

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Geografie
Fyzická geografie a geoekologie



Bc. Barbora Šachová

Vliv klimatické změny na hydrologické sucho v povodí horní Otavy
Climatic change effect on hydrological drought in the Otava River headwaters

Diplomová práce

Vedoucí závěrečné práce: RNDr. J. Kocum, Ph.D.

Praha, 2013

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citovala.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze 20. 8. 2013

.....
Barbora Šachová

Děkuji RNDr. Janu Kocum, Ph.D. za vedení práce. Můj dík patří panu Ing. Josefu Hladnému, CSc. zajímavé podněty k práci a Ing. Romanu Kožínovi za technické rady ohledně modelu BILAN. Velice děkuji i své rodině a přátelům, kteří mě během studia podporovali a byli nápomocni při dokončování práce.

VLIV KLIMATICKÉ ZMĚNY NA HYDROLOGICKÉ SUCHO V POVODÍ HORNÍ OTAVY

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá hydrologickým suchem v podmínkách klimatické změny v povodí horní Otavy. Tématika je zkoumána ze čtyř aspektů, které společně tvoří ucelenou informaci o hydrologickém suchu v povodí. První rovinou je analýza hydrologického sucha v dlouhých časových řadách, kde je pomocí metody threshold a SPA zkoumán režim nízkých průtoků, nedostatkové objemy a intenzita sucha. Druhou rovinou je zkoumání vlivu klimatické změny na hydrologické sucho v povodí. K tomuto účelu byl použit model BILAN. Dalším zkoumaným aspektem je předpověď odtoku a vývoje nedostatkových objemů v bezesrážkových obdobích. Předpovědní vztah byl definován pomocí recesních křivek. Závěrečná část práce se věnuje procesu plánování, managementu a možnostem adaptace na hydrologické sucho.

Klíčová slova: hydrologické sucho, nedostatkové průtoky, nedostatkové objemy, klimatická změna, model BILAN, Otava, Modrava, Rejštejn, Sušice, adaptační opatření

CLIMATIC CHANGE EFFECT ON HYDROLOGICAL DROUGHT IN THE OTAVA RIVER HEADWATERS

Abstract

The submitted thesis deals with hydrological drought in condition of climate change in Otava River headwaters. The topic is discussed from four different aspects that together create a complex view on the hydrological drought issues in the catchment. The first aspect, the hydrological drought analysis in daily series, is done by threshold level method and SPA. Second aspect studies the impact of climate change on the hydrological drought by using the BILAN model. Following aspect determines a prediction of low flows and deficit volumes during drought by the recession analysis. Final aspect suggests relating process of management, planning and adaptation measures on drought.

Key words: hydrological drought, minimal discharges, deficit volumes, BILAN model, climatic change, recession analysis, Otava River, Modrava, Rejštejn, Sušice, adaptation measures

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
	1.1 Cíle a struktura práce	8
2	HYDROLOGICKÉ SUCHO V KONTEXTU KLIMATICKÉ ZMĚNY V EVROPĚ A V ČESKU	10
	2.1 Definice hydrologického sucha.....	10
	2.2 Sucho v povrchových a podzemních vodách.....	12
	2.2.1 Vliv klimatické změny na hydrologické sucho.....	13
	2.3 Hydrologické sucho v Evropě.....	14
	2.4 Předpokládané dopady klimatické změny na vodní zdroje v Česku.....	16
3	ANALÝZA HYDROLOGICKÉHO SUCHA V POVODÍ OTAVY.....	18
	3.1 Vymezení zájmového území.....	18
	3.2 Datové zdroje	20
	3.3 Fyzickogeografická charakteristika povodí	21
	3.3.1 Geologická a geomorfologická charakteristika	21
	3.3.2 Půdní poměry	22
	3.3.3 Klimatické poměry	22
	3.3.4 Využití území a ochrana přírody	26
	3.3.5 Odtokové poměry	27
	3.3.5.1 Antropogenní ovlivnění povodí.....	28
	3.4 Analýza hydrologického sucha v denních řadách průtoku	29
	3.4.1 Metodika	29
	3.4.1.1 Metoda mezní hodnoty (Treshold limit)	29
	3.4.1.2 Algoritmus následných vrcholů	30
	3.4.1.3 Postup výpočtu.....	30
	3.4.2 Výskyt deficitních odtokových charakteristik v povodí Otavy	31
4	VLIV KLIMATICKÉ ZMĚNY NA HYDROLOGICKÉ SUCHO	41
	4.1 Globální klimatické modely.....	42

4.2	Regionální klimatické modely	43
4.3	Modelování vlivu klimatické změny na vodní zdroje.....	45
4.3.1	Model BILAN	45
4.4	Vliv klimatické změny na odtok z povodí horní Otavy	46
4.4.1	Vstupní data	47
4.4.1.1	Teploty	47
4.4.1.2	Srážky.....	50
4.4.2	Odtok z povodí v podmínkách klimatické změny	52
5	PŘEDPOVĚĎ ODTOKU V SRÁŽKOVĚ DEFICITNÍCH EPIZODÁCH.	59
5.1	Recesní křivky	60
5.2	Recesní křivky v zájmových profilech.....	62
6	MOŽNOSTI ADAPTACE NA HYDROLOGICKÉ SUCHO	70
6.1	Dopady sucha.....	70
6.2	Management plánování a reakce na sucho.....	71
6.3	Tvorba plánů	73
6.4	Adaptační opatření	77
6.5	Legislativa v ČR a Evropě	82
6.6	Možnosti adaptačních opatření v povodí horní Otavy.....	83
7	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE	88
8	ZÁVĚR.....	93
9	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	95
9.1	Literatura.....	95
9.2	Zdroje	99
9.2.1	Internetové zdroje	99
9.2.2	Mapové podklady a digitální zdroje.....	100
10	SEZNAM TABULEK	101
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	102

1 ÚVOD

Předkládaná diplomová práce se zabývá hydrologickým suchem v kontextu klimatické změny. Změna klimatu je dnes již brána jako fakt, jakkoliv lze diskutovat příčiny, roli člověka a míru těchto změn. Geosféry tvoří systém propojený zpětnými vazbami, narušíme-li tedy některou její složku, nutně vyvede z rovnováhy některou další. Vědci se dnes shodují, že hydrologický cyklus bude v kontextu těchto změn intenzivnější a rychlejší. Pravděpodobným následkem je potom častější výskyt obou hydrologických extrémů, povodní a sucha. Diskutovanou otázkou je propojenost těchto fenoménů. Příkladem může být katastrofické sucho, které Evropu zasáhlo rok po povodni v roce 2002. Koneckonců i v roce 2013 zažíváme oba extrémy.

Tato fakta ukazují na aktuálnost řešeného tématu práce. Sucho je oproti povodním nenápadným a pomalu postupujícím extrémem. Dostává se mu proto méně pozornosti od veřejnosti, ačkoliv jeho následky nejsou o nic méně závažné a to zejména z toho důvodu, že postihuje rozsáhlé regiony. Česká republika má vzhledem k této problematice specifickou polohu, nachází se na tzv. střeše Evropy. Důsledkem toho je, že vodní zdroje jsou závislé čistě na srážkách spadlých na našem území. Nevhodné zásahy provedené v minulosti navíc způsobily, že rychlost odtoku vody z území se zvýšila. Dnešní filozofie vodního hospodářství se mění. Stále větší důraz je kladen na přirozenou retenci vody v povodí a o to je třeba se dále zasazovat.

V odborných kruzích je výzkumu sucha připisována rostoucí pozornost. Dokladem toho jsou projekty na evropské i české úrovni. V roce 2010 byl dokončen projekt VÚV TGM a ČHMÚ - Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny. Cílem výzkumu sucha je především omezení negativních dopadů. Je zřejmé, že kvůli klimatické změně bude muset vodní hospodářství změnit svůj pohled na nakládání s vodami. Dosavadní přístup počítal s tím, že zásoby vody v povodí jsou stacionární. Platnost tohoto pravidla se však zdá být do budoucna limitována. Pozornost tedy musí být věnována vlivu klimatické změny na vodní zdroje. Je nutné naučit se nakládat s nejistotou pramenící z procesu projekce klimatu tak, aby byly vynaloženy adekvátní prostředky na dostatečná opatření.

Pro úspěšnou adaptaci je nutné poznat fyzicko-geografické charakteristiky povodí, jeho srážkový a odtokový režim, navrhnout vhodné limity a definovat nedostatkové objemy. Podle historických dat je třeba určit k jakým změnám v povodí

a v odtokovém režimu došlo. S dostatečně kritickým pohledem je třeba přistoupit k matematické modelaci vlivu klimatu v daném povodí. Je nutné rovněž popsat reakci povodí na sucho a vývoj nedostatkových objemů v bezesrážkových obdobích. S těmito poznatky je potom možné přistoupit k návrhu plánů a adaptačních opatření.

Předkládaná práce se výše zmíněnými kroky zabývá. Pro aplikaci postupů bylo vybráno povodí horní Otavy. Zájmové povodí je dlouhodobě cílem projektů Katedry Fyzické geografie a geoekologie PřF UK. Jedná se o hydrologicky cennou lokalitu přirozené akumulace vod a je tedy přínosné poznat vliv klimatické změny na nízké průtoky této oblasti.

1.1 Cíle a struktura práce

Práce pojímá tematiku hydrologického sucha ze široka. Zkoumá čtyři aspekty sucha, analýzu současného stavu, predikci stavu budoucího, reakci povodí na bezesrážkové periody a možnosti adaptace. Jakkoliv tyto součásti tvoří nedělitelné kroky zkoumání hydrologického sucha, jsou odlišného charakteru. Bylo tedy přistoupeno k rozdělení práce na čtyři části, z nichž každá má svůj úvod do problematiky.

V úvodní části je představena problematika hydrologického sucha a klimatické změny v Evropě a v Česku. Další část popisuje zájmové povodí horní Otavy a výskyt hydrologického sucha v dlouhých časových řadách. Následující část je věnována problematice klimatického modelování. Za účelem poznání vlivu klimatické změny na hydrologické sucho byl modelován odtok z povodí pomocí modelu BILAN. V další kapitole je zkoumána problematika vývoje sucha v bezesrážkových obdobích a předpověď vývoje nedostatkových průtoků pomocí recesních křivek. V poslední části jsou popsány možnosti adaptace a managementu povodí. Na závěr jsou výsledky shrnuty do komplexního rámce.

Práce si klade následující cíle:

- zhodnocení projevů hydrologického sucha v zájmovém povodí ve vztahu ke klimatickým veličinám a fyzicko-geografickým charakteristikám povodí

- určení možného vlivu klimatické změny na hydrologické poměry v oblasti zájmového povodí pomocí modelu BILAN
- definovat předpovědní vztahy pro odtok ve srážkově deficitních obdobích
- určení možností potenciálních opatření vedoucích k prevenci a částečné kompenzaci negativních dopadů hydrologického sucha v zájmovém území.

Diplomová práce navazuje na bakalářskou práci Hydrologické sucho v kontextu klimatické změny ve světě a českém povodí Labe (Šachová 2010), tamtéž lze odkázat na komplexní ucelenou rešerši.

2 HYDROLOGICKÉ SUCHO V KONTEXTU KLIMATICKÉ ZMĚNY V EVROPĚ A V ČESKU

Tato kapitola je úvodem do problematiky hydrologického sucha. Je zde uvedena definice typů sucha a hranice pro vymezení hydrologického sucha. Dále jsou nastíněny trendy ve výskytu hydrologického sucha v Evropě a vliv klimatické změny na hydrologické sucho v České republice.

2.1 Definice hydrologického sucha

Sucho je přirozenou součástí koloběhu vody na Zemi. Je výsledkem meteorologické anomálie, která způsobí nedostatek srážek. Představuje velmi komplexní jev a je proto třeba znát chod atmosférických činitelů a klimatický režim oblasti. Vzhledem k těmto regionálním klimatickým rozdílům je znemožněno vytvoření jednotné definice. Vždy se ale jedná o vodní deficit oproti běžným hydrometeorologickým podmínkám.

Červený a kol. (1954) definuje sucho v podmínkách střední Evropy jako určité časové období týdnů, měsíců či roků, ve kterém spadne méně srážek, než kolik činí dlouhodobý normál, nebo jako počet za sebou jdoucích dnů, v nichž nebyl dosažen předem stanovený limit. Z hydrologického hlediska je takto sucho definováno jako počet za sebou jdoucích měsíců s průtoky nižšími než za normálních podmínek.

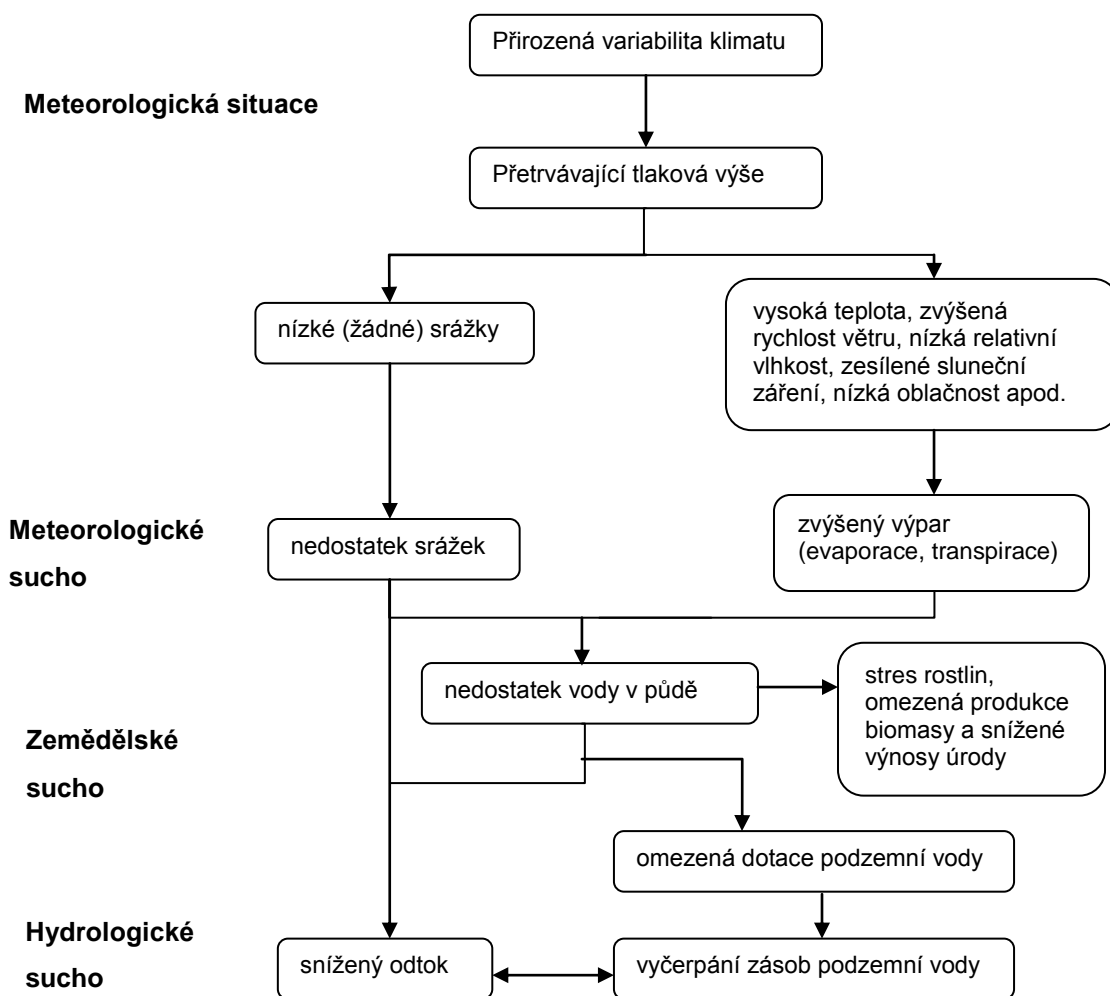
Wilhite a Glantz (1985) stejně jako další autoři dělí sucho na několik typů tak, jak postupují hydrologickým cyklem (Obr. 1).

Primární fází je **meteorologické sucho**, které je výsledkem přechodného nepříznivého stavu atmosféry, kdy je vlivem atmosférických činitelů snížena dotace srážek. Je definováno na základě odchylek od dlouhodobých průměrů srážkových úhrnů nebo jako řada dní s deficitním srážkovým úhrnem pro daný region. (Hladný 2010).

Pokud srážkový deficit přetrvává a je sníženo množství vody v půdě, potom v závislosti na typu půdy a plodiny navazuje **sucho agronomické**, případně jej lze označit jako deficit půdní vláhy, pokud není vztaženo k plodině (Hladný 2010, Tallaksen 2004).

Při přetrvávající nepříznivé srážkové situaci, kdy jsou podzemní vody nedostatečně zásobeny, dochází k **hydrologickému suchu** a snižuje se hladina podzemní vody i odtok.

Pokud je nevyrovnaný poměr mezi poptávkou a dodávkou vody, nedostatek vody tak začne negativně ovlivňovat společnost a hospodářství, je sucho označováno jako **socioekonomické**. Socioekonomické sucho je odvozeno z dopadů sucha a může nastat v jakékoliv fázi. Podobně je vymezeno **sucho ekologické**, kdy je nedostatkem vody postižen ekosystém.



Obr. 1: Vývoj sucha v hydrologickém cyklu (Stahl 2001, upraveno)

Za hranici hydrologického sucha je dle Novický a kol. (2009) považováno období kdy:

- průměrný průtok je menší než příslušný dlouholetý průměrný měsíční průtok v daném měsíci (Vorel 1937)
- se vyskytnou alespoň tři měsíce, ve kterých je měsíční průtok menší nebo roven 60 % dlouhodobého průtoku daného měsíce (Johanovský, Wolf 1985).
- když se vyskytne nejnižší průměrný denní průtok v daném roce, tj. každý rok se vyskytne jedno sucho (Gumbel 1963)
- když se v alespoň pěti po sobě jdoucích dnech vyskytne průtok s pravděpodobností překročení $p = 97,19 \%$, tj. Q_{355} (Řiřicová a kol. 2003). Hladný (2009) uvádí tři po sobě následující dny. Hodnota Q_{355} je považována za hranici odběru vody bez technických obtíží.

2.2 Sucho v povrchových a podzemních vodách

Hydrologické sucho vzniká, pokud je dlouhodobě narušena hydrologická bilance součinností tří hlavních faktorů. Těmi jsou meteorologická situace, odtokové charakteristiky povodí a antropogenní činitelé.

Primární příčinou vzniku je změna v cirkulaci atmosféry. V Evropě je to poloha tlakových výší a odklon jejich drah. Od toho je odvozeno množství srážek a teploty, na čemž závisí evapotranspirace. Při nedostatku srážek ustává povrchový i podpovrchový odtok a jsou nedostatečně saturovány podzemní vody. Vysoké teploty tento deficit umocňují zvýšenou výparností. Na těchto faktorech pak závisí evapotranspirace, jejíž míra závisí na půdním a vegetačním pokryvu. Pro identifikaci sucha je tedy klíčové znát klimatický režim oblasti.

Důležitou roli hraje přirozená kapacita povodí. Určuje, jak rychle budou povrchové a podzemní vody reagovat na nedostatek srážek. Hlavními faktory jsou hydrogeologické vlastnosti, hydraulická konduktivita půdy a formy, v níž je voda v povodí zadržována. Povodí, která mají vysoký podíl jezer, mokřadů a akumulují vodu ve zvodních, reagují na sucho pomaleji.

Existují dva základní typy povodí: s rychlou a pomalou odezvou. Povodí s rychlou odezvou jsou ta, kde větší složku odtoku tvoří povrchový nebo hypotermický

odtok a která nemají vyvinuté zásoby podzemní vody. Srážky odtékají po prudkých svazích nebo málo konduktivních půdách. Při intenzivních srážkách je snadno překročena infiltrační kapacita půdy. Voda tak odteče bez toho, aby se vsákla a doplnila tak zásoby podzemních vod. Tato povodí jsou náchylnější k hydrologickým extrémům. Povodí, která mají silnou nenasycenou vrstvu umožňující infiltraci, často překračující dno údolí, a u kterých převažuje základní odtok, reagují na nedostatečnou dotaci srážek pomaleji. U povodí s rychlou odezvou sucho nastává častěji, ale nedostatková období nemají dlouhého trvání. Povodí s pomalým odtokem jsou sice vůči suchu odolnější, ale pokud sucho nastane, trvá dlouho, než je opět dosaženo optimálního stavu vodních zásob.

Nezanedbatelným faktorem vzniku hydrologického sucha je antropogenní činnost. Důsledkem lidské činnosti je změna land use, zvětšování podílu nepropustných ploch a orné půdy s nevhodným způsobem hospodaření. Vliv na odtok má také změna skladby lesa. Hospodářské lesy s vysázenými monokulturami jehličnanů mají vyšší výparnost. V minulosti byly provedeny nevhodné úpravy koryta řek jako napřimění či zpevnění koryta, které způsobily, že rychlost odtoku z povodí se výrazně zvýšila bez toho, aby byla dostatečně saturována půda a podzemí vody.

Se zvyšující životní úrovní roste spotřeba vody a přirozená distribuce zdrojů vody často neodpovídá koncentraci spotřeby. Člověk tak sám může působit jako řídicí faktor vzniku hydrologického sucha čerpáním vody ve větší míře, než jakou jsou zásoby schopny se doplňovat. V krajním případě pak může dojít k vyschnutí pramenů přerušením hydraulického spojení mezi podzemní a podpovrchovou vodou.

2.2.1 Vliv klimatické změny na hydrologické sucho

Znalost vývoje klimatu do budoucnosti je přes veškerou snahu doposud omezená. Existuje však shoda na tom, že hydrologický cyklus bude intenzivnější a rychlejší. Vyšší teploty budou mít za následek rychlejší odpařování vody z půdy a vodních ploch a budou tak urychlovat transpiraci rostlin, tím poroste obsah vodní páry v atmosféře. Větší vlhkost vzduchu povede k intenzivnějším lokálním srážkám a jejich nerovnoměrnému rozložení v prostoru i čase. Zvyšovat se tak bude počet přívalových dešťů způsobujících povodně. Snižování vlhkosti půdy a zvýšená evapotranspirace pak povede k vysychání půdy a spolu s nerovnoměrným přísunem srážek může způsobovat

sucho. Se zvýšením globální teploty souvisí oteplení hladiny moří, odkud se odvíjí možná změna atmosférické cirkulace a režimu srážek v ročním cyklu. Zvýšením teploty budou ovlivněna povodí se sněhovým režimem, neboť tání se posune na dřívější měsíce a zvýší odtok v zimě. Celkově se sníží dotace podzemních vod v jarním období. Zvýšením letních teplot se případné sucho může ještě prohloubit (Bates a kol. 2008).

2.3 Hydrologické sucho v Evropě

Obvyklou příčinou sucha v Evropě je setrvávající tlaková výše, která odklání proudění vzduchu přinášející srážky. Červený a kol. (1954) charakterizoval vznik sucha ve střední Evropě jako nahodilý jev vznikající v důsledku nerovnoměrného výskytu anticyklonálních a cyklonálních situací, který způsobuje nepravidelné a proměnlivé četnosti srážek spolu s dalšími meteorologickými proměnnými. Letní sucha jsou způsobena dlouhotrvající tlakovou výší a častou jsou následována suchými zimami a malou zonální cirkulací (Stahl 2001).

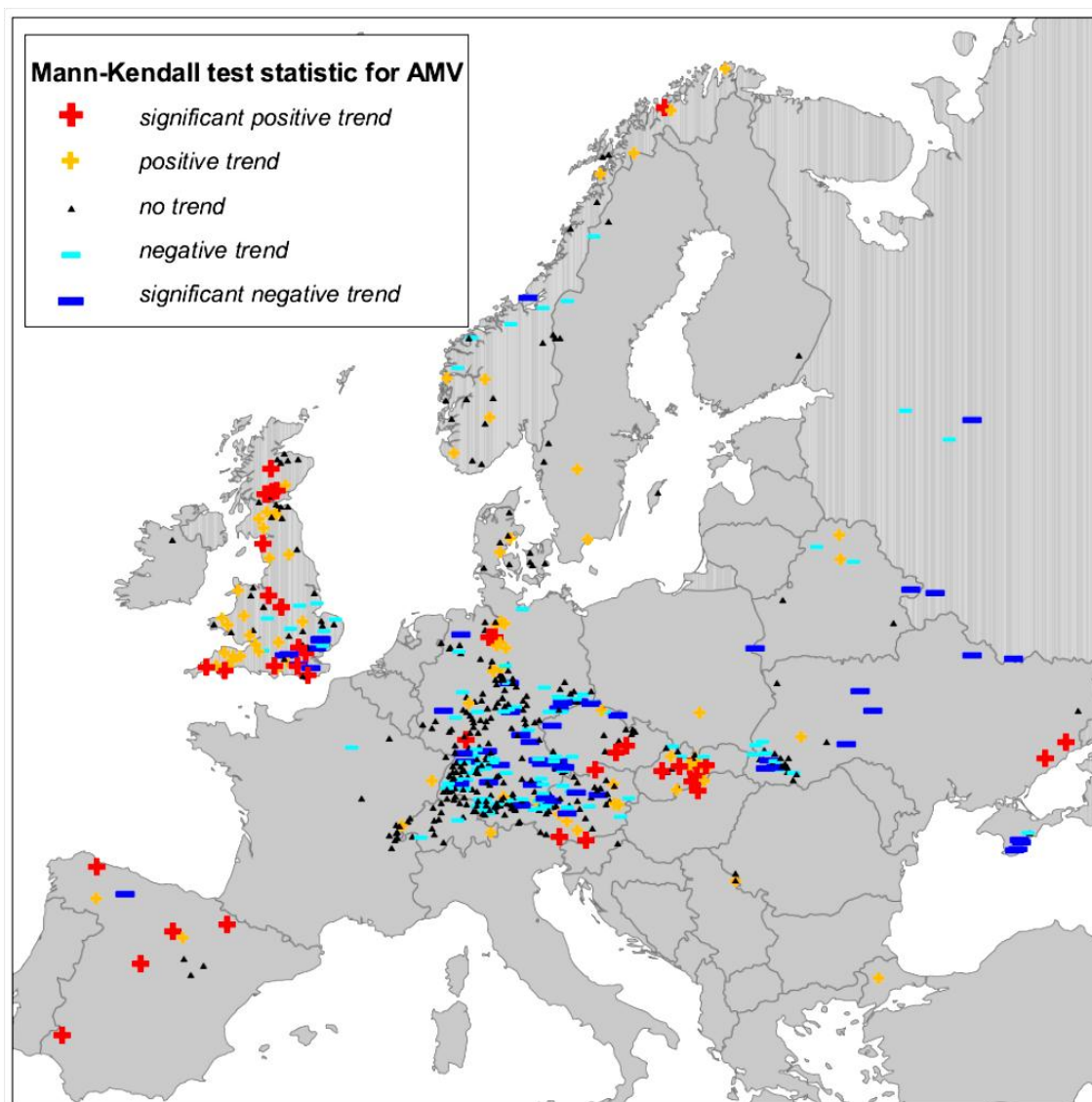
Dalším faktorem vzniku sucha jsou interakce mezi oceánem a atmosférou a jejich anomálie. Evropu zasahuje fenomén Severoatlantské oscilace (NAO). Má vliv na sílu západního proudění vzduchu přinášejícího srážky. Jeho intenzita se měří pomocí NAOI (North Atlantic Oscillation Index) jako rozdíl tlaku na hladinu oceánu a islandskou tlakovou níží. Vysoké hodnoty v zimě jsou spojeny se suchem ve střední a jižní Evropě (Tallaksen et al. 2004).

Hisdal a kol. (2001) zkoumali 600 povodí v Evropě v období mezi lety 1911 a 1995 a došli k závěrům, že změny v intenzitě sucha se regionálně liší. Nárůst intenzity sucha byl zjištěn ve Španělsku, na Britských ostrovech, v České republice a na Slovensku, naopak k poklesu došlo v Německu, Rakousku, Norsku, Bělorusku a na Ukrajině. Postižené regiony se liší změnou ve frekvenci suchých období. Zatímco na Britských ostrovech byl zaznamenán pokles četnosti, v České republice a na Slovensku se počet suchých období zvýšil, ve Španělsku jejich počet stagnoval. Ve východní Evropě se projevil trend snižování intenzity sucha i snižování počtu suchých období. Na severním úpatí Alp je zaznamenán nárůst počtu málo intenzivních suchých období.

Nejednoznačný trend v nárůstu intenzity sucha potvrzuje Stahl (2001). Byly zkoumány nízké průtoky na časových řadách let 1962 -1990. Byly prokázány určité regionální zákonitosti (Obr. 2). Ačkoliv je v Evropě celkově zaznamenán trend

klesající, v jejích částech jako Španělsko, jižní a západní Británie, Slovensko a Morava se ukázal trend vzrůstající. Všichni zmínění autoři se nicméně shodují na tom, že výsledky analýz závisí zejména na výběru období a jeho délce a kvalitě dat.

Tyto trendy v budoucnosti ovlivní další klimatické změny. Srážkové úhrny pravděpodobně zvýší v severní části Evropy, kdežto v jižní klesnou až o 10 %. V mírných šířkách je předpokládán nárůst srážek v zimním období a jejich pokles v létě. Růst teplot, a tím pádem větší evapotranspirace, se předpokládá nad celým kontinentem. (Estrela a kol. 2001).



Obr. 2: Trend vývoje intenzity hydrologického sucha v Evropě v období 1962-1990 (Stahl 2001)

2.4 Předpokládané dopady klimatické změny na vodní zdroje v Česku

V současnosti jsme svědky výrazné variability srážkových úhrnů. Rok 2002 byl na nejdéle měřící stanici v Česku, v pražském Klementinu, srážkově třetím nejbohatším v celé více než 200-leté historii měření (138 % srážkového normálu). Následující rok 2003 byl naopak druhým srážkově nejchudším (74 % srážkového normálu). ČHMÚ udává růst teplot v posledních dvou desetiletích o 0,8 °C, přičemž největší změny byly zaznamenány v červenci a srpnu, nejmenší v září až listopadu, v prosinci naopak nastal pokles o 0,2 až 0,4 °C. V zimních měsících jsou výkyvy výraznější. Bez ohledu na roční období průměrná teplota v ČR vzrostla za posledních padesát let o 0,3 °C na deset let.

Suchá období se v Česku v současnosti objevují s desetiletou periodicitou vždy kolem třetího roku každého desetiletí, avšak s rozdílnou intenzitou. Těmito suchými roky byly 1953, 1962, 1983, 1992, 2003 a roky jim blízké. Velmi intenzivní sucho postihlo Česko v roce 1947 (Vlnas a kol. 2010).

Následující tvrzení vycházejí z extraktu závěrečné zprávy projektu „Zpřesnění dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství, lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ (2011), jehož hlavním řešitelem bylo ČHMÚ:

Model ALADIN předpokládá změnu růst teplot v období 2010-2039 o 1°C, k největšímu oteplení by mělo dojít na jaře a na podzim, o něco méně v létě a v zimě. Růst teplot je málo plošně variabilní. Pokles srážek naopak závisí na poloze. Model ALADIN simuluje pokles do 20 % v zimě, na jaře jejich zvýšení o 2 až 16 %. V létě převládá pokles srážek o několik procent, avšak na některých místech se předpokládá jejich zvýšení až o 10 %. Na podzim je modelován na některých místech pokles, jinde jejich zvýšení až o 26 %.

V období 2040 až 2069 se předpokládá výraznější zvýšení teplot. V létě a na jaře až o 3,9°C, na podzim o v zimě do 2,1 °C. Pro srážky je v tomto období charakteristický pokles v zimě (až o 20 %) a v létě. Na podzim je naopak charakteristické jejich zvýšení.

V období 2070 až 2090 teploty dále porostou v závislosti na poloze, v létě až o 4,7 °C. V létě se prohlubuje klesající trend srážek a naopak pokles srážek v zimním období je nižší.

Faktorem ovlivňujícím hydrologický režim je rovněž evapotranspirace. Její růst je způsoben zvyšováním teplot, a zároveň je kompenzován nárůstem srážek. Celkový

růst je předpokládán 5-10 %, v místech nedostatečné kompenzace jako ve středních Čechách až o 20 %. V zimním období dochází k největšímu zvyšování evapotranspirace vlivem vyššího počtu dní s kladnými teplotami.

Změny v hydrologickém režimu lze popsat následující zákonitostí: na podzim a v zimě dochází k růstu srážek i teplot, a tím pádem ke zvýšení výparu. Vzhledem k překročení hranice tání lze očekávat nárůst průtoku na jaře o 5 až 20 % a posun jarního tání do dřívějších měsíců. V letním období s poklesem srážek nemůže docházet k velkému územnímu výparu. Vzhledem k úbytku zásob odtok z povodí v létě klesá o 20-40 %. V celoroční bilanci lze tedy čekat pokles 5 až 20 %.

Ve zprávě je konstatováno, že výskyt období s nedostatkem vody je pravděpodobnější než zvýšení intenzity a četnosti přívalových srážek. Podle pesimistických scénářů pravděpodobně největší změna odtokové výšky, až přes 50 %, postihne oblast jižní Moravy zejména vlivem snížené dotace srážek. Optimistické scénáře naopak pro tuto oblast nepredikují velké změny. Negativní bilance se predikuje také nízkým polohám v Polabí a jižních Čechách. Naopak horské oblasti na severu Čech a Moravy jsou hodnoceny bez výrazné změny (Novický a kol. 2009).

3 ANALÝZA HYDROLOGICKÉHO SUCHA V POVODÍ OTAVY

V této kapitole je hodnocen výskyt hydrologického sucha v dlouhých časových řadách hydroklimatických dat v povodí horní Otavy. V první části je zájmové povodí posouzeno z fyzicko-geografického hlediska, následuje analýza současného výskytu hydrologického sucha v časových řadách. V této části je zahrnut také popis vhodných metodických postupů k posuzování sucha.

