

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie



**MODELOVÁNÍ VLIVU ZMĚN V KRAJINĚ NA PRŮBĚH POVODNÍ
V POVODÍ HORNÍ LUŽNICE**

(Modelling the land use changes impact on the course of floods in the
upper Lužnice river basin)

Diplomová práce

Věra VÁŇOVÁ

Vedoucí práce: RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

PRAHA 2008

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací s názvem „Modelování vlivu změn v krajině na průběh povodní v povodí horní Lužnice“ vypracovala samostatně na základě uvedených informačních zdrojů. Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely.

V Pacově dne 25.8. 2008

.....

Věra Váňová

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé práce RNDr. Jakubovi Langhammerovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále pak bych chtěla poděkovat RNDr. Tomáši Vlasákovi, Ph.D. za poskytnutí informací z jiného pracoviště. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je modelování změn odtoku z povodí vlivem měnícího se krajinného pokryvu v povodí horní Lužnice po závěrový profil Pilař. Pro samotné modelování byl vybrán srážko-odtokový model HEC-HMS. Cílem práce je aplikace a ověření chování vybraného modelu a jeho následné využití pro simulace odtokové odezvy na příčinou srážku pro čtyři odlišné stavy krajinného pokryvu. První dva se týkaly let 1990 a 2000 (analyzováno na základě dat CORINE Land Cover). Další dva byly čistě hypotetické scénáře, kdy byly měněny kategorie krajinného pokryvu. Modelování proběhlo pro srážky s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Jako hlavní metoda byla použita metoda SCS CN.

Klíčová slova

Modelování srážko-odtokových procesů, srážko-odtokový model, HEC-HMS, horní Lužnice, krajinné scénáře, kalibrace

Abstract

Thesis subject is modelling land use changes impact on the runoff in the Upper Lužnice river basin down to the gauging station Pilař. Rainfall-runoff model HEC-HMS was used for rainfall-runoff modelling. The main goal is an application and testing of chosen hydrological model for four different classification of land use. The first two includes years 1990 and 2000 (analysed on CORINE Land Cover data basis). The other two were hypothetical and in this cases were categories of land use changed. Modelling covered rainfall for period of 10, 20, 50 and 100 years. The SCS CN method was used.

Keywords

Rainfall-runoff modelling, rainfall-runoff model, HEC-HMS, the Upper Lužnice, scenarios modelation, calibration

OBSAH:

1. ÚVOD	7
2. VYMEZENÍ A PŘÍRODNÍ CHARAKTERISTIKA OBLASTI	9
2.1. Vymezení zájmové oblasti	9
2.2. Základní charakteristika toku horní Lužnice	10
2.2.1. Vysoko položená pramenná oblast.....	10
2.2.2. Rakouská vrchovinná část.....	10
2.2.3. Třeboňská pánev	11
2.3. Přírodní charakteristika povodí	12
2.3.1. Geologická charakteristika povodí.....	12
2.3.2. Geomorfologie	14
2.3.3. Půdní poměry	16
2.3.4. Klimatická charakteristika	18
2.3.5. Hydrologické poměry	21
2.3.6. Vegetační pokryv	27
3. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH PROCESŮ	30
3.1. Model HEC- HMS 3.1.0.....	31
3.1.1. Podpůrné programové prostředky	33
3.2. Složky hydrologického cyklu v modelu HEC-HMS.....	34
3.2.1. Model objemu odtoku	35
3.2.2. Model transformace přímého odtoku	36
3.2.3. Model základního odtoku.....	36
3.2.4. Model korytového odtoku.....	37
4. PŘÍPRAVA SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU	38
4.1. Zpracování fyzicko-geografických charakteristik povodí.....	38
4.1.1. Tvorba digitálního modelu reliéfu (DMR).....	38
4.1.2. Tvorba říční sítě a subpovodí v extenzi ArcHydro	39
4.1.3. Výpočet charakteristik povodí v extenzi HEC-GeoHMS	41
4.1.4. Sestavení a export hydrologického modelu povodí.....	50

4.2.	Zpracování meteorologických dat v HEC-DSSVue	51
4.2.1.	Zpracování srážkových dat	51
4.2.2.	Zpracování dat o průtocích.....	52
5.	PRŮBĚH A VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ	54
5.1.	Sestavení modelu.....	54
5.2.	Zadání kontrolních specifikací	55
5.3.	Kalibrace a validace srážko-odtokového modelu.....	56
5.3.1.	Metody hodnocení úspěšnosti modelování	57
5.3.2.	Kalibrace události v srpnu 1991.....	58
5.3.3.	Validace modelu na události ze srpna 2002	60
5.4.	Scénářové modelování	63
5.4.1.	Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 100 let.....	64
5.4.2.	Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 50 let.....	65
5.4.3.	Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 20 let.....	66
5.4.4.	Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 10 let.....	67
6.	DISKUZE.....	68
7.	ZÁVĚR	71
8.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
9.	SEZNAM MAPOVÝCH A DATOVÝCH PODKLADŮ.....	76
9.1.	Mapy	76
9.2.	Datové zdroje	76
10.	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK, GRAFŮ A PŘÍLOH	77
10.1.	Seznam obrázků:.....	77
10.2.	Seznam tabulek:	77
10.3.	Seznam grafů:	78
10.4.	Seznam příloh:	79
PŘÍLOHY		80

1. Úvod

Způsob využívání krajiny, který je určen především hospodařením člověka v krajině, má patrný vliv na charakter odtokového procesu. Intenzifikace zemědělské činnosti a změny v uspořádání a využívání krajiny včetně hydrotechnických zásahů výrazně ovlivnily vodní režim na významné části území České republiky. Zájem o toto téma zvyšuje především rostoucí četnost a intenzita povodní. Od devadesátých let dvacátého století je věnováno značné úsilí k identifikaci a omezení negativních vlivů těchto změn. Jejich význam si uvědomuje nejen vědecká veřejnost, ale také političtí činitelé, což dokládá množství programů a opatření snažící se vrátit vodnímu režimu přírodní podobu. Jedním z přístupů ke zmírňování povodňových škod je snaha o zvyšování retenční schopnosti krajiny. Při zkoumání míry vlivu této charakteristiky území na schopnost zmírnit množství škod napáchaných extrémními meteorologickými situacemi je možné využít hydrologických modelů.

