezeným souborem příčin, které se opakují.

Ačkoliv je zřejmé, že metoda analogu není rovnocenným předpovědním nástrojem k fyzikálním modelům, může být jejich vhodným doplněním a může přispět k odhalení chybných modelových výstupů, které za běžných okolností jsou obtížně identifikovatelné.

Náročnost aplikace metody analogu spočívá především v nutnosti shromáždění a zpracování velkého množství dat a v úpravě ukazatelů příčin (prediktorů) do formy, která umožňuje jejich matematické zpracování, což v případě vícerozměrných veličin

(prostorová data měnící se v čase – např. tlakové pole, úhrnů srážek atd.) je komplikované. Pokud se použije více různých prediktorů, pak se algoritmus výběru analogu musí optimalizovat, protože obvykle není známé numerické vyjádření funkční závislosti mezi prediktory a predikanty.

Metoda předpovědního analogu pro odhad vývoje odtokové situace byla v této práci navržena tak, aby všechny vstupy byly snadno dostupné bez využití výstupů z jiných srážko-odtokových modelů a aby nástroje použité pro kalibraci metody a výběr předpovědního analogu byly aplikovatelné v provozu hydrologického předpovědního pracoviště.

## 6.2 Použitá data

K tomu, aby bylo možné využít co nejdélejší záznam o hydrologických a meteorologických procesech, bylo nutné volit data s denním krokem, u nichž délka disponibilních řad je nepoměrně větší než u hodinových dat. Použití dat s denním krokem však neumožňuje analyzovat mezi příčinami povodní ty procesy, jejichž délka trvání je kratší. Je to především intenzita srážek a jejich podrobnější časoprostorová distribuce. Vlivy těchto faktorů na vznik povodní jsou nepochybně významné, přesto však existují okolnosti, proč absence tak důležitých informací nemusí být závažnou překážkou pro vyhledání povodní s dostatečně podobnými příčinami. V našem případě byly až na dvě výjimky (19700521, 19630701) všechny uvažované povodně na Otavě v Písku s průtokovou kulminací nad  $146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  způsobené plošně rozsáhlými srážkami, u nichž většinou intenzita nedosahuje extrémních hodnot jako při lokálních bouřkových přívalech. Navíc zahrnutí vlivu sezóny do procesu výběru povodňových analogů omezuje možné rozdíly v intenzitách deště, protože vysokých intenzit je dosahováno především v letních měsících, kdy je vyšší podíl konvektivních srážek. Pohyb srážek při povodních podléhá také určitému mechanismu, jak bylo prokázáno v kapitole 5.5. Jeho indikátorem může být rozložení srážek, které je v povodí Otavy silně podmíněno směrem a rychlostí proudění vzduchu. Lze tedy předpokládat, že povodňovým situacím s podobným rozložením průměrných denních úhrnů srážek předcházelo podobné proudění vzduchu, a tedy i pohyb srážek.

Jediným údajem pocházejícím z hodinových záznamů byly povodňové kulminace Otavy v Písku, které byly použity pro kalibraci navržené metody pro vyhledávání analogů. Testování této metody bylo provedeno pouze na povodí Otavy po Písek, se kterým se pracovalo jako s black-box modelem, tedy bez analýzy distribuce odtoku uvnitř povodí.

Metoda byla navržena jedině pro odhad vývoje odtoku způsobeného dešťovými srážkami, padajícími do povodí za stavu, kdy vliv sněhové pokrývky není významný. V případě Otavy to není tak zásadní omezení, protože jak prokázaly předchozí analýzy

povodňového mechanismu, tak u většiny povodní na Otavě v Písku byl vliv tání sněhu zanedbatelný nebo žádný. Omezení jen na dešťové povodně zmenšuje soubor možných prediktorů a usnadňuje návrh vyhledávacího algoritmu. K tomu bylo však nutné v historických řadách vyřadit ty dny, které podmínku žádného nebo malého vlivu sněhu nesplňovaly. Z tohoto důvodu nebyly do procesu kalibrace ani testování metody zahrnuty některé povodně z Katalogu povodňových případů s výrazným vlivem tání sněhu na jejich vznik.

Kritériem pro identifikaci dní, kdy srážky vypadávaly ve formě sněhu, byla zvolena průměrná denní teplota vzduchu na Churáňově, který reprezentuje svojí nadmořskou výškou (1118 m n.m.) nejvyšší partii povodí. Dny, ve kterých tato teplota byla nižší než 0°C, nebyly do testování metody zahrnuty. Toto kritérium sice umožňuje, že částečně mohlo jít o srážky sněhové, ale tyto v naprosté většině padaly spíše ve formě deště. Takto jednoduchý ukazatel byl použit s ohledem na případné operativní použití metody, kde není možné počítat například s údaji o novém sněhu z dobrovolnických stanic sítě ČHMÚ, které by byly jistě vhodnějším indikátorem výskytu sněžení. Dále byly vyřazeny dny, kdy v povodí leželo větší množství sněhu. Přesahovala-li průměrná výšky vodní hodnoty sněhu na celé povodí Otavy 5 mm, nebyl tento den uvažován pro testování metody. Denní údaje o vodní hodnotě sněhu byly převzaty z výstupů z modelu SNOW – 17 [Anderson, 1973].

Pro porovnání příčin povodní byly zpracovány čtyři typy dat:

- Datum dne, pro který je připravována předpověď.
- Denní úhrny srážek ze srážkoměrné sítě ČHMÚ v povodí Otavy a v jeho nejbližším okolí.
- Denní průměrné teploty na meteorologické stanici Churáňov.
- Průměrné denní průtoky ve vodoměrné stanici Písek.

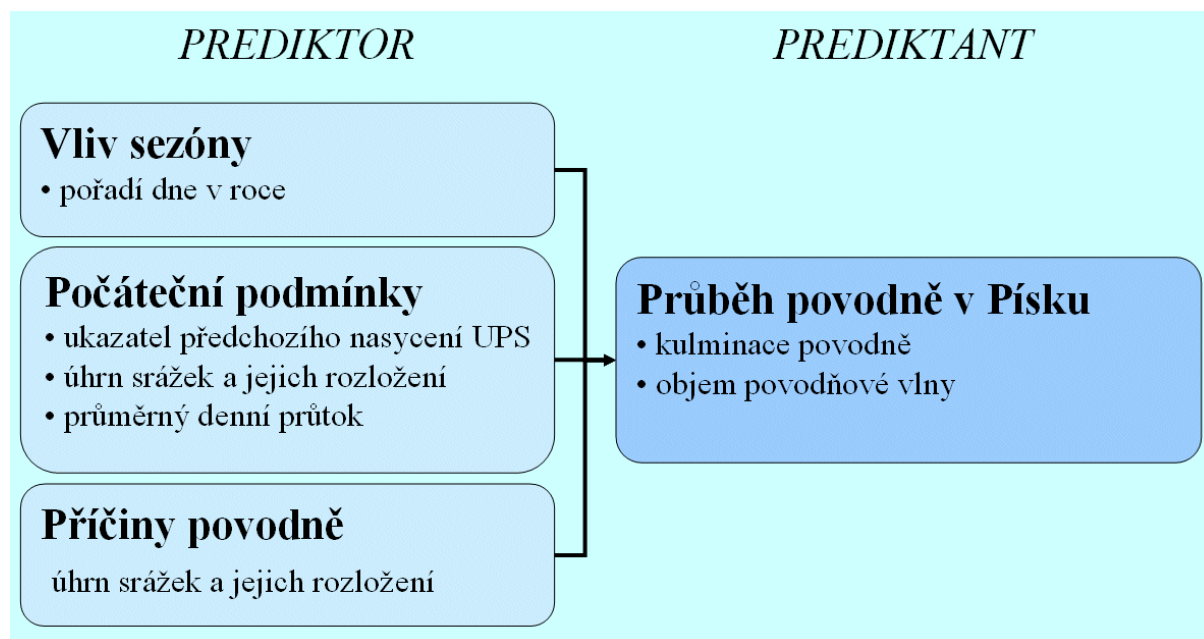
Rozsah datových řad zahrnutých do testování metody byl omezen 1. lednem 1961, od kterého jsou v klimatické databázi uloženy denní úhrny srážek ze všech stanic ČHMÚ a 31. prosincem 2006. Aby bylo možné zahrnout také velké povodně z let 1890 – 1961, byly pro tyto účely digitalizovány v dostatečném rozsahu záznamy denních úhrnů srážek ze starých srážkoměrných ročenek v době výskytu těchto povodní.

### 6.3 Úprava vstupních dat

Datové řady v neupravené formě v sobě nesou všechny dostupné informace o příčinách povodní. Proto by teoreticky nebylo nutné tato vstupní data dále zpracovávat a hledala by se podobnost přímo mezi nimi. Algoritmus pro nalezení podobných situací by však při množství a variabilitě těchto dat musel být velmi komplikovaný a na jeho kalibraci

(trénování) by bylo potřeba mnohem více povodňových případů. Proto byla vstupní data zpracována do souhrnných charakteristik, které zároveň popisující tři základní stavy ovlivňující vznik povodně (obr. 6.2.) :

- (1) Vliv sezóny.
- (2) Počáteční podmínky (stav nasycenosti) povodí.
- (3) Příčinné podmínky povodní.