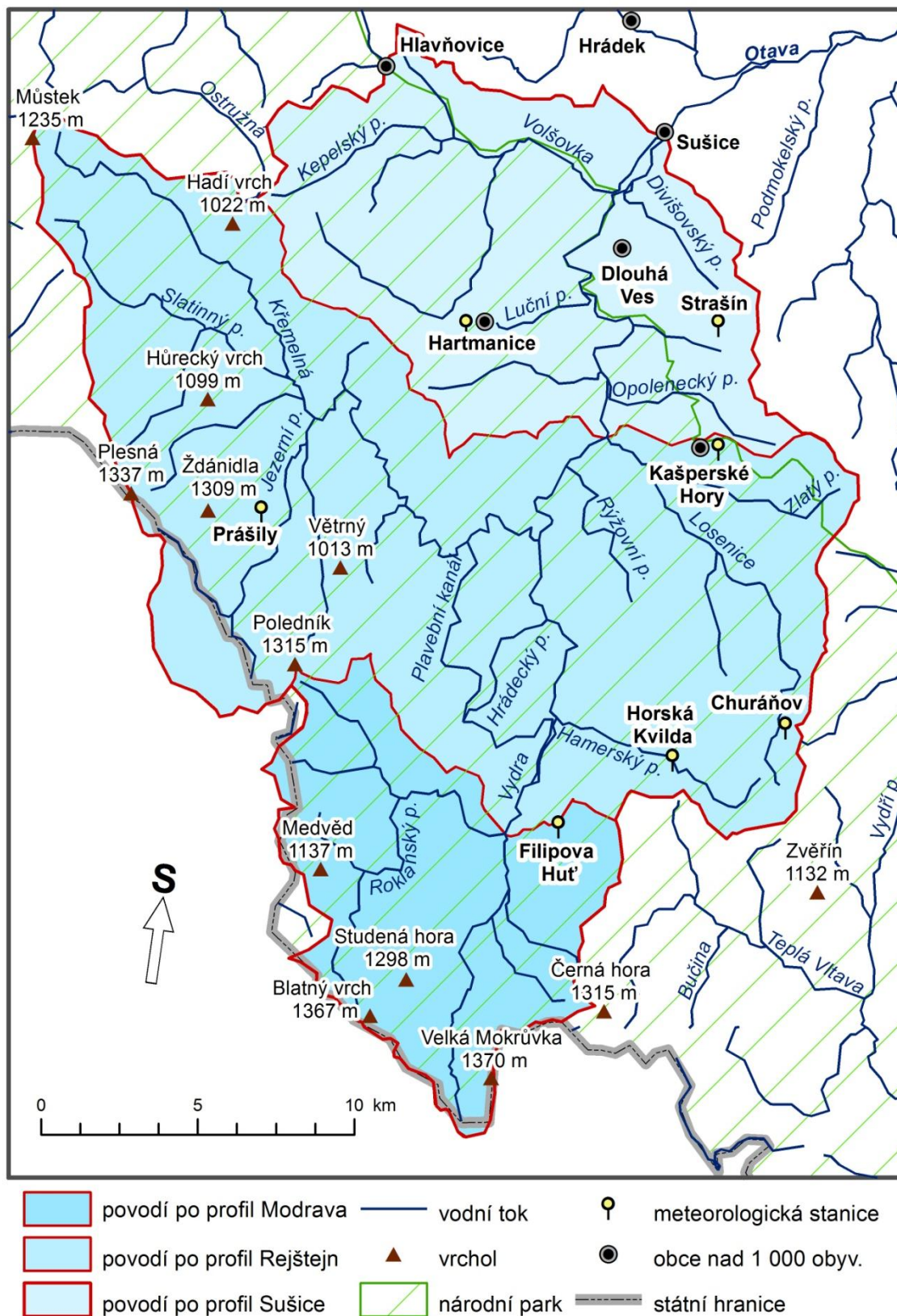
3.1 Vymezení zájmového území

Zájmové povodí horní Otavy patří k srážkově nejbohatším a hydrologicky cenným oblastem ČR. Povodí je analyzováno rozdělením na tři části, oddělené profily Modrava, Rejštejn a závěrový profil Sušice (Obr. 3).

Otava vzniká pod elektrárnou Čeňkova pila soutokem Křemelné a Vydry v nadmořské výšce 627 m n. m. Její zdrojnice Vydra pramení jako Modravský potok na svahu vrchu Luzného v nadmořské výšce 1 192 m. Jako Vydra je označována od soutoku Modravského a Roklanského potoka. Právě zde se nachází první profil Modrava. Plocha povodí po profil Modrava je 90,17 km². Profil se nachází v nadmořské výšce 973 m n. m.

Pod Modravou je z Vydry veden umělý Vchynicko-tetovský plavební kanál, který odvádí vodu do elektrárny Vydra. Část vody se vrací zpět do toku a část je vedena skluzem do Křemelné. V této části Vydra přibírá z významnějších přítoků Hamerský a Hrádecký potok. Pod soutokem Vydry s Křemelnou se nachází profil Rejštejn v nadmořské výšce 564 m n. m. Plocha této části povodí je 333,97 km². Zhruba polovinu povodí tvoří výše zmiňovaná Vydra a druhou část Křemelná. Třetím přítokem je Losenice.

Profil Sušice se nachází na úpatí Šumavy v nadmořské výšce 466 m n. m. Plocha povodí Otavy je v tomto místě 534 km². Otava v této části přibírá přítoky Volšovka, Opolenecký, Divišovský a Radešovský potok.



Obr. 3: Schematická mapa zájmového povodí horní Otavy (zdroj: ArcČR500, verze 9.33, DIBAVOD)

3.2 Datové zdroje

K analýze hydrologického sucha bylo využito dlouhých časových řad průtoků, teploty a srážek z databáze ČHMÚ.

Průtoky byly k dispozici pro profily Sušice (kód stanice 1380) za období hydrologických let 1930 až 2011, Rejštejn (kód stanice 1370) za období 1910 až 1920, 1931 až 1937 a 1948 až 2001 a profil Modrava, (kód stanice 1350) pro období 1930 až 1940 a 1948 až 2011. Vizuální kontrola průtokových dat pomocí součtových čar neprokázala nehomogenitu v těchto řadách. Z důvodu extrémně nízkých průtoků v počátcích měření na profilu Rejštejn, byl tento rok pro případnou nesourodost vyřazen.

Pro data srážek na povodí byly vybrány srážkoměrné stanice Filipova Huť (1 110 m n. m.), Churáňov (1 118 m n. m.), Kašperské Hory (741 m n. m.), Prášily (883 m n. m.), Strašín (637 m n. m.), Horská Kvilda (1 052 m n. m.), Hojsova stráž (863 m n. m.) a Hartmanice pro denní srážky. Srážky byly na povodí přepočítány pomocí Thiessenových polygonů v programu ArcMap a to z toho důvodu, že se na povodí více projevil efekt návětrné strany než orografické regrese.

K hodnocení teplot byly využity dvě stanice: Kašperské hory a Churáňov. Povodí bylo rozděleno podle střední nadmořské výšky mezi stanicemi na dvě části, podle kterých byla teplotám přidělena váha.

Počátek hydrologického roku je netypicky v dubnu z toho důvodu, aby nedocházelo k půlení suchých období mezi dva roky.

3.3 Fyzickogeografická charakteristika povodí

Faktory ovlivňující vznik sucha jsou především srážkové a teplotní poměry, které korelují s nadmořskou výškou, hydrogeologické podloží, půdní typ a land use. Tyto vlastnosti povodí ovlivňují vznik a vývoj sucha během srážkově deficitních epizod.

3.3.1 Geologická a geomorfologická charakteristika

Z geologického hlediska patří Šumava k nejstarším pohořím Evropy. Na utváření reliéfu Šumavy se projevovало střídání fází vrásnění, zarovnaní a opětovného vyzdvihování. Z geologické mapy lze vyčíst, že hlavní geologické jednotky tvoří moldanubikum prostoupené variskými granitoidy. V pleistocénu se na utváření povrchu projevila ledovcová činnost. Kvartérní pokryv tvoří deluviální uloženiny soliflukčního původu. Povodí horní Otavy patří dle geomorfologického členění do Šumavské provincie a jí podřazeným celkům Šumavské hornatiny a Šumavského podhůří.

Povodí Vydry (profil Modrava) patří do podcelku Šumavské pláně. Zde je v nadmořské výšce mezi 1 300 a 1 000 m oblast reliktních zarovnaných povrchů, kam nezasáhla zpětná eroze vodních toků (Demek a kol. 1965). Oblast povodí po profilu Rejštejnu patří k přechodné oblasti. V části povodí po profilu Sušice reliéf přechází do zvlněného šumavského podhůří. Nejvyšším vrcholem v povodí je Luzný (1 373 m) v jižním cípu, dalšími významnými vrcholy jsou Blatný vrch (1 367 m) a Velká Mokrůvka (1 370 m). Charakteristiky netypicky plochého horského povodí ukazuje i tabulka (Tab. 1).

Tab. 1: Hydrografické charakteristiky povodí (Zdroj: ArcČR 500)

	délka toku	plocha povodí	nadm. v. profilu	střední sklon toku	střední sklon povodí
Modrava	11,69 km	90,17 km ²	627 m n. m	48,3 ‰	59,5 ‰
Rejštejn	28,85 km	333,97 km ²	564 m n. m	21,77 ‰	34,36 ‰
Sušice	31,87 km	534 km ²	466 m n. m	22,7 ‰	31,41 ‰

3.3.2 Půdní poměry

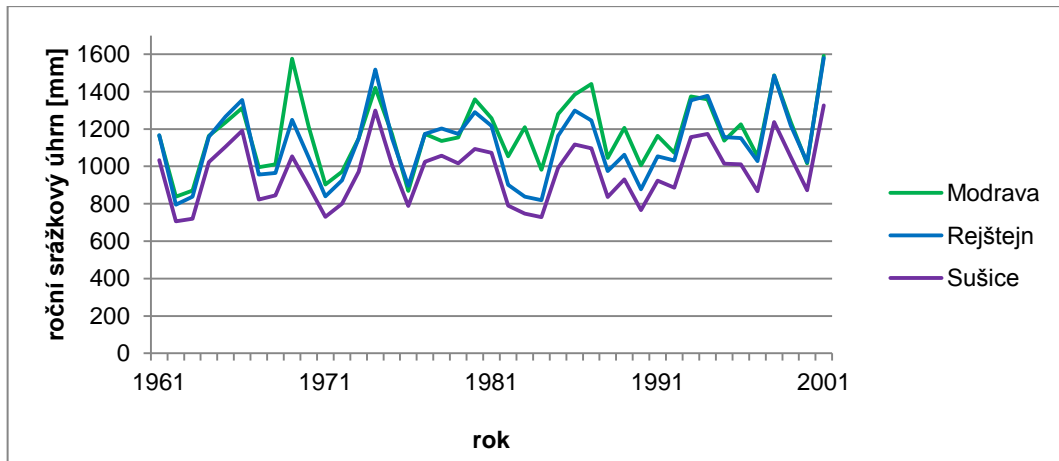
Pro náhorní plošiny jako je horní část povodí Otavy, je typická velká heterogenita půdních typů díky rozdílům ve svažitosti náhorních akumulčních poloh a svahů náhorní plošiny. Společným jmenovatelem horní části povodí je nízký stupeň vývoje půd. Jsou to lehké, až středně skeletovité půdy, jejichž vysoká infiltrační rychlost a malá retenční schopnost urychluje proces odtoku (Šefrna 2003).

Šefrna povodí charakterizuje jako „půdní region kambizemí oligobazických až rankerů výrazněji svažitých poloh a region kryptopodzolů až podzolů v asociaci s dystrickými kambizeměmi hornatin s frigidním plotním režimem“. Mimo to se v povodí Vydry a dále potom v menším zastoupení objevují organozemě a hydromorfnní půdy v podobě vrchovišť, které jsou silně nasycené vodou a na odtok mají specifický vliv. Rašelinné a zrašeliněné půdy jsou mělké zamokřené půdy, kde se hladina podzemní vody drží blízko u povrchu, přičemž zrašeliněné půdy jsou předcházejícím stádiem rašelinistních půd. Organozemě fungují jako regulátor odtoku, mají vysokou retenční schopnost, ale jen do chvíle jejich nasycení, potom fungují jako urychlovač odtoku. Po profil Rejštejnu zaujímají zrašeliněné půdy 14,9 % (Kocum 2012), v povodí Vydry je to 26,77 %. Tento fenomén bude popsán ve vztahu k odtoku dále.

V dolní části povodí je region kambizemí eubazických a modálních a region pseudoglejů a hydromorfnních půd plochých a akumulčních rovin. Ve svažitých oblastech se vyskytují dystrické kambizemě a rankery. Značná diference půd je způsobena rozmanitými typy matečních hornin (Šefrna 2003).

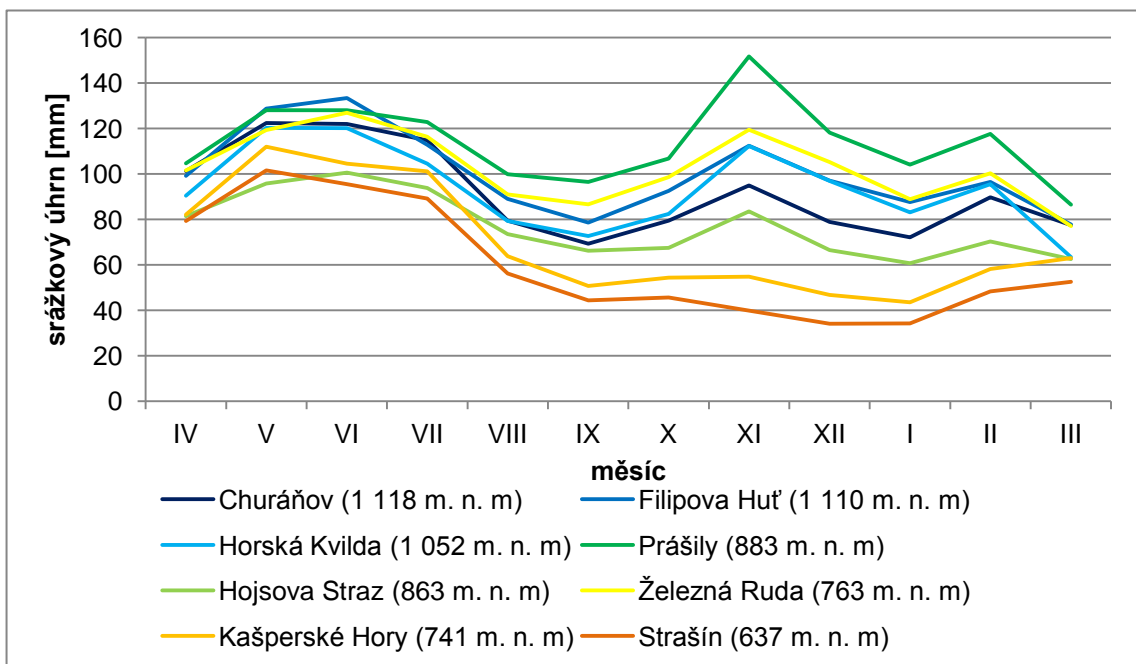
3.3.3 Klimatické poměry

Povodí horní Otavy patří mezi chladné a srážkově bohaté oblasti. A to zejména kvůli jeho horní části. Průměrné roční srážkové úhrny (1962-2001) se v jednotlivých mezipovodích liší. V povodí Vydry je to 1 177,34 mm, povodí po Rejštejnu 1 121 mm a Sušici 970 mm. (zdroj časové řady VÚV 1947-1980). Od roku 1961 je mírně rostoucí trend v ročních srážkových úhrnech. Nejnižší srážky z období 1961 až 2001 připadají na rok 1962 (Obr. 4). Tento srážkový deficit se výrazně projevil na odtoku v tomto roce.



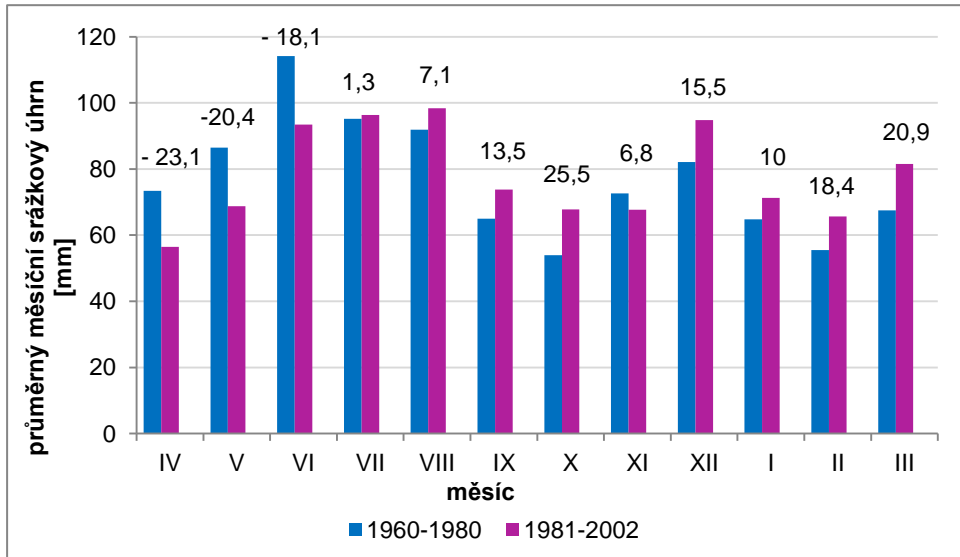
Obr. 4: Roční srážkové úhrny na mezipovodí oddělené profily Modrava, Rejštejn a Sušice pro období let 1961 až 2001 (zdroj: ČHMÚ)

Rozložení srážek v průběhu roku na jednotlivých srážkoměrných stanicích liší (Obr. 5). Tyto hodnoty se liší podle polohy stanice vzhledem k hřebenu Šumavy a podle nadmořské výšky. Na nízko položených stanicích jako jsou Kašperské hory nebo Strašín dosahují srážky minima v listopadu až prosinci. Naopak na stanicích umístěných na severu území dochází v tomto měsíci ke srážkovému maximu. Pro výskyt sucha kvůli nedostatku srážek jsou ale klíčové letní měsíce. V těchto měsících dochází k poklesu srážek zejména v září.



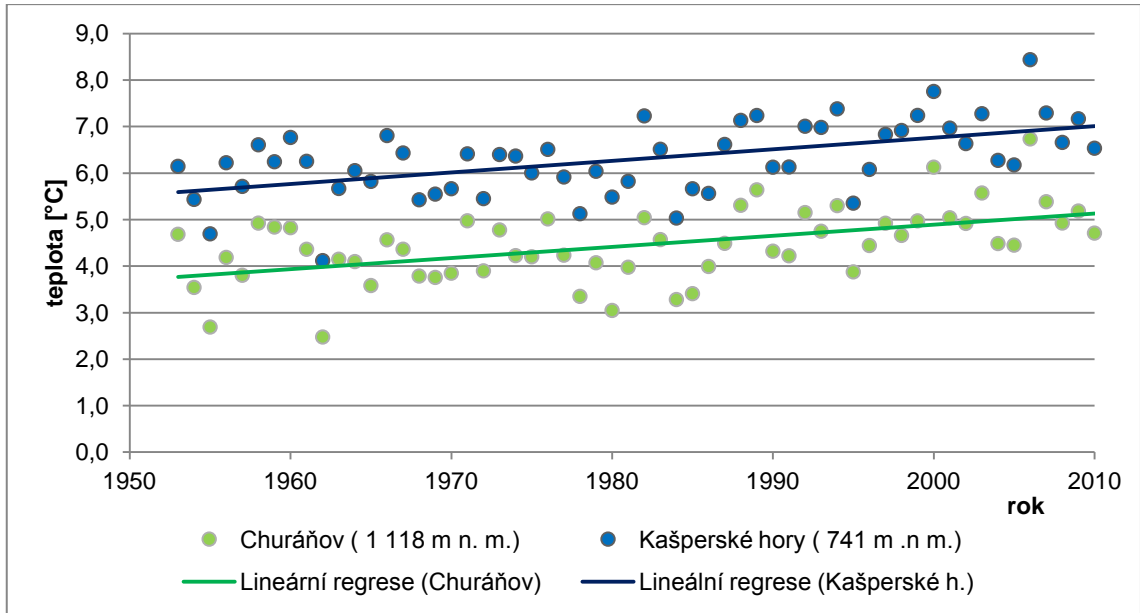
Obr. 5: Průměrné měsíční srážkové úhrny za období 1961-2002 (zdroj: ČHMÚ)

Na grafu znázorňujícím procentuální rozdíl průměrných měsíčních srážek v celém povodí mezi dvěma dvacetiletými obdobími se potvrzuje predikovaný rozdíl modelem ALADIN. Došlo k poklesu srážek v jarních měsících přibližně o 20 % a k nárůstu v od září do března (s výjimkou listopadu) (Obr. 6).



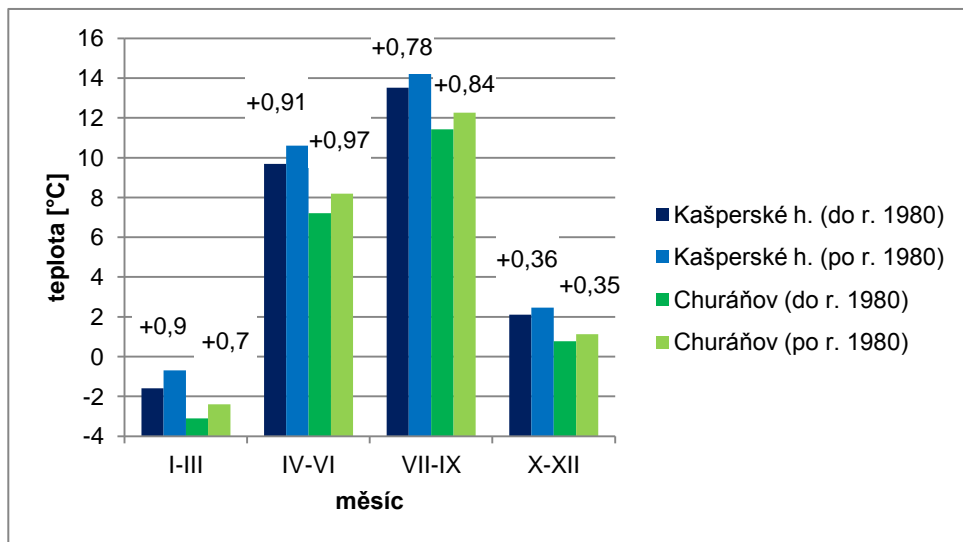
Obr. 6: Rozdíl průměrných měsíčních srážkových úhrnů s vyznačeným procentuálním rozdílem (zdroj: ČHMÚ)

Zajímavým faktem je rovněž trend v průměrných teplotách na stanicích Kašperské hory a Churáňov. Obě přímky regrese proložené řadou průměrných ročních teplot ukazují rostoucí tendenci (Obr. 7). Do r. 1980 byl teplotní průměr v Kašperských horách 5,9 °C a v Churáňově 4 °C po r. 1980 se na obou stanicích zvedl o přibližně 0,8 °C. Kliment a Matoušková (in Langhammer ed. 2007) dodávají, že spolu s rostoucími teplotami lze pozorovat od 70. a zejména 90. let úbytek dní se sněhovou pokrývkou i snížení průměrné výšky sněhu.



Obr. 7: Průměrné roční teploty (pro hydrologický rok) ve stanici Kašperské hory a Churáňov od r. 1952 do r. 2010 se zobrazením trendu lineární regrese (zdroj: ČHMÚ)

Na grafu (Obr. 8) je patrné, že k nárůstu teplot došlo ve všech obdobích, nejvíce v jarních měsících (duben až červen), kdy v Kašperských horách vzrostla teplota mezi obdobími 1952- 1980 a 1981- 2010 o 0,91 °C, v Churáňově 0,97 °C.



Obr. 8: Sezonní průměrné teploty ve stanici Kašperské hory a Churáňov v obdobích 1952-1980 a 1981- 2010 (zdroj: ČHMÚ)

3.3.4 Využití území a ochrana přírody

V horní části povodí převažují lesy, jež jsou tvořeny smrkovými monokulturami. V Šumavském podhůří převažuje extenzivní hospodářství.

Bičík a Kupková ve své studii (2003) poukazují na tyto změny land use ve čtyřech vybraných kategoriích, které mají vliv na odtok: orná půda, louky a pastviny (drnové kultury), trvalé kultury (zahrady a sady) a les. Jejich studie však svým rozsahem pokrývá celé povodí Otavy, nikoliv pouze jeho horní část. Odmítá ovšem některé stereotypní předpoklady o změně land use.

Největší nárůst ploch orné půdy byl během kolonizace Šumavy v letech 1845-1948. Území nejbližší hranicím, tj. sudetská oblast, bylo opuštěno a znovu osídleno, avšak mimo pohraničního pásma, které tak bylo uchráněno kolektivizace. Po roce 1948 nastal další úbytek orné půdy, největší v bezprostřední blízkosti železné opony. V období 1948-1990 ubyla výměra orné půdy o 18,3 %. Stejně tak docházelo ke snižování úhrnu ploch luk a pastvin. Lesní plochy se naopak v celém sledovaném období zvětšovaly, v období 1845 až 1990 prakticky o jednu třetinu. V tomto období tak došlo k obměně převládajícího typu ploch, v roce 1845 to byla orná půda necelými s 40 % rozlohy území, kdežto v roce 1990 to byly lesní plochy podílem 39,13 %.

Velkou část povodí zaujímá Národní park Šumava, vyhlášen nařízením vlády ČR č. 163/1991 Sb. Území parku zasahuje až k profilu Rejštejn. CHKO Šumava vyhlášené 27. 12. 1963 výnosem Ministerstva školství a kultury č. 53855/63 a novelizováno výnosem Ministerstva kultury ČSR č. 5954 ze dne 17. 3. 1975 zasahuje o něco dále k Novému Městečku. Na tato území navazují Přírodní parky Kochánov a Kašperská vrchovina.

Území NP Šumava je také zahrnuto do CHOPAV (Chráněné oblasti přirozené akumulace vod) nařízením vlády č. 40/1978, podle zákona č. 138/1973 Sb., o vodách. Tento status zakazuje ty zásahy a činnosti v povodí, které by negativně ovlivnily vodní bilanci a snížily kvalitu vody. Na internetových stránkách národního parku je uvedeno, že na celém objemu odtoku z povodí Labe se odtok z NP Šumava podílí 4,6 oproti 1,6 % plochy. Tento poměr dokazuje jeho pozitivní přínos.

3.3.5 Odtokové poměry

Stabilita odtoku z povodí lze vyjádřit poměrem mezi celkovým a základním odtokem. Tuto charakteristiku vyjadřuje index základního. Ukazuje, jak povodí reaguje na srážky či jejich nedostatek a jak je jejich odtok distribuován v čase. Vysoká hodnota indexu ukazuje stabilní povodí, které má velký podíl základního odtoku a je schopno více odolávat nedostatku srážek díky velkým zásobám podzemní vody. Hodnoty indexu vycházejí pro profil Modrava 0,638, pro profil Rejštejn 0,675 a pro profil Sušice je to 0,677. Povodí patří svými hodnotami mezi ta stabilnější s tím, že stabilita podle tohoto ukazatele roste spolu s klesající nadmořskou výškou.

Specifický vliv na odtok mají rašeliniště. Existují v podstatě dvě teorie o jejich vlivu na odtok. První je tzv. houbová teorie, která tvrdí, že rašeliniště zadržují vodu při srážkách a při suchých obdobích ji upouštějí, tedy že funkce rašelinišť je jednoznačně pozitivní. Druhý názor převládá na základě výzkumů později, neboť se ukázalo, že toky z rašelinných oblastí mají velmi rozkolísané průtoky. Pokud jsou povodí nasycena srážkami, už jako „houba“ nepůsobí, naopak fungují jako urychlovač odtoku a během sucha odtok z rašelinišť ustává. Na základě tvrzení, že odvodněná rašeliniště mají hydrologickou funkci, byly provedeny meliorace rašelinišť. V současné době probíhá diskuze, zda ponechat rašeliniště jejich přirozenému vývoji, tzn. hrazení melioračních kanálů, či ponechání (Janský, Kocum 2007).

Rašeliniště mají vliv i na jakost vody, což je během sucha, kdy kvalita vody klesá vlivem nedostatečného ředění, snížení proudění a vzrůstající teplotě vody, důležitý fakt. Během suchých období odtok z rašelinišť ustává, což se pozitivně projevuje na kvalitě vody během těchto epizod.

Na bilanci odtoku mají vliv lesy, dominantní pokryv území. Jedním faktorem je vysoká intercepce v zalesněné části povodí. Stromy, zejména jehličnaté, zadržují srážky, které při nízké intenzitě pouze smáčí koruny stromů. S tím souvisí i vysoká evapotranspirace z lesních porostů. Výparnost lesů v povodí Vydra však dosahuje 216 mm za rok, což ukazuje jednu z nejnižších výparností z lesů srovnatelných poloh (Švihla 2001 in Bartůňková 2011). Pozitivním prvkem v odtokové bilanci je vysoká infiltrační schopnost nadložního humusu.

Na vysokou retenční schopnost povodí poukazuje Pavlásek (2010), který jako ukazatel retence zvolil rozdíl mezi výškou srážky v předchozích pěti dnech a výškou

odtoku při vybrané extrémní srážkoodtokové události. Výsledky ukázaly na vysokou míru retence, až 100 mm oproti běžným 60-90 mm v zalesněných povodích.

3.3.5.1 Antropogenní ovlivnění povodí

Velkým zásahem do přirozeného hydrologického režimu Vydry je existence umělého Vchynicko-tetovského plavebního kanálu, vybudovaného v letech 1799-1801 za účelem plavení dřeva ze Šumavských lesů. V současnosti z něj podzemní přivaděč svádí vodu do akumulární nádrže Sedlo o objemu 67 000 m³, kterou využívá vodní elektrárna Vydra. Ta byla vystavěna v letech 1937 až 1939 a uvedena do provozu v roce 1942. Provoz elektrárny je nyní pouze špičkový, a to pouze tehdy přitéká-li do akumulární nádrže dostatek vody.

V této souvislosti je umožněn nezanedbatelný odběr vody z povodí a odvod části vody do Křemelné. Pod odběrovým místem Rechle po soutoku s Hamerským potokem tak vzniká kritická situace s udržováním minimálních zůstatkových průtoků. Odběr vody probíhá podle manipulačního řádu nad jezem Rechle s ohledem na udržování minimálních průtoků pod jezem. Touto problematikou se zabývala ve své diplomové práci Ševčíková (2009).

Další elektrárnou je Čeňkova pila nacházející se na soutoku Vydry a Křemelné, avšak voda do ní je přiváděna derivačním kanálem z Vydry nad obcí Jelenov. Původní roční výroba 500 MWh klesla na 90 kW. Patří mezi chráněné objekty.

Pro posílení průtoku ve Vchynicko-tetovském kanálu bylo vybudováno osm umělých vodních nádrží, tzv. klauz. Vypouštěním těchto nádrží se zvedla průtoková vlna, která umožnila splavení klád kanálem.

Hydrografická síť byla v povodí Otavy zkrácena o 55,7 km, tzn. 9,7 % a to zejména na drobnějších tocích v zemědělské krajině (Langrammer 2003). Vydra a Křemelná patří k nejméně zkráceným tokům v povodí. Změny upravenosti koryta mají vliv zejména na průběh povodní, ale je pravděpodobné, že rychlejší odvod vody z povodí má za následek menší uložení zásob pro případ sucha.

3.4 Analýza hydrologického sucha v denních řadách průtoku

Sucho je určeno dobou trvání sucha a objemem nedostatku. Společně tyto ukazatele tvoří intenzitu sucha. Důležité je také znát rozsah postižené oblasti, ale o tom je bezpředmětné uvažovat v rámci jednoho povodí.

Pro identifikaci suchých period se používá určitý limit, pod který zkoumaná veličina klesne. Překročení této hodnoty udává počátek a konec suché periody. Obvykle to bývá výška hladiny nebo průtok. Pro určení správné limitní hodnoty je třeba dobře znát režim toku a definovat jej s přihlédnutím k regionálním charakteristikám. Hranice sucha se může lišit i v závislosti na období. Například na roční fixní limitě se nemusí sucho prokázat, kdežto během vegetační sezóny je množství vody nedostatečné.

Je také potřeba určit a odlišit příčiny vzniku sucha, jako je zadržetí vody ve sněhové pokrývce nebo antropogenní činnost. Tyto příčiny se dají identifikovat porovnáním odtoku, srážek a teplot. Pro přesné určování a vyhnutí se dlouhodobějším výkyvům je třeba využít co nejdelší řady dat, doporučena je minimálně 30ti-letá řada.

3.4.1 Metodika

Nejprve jsou uvedeny použité metody a následně je představen postup výpočtu.

3.4.1.1 Metoda mezní hodnoty (Threshold limit)

Tato metoda je nejpoužívanější pro určování doby trvání sucha, stanovení počátku a konce. Primárním úkolem je definování prahové hodnoty Q_x , pod kterou jsou průtoky hodnoceny jako nedostatečné. Nastavení Q_x musí odpovídat hydrologickému režimu. Pro stálé toky se obvykle nastavuje hodnota percentilu mezi Q_{70} a Q_{95} . Pro občasné toky se může stát, že průtok Q_{70} bude nulový, ačkoliv je to v dané oblasti normální stav. Limitní hodnota může být stálá po celý rok nebo může být vypočítána pro každý měsíc či den. Lze použít i hodnoty průměrného ročního minimálního průtoku nebo jinak definované minimální průtoky. Výběr limitní hodnoty závisí na tom, zda je cílem zjistit odchylku od pravidelného ročního cyklu nebo zjistit, kdy hodnota klesla pod určitou mez, například při zajištění ekologického průtoku. Pro zjištění odchylky od ročního chodu je lepší použít pohyblivou limitu.

Průsečíky hodnoty Q_x a hydrografu vyznačují počátek a konec deficitního průtoku. Podle limitního průtoku lze zjistit objem nedostatku vypočtením objemu průtoku pod limitní hodnotou.

Problémem této metody jsou krátkodobé poklesy průtoku pod hodnotu Q_x , které jsou také zaznamenány, ale jsou normálním projevem variability průtoku, nebo naopak velké sucho, které je přerušeno náhlým jednorázovým vzestupem průtoku nad Q_x . Je tedy dobré definovat minimální dobu, pod kterou musí být průtok pod limitní hodnotou (Tallaksen a kol. 2004).