Tématem předkládané práce je modelování odtoku v povodí horní Lužnice po závěrový profil Pilař. Specifikem vybrané oblasti je geografická poloha na území dvou států, Česka a Rakouska, přičemž téměř 71 % leží na území Rakouska. Dolní část povodí horní Lužnice zasahující do Třeboňské pánve, představuje díky důmyslné síti umělých stok a rybníků komplikovaný hydrologický systém. Z hlediska průběhu a následků extrémních povodní je tato oblast unikátní především silným transformačním účinkem na povodňovou vlnu a tím zcela atypickým průběhem povodňových událostí (Langhammer, 2005).

Pro modelování srážko-odtokového procesu byl zvolen model HEC-HMS, vyvinutý americkou armádou, jehož výhodou je, že je volně dostupný a je kompatibilní s GIS. Tento model našel pro svoje kvality široké využití ve vědeckých výzkumech nejen v USA, ale i jinde ve světě.

Hlavním cílem práce je aplikace a ověření vybraného srážko-odtokového modelu tak, aby vhodně reprezentoval chování povodí, a následně simulace odtokové odezvy při různých krajinných scénářích. Toho bylo dosaženo prostřednictvím jednotlivých dílčích úkolů:

- příprava vstupů, sestavení modelu,
- kalibrace srážko-odtokového modelu,
- testování na nezávislých vstupních datech,
- konstrukce možných scénářů.

Kalibrace modelu proběhla na povodni ze srpna 1991. Pro ověření kalibrovaného modelu byla vybrána povodeň ze srpna 2002. Scénářové modelování bylo postaveno na datech z let 1990 (představující období intenzivního hospodaření) a 2000, kdy byla již

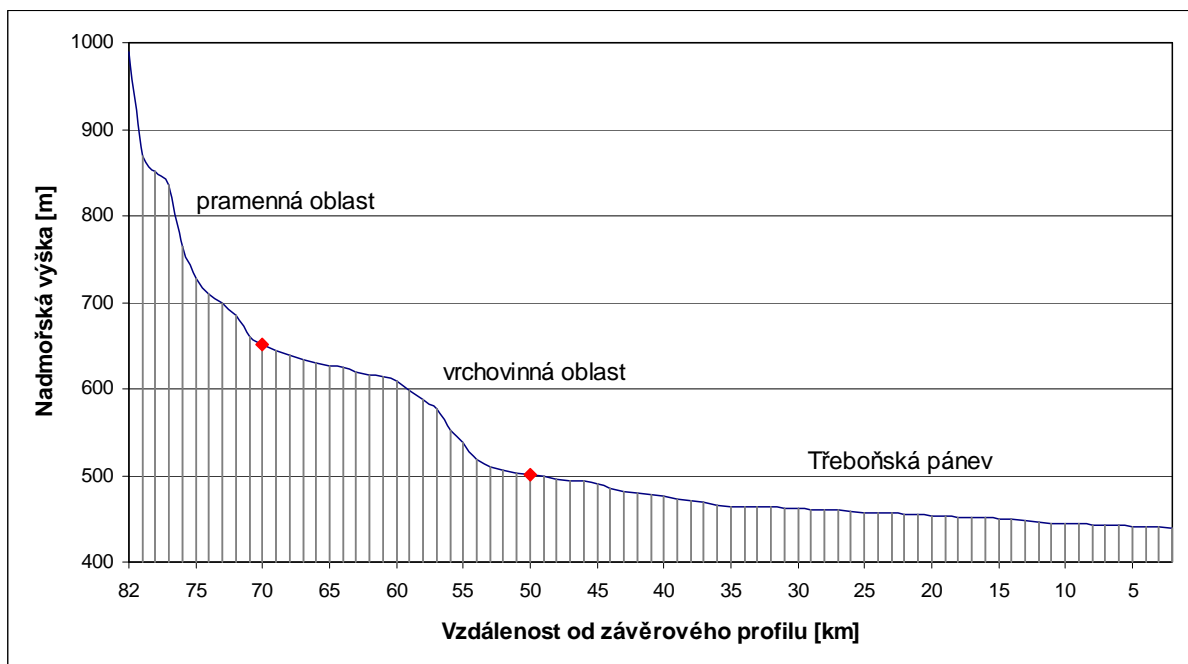
předpokládána změna krajinného pokryvu. Srovnání bylo doplněno o dva hypotetické scénáře.

Diplomová práce je členěna do šesti hlavních částí. V úvodní kapitole byly vymezeny cíle diplomové práce. Následující část je věnována fyzicko-geografické charakteristice povodí horní Lužnice. Na třetí kapitole, která popisuje matematické modelování a strukturu vybraného srážko-odtokového modelu, navazuje část týkající se přípravy dat vstupujících do modelu. Průběh a výsledky vlastního modelování uvádí kapitola pátá. Poslední kapitola je věnována diskuzi.

2.2. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA TOKU HORNÍ LUŽNICE

Podélný profil řeky Lužnice (graf 2.1) můžeme rozdělit na tři výrazně odlišné segmenty, jejichž bližší charakteristiku popisuje tabulka 2.1 (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996) a to na:

1. vysoko položenou pramennou oblast,
2. rakouskou vrchovinnou oblast,
3. oblast třeboňské pánve.



Graf 2.1: Podélný profil toku

2.2.1. Vysoko položená pramenná oblast

Po téměř prvních dvanáct kilometrů teče řeka Lužnice spíše hlubokým údolím s četným příkrým a převážně skalnatým podkladem. V této části není vyvinuta niva a oblast je zde téměř zcela zalesněna původními bukovými porosty a recentně zasazenými norskými smrky. Kolonizace začala v období 1600 – 1900 n.l. a vliv lidské činnosti je dodnes poměrně malý.

2.2.2. Rakouská vrchovinná část

Od 70. do 50. říčního kilometru, tedy dalších dvacet kilometrů, protéká Lužnice krajinou s pozvolnými kopci, pokrytými lesy a mozaikou luk a polí. Podél tohoto úseku můžeme najít úzkou (50 – 150 m), sporadicky zaplavovanou nivu. Tam, kde je údolní niva vyvinuta, se zpravidla vyskytují sečené louky. Farmy, malé vesnice a historické město Weitra

byly postaveny na řece kolem roku 1000 n.l. Řeka je jenom mírně znečištěná z lokálních úniků domácích splaškových vod.

2.2.3. Třeboňská pánev

Kolem 50. říčního kilometru, stále na rakouském území, Lužnice vstupuje do Třeboňské pánve. Tato plochá oblast je tvořena jílovitými, písčitými a štěrkovými sedimenty. Zde řeka tvoří širokou nivu, s mnoha stojatými vodami, permanentně a periodicky zaplavovanými tůňemi a meandry, kromě míst, kde je tok regulovaný. Tato část pokračuje až do závěrového profilu Pilař.