Obr. 6.2 Základní schéma použitých prediktorů a prediktantů

Při vyhledávání povodňového analogu se porovnávají podobnosti prediktorů, jejichž výskyt může mít různý časový předstih před výskytem prediktantu, v našem případě průtokové kulminace povodně. V povodí Otavy se příčinné srážky mohou vyskytovat tři nebo také jeden den před kulminací. Z těchto důvodů bylo potřeba použít jiné indexované označení dnů než jako u analyzování příčin povodní, kde je klíčovým dnem den kulminace (DD).

Zde je rozhodující den, pro který je vyhledáván předpovědní analog – tedy předpovědní den. Vybraná zkratka pro tento den je PD a analogicky jako u DD jsou PD-1, PD-2 atd. dny před předpovědním dnem PD a PD+1, DP+2 atd. dny po něm. U předpovědních analogů pro povodňové situace v povodí Otavy bude předpovědní den PD většinou 1 až 3 dny před dnem kulminace DD.



### 6.3.1 Definování vlivu sezón

Působení sezóny je vyjádřeno pořadím dne PD v roce. Cílem zařazení tohoto ukazatele je podchytit především vliv evapotranspirace a vegetačního pokryvu. Je zřejmé, že v době mimo vegetační sezónu bude ke vzniku povodňového průtoku stačit menší množství srážek a také hodnota indexu nasycenosti UPS, který nezohledňuje změnu evapotranspirace, bude v jiném kontextu s reálnou nasyceností než ve vegetační sezóně.

### 6.3.2 Definování počátečních podmínek

Počáteční podmínky stavu nasycenosti povodí byly zpracovány do několika různých ukazatelů, založených na bilancování srážek spadlých na povodí a dále na velikosti průtoku Otavy v Písku. Pro vyjádření nasycenosti pomocí spadlých srážek byl použit ukazatel předchozích srážek (*UPS*). Protože index *UPS* počítaný pouze z údajů ze srážek nezohledňuje vliv akumulace a tání sněhu, byly vstupy denních úhrnů srážek (viz rovnice 4.1) nahrazeny součtem úhrnu pouze kapalných srážek a výšky vody z tání sněhu. Z období mezi 1961 a 2006 byly obě hodnoty získány pomocí sněhového modelu SNOW – 17 [Anderson, 1973], u povodní před rokem 1961, které se všechny vyskytly v měsících květen až říjen, se předpokládá, že akumulace ani tání sněhu neprobíhaly. Průměrná hodnota indexu *UPS* na povodí Otavy byla vypočtena pro všechny dny mezi daty 1.1. 1961 – 31.12.2006 a pro nejbližší dny kolem velkých povodní mezi lety 1890 – 1961. K testování metody analogu byly použity hodnoty *UPS* pro dny PD a PD-2.

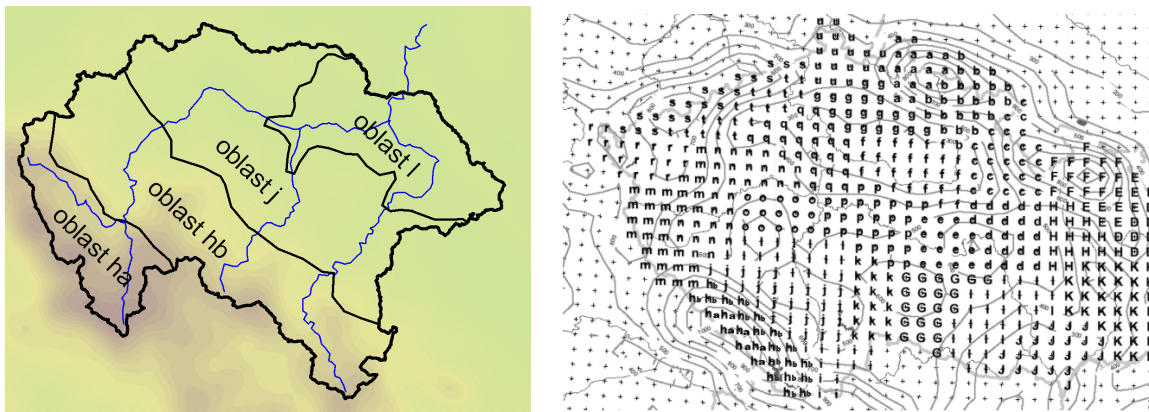
Průtok Otavy v Písku jako ukazatel nasycenosti povodí nebyl nijak upravován, pouze se použil denní průměr, který je dostupný z databáze ČHMÚ. Tento prediktor byl vztažen ke dnům PD a PD-2.

Mezi ukazatele nasycenosti byly také zahrnuty průměrné dvoudenní úhrny srážek na povodí Otavy stanovené pro jednotlivé zóny, (viz kapitola 6.3.3) ve dnech PD-2 a PD-1. Vyčlenění těchto srážek mimo index *UPS* je zdůvodněno tím, že tyto srážky se podílejí nejen na nasycenosti povodí, ale také na odtoku v předpovídaných dnech, a proto je třeba zvýšit jejich váhu zařazením mezi ostatní přímé příčiny povodně.

### 6.3.3 Definování příčinných podmínek

Základním ukazatelem příčin povodní byly průměrné denní úhrny srážek na ploše povodí Otavy. Pro účely podchycení vlivu rozložení srážek na vznik povodně bylo povodí rozděleno celkem na čtyři zóny, pro které se také vypočetly průměrné úhrny srážek. Zvolené zóny respektují základní morfologické členění povodí a navíc jejich rozložení

koresponduje s oblastmi, pro které jsou v současné době rutinně vydávány kvantitativní předpovědi srážek numerickým meteorologickým modelem ALADIN, který provozuje ČHMÚ (obr. 6.3).



Obr 6.3 Oblasti povodí Otavy, pro které jsou vydávány kvantitativní předpovědi srážek modelem ALADIN ČHMÚ. Oblast h je rozdělena na podoblasti ha a hb, kde jsou srážky upravovány s přihlédnutím k orografii.

Prediktor příčinných srážek byl vyjádřen jako dvoudenní průměrný úhrn ve dnech PD až PD+1 nebo třídní úhrn PD až PD +2. V obou variantách byly vypočteny průměrné veličiny jak pro povodí Otavy po Písek, tak i pro čtyři vyčleněné zóny.

#### Vliv sezóny

- pořadí dne v roce od 1.1 (1) do 31.12. (365)

#### Počáteční podmínky

- průměrná hodnota UPS počítaná z kapalných srážek a tání sněhu na povodí Otavy v den PD
- průměrná hodnota UPS počítaná z kapalných srážek a tání sněhu na povodí Otavy v den PD-2
- průměrný dvoudenní úhrn srážek na povodí Otavy ve dnech PD-2 a PD-1
- průměrný dvoudenní úhrn srážek v zónách ha, hb, j a l ve dnech PD-2 a PD-1
- denní průměrný průtok Otavy v Písku v den PD
- denní průměrný průtok Otavy v Písku v den PD-2

#### Příčiny povodně

- průměrný dvoudenní úhrn srážek na povodí Otavy ve dnech PD a PD+1
- průměrný dvoudenní úhrn srážek v zónách ha, hb, j a l ve dnech PD-2 a PD+1
- průměrný třídní úhrn srážek na povodí Otavy ve dnech PD až PD+2
- průměrný třídní úhrn srážek v zónách ha, hb, j a l ve dnech PD až PD+2

Obr. 6.4 Přehled všech prediktorů použitých pro testování metody analogu

## 6.4 Algoritmus pro vyhledávání povodňových analogů

Cílem metody předpovědního analogu je najít v historických řadách záznam, který má dostatečně podobné charakteristiky jako nastávající situace, pro kterou je analog hledán. Pro prediktant v cílovém čase  $t$  (v našem případě je to předpovědní den PD) je tedy vyhledán v historických datech prediktant v čase  $u$ , pro který platí že prediktor  $F(u)$  se dostatečně podobá prediktoru  $F(t)$ . Numericky vyjádřeno je vyhledávání analogu založeno na minimalizace rozdílu :

$$\text{Min } ||F(u) - F(t)|| \quad 6.1$$

prohledáváním historických záznamů [Cubash, 1996]. Rovnici v této jednoduché podobě není však možné aplikovat tam, kde je použito více prediktorů popisujících různé nezávislé veličiny. Proto byl pro výběr analogu v našem případě použit postup, při kterém se porovnávají jednotlivé prediktory  $p$  (pořadí dne v roce, UPS v den PD atd.) samostatně podle vztahu

$$P_p = [F_p(u) - F_p(t)] \quad 6.2$$

kde  $P_p$  vyjadřuje míru podobnosti hodnot u prediktoru  $p$  v čase  $t$  a  $u$ . Pokud by všechny použité prediktory  $P_p$  byly v kauzálním vztahu rovnocenné, hledal by se předpovědní analog pomocí vztahu 6.1. minimalizací součtu míry podobnosti  $P_p$  u všech prediktorů. V našem případě je však zřejmé, že vliv jednotlivých prediktorů na vznik povodně je různý (například množství srážek vyvolá povodeň spíše než pořadí dne v roce). Proto bylo nutné míru vlivu jednotlivých prediktorů vymežit zavedením váhových koeficientů.

Míru vlivu prediktoru  $P_p$  na prediktant určuje velikost koeficientu  $c_p$ , jehož hodnota byla předmětem kalibrace metody. Výsledný algoritmus použitý pro vyhledávání analogu porovnává součet vážených podobnosti jednotlivých prediktorů, který je v této práci nazýván jako index podobnosti prediktorů  $I_{po}$

$$I_{po} = \sum_p c_p * P_p \quad 6.3$$

Agregace vlivů jednotlivých prediktorů do jedné hodnoty ( $I_{po}$ ) umožňuje mimo jiné ohodnotit nalezené analogy podle míry podobnosti jejich prediktorů a tím odhadnout pravděpodobnost, s jakou nalezený předpovědní analog se bude blížit skutečné odtokové odezvě. Tímto postupem získává předpověď svou pravděpodobnostní hodnotu.