3.4.1.2 Algoritmus následných vrcholů

Algoritmus následných vrcholů (sequent peak algorithm, dále SPA). Na rozdíl od metody limitní hodnoty zohledňuje kumulující se deficit vody a má za cíl eliminovat krátkodobé překročení hranice požadovaného minimálního průtoku. Spojuje období sucha, pokud zásoby vody nebyly dostatečně obnoveny (Tallaksen a kol. 2004).

Vkládanými veličinami do algoritmu je průměrný denní průtok Q_t a požadovaný minimální průtok Q_x . Výslednou veličinou je S_t , což je ztrátový průtok zohledňující akumulovaný nedostatečný průtok v předchozích dnech. Pokud průtok Q_t dosahuje nebo přesahuje hodnoty požadované Q_x , je vyhodnocen jako 0. Hodnoty S_t se načítají, pokud je hodnota S_{t-1} a požadovaného minimálního průtoku Q_x větší než Q_t .

Řada hodnot s veličinou S_t větší než 0 je postupným úbytkem a znovu doplněním objemu požadovaného průtoku Q_x . Ztrátový průtok v době maximálního úbytku je charakterizován objemem deficitního průtoku v_i a dobou trvání d_i . Doba trvání je počítána od počátku nedostatečného průtoku t_0 po dobu největšího nedostatku t_{max} . Trvání sucha je tedy charakterizováno $t_{max} - t_0 + 1$.

Tato metoda tedy spojuje období sucha, pokud zásoby vody nebyly dostatečně obnoveny.

3.4.1.3 Postup výpočtu

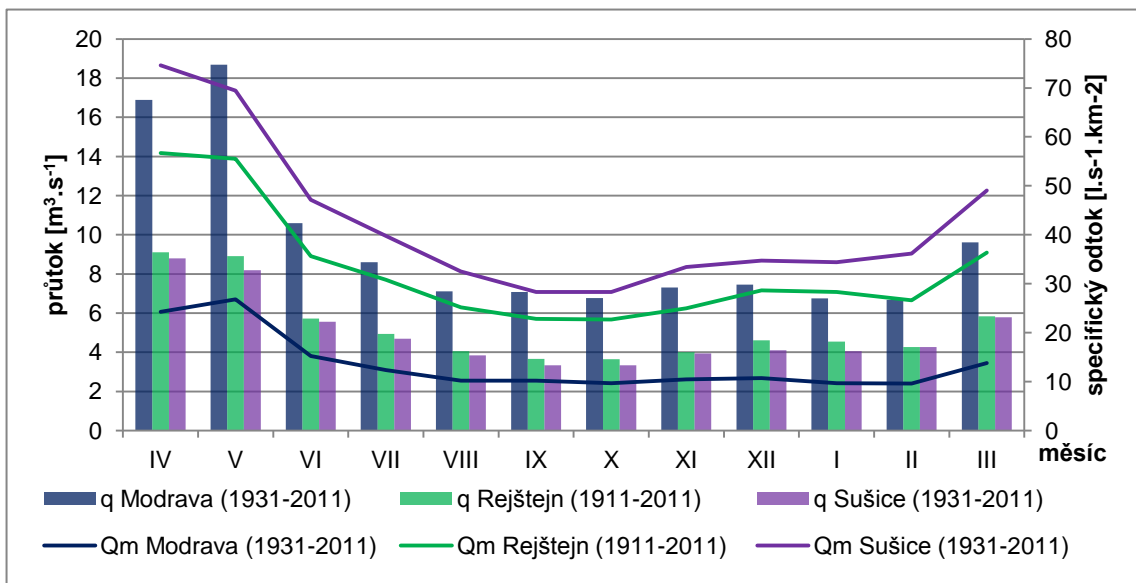
V první řadě byl zkoumán hydrologický režim oblastí. Byly sestrojeny průměrné měsíční průtoky. Podle křivky překročení byly vybrány průtoky Q_{90} , Q_{95} a Q_{99} pro celou dobu sledování. Byly také určeny limitní průtoky Q_{95} pro měsíce ve vegetačním období, květen až říjen. Podle počtu dní pod fixní limitou v jednotlivých měsících byl určen

roční režim nízkých průtoků. Pomocí průměrných minimálních průtoků pro klouzavý průměr pěti dnů v jednotlivých měsících a byla zjištěn vývoj minimálních průtoků během sledovaného období.

Následně proběhla analýza časových řad. V jednotlivých letech byl určen počet dní pod limitní hodnotou v zimním a letním období. Pro tento účel určení sucha, které povodí zasáhlo, se více hodí algoritmus SPA, který určuje celé období sucha, dokud se deficit vody nevyrovná. Byl zjištěn deficit vody v jednotlivých měsících daných let podle hodnoty Q_{m95} pro sucho, které překročilo dobu trvání alespoň tři dny. V této minimální délce trvání deficitu byla také určena intenzita sucha podílem objemu deficitu k délce trvání.

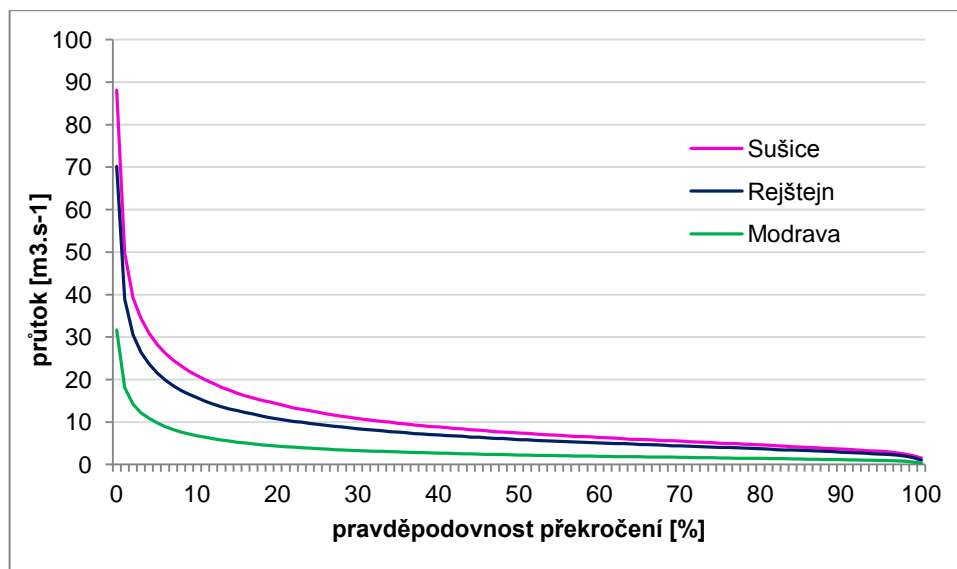
3.4.2 Výskyt deficitních odtokových charakteristik v povodí Otavy

Průměrný průtok logicky narůstá od pramenných oblastí k profilu Sušice. Průměrný průtok profilu Modrava je $3,397 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, na profilu Rejštejn $8,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a na profilu Sušice $10,58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nicméně je důležité si uvědomit, že největší specifický odtok má horní část povodí po profil Modrava a je tím pádem hydrologicky nejcennější. Rozkolísanost měsíčních průtoků se také v jednotlivých profilech liší. Na profilu Modrava je průměrný měsíční průtok relativně vyrovnaný po celý rok, naopak níže položené profily zaznamenávají poměrně velký pokles průtoků od dubna do října. Vzhledem k nadmořské výšce profilů se také liší nástup vysokých jarních průtoků přibližně o měsíc (Obr. 9).



Obr. 9: Roční průměrné průtoky pro profily Modrava (r. 1931-1939 a 1949-2010), Rejštejn (r. 1912-1919, 1931-1936 a 1948-2010) a Sušice (r. 1931-2010) (zdroj: ČHMÚ)

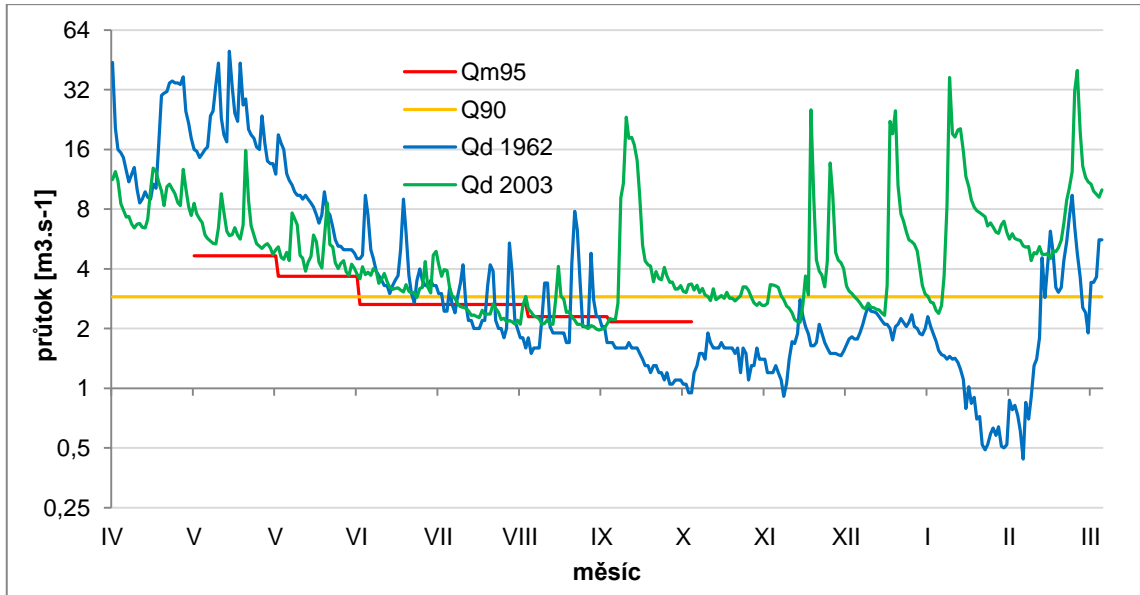
Pro odečtení limitních průtoků byla sestrojena křivka překročení průtoků (Obr. 10). Limitní hodnoty průtoků pro celou dobu měření a jejich měsíční ekvivalenty jsou zaznamenány v tabulce (Tab. 2). Příklad použití fixní a variabilní limity je ukázán na Obr. 11, který zobrazuje využití na suchých letech 1962 a 2003. Graf je pro lepší názornost zobrazen v logaritmickém měřítku.



Obr. 10: Křivka překročení průtoku pro profily Modrava, Rejštejn a Sušice (zdroj: ČHMÚ)

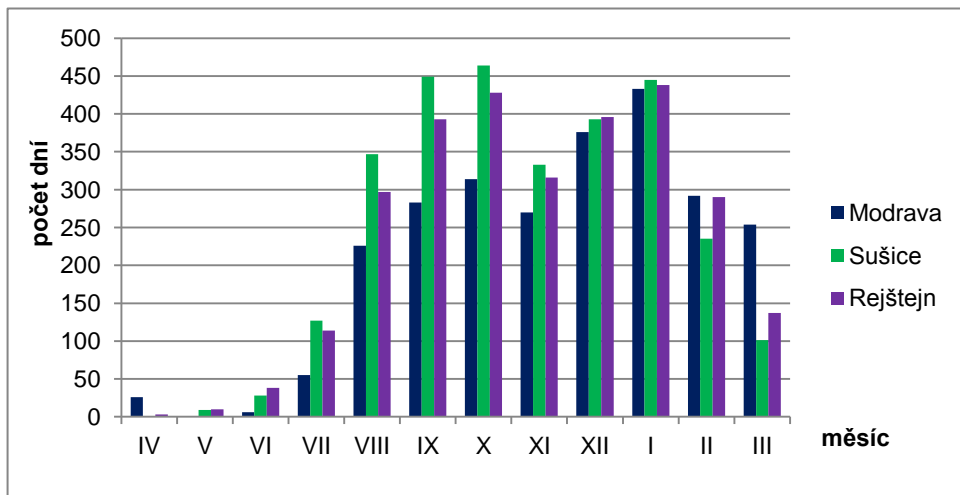
Tab. 2: Hodnoty limitních průtoků na profilu Modrava, Rejštejn a Sušice (zdroj: ČHMÚ)

		Qm95%								
		Q90%	Q95%	Q99%	V	VI	VII	VIII	IX	X
Modrava	m ³ ·s ⁻¹	1,12	0,949	0,59	1,85	2,08	1,22	0,98	0,9	8,2
Rejštejn		2,9	2,4	1,65	4,65	3,67	2,96	2,65	2,3	2,17
Sušice		3,64	3,1	2,09	5,8	4,49	3,62	2,84	2,78	2,89



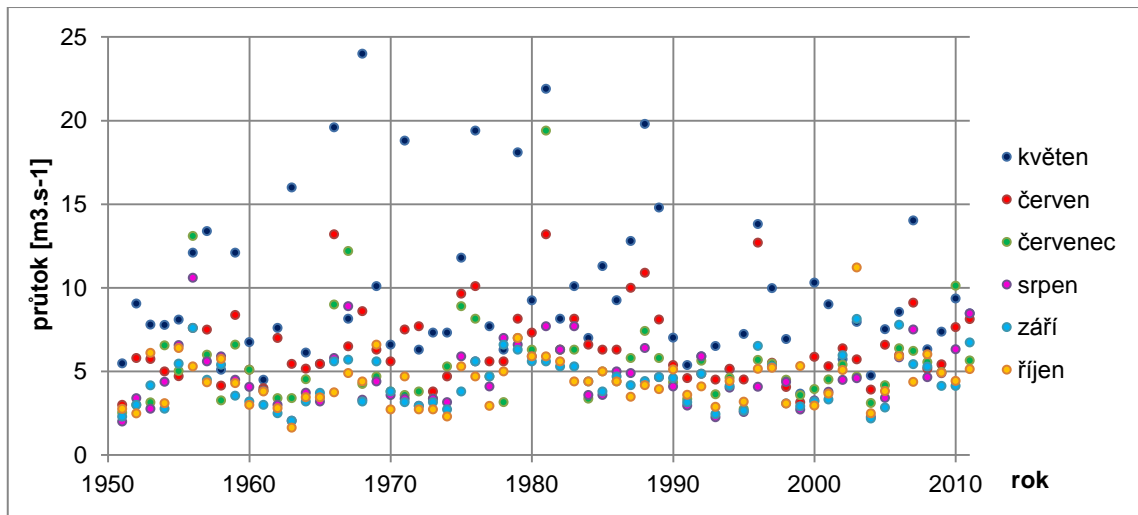
Obr. 11: Příklad použití fixní a variabilní hodnoty v suchých letech 1962 a 2003 na profilu Rejštejn (zdroj: ČHMÚ)

Roční režim chodu nízkých průtoků znázorňuje Obr. 12. Je na něm suma dní pod fixní limitu Q_{90} v jednotlivých měsících pro celou dobu pozorování. Z grafu je patrné, že na počátku vegetačního období v měsících duben až červen takto definované sucho téměř nenastává, v červenci minimálně. Nedostatkové průtoky se v povodí Modravy vyskytují nejvíce v zimě. Naopak v níže položeném profilu Sušice to jsou letní měsíce. To odráží charakteristiky horského povodí, kde v zimních měsících je voda zadržena ve sněhové pokrývce a je zřejmé, že ve výše položených partiích bude tento stav trvat déle. Více vody je nicméně třeba ve vegetačním období, z toho důvodu je lepší používat měsíční hodnoty limity.



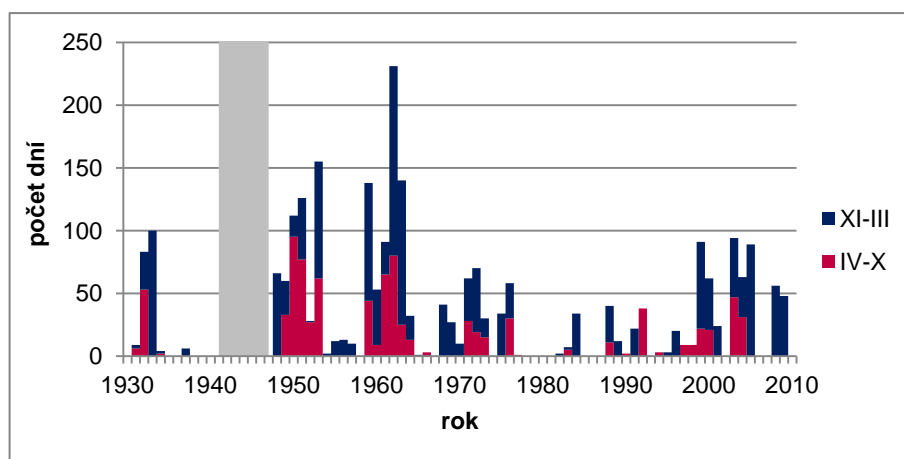
Obr. 12: Roční režim nízkých průtoků (zdroj: ČHMÚ)

Minimální měsíční průtoky ve měřeném období byly zkoumány pomocí minim pětidenního klouzavého průměru průtoků (Obr. 13). Při porovnání dvou třicetiletých období 1950-1980 a 1981-2011 byly nalezeny následující změny: průměr minim za jednotlivé měsíce klesl v měsících květen až červenec a to v případě května o $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Naopak v pozdějších měsících minima lehce vzrostla.

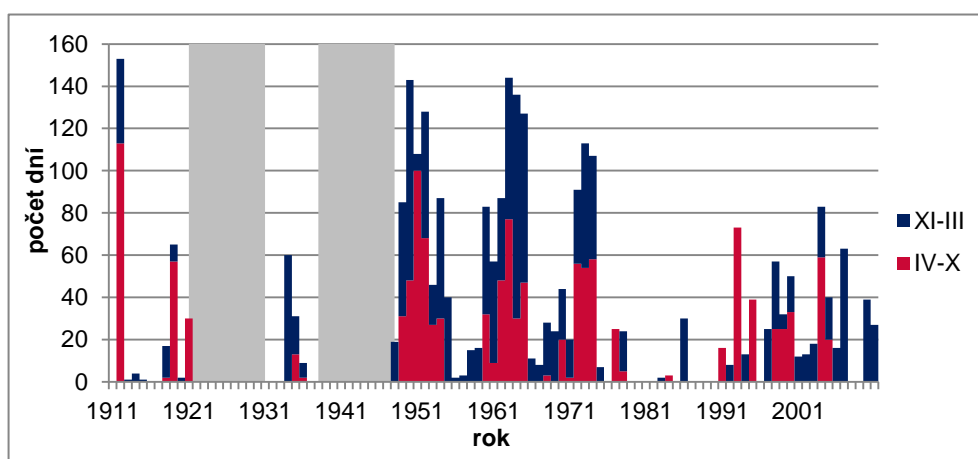


Obr. 13: Měsíční minima pětidenního klouzavého průměru na profilu Sušice (zdroj: ČHMÚ)

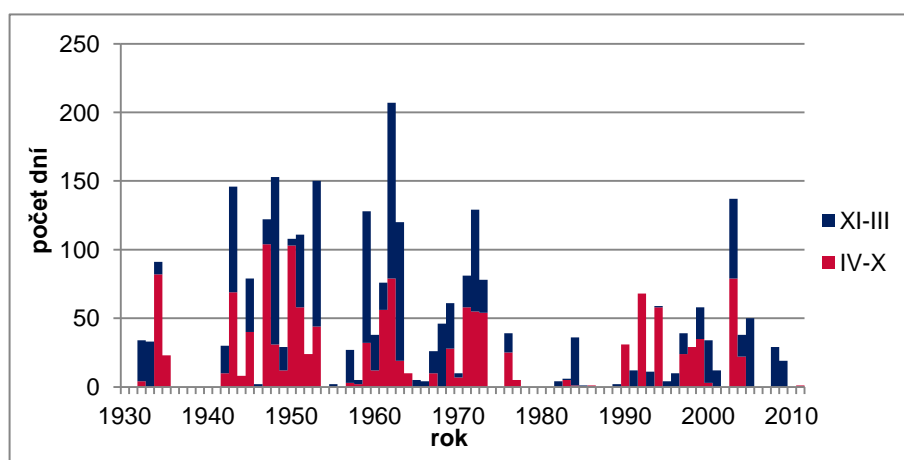
Dny s překročením fixní limitní hodnoty jsou pro jednotlivé profily na Obr. 14, Obr. 15 a Obr. 16. Byla použita fixní hodnota, proto jsou dny s nedostatkovým průtokem rozděleny na zimní a letní měsíce. Z grafů je patrné, že roky s deficitem se sdružují. Dají se určit suchá období vymezená roky 1948-1953, 1959-1964 a 1968-1976. Od konce 70. let do roku 1999 bylo poměrně vyrovnané období, kdy k poklesům průtoků docházelo výjimečně. Od roku 1999 počet dní s nedostatkovým průtokem opět narůstá, ačkoliv jejich počet nedosahuje hodnot 50. až 60. let. Větší nárůst je zaznamenán v profilu Sušice. To může být v níže položených profilech způsobeno zmiňovaným zvyšováním teplot a poklesem srážek od dubna do června. Chod deficitních průtoků nicméně odpovídá ročním průměrným srážkovým úhrnům, kde, jak již bylo konstatováno, nedochází k takovým poklesům jako právě v suchých obdobích v 40. a 60. letech.



Obr. 14: Počet dní s nedostatkovým průtokem pod Q90% s vyznačeným podílem hodnot v zimním a letním období v profilu Modrava (zdroj: ČHMÚ)



Obr. 15: Počet dní s nedostatkovým průtokem pod Q90% s vyznačeným podílem hodnot v zimním a letním období v profilu Rejštejn (zdroj: ČHMÚ)



Obr. 16: Počet dní s nedostatkovým průtokem pod Q90% s vyznačeným podílem hodnot v zimním a letním období v profilu Sušice (zdroj: ČHMÚ)

Pomocí algoritmu SPA byly definovány největší období sucha v jednotlivých profilech (Tab. 5, Tab. 4, Tab. 3). Délka sucha je uvažována až do znovunaplnění chybějících zásob vody. Do tabulek byla vybrána ta sucha, která byla nad určitou hodnotu kumulovaného průtoku (uvedeno pod tabulkou) a která zasáhla do letního období. Z tohoto pohledu bylo největší sucho v roce 1962 s maximem 8. 3. 1963, kumulovaný deficit trval 211 dní na profilu Sušice, déle trvalo na profilu Modrava. K největším suchům s kumulovaným deficitem přes 100 dní se řadí sucha ve 40. letech, v roce 1944, 1947 a 1949. V posledních třiceti letech k takto dlouhým suchům nedocházelo, sucho s maximální kumulovanou délkou bylo v roce 2003 v délce 62 dní (profil Rejštejn). Na profilu Modrava jsou ještě zaznamenána sucha dlouhá přes sto dní v roce 1954 a 1959.

Tab. 3: SPA pro Q 90 – profil Modrava

datum	dny	Qdef	datum	dny	Qdef	datum	dny	Qdef
17.10.1932	66	7,13	12.11.1951	68	19,91	24.9.1963	14	2,56
9.8.1949	12	1,18	31.8.1952	33	2,05	11.4.1964	120	37,02
24.10.1949	24	2,87	6.1.1954	129	36,59	8.10.1964	8	2,88
11.11.1949	14	5,19	25.12.1959	103	29,95	8.11.1971	19	1,1
19.9.1950	83	20,24	9.8.1961	11	1,82	16.10.1976	16	3,18
9.11.1950	42	7,35	14.9.1961	18	1,59	20.8.1988	9	1,05
16.8.1951	18	3,41	16.10.61	30	9,9	31.8.1992	25	1,503
2.9.1951	7	1,64	6.4.1963	249	137,61	3.10.2003	54	5,723
						22.9.2004	22	3,733

(pozn.: Vybrány deficitní události $Q_{def} > 1$ a s dobou trvání zasahujících IV až X)

Tab. 4: SPA Q 90 - profil Rejštejn

datum	dny	Qdef	datum	dny	Qdef	datum	dny	Qdef
29.6.2018	40	38,4	25.12.1959	89	50,835	30.10.1976	30	11,87
1.10.2018	14	4,21	17.10.1961	31	22,885	21.10.1992	82	36,32
24.8.2020	17	8,105	9.11.1961	14	4,51	10.8.1994	13	4,265
13.3.1949	171	158,635	8.3.1963	220	259,37	26.9.1994	26	6,01
9.8.1949	12	6,04	25.9.1963	12	3,41	1.10.1997	17	5,935
11.11.1949	51	27,985	7.11.1963	21	9,065	21.8.1998	15	6,375
20.9.1950	92	50,38	10.8.1964	12	4,43	2.11.1999	20	5,61
21.11.1951	75	50,855	7.10.1964	27	8,355	4.10.2003	62	37,57
31.8.1952	38	14,47	23.10.1972	32	18,96	21.9.2004	21	9,495
11.1.1954	125	51,225	15.10.1973	58	21,05			

(pozn.: Vybrány deficitní události $Q_{def} > 3$ a s dobou trvání zasahujících IV až X)

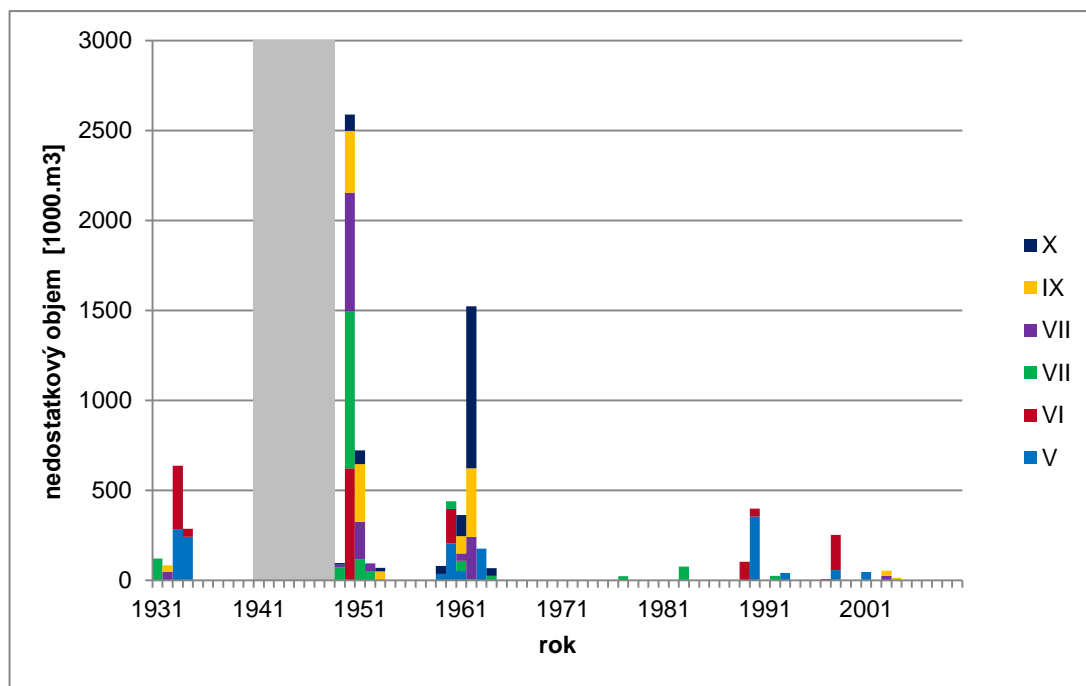
Tab. 5: SPA Q 90 – profil Sušice

datum	dny	Qdef	datum	dny	Qdef	datum	dny	Qdef
4.8.1934	33	7,22	15.3.1954	188	80,23	30.10.1976	30	9,35
13.10.1934	35	5,2	25.12.1959	88	75	29.9.1992	60	41,51
10.1.1944	147	86,85	17.10.1961	31	19,29	7.8.1994	10	6,45
9.8.1945	11	7	8.3.1963	211	263,27	26.9.1994	28	15,1
23.9.1945	29	17,61	7.11.1969	28	13,08	1.10.1997	16	5,46
9.11.1947	110	155,65	21.8.1971	17	5,15	21.8.1998	15	8,16
13.3.1949	171	176,2	9.11.1971	35	15,33	2.11.1999	19	7,67
19.9.1950	91	58,54	23.10.1972	32	15,86	4.10.2003	62	62,9
21.11.1951	75	38,54	15.10.1973	42	21,16	11.12.2003	41	16,92
						22.9.2004	20	9,4

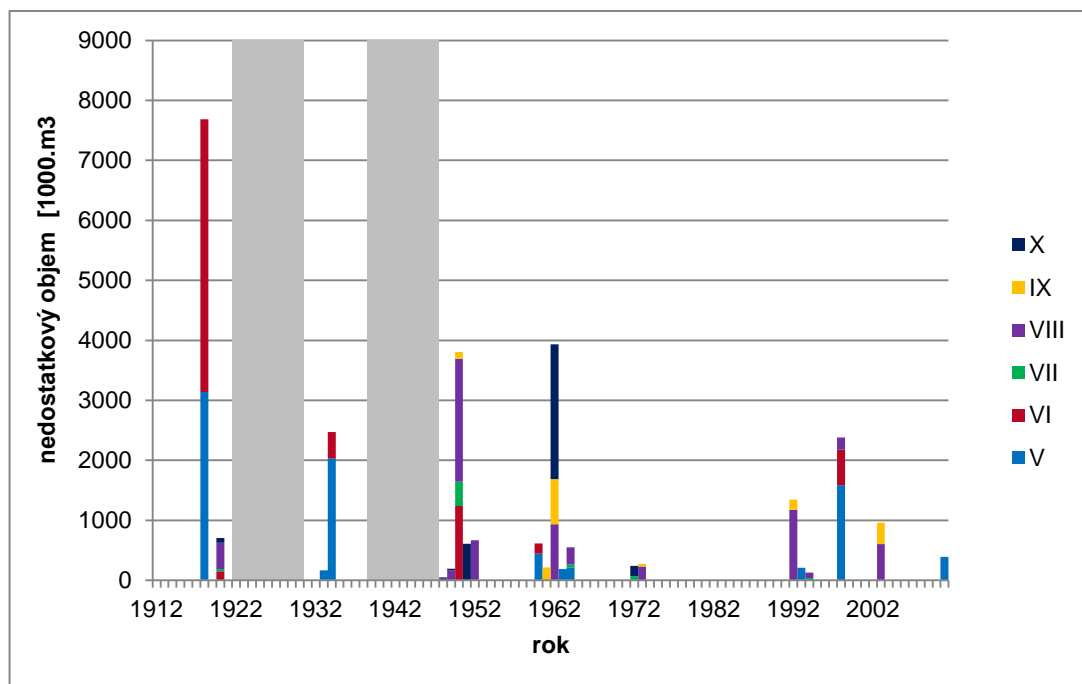
(pozn.: Vybrány deficitní události Qdef > 5 a s dobou trvání zasahujících IV až X)

Nedostatkové objemy pro profily byly zkoumány na základě variabilních hodnot Q_{m95} , přičemž byly v potaz brány jen období s délkou sucha minimálně tři dny. Je logické, že období nedostatkových objemů kopírují uvedená deficitní období. Níže jsou uvedeny grafy s měsíčním rozložením nedostatkových objemů v měsících květen až říjen (Obr. 17, Obr. 18, Obr. 19). Nedostatkové objemy v současné době nedosahují takových hodnot, jako ve 40. a 60. letech a opět se ukazuje, že s klesající nadmořskou výškou profilu je tento rozdíl menší. Je rovněž patrné, že tyto nedostatkové objemy se projevují v dřívější části roku, v květnu a červnu, což potvrzuje fakt poklesu srážek v tomto období.

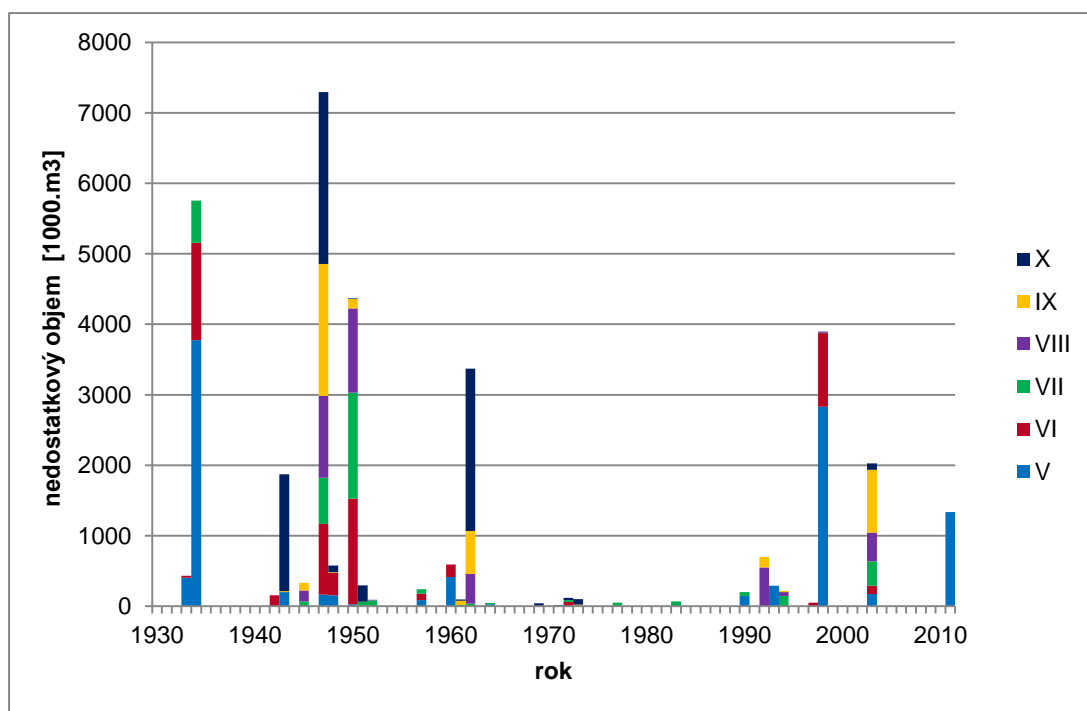
Největší deficit naměřený na profilu Sušice z roku 1947 má hodnotu 7,24 mil. m³. V posledních letech největší deficit nastal v roce 1998, kdy k minimálnímu průtoku chybělo 3,65 mil. m³ a v roce 2003, kdy byl deficit 1,94 mil. m³.