Řeka tvoří přírodní osu Třeboňské pánve a její voda byla používána již od středověku k vytvoření hojných umělých rybníků. Ty jsou spojeny mnoha kanály a stokami.

Kolonizace Třeboňské pánve začala později ve srovnání se sousedními oblastmi, teprve na konci 12. století. Díky rovinaté, špatně odvodněné a rašelinou pokryté krajině, lidské osídlení a doprovodné aktivity nebyly tak intenzivní jako v pohraničních oblastech. Proto zde mohly přetrvat jemně rozložené oblasti přírodních, polopřírodních a umělých ekosystémů.

Nejvíce zachované části Lužnice byly zahrnuty do jádrových oblastí Třeboňské biosférické rezervace, která byla založena v roce 1977 pod záštitou UNESCO. V roce 1979 byla zřízena Chráněná krajinná oblast Třeboňsko. Jedná se o jedno z mála území vyhlášených v rovinaté krajině, která byla po staletí ovlivňována a kultivována člověkem.

Tabulka 2.1: Charakteristika jednotlivých segmentů horní Lužnice

(Upraveno podle Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996)

Část číslo	1	2	3
Říční kilometr	82-70	70-50	50-0
Nadmořská výška toku [m]	990-660	660-500	500-439
Průměrná roční teplota [°C] a srážky [mm]	4,9; 901 ¹	6,6; 695 ²	7,8; 627 ³
Převládající skalní podklad	Granit	Granit, pararula	Jíl, písek, štěrk
Pokles od vrcholů kopců k řece [m]	Až do 250	100	10
Průměrný sklon toku [%]	2,1	1,8	0,93
Šířka řečiště [m]	1-3	3-8	8-20
Průměrný dlouhodobý průtok [m ³ ·s ⁻¹]	Méně než 0,5	0,5-3,8	3-10
Trofie	Oligotrofní	Oligotrofní, mezotrofní	Eutrofní
Šířka nivy (m)	+0	50-150	150-1000

¹Karlstift, 917 m n. m.; ²Weitra, 580 m n. m.; ³Třeboň, 433 m n. m.. (všechna čísla vztažena k periodě 1901-1950)

2.3. PŘÍRODNÍ CHARAKTERISTIKA POVODÍ

Vzhledem k nedostatku literatury o rakouské části povodí je přírodní charakteristika území zaměřena podrobněji na českou část.

2.3.1. *Geologická charakteristika povodí*

Krystalinický základ oblasti tvoří moldanubické horniny (ruly a migmatity předprvohorního stáří, granitoidy moldanubického plutonu prvohorního stáří). Krystalinický komplex se vynořuje na povrch kolem hranic mezi Českem a Rakouskem a v rakouské části povodí. V Třeboňské pánvi je téměř celý pokryt mladšími sedimenty (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996).

Moldanubické horniny byly několikrát zvrásněny a metamorfovány, naposledy v paleozoiku při variském horotvorném procesu, kdy byly proniknuty tělesy hlubinných vyvřelin (Albrecht, 2003). V moldanubickém plutonu rozeznáváme několik petrografických typů hornin, jedná se například o granity typu Eisgarn (dvojslídňá žula, středně zrnitá, s vyrostlicemi draselného živce) či Weinsberg (hrubozrnný, porfyrický, biotitový granit) (Chábera, 1998).

Ve svrchní křídě byly jižní Čechy parovinou, pokrytou zvětralinovým pláštěm a odvodňovanou k jihu a jihovýchodu. Začínající alpské vrásnění způsobilo oživení existujících zlomů a začaly se formovat tektonicky založené příčně členěné deprese, z nichž se vyvinula dnešní Třeboňská pánev (Chábera, 1998). Mesozoické sedimenty tvoří velkou část nánosů Třeboňské pánve a jejich tloušťka dosahuje kolem řeky Lužnice přibližně 100 m. Největší tloušťka těchto sedimentů je 300 m. Tyto svrchnokřídové sedimenty jsou reprezentovány uloženinami klikovského souvrství, které zasahuje v reliktech až k okrajům Vídeňské pánve. Souvrství je produktem lakustrinní sedimentace, kdy byl splachy odnášen materiál z kaolinicky zvětralých granitoidů, ortorul a ostatních krystalických břidlic do ploché, tektonicky předurčené sníženiny. Litologický vývoj je charakterizován nepravidelně cyklickou sedimentací (Chábera, 1998). Bazální sekce je formována hrubozrnnými psefiticko – psamitickými uloženinami s významným obsahem živců. Během následné sedimentace byly ukládány jemně zrnité sedimenty. Poslední fáze jílových sedimentů odráží uklidňující sedimentační podmínky (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996).

Třetihorní geologii reprezentuje především neogenní mydlovarské souvrství. Tyto sedimenty se objevují převážně v jihozápadní oblasti Třeboňské pánve a dosahují mocnosti kolem 80 m. Blízko řeky Lužnice se vyskytují jenom jako relikty s mocností několika metrů. Mydlovarské souvrství je rozděleno na dolní část tvořenou písčito-jílovitými zeleně

zbarvenými uloženinami se sporadickým výskytem uhelných jíílů, a na horní část, která obsahuje převážně diatomické sedimenty (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996).

Kvartérní sedimenty jsou v pánvi nejtenčí. Dosahují největších mocností v zóně široké 3 km kolem toku. Reprezentují uloženiny pleistocénního i holocénního stáří. Hlavní typy uloženin jsou sedimenty fluviální, deluviální, eolické a organické. Fluviální sedimenty zahrnují jednak holocénní povodňové hlíny a pleistocénní terasové uloženiny (Chábera, 1985). Fluviální terasy jsou hlavní částí kvartérní sedimentace. Nejstarší sedimenty se vyskytují v písčitém štěrku nedaleko Českých Velenic a vznikly v mindelské době ledové. Jsou zachovány jako nejvyšší terasy, které jsou vyvýšeny až 20 metrů nad současnou nivou. Další stupně štěrkopískových lavic byly formovány během risského zalednění. Pleistocénní říční sedimentace je ukončena štěrkopísky würmské terasy (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996). Holocénní uloženiny se zde vyskytují ve formě jemných jílovito-hlinitých písků až písčitých jíílů, které vyplňují široká údolí řek a větších potoků až v kilometrových šířkách a několikametrových mocnostech. Eolické sedimenty jsou v Třeboňské pánvi reprezentovány vátyými písky vyvátými z rozsáhlých štěrkopískových teras Lužnice. Deluviální sedimenty se nacházejí jenom v úzkém pásu a převážně jako písčité hlíny kolem okraje pánve (Chábera, 1998).