### 6.4.1 Podobnosti u jednotlivých prediktorů

Pro zpřehlednění procesu kalibrace bylo kvantitativní vyjádření podobnosti u jednotlivých prediktorů matematicky standartizováno do podoby indexů, které se pohybují v intervalu  $\{0,1\}$ , a kde 0 znamená nejmenší podobnost a 1 úplnou shodu. Celkem bylo

pro testování metody použito 11 prediktorů, z nichž některé jsou stejné veličiny používané v jiném časovém vztahu k předpovědnímu dni PD. Výsledně bylo třeba numericky vyjádřit podobnosti u:

- pořadí dne v roce,
- úhrnu srážek,
- UPS,
- rozložení srážek.

Pro ukazatel vlivu sezóny v roce bylo použito jednoduché kritérium

$$P_{sezona} = 1 - \frac{[P_{sezona}(u) - P_{sezona}(t)]}{183} \quad 6.4$$

kde 183 je maximální možná odlehlost pořadí dnů v roce (366 dní / 2).

Podobnost úhrnů srážek, indexů UPS a denních průměrných průtoků byla standardizována podle vzorce:

$$P_P = 1 - ABS \left[ \frac{P_p(u) - P_p(t)}{P_p(u) + P_p(t)} \right] \quad 6.5$$

kde *ABS* znamená absolutní hodnota a prediktor *p* úhrn srážek (*SRA*), ukazatel předchozích srážek (*UPS*) nebo průměrný průtok (*Qd*).

Jiným postupem byla kvantifikována podobnost rozložení srážek. V tomto případě byly informace o prostorové distribuci srážek redukovány na čtyři hodnoty, které vyjadřují průměrné úhrny srážek v zónách *ha*, *hb*, *j* a *l* (obr 6.3). Jako nejvhodnější způsoby vyjádření podobnosti se ukázalo porovnání relativních objemů srážek v jednotlivých zónách podle vzorce:

$$P_{RSRA} = 1 - \sum_{x=Ha}^{x=L} ABS \left[ \frac{V_x(u) - V_x(t)}{V(u) - V(t)} \right] \quad 6.6$$

kde  $V_x$  je objem (nikoliv průměrný úhrn) srážek spadlých na zónu *x* (*ha*, *hb*, *j* a *l*), *V* je objem srážek spadlých na celé povodí. Hodnota ukazatele  $P_{RSRA}$  dosahuje stejně jako u ostatních prediktorů hodnot od 0 do 1 se stejným rozložením míry podobnosti.

## 6.5 Kalibrace metody vyhledávání předpovědního analogu

Z principů metody předpovědního analogu vyplývá, že při vzrůstající podobnosti příčin by se měly více podobat i následky jimi vyvolané. Ve skutečnosti vzájemná závislost mezi podobnostmi příčin a následků je zatížena řadou nejistot. Cílem kalibrace navržené metody proto bylo identifikovat co největší možnou míru závislosti mezi podobnostmi

příčinných podmínek povodní (vyjádřených pomocí indexu podobnosti prediktorů  $I_{po}$ ) a podobností prediktantů. Kalibrace spočívala ve zjištění optimálních koeficientů  $c_p$ , které po dosazení do rovnice 6.3 dávají pro uvedené účely nejvhodnější způsob výpočtu indexu  $I_{po}$ .

Podobnost nalezených analogických povodní byla hodnocena na straně prediktantů (následků) podle podobnosti kulminačních průtoků a objemů průtokové vlny. Kulminační průtok byl u hledaných historických analogů zjišťován jako maximální průtok, který se vyskytl v intervalu dnů PD až PD+3. Objem povodňové vlny byl zjednodušeně stanoven jako čtyřdenní objem vody, která protékla Pískem v průběhu dnů PD až PD+3. Podobnost kulminací i objemu povodní byla numericky vyjádřena podle rovnice 6.5. Protože hodinové záznamy nutné pro určení maximálního průtoky byly v rámci disertační práce k dispozici pouze u povodní uvedených v Katalogu povodňových případů, byla metoda pro předpověď kulminačních průtoků kalibrována pouze na základě vzájemného porovnávání těchto povodní. U objemů vln, které jsou stanovené z denních průměrných průtoků, byly do kalibrace zahrnuty všechny dny v období 1961-2006.

Pro kalibraci i testování metody byly použity pouze ty povodně z Katalogu, u kterých se nepodílelo na tvorbě odtoku výraznější měrou tání sněhu. Celkový počet 72 povodní byl tak zredukován na 56 případů, které jsou pro lepší názornost nazývány testovacími povodněmi.

Při zjišťování optimálních hodnot koeficientu  $c_p$  se postupovalo ve dvou krocích.

- (1) Ke každé z 56 testovacích povodní bylo na základě i velmi malé podobnosti prediktorů nalezeno v uvažovaném referenčním období 1961-2006 větší množství historických analogů. Tento výběr byl z praktických důvodů omezen zavedením podmínky, že míry podobnosti  $P_p$  u všech prediktorů  $p$  musely být vyšší než 0,3). Vznikl tak soubor 29 536 „párů“ povodní, u kterých byly známy hodnoty podobností  $P_p$  k jednotlivým prediktorům stejně jako podobnosti následků, tedy maximálních průtoků v následujících 4 dnech a objemů povodňových vln.
- (2) Na základě tohoto souboru analogů byly pro každý jeho člen pomocí rovnice 6.3 vypočteny různé varianty indexu  $I_{po}$ , kde za koeficienty  $c_p$  byly postupně dosazovány hodnoty od nuly do jedné. Programovým cyklem byla pak vybrána ta kombinace koeficientů  $c_p$ , která v souboru vybraných povodňových analogů dávala největší korelační koeficient  $R^2$  mezi hodnotou indexu  $I_{po}$  a kvantifikovanou podobností prediktantů.

Protože krok (2) byl proveden zvlášť pro predikci objemu povodně a kulminačního průtoky, byly výsledkem kalibrace dvě různé rovnice výpočtu indexu podobnosti  $I_{po}$ . Pro předpověď kuminačního průtoky:

$$I_{po\_kulminace} = 0,2 * P_{sezona}(PD) + 0,2 * P_{UPS}(PD) + 0,1 * P_Q(PD) + \\ 0,1 * P_{SRA}(PD-2-PD-1) + 0,9 * P_{SRA}(PD-PD+1) + 0,1 * P_{RSRA}(PD-PD+1) + \\ 1 * P_{SRA}(PD-PD+2) + 0,1 * P_{RSRA}(PD-PD+2) \quad 6.7$$

Pro předpověď objemu odtoku:

$$I_{po\_objem} = 0,1 * P_{sezona}(PD) + 0,3 * P_{UPS}(PD) + 0,3 * P_Q(PD-2) + 1 * P_Q(PD) + \\ 0,4 * P_{SRA}(PD-PD+1) + 0,2 * P_{RSRA}(PD-PD+1) + 0,6 * P_{SRA}(PD-PD+2) + \\ 0,2 * P_{RSRA}(PD-PD+2) \quad 6.8$$

kde zkratky míry podobnosti  $P_p$  jednotlivých prediktorů  $p$  znamenají:

- $P_{sezona}(PD)$  . . . . . míra podobnosti pořadí dnů PD v roce,
- $P_{UPS}(PD)$  . . . . . míra podobnosti indexů UPS na povodí Otavy v den PD,
- $P_Q(PD)$  . . . . . míra podobnosti denních průměrných průtoků Otavy v Písku v den PD,
- $P_Q(PD-2)$  . . . . . míra podobnosti denních průměrných průtoků Otavy v Písku v den PD-2,
- $P_{SRA}(PD-2 - PD-1)$  . . . . . míra podobnosti dvoudenních úhrnů srážek na povodí Otavy ve dnech PD-2 až PD-1,
- $P_{SRA}(PD - PD+1)$  . . . . . míra podobnosti dvoudenních úhrnů srážek na povodí Otavy ve dnech PD až PD+1,
- $P_{RSRA}(PD - PD+1)$  . . . . . míra podobnosti rozložení dvoudenních úhrnů srážek v zónách *ha, hb, j a l* ve dnech PD až PD+1,
- $P_{SRA}(PD - PD+2)$  . . . . . míra podobnosti třídních úhrnů srážek na povodí Otavy ve dnech PD až PD+2,
- $P_{RSRA}(PD - PD+2)$  . . . . . míra podobnosti rozložení třídních úhrnů srážek v zónách *ha, hb, j a l* ve dnech PD až PD+2,