Obr. 17: Nedostatkový objem v měsících květen až říjen na profilu Modrava v období 1931 až 1940 a 1949 až 2011 (zdroj: ČHMÚ)

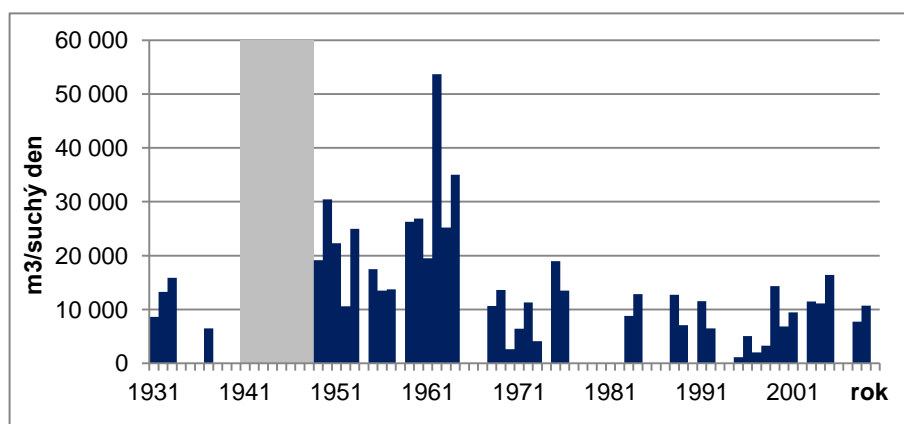


Obr. 18: Nedostatkový objem v měsících květen až říjen na profilu Rejštejn v období 1912 až 1921, 1931 až 1938 a 1948 až 2011 (zdroj: ČHMÚ)

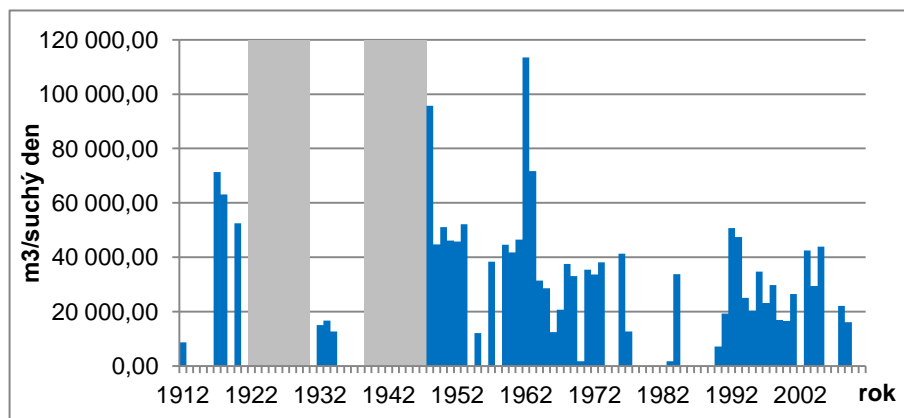


Obr. 19: Nedostatkový objem v měsících květen až říjen na profilu Sušice v období 1930 až 2011 (zdroj: ČHMÚ)

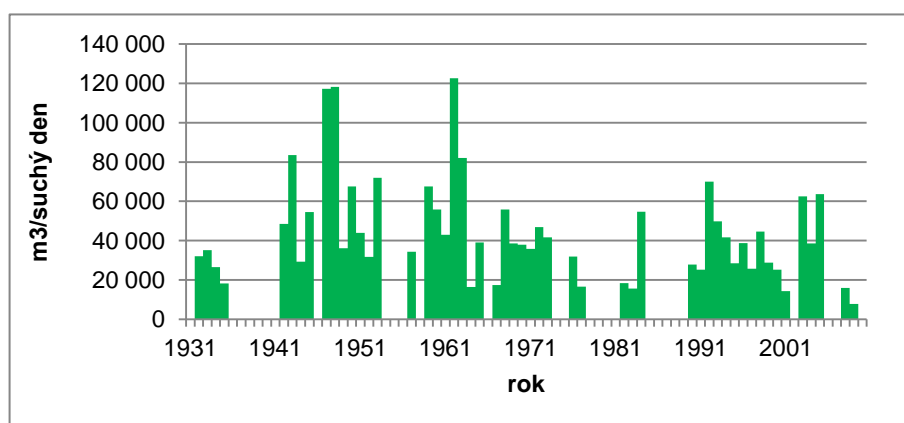
Intenzita sucha vyjadřuje podíl doby trvání a nedostatkového objemu (Obr. 20, Obr. 21, Obr. 22). Byly vybrány periody sucha v délce alespoň tři dny a jako limitní hodnota byla brána fixní roční limita Q_{90} . Na profilu Modrava intenzita sucha od 70. let klesla. V níže položených profilech je tento rozdíl zřetelný o něco méně. Na profilu Modrava v posledním desetiletí je tato hodnota průměrně $11\,154\text{ m}^3$, tzn., že pokud v posledním desetiletí klesl průtok pod hodnotu Q_{90} , deficitní objem v tomto dni byla průměrně výše zmíněná hodnota. Pro profil Rejštejn je to $33\,361\text{ m}^3$ a pro profil Sušice $47\,743\text{ m}^3$.



Obr. 20: Intenzita sucha na profilu Modrava (zdroj: ČHMÚ)



Obr. 21: Intenzita sucha na profilu Rejštejn (zdroj: ČHMÚ)



Obr. 22: Intenzita sucha na profilu Sušice (zdroj: ČHMÚ)

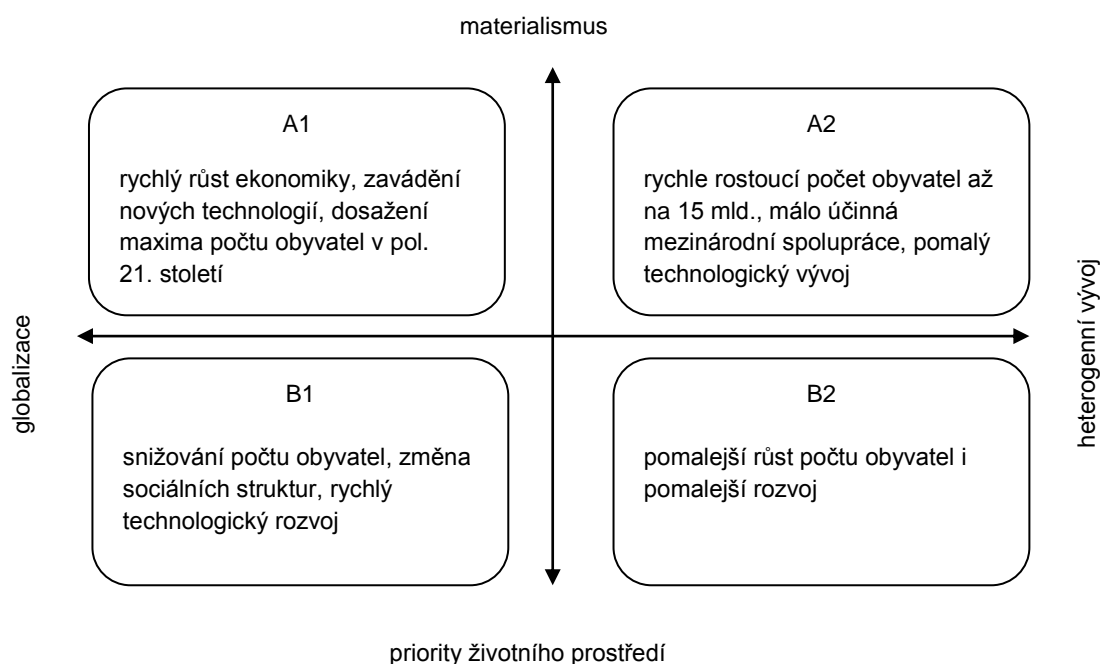
Výše uvedené výsledky lze v podstatě shrnout do tvrzení, že v současné době dochází opět k výskytu nedostatkových průtoků po jakési „pauze“. Tyto nedostatkové objemy však nedosahují takové hodnoty jako během nejhorších such okolo roku 1949 a 1962. Z měsíčních charakteristik lze vyzorovat větší podíl nedostatkových objemů v květnu a červnu. To potvrzuje i trend minimálních průtoků, stejně jako chod klimatických veličin, kde je zaznamenán pokles srážek v těchto měsících.

Zjištěná fakta potvrzuje rovněž trend nedostatkových objemů, který byl zkoumán během projektu VÚV TGM (2010). Testu trendu bylo podrobena několik povodí, včetně profilu Sušice. V ročních standardizovaných nedostatkových objemech vymezených průtokem Q_{m95} byl v období 1947-2007 trend klesající (na úrovni 0,05), v období 1961-2007 byl bez trendu.

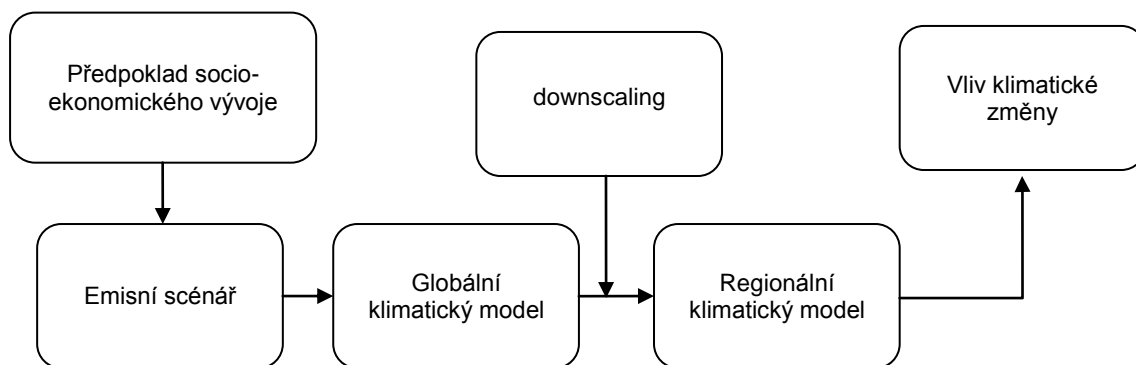
4 VLIV KLIMATICKÉ ZMĚNY NA HYDROLOGICKÉ SUCHO

Modelování změn klimatu vychází z budoucího ekonomického a společenského směřování společnosti, které ale není možné s jistotou predikovat. Pro tyto účely určilo IPCC modelové emisní scénáře označované SRES, demonstrující různé varianty vývoje společnosti, jak je ukázáno na obrázku níže (Obr. 23). Scénáře vývoje reprezentované změnou koncentrací skleníkových plynů jsou do modelů vkládány pomocí změn teplot a dalších klimatických parametrů, na základě kterých jsou interpretovány následky změny. Scénáře změn se projektují k roku 2100 vzhledem k referenčnímu období 1960-1990 za předpokladu udržení jistého trendu. Tato data vstupují do globálních klimatických modelů. Následně pro aplikaci výsledků nad menší území je nutné provést downscaling pro regionální klimatické modely (Obr. 24).

Nejistota modelů pramení nejen z budoucího směřování, ale také z historických dat 2. pol. 20. století, pro které se provádí kalibrace a následně validace. Tyto nejistoty je možné částečně odbourat několikanásobným během, kdy je mírně pozměněn počáteční stav, nebo jsou pozměněna parametrizační schémata. Hlavní spornou otázkou klimatického modelování je délka dostupných řad, ze které lze těžko vypozařovat přirozenou variabilitu klimatu (ČHMÚ).



Obr. 23: Scénáře SRES socioekonomického vývoje (zdroj: IPCC 2007)



Obr. 24: Proces modelování vlivu klimatické změny na vodní zdroje

4.1 Globální klimatické modely

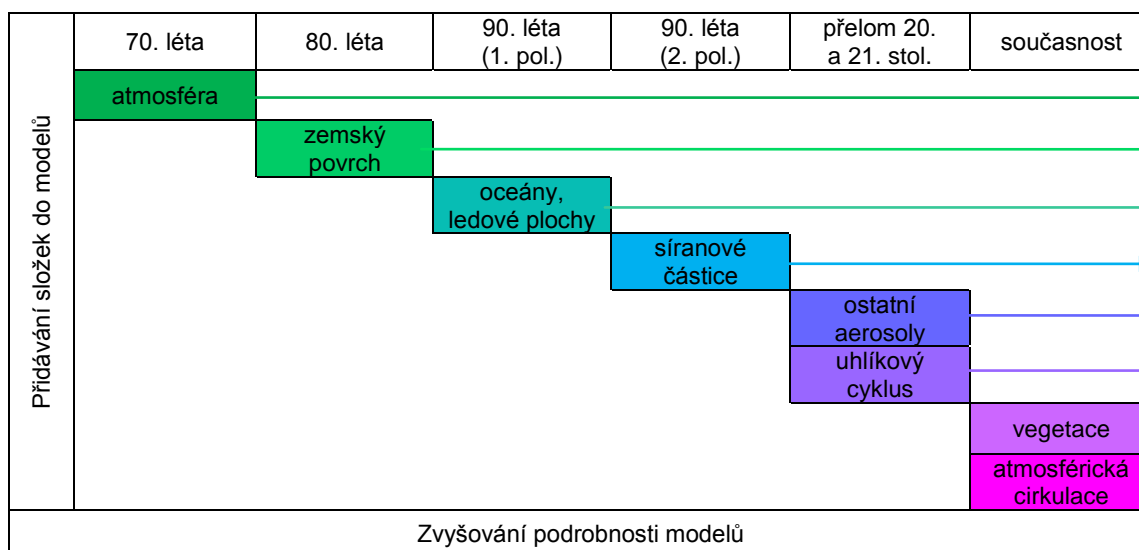
Klimatické modely jsou matematickou reprezentací fyzikálních a chemických vztahů, které probíhají v klimatickém systému Země. Tyto modely potom simulují řetězce příčin a následků a jejich zpětné vazby. Jedná se o simulaci zjednodušenou, neboť vazby klimatického systému jsou značně složité. Přesnost, ale i složitost modelů roste a je často limitována technickými možnostmi (Tab. 6).

Klimatické modely se skládají z bilančních rovnic: energetických, hydrologických a hmotových. Tyto rovnice jsou aplikovány na jednotlivé buňky sítě. Rozlišení sítě závisí na výpočetních možnostech dostupné techniky.

Modely všeobecné cirkulace atmosféry spojené s modely oceánů jsou označovány jako *global circulation/climate model* (GCM). Dalšími složkami bývají biosféra, uhlíkový cyklus, mořský led. Rozlišení gridové sítě bodů je obvykle 2-4° zeměpisné sítě. Ve vertikální rovině mají modely 25-40 hladin v atmosféře a 20-30 rovin v oceánu. Model dokáže zachytit pouze procesy, které jsou větší než jeho gridová síť, není tedy schopen zachytit lokální události a zahrnout např. orografii (ČHMÚ).

V evropských projektech byl použit např. model HadCM, vytvořený v roce 1999 v Haddley centre. Dalším příkladem je model ECHAM5 z Max Planck Institute for Meteorology, vytvořený již v roce 1987, nebo model ARPEGE, využívaný např. pro český model ALADIN/CLIMATE. Byl vytvořen v Meteo France v 90. letech původně jako model operativní předpovědi počasí. Řídícím modelem projektu ENSEMBLE je ERA 40. Vznikl z upravených dat atmosféry a povrchu za posledních 45 let na ECMWF roku 2002.

Tab. 6: Vývoj složitosti GCM od 70. let do současnosti (zdroj: ČHMÚ)



4.2 Regionální klimatické modely

Pro modelování regionálních odlišností je třeba provést tzv. *downscaling*, tedy zmenšení měřítka. Pro tento účel se používají regionální modely klimatu (RCM) se vstupními parametry, tzv. okrajovými podmínkami, vypočítanými globálním řídicím modelem. Tyto modely mají v současnosti rozlišení 5 až 10 km², jsou tedy aplikovány pro menší území, např. střední Evropu. V posledních letech modely prošly překotným vývojem a byly řešeny projekty, které hodnotily a propojovaly doposud používané RCM, jako evropské projekty ENSEMBLE, CECILIA a PRUDENCE.

Projekt ENSEMBLE je společným projektem vědeckých institucí zastřešených Evropskou komisí. Projekt se zaměřoval na společný systém projekcí klimatu pro různá časová a prostorová měřítka, který probíhal pět let od r. 2004. Zaměřoval se zejména na variabilitu změny klimatu a extrémní události. Jelikož regionální modely mají široké spektrum výsledků (i pokud jsou vstupní hodnoty ovlivněné stejným scénářem), byl vytvořen systém, který regionálním klimatickým modelům přidává váhu založenou na schopnosti reprodukovat pozorované charakteristiky atmosférických proměnných v různých časových a prostorových měřítkách. Tyto váhy potom určují kvalitu modelu. Systém vah aplikovaných na regionální klimatické modely zahrnuté do projektu ENSEMBLE následně vytváří celkový model (Lorenz, Jacob 2010).

V Česku vznikl model ALADIN-CLIMATE/CZ. Je řízen globálním klimatickým modelem ARPEGE podle emisního scénáře SRES A1B, horizontální rozlišení 25x25 km. Za okrajové podmínky model bere globální model ERA 40. Podle Meteo France model podhodnocuje teploty ve střední a východní Evropě, zejména v období pozdní zimy a jara. Léto a podzim model ukazuje relativně sušší. Tyto systematické chyby jsou však prostorově variabilní.

Další modely využívané v evropských projektech jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7). Odlišnosti mezi modely jsou mimo jiné v zahrnutí orografických podmínek, ty využívá např. model HIRHAM. Dalším příkladem odlišnosti je gradient západovýchodního proudění, jehož efektem je ovlivněn model RCA3.0.

Tab. 7: Regionální modely využité v projektu ENSEMBLE

Název modelu	označení	Řídící GCM	Tvůrce
ALADIN-CLIMATE/CZ	ALA_Q	ARPEGE	Český hydrometeorologický ústav, CZ
ENSAMBLE	ENS_AVE	ERA40	Swiss Federal Institute of Technology Zurich
HadRM3.0	HadRM_Q0	HadCM Q0	Met Office Hadley Centre, UK
HadRM3.0	HadRM_Q3	HadCM Q3	Met Office Hadley Centre, UK
HadRM3.0	HadRM_Q16	HadCM Q16	Met Office Hadley Centre, UK
CLM2.4.6	CLM_Q0	HadCM Q0	Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ)
HIRHAM5	HIR_ARP	ARPEGE	Danish Meteorological Institute
HIRHAM5	HIR_EH5	ECHAM5	Danish Meteorological Institute
RACMO2.1	RACMO_EH5	ECHAM5	Royal Netherlands Meteorological Institut
RCA3.0	RCA_EH5	ECHAM5	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
RCA3.0	RCA_Q3	HadCM Q3	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
RCA3.0	RCA_Q16	HadCM Q16	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
RegCM3	RegCM_EH5	ECHAM5	Abdus Salan International Centre for Theoreticak Physics, Italy
REMO5.7	REMO_EH5	ECHAM5	Max Planck Institute for Meteorology

4.3 Modelování vlivu klimatické změny na vodní zdroje

Klimatický a hydrologický systém jsou propojeny zpětnými vazbami. Změní-li se klima, má to nutně dopad na vodní zdroje. Detekování a projekce změn jdou důležité činnosti z toho důvodu, že nakládání s vodními zdroji je obvykle plánováno pro stacionární podmínky.

Určení vlivu klimatické změny na vodní zdroje má dvě fáze. Je to jednak pozorování a analýza současných trendů, a pak projekce klimatických scénářů do hydrologických modelů. Při modelování je třeba mít na paměti, že model je ze své podstaty zjednodušená matematická reprezentace fyzikálních vztahů v povodí a správnost úsudku závisí na jejich interpretaci. Spolehlivost výsledku závisí na použitém modelu, tj. numerické správnosti popsání fyzikálních rovnic a zahrnutých hydrologických procesech. Druhým faktorem je kvalita vkládaných dat a prostorová a časová rovina.

Používají se hlavně fyzikálně založené celistvé a distribuované modely. Celistvé modely se skládají z množství matematických rovnic, které popisují jevy v povodí. Uvažují povodí jako homogenní celek s jedním závěrovým profilem. Pro tyto účely byl ve VÚV T.G.M. vyvinut model BILAN, který hodnotí hydrologickou bilanci povodí mezi nasycenou a nenasycenou zónou. Distribuované modely jsou účinnější, ale také náročnější na vstupní data. Distribuované numerické modely se používají pro výpočet prostorové variability. Zohledňují land use, půdní vlastnosti, hydrogeologické vlastnosti a rozložení hydrologické sítě. Mezi tyto modely patří SHE, MODFLOW a SIMGRO.

4.3.1 Model BILAN

Model hydrologické bilance BILAN byl vyvinut ve VÚV TGM. Simuluje prvky srážkoodtokové bilance v povodí pomocí základních bilančních rovnic v nasycené i nenasycené zóně. Model je používán mimo jiné k odhadu dopadů klimatické změny na vodní zdroje (Kašpárek, Novický 2013).

Vkládanými daty jsou průměrné měsíční hodnoty teploty [°C] a srážek [mm]. Volitelně lze vložit data relativní vlhkosti vzduchu nebo využít režimu výpočtu s Oudinovou rovnicí. Pro kalibraci je nutné rovněž vložit data odtoku [mm]. Časový krok je jeden měsíc, později by vytvořen model s jednodenním krokem. Model simuluje evapotranspiraci, infiltraci do půdy a perkolaci do zvodně a generuje množství vody

ve sněhu, v půdě a zvodni. Hlavním výsledkem je časové řada odtoku skládající se ze tří složek: základní odtok, odtok z půdy a přímý odtok. Při výpočtu je povodí rozděleno na tři úrovně – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody - uvažované jako soustava nádrží.

Teplota určuje zimní a letní režim výpočtu. Mezníkem je 0 °C, kdy začíná tání. Tající sníh a srážky jsou infiltrovány do půdy. Z půdy je voda čerpána vegetací v míře potenciální evapotranspirace, dokud je v půdě dostatečné množství vody. Když je vody v půdě nedostatek, hodnota evapotranspirace klesne z potenciální na aktuální míru. Pokud množství vody v půdě přesahuje hodnotu potenciální evapotranspirace, je přebytek transportován do zvodně. Jednotlivé složky odtoku jsou generovány přebytkem vody, který odtéká skrze půdu a zvodně při vysokých srážkách. Výpočet potenciální evapotranspirace je odvozen z předpokládané bioklimatické zóny určené na základě teploty.

Pro výpočet simulovaných řad je nutné stanovit osm parametrů (kapacita půdní vláhy, parametr přímého odtoku, perkolace apod.). Tyto parametry musejí být kalibrovány pomocí pozorovaných řad. Kalibrace je doporučena provést na konci časové řady s úsekem 5-10 let.

4.4 Vliv klimatické změny na odtok z povodí horní Otavy

Model BILAN byl vybrán z několika důvodů. Byla to jednak dostupnost, relativní nenáročnost na data i výpočetní kapacitu, a pak také jeho dosavadní široké užití v Česku, které umožňuje srovnání výsledků pro další povodí.

V této části práce byly zkoumány měsíční charakteristiky. Byl posuzován profil Sušice, protože vzhledem k dostupnosti dat a problémům s kalibrací by informace z jiných profilů ze zájmového povodí nepřinesly lepší ani srovnatelné informace. Byla modelována čtyři časová rozmezí 28letých období. Kalibrace parametrů proběhla na datech z hydrologických let 1947-1980 počínajících listopadem. Výsledkem modelace byla období označované referenčním rokem, náležitým přibližně do středu těchto období, 2025 (2011-2040), 2055 (2041-2070), 2083 (2071-2100). K těmto rokům se vztahují průměrná data modelace.

Byly použity metody MAE (mean absolute error) pro první část a MAPE (mean absolute percentage error) pro druhou. Výsledné kritérium MAPE vycházelo 0,2, což lze považovat za dobrou, nikoliv však 100 % shodu. Tato odchylka je třeba brát v úvahu

při vyvozování závěrů. Validace modelu nebyla provedena, neboť řady by pak nedosahovaly požadované délky.

4.4.1 Vstupní data

Jako vstupní data byly využity časové řady srážek, teplot a vlhkosti vzduchu z databáze VÚV TGM v měsíčním časovém kroku. Pro kalibraci byly využity měsíční časové řady průtoků z databáze ČHMÚ. Z těchto kalibrovaných řad byl vyexportován textový soubor parametrů, které byly do modelu vkládány při modelaci průtoků. Jako další parametry modelu byly využity defaultní hodnoty 50 mm pro hladinu podzemní vody a 50° severní šířky.

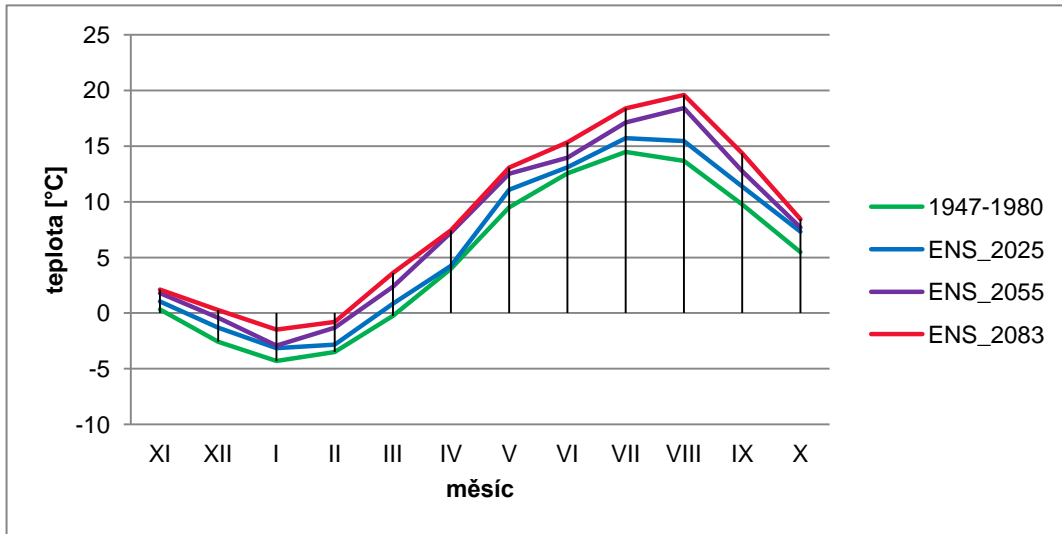
Vstupní časové řady pro modelaci období k referenčním rokům 2025, 2055 a 2083 vycházely z období 1947-1980 a byly přírůstkovou metodou (*delta method*) přizpůsobeny jednotlivým scénářům. Přírůstková metoda upravuje pozorované řady tak, aby vykazovaly stejné průměrné měsíční změny jako RCM simulace pomocí koeficientů (Hanel, Vizina 2010). Do modelu BILAN jsou potom tyto řady vkládány v textovém formátu .prn.

4.4.1.1 Teploty

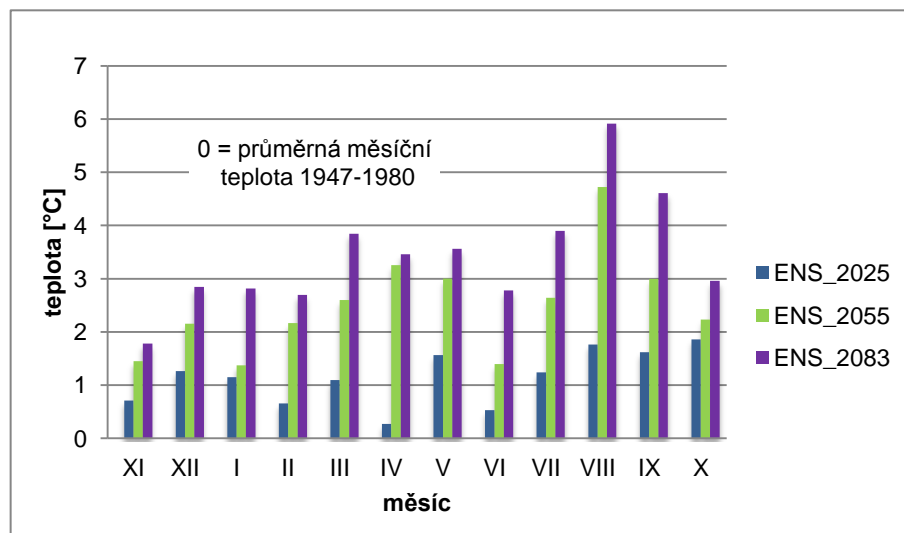
Časové řady teplot byly vytvořeny pomocí koeficientu přičteného k řadám teplot referenčního období 1947-1980. Vznikly tak řady, které jsou závislé jak na parametrech regionálního, tak globálního modelu. Tyto koeficienty byly až na výjimky kladné. Rozptyl hodnot koeficientů mezi scénáři se směrem do budoucnosti zvětšuje, trend však zůstává zřetelný.

V období k roku 2025 je největší rozdíl mezi modely 3,45 °C v dubnu a 2,93 °C v lednu. Mezi modely pro rok 2055 se už rozdíl přes 3 °C vyskytuje ve třech měsících v lednu, březnu, a největší rozdíl v srpnu. Ve třetím období 2083 je už rozdíl mezi scénáři poměrně velký, maximální rozdíl je během pozdních letních měsíců, srpna (4,85 °C) a září (5,2 °C). Grafy ukazující rozdíl mezi současným stavem a modely jsou na Obr. 27. Demonstrují zejména to, z jakého spektra dat se skládají předpovědi jednotlivých modelů a komplexního modelu ENSEMBLE:

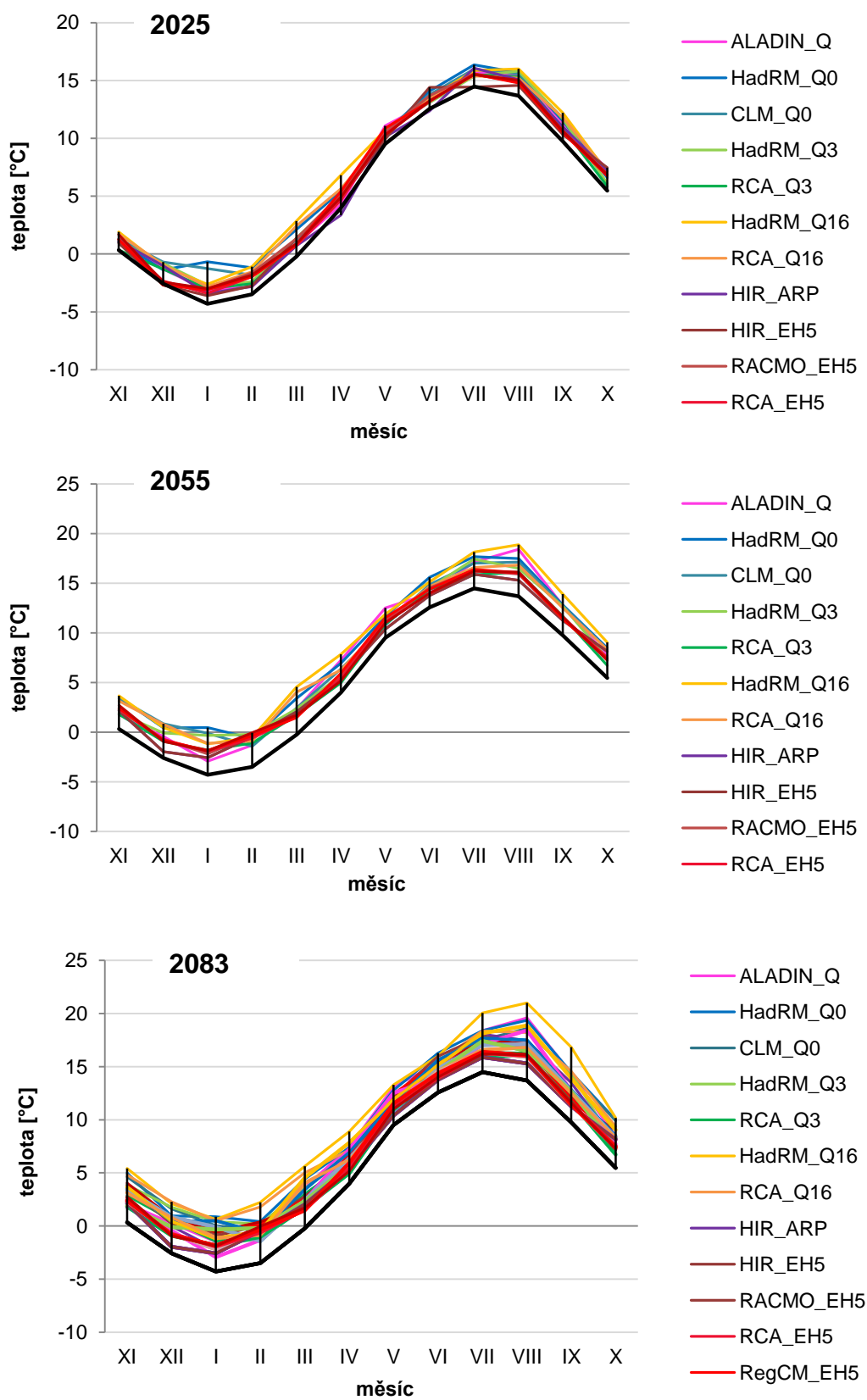
Jako souhrnná informace může posloužit model ENSEMBLE, jehož hodnoty pro všechna tři období jsou na grafech (Obr. 25 a Obr. 26). Lze z něj vyvodit zvyšování teplot v průběhu celého roku s největším nárůstem v srpnu, v období 2083 téměř o 6 °C. Nárůst průměrné roční teploty za třicetiletá referenční období podle modelu ENSEMBLE je 1,143 °C v období 2025, 2,5 °C v období 2055 a 3,43°C v období 2083.