Recentní organické sedimenty obsahují nížinné slatiny a rašeliny s hloubkou až tři metry. Vznik souvisí s cirkulací podzemních vod vystupujících po zlomových liniích (Chábera, 1998).

2.3.2. *Geomorfologie*

Podle geomorfologického členění České republiky (Balatka, 2006) patří zájmové území k provincii Česká vysočina, zde zastoupenou dvěma subprovinciemi – Šumavskou (I) a Českomoravskou (II). Členění na úrovni okrsků v české části povodí zobrazuje mapa na obrázku 2.2.

I. Šumavská subprovincie

Šumavská subprovincie se nachází v pramenné oblasti v jihovýchodní části povodí, do povodí zasahuje oblastí Šumavská hornatina (IB), celkem Novohradské hory (IB-3), podcelkem Pohořská hornatina (IB-3A), který je zde reprezentován dvěma okrsky: Žofínskou hornatinou (IB-3A-b) a Pohořskou kotlinou (IB-3A-c).

IB-3 Celek Novohradské hory

Území Novohradských hor představuje plochou kernou hornatinu vrásnozlomových struktur a hlubinných vyvřelin. Česká část fundamentu Novohradských hor souvisí na jihu s jejich větší částí rakouskou nazývanou Freiwald (Chábera, 1998).

II. Českomoravská subprovincie

Českomoravská soustava zasahuje do povodí horní Lužnice jižní částí oblasti Jihočeských pánví (IIB), celkem Třeboňská pánev (IIB-2) a jihozápadní částí Českomoravské vrchoviny (IIC), celkem Javořická vrchovina (IIC-6).

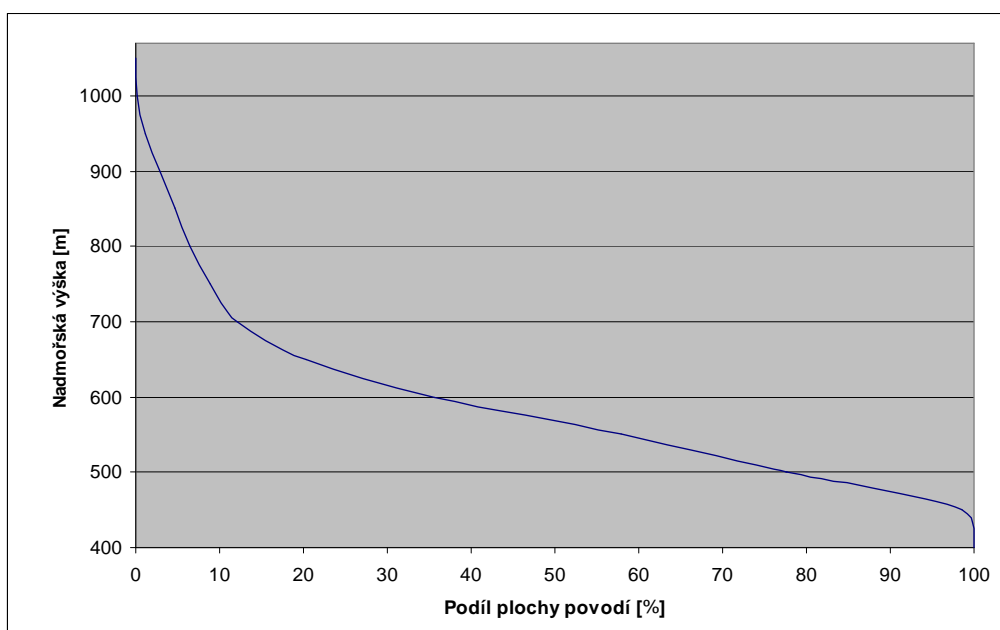
IIB-2 Celek Třeboňská pánev

Třeboňská pánev představuje plochou sníženinu, která má mírně zvlněný reliéf jen při okrajích a na rozvodích. Je to typ reliéfu tektonického původu s akumulací výplní a erozně denudačním povrchem především v centrální části (Chábera, 1998). Lze ji zde rozdělit na 2 podcelky: západní ploché akumulací pásmo pánve Lomnické (IIB-2A) a na východě o 30-50 metrů vyšší stupeň nízkých vyvýšenin starých hornin s jezerními usazeninami Kardašověčické pahorkatiny (IIB-2B). Lomnická pánev tvoří širokou, od JJV k SSZ Lužnicí protékanou, otevřenou rovinu v nadmořské výšce kolem 450 metrů, ohraničenou na východě vyšším stupněm Kardašověčické pahorkatiny, na severu Táborskou pahorkatinou. Západním směrem se terén mírně zvedá k Lišovskému prahu a na jihu vniká mezi Novohradské podhůří a jižní výběžek Novobystřické vrchoviny. Pro Lomnickou pánev je charakteristický plochý nebo jen mírně zvlněný reliéf, daný střídáním plochých vyvýšenin, který vznikl na svrchnokřídových a terciálních sedimentech (Chábera, 1998). Jižní část Lomnické pánve patří Českovelenické pánvi (IIB-2A-b). Na území pokrytém hustým borovým a smrkovým lesem jsou četné rybníky, močály a rašeliniště. Plochý georeliéf Kardašověčické pahorkatiny v průměrné

[1003 m]. Vrchol Myslivna [1040 m] leží na našem území v prostoru JV od Nových Hradů v Pohořské hornatině.

Průměrný sklon povodí je $3,5^\circ$. Sklonitostní poměry se pohybují přibližně v rozmezí od $0^\circ - 2^\circ$ v Třeboňské pánvi až po příkře skloněné svahy v Novohradských horách a ve Freiwaldu. V příloze číslo 1 jsou zobrazeny výškové poměry a sklonitostní poměry povodí zobrazuje příloha číslo 2.

Změnu plochy povodí s nadmořskou výškou charakterizuje hypsografická křivka, která dokumentuje vertikální členitost reliéfu v povodí (graf 2.2). Hypsografická křivka byla odvozena z digitálního modelu reliéfu v prostředí GIS.