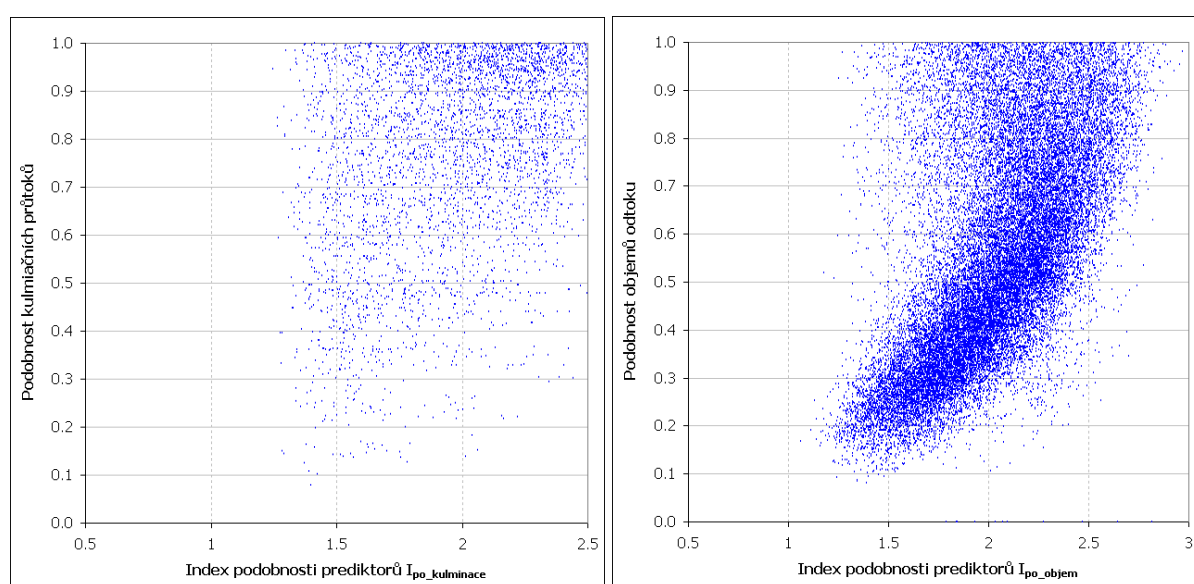
a hodnoty **0,1 – 1**, který mi jsou násobeny míry podobnosti  $P_p$ , jsou optimalizované koeficienty  $c_p$ .

U prediktorů: index UPS na povodí Otavy v den PD-2 a rozložení dvoudenních srážek v zónách *ha, hb, j a l* ve dnech PD-2 až PD-1, byl u obou rovnic vypočítán optimální koeficient  $c_p$  rovný nule, což znamená, že tyto veličiny při uvažovaném přístupu nemají signifikantní vliv na podobnost prediktantů u nalezených předpovědních analogů, a proto nebyly pro výběr historického předpovědního analogu použity.

Hodnoty koeficientů  $c_p$  v rovnicích 6.7 a 6.8 určují mimo jiné váhu, tzn. velikost vlivu podobnosti jednotlivých prediktorů na podobnost hledaných prediktantů. U předpovědi

kulminačního průtoku mají nejvyšší váhy míry podobnosti dvoudenních a třídních úhrnů srážek. Vliv ostatních prediktorů je výrazně nižší. U předpovědi objemů má nejvyšší váhu podobnost průměrného denního průtoku Otavy v Písku, o něco nižší pak podobnosti dvou a třídních srážkových úhrnů.

Výsledný vztah mezi velikostí indexu  $I_{po}$  vypočítaného podle rovnic 6.7 a 6.8 a mírou podobnosti kulminačních průtoků, respektive objemů povodní je zobrazen na obrázku 6.5. Optimalizační koeficientů  $c_p$  bylo u těchto závislostí dosaženo u předpovědi kulminačních průtoků maximálního korelačního koeficientu  $R^2 = 0,39$  a u předpovědi objemů povodní  $R^2 = 0,61$ .



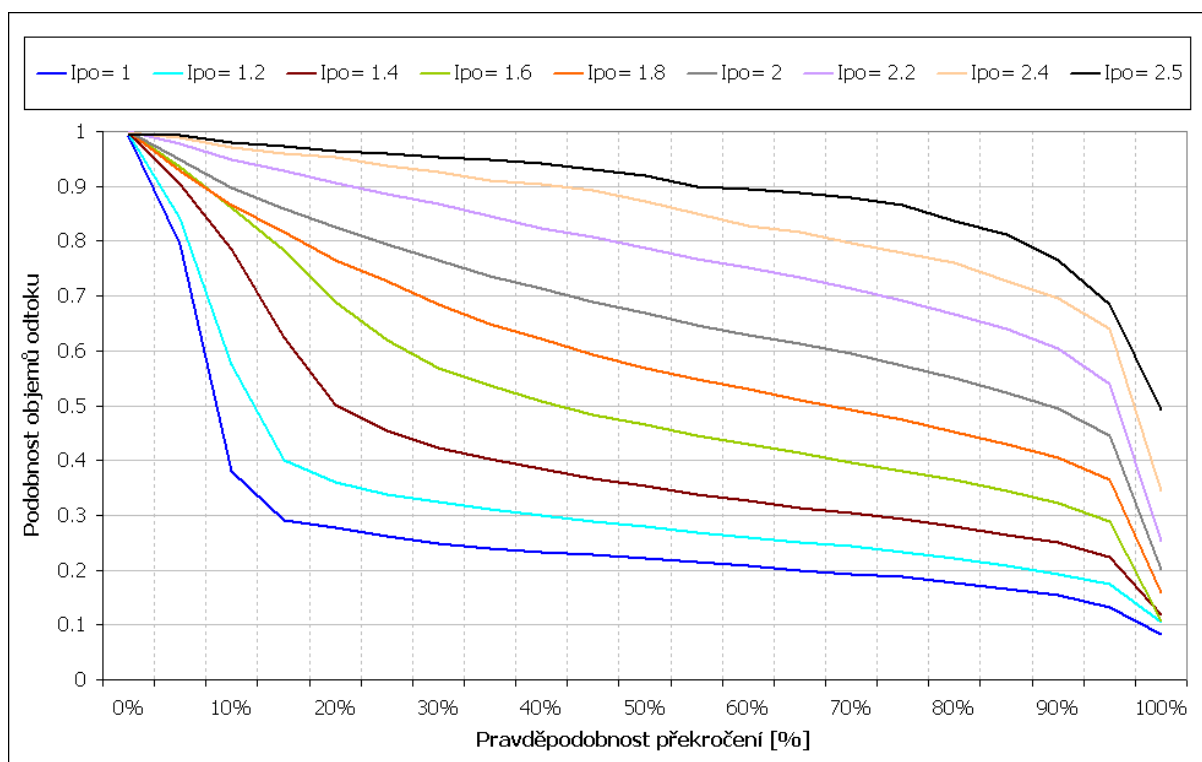
*Obr. 6.5 Závislost mezi indexem podobnosti prediktorů  $I_{po}$  a podobností předpovídaných charakteristik odtoku – kulminačního průtoku a objemu odtoku.*

Rozptyl hodnot zobrazených na obrázku 6.5 definuje kromě funkčnosti vztahu také pravděpodobnostní hladiny, které určují s jakou pravděpodobností bude při určité hodnotě indexu  $I_{po}$  překročena míra podobnosti prediktantů. Tato informace přidává předpovědím pravděpodobnostní rozměr.

Vyhodnocení pravděpodobnostního rozměru předpovědí bylo provedeno pouze pro předpovědi objemů odtoku. Testování metody pro odhad kulminačního průtoku bylo omezeno pouze na vyhledávání předpovědního analogu mezi testovanými povodněmi (56 případů) navzájem. Jelikož většina těchto povodní vykazovala kulminaci mezi  $146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  až  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , byly by si vybrané povodně vzájemně podobné i při náhodném výběru předpovědního analogu. Průměrné míry podobnosti kulminačního průtoku by při zahrnutí odtokových situací, které svým maximálním průtokem nepřekročily hranici 1leté

vody, byly ve skutečnosti menší a měly jiný rozptyl.

Pro zvolené intervaly hodnot indexu  $I_{po}$  byly vypočteny histogramy četností výskytu povodňových analogů s určitou velikostí míry podobnosti objemů odtoku. Z těchto histogramů byly zkonstruovány čáry překročení, které určují, s jakou pravděpodobností se bude při určité hodnotě indexu  $I_{po}$  objem odtoku nalezené historické povodňové události podobat reálné situaci. Například je-li k daným charakteristikám příčin nalezena v historických řadách situace, u které při porovnání příčin je vypočtena velikost indexu podobnosti  $I_{po} = 2,2$ , pak z čar překročení zobrazených na obrázku 6.6 vyplývá, že s 50 procentní pravděpodobností bude míra podobnosti objemů větší 0,8 (při předpovědi objemu odtoku například 400 mil. m<sup>3</sup> to znamená, že reálný objem se bude podle rovnice 6.5 nacházet v intervalu 267 – 600 mil. m<sup>3</sup>).