Obr. 25: Vývoj průměrných teplot v referenčních obdobích v modelu ENSEMBLE (zdroj: VÚV TGM)



Obr. 26: Přírůstek teplot v referenčních obdobích oproti současným průměrným měsíčním hodnotám (zdroj: VÚV TGM)



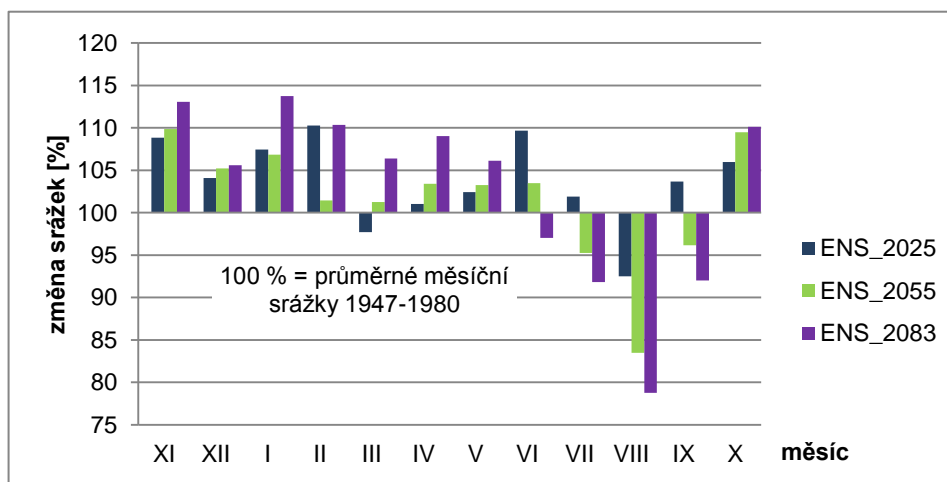
Obr. 27: Vývoj teplot v referenčních obdobích 2025, 2055 a 2083 vzhledem k současným průměrným měsíčním teplotám (zdroj: VÚV TGM)

4.4.1.2 Srážky

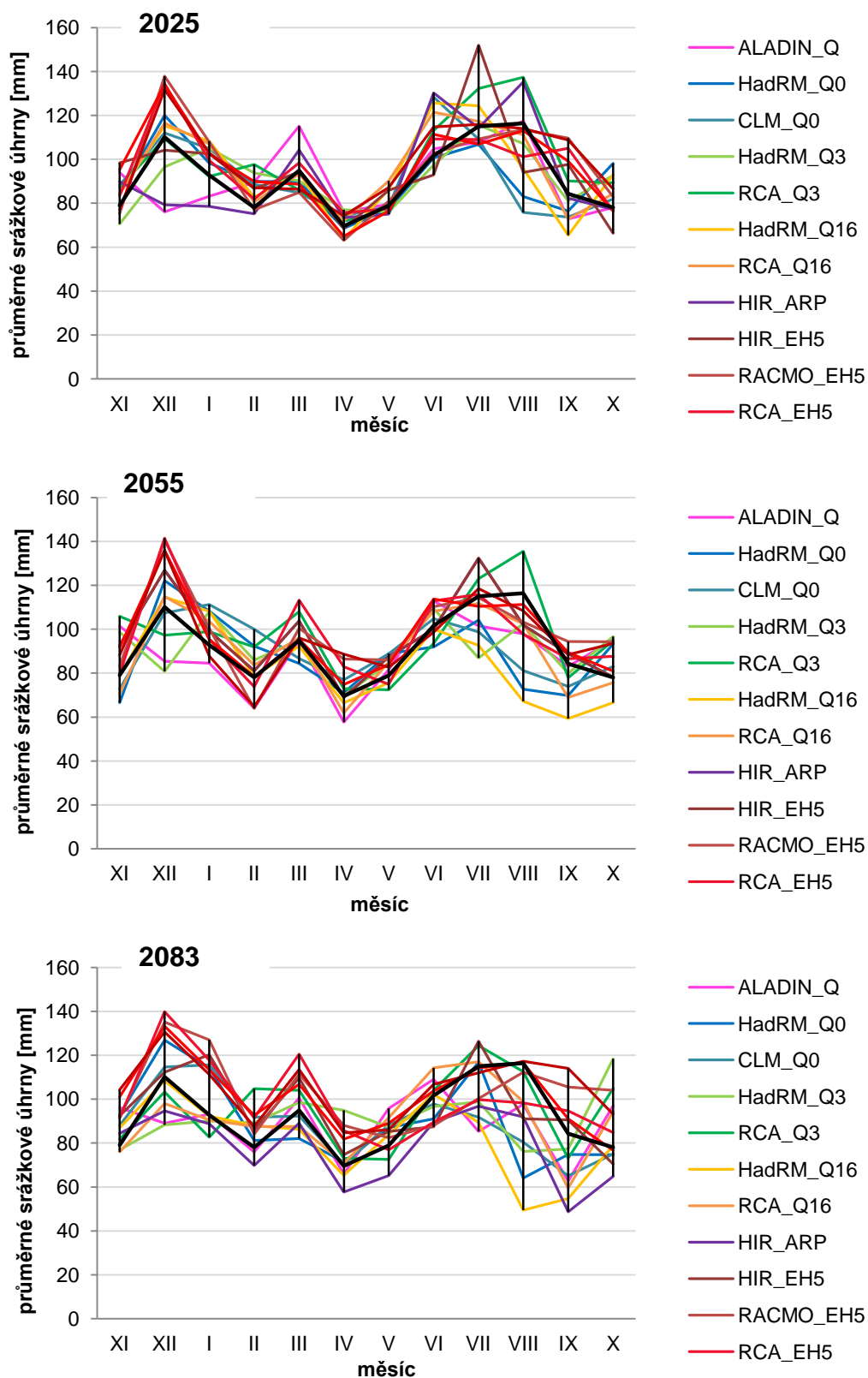
Časové řady srážek pro referenční období 2025, 2055 a 2083 byly vytvořeny rovněž přírůstkovou metodou pomocí procentuálních koeficientů. Scénáře pro srážková data vykazují mnohem větší variabilitu než teploty. Těžko z nich vyvodit pro povodí jasnou zákonitost. Příkladem může být prosinec referenčního období 2025, kdy průměrné srážky ukazují nárůst i úbytek přibližně stejnou měrou, tento rozdíl činí 61,7 mm. Rozdíl scénáře ALA_Q, který představuje pro tento měsíc minimum, představuje oproti současnému stavu zhruba -34 mm, naopak odhad podle scénáře RACMO_EH5 je +27,7 mm. Tuto variabilitu dokládá Obr. 29.

V zásadě se lze říci, že pro referenční období 2025 nejsou modely natolik jednotné, aby se podle jednotlivých modelů daly určit změny. Lze zde najít silné ovlivnění globálními klimatickými modely. Podobně nejednoznačný průběh mají i projekce pro období referenčního roku 2055. Nicméně v letních měsících lze konstatovat větší posun srážkových úhrnů pod současnou úroveň a to zejména u modelů řízených GCM Q16 a Q0. V referenčním roce 2083 je podle modelů markantní pokles úhrnů v červenci a srpnu, který ukazuje většina modelů, a to až o 57 %.

Podle souhrnného modelu ENSAMBLE (Obr. 28) je možné konstatovat, že zde jistá změna ve srážkových úhrnech pravděpodobně bude, ačkoliv roční průměrný úhrn se příliš nezmění. Je zde pozorovatelný postupný nárůst srážkových úhrnů v zimních měsících. A poměrně významný pokles v červenci až září v obdobích 2055 a 2083. V srpnu v 2083 je to pokles srážek až o 21,2 %. Z grafů je tedy znát že variabilita scénářů je vysoká a není zde jasně definovatelný trend, jako je tomu u teplot.



Obr. 28: Procentuální změna srážek v referenčních obdobích oproti současným průměrným měsíčním srážkovým úhrnům (zdroj: VÚV TGM)



Obr. 29: Srážkové úhrny podle jednotlivých modelů pro referenční období 2025, 2055 a 2083 a současné průměrné měsíční srážky (zdroj: VÚV TGM)

4.4.2 Odtok z povodí v podmínkách klimatické změny

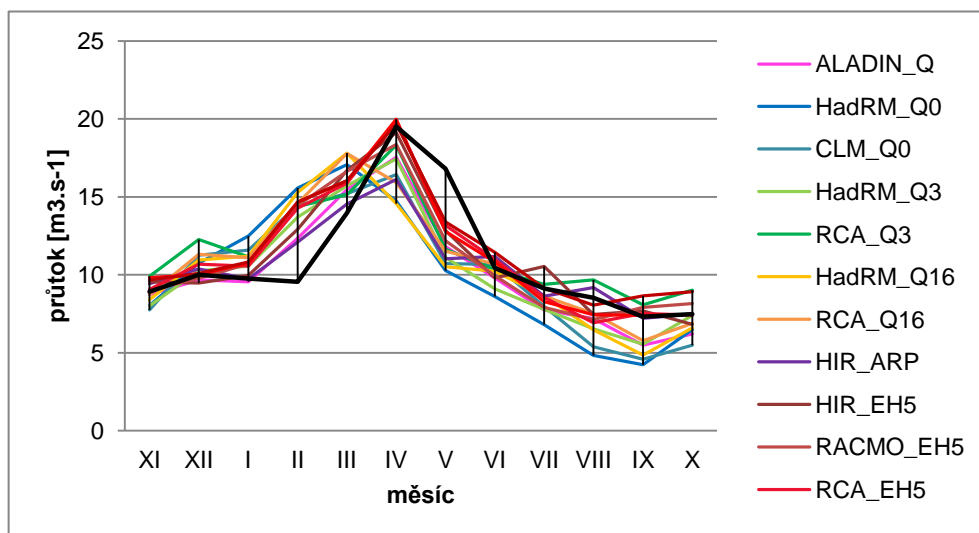
Pro modelaci byly využity scénáře, jejichž výčet je uveden v tabulce výše (Tab. 7). Z modelu ALADIN byla vybrána varianta Q, korigována kvantil-kvantilovou metodou, která podle Kliegrové a kol. (2010) poskytuje nejlepší výsledky. Největší důraz byl kladen na model ENSEMBLE.

Výstupy byly uloženy v textovém formátu a následně zpracovány v MS Excel, kde byla odtoková výška převedena na průtok a procentuálně porovnána s původním průměrným měsíčním průtokem. Pro jednotlivé měsíce byly vypočítány průměrné měsíční nedostatkové objemy pomocí limity 31 denního klouzavého Q_{90} .

Referenční období 2025

Poměrně blízká budoucnost je už provázena poměrně jasným trendem změny. Tím je nárůst průtoků brzy z jara především z důvodu dřívějšího tání. Výsledky jednotlivých modelací se liší a je na nich dobře patrný vliv řídicího GCM (Obr. 30).

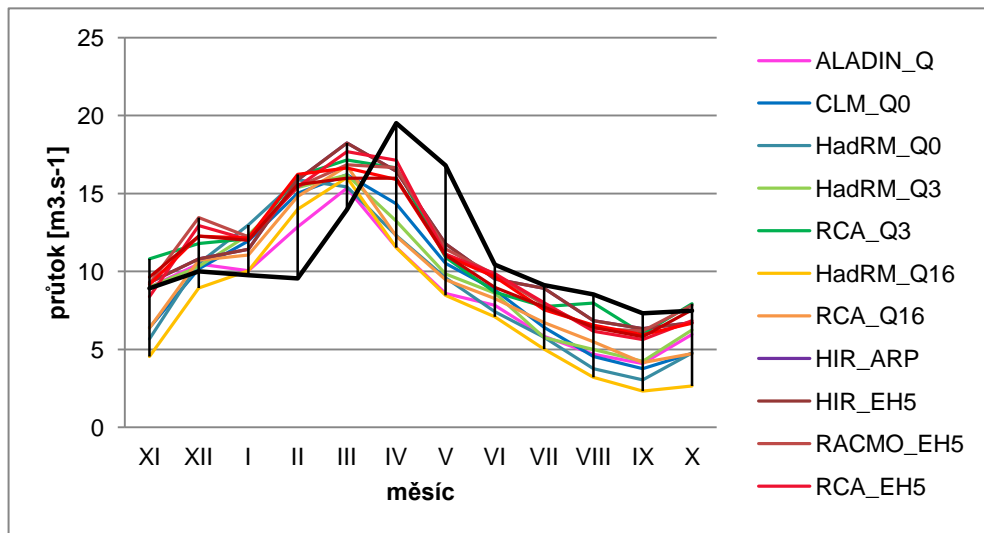
Největší březnový nárůst průtoků zaznamenává HadRM_Q0, což je dáno jeho nejvyššími přírůstky teplot, kterými se výrazně odchyľuje od ostatních modelů. V květnu všechny modely zaznamenávají výrazný úbytek. V měsících srpnu a červenci dochází ke snižování průtoků, což se nejmarkantněji projevuje v modelech řízených Q0 a Q16, tyto modely v tomto období měly také výrazně snížené srážkové úhrny.



Obr. 30: Modelovaný průtok pro jednotlivé scénáře v referenčním období 2025 a současný průměrný měsíční průtok (černě) (zdroj: VÚV TGM)

Referenční období 2055

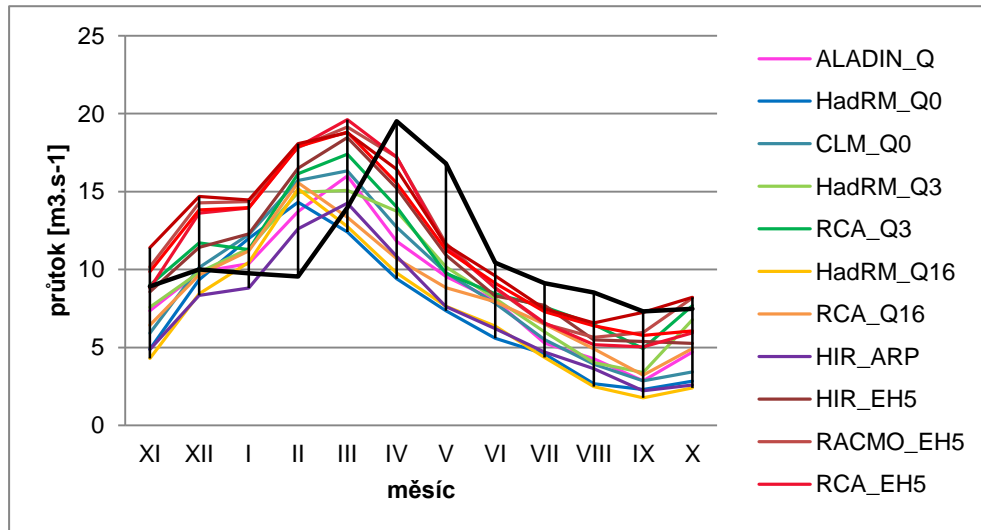
Jednotlivé modely pro období 2055 v podstatě prohlubují předvídaný vývoj pro období 2025, nárůst jarních a zimních průtoků s maximem v březnu a následně pokles letních a podzimních průtoků s minimem v září. Největší záporný rozdíl je v květnu, srpnu až říjnu (Obr. 31). V hodnotách pro září a říjen jsou modely nejvíce diferencované s rozdílem téměř 5 °C.



Obr. 31: Modelovaný průtok pro jednotlivé scénáře v referenčním období 2055 a současný průměrný měsíční průtok (černě) (zdroj: VÚV TGM)

Referenční období 2083

Modely jsou již v tomto období značně diferencované, avšak trend je z nich jasně patrný (Obr. 32). Nadále se zvyšují jarní průtoky, zejména v únoru a březnu. Pokles od května do listopadu je u všech modelů výrazný. K optimističtějším modelům patří modely řízené EH5, o něco méně optimistické jsou modely řízené Q3. Modely řízené ARP, mezi něž patří i český model ALADIN, patří spíše k těm pesimistickým, stejně jako modely řízené Q0 a Q16.



Obr. 32: Modelovaný průtok pro jednotlivé scénáře pro referenční období 2083 a současný průměrný měsíční průtok (černě) (zdroj: VÚV TGM)

Výsledky modelu ENSEMBLE

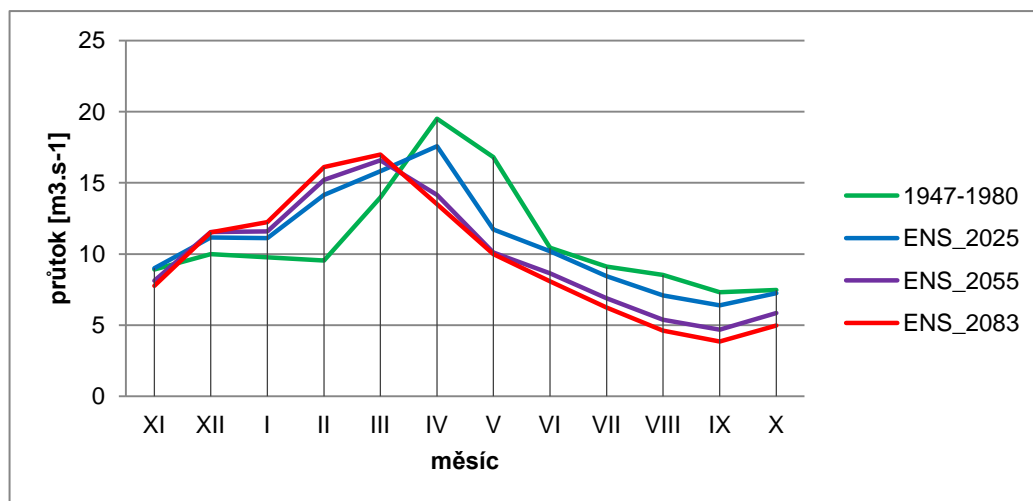
Pokud výsledky jednotlivých scénářů srovnáme s výsledkem komplexního modelu ENSEMBLE je patrné, že pomocí aplikovaných vah byl vytvořen vyrovnanější odtok, který si ovšem rysy předchozích modelací zachovává (Obr. 33).

V referenčním období 2025 je modelováno výrazné zvýšení průtoků v únoru o 48 % snížení maxima v dubnu o 9 %, největší pokles je projektován v květnu o 30 %, tzn. z $16,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a následně menší pokles průtoků až do října.

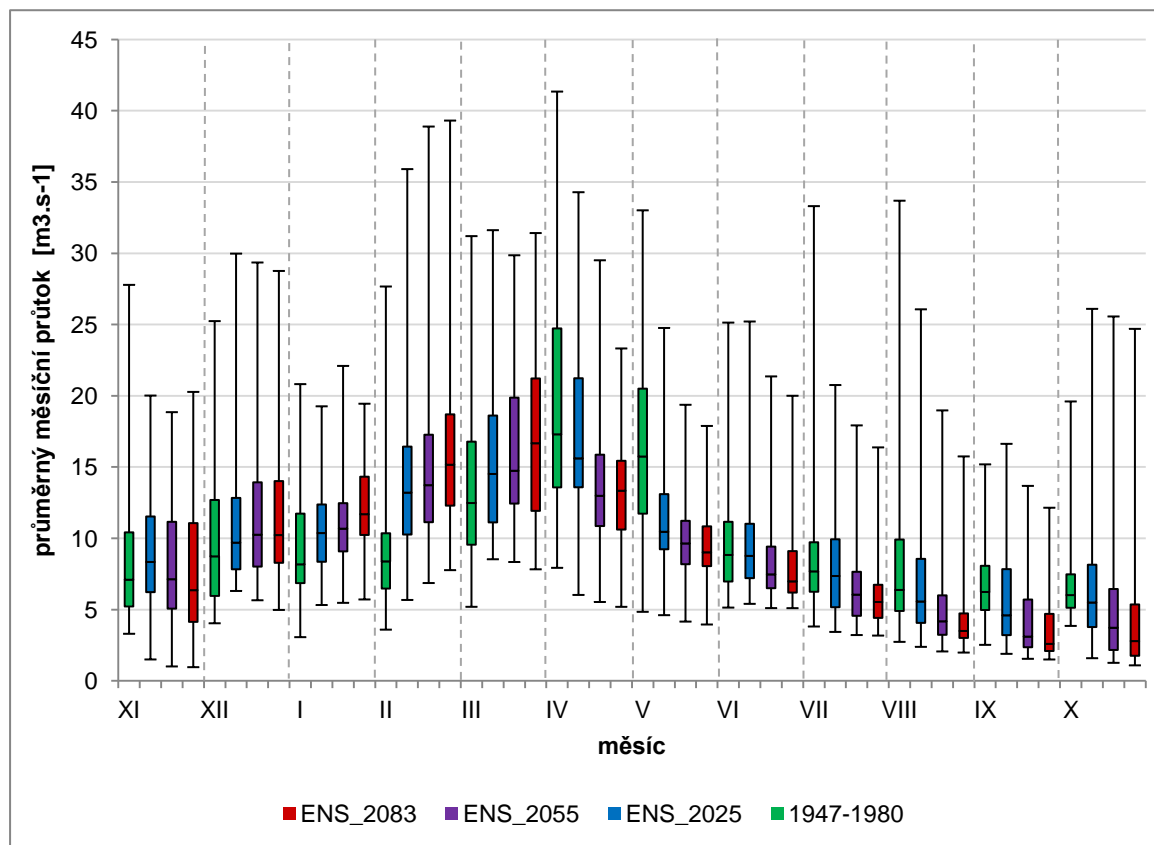
V následujícím referenčním období 2055 je modelováno posunutí maximálního průtoků do března a zároveň je průměrně o $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nižší než dubnový peak referenčního období 1947-1990. Naopak únorový průtok zaznamenává další nárůst. Od března je modelován pokles průtoků s dalším snížením v květnu na $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Minimum je dosaženo v září, toto minimum je o 35 % procent nižší než referenční období 1947-1990.

Rozdíl referenčního období 2083 od předchozího není tak markantní. Zvyšuje se průtok v únoru až na 68 % původní hodnoty a snižuje průtok v říjnu a září o 45 až 47 % z přibližně $7,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $4,6$ a $5,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Signifikantní pokles je rovněž zaznamenán v srpnu až na 45 % původní hodnoty, tzn. ze $8,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $4,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Další graf (Obr. 34) znázorňuje variabilitu průtoků. Je patrné, že průtoky posouvají v letních a podzimních měsících medián směrem k minimům a (mimo říjen) se snižují maxima. V únoru dochází vlivem zvýšených teplot a tání k výrazně zvýšeným průtokům.



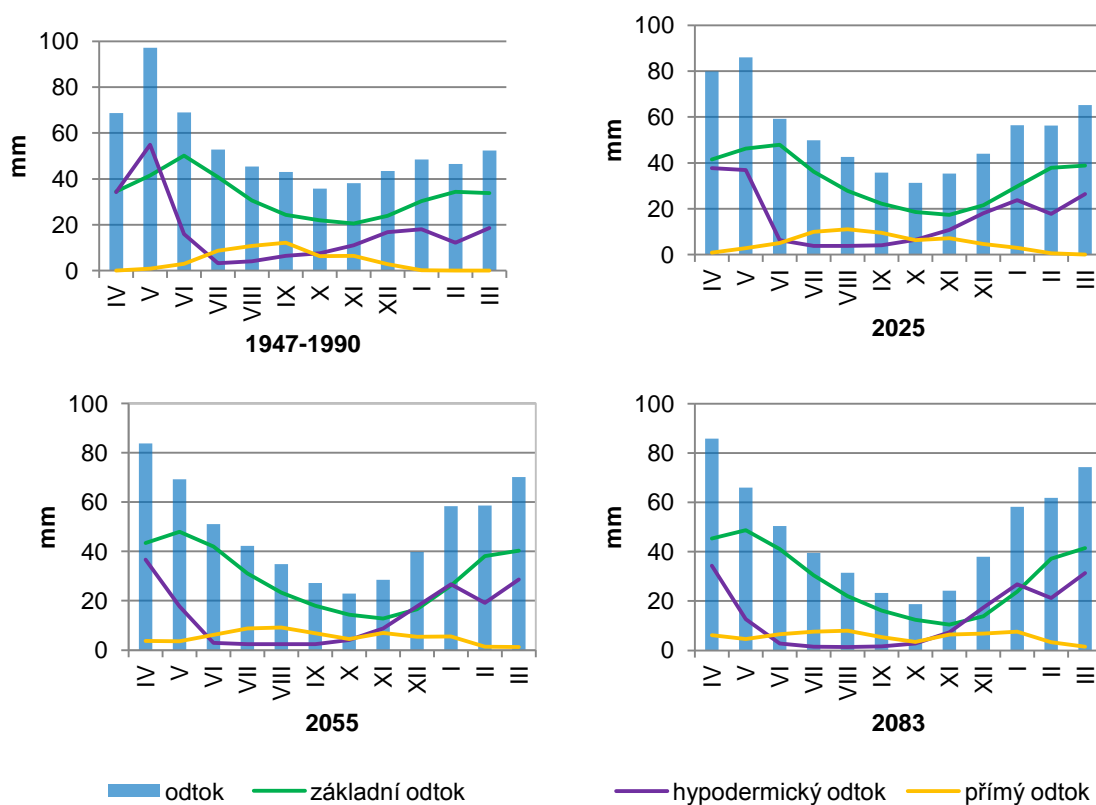
Obr. 33: Modelované průtoky modelu ENSAMBLE pro referenční období 2025, 2055, 2083 a 1947-1990



Obr. 34: Variabilita měsíčních průtoků z modelu ENSEMBLE v referenčních obdobích 1947-1990, 2025, 2055 a 2083

BILAN umožňuje modelovaný průtok rozložit na složky (Obr. 35). Největší změny doznává hypotermický průtok, který v období 1947-1990 měl výrazné maximum v květnu, v následujících obdobích klesá. To by se mohlo negativně projevit na dostupnosti vody v půdě právě důležitém počátku vegetačního období.

V postupujících referenčních obdobích se také mění povrchový odtok. V referenčním období 1947-1990 má maximum v září. V obdobích 2055 a 2083 nedosahuje povrchový odtok maxima, avšak rozkládá rovnoměrně v celém roce včetně zimních měsíců. Vzhledem ke struktuře modelu, kdy tání nastává při překročení teploty 0 °C, je to způsobeno vyššími teplotami a táním.



Obr. 35: Rozklad modelovaného odtoku na jednotlivé složky pro referenční období 1947-1990, 2025, 2055 a 2083

Podle vstupních dat průměrný roční průtok od referenčního období 1947-1980 klesá viz tabulka:

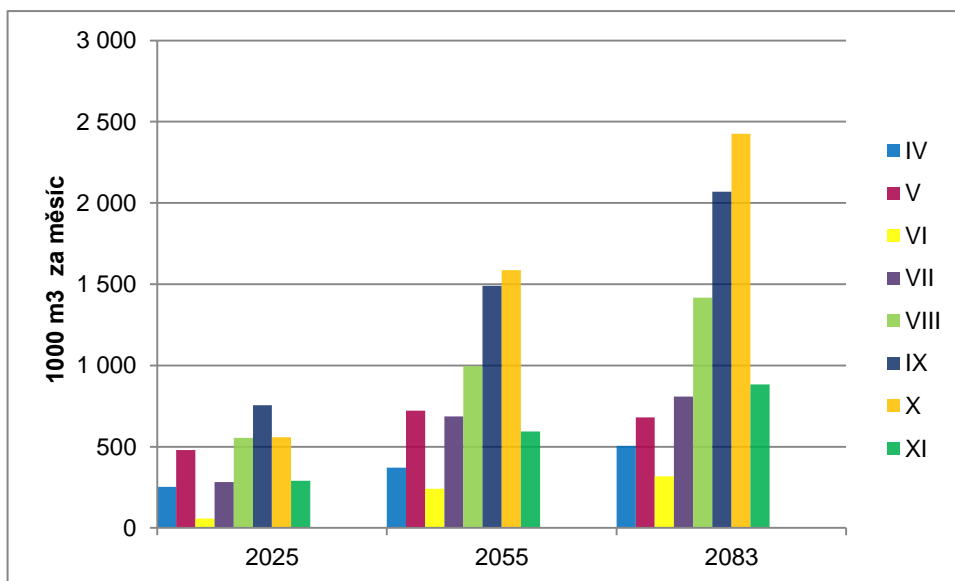
1947-1980	ENS_2025	ENS_2055	ENS_2083
10,94	10,82	9,9	9,65

Hlavní změnou je však posun průtoků: výrazný nárůst zejména v únoru kvůli vyšším teplotám a dřívějšímu tání, nejvyšších průtoků je tak dosahováno v březnu a následuje konstantní pokles s minimem v září. I takovéto poklesy průtoků mohou ovšem znamenat poměrně značný nárůst nedostatkových objemů.

Nedostatkové objemy byly počítány podle 90. percentilu průtoků pro 31 denní klouzavý průměr denních průtoků z celé délky měření, tzn. od r. 1930 do r. 2011. Největší nárůst nedostatkového objemu je v říjnu. V referenčním období 2083 to činí až 2,3 mil. m³. V září je to 1,9 mil. m³. V referenčním období 2025 jsou tyto nedostatky menší, v září 700 000 m³, v červenci a říjnu přibližně 530 000 m³ (Obr. 36). Je však zjevné, že tato hodnota závisí na zvolené limitní hodnotě a ta se pro měsíční průtoky stanovuje obtížně. Pro srovnání je tedy uveden procentuální rozdíl průměrného měsíčního objemu průtoků v ref. období 1947 až 1990 a obdobích následujících (Tab. 8).

Tab. 8: Procentuální rozdíl objemu průtoků referenčních období 2025, 2055 2083 vzhledem k 1947-1990 (zdroj: VÚV TGM)

	2025	2055	2083
IV	-9,9	-27,4	-30,8
V	-30,3	-39,9	-40,5
VI	-2,3	-17,2	-22,6
VII	-7,6	-24,4	-31,7
VIII	-16,9	-36,8	-46,0
IX	-12,7	-35,9	-47,5
X	-3,0	-21,8	-33,5
XI	1,0	-8,9	-12,9
XII	11,7	15,5	15,3
I	14,0	18,8	25,3
II	48,3	59,3	68,7
III	13,3	18,7	21,7



Obr. 36: Objem nedostatkového průtoku v referenčních obdobích 2025, 2055 a 2083 od limity Q90 klouzavého průměrného 31-denního průtoku 1930-2011 (zdroj: VÚV TGM)

5 PŘEDPOVĚĎ ODTOKU V SRÁŽKOVĚ DEFICITNÍCH EPIZODÁCH

Sucho je fenomén, který se vyvíjí pomalu. Při rozeznání klimatických podmínek, které předcházejí hydrologicky deficitní epizodě, ho lze předpovídat a tím pádem zmírnit negativní následky. Je nutné rozlišit dva typy předpovědi: předpověď klimatických činitelů, jejichž odchylka je zdrojem sucha, a předpověď vývoje zásob vody v daném povodí. Pro relevantní výsledek je tedy nutné sloučit střednědobou předpověď meteorologických činitelů společně s poznáním odtokových vlastností povodí v bezsrážkovém období. Pro predikci je rovněž důležitá volba měřítka. Je třeba si uvědomit, že sucho je regionální spíše než lokální záležitost.

Operativní předpověď sucha, jako je u povodní, nebývá častá. Vzhledem k charakteru fenoménu je to i velmi obtížné. Sucho často postihuje rozsáhlé území s heterogenními fyzicko-geografickými podmínkami, reaguje na sucho rozdílně a ne všude se vyvíjí se stejnou intenzitou. Lze však definovat předpovědní vztahy pro odtok během srážkově deficitních období pomocí statistického aparátu. Takto vytvořený předpovědní vztah umožňuje výpočet vývoje nedostatkových objemů v čase. V rámci proaktivního přístupu k suchu by měl být integrovanou součástí plánů.

V Evropě je sucho monitorováno ECMWF (The European Centre for Medium Range Weather Forecast), které produkuje střednědobou predikci (1 až 3 měsíce) tlaku na střední hladinu moře, srážek a teplot, včetně pravděpodobnostních charakteristik.

Pro středně a dlouhodobou předpověď je potenciál využití synoptických anomálií velkého měřítka jako je ENSO nebo NAO. Studie prováděná v Anglii a Walesu (Wedgbrow 2002) se zabývala prediktory velkého měřítka. Byly zkoumány korelační vztahy mezi klimatologickými anomáliemi: Polární-Eurasijskou telekonekcí (POL), Severoatlantskou oscilací (NAO), teplotou vody v oceánu – North Atlantic sea surface temperature anomalies (SSTAs) a Palmerovým indexem závažnosti sucha. Studie korelací potvrdila, avšak ne v celé oblasti se tyto korelace projevovaly ve stejné míře. Jak uvádí sami autoři, je třeba další podrobnější výzkum na delších časových řadách. Ukazují však způsob, jakým je možné se v predikci ubírat. V Česku je klima oceánem ovlivněno méně, avšak existuje potenciál ve zkoumání typizace povětrnostních situací pro ČR.

Předpověď lze zlepšit využitím dálkového průzkumu Země a GIS, pomocí indexu NDVI. Zelená vegetace málo odráží záření ve viditelné složce světla a velkou část spektra blízko infračerveného světla. Během sucha se tento rozdíl stává menším a tato hodnota potom slouží k odvození NDVI indexu. Výhodou je poměrně exaktní poznání stavu povodí, umožňuje poměrně rychlé zpracování na rozsáhlé ploše a to především tam, kde nejsou k dispozici dlouhé klimatologické řady. Nicméně nevýhodou je poměrně vysoká pořizovací cena snímků a nelze zjistit, zda je sucho na postupu či ústupu.

Tři metody používané k předpovědi průtoků v bezsrážkových obdobích uvádějí Hladný a Buchtele (1968). První dvě metody, metoda odpovídajících průtoků a metoda odvozená od evidence říčních zásob, jsou založené na principu bilance vodních zásob a nabývají na významu v povodích, kde jsou velké zásoby vody. Třetí metodou je metoda tendence, která vychází z toho předpokladu, že průtok se v daném profilu zmenšuje charakteristickou intenzitou. Tato metoda využívá poklesovou křivku hydrogramu používanou při recesních analýzách.

5.1 Recesní křivky

Tvar recesní křivky napovídá, jak rychle se spotřebovávají zásoby vody v povodí. Tato charakteristika se používá při předvídání odtoku během sucha nebo jako vstup do hydrologických modelů. Předpověď vývoje situace během sucha se dá využít při managementu vod, dodávkách vody pro domácnosti, elektrárny a zavlažování (Tallaksen a kol. 2004).

Tvar křivky závisí hlavně na hydrogeologii, reliéfu a klimatu. Povodí s pomalým poklesem mají dominantní část podzemního odtoku. A naopak povodí s rychle upadající křivkou jsou povodí s rychlým odtokem. Křivky mají různý tvar ve vztahu k období recese. Také stav, ve kterém se povodí nachází, není vždy identický (Tallaksen 1995).

Recesní analýza je poměrně rozšířený hydrologický nástroj, ačkoliv jeho užití přináší řadu obtíží. Existuje tedy mnoho metodických postupů a řešení. Základním problémem je, že žádné povodí není identické a nikdy se nenachází v identickém stavu. Recesní segment tedy představuje úsek hydrogramu odpovídající jeho momentálnímu stavu, který je výsledkem předchozího vývoje zásob vody v povodí.