Graf 2.2: Hypsografická křivka povodí horní Lužnice

2.3.3. *Půdní poměry*

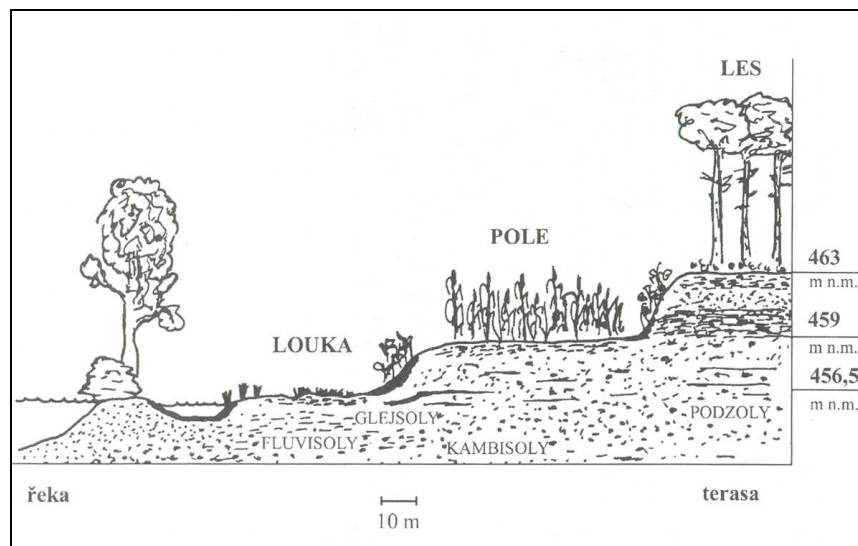
Půdní vlastnosti se projevují působením na charakter odtokového režimu. Rozhodující je především textura a struktura půdy, její vlhkost a zvrstvení a také obsah humusu a nasycenost sorpčního komplexu. Podíl infiltrace se většinou při povodňových stavech snižuje.

Hlavní pozornost popisu půdního krytu je zaměřena na půdní typy, v detailu popis přechází až na půdní subtypy a variety.

Půdní pokryv Třeboňské pánve ztvárňují jedny z nejvíce rozmanitých regionálních půdních jednotek v České republice. Třeboňsko je největším souvislým areálem semihydromorfních a hydromorfních půd v Čechách. Rozšířené jsou gleje a pseudogleje, které se vyvinuly v plochem špatně odvodněném terénu, formující zde velmi rozsáhlou oblast. Také organozemě jsou na území pánve početné a vytvářejí plošně rozsáhlé souvislé

celky (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996). Organozemě vznikly postupnou biologickou akumulací rostlinného materiálu v bezodtokých depresích, kolem rybníků, potoků převážně na předkvartérních sedimentech (Albrecht, 2003).

Typické schéma půd vyvinutých na recentních říčních uloženinách a na terasách kolem Lužnice ukazuje obrázek 2.3 (Prach K., Pithart D., Francíková T., 2003).



Obrázek 2.3: Obecné uspořádání půdních typů na terasovém systému Lužnice
(Zdroj: Prach, 2003)

Fluvizemě jsou vyvinuty v nejnižších úrovních terasy, tj. v nivě samotné. Patří do skupiny půd vzniklých procesem akumulace humusu, rušeným opakující se akumulací minerálního materiálu při záplavách (Albrecht, 2003). Nejmladší fluvizemě vyskytující se na písčitéch uloženinách v blízkosti nebo přímo v řečišti, mají malou diferenciaci půdního profilu s minimální organickou akumulací. Starší fluvizemě, s větší diferenciací uvnitř půdního profilu, se nacházejí ve větších vzdálenostech od říčních břehů (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996). Z půdních subtypů vyskytujících se kolem řeky se jedná převážně o fluvizem oglejenou a fluvizem glejovou.

Největší plochu z hydromorfních půd zde zaujímají gleje. Vyvinuly se podél periodicky zaplavených tůní a kolem mrtvých meandrů v důsledku postupné akumulace jílu a organických látek během povodňových událostí. Rozšíření glejí je spojeno hlavně s dvěma pozicemi na říčních terasách. Větší část se nachází ve středních částech a základnách úbočí teras, ale mohou se také vyskytovat na plochých částech starých teras, kde jsou vyvinuty z vysoce zvětralých podzolů s vysokým obsahem zoxidovaného železa (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996). Původní vegetací byly zejména silně podmáčené olšové lužní lesy (Chábera, 1985). Z půdních subtypů se zde vyskytuje glej modální, arenický a zrašeliněný.

Na gleje navazují pseudogleje. Jsou soustředěny především do plochého terénu, do mělkých terénních sníženin v pahorkatinách i vrchovinách kraje. Vyvinuly se vlivem periodické stagnace srážkové vody na nepropustném podloží a vyluhováním sloučenin Fe, Mn a Al humusovými kyselinami (Albrecht, 2003). Z půdních subtypů se zde vyskytují pseudoglej modální, pseudoglej kambický a pseudoglej glejový.

Kambizemě vystupují v různých výškových stupních pahorkatin a vrchovin. Vytvořily se především na zvětralinách vyvěřelých a metamorfovaných horninách skalního podkladu (Chábera, 1985). Specifický charakter mají kambizemě vytvořené na písčitéch a štěrkopískových uloženinách, které jsou typické pro plochý reliéf Třeboňské pánve. Z kambizemí se v zájmovém území nachází převážně kambizem mezobazická, i slabě oglejená, kambizem dystrická a kambizem luvická oligotrofní.

Podzoly jsou obvykle vázány na vyšší nadmořské výšky. Vyvinuly se postupným promýváním kyselého nadložního humusu srážkovou vodou. Vytvořily se na svahovinách zvětralin kyselých vyvěřelých hornin, rul a granulitů (Albrecht, 2003). V Třeboňské pánvi se společně s podzolovanými kambizeměmi vyvinuly v nižších polohách na štěrkopískových terasových uloženinách Lužnice a na předkvártérních sedimentech. To bylo umožněno výrazně promyvným vodním režimem, který je předpokladem podzolizace (Chábera, 1985).