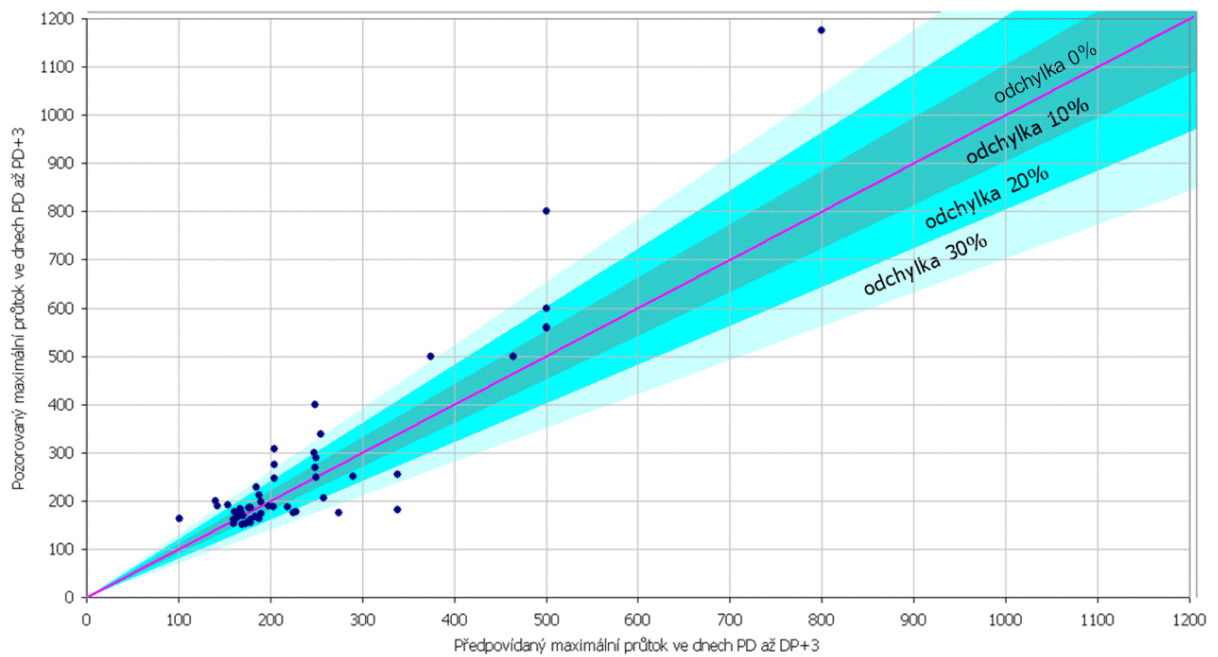


Obr. 6.6 Čáry překročení podobností objemů odtoku k nalezeným analogickým povodním při různých hodnotách indexu podobnosti objemů odtoku

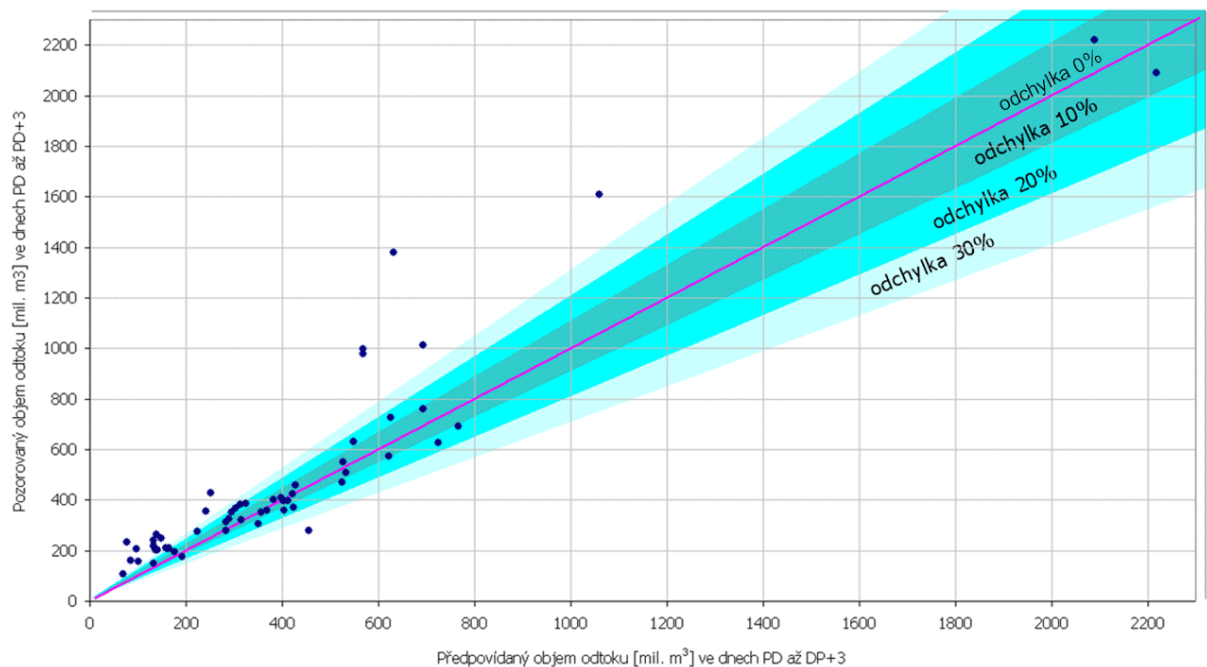
Při již známém algoritmu výpočtu indexu  $I_{po}$  bylo možné vyhodnotit úspěšnost navržené metody na základě porovnání nejvhodnějších předpovědí k 56 testovaným povodním. Nejvhodnější předpovědní analog ke každé testovací povodni byl v historických řadách vybrán na základě nalezení dne s nejvyšší hodnotou indexu  $I_{po}$ . Z výběru byly pochopitelně vyřazeny dny v bezprostřední blízkosti testovací povodně. Graficky pak byly porovnány předpovídaný kulminační průtok a objem odtoku se skutečnými. Tyto výsledky



jsou zobrazeny na obrázcích 6.7 a 6.8.



*Obr. 6.7 Porovnání předpovídaných a pozorovaných maximálních průtoků u 56 povodní Otavy v Písku, jejichž charakteristiky byly použity pro testování metody předpovědního analogu*



*Obr. 6.8 Porovnání předpovídaných a pozorovaných objemů odtoku u 56 povodní Otavy v Písku jejichž charakteristiky byly použity pro testování metody předpovědního analogu*

## 6.6 Výsledky navržené předpovědní metody

Navržená metoda předpovědního analogu je založená na syntéze charakteristik příčin povodně do jednoho indexu ( $I_{po}$ ), na jehož velikosti je závislá také míra podobnosti maximálního průtoku a objemu odtoku v následujících čtyřech dnech. Výsledky ukazují, že při porovnání uvedených charakteristik příčin povodní dosahuje vyšší závislosti na indexu  $I_{po}$  podobnost předpovídaných a skutečných objemů odtoku. Pro nalezení optimálního předpovědního analogu pro odhad objemu odtoku má největší vliv podobnost mezi průtoky Otavy v Písku v předpovědní den a mezi dvoudenními a třídenními srážkovými úhrny ve dnech následujících. Statistické vyhodnocení předpovědních analogů za všechny dny období 1961 – 2006 umožňuje u každé předpovědi stanovit pravděpodobnostní interval, ve kterém by se měl nacházet předpovídaný objem.

Z porovnání nejvhodnějších předpovědních analogů (s nejvyšší hodnotou indexu  $I_{po}$  k 56 testovaným povodním) vyplývá, že i navržená metoda pro předpověď kulminačních průtoků má poměrně dobré výsledky. Předpovězený kulminační průtok se u 56 testovaných povodní odchyloval od skutečnosti v 16 případech o méně než 10 %, u 14 předpovědí o méně než 20 %, u 14 předpovědí o méně než 30 % a 12 předpovědí se lišilo více než 30 %. U předpovědí objemu odtoku se u 56 testovacích povodní 15 předpovědí lišilo od skutečnosti o méně než 10 %, 13 předpovědí o méně než 20 %, 10 předpovědí o méně než 30 % a 10 předpovědí o více než 30 %. Například objem druhé vlny povodně ze srpna 2002 povodně by se od předpovědního analogu, kterým je povodeň 18900904, lišil pouze o 8%!

Otázkou zůstává malý vliv podobnosti prostorového rozložení srážkových úhrnů na nalezení optimálního předpovědního analogu (viz rovnice 6.7 a 6.8). To je překvapivé zejména proto, že provedené analýzy povodňového mechanismu Otavy prokázaly důležitost tohoto faktoru na charakter vývoje odtokové situace. Lze se domnívat, že pokud by algoritmus výpočtu indexu  $I_{po}$  mohl být kalibrován na podobnost takového procesu jako je utváření tvaru povodňové vlny, k jehož řešení nebývá vždy dostatek potřebných podkladů, pak by byl význam rozložení srážek vyšší. Proto zpřesnění této metody pro stanovení průběhu odtoku vyjádřeného tvarem průtoku vlny je otázkou pro další rozvoj tohoto přístupu k hydrologickým předpovědím.

Postup při aplikaci navržené metody předpovědního analogu v provozu hydrologického předpovědního pracoviště je následující:

- (1) Průběžně se stále aktualizuje soubor s charakteristikami příčin povodní uvedených v této práci jako prediktory vzniku povodní. Tento soubor je funkčně propojen s algoritmem pro vyhledávání předpovědního analogu.
- (2) Signalizují-li výstupy z meteorologických předpovědních modelů riziko vzniku

povodňové situace, je na základě podobnosti prediktorů, respektive velikosti indexu  $I_{po}$ , vyhledáno několik historických analogů. Vyhodnotí se jejich spolehlivost podle velikosti indexu  $I_{po}$  a podle uvedených čar překročení.

- (3) Pokud jsou nalezené historické povodňové události součástí Katalogu, je možné detailní informace o jejich příčinách subjektivně porovnat s aktuální situací a podle dalších faktorů jako jsou povětrnostní příčiny, mapy rozložení úhrnů srážek nebo rozložení odtoku v jednotlivých částech povodí zpřesnit odhad pravděpodobného vývoje blížící se odtokové situace.

## 7. Závěr

Disertační práce se zabývala analýzou příčin 72 povodní na Otavě, které se vyskytly v období od roku 1890 do roku 2006. Cílem bylo na základě tohoto souboru navrhnout jednotný způsob ukládání důležitých informací o hydrometeorologických příčinách povodní v grafické databankové podobě, objasnit mechanismus vzniku vývoje průtokových vln Otavy v Písku a navrhnout postup, který by s využitím sestavené databanky povodní vedl k odhadu vývoje srážko-odtokové situace aplikací metody předpovědního analogu.