Během suchých období je povodí odvodňováno skrze půdu, podzemním odtokem a ke ztrátám dochází evapotranspirací. Odtok je definován funkcí $Q=Q(t)$, kde Q je průtok a t je časový úsek. Neexistuje žádná univerzální technika, která by tento vztah dokázala jednoduše aplikovat na vybrané povodí. Tallaksen (1995) popisuje dva přístupy, teoretický a empirický, a čtyři způsoby nalezení analytického předpisu rovnice pro vyčerpávání povodí.

Prvním způsobem je modelování recese jako základní rovnice odtoku. Tyto teoretické rovnice vycházejí z Boussinesquovy rovnice pro odtok ze zvodně. Jejich nevýhodou však je, že jsou funkční pro homogenní, isotropní zvodně. Tento předpis může být funkční pro homogenní povodí. Pro povodí s heterogenními podmínkami je však užití omezené. Po úpravě **Deput-Boussinesquovy rovnice** vznikla jednoduchá exponenciální rovnice:

$$Q_t = Q_0 \exp\left(-\frac{t}{C}\right)$$

nebo další formy:

$$Q_t = Q_0 \exp(-at)$$
$$Q_t = Q_0 k^t$$

kde $Q_{t=0}$ je počátek modelované recese a k , C , α jsou parametry modelu, který charakterizuje míru recese. Existuje několik modifikací těchto rovnic, které popisuje Tallaksen (1995).

Druhým způsobem je modelování recese jako **odtoku z lineární nádrže**, které vychází z rovnice:

$$Q = KS^p$$

kde S je zásoba v nádrži a K a p jsou konstanty. Takhle jednoduchý zápis však dostatečně nereprezentuje odtokový proces. Je tedy nutné rovnici přetvořit na nelineární nebo vytvořit soustavu několika nádrží. Tallaksen (1995) opět tyto modifikace uvádí.

Dalším způsobem je využití **autoregresního procesu**. Pro rovnice prvního řádu je možné použít vztah:

$$Q_{t+1} = kQ_t + e_{t+1}$$

kde e_t je nezávislý chybový faktor normálního rozdělení. Přidáním konstant je možné vytvořit autoregresní model druhého řádu.

V současnosti nejrozšířenějším předpisem je odvození **empirických vztahů**. Empirickou modifikací výše zmíněné rovnice s přidáním empirických konstant je předpis:

$$Q_t = (Q_0 - b) \exp\left(-\frac{t}{C}\right) + b$$

kde b je interpretováno jako limita základního odtoku. Tuto rovnici lze dobře použít v povodích ovlivněných táním sněhu.

Lepších výsledků shody je možné dosáhnout vytvořením regresních vztahů mezi separovanými složkami odtoku. Rovnice s jedním parametrem svou jednoduchostí lépe slouží komparativním analýzám. Vlastnostem povodí však obvykle odpovídají rovnice s více parametry.

Důležitý je výběr recesního segmentu. Počáteční průtok Q_0 může být fixní nebo pohyblivý. Pevně daný průtok omezuje výběr hodnot na ty, které se nacházejí pod limitou Q_0 . Variabilní počátek může být dán např. daným počtem dní po poslední srážce. První část se obvykle vynechává, aby nebyl výběr ovlivněn povrchovým odtokem. Délka recesního segmentu může být také fixní nebo variabilní. Obvykle bývá dána minimální délka recesního segmentu mezi 4 až 10 dny. Je důležité zhodnotit obvyklou délku sucha v regionu. Existuje také variabilita v odtoku během roku a tím pádem se liší i tvar recesní křivky.

Využití recesních křivek ve vztahu k předpovědi se v povodí Otavy věnovali Hladný a Buchtele (1968). Pro výpočet křivky použili Reitzovu rovnici:

$$Q_t = Q_0 e^{-k\sqrt{t}}$$

Recesní křivky vyšetřovali pro vegetační období a to odděleně pro jednotlivé měsíce.

5.2 Recesní křivky v zájmových profilech

Prvním krokem vytvoření recesního vztahu je správný výběr recesního segmentu. Bylo nutné propojit informace ze souborů časových řad srážek a denních průtoků. Dále bylo třeba nastavit vhodné parametry výběru tak, aby postihl úseky v bezsrážkových obdobích a dolní úseky poklesové větve, zároveň zahrnul výjimky a vše proběhlo co možná nejvíce automaticky.

Byly vybrány měsíce, kdy dochází k suchu vlivem srážkového deficitu a vysokých teplot, měsíce červen až říjen. Tyto měsíce byly rozděleny na letní (červen až srpen) a podzemní (září až říjen) režim výpočtu. Řady tak nemohou obsahovat sucho zimního typu. Výběr řad byl proveden pomocí fixní hodnoty Q_{60} pro jednotlivé měsíce. Segment začínal poslední den nad hranicí Q_{60} . Dalším kritériem byl pokles segmentu alespoň na jeden den ke Q_{95} . Minimální délka pod limitou nebyla brána v úvahu, ale

byl zkoumán úsek segmentu k nejnižší hodnotě v daném deficitním období. Dalším kritériem byla minimální délka segmentu alespoň deset (v případě profilu Sušice patnáct) dní. Bylo také nutné ve výběru postihnout výjimky náhlého, byť nedostatečného, zvýšení průtoku, proto byla použita vůle 0,2.

Recesní segmenty jsou i přes tato kritéria individuální a bylo nutné učinit některé výjimky. Jako kontrolní mechanismus v tomto případě sloužily srážky, které ale nebyly dostupné pro celé období měření průtoků. Srážky byly převedeny na systém 0 a 1, pro dny beze srážek (byly zahrnuty srážky menší než 10 mm) a se srážkovou dotací. Byla také vypočítána efektivní srážka. Nakonec bylo toto kritérium využito jen jako pomocné, neboť se ukázalo, že se téměř nevyskytovala bezesrážkové období delší, než je hranice užívaná pro meteorologické sucho a vztah mezi hodnotou počátečního průtoku a efektivní srážkou se neprokázal jako signifikantní. To lze přičíst na vrub charakteru srážkově bohatého horského povodí.

Byla rovněž provedena separace složek odtoku. Separační algoritmus byl převzat z výpočtu BFI (Tallaksen a kol. 2004). Z pěti po sobě jdoucích dní bylo vybráno minimum. Pokud jeho hodnota byla alespoň 0,9 krát menší nebo rovna sousednímu minimu, byla přiřazena k hydrografu základního odtoku. Důležitým momentem byla hodnota v den počátku recese. Složka povrchového odtoku by již měla být eliminována hodnotou Q_{60} .

Byla sestrojena průměrná křivka poklesu. Z počátečního průtoku každého segmentu byl spočítán průměr, který sloužil jako Q_0 pro návrhové křivky. Stejný principem byla vytvořena počáteční hodnota základního odtoku. Jako analytický předpis byla využita kombinace empirického odvození a Reitzovy rovnice. Parametr k byl odvozen od sklonu přímky proložené mezi hodnotami t a Q v logaritmicke-odmocninovém měřítku. Parametr k byl potom vypočítán z logaritmu této hodnoty. Parametr k_{BF} byl odvozen empiricky podle nejlepší shody. Nicméně při detailnějším zkoumání by bylo možné ho vypočítat, neboť odpovídá směrnici logaritmické přímky vyčerpávání dané hodnoty BF v závislosti na čase. Rovnice je tedy ve tvaru:

$$Q_t = (Q_0 - BF_0) * e^{-k\sqrt{t}} + (BFI_0 + k_{BF} * \ln t)$$

Pro validaci bylo použito kritérium MAPE ze shody průměrné a modelované přímky:

$$\frac{1}{n} \sum \left| \frac{Q - Q_{mod}}{Q} \right| * 100$$

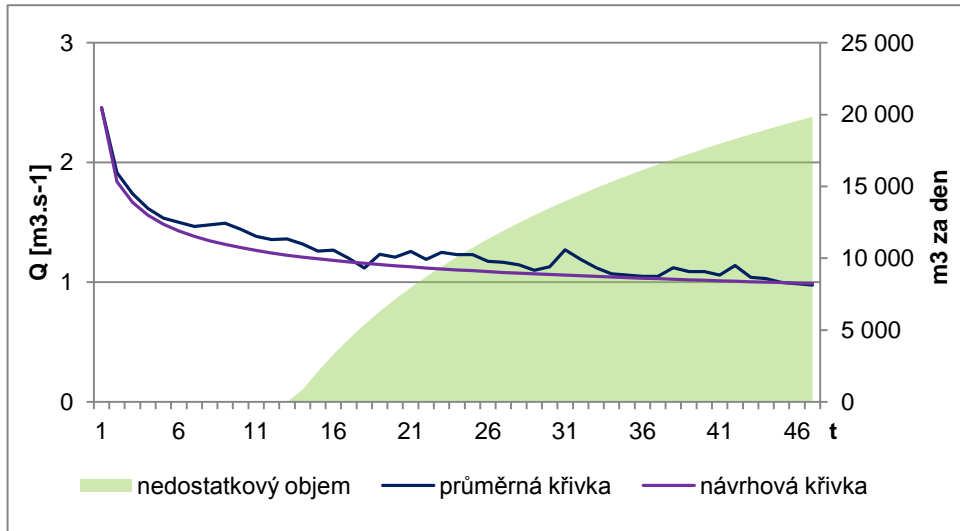
Výsledky parametrů pro jednotlivé měsíce jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9). Lze z nich usoudit, že povodí má na horské podmínky vyrovnaný odtok (pro toto tvrzení Tallaksen a kol. (2004) udává hranici parametru k 0,7). Z charakteru rovnice tento parametr ovlivňuje hlavně první část odtoku. Z křivek lze definovat průměrnou délku úseku mezi počátkem recese a dosažením minima. Typickou délkou poklesu pro povodí to je přibližně 20 dní, nicméně délka vybraných segmentů byla velmi variabilní. Ukázalo se, že předpokládaný vztah délky poklesu a směrnice s efektivní srážkou neplatí.

Na obrázcích (Obr. 37, Obr. 38, Obr. 39, Obr. 40, Obr. 41, Obr. 42) jsou znázorněny návrhové křivky spolu s průměrnou křivkou poklesu. Podle hodnoty Q_{m95} byl vypočítán nedostatkový objem podle návrhových křivek. Po 55 dnech sucha v letním období na profilu Sušice se nedostatkový objem vyšplhá k 84 000 m³ za den. V podzimním období je to 25 000 m³. Je z nich rovněž patrné, že k deficitu dochází od 11. dne poklesu v letním a od 14. dne v podzimním období. Podobně lze tyto hodnoty odečíst pro profil Rejštejnu a Modrava.

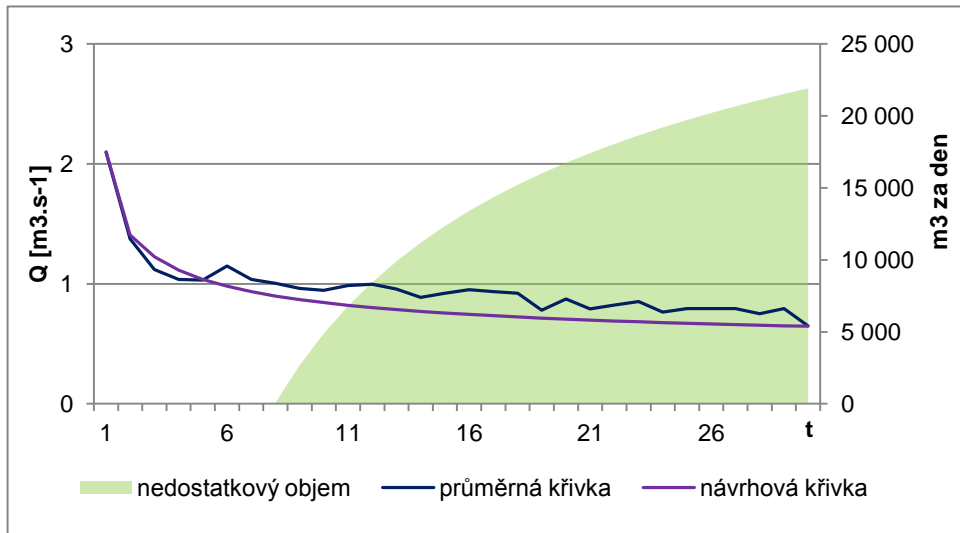
Tab. 9: Parametry recesních křivek pro zájmové profily

		Modrava	Rejštejn	Sušice
Qm60	červen	2,5	2,54	7,78
	červenec	2	2	5,19
	srpen	1,76	1,755	5,275
	září + říjen	1,65	1,655	4,975
Qm95	červen	2,5	2,54	7,78
	červenec	2	2	5,19
	srpen	1,76	1,755	5,275
	září + říjen	1,65	1,655	4,975
počet křivek	léto	12	18	12
	podzim	6	5	11
Průměrná délka úseku	léto	22,2	16	28,19
	podzim	21,1	22,6	26,54
k	léto	0,85	0,82	0,8
	podzim	0,8	0,78	0,89
kBF	léto	0,15	0,1	0,5
	podzim	0,1	0,1	0,1
Počáteční hodnota BF	léto	1,565	1,456	4,14
	podzim	0,971	0,962	2,935
Počáteční hodnota Q0	léto	2,458	2,495	6,803
	podzim	2,098	2,902	6,183
MAPE	léto	6,157	3,1	13,7
	podzim	11,7	19,3	8,5

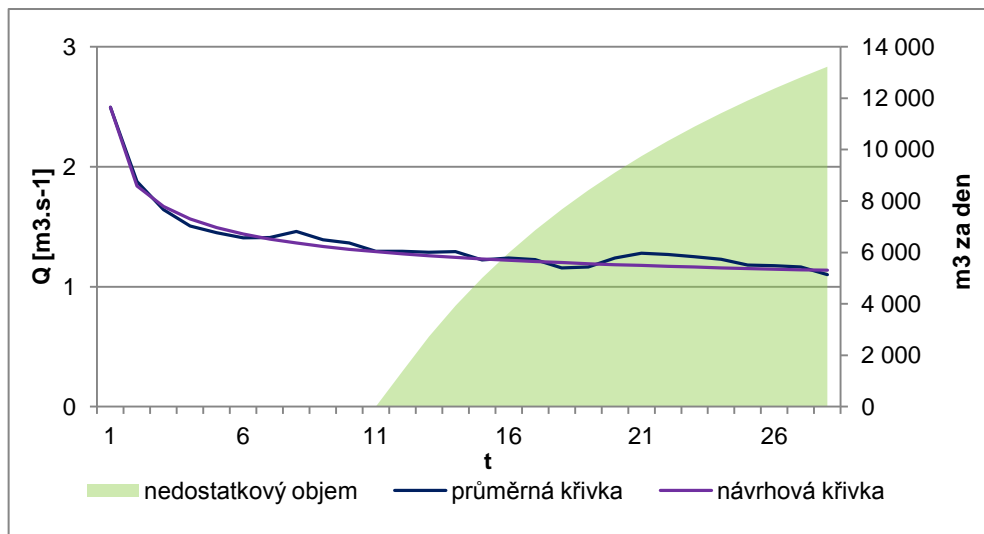
Takto sestrojené čáry umožňují definování stupňů nebezpečí sucha. Lze jich rovněž využít při dlouhotrvajícím bezsrážkovém období pro definování kroků omezení odběru vody a aplikaci opatření při suchu. Pro využití je nutné se detailně seznámit s vodohospodářskými plány odběru vody v povodí. Lze z nich rovněž vyčíst nedostatkový objem, který je třeba zajistit retencí vody v krajině či nádržích.



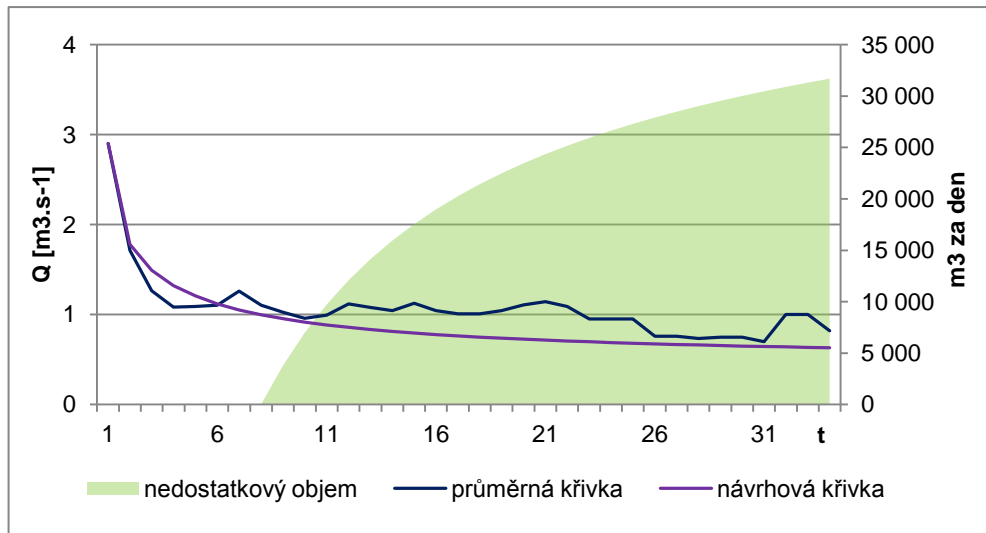
Obr. 37: Recesní křivka pro letní období - profil Modrava (zdroj: ČHMÚ)



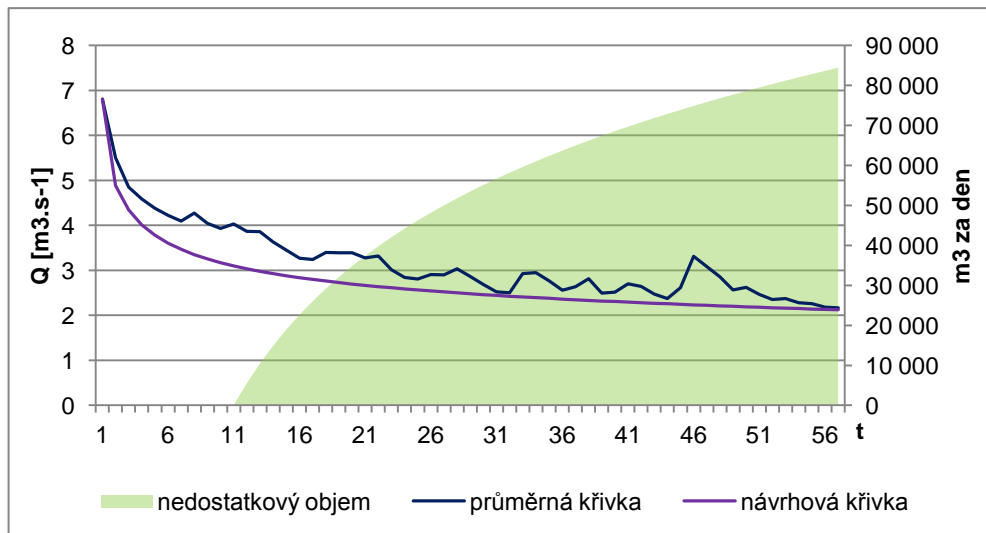
Obr. 38: Recesní křivka pro podzimní období – profil Modrava (zdroj: ČHMÚ)



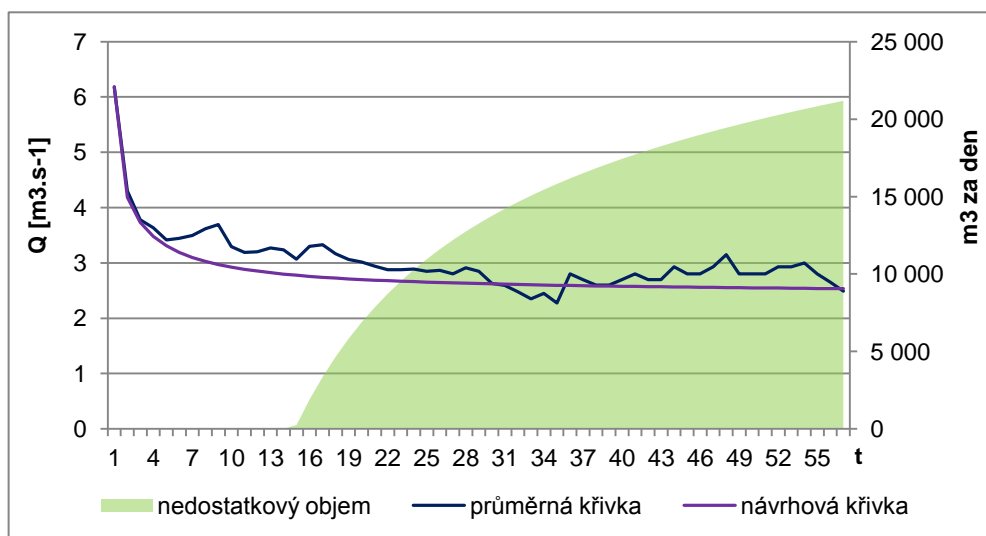
Obr. 39: Recesní křivka pro letní období - profil Rejštejn (zdroj: ČHMÚ)



Obr. 40: Recesní křivka pro podzimní období - profil Rejštejn (zdroj: ČHMÚ)

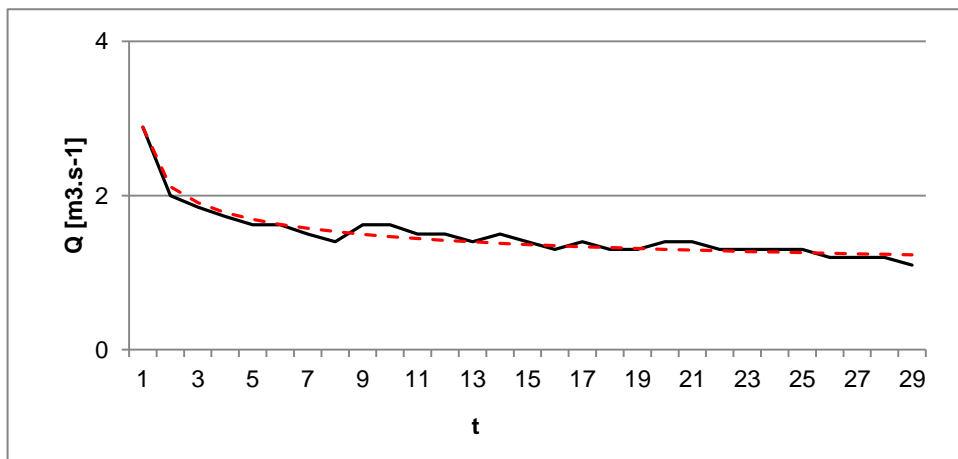


Obr. 41: Recesní křivka pro letní období - profil Sušice (zdroj: ČHMÚ)

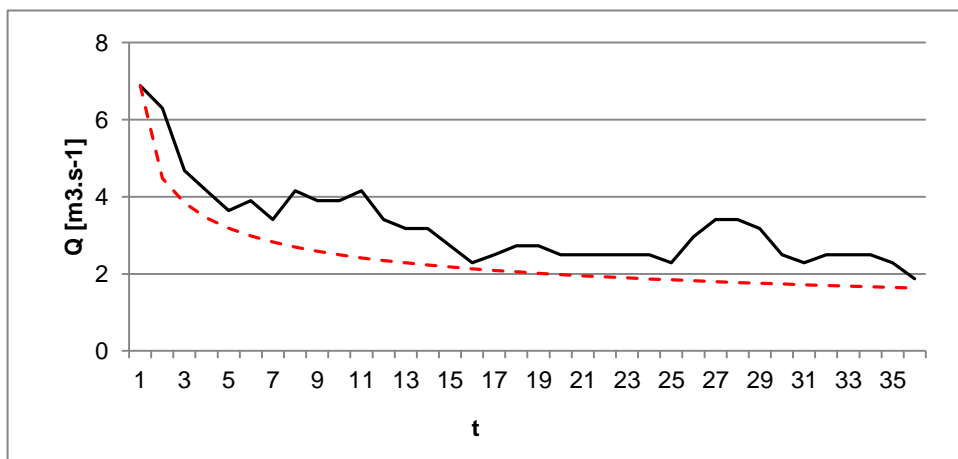


Obr. 42: Recesní křivka pro podzimní období - profil Sušice (zdroj: ČHMÚ)

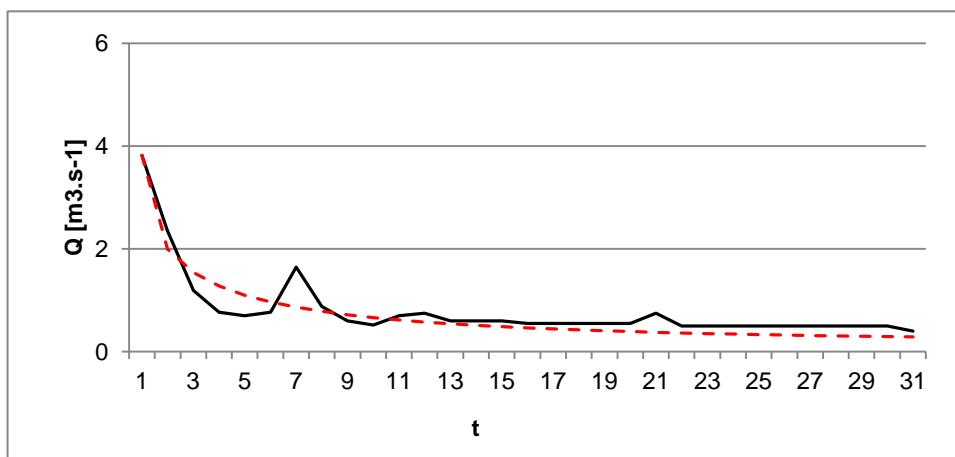
Rovnici lze rovněž využít při operativní předpovědi odtoku modifikováním aktuálních vstupních parametrů Q_0 a BF s vypočítanými parametry k . Tato modifikace umožňuje jednoduché přizpůsobení aktuálním podmínkám. Výsledky modelace na jednotlivých profilech jsou ukázány na následujících příkladech (Obr. 43, Obr. 44, Obr. 45). Jak uvádí Hladný a Buchtele (1968), pro předpověď nízkých průtoků je důležité znát zajištěné průtoky, tzn. model je úspěšnější, pokud podhodnocuje, spíše než nadhodnocuje.



Obr. 43: Profil Modrava: 28denní sucho s $Q_0=2,89$ a $BF=1,724$, v letním režimu. Kritérium MAPE 4,3 (zdroj: ČHMÚ)



Obr. 44: Profil Sušice: 35denní sucho s $Q_0 = 6,8$ a $BF= 3,4$, v letním režimu. Kritérium MAPE 26 (zdroj: ČHMÚ)



Obr. 45: Profil Rejštejn: 30denní sucho, $Q_0=3,820$ a BF 0,585 v podzimmím režimu. Kritérium MAPE 28 (zdroj: ČHMÚ)

6 MOŽNOSTI ADAPTACE NA HYDROLOGICKÉ SUCHO

Nedostatek vody má široké spektrum navzájem propojených negativních dopadů na přírodní ekosystémy, společnost i ekonomiku. Rostoucí populace a zvyšující se poptávka vodě činí společnost ve vztahu k suchu čím dál zranitelnější. Zmírnit projevy sucha a přizpůsobit se novým klimatickým podmínkám je nezbytnou činností, jak tyto dopady minimalizovat. Pro objektivní posouzení možností adaptace je dobré položit si následující otázky:

- Jaké sektory jsou zranitelné? Jaké bude mít sucho dopady?
- Která instituce je zodpovědná za řešení problémů spojených se suchem?
- Která opatření by měla být implementována a kdy?
- Jaká může být dosaženo zvýšení efektivity stávajících opatření?

Z odpovědí vychází strategie, která zahrnuje celé spektrum činností: plánování, monitoring a implementaci plánovaných opatření, management rizikových situací a rychlá náprava škod. Žádný z těchto kroků by neměl být zanedbán.

6.1 Dopady sucha

Nedostatek vody má řadu navzájem propojených negativních dopadů na krajinu, socioekonomickou sféru, zemědělství, průmysl a vodní hospodářství. Je důležité zmínit také to, že tyto dopady nemusí postihnout pouze dané povodí ani stát. V globalizovaném světě mohou mít na Českou republiku negativní dopady sucho v zemích s ekonomickou návazností nebo dlouhodobé změny kdekoliv ve světě.

Environmentální dopady se začnou projevovat jako první a to jak v zemědělství, tak v přírodních ekosystémech. Po dlouhé absenci srážek klesá voda v půdě pod bod vadnutí a dochází k úhynu rostlin. Zemědělství je zranitelnější, pokud je závislé na zavlažování. V přírodních ekosystémech při suchu může dojít k zániku některých stanovišť. Zvyšuje se koncentrace solí v tocích, podzemních vodách i zavlažovaných oblastech. Poškozuje se říční habitat vlivem větší koncentrace škodlivin a zvyšující se teploty vody. Vysychání půdy má za následek větší prašnost až prachové bouře. V lesích může docházet k požárům (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007, Novický a kol. 2008, Tallaksen a kol. 2004).

Následkem environmentálních dopadů jsou ekonomické ztráty. Zejména v sektorech návazných na zemědělství. Vlivem deficitu vláhy jsou sniženy výnosy z úrody, klesá výnosnost pastvin a produkce mléka. Vlivem zhoršeného zdravotního stavu dobytka dochází k úhynům. Dopady se projevují i v rybářství, vzhledem k zhoršenému stavu rybníků, i v lesnictví, kvůli menším výnosům dřevní hmoty a požárům. Ke ztrátám dochází i v průmyslu, zejména v odvětvích vázaných na zemědělství. Dopady na energetiku se projevují ve vodních elektrárnách, i elektrárnách, které jsou na vodě závislé kvůli chlazení. Problémy má i finanční sektor, zejména kvůli pojistným událostem a většímu riziku investic. Další finanční prostředky jsou vydávány na omezení negativních dopadů, informační kampaň a zajištění suplementárních zdrojů vody (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007).

Sociální dopady přichází postupně a závisí zejména na vyspělosti státu. Během sucha klesá kvalita i dostupnost vody. S tím jsou spojena zdravotní rizika ze závadné vody. Problémy se zásobováním mají zejména rozvojové země, kde jsou dopady mnohonásobně vyšší. S tím ale souvisí migrace, která může směřovat kamkoliv, zejména do velkých měst, kde se následně vytváří čtvrti na periferii se sociálními problémy. Ve vyspělém světě má na zdraví horší dopady horko, které sucho doprovází. Při dlouhodobém trvání sucha se ale i v rozvinuté společnosti dají očekávat negativní dopady na změnu životního stylu pramenící z nejistoty v dostupnosti a ceně vody, nezaměstnanosti v zemědělství, nerovnosti v dopadech sucha a v rozložení opatření. Přímé ohrožení obyvatel také pramení z požárů (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007, Hladný 2010).

6.2 Management plánování a reakce na sucho

Sucho je přírodní ohrožení, které se od ostatních liší tím, že nastupuje pomalu a trvá měsíce až roky než zasáhne velká území. Při včasném zavedení vhodných opatření je možné do jisté míry následky zmírnit a předcházet negativním dopadům v dlouhodobém horizontu. Predikce sucha existuje jen ve velmi omezené kvalitě a projekce změn klimatu spolu se zjednodušením problému prostřednictvím matematických modelů vnáší do dlouhodobého plánování vysoký stupeň nejistoty. Při takovém stupni nejistoty neexistuje jediný správný přístup k vytváření plánů a výběru adekvátních opatření.

Přístup k zavádění těchto opatření se dělí na **reaktivní** a **proaktivní**. Reaktivní přístup koná tehdy, když už sucho nastalo a je třeba okamžitě zavést nutná opatření nebo je nezavést ve víře, že společnost a příroda jsou natolik odolné, že sucho přestojí. Proaktivní přístup zavádí opatření preventivně. Rozdíl mezi těmito přístupy je zejména v plánování namísto činění ad hoc (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007).

Mrkvičková a Kos (2010) popisují dělení přístupů ke stanovování adaptačních opatření na dva typy: **hodnocení zranitelnosti** a **posilování odolnosti**. Tyto dva přístupy ve své podstatě vycházejí z odlišné logiky při vytváření plánů. Při hodnocení zranitelnosti jsou ve funkčním celku vytipována nejslabší místa na základě předem stanovených indikátorů. Pro tato místa jsou následně vytvářeny plány na zvýšení odolnosti. Obdobně se postupuje při interpretaci výsledků modelace změny a dopadů klimatické změny. Plány mohou být stavěny buď na největší možné spektrum pravděpodobnosti scénářů vývoje nebo na scénář nejpravděpodobnější. Zde se však nabízí otázka finanční nákladnosti vzhledem k pravděpodobnosti nejhoršího scénáře. Přístup k posilování odolnosti naopak rozvíjí a posiluje ty složky, které činí systém odolný vůči extrémům. Jedním z možných kompromisů je vycházet z hodnocení zranitelnosti, kde jsou ve funkčním celku vytipována nejslabší místa, pro která jsou následně vytvářeny plány na zvýšení odolnosti.

Sucho je často popisováno jako skrytá hrozba. Tím spíše je třeba sdílet informace a spolupracovat na tom, aby se odhalilo, jak velkou plochu sucho postihuje, jak často a jaké jsou modelované změny do budoucna. Huntjens, Pahl-Wost a Grin (2010) studovali evropská povodí, ve kterých je využívána platná evropská legislativa. V povodích se ukázalo velkým problémem přílišné lpění na stabilizaci současného systému managementu, který dává malý prostor inovacím. Ve zkoumaných povodích se tak projevila malá schopnost reagovat na sucho, ačkoliv dopady už měly velké sociální, ekonomické a environmentální dopady a existuje předpoklad, že se tyto dopady zhorší.