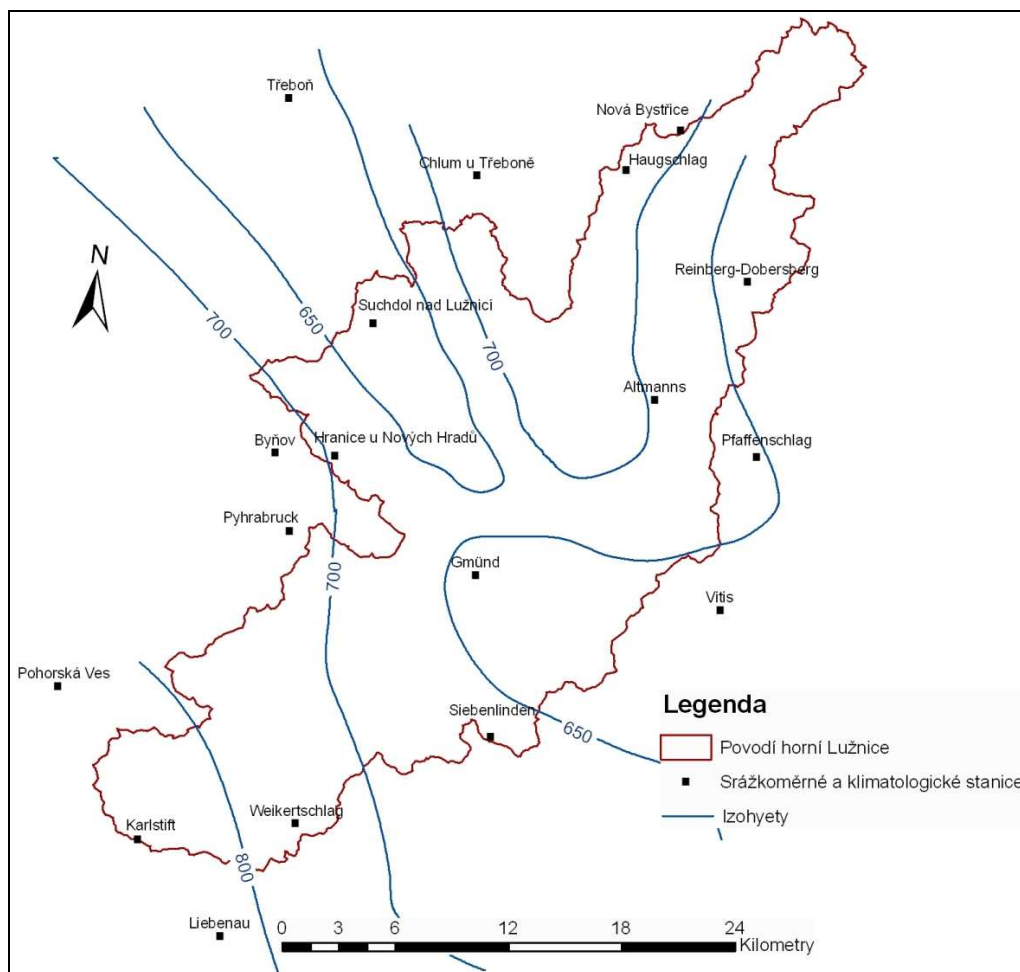
2.3.4. *Klimatická charakteristika*

Podle klimatologické rajonizace (Quitt, 1971) patří převážná část české části území do mírně teplé klimatické oblasti. Nejteplejší je Třeboňská pánev, kde průměrná roční teplota vzduchu dosahuje 7,5 až 8,0 °C. Tato oblast, MT11, se nachází na severu povodí v nejnižších nadmořských výškách. Se stoupající nadmořskou výškou průměrná roční teplota vzduchu klesá asi na 6,5 °C v 600 m a na 4,5 °C v 1000 m. Přibližně od nadmořské výšky 700 m je území začleněno do chladné klimatické oblasti CH7.

Ve volné atmosféře převládá nad územím západní proudění, v přízemní vrstvě jsou však směr i rychlost větru ovlivněny orografií. Například v Třeboňské pánvi dochází k mírnému odklonu k severozápadu, který je způsoben usměrňováním proudění podél delší osy pánve (Albrecht, 2003).

Prostorová proměnlivost srážkového pole se formuje za spolupůsobení meteorologických, cirkulačních a geografických faktorů. Charakter reliéfu, hlavně výškové poměry, členitost, orientace pohoří a údolí, je v souvislosti s převládajícím prouděním vzduchu a s ním související srážkovou expozicí rozhodující pro prostorovou diferenciaci srážek (Kuchařová, 2006).

Srážkové poměry týkající se jižních Čech zpracoval Chábera (1985) za období 1876 – 1975. Izohyeta ročního průměrného úhrnu srážek 900 mm probíhá v nadmořských výškách přibližně po vrstevnici 900 m v Novohradských horách a ve Freiwaldu. V závětrných oblastech se množství srážek snižuje. Třeboňskou pánví probíhá izohyeta 650 mm. Zajímavé je zesílení srážek v jihovýchodním cípu Třeboňska. Zde se severozápadní vítr nasytí opět vodními parami z rybníků Třeboňské pánve a vlhkost ztrácí při výstupu na kopce mezi Lužnicí a Nežárkou a v Rakousku. Tímto územím probíhá izohyeta 750 mm.



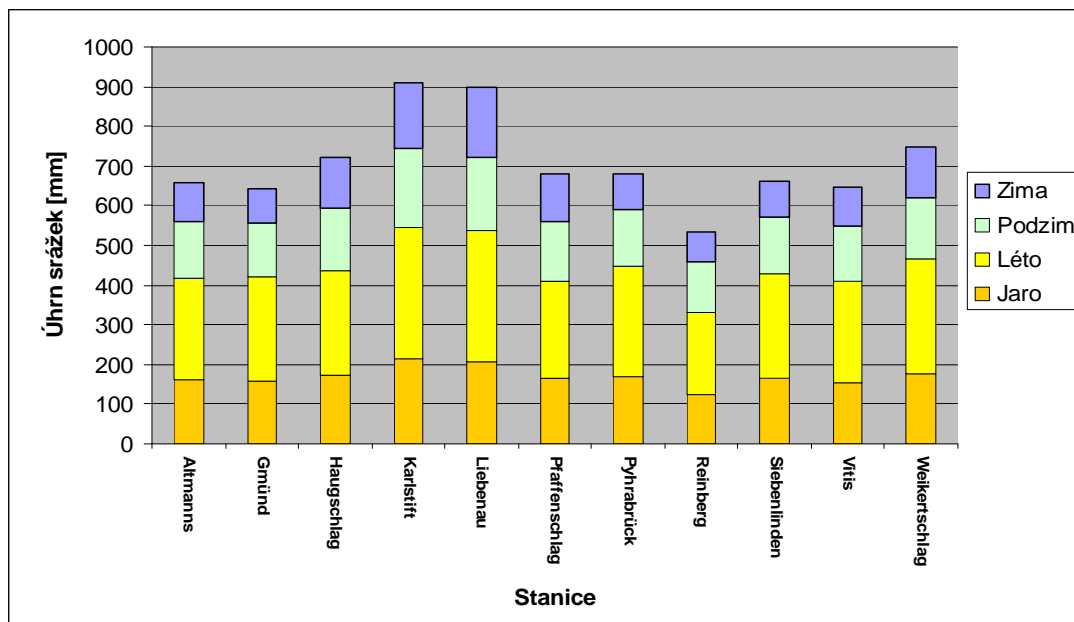
Obrázek 2.4: Izohyety ročního průměrného úhrnu srážek

(Zdroj dat: DIBAVOD, e-HYD)

Průměrné roční izohyety (1981-2000) pro povodí zobrazuje mapa na obr. 2.4. Jižní částí povodí prochází izohyeta 800 mm. Konkrétně ve stanici Karlstift (917 m n. m.), nacházející se v pramenné oblasti Lužnice, je průměrný roční úhrn srážek 908 mm (průměr období 1981 – 2002). Což odpovídá i předchozím údajům Chábery (1985). Severní části povodí prochází izohyeta 650 mm a 700 mm. Zde je na stanici Haugschlag, nacházející se v 568 m n. m., průměrný roční úhrn srážek (období 1981 – 2002) 722 mm. Oblastí kolem

města Gmünd (500 m n.m.) prochází izohyeta 650 mm. Průměrný roční úhrn srážek za období 1981- 2002 je zde 644 mm.