Databanka povodní, představovaná navrženým Katalogem povodní, obsahuje: (1) popis povětrnostních příčin prostřednictvím map rozložení tlakového pole a výskytu odpovídajících synoptických typů, (2) meteorologickou situaci v povodí Otavy pomocí rychlosti a směru proudění větru, teplot vzduchu, průměrného množství denních úhrnů srážek a časoprostorových snímků rozložení srážek, (3) stav povodí před povodní prostřednictvím ukazatele nasycenosti povodí (UPS) nebo množství sněhových zásob a (4) průběh povodňových vln pomocí synchronně zobrazených průtokových hydrogramů z hlavních vodoměrných profilů Otavy.

Z disponibilního souboru 72 případů průtokových vln a k tomu přidružených meteorologických, fyzicko-geografických a hydrologických podkladů byly prostřednictvím různých metodických přístupů odvozeny následující poznatky:

- Mezi povodňově nebezpečnými situacemi, které v Písku vyvolávají průtoky nad hodnotou jednoletého průtoku, se častěji vyskytují povodně v letním hydrologickém půlroce. Tato převaha je ještě výraznější u velkých povodní s kulminací nad 10letým průtokem.
- Sezonální aspekt výskytu povodní na Otavě v Písku je výrazně ovlivněn fyzicko-geografickým prostředím. Povodí, odvodňující centrální partie Šumavy, mají větší podíl zimních povodní, které jsou však způsobené převážně silnými dešťovými srážkami a vyskytují se nejčastěji v listopadu a prosinci. Toky, pramenící na severovýchodním úpatí Šumavy (Volyňka, Blanice), jsou mnohem citlivější na letní povodně. Na Otavě v Písku se sezonální režimy výskytu povodní v dílčích povodích promíchávají.
- Z kvantitativního určení podílu tání sněhu na vzniku povodní a z rozboru počátečních podmínek před povodněmi vyplynulo, že samotné tání sněhu ovlivňuje vznik povodní na Otavě pouze v omezené míře. Jen u osmi případů povodní byl popsán převažující vliv tání sněhové pokrývky, které ve všech případech doprovázely dešťové srážky. Velká výšková členitost povodí zabraňuje, aby k plnému tání docházelo naráz z velké plochy. Z hlediska intenzity a plošného rozsahu má tak tání své limity, které

zabraňují, aby bez dešťových srážek způsobilo v povodí Otavy povodeň s katastrofálními následky.

- U povodní na Otavě se výrazně liší povětrnostní příčiny povodně, vzniklé v letním a zimním hydrologickém půlroce. Až na jednu výjimku se u všech zimních povodní nacházelo povodí Otavy v silném proudění se západní složkou směru, které je charakteristické pro synoptické situace Wc, Wcs, SWc<sub>2,3</sub> a NWc. U letních povodní převažovaly synoptické typy C, B, Ec, Sec a NEc, s polohou tlakové níže v bezprostřední blízkosti povodí Otavy nebo v jižní a východní Evropě, směr proudění vykazoval zpravidla severní složku.
- Většina zimních povodní vzniká na Otavě v důsledku dešťových srážek, které vyvolávají přechody frontálních systémů (často opakované) ve velmi silném západním proudění. Úhrny srážek jsou u těchto povodní vždy výrazně orograficky zesíleny v pramenné oblasti Vydry a Křemelné, na druhé straně se vytváří závětrří, tedy zeslabení srážek na dolní Otavě a v povodí Blanice. Extrémity těchto povodní bývá největší v povodí Otavy po Sušici.
- Letní typy povodní se vyznačují rovnoměrnějším rozložením srážek, s maximem nacházejícím se velmi často na vedlejším šumavském hřebeni, vedoucím po linii hor Popelná, Boubín a Libín. U těchto povodní se na objemu i na maximálním průtoku Otavy v Písku více podílejí Blanice a Volyňka.
- Ohrožení povodněmi na Otavě v Písku vlivem lokálních bouřkových přívalů bývá relativně malé. Na menších povodích, zejména na Volyňce a Blanici nad Husineckou přehradou, však tento typ povodní může představovat významné nebezpečí.
- Průběh průtoků Otavy v Písku je při povodních výrazně ovlivněn transformací povodňové vlny v korytě a údolní nivě Otavy pod Horažďovicemi. Zejména u zimních dešťových povodní, které se formují v povodí nad Sušicí, je na Otavě v Písku patrné zploštění vlny do charakteristického zkoseného tvaru.

Na podkladě sestavené databanky povodní, doplněné o denní údaje o srážkách a průtocích Otavy v Písku, byla testována metoda předpovědního analogu. Tato metoda na základě podobnosti mezi příčinami povodně vyhledává v historických záznamech povodňových případů tu epizodu, na základě které by bylo možné v reálném čase odhadnout scénář vývoje budoucí srážko-odtokové situace. Předpovědní metoda byla nakalibrována pro odhad objemu odtoku v posloupnosti čtyř dnů a pro odhad maximálního průtoku bez udání času kulminace, na základě známých údajů o sezóně, nasycenosti povodí a odhadu denních úhrnů srážek, které spadnou v následujících třech dnech. Pro testování a kalibraci metody nebyly uvažovány povodně s významným vlivem tání sněhu. Přestože je zřejmé, že použité ukazatele příčin i navržený algoritmus pro vyhledávání analogických povodní je zatížen řadou nejistot, výsledky potvrzují funkčnost této metody:

- K testovaným 56 povodním byl navrženou metodou odhadnut kulminační průtok, který se od skutečnosti lišil v 44 případech o méně než 30% a u 16 povodní o méně než 10%
- U odhadu objemu odtoku v následujících čtyřech předpovědních dnech se předpovídané hodnoty lišily od skutečných v 46 případech o méně než 30% a v 15 případech o méně než 10%.

Především u odhadů objemů odtoku, u kterých byly k testovaným povodním hledány předpovědní analogy ze všech dní v období 1961 až 2006, prokázalo provedené testování přijatelnost metody jako potenciálního doplňku k hydrologickým předpovědím na základě modelových přístupů.

Sestavení databanky povodní a navržení procedury pro výběr povodňových epizod na základě zadaných kritérií nebo vzájemného porovnávání jejich příčinných podmínek umožňuje další rozvoj tohoto nástroje nejen pro potřeby hydrologické prognózy. Vyhledávání a kategorizaci povodní podle zvolených charakteristik lze využít například pro identifikaci zdrojových oblastí povodní nebo typické interference průtokových vln v soutokových uzlech při určitém typu rozvodnění. Je zřejmé, že tyto informace jsou velmi důležité pro systémové plánování protipovodňových opatření.

## Literatura:

- Augustin, F. J.*, [1891]. **Povodeně v Čechách roku 1890**. Praha.
- Albrecht, J., a kol.* [2000] **Chráněná území ČR - Českobudějovicko**: VIII. svazek Edice Chráněná území ČR, Agentura Ochrany Přírody a krajiny ČR, Praha, 807 s.
- Anderson, E.* [1973]: **National Weather Service River Forecast System -- Snow Accumulation and Ablation Model**, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17, U.S. Dept. of Commerce, Silver Spring, Md., 217 s., <http://www.civil.utah.edu/~cv5450/modeling/2snow-17.htm>
- Barnolas, M., Llasat, C., M.* [2007]: **A flood geodatabase and its climatological applications: the case of Catalonia for the last century**, Natural Hazards and Earth System Sciences, 7, s. 271-281
- Benešová, D., a kol.* [2005]: **Šumava - příroda, historie, život**, nakl. Baset, ISBN : 80-7340-021-9, s. 800
- Běhalová, K.* [1995]: **Možnosti odhadu vývoje povodňových situací na základě analýza historických případů**, Diplomová práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, s. 52
- Bičík, I., Kupková, L.*, [2003]: **Vývoj struktury ploch v povodí Otavy v letech 1845 – 1948 – 1990 – 2000** In: Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní (ed. Langhammer, J.) s. 113 – 121, PřFUK Praha
- Brádka, J.* [1967]: **Meteorologické příčiny povodí ve Slezsku**, Meteorologické zprávy, 20, č.1, s.3-9
- Brádka, J., Dřevíkovský, A., Gregor, Z., Kolesám, J.* [1961]: **Počasí na území Čech a Moravy v typických povětrnostních situacích**, Praha, HMÚ, 1961, s. 126
- Brakenridge, G. R.*, [1996]; **The Dartmouth Flood Observatory: an electronic research tool and electronic archive for investigations of extreme flood events**. Geoscience Information Society Proceedings, Volume 27 , 1996, s. 31-36
- Brázdil, R., a kol.*[2005]: **Historické a současné povodně v České republice**, Masarykova univerzita v Brně, ČHMÚ, Brno-Praha 2005, s. 369
- Brázdil, R., Štekl, J.* [1986]: **Cirkulační poměry a atmosférické srážky**. Universita J. E. Purkyně, Přírodovědecká fakulta, Brno, s. 297