Možným přístupem, jak se tohoto problému zhostit je strategie **Adaptive and Integrated Water Management** (AIWM). AIWM se zakládá na systematicky se zlepšujícím managementu legislativy a praxe prostřednictvím zpětných vazeb. Možnost měnit a přizpůsobovat cíle programů novým poznatkům a nově nastalým skutečnostem a podmínkám je vhodným řešením právě pro nejistotu vyplývající z modelů. Právě tento přístup vyžaduje jiný pohled na problematiku než je tradiční málo pružný systém. Je

třeba provázat zpětnými vazbami správce povodí, vědce a správní instituce a naučit se pracovat s určitou nejistotou a reagovat na přírodní a sociální prostředí a zároveň se vyrovnat s nejistotou předpovědi. Huntjens, Pahl-Wost a Grin tvrdí, že neurčitost změny je často brána jako omluva pro to, aby nebyla opatření provedena. Adaptabilní správa závisí na adaptabilních institucích, které jsou schopné reagovat na složitost a nejistotu klimatické změny, což bývá v kontrastu s tradičním managementem založeným na konkrétních číslech. Pružně reagující správa je lépe schopná propojovat opatření prováděné na určitých úrovních a měřítkách

Je třeba zavést do procesu adaptace faktor průběžného učení a poučení a sdílet zkušenosti tak, aby si s danou nejistotou uměli poradit. Folke a kol. (2005) podotýká, že jedna generace vědomostí nestačí na to, aby se socioekonomický systém naučil adaptovat na dynamiku přírodních změn. Folke vyzdvihuje spolupráci a sociální vazby jako důležitý faktor možnosti účinné adaptace prostřednictvím předávání vědomostí.

Povodně představují přímé ohrožení, následky jsou jasně viditelné a akutní. Sucho je naproti tomu fenomén s pomalým nástupem, jehož následky obyvatelé zažívají spíše nepřímo (Kingdon 1995 in Huntjens, Pahl-Wost a Grin 2010). Opatření proti povodním se zavádí snadněji, protože jsou zažívány přímo všemi zúčastněnými stranami a vytváří tak „legislativní okno“ skrze nátlak veřejnosti a znepokojení, které pomůže kroky uskutečnit. Pro zavádění opatření je proto klíčové správné načasování. Je důležité rozvířít diskuzi k dosažení určité informovanosti pro otevření „legislativních oken“, které by umožnilo prosadit adaptační kroky, neboť společnost i správní orgány jsou změně nakloněny během problému či těsně po něm. Je proto důležité, aby za běžných podmínek odděleně fungující instituce vodohospodářské, legislativní a správní pracovaly v daný okamžik společně.

6.3 Tvorba plánů

První fází proaktivního přístupu je příprava plánů, které obsahují jednotlivé kroky, tak jak by měly za sebou následovat. První část plánů je analýza vodního režimu, identifikace zranitelných prvků v ekonomické, sociální a environmentální sféře. Po analýze dopadů na tyto sektory, by měla být identifikována dlouhodobá opatření. Tato opatření by měla snížit zranitelnost povodí zvýšením dostupného množství vody a snížením spotřeby vody (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007).

V roce 1991 Wilhite publikoval metodiku strategického postup národní úrovni o 10 krocích pro USA. V určitých obměnách při užití principu subsidiarity je tento postup platný pro ČR nebo povodí.

1. Prvním krokem je určení zodpovědných institucí, které budou dohlížet a koordinovat vývoj plánů a informační kampaň a které budou mít následně na zodpovědnosti probíhání plánu během sucha. Výběr zúčastněných stran by měl být v té šíři, aby postihl všechny sektory zainteresované v řešení sucha, vědce, výkonné orgány, lokální správu, bezpečnostní složky, potenciálně a je třeba zahrnout i komunikátora s veřejností (médiá).

2. Následně by měly být ustanoveny a definovány účel a cíle plánů. Na místě je několik úkolů, které by měly ustanovit roli lokální správy v opatřeních, stanovit rozsah plánů, definovat nejvíce ohrožené oblasti, zhodnotit historické dopady a odezvu na sucho, identifikovat zranitelné ekonomické a sociální sektory, definovat způsob řešení sporů mezi účastněnými postiženými suchem a zjistit současné trendy – vzrůst, pokles rizika, naplánovat legislativní a sociální zavádění plánu.

3. Jednotlivá opatření často nedojdou jednoznačné shody všech zúčastněných stran. Je tedy třeba oslovit všechny dotčené skupiny a vysvětlit vzájemná stanoviska. Je nutné, aby všechny strany byly do procesu zahrnuty a osloveny včas z toho důvodu, že mohou odvoláním komplikovat proces schvalování plánu.

4. Je třeba provést „inventura“ zdrojů. Nejdůležitějším prvkem jsou samozřejmě vodní zdroje, ale je třeba kvantifikovat typy půdy, prvky land use, uživatele vodních zdrojů a jejich odběry, množství dobytka apod. Je nutné určit zranitelnost a priority ohrožených sektorů, jak často a v jaké míře budou pravděpodobně suchu vystaveny. Míra postižení oblastí suchem se nemusí rovnat míře zranitelnosti těchto oblastí. Musí být tedy porovnány finanční prostředky, které budou vynaloženy na zavedení opatření vzhledem ke ztrátám, které by nastaly, kdyby tento plán nebyl implementován.

5. Další krok ustanovuje skupiny zodpovědné za vytvoření a implementaci plánu. Tyto skupiny by měly zahrnout monitoring, posouzení rizika a zmírnění následků.

Monitorovací skupina je zodpovědná za sběr dat a jejich analýzu. Cílem je definování hranic a fází sucha. Je-li oblast heterogenní, je dobré klasifikovat „oblasti sucha“, kde jsou projevy srovnatelné. Je třeba nalézt způsob, jak z monitoringu ukazatelů sucha vytvořit co možná nejjednodušší systém rutinního rozhodování a nalézt kanály, kterými se informace budou předávat.

Skupina řízení rizika musí posoudit riziko subjektů vytavení suchu společně s jejich zranitelností. Je nutné pojmenovat dopady, zjistit jejich příčiny a navrhnout způsob jak zmírnit zranitelnost subjektů.

Skupina reakce na sucho by měla navrhnout opatření na zmírnění dopadů a reakce na sucho subjektů, které definovala skupina řízení rizika pro různá časová i prostorová měřítka.

Výsledky práce skupin by měly sloužit jako podklad pro tvorbu dlouhodobých a krátkodobých plánů. Mělo by proběhnout veřejné slyšení a následně by plán měl být doplněn o návrhy. V této fázi je také dobré ustanovit tři **stupně nebezpečí**, které lze určit podle hodnoty mezního průtoku, indexu či pravděpodobnosti. Bonaccorso, Castiglione a Rossi (2007) tyto stupně klasifikují:

Stav bdělosti

- nastává, když monitoring ukáže počáteční fázi sucha. Tento stav přináší mírné riziko. Je předem definovaná pravděpodobnost, že by se poptávka po vodě nestřetla s dostatečnou dodávkou. V této fázi by se zejména měla projevit příprava na možnost vzrůstajícího nedostatku vody. Opatření jsou vesměs přijímána dobrovolně ve formě doporučení bez vynaložení větších finančních prostředků. Je zahájena informační kampaň.

Stav pohotovosti

- vzrůstá pravděpodobnost nedostatku vody. Je třeba přijmout opatření na šetření vodou a mobilizovat přídatné zdroje. Podle předem stanovených priorit by měli být odběratelé kráceni na dodávkách vody.

Stav ohrožení

- nastává, když se ukáže, že sucho může trvat dále a mohou se projevit negativní dopady na dodávku vody. V této fázi jde především o to, zajistit dostatečnou dodávku pitné vody, alespoň minimální dodávku pro zemědělství a minimalizovat škody v ostatních sektorech. Opatření v této fázi jsou již za vysokou cenu finanční i sociální. Využité nástroje musí být přímé a nestrukturální.

6. Z pracovních výsledků výše zmíněných skupin je následně nutné identifikovat potřeby dalšího výzkumu a mezery v legislativě.

7. Pro co nejefektivnější využití výsledků výzkumu je nutné vytvořit komunikační kanály mezi vědci a zákonodárci. Vzájemná spolupráce a porozumění hledisek obou skupin je klíčové pro schválení funkčního plánu.

8. Dále je třeba plán publikovat a vzbudit povědomí o problému. Vědecká stanoviska je veřejnosti třeba předkládat na příkladech, co lze dělat na jakých stupních ohrožení.

9. Dalším krokem je ustanovení vzdělávacích programů pro různé skupiny obyvatel a vypracování prezentací. Je vhodné využít příležitostí jako je Den Země nebo Den vody, připravit workshopy a další akce zaměřené na vodu a její úspory a odpovědný přístup.

10. Pro zhodnocení plánu je třeba vytvořit evaluační metody. Plány je třeba předem testovat a aktualizovat. Existují dva typy evaluace. Prvním je aktualizace plánu buď průběžně, nebo po stanoveném období tak, aby se přizpůsoboval novým poznatkům vědy, technologiím nebo novým direktivám. Jiným typem je evaluace, která by měla proběhnout po každém suchu. Je třeba zhodnotit, jak byl plán využit, jak fungovala opatření a komunikace. Je třeba zhodnotit připomínky a doporučení. Je také třeba zhodnotit, jak sucho probíhalo z hlediska hydrometeorologických veličin, zda není nutné upravit identifikátory sucha.

Plány jsou trojího typu: preventivní Strategický plán přípravy na nedostatek vody, Plán řízení vodních dodávek, který by měl zabránit aby nenastal nedostatek vody, a Plán pro výjimečné situace sucha, jenž funguje během nedostatku. Plány obsahují následující body (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007):

Strategický plán přípravy na nedostatek vody (Strategic Shortage Preparedness Plan):

- kritéria určení ohrožených oblastí
- dlouhodobé zásahy do jednotlivých zásobovacích systémů
- určení priorit přerozdělení vodních zásob při nedostatku mezi obyvatelstvo, zemědělství a průmysl

- definování přípustných dávek vody
- kritéria pro porovnávání jednotlivých zmírňujících opatření
- nástroje na zvýšení informovanosti veřejnosti o problému sucha

Plán řízení vodních dodávek (Water Supply System Management Plan):

- definování indikátorů sucha pro tři stupně nebezpečí
- určení dlouhodobých i krátkodobých opatření, které mají být zavedena, aby se odvrátil stav ohrožení
- odhad ceny opatření a definování zdroje financování
- nástroje na zlepšení podílu investorů a obecného povědomí

Plán pro výjimečné situace sucha (Drought Contingency Plan):

- ukazatele sucha pro vyhlášení nouze
- seznam krátkodobých opatření pro zmírnění dopadů sucha
- nařízení pro koordinaci akcí mezi vládou, regionální samosprávou a vodárenskými společnostmi
- opatření na zlepšení obecného povědomí
- seznam opatření na nápravu škod napáchaných suchem

6.4 Adaptační opatření

Reyer (2012) upozorňuje, že ačkoliv vědeckých prací na téma adaptace přibývá, zdokumentovaných případů realizace je minimum. A to i přes to, že většina adaptačních opatření lze provádět i z jiných důvodů než je adaptace na klimatickou změnu, například zavedení vhodných opatření v krajině podporuje turistiku, zvyšuje biodiverzitu, zdraví lesa apod. Při návrhu adaptačních opatření by ale nemělo být na změnu klimatu pohlíženo jako na proces, jež probíhá samostatně, ale jako proces součinný s demografickým, ekonomickým a urbánním vývojem.

Opatření se podle účelu dělí na tři typy: pro **zvýšení zásob/dodávek vody**, na **snížení poptávky** po vodě a na **minimalizování dopadů** sucha. Každý typ má ještě časové měřítko, podle kterého se dělí na krátkodobá a dlouhodobá (Tab. 10) (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007).

Dlouhodobá opatření mají za cíl co možná nejvíce zmírnit riziko budoucího sucha nebo mu co možná zamezit. Krátkodobá přichází na řadu, kdy už sucho probíhá. Dlouhodobá jsou obsažena ve strategickém plánu, krátkodobá jsou zahrnuta v plánech řízení dodávek vody a plánu pro výjimečné situace. Dlouhodobá opatření mohou být více efektivní, ale v případě, že je riziko sucha malé, je v plánovaném období možné strategii zaměřit na krátkodobá opatření. Ta mají výhodu v tom, že neprovádí technické zásahy do krajiny, lze na ně vyložit menší množství finančních prostředků, což je často limitující faktor. Dlouhodobá opatření bývají často strukturálního charakteru, krátkodobá umožňují individuální řešení, podle výskytu a intenzity sucha. Avšak při plošném nedostatku asi budou nedostatečné (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007).

Tab. 10: Typologie a příklady adaptačních opatření (Bonaccorso, Castiglione, Rossi 2007, upraveno)

		OPATŘENÍ		
		dlouhodobá	krátkodobá	
snížení poptávky		<ul style="list-style-type: none"> • ekonomické pobídky pro šetření vodou • zemědělské techniky na snížení spotřeby vody • plodiny nenáročné na vodu namísto zavlažovaných • dvojitá síť pro městské užití • recyklace vody v průmyslu 	<ul style="list-style-type: none"> • informační kampaň o šetření vodou pro veřejnost • omezení pro některé oblasti městského užití (mytí aut, zalévání) • omezení na závlahu jednoletých plodin • stanovení cen • povinné přiděly 	
	zvýšení dodávky		<ul style="list-style-type: none"> • rozvodná síť pro obousměrnou výměnu • znovu užití upravené odpadní vody • převod vody mezi povodími • stavba nových přehrad nebo zvýšení kapacity stávajících přehrad • stavba rybníků na farmách • desalinizace mořské nebo brakické vody • kontrola infiltrace a evaporačních ztrát 	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšení efektivity využívání stávajících zdrojů • užití přídatných zdrojů nižší kvality nebo vyšší ceny čerpání • užití rezerv podzemní vody
		minimalizace dopadů		<ul style="list-style-type: none"> • vzdělávací aktivity na zvýšení připravenosti na sucho a šetření s vodou • přerozdělení vodních zdrojů na základě požadavků na kvalitu vody • vyvinutí systému včasného varování • zavedení kontingenčního plánu • pojistné programy

Z celé škály opatření, která existují pro adaptaci na hydrologické sucho, lze v podmínkách Česka aplikovat jen omezené množství. Tato opatření jsou kromě měkkých opatření dvojího charakteru, jsou to opatření technická a opatření blízká přírodě, která technické zásahy minimalizují. Pro eliminaci zásahů do krajiny jsou vhodná opatření přírodě blízká, avšak ta jsou spíše podpůrného charakteru a v celkovém efektu zřejmě nedostačující. Jsou to také často opatření nápravná, která vrací do rovnováhy nevhodné zásahy člověka. Limity každého opatření jsou majetkoprávní vztahy, přírodní podmínky, realizovatelná plocha a finanční náročnost.

Přehled opatření podává zpráva: Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření:

Jednou skupinou jsou **opatření v krajině** a ty jsou trojího typu: organizační, agrotechnická a biotechnická. Organizační podporují plošnou rozmanitost v rámci pozemkových úprav, zalesnění a zatravnění, omezení plodin, pod kterými se vytváří nepropustná krusta, např. kukuřice. Patří sem racionalizace zemědělských investic a nepodporování vzniku nových ploch s nutností zavlažovat, a to i v rámci energie z obnovitelných zdrojů, např. omezení produkce biomasy v místech, kde je nedostatek vody.

Mezi agrotechnická opatření patří jiné osevní postupy, podporující infiltraci. Biotechnická opatření jsou např. průlehy či zasakovací pásy.

Další opatření jsou aplikována **na tocích a v nivě**. Tato opatření podporují zvyšování retenční kapacity a infiltrační schopnosti okolí toku. Patří sem revitalizace toků a úprava řečišť zpomalující odtok vody a zlepšující komunikaci s přípovrchovou zvodní a zachování a podpora rozšiřování lužních lesů.

Jiným typem je skupina opatření zaváděna v **urbanizovaných územích**. Je třeba zřídit retenční a vsakovací objekty na zvýšení infiltrace, jímání a využívání srážkových vod. Zde je možné se inspirovat v Německu, kde je sběr dešťové vody ve velkých městech s cílem dosáhnout 15 % sběrné plochy.

Technickým opatřením je obnova starých či zřízení nových **vodních nádrží**. Vliv nádrží na sucho je hodnocen jako pozitivní, jak tomu na základě literatury a vlastních výzkumů uvádí Vlnas a kolektiv (2010). Vodní nádrže udržují zásoby vody a nadlepšují průtoky. Dochází ke zvýšeným minimálním a snížení maximálních průtoků. Literatura

se ovšem většinou věnuje vlivu nádrží na vysoké průtoky než opačně. Je nutné sladit ekologické požadavky a požadavky na zajištění dostatečného množství vody.

Dalším opatřením je **zefektivnění hospodaření s vodními zdroji**. Do této skupiny patří převody vody mezi povodími a vodárenskými soustavami, zpětné převody vody uvnitř povodí, dočasné využití statických zásob podzemní vody, umělé infiltrace, vícenásobné využití vody, zhodnocení a přerozdělování kapacit vodních zdrojů. Příklad si lze nalézt na Kypru, kde vícenásobné užívání vody z praček a myček k zalívání zahrad dokázalo snížit spotřebu vody o 40%. Souvisejícím krokem je vytvoření dodatečné **infrastruktury zásobování vodou**.

Nutným prostředkem adaptace je **zmenšení spotřeby vody**. Mezi tato opatření patří minimalizace ztrát ve vodárenských soustavách, racionalizace stanovení minimálních průtoků, stanovení priorit pro kritické situace nedostatku vody a podpora vzdělávacích programů a informačních kampaní pro veřejnost

Dle Evropské komise (2010) je špatné hospodaření s vodními zdroji často zapříčiněno neúčinnou politikou poplatků za vodu. Úspory a vytvoření návyků by se měly stát prioritou. Nejvhodnější strategií je integrovaný přístup kombinující zavedení poplatků a racionálnější přiděl vody a finančních prostředků vztahujících se k vodě. Finanční rámec racionálního hospodaření s vodou by měl směřovat k podpoře investic a programů směřujících k šetření spíše než k rozvoji infrastruktury zásobování a podpoře kultury spotřeby zvýšením informovanosti a motivace, například i při zadávání veřejných zakázek.

Ekonomické nástroje popisují Slavíková, Petružela a Jílková (2012). Vzhledem k variabilitě dostupnosti vodních zdrojů mohou ekonomické nástroje pomoci jako samoregulační systém k usměrnění poptávky po vodě, v době kdy se poptávka neseťká s nabídkou.

Zpoplatnění povoleného odběru podzemní nebo povrchové vody by mělo umožnit racionalizovat odběr dle různých priorit (zatížení zdroje, typu užití). Tento poplatek by vytvořil ekonomický základ k převoditelnosti povoleného množství odběru vody a tak by měl pomoci racionalizovat užívání vody a to zejména v těch dobách, kdy by podmínky neumožňovaly vydávání nových povolení, či by vydávání bylo omezeno.

Ekonomické pobídky v podobě regulace cen vody mají několik aspektů. Je to jednak sociální hledisko dostupnosti vody pro nízkopříjmové domácnosti a přijatelnost ceny vody. Příliš vysoko nastavené ceny vody snižují dostupnost vody sociálně slabším a snižují platební morálku uživatelů. Na druhé straně stojí udržitelnost využívání

vodních zdrojů, které vysoké ceny vody regulují a zajištěný prostředků nezbytných k zajištění provozu a obnově infrastruktury.

Příkladem takového patření je zavedení vodoměrů pro zavlažovače ve Francii, pokud překročí povolenou hranici odběru.

Existuje systém podpory rozhodování - **decision support system** (DSS), interaktivní přizpůsobivý systém na rozeznávání a řešení komplexních problémů, který by měl na základě dat usnadnit proces rozhodování. Byl navržen pro udržitelný rozvoj německé části Labe. Obsahuje georeferencované simulace modelů a příbuzných dat s uživatelským rozhraním. Uživatelé mohou hodnotit efektivitu managementu a opatření podle scénářů změny klimatu v závislosti na demografickém, socioekonomickém vývoji a zjistit tak cíle managementu povodí jako je kvalita vody a odtokové charakteristiky k realizaci vlastních např. investičních rozhodnutí. (Lautenbach et al. 2009).

Při návrhu adaptačních opatření často dochází ke konfliktu mezi účelem opatření a dopady na jednotlivé sféry. Zvyšování vodní kapacity v krajině vede ke zvýšené evapotranspiraci skrze rostliny, které mohou čerpat vláhu z podzemní vody ve větší míře, než jsou-li dotovány pouze srážkami. To se projevuje zejména v pozdním létě. Zvýšení vodní kapacity krajiny má nesporně pozitivní efekt, nicméně právě kvůli evapotranspiraci může být konečně negativně ovlivněn průtok během srážkově deficitních období. Stejný efekt může mít volná hladina při stavbě nádrží či kanálů k transferu vody mezi povodími. Přehrady i kanály mohou mít dopad na říční ekologii a kvalitu vody (Reyer 2002).

Návrh adaptačních opatření by měl být přizpůsoben možnosti budoucích nestacionárních podmínek. Při neznalosti potenciálního vývoje může dojít k tomu, že budou vynaloženy neadekvátní prostředky, ať už přeceněné či podceněné, na implementování opatření, která jsou nedostatečná nebo postrádají smysl. Projektový management se tedy musí vyrovnat s nejistotami, které do procesu vnáší klimatická změna a modely. Návrh adaptačních opatření by tedy neměl být vytvářen pro konkrétní hodnoty, ale musí zahrnout rozsah možných scénářů a stupeň nejistoty. Následně je třeba zhodnotit jejich pravděpodobnost a jejich ekonomickou návratnost (Kundewicz 2008).

Často ale dochází k tomu, že současné postupy, předpisy a konflikty zájmů znemožňují adaptaci více než technologické a environmentální překážky, to ukazuje na sociální limity adaptace. Reyer uvádí dva obraty, podle kterých se řídí současná adaptace: *adapt when necessary* a zavádění *no-regret measures*. V podstatě říká, že i vyspělá země, jako v jeho článku popisovaný spolkový stát Brandenburg, není schopen adaptace dříve, než problém nastane, a jsou zaváděna opatření, která jsou konstruována na řešení současných problémů bez perspektivy do budoucnosti. Otázkou zůstává, bude-li tento přístup v budoucnu udržitelný (Reyer 2002).

6.5 Legislativa v ČR a Evropě

Mezníkem zájmu států EU o problematiku sucha a uznání nutnosti jeho řešení byl rok 2003. Sucho v tomto roce mělo katastrofické následky, které byly vyčísleny na 13 miliard Euro a počet obětí 30 000 (Hladný 2009).

Zastřešujícím dokumentem je tzv. Bílá kniha Evropské komise (Adapting to Climate Change) která identifikuje adaptační strategii na zvýšení odolnosti vůči změně klimatu v rámci různých sektorů. Hlavní dokument je Water Framework Directive (2000/60/EC), Flood Directive (2007/60/EC), a Water scarcity and Drought Communication. Doprovodným dokumentem je WFD River Basin Management Planning (RBMP), který určuje kroky, posouzení rizika, monitoringu a environmentálních věcí. Obsahuje doporučení, jak nakládat s informacemi o změně klimatu a jak postupovat při přípravě plánů povodí, které obsahuje některé konkrétní doporučení k adaptaci na sucho a povodně. Tento dokument je směřovaný odborníkům a správcům povodí.

Dalším dokumentem vytvořeným Evropskou hospodářskou komisí Spojených národů obsahující obecný rámec procesu adaptace je Guidance on Water and Climate change (UNECE 2009). Obsahuje především legislativní a institucionální zabezpečení na národní úrovni a je tedy směřován především vládním činitelům. Metodika pracuje s pojmem nejistoty současného poznání a pro větší účinnost ho deleguje na úroveň, která je schopná zajistit konkrétní opatření (Mrkvičková, Kos 2010).

Existuje řada i evropských programů, které se suchem a adaptací vodních zdrojů na klimatickou změnu zabývají. Jejich plný výčet uvádí Quevauviller (2011). Za zmínku stojí proběhnutý projekt XEROCHORE (2008-2010) zaměřený na potřeby výzkumu a možnosti legislativy v územích postižených suchem. Pod Evropskou komisí

vznikla Evropská observatoř pro sledování sucha (EDO) za účelem předpovědi sucha, zjišťování a sledování sucha, nedostatku vody a rozšiřování pouští. Na svém webovém rozhraní poskytují informace o současném suchu pomocí mapových výstupů a další informace o suchu.

Legislativa ČR vychází ze směrnice EP a rady ustanovující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky. V souladu s tím byly v ČR zavedeny Zákon č. 254/2001 Sb. o vodách a Vyhláška č. 142/2005 Sb. o plánování v oblasti vod, který byl základem pro vypracování Plánu hlavních povodí ČR (PHP ČR) v květnu 2007. Tento plán byl schválen vládou a jeho závazná část je vyhlášena nařízením vlády č. 262/2007 Sb. V plánu je zdůrazněna role krajinné struktury v omezování negativních dopadů klimatické změny. Povodí s akumulací vody ve formě podzemních zásob nebo v podobě přírodní či umělé akumulace povrchových byla označena jako odolnější vzhledem k mimořádným průtokům.

Byl aktualizován systém územní ochrany lokalit hydrologicky a morfologicky vhodných pro akumulaci povrchových vod, označovaný jako Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod (Generel LAPV). Součástí generelu je označení strategických lokalit, které bude možné využít pro zásobování pitnou vodou. Tyto lokality musí svými hydrologickými a hydrogeologickými podmínkami umožnit i naplnění nádrží v případě předpokládaných dopadů klimatické změny. Další oblasti jsou vytipovány za účelem protipovodňové ochrany a zabezpečení ekologických průtoků v tocích v souladu s pokrytím požadavků na odběry a nadlepšování průtoků. Generel schvaluje Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo životního prostředí a budou sloužit jako podkladový materiál pro Politiku územního rozvoje. Lokality budou přebírány do Zásad územního rozvoje a územně plánovacích dokumentací formou územních rezerv či limitů využití území (Dobrovský, Franková 2009).

6.6 Možnosti adaptačních opatření v povodí horní Otavy

Výsledku analýzy hydrologického sucha v první části práce ukázaly, že sucho povodí v posledním desetiletí postihlo, avšak ne v takové míře, jako v 40. a 60. letech. S přihlédnutím k výsledkům modelace prostřednictvím klimatických scénářů, je pravděpodobné, že se tato situace v budoucnu bude kontinuálně zhoršovat a to ve větší míře v nižších nadmořských výškách.

Je důležité si ale uvědomit, že sucho není problémem pouze konkrétního povodí, ale postihuje většinou rozsáhlou oblast. Z hlediska konceptu odolnosti a zranitelnosti se zranitelná povodí nalézají dále po toku. Při posilování odolnosti by tak neměly být pramenné oblasti Otavy opomíjeny, neboť představují silné stránky hydrologického systému. Dalším zmiňovaným konceptem bylo plánování pro nestacionární podmínky. Z toho pohledu je zřejmé, že posun hydrologického režimu postihne i povodí Otavy, ačkoliv roční objem odtoku se přímo nezmění. Je třeba se připravit na to, že pokles průtoků nastane od dubna do října až listopadu. Už v referenčním roce 2025 by podle modelu průtok klesl o 30 % v květnu, o 12 až 16 % v srpnu a září a v období 2083 v říjnu až o 47 %. To znamená, že je třeba se připravit na nedostatek 550 až 750 tisíc m³ nedostatku v měsících květen až říjen období 2025 a až 2,4 milionu m³ v říjnu období 2083. Pro určení vhodné míry opatření je možné vycházet z návrhových křivek. Jak již bylo zmíněno výše. Při 30ti denním deficitu je v povodí bude chybět přibližně 84 000 m³ vody v profilu Sušice.

Při návrhu opatření je třeba vycházet z charakteristik povodí. Klíčovým specifickým povodí je, že se celé nachází na území více či méně chráněném. To omezuje veškerá technická opatření a tvrdé zásahy do krajiny, které je možné aplikovat do území antropogenně narušeného. Nabízí se tedy dvě možnosti: využít přírodě blízká opatření nebo některých starých antropogenních zásahů.

Při dalších úvahách o vhodných opatřeních je třeba zhodnotit celkový charakter povodí. Jedná se o horské povodí, převážně zalesněné, v nižší části extenzivně využívané s malým podílem zastavěných ploch i trvale žijících obyvatel. Tok není výrazně podélně upravený. Výrazným antropogenním zásahem je vytvořený převod vody v povodí pro vodní elektrárny, meliorace rašelinišť a pozůstatky starých nádrží. Významnými činiteli jsou malé vodní elektrárny a staré nádrže, tzv. klauzy.

V krajině lze aplikovat přírodě blízká opatření. Je třeba zvyšovat retenční kapacitu půdy a její infiltrační schopnosti. Tato opatření lze rovněž využít jako opatření integrované protipovodňové ochrany a protierozní opatření. Na orné půdě se nabízí pozemkové úpravy jako stavba mezí, průlehub a zasakovacích pásů, které zpomalují povrchový odtok z polí.

Meze musí mít vrstevnicový charakter, Vznikají postupně naoráváním, stabilizují se kameny a vegetací je možné je využít např. výsadbě ovocných stromů. Kromě toho mají i krajinnotvorný efekt a funkci biokoridoru. Průleh je biotechnické

opatření. Jedná se o široké mělké příkopy se sběrnou svodnou funkcí, často jsou zpevněny vegetací. Existuje více typů. Je nutné posoudit technickou vhodnost takového opatření, hodí se spíše na méně svažité pozemky s malou členitostí.

Podle odhadů ze satelitních snímků však pozemky v povodí horní Otavy jsou poměrně členité a zatravněné. Jedná se tak hlavně o údržbu stávajících mezí a členění krajiny.

Převládajícím krajinným typem v povodí je les. Vzhledem k tomu, že se jedná především o smrkové monokultury, mu připadá méně pozitivní hodnocení. Podle internetových stránek národního parku se druhová skladba od původní velice liší. Les s diverzifikovanou skladbou nahradil les hospodářský. Podíl smrku v porostu vzrostl o 33 % na celkový podíl 84 % a to zejména na úkor buku, jehož podíl poklesl o 15 %, a jedle, která má o 12 % menší zastoupení.

Podle Švihly (2001 in Bartůňková 2011) má povodí Vydry jednu z nejnižších výparností z lesů srovnatelných poloh, 216 mm za rok a to i přes to, že jehličnaté stromy mají až o 10 % větší výparnost. Lesní porosty výrazně podporují filtraci do půdy skrze silnou opadankovou vrstvu a terénní deprese a pozitivně tak působí na odtok.

Je tedy nutné zasadit se o podporu výsadby původních druhů, zejména snížit podíl jehličnanů, zlepšit tak zdravotní stav lesa a zvýšit jeho odolnost vůči kalamitám.

Dalším významným prvkem krajiny v horní části povodí jsou rašeliniště. Na těchto plochách byl v minulosti proveden antropogenní zásah a rašeliniště byla odvodněna. Toto odvodnění proběhlo ve dvou vlnách. První zásah pomocí odvodňovacích rýh a kanálů proběhl za Schwarzenberských dob před 200 lety. Tyto kanály měly nastavitelné hrázky za účelem zadržení vody v povodí a manipulací. Další fáze přišla v 50. a 70. letech, kdy byly vytvářeny hluboké napřímené rýhy pomocí mechanizace (Hais 2004 in Ševčíková 2009). V současné době probíhá revitalizace pomocí pevných hrází.

Tato práce si neklade ambice problematiku hodnotit. Je zřejmé, že hluboké meliorační rýhy jsou nevhodným zásahem do krajiny a dlouhodobé odvodnění rašelinišť spěje k jejich sukcesi. Odvodněním se mění mikroklima lesů a dochází k většímu kolísání teplot. Nicméně hydrologický režim toků napájených rašeliništi vykazuje značnou rozkolísanost a podle výzkumů v době sucha tok nedotují (Ferda, Hladný,

Bubeníčková, Pešek 1971 in Janský, Kocum 2007). Koncept regulovatelných odtokových kanálů se proto zdá jako dobrý kompromis.

Nepropustné plochy v zástavbě představují malé procento plochy povodí. Jsou ale podle Bičíka a Kupkové (2003) jsou dynamicky se rozvíjejícím se typem ploch v povodí.

Existuje stavební norma TNV 75 9011 o způsobech nakládání se srážkovými vodami odtékajícími z povrchu urbanizovaného území tak, aby bylo co nejvíce přírodě blízké. Je ale nutné oddělit různě znečištěné srážkové vody, kvůli následnému využití.

Jedním principem je povrchové vsakování, při kterém je voda bez jakékoliv retence odváděna na plochu určenou ke vsakování. Takové plochy je například záhodno zřídit v návaznosti na parkoviště a komunikace. Po překročení kapacity vsakovací plochy je voda sváděna do průlehu, který je určen pro krátkodobou retenci a nutné tedy zajisti dobře propustnou zeminu a průlehu (Pírek 2012).

Na obdobném principu funguje tzv. vsakovací nádrž, objekt s výraznou retenční funkcí se vsakováním přes zatravněnou humusovou vrstvu. Podmínkou je dostatečná hydraulická vodivost podloží, aby zatopení nádrže netrvalo příliš dlouho.

Dalším způsobem je vytvoření suché retenční dešťové nádrže (suchého poldru). Jsou to povrchové nádrže, které tvoří vymezený retenční prostor pro srážkové vody povrchového odtoku. Navrhují se s vegetačním překrovem, a regulátorem odtoku v nejnižším odtokovém bodě nádrže a bezpečnostním přelivem. Pro omezení zanášení nerozpustnými látkami se doporučuje vytvoření sedimentačního prostoru.

Naopak trvale částečně napuštěné jsou retenční dešťové nádrže se zásobním prostorem. Jsou navrženy především pro transformaci povodňové vlny, nicméně představují možnost zásoby vody v intravilánu, např. k užití na veřejném prostranství. Jejich retenční prostor je nad hladinou zásobního prostoru, plní mimo to funkci estetickou a zlepšují mikroklima.

Velký potenciál má využití umělých mokřadů s vodními rostlinami, kombinují funkci retenční funkci mělké nádrže a biologického čištění srážkových vod. Zlepšují vlhkostní poměry okolí a slouží k regulaci odtoku. Regulátor je umístěn v úrovni stálého nadržení (Pírek 2012).