Následující graf zobrazuje průměrné sezónní rozdělení úhrnů srážek na rakouských stanicích v období, kdy jsou k dispozici údaje ze všech stanic, tj. období 1981 až 2002.

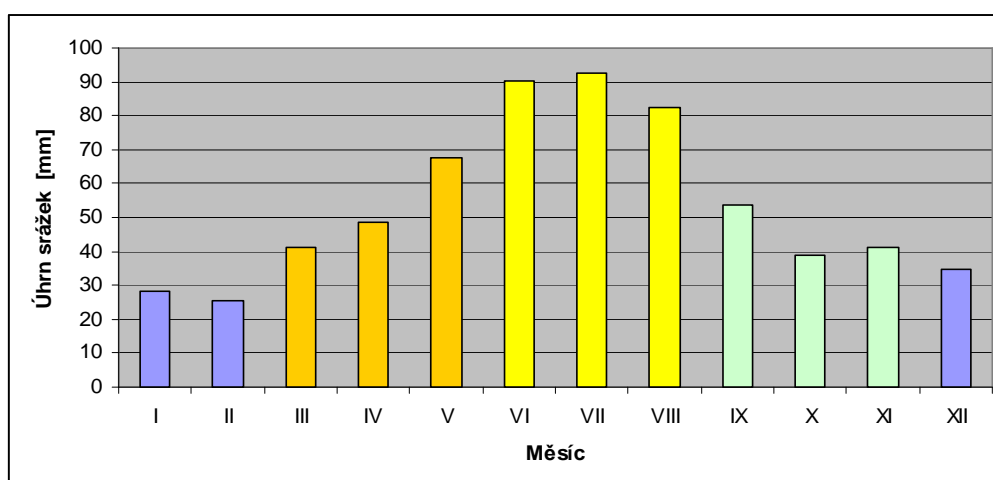


Graf 2.3: Sezónní úhrny srážek na rakouských stanicích

(Zdroj dat: e-HYD)

Z grafu vyplývá, že nejvíce srážek spadne v letním období, kdy tvoří srážky 40 % ročního srážkového úhrnu a minima srážky dosahují v zimním období, kdy tvoří kolem 15 % ročního srážkového úhrnu.

Následující graf vystihuje měsíční rozložení srážek na stanici Gmünd za období 1981 až 2002.



Graf 2.4: Sezónní úhrny srážek na rakouských stanicích

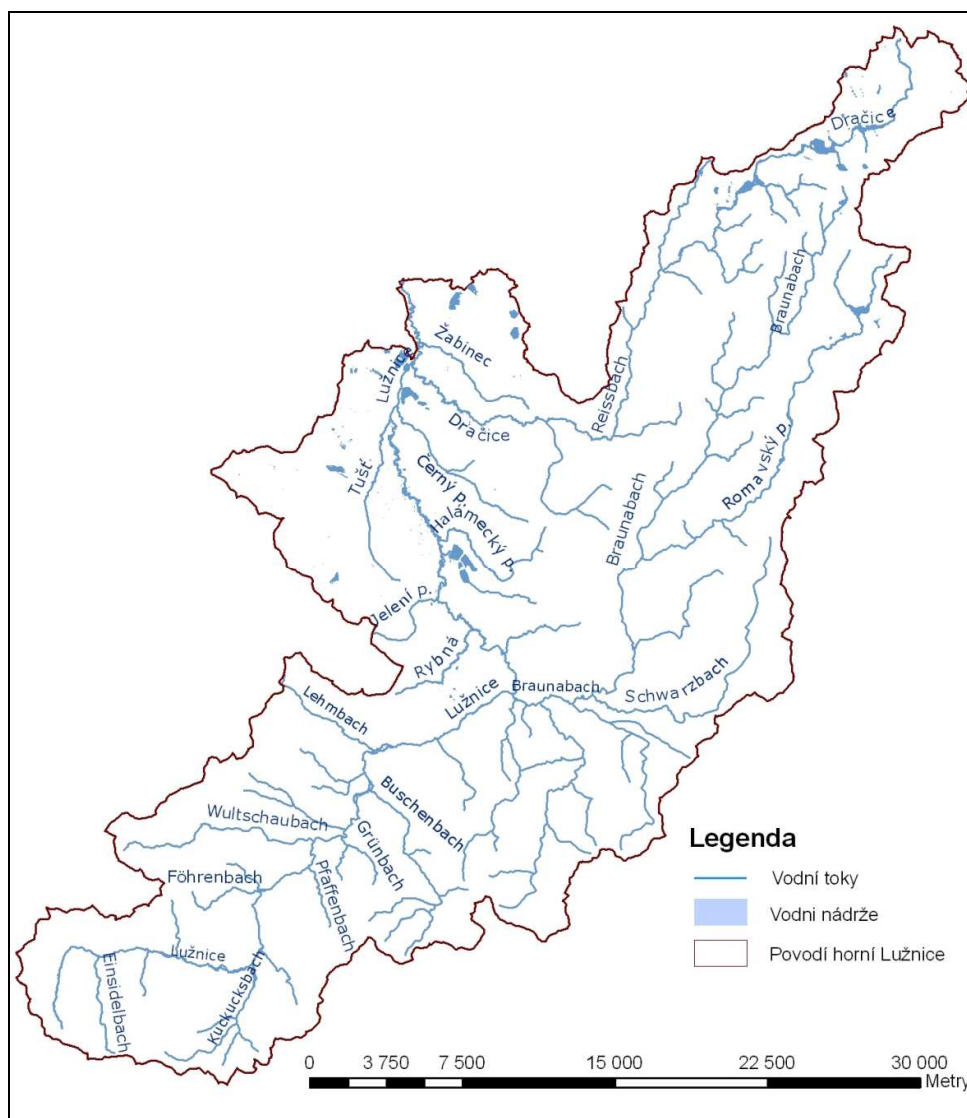
(Zdroj dat: e-HYD)

Síť srážkoměrných a klimatologických stanic, které se nacházejí v povodí nebo blízko hranic s povodím, není příliš hustá, ale je, jak ukazuje mapa na obr. 2.6, celkem rovnoměrně rozložena. Celkem se jedná o jedenáct stanic na rakouské straně a osm stanic na české straně.