- Buchtele, J.* [1972]: **Kategorizace povodňového režimu na tocích Vltavské kaskády**, Sborník prací hydrometeorologického ústavu v Praze, svazek 18, HMÚ v Praze, s. 64 – 139
- Cubash, U. von Storch, H., Wasykewity, E. Yorita, E.* [1996]: **Estimates of Climate Changes on southern Europe using different downscaling techniques**, Climate Research 7, s. 129 -149
- Čekal, R.* [2005]: **Hydrosynoptická analýza povodňových situací v povodí Horní Ohře**, Disertační práce, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, s. 208
- Červený, J. a kol.* [1984]: **Podnebí a vodní režim ČSSR**. Praha, Stát. zeměd. nakl. 1984. 416 s., 32 obr., 94 tab.
- ČHMÚ – kolektiv autorů* [1996]: **Hydrologické charakteristiky vybraných vodoměrných stanic České republiky**, ČHMÚ, Praha, 134 s.
- Daňhelka, J.* [2005] **Nejistota operativních hydrologických předpovědí** Disertační práce, Přírodovědecká fakulta UK Praha, s. 217
- Dub, O.*, [1957] : **Hydrologie, hydrografie, hydrometrie**, SVTL, Bratislava
- Duckstein, I., Bardossy, A. Bogardi, I.* [1994]: **Linkage between the occurrence of daily atmospheric circulation patterns and flood: an Arizova case study**. Journal of Hydrology, 143, od. Elsevier S. P. Amsterodam, s. 413-428
- Fiedlert, F.*, [2000] **Sacramento Soil moisture Accounting Model**, COMET Hydrometeorology Course Home Page, [http://www.comet.ucar.edu/class/hydromet/11\\_May09\\_2000/docs/rti/sac-sma.htm](http://www.comet.ucar.edu/class/hydromet/11_May09_2000/docs/rti/sac-sma.htm), Fort Collins, Colorado, USA
- Hladný, J.* [1962]: **Některé poznámka k problematice parametrů srážko-odtokových vztahů** Sborník mezinárodní hydrologické konference Slovenské akademie věd a Ústavu hydrologie a hydrauliky, Bratislava s. 20-1 až 20-11
- Hladný, J. a kol.* [1995]: **Odhad vývoje povodňových situací analýzou historických případů - 3. Část Meteorologické symptomy**. Praha, SPIS s.r.o., s. 1-37.
- Hladný, J.*, [1997]. **Možnosti hydrometeorologické analýzy povodňových situací**. Sborník referát ze semináře České meteorologické společnosti při AV ČR a ČHMÚ. s. 261-269.
- Hladný, J., Černý, M., Strachota, J., Vavruška, F.* [1995]: **Odhad vývoje povodňových situací analýzou historických případů**. Soubor symptomů příčinných cirkulačních podmínek v atmosféře. Praha, SPIS



- Hladný, J. , Černý, H. , Řiřica, J. [1993]:* **Odhad vývoje povodňových situací analýzou historických případů - 1. část Databanka povodňových vln průtoků.** Praha, SPIS s.r.o., s. 1-45.
- Hladný, J., Chaloušová, J. [2005]:* **Regionalizace sezonního zatížení krajiny povodňovým nebezpečím,** Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko, ed. Langhammer, J., Přírodovědecká fakult Univerzity Praha, s. 9 – 21
- Chaloušová, J. [2004]:* **Vliv fyzicko-geografických faktorů na časový a prostorový výskyt povodní v povodí Labe,** Disertační práce, Přírodovědecká fakulta Praha, 134 s.
- Kakos, V. [1974]:* **Možnosti hydrometeorologických předpovědí havarijních odtokových situací.** Sborník prací Hydrometeorologického ústavu, 21, Praha, s. 55 – 85
- Kakos, V., [1985]:* **Hydrometeorologická analýza povodňových situací v povodí Labe,** Meteorologické zprávy, 38, č.5, s. 148 – 151
- Kakos, V. [2001]:* **Přehled povodní na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně v období přístrojových měření.** Rukopis, Praha
- Kašpárek, L. [1999]:* **Hodnocení a modelování srážko-odtokových vlastností povodí,** Zpráva o výsledcích úkolu 1008/21, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, Praha, s.46
- Kocum, J., Janský, B., [2008]:* **Hydrologický režim v pramenných oblastech toků** In: Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následek povodní s. 85 – 97 , PřfUK Praha
- Konček, M., Rein, F., [1971]:* **Katalog der Witterungstypen für Mitteleuropa.** Acta Fac. Rer.Nat.Univ.Comen., Meteorologia IV, s. 1 – 33.
- Krejčí, J. [1999]:* **Aqualog 4.2. Modelovací systém hydrologických a vodohospodářských procesů,** Teorie a referenční příručka programu , AquaLogic s.r.o., s. 92
- Křivancová, S. [1999]:* **Doplnění poznatků o teplotních zvláštlostech Šumavy** In: Klimatologické a hydrologické studie z pobočky ČHMÚ České Budějovice, Sborník prací ČHMÚ Sv. 47, Praha, ČHMÚ 1999
- Křivancová, S., Vavruška, F. [1997]:* **Základní meteorologické prvky v jednotlivých povětrnostních situacích na území České republiky v období 1961 -1990,** Sborník Národní klimatický program č. 27, ČHMÚ Praha, 113 s.
- Langhammer, J. [2004]:* **Antropogenní upravenost říční sítě v povodí Otavy** In: Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní (eds. Langhammer, J., Engel, Z.) s. 125 – 149, Přf UK Praha

- Langhammer, J.* [2004]: **Struktura využití území údolní nivy a oblasti záplavy povodně 2002 v povodí Otavy.** Závěrečná zpráva dílčího grantu GAČR 205/03/Z046., Pff UK, Praha, 20s
- Langhammer, J., Vajskebr, V.* [2004]: **Historické změny říční sítě v povodí Otavy** In: Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní (eds. Langhammer, J., Engel, Z.) s. 150 – 169, PffUK Praha
- Lejsková, K.* [2000]: **Srážky v jihočeské části Šumavy v období 1961-95,** Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta UK, 99 s.
- Lorenz, E.* [1969]: **Atmospheric predictability as revealed by natural occurring analogues.** Journal of Atmospheric Science 26, s. 636 – 646
- Loukas, A., Vasiliades, L., Dalezios, R. N.* [2000]: **Flood producing mechanisms identification in southern British Columbia, Canada,** Journal of hydrology, Volume 35, Issues 3-4, 31 s. 299 - 311
- Lupikasza, E.* [2006]: **Interpolation methods for precipitation fields in Europe,** Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 06493, 2006
- Martin, D. E.* [1972]: **Climatic presentation for short-range forecasting based on event occurrence and reoccurrence profiles.** Journal of Applied Meteorology
- Müller, M., Kašpar, M., Řezáčová, D., Sokol, Z.* [2006]: **Extremita meteorologických prvků před velkoprostorovými dešťovými povodněmi v České republice – index LSF,** Meteorologické zprávy ročník 59, Praha, s. 65 - 75
- Obled, C.* [2007]: **Analog based post-processing of meteorological forecasts for basinwide PQPF's: principles and operational aspects,** in: Thielen., J., J. Bartholmes J., and J. Schaake (Eds.) (2007) 3rd HEPEX workshop, Book of Abstracts, European Commission EUR22861EN
- Obled Ch., Bonton, G., Garco, R.* [2002]: **Quantitative precipitation forecasts a statistical adaptation of model outputs through an analogue sorting approach,** Atmospheric Research 63, s. 303-324
- Olmer, M., Kessl, J. a kol.* [1990]: **Hydrogeologické rajony.** Práce a studie, sešit 176, Státní zemědělské nakladatelství, Praha
- Stehlík J.* [2002]: **Meteorologické příčiny povodí na Otavě,** Rukopis, ČHMÚ, Praha s. 25
- Šercl, P., Lett, P.* [2002]. **Výpočet rastru srážek v prostředí GIS (s využitím ArcView Spatial Analyst).** Uživatelská příručka verze 2.0.2. ČHMÚ, OPV, Praha, 8 s.
- Šmíd, Z.* [2005]: **Otava,** nakl. Paseka, ISBN 80-7185-742-4, 360 s.

- Řezáčová D., a kol [2003]: **Posouzení hydrometeorologických podmínek vzniku významných letních povodní na území ČR na základě porovnání situace ze srpna 2002 s vybranými srážkovými epizodami a extrémními podmínkami**, Výzkumná zpráva, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha
- Řezáčová, D., Novák, P., Kašpar, M., Setvák, M. [2007]: **Fyzika oblaků a srážek**, Academia, Praha 2007, s. 574
- Tolasz, R. a kol. [2007]: **Atlas podnebí Česka. Climate Atlas of Czechia**. ČHMÚ, Univerzita Palackého v Olomouci, Praha – Olomouc 2007, ISBN 978-80-86690-26-1 (ČHMÚ) ISBN 978-80-244-1626-7 (UP)
- Vavruška, F. [1989]: **Meteorologické příčiny povodní na Otavě a Lužnici**, Meteorologické zprávy, 42, ČHMÚ, Praha, s. 111-115
- Vlasák, T. [2000]: **Analýza zimních povodňových situací v povodí Otavy**, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta UK, 59 s.
- Vlasák, T. [2004]: **Overview and Classification of Historical Floods in the Otava River Basin**, Enviromental changes impact on extreme floods. Acta Universitatis Carolinae - Geographica., 250 p. (in print.)
- Vlasák, T. [2005]: **Přehled a klasifikace historických povodní na Blanici** In: Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní (ed. Langhammer, ) s. 138 – 146, Přf UK Praha
- Vlasák, T. [2007]: **Povodňové režimy Otavy a Lužnice**, Změny v krajině a povodňové riziko, Sborník příspěvků semináře Povodně a změny v krajině, PřF UK, Praha 5.6.2007 s. 105 - 113
- Wehry, W. [1968]. **Synoptish-statistische Unteruchungen zu Starkregen- Wetterlagen in Mitteleuropa**. Meteorologische Abhandlungen, 86, č. 3, s. 1-88.
- Wetterhall, F., Halldin, S., Xu Chong-yu [2004]: **Statistical precipitation downscaling in central Sweden with analogue method**, Journal of Hydrology 306 s. 174 - 190