Antropogenním zásahem provedeným v minulosti v povodí Vydry byla výstavba retenčních nádrží, tzv. klauzů. V povodí Vydry jich bylo 8 s odhadovaným objemem zadržované vody 110 000 m³. Jsou to nádrže Luzenská (21 000 m³), Rokytecká

(18 000 m³), Javoří (16 000 m³), Novohuťská (15 000 m³), Roklanská (14 000 m³), Studená (3 000 m³), Černohorská (2 200 m³) a Ptačí (1 000 m³) (Běla, Barták, Etlér 2009 in Ševčíková 2009).

Z hlediska řešení problému sucha představují velký potenciál. Problémem ovšem je, že se nachází na území parku, kde takovýto opětovný antropogenní zásah do krajiny není žádoucí. V případě nádrží směřovaných na prevenci sucha by totiž tyto nádrže musely být stále zatopené, neboť, jak již bylo zmiňováno, predikce sucha je velmi poměrně omezená. Otázkou je, zda při počátečních projevech sucha by nádrž fungující v podobě suchého poldru byla schopna se napustit a zachovat přitom minimální zůstatkový průtok pod nádrží.

Vedení Národního parku Šumava na svých webových stránkách nicméně uvádí, že vzhledem ke zvýšenému riziku požáru a zřízení hasičské jednotky, uvažují /podle vyjádření/ o obnově některých klauz.

Na přelomu 50. a 60. let byla jako potenciální zdroj pitné vody pro plzeňskou aglomeraci uvažovaná nádrž Rejštejn. Dnes ovšem pro tento typ projektů není vůle společnosti a tím pádem otevřené „legislativní okno“. A je samozřejmě diskutabilní přínos takto velkého projektu, ačkoliv přínos vodních nádrží při adaptaci na sníženou dostupnost vody je pozitivní.

Adaptačním opatřením, které uvádí Huntjens, Pahl-Wost a Grin (2010) i ostatní autoři nevyžadující žádný zásah do krajiny, je vytvoření fungující platformy pro komunikaci a spolupráci mezi správou parku, obyvateli, vědci a vodohospodáři. Každé adaptační opatření je kompromis a je tak k němu třeba přistupovat. Pro vysvětlení vzájemných stanovisek, sdílení informací a tím pádem vytvoření úspěšné strategie adaptace je vzájemná spolupráce nezbytná.

7 SHRnutí VÝSLEDKŮ A DISKUZE

Pro ucelenou informaci o hydrologickém suchu v povodí Otavy je třeba postavit výsledky jednotlivých částí do vzájemné souvislosti.

Povodí Otavy je díky svým fyzicko-geografickým vlastnostem hydrologického sucha málo náchylné. Patří mezi srážkově nejbohatší v Česku a antropogenní zásahy v minulosti nijak zásadně neohrozily jeho hydrologický režim. Byly zkoumány tři profily, z nichž každý leží v jiné nadmořské výšce. Horní část povodí se jeví jako více hydrologicky cenná díky většímu podílu spadlých srážek.

V první části byla zkoumána historie výskytu hydrologického sucha v povodí a byla provedena analýza časových řad. Pro správný úsudek bylo třeba dobře zhodnotit co nejdélejší řady průtoků a správně nastavit limitní průtok.

Důležitost výběru období je možno demonstrovat na evropské studii z let 1962 až 1990 (Stahl 2001), která hodnotí výskyt sucha v západních Čechách jako klesající. Po analýze v povodí Otavy se ukázalo, že právě rok 1962 byl rokem s nejvíce nedostatkovým objemem za celou dobu pozorování (1930-2011). V kontrastu s tím byla 70. a 80. léta na nedostatkové objemy chudá. Po roce 1990 se však nedostatkové průtoky začaly opět objevovat a zmiňovaný klesající trend není tolik výrazný.

Užití měsíční i fixní limity má svá specifika, proto je ke správné interpretaci dat nutná znalost režimu nízkých průtoků. Fixní limita dává informaci o nedostatečném množství vody vzhledem k jedné hodnotě, naopak měsíční variabilní hodnota postihuje hydrologický režim toku. Specifikem horského povodí je akumulace vody ve sněhu, proto se hodnoty Q_{90} vyskytují rovněž v zimním období. Tyto nedostatkové průtoky však nelze hodnotit společně s těmi, které jsou způsobeny nedostatkem srážek a vysokými teplotami, neboť projevy sucha mají jiný charakter. V povodí Modravy je deficitních průtoků definovaných Q_{90} nejvíce v zimě. Naopak v Sušici to jsou letní měsíce červen a červenec. Bylo tedy pracováno více s měsíční variabilní hodnotou.

Nedostatkové průtoky byly zpracovávány pomocí dvou metod, threshold a SPA. Pro identifikaci epizod sucha se jako lepší a názornější ukázal SPA, který váže minoritní sucha dohromady v případě, že zásoby ještě nebyly dostatečně obnoveny.

Největší sucho v povodí se vyskytlo na přelomu let 1962 a 1963. Z poslední doby je možné jmenovat sucho v roce 2003 a 1992. Výsledky potvrzují, že suché roky mají tendenci se sdružovat. Lze rovněž potvrdit tvrzení Vlnase a kol. (2010), že sucho se opakuje s periodou deseti let, vždy kolem třetího roku daného desetiletí. Výjimkou byl deficit kolem roku 1947, který byl rovněž svým rozsahem extrémní.

Vhodným ukazatelem je intenzita sucha, která slučuje dobu trvání a nedostatkový objem v průměrnou konkrétní veličinu. Lze na něm demonstrovat projevy sucha v denních řadách a shrnout je v následujícím tvrzení. Největší sucha se projevila na konci 40. a počátku 60. let. Následovalo období bez výrazných deficitů. Od roku 1992 se deficitní průtoky opět vyskytují, avšak v menší míře nedostatkových objemů.

Důležité je navázat tyto informace na projekci vývoje odtoku do budoucnosti. K modelaci vlivu klimatické změny na odtok z povodí byl využit model BILAN. Byly modelovány průtoky pro celou škálu modelů RCM, zvláštní zřetel byl kladen na model ENSEMBLE. Tento model je výsledkem projektu, který sdružuje jednotlivé RCM a podle jejich úspěšnosti jim dává váhy. Jeho výsledkem jsou poměrně realistické projekce vývoje.

Podle jednotlivých RCM si lze především vytvořit představu, na jakých datech model ENSEMBLE stojí. V některých měsících se totiž vyskytují až protichůdné modelace jednotlivých RCM, které často závisí na GCM. Lze tak mluvit o optimistických modelech, např. globální model ECHAM5 a HadCM Q3, a pesimistických, mezi které patří i model ALADIN/CLIMATE s globálním modelem ARPEGE.

Modelace odtoku stojí na vstupních datech. Předpokládaným vývojem teplot je jejich nárůst v průběhu celého roku. Jak velký je tento nárůst, závisí na jednotlivých modelech. Podle modelu ENSEMBLE je očekáván růst teplot v jednotlivých referenčních obdobích o 1,1 (2025) až 3,4 °C (2083). Tento předpoklad je realistický vzhledem k současnému vývoji doloženém historickými časovými řadami, kde tento nárůst činil 0,8 °C, a to nejvíce v jarních měsících.

Mnohem složitější situace se ukazuje v projekcích srážek, které ne zcela odpovídají současné situaci. Od listopadu do června se předpokládá spíše nárůst. Naopak od června do září je očekáván postupný pokles. Na historických řadách se

ukázalo, že mezi roky 1960 a 2002 došlo k poklesu srážek od dubna do června, v ostatních měsících spíš k nárůstu. V ročních úhrnech lze vysledovat mírný nárůst po roce 1990, roční minimální úhrny po roce 1990 neklesají pod 800 mm za rok, což se dříve opakovalo právě s desetiletou periodou vázanou na výskyt sucha.

Z těchto faktů lze usuzovat, že na výskyt sucha v povodí mají mimo srážkového deficitu velký vliv teploty.

I přes jistou neurčitost lze z modelů vyvodit závěry o pravděpodobné změně odtoku v jednotlivých referenčních obdobích. V současné době se průměrný nejvyšší průtok vyskytuje v dubnu. V následujícím období toto maximum čeká pravděpodobný pokles a postupný přesun do měsíce března. Od tohoto peaku se očekává signifikantní pokles průtoků s minimem v září. S postupujícím obdobím se tento deficit prohlubuje. Největší pokles průtoků je zaznamenán v květnu. Naopak největší nárůst je zaznamenán v únoru, pravděpodobně daný zvyšujícími se teplotami a dřívějším táním sněhu.

Důležitým závěrem z modelace je znalost objemu vody, který bude oproti současnému stavu chybět. Byly vypočteny nedostatkové objemy podle zvolené limity, avšak toto kritérium se nezdá ideální. Průměrný měsíční průtok je již poměrně robustní veličina. Jako lepší ukazatel slouží procentuální rozdíl objemu. Již v referenčním období 2025 je v květnu zaznamenán pokles objemu průtoku o 30 %. Celkově největší pokles je očekáván v září a to až o 47 %. Naopak v únoru je očekáván postupný nárůst až o 68 %. Tyto hodnoty ukazují na potřebu zadržet únorové průtoky pro užití ve vegetačním období, kdy jich bude třeba.

Hodnoty simulace lze srovnat s vývojem pozorovaných průtoků. Už v současnosti lze sledovat snižování průměrných minimálních květnových a červnových průtoků. V případě května byl rozdíl průměrných minimálních průtoků $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ mezi dvěma třicetiletými obdobími rozdělenými rokem 1980. Rovněž nedostatkové objemy vyskytující se po roce 1990 mají velký podíl v květnových a červnových průtocích.

Ačkoliv technická náročnost modelů roste, stále je nutné k modelaci přistupovat dostatečně kriticky už vzhledem k demonstované variabilitě scénářů. Je nezbytné také nezapomínat, že model představuje obraz velice komplikovaného systému vyjádřený matematickými rovnicemi. Dalším sporným bodem je postavení předpovědi na tzv. emisních scénářích. Funkce CO_2 v atmosféře je nezpochybnitelná, není však jediným prvkem v systému geosfér, který člověk mění. Velkou změnou prošel

např. land use, který se však do těchto scénářů nepromítá. Jiná nejistota pramení z faktu, že dostupné měřené řady jsou z hlediska změn klimatu velice krátké a nelze z nich vyloučit podíl přirozené variability klimatu.

Další rovinou práce byla predikce odtoku v bezesrážkových obdobích. Byly vytvořeny návrhové křivky pro průtok během odtokové recese. K tomu bylo využito vztahu zahrnující počáteční průtok, základní průtok a dvě konstanty. Tento vztah slučuje Reitzovu rovnici, kterou použil Hladný a Buchtele (1968) s rovnicí, kterou uvádí Tallaksen (1995). V této podobě však zřejmě jinde použita nebyla. Avšak zdá se, že charakteru odtoku z tohoto povodí dobře odpovídá. Byla testována na jednotlivých křivkách s lepším výsledkem, než jiné zkoušené rovnice. Je ovšem nutné otestovat její platnost i na jiných povodích. Problematický je také druhý koeficient k_{BF} , který byl v této práci empiricky odvozován podle nejlepší shody. Jedná se však o koeficient vyčerpávání základního odtoku, při dobře provedené separaci složek odtoku a poznání rychlosti vyčerpávání, je tento koeficient rovněž statisticky definovatelný.

Návrhové křivky jsou dobře přizpůsobitelné aktuální situaci. Jsou tak účinným nástrojem pro plánování a definování stupňů sucha. Jak bylo zmiňováno a jak je patrné z výsledků modelů, je třeba změnit pohled na stacionární hydrologii. Činit opatření na základě těchto návrhových křivek se v dlouhodobém horizontu může projevit jako nedostatečné.

Vzhledem k absenci potřebných dat je nenaplněnou perspektivou této práce modelace recesních křivek v budoucích referenčních obdobích. Pomocí znalosti koeficientu klimatických modelů je třeba přírůstkovou metodou ovlivnit klimatické veličiny v jednodenním kroku. Dále je nutné nakalibrovat model na jednodenní krok a z výsledků vybrat recesní úseky, sestavit návrhové křivky a porovnat vývoj budoucí situace. Tento postup je rovněž nutné aplikovat na různých povodích pro srovnání výsledků.

V poslední části byly zmíněny možnosti adaptace. Zde je nutné zejména uvážit, které z navrhovaných možností jsou realizovatelné. V dnešní době zřejmě není možné uvažovat o realizaci trvale napuštěných nádrží v národním parku, ačkoliv jejich objem by současnou návrhovou potřebu pokryl. Jak ale bylo zmíněno, k realizaci takového opatření je třeba všeobecná vůle, která vyplývá z dostatečné informovanosti či kritické situace.

Povodí bylo celkově hodnoceno jako poměrně „zdravé“. Je nicméně nutné zasadit se o nápravu druhové skladby lesa a přirozenou retence vody v krajině. Bylo by rovněž bylo užitečné věnovat se výzkumu role rašelinišť během sucha tak, aby se v tomto kontextu dalo definitivně rozhodnout, zda kanály otevřít či zahradit.

Na příkladě tohoto povodí se také nabízí příklady typických konfliktů opatření. Je třeba zvážit, jak cenné ekosystémy by byly ztraceny při stavbě takovéto nádrže. Zda jsou vůbec technické zásahy v jedné z poměrně zachovalých krajin v Česku žádoucí. Je rovněž důležité uvážit, jaký vliv by měla evapotranspirace z volné hladiny. Tento problém se týká i zamokřených rašelinišť a krajiny.

8 ZÁVĚR

V naší krajině jsme se naučili brát dostatek vody jako samozřejmost. Současné události i projekce budoucího vývoje klimatu však naznačují, že toto dosavadní pravidlo může mít omezenou platnost. Sucho je často popisováno jako skrytá hrozba nebo plíživý fenomén, který díky fungující infrastruktuře dodávek vody postupuje v naší společnosti dlouhou dobu bez povšimnutí běžné populace. Dopady sucha však mohou mít velké environmentální, ekonomické i sociální dopady a je proto třeba tomuto fenoménu věnovat dostatečnou pozornost.

Tato práce se problematice hydrologického sucha věnuje komplexně. Byl popsán výskyt hydrologického sucha v historických řadách dat a pravděpodobný vliv klimatické změny na hydrologické sucho v povodí. Dále byly zkoumány možnosti predikce vývoje odtoku v bezesrážkových obdobích a pozornost byla rovněž věnována problematice plánování a managementu povodí s cílem adaptace na sucho.

Tyto aspekty výzkumu hydrologického sucha byly aplikovány v povodí horní Otavy. Ukázalo se, že v současnosti povodí netrpí větším suchem než v minulosti. Zároveň ale bylo konstatováno, že se deficitní průtoky po dvacetiletém období relativně vyrovnaného odtoku začaly opět objevovat, i když v menší míře než v první polovině sledovaného období. Klimatické modely do budoucna projektují poměrně negativní změnu a současný vývoj klimatických veličin tento trend potvrzují. Už v současné době je zaznamenán růst teplot během celého roku a změna ve srážkovém režimu. Výsledky klimatického modelování ukazují, že je zejména potřeba se připravit na posun režimu průtoků. Očekává se nárůst průtoků v únoru vlivem dřívějšího tání sněhové pokrývky a naopak deficitní průtoky v druhé části roku od května. Tomu je třeba přizpůsobit management povodí a je třeba aplikovat opatření tak, aby bylo zabráněno negativním dopadům těchto změn.

Povodí horní Otavy je v tomto pohledu specifické. Jedná se o jedno ze srážkově nejbohatších povodí v Česku. Situace je tu tedy jiná než např. na Rakovnickém potoce či Blšance, kde je již konstatován výrazný pokles průtoků. Je však třeba si uvědomit různá měřítká problému. Bylo prokázáno, že se opětovný výskyt nedostatkových průtoků projevuje v dolní části povodí s větší intenzitou než ve vyšších nadmořských výškách a je pravděpodobné prohlubování situace dále po toku. Pramenná oblast tak

tvoří odolnou složku jinak zranitelného povodí a je tedy důležité k němu tak přistupovat a podporovat retenci vody v povodí.

Jako potenciálně účinný nástroj k tvorbě plánů adaptace na hydrologické sucho se ukázaly recesní křivky, které umožňují predikci vývoje odtoku a nedostatkového objemu ve srážkově deficitních obdobích. Představují i možnost aplikace vlivu klimatické změny na epizody sucha. Právě díky možnosti využití pro definování stupňů sucha a tvorby plánů pro návrhové veličiny ovlivněné změnou klimatu jsou zajímavým cílem dalšího aplikovaného výzkumu sucha.

Zmírnění negativních dopadů sucha patří mezi jednu z největších výzev managementu vody. V kontextu klimatické změny je třeba přizpůsobit se nestacionárním podmínkám a naučit se pracovat s nejistotou vycházející z celého procesu modelace klimatické změny. Jak bylo řečeno, o většině adaptačních návrhů se prozatím spíše hovoří a zdokumentovaných realizovaných opatření je zatím poskromnu. Právě neschopnost prosadit plynulý rozvoj prevence v relativních obdobích klidu mezi odtokovými extrémy činí systém eliminace negativních dopadů málo efektivní. Je třeba dlouhodobě zakotvit kulturu spotřeby vody tak, aby nebyl vyvíjen zbytečný tlak na vodní zdroje, a osvojit si pohled na vodu jako na cennou a strategickou surovinu budoucnosti.

9 POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE

9.1 Literatura

BARTUŇKOVÁ, K. (2011): Vliv lesních disturbancí na dynamiku odtoku v oblasti centrální Šumavy. Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha, 116 s.

BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z. W., WU, S., PALUTIKOF, J.P. (eds.) (2008): Climate Change and Water. Technical Paper VI – english. IPCC Secretariat, Geneva, 210 s.

BĚLA, J., BARTÁK, J., ETTLER, Z. (2001): Plavení dříví na střední Šumavě: 200 let Vchynicko-Tetovského plavebního kanálu. Západočeská energetika, a. s., 200 s.

BIČÍK, I., KUPKOVÁ, L. (2003): Vývoj struktury ploch v povodí Otavy v letech 1845-2000. Závěrečná zpráva k projektu GAČR 205/03/Z046 „Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova. 18 s.

BONACCORSO, B., CASTIGLIONE, L., ROSSI, G. (2007): Guidelines for planning and implementing drought mitigation measures. In Rossi, G. et al. (Eds.): Methods and Tools for Drought Analysis and Management. Department of Physics, University of Rome “La Sapienza”, Rome, Springer, s. 325-347.

ČERVENÝ, J. a kol (1984): Podnebí a vodní režim ČSSR. SZN, Praha, 414 s.

DEMEK, J. a kol. (1965): Geomorfologie Českých zemí. Nakladatelství ČSAV, Praha, 333 s.

ESTRELA, T. a kol. (2001): Extreme hydrological events: floods and droughts. Environmental issue report No. 21: Sustainable water use in Europe, Part 3. European Environment Agency, 84 s.

EVROPSKÁ KOMISE (2010): Zpráva komise radě a evropskému parlamentu: Druhá zpráva o následných opatřeních ke sdělení Komise o nedostatku vody a o suchu v Evropské unii KOM (2007) 414 v konečném znění. Brusel, 10 s.

FERDA, J., HLADNÝ, J., BUBENÍČKOVÁ, L., PEŠEK, J (1971): Odtokový režim a chemismus vod v povodí Horní Otavy se zaměřením na výskyt rašelinišť. Sborník prací HMÚ, sv. 17, Praha, s. 22-126.

FOLKE, A. et al. (2005): Adaptive governance of social-ekological systems. *Annual Review of Environmental Resources*, 30, 8, s. 441-473.

DOBROVSKÝ, P., FRANKOVÁ, L. (2009): Generel lokalit pro akumulaci povrchových vod. *Ochrana přírody*, 64, č. 5, s. 7-9.

GUMBEL, E. J. (1963): Statistical forecast of drought. *Bulletin of the international Association of Scientific Hydrology* 8, s. 5-23.

HAIS, M. (2004): Vliv odvodnění na funkce krajiny v oblasti NP Šumava. *Collection of Scientific Papers. Faculty of Agriculture in České Budějovice. Series for Crop Sciences. Special Issue: Agroregion*, 21, č. 2-3, s. 343-346-

HANEL, M., VIZINA, A. (2010): Hydrologické modelování změn klimatu v denním kroku: Korekce systematických chyb a přírůstková metoda. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 52, mimořádné číslo II, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i, s. 17-21.

HISDAL, H., DEHMUT, S., STAHL, K., TALLAKSEN, L. M., (2000): Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International journal of climatology*, 21, č. 3, s. 317-333.

HISDAL, H., TALLAKSEN, L. M. (Eds.) (2000): Drought event definition. *Technical Report to the ARIDE project No. 6. Oslo*, 41 s.

HLADNÝ, J., BUCHTELE, J. (1968): Předpovědi odtoku v bezsrážkových obdobích. *Sborník prací hydrometeorologického ústavu Československé socialistické republiky*, 12, s. 77- 150.

HLADNÝ, J. (2009): Druhy sucha. In: Němec, J., Kopp, J. (Eds.): *Vodstvo a podnebí v České republice. Ministerstvo zemědělství České republiky, Consult Praha*, s. 66.

HLADNÝ, J. (2009): Jaké následky přineslo sucho v roce 2003? In: Němec, J., Kopp, J. (Eds.): *Vodstvo a podnebí v České republice. Ministerstvo zemědělství České republiky, Consult Praha*, s. 81.

HUNTJENS, P., PAHL-WOST, C., GRIN, J. (2010): Climate change adaptation in European river basins. *Regional Environmental Change*, 10, č. 4, Springer, s. 263-284.

JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2007): Retenční potenciál v pramenných oblastech toků. In: Langhammer, J. ed.: *Povodně a změny v krajině. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze a Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha*, 350 s.

JOHANOVSKÝ, Z., WOLF, P. a kol. (1985): Hodnocení suchého období let 1982-4 v profilech vybraných nádrží ČSR. ČHMÚ, Praha, 36 s.

KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ, O. (2013): User's guide BILAN. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M., Praha, 33s.

KINGDON, J. W. (1995): Agendas, alternatives and public policies, HarperCollins, New York.

KLIMENT, Z. MATOUŠKOVÁ, M. (2007): Změny srážko-odtokových poměrů v pramenných oblastech povodí Otavy. In: Langhammer, J. ed.: Povodně a změny v krajině. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze a Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha, 350 s.

KOCUM, J. (2012): Tvorba odtoku a jeho dynamika v pramenné oblasti Otavy. Disertační práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha, 203 s.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. (2008): Rapid communication: The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques, 53, č. 1, IAHS Press, s. 3-9.

LAUTENBACH, S. et al. (2009): Application of the Elbe-DSS: Scenario Analysis and Management Options, Environmental Modelling & Software 24, 1, s. 26-43.

LANGHAMMER, J. (2003): Antropogenní upravenost říční sítě v povodí Otavy. Závěrečná zpráva k projektu GAČR 205/03/Z046 „Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova. 12 s.

LORENZ, P., JACOB, D. (2010): Validation of temperature trends in the ENSEMBLES regional climate model runs driven by ERA40. Climate Research, 44, č. 2-3, s. 167-177.

MRKVIČKOVÁ, M., KOS, Z. (2010): Metodika posouzení dopadů klimatické změny a návrhu adaptačních opatření na vodních zdrojích. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 52, mimořádné číslo II, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i, s. 21-24.

NOVICKÝ, O. a kol. (2008): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Zpráva za rok 2008. VÚV T.G.M., Praha, 59 s.

NOVICKÝ, O. a kol. (2009): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Zpráva za rok 2009. VÚV T.G.M., Praha, 95 s.

PAVLÁSEK, J. (2010): Retenční schopnosti malého horského povodí při extrémních srážkoodtokových událostech. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 52, č. 5, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i, s. 12-14.

QUEVAUVILLER, P. (2011): Adapting to climate change: reducing water-related risks in Europe – EU policy and reseatrch consiradation. Environmental Science and Policy, 14, č. 7, Elsevier, s. 722-729.

REYER, CH. et al. (2012): Climate change adaptation and sustainable regional development: a case study for the Federal State of Brandenburg. Regional Environmental Change, 12, č. 3, Springer, s. 523-54.

ŘIČICOVÁ P. et al. (2003): Sucho v českých povodích v roce 2003 a v minulých desetiletích. In: Sborník příspěvků k Workshopu 2003, ČVUT, Praha, s. 103-112.

SLAVÍKOVÁ, L., PETRUŽELA, L., JÍLKOVÁ, J. (2012): Ekonomické nástroje k podpoře adaptace vodního hospodářství ČR na změnu klimatu. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 54, č. 1, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i, s. 5-4.

ŠACHOVÁ, B. (2010): Hydrologické sucho v kontextu klimatické změny ve světě a v českém povodí Labe. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. Praha. 95 s

ŠEFRNA, L. (2003): Pedologická charakteristika povodí Otavy ve vztahu k povodním. Závěrečná zpráva k projektu GAČR 205/03/Z046 „Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. 17 s.

ŠEVČÍKOVÁ, L. (2009): Antropogenní ovlivnění odtokového režimu v povodí Vydry. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. Praha. 96 s.

STAHL, K. (2001): Hydrological drought, study across Europe. Dizertační práce. Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, 122 s.

ŠVIHLA, V. (2001): Vliv lesa na odtokové poměry na malém povodí. Lesnické práce, 80, 2, s. 1.

TALLAKSEN, L. M. (1995): A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165, s. 349-370, Elsevier.

TALLAKSEN, L. M., VAN LANEN, H. A. J. (Eds.) (2004): Hydrological drought: Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. *Developments in water science*, 48, Elsevier, 579 s.

VIZINA, A. (2008): Hydrologická studie dopadů změny klimatu na průtoky v povodí Berounky. Diplomová práce, Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování, Fakulta životního prostředí, ČZU, 100 s.

VLNAS, R. (2010): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 162 s.

VOREL, Č. (1937): Sucha na území Československé republiky v posledních desetiletích. *Práce a studie*, sešit 22. Státní ústavy hydrologický a hydrotechnický T. G. Masaryka, 14 s.

WILHITE, D. A. et al. (2000): Planning for drought: Moving from crisis to risk management. *Journal of the American Water Resources Association*, 36, č. 4, s. 697 – 710.

WEDGBROW, C. S. et al. (2002): Prospects for seasonal forecasting of summer drought and low river anomalies in England and Wales. *International Journal of Climatology*, 22, s. 219-236, Wiley Interscience.

9.2 Zdroje

9.2.1 Internetové zdroje

ČHMÚ: Modelování klimatu a jeho změn. Dostupné z http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/cc_chap07.pdf > [cit. 2013-7-14]

Intergovernmental panel of climate change. Dostupné z <http://www.ipcc.ch/> > [cit. 2013-6-20]

KLIEGROVÁ, S. a kol. (2010): Daily precipitation in the Czech Republic: Different methods for statistical correction of model results: Poster. ČHMÚ a MFF UK,

Dostupné z < <http://www.ufa.cas.cz/dub/prasce/2010-ims-c-precip-stana.pdf> >

[cit. 2013-7-14]

Max-Planck-Institut für Meteorologie Dostupné z < <http://www.mpimet.mpg.de/>>

Met Office: Dostupné z < <http://www.metoffice.gov.uk/>>

Meteo France: Dostupné z < <http://www.cnrm.meteo.fr/gmgec/?lang=fr>>

NP Šumava – internetové stránky: Dostupné z < <http://www.npsumava.cz/cz/> >

[cit. 2013-7-30]

PÍREK, O. (2012): Hospodaření se srážkovými vodami (HDV) – TNV 75 9011. Sborník k semináři ASIO, spol. s.r.o. Dostupné z

<<http://www.asio.cz/cz/99.hospodareni-se-srazkovymi-vodami-hdv-tnv-75-9011>>

[cit. 2013-8-14]

Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních patření. Extrakt ze závěrečné zprávy projektu VaV SP/1a6/108/07. Dostupné z

<http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/vav_Extrakt_ZZ_2011.pdf> [cit. 2013-8-14]

9.2.2 Mapové podklady a digitální zdroje

Databáze ArcČR500, verze 9.3., vrstvy SHP

Databáze DIBAVOD: A - základní jevy povrchových a podzemních vod., vrstvy SHP. VÚV T.G.M. – přístup 19.6.201 Dostupné z WWW <<http://www.dibavod.cz>>

Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater, CD-ROM: Worked examples, self-guided tours and case studies. Elsevier, 2004.

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hydrografické charakteristiky povodí	21
Tab. 2: Hodnoty limitních průtoků na profilu Modrava, Rejštejn a Sušice	32
Tab. 3: SPA pro profil Modrava pro Q 90	36
Tab. 4: SPA Q 90 - profil Rejštejn	36
Tab. 5: SPA Q 90 – profil Sušice	37
Tab. 6: Vývoj složitosti GCM od 70. let do současnosti.....	43
Tab. 7: Regionální modely využité v projektu ENSEMBLE.....	44
Tab. 8: Procentuální rozdíl objemu průtoku referenčních období 2025, 2055 2083 vzhledem k 1947-1990	57
Tab. 9: Parametry recesních křivek pro zájmové profily	65
Tab. 10: Typologie a příklady adaptačních opatření.....	78

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vývoj sucha v hydrologickém cyklu	11
Obr. 2: Trend vývoje intenzity hydrologického sucha v Evropě v období 1962-1990	15
Obr. 3: Schematická mapa zájmového povodí horní Otavy	19
Obr. 4: Roční srážkové úhrny na mezipovodí oddělené profily Modrava, Rejštejn a Sušice pro období let 1961 až 2001	23
Obr. 5: Průměrné měsíční srážkové úhrny za období 1961-2002	23
Obr. 6: Rozdíl průměrných měsíčních srážkových úhrnů s vyznačeným procentuálním rozdílem	24
Obr. 7: Průměrné roční teploty (pro hydrologický rok) ve stanici Kašperské hory a Churáňov od r. 1952 do r. 2010 se zobrazením trendu lineární regrese	25
Obr. 8: Sezonní průměrné teploty ve stanici Kašperské hory a Churáňov v obdobích 1952-1980 a 1981- 2010.....	25
Obr. 9: Roční průměrné průtoky pro profily Modrava (r. 1931-1939 a 1949-2010), Rejštejn (r. 1912-1919, 1931-1936 a 1948-2010) a Sušice (r. 1931-2010).....	31
Obr. 10: Křivka překročení průtoky pro profily Modrava, Rejštejn a Sušice.....	32
Obr. 11: Příklad použití fixní a variabilní hodnoty v suchých letech 1962 a 2003 na profilu Rejštejn.....	33
Obr. 12: Roční režim nízkých průtoků.....	33
Obr. 13: Měsíční minima pětidenního klouzavého průměru na profilu Sušice	34
Obr. 14: Počet dní s nedostatkovým průtokem pod Q90% s vyznačeným podílem hodnot v zimním a letním období v profilu Modrava	35
Obr. 15: Počet dní s nedostatkovým průtokem pod Q90% s vyznačeným podílem hodnot v zimním a letním období v profilu Rejštejn.....	35
Obr. 16: Počet dní s nedostatkovým průtokem pod Q90% s vyznačeným podílem hodnot v zimním a letním období v profilu Sušice	35
Obr. 17: Nedostatkový objem v měsících květen až říjen na profilu Modrava v období 1931 až 1940 a 1949 až 2011	38
Obr. 18: Nedostatkový objem v měsících květen až říjen na profilu Rejštejn v období 1912 až 1921, 1931 až 1938 a 1948 až 2011	38
Obr. 19: Nedostatkový objem v měsících květen až říjen na profilu Sušice v období 1930 až 2011	39
Obr. 20: Intenzita sucha na profilu Modrava	39
Obr. 21: Intenzita sucha na profilu Rejštejn	40

Obr. 22: Intenzita sucha na profilu Sušice	40
Obr. 23: Scénáře SRES socioekonomického vývoje	41
Obr. 24: Proces modelování vlivu klimatické změny na vodní zdroje	42
Obr. 25: Vývoj průměrných teplot v referenčních obdobích v modelu ENSEMBLE	48
Obr. 26: Přírůstek teplot v referenčních obdobích oproti současným průměrným měsíčním hodnotám.....	48
Obr. 27: Vývoj teplot v referenčních obdobích 2025, 2055 a 2083 vzhledem k současným průměrným měsíčním teplotám.....	49
Obr. 28: Procentuální změna srážek v referenčních obdobích oproti současným průměrným měsíčním srážkovým úhrnům	50
Obr. 29: Srážkové úhrny podle jednotlivých modelů pro referenční období 2025, 2055 a 2083 a současné průměrné měsíční srážky	51
Obr. 30: Modelovaný průtok pro jednotlivé scénáře v referenčním období 2025 a současný průměrný měsíční průtok	52
Obr. 31: Modelovaný průtok pro jednotlivé scénáře v referenčním období 2055 a současný průměrný měsíční průtok	53
Obr. 32: Modelovaný průtok pro jednotlivé scénáře pro referenční období 2083 a současný průměrný měsíční průtok	54
Obr. 33: Modelované průtoky modelu ENSAMBLE pro referenční období 2025, 2055, 2083 a 1947-1990.....	55
Obr. 34: Variabilita měsíčních průtoků z modelu ENSEMBLE v referenčních obdobích 1947-1990, 2025, 2055 a 2083	55
Obr. 35: Rozklad modelovaného odtoku na jednotlivé složky pro referenční období 1947-1990, 2025, 2055 a 2083	56
Obr. 36: Objem nedostatkového průtoku v referenčních obdobích 2025, 2055 a 2083 od limity Q ₉₀ klouzavého průměrného 31-denního průtoku 1930-2011	58
Obr. 37: Recesní křivka pro letní období - profil Modrava	66
Obr. 38: Recesní křivka pro podzimní období – profil Modrava.....	66
Obr. 39: Recesní křivka pro letní období - profil Rejštejnský.....	66
Obr. 40: Recesní křivka pro podzimní období - profil Rejštejnský.....	67
Obr. 41: Recesní křivka pro letní období - profil Sušice	67
Obr. 42: Recesní křivka pro podzimní období - profil Sušice	67
Obr. 43: Profil Modrava: 28denní sucho s Q ₀ =2,89 a BF=1,724, v letním režimu. Kritérium MAPE 4,3.....	68
Obr. 44: Profil Sušice: 35denní sucho s Q ₀ = 6,8 a BF= 3,4, v letním režimu. Kritérium MAPE 26.....	68

Obr. 45: Profil Rejštejn: 30denní sucho, $Q_0=3,820$ a BF 0,585 v podzimním režimu. Kritérium MAPE 28..... **69**