## Seznam obrázků, tabulek a příloh

### Seznam obrázků:

Obr. 3.1 Poloha povodí Otavy po vodoměrnou stanici Písek a fyzicko – geografická mapa . . . . .	7
Obr. 3.2 Hypsografická křivky povodí Otavy.. . . . .	8
Obr. 3.3 Hypsografická křivka dílčích povodí a mezipovodí v povodí Otavy . . . . .	9
Obr. 3.4 Sklonitostní poměry a orientace svahů v povodí Otavy. . . . .	9
Obr. 3.5 Průměrné roční srážky a průměrné roční teploty vzduchu v povodí Otavy . . . . .	11
Obr. 3.6. Spádová křivky hlavních toků v povodí Otavy . . . . .	12
Obr. 3.7 Říční síť a vzdálenosti závěrových profilů povodí 5. řádu po toku k vodoměrné stanici Písek. . . . .	13
Obr. 3.8 Struktura odtoku Otavy a jejich přítoků podle srážko-odtokového modelu SAC – SMA. . . . .	14
Obr. 3.9 Rozložení relativního množství odtoku z let 1961 – 2005 v jednotlivých povodích Otavy. . . . .	15
Obr. 3.10 Transformace povodňových vln přechodem přes přehradní nádrž Husinec (limnigraf Podedvory leží poblíž ústí Blanice do Husinecké nádrže) . . . . .	16
Obr. 4.1 Ukázka informací o povětrnostních příčinách pro povodňovou epizodu 20060529 . . . . .	21
Obr. 4.2 Charakteristiky srážek a teplot pro povodňovou epizodu 20060526 . . . . .	22
Obr. 4.3 Mapy rozložení srážek a indexu UPS u povodňové situace 20065026 . . . . .	23
Obr. 4.4 Pozorovaný průtok v hlavních vodoměrných profilech povodí Otavy . . . . .	25
Obr. 5.1 Kulminační průtoky Otavy v Písku mezi lety 1888 až 2006 podle průtoků a sezonního výskytu. . . . .	26
Obr. 5.2 Polární grafy sezonního výskytu povodní s pravděpodobností výskytu Q1 (1letá povodeň) Q2 (2letá povodeň) a Q5 (5letá povodeň). Hodnoty vyjadřují relativní četnost výskytu kulminačních průtoků podle rovnice 5.2. Řada $Q_m \cdot (12 \cdot Q_a)^{-1}$ označuje relativní podíl objemu odtoké vody v daném měsíci na celkovém ročním objemu odtoku. . . . .	31-32
Obr. 5.3 Procentuální četnost výskytu příčinných synoptických typů v povodí Otavy v letní a zimním hydrologickém půlroce . . . . .	35
Obr. 5.4 Relativní četnosti výskytu synoptických typů během povodní na Otavě v Písku v letním hydrologickém půlroce . . . . .	37
Obr. 5.5 Relativní četnosti výskytu synoptických typů během povodní na Otavě v Písku v zimním hydrologickém půlroce . . . . .	37
Obr. 5.6 Četností výskytu větru určitého směru u povodní na Otavě podle sezóny. . . . .	38
Obr. 5.7 Průměrná rychlost a převládající směr větru ve stanici Churáňov v době vypadávání příčinných srážek . . . . .	38
Obr. 5.8 Poloha a trajektorie řídících tlakových níží před povodněmi v zimním hydrologickém půlroce na Otavě . . . . .	40

Obr. 5.9 Poloha a trajektorie řídicích tlakových níží před povodněmi v letním hydrologickém půlroce na Otavě .....	41
Obr. 5.10 Poloha a trajektorie řídicích tlakových níží před velkými povodněmi s kulminací v Písku nad desetiletou vodou .....	41
Obr. 5.11 Ukázka metody určení jádra srážkové činnosti pro povodeň 20020813 .....	43
Obr. 5.12 Četnosti výskytu jádra srážkového pole při situacích s převládajícím směrem větru ze sektoru 200° - 270° a průměrnou rychlostí větší než 5 m.s <sup>-1</sup> . Průtokové vlny v Písku, které vznikly následkem těchto situací.. .....	44
Obr. 5.13 Poloha srážkových jader u příčinných synoptických typů povodní na Otavě v Písku. ....	45
Obr. 5.14 Četnosti výskytu jádra srážkového pole při situacích s převládajícím směrem větru ze sektoru 200° - 270° a průměrnou rychlostí menší než 5 m.s <sup>-1</sup> . Průtokové vlny v Písku, které vznikly následkem těchto situací .....	46
Obr. 5.15 Četnosti výskytu jádra srážkového pole při situacích s převládajícím směrem větru ze sektoru 310° - 70°. Průtokové vlny v Písku, které vznikly následkem těchto situací .....	47
Obr. 5.16 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Velké letní povodně“ .....	50
Obr. 5.17 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek zařazených do kategorie „Velké letní povodně“ ..	50
Obr. 5.18 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Velké zimní povodně“ .....	51
Obr. 5.19 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Velké zimní povodně“ .....	51
Obr. 5.20 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“ .....	53
Obr. 5.21 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“ .....	53
Obr. 5.22 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“ .....	55
Obr. 5.23 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“ .....	56
Obr. 5.24 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových málo orograficky zesílených srážek“ .....	57
Obr. 5.25 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových málo orograficky zesílených srážek“ .....	57
Obr. 5.26 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“ .....	59
Obr. 5.27 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“ .....	59
Obr. 5.28 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“ .....	61

Obr. 5.29 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“ . . . . .	61
Obr. 5.30 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“ . . . . .	62
Obr. 5.31 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených do kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“ . . . . .	63
Obr. 5.32 Charakteristiky povodní zařazených do kategorie „Letní povodně z bouřkového přívalu“ . . . . .	64
Obr. 5.33 Průtokové vlny Otavy ve stanici Písek u povodní zařazených kategorie „Letní povodně z bouřkového přívalu“ . . . . .	64
Obr. 6.1 Použité termíny při aplikaci metody předpovědního analogu . . . . .	66
Obr. 6.2 Základní schéma použitých prediktorů a prediktantů . . . . .	70
Obr. 6.3 Oblasti povodí Otavy, pro které jsou vydávány kvantitativní předpovědi srážek modelem ALADIN ČHMÚ. Oblast H je rozdělena na podoblasti Ha a H, kde jsou srážky upravovány sloužícím meteorologem. . . . .	72
Obr. 6.4 Přehled všech prediktorů použitých pro testování metody analogu . . . . .	72
Obr. 6.5 Závislost mezi indexem podobnosti prediktorů $I_{po}$ a podobností předpovídaných charakteristik odtoku – kulminačního průtoku a objemu odtoku. . . . .	77
Obr. 6.6 Čáry překročení podobností objemů odtoku k nalezeným analogickým povodním při různých hodnotách indexu podobnosti objemů odtoku . . . . .	78
Obr. 6.7 Porovnání předpovídaných a pozorovaných maximálních průtoků u 56 povodní Otavy v Písku, jejichž charakteristiky byly použity pro testování metody předpovědního . . . . .	79
Obr. 6.8 Porovnání předpovídaných a pozorovaných objemů odtoku u 56 povodní Otavy v Písku jejichž charakteristiky byly použity pro testování metody předpovědního analogu . . . . .	79

## Seznam tabulek:

Tabulka 3.1 Vybrané hydrologické charakteristiky pro dílčí povodí Otavy . . . . .	14
Tabulka 4.1 Přehled povodní zařazených do databanky povodňových událostí . . . . .	20
Tabulka 5.1 Typy povodní podle příčin . . . . .	28
Tabulka 5.2 Typy povodní podle podílového indexu sněhu. . . . .	29
Tabulka 5.3 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Velké letní povodně“ . . . . .	49
Tabulka 5.4 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Velké zimní povodně“ . . . . .	51
Tabulka 5.5 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s výrazným podílem tání sněhu“ . . . . .	52

Tabulka 5.6 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových, výrazně orograficky zesílených srážek“ . . . . .	55
Tabulka 5.7 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Zimní povodně s převažujícím vlivem dešťových málo orograficky zesílených srážek“ . . . . .	56
Tabulka 5.8 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na vrcholové části Šumavy“ . . . . .	58
Tabulka 5.9 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Letní povodně s orografickým zesílením srážek na severovýchodním úpatí Šumavy“ . . . . .	59
Tabulka 5.10 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie „Letní povodně bez orografického zesílení srážek“ . . . . .	62
Tabulka 5.11 Přehled základních charakteristik povodní zařazených do kategorie letní povodně z bouřkového přívalu . . . . .	64

## Seznam příloh:

Tabulka P.1 Přehled povodňových epizod uložených v Katalogu povodňových událostí. . . . .	P1
Tabulka P.2 Typy meteorologických situací v dnech výskytu povodní na Otavě. . . . .	P3
Tabulka P.3 Průměrné úhrny srážek na povodí Otavy po Písek v dnech výskytu povodní na Otavě . . . . .	P5