2.3.5. Hydrologické poměry

Obecná charakteristika odtoku

Lužnice je pravým přítokem Vltavy, má silně asymetrické povodí, naprostá většina větších přítoků se vlévá zprava. K hlavním přítokům horní Lužnice patří – pravostranné přítoky: Kuckucksbach, Pffafenbach, Grünbach, Busschenbach, Braunabach, Halámecký potok, Gamza, Černý potok, Dračice a Žabinec. Levostranné přítoky: Wultschaubach, Tiefenbach, Leimbach, Rybná, Jelenní potok a Tušt. Hydrografickou síť zobrazuje mapa na obr. 2.5.



Obrázek 2.5: Hydrografická síť povodí horní Lužnice

(Zdroj dat: DIBAVOD)

Hydrologické pořadí řeky Lužnice od pramene po Pilař: 1-07-01-001 až 1-07-02-017.

Na české straně povodí se nacházejí dvě limnigrafické stanice provozované ČHMÚ. Limnigrafická stanice kategorie B, Nová Ves nad Lužnicí, je umístěna na 146,8. říčním kilometru. Další stanice kategorie A, Pilař, je situována nedaleko obce Majdalena na 116,4. říčním kilometru. Následující parametry (ČHMÚ) charakterizující tok v tomto bodě (období 1965 – 2006):

- Průměrný roční stav hladiny: 175 [cm]
- Průměrný roční průtok: 6,21 [m³s⁻¹]

N-leté průtoky	Q100	Q30	Q10	Q5	Q1
[m ³ s ⁻¹]	270	215	115	84	33

(Zdroj dat: ČHMÚ)

Na rakouské straně povodí se nachází šest limnigrafických stanic. Jedná se o stanice Ehrendorf, Hohenheich, Amaliendorf, Heidenreichstein, Kößlersdorf a Oberlainsitz. Limnigrafické stanice nalézající se v povodí horní Lužnice zobrazuje mapa na obr. 2.6.

Následující parametry charakterizují Lužnici na stanici Ehrendorf, která se nachází na 160. říčním kilometru (období 1971-2006):

- Průměrný roční průtok: 2,20 [m³s⁻¹]

N-leté průtoky	Q100	Q30	Q10	Q5	Q2	Q1
[m ³ s ⁻¹]	110	75	50	35	22	17

(Zdroj dat: e-HYD)

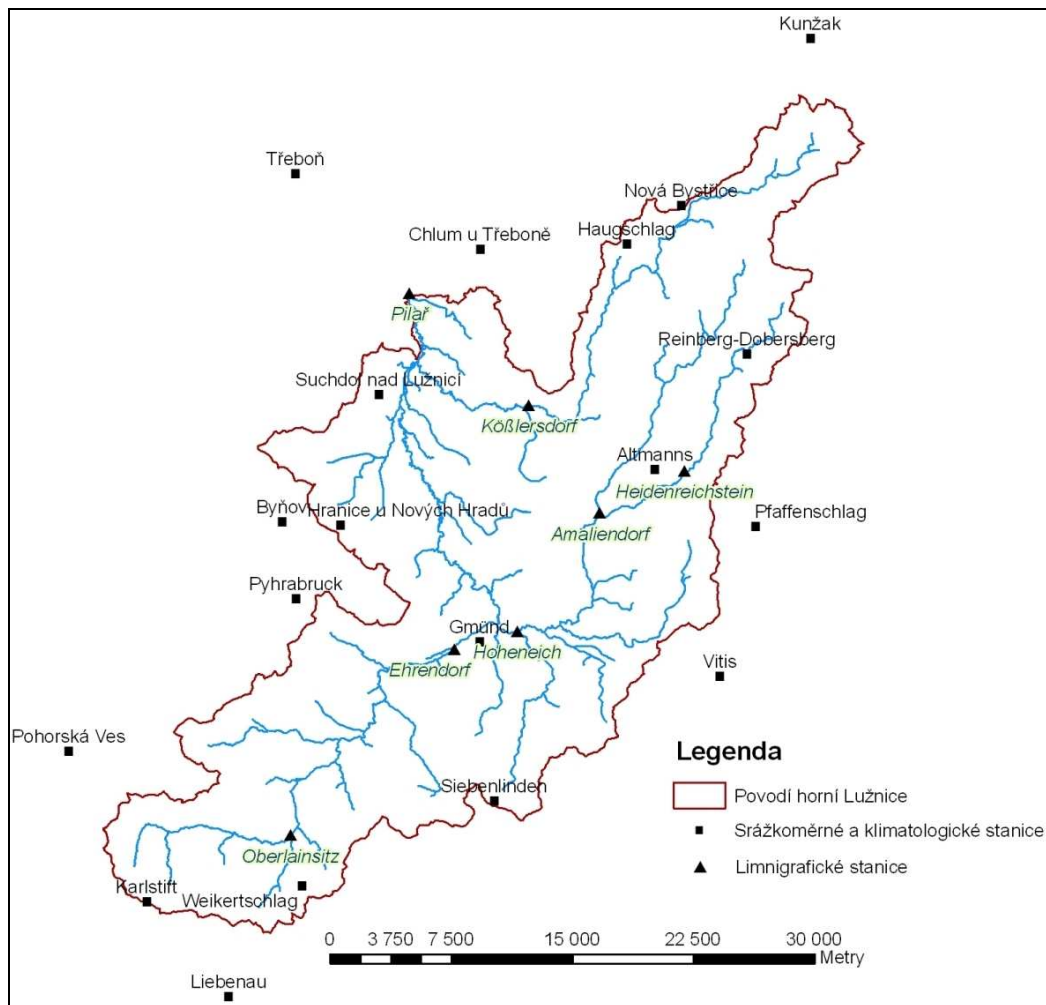
Další parametry charakterizují největší pravostranný přítok Lužnice na rakouském území Braunabach (vlévá se do Lužnice na jejím 156,5 říčním kilometru), zde se nachází limnigrafická stanice Hoheneich (období 1971-2006):

- Průměrný roční průtok: 2,18 [m³s⁻¹]

N-leté průtoky	Q100	Q30	Q10	Q5	Q2	Q1
[m ³ s ⁻¹]	90	60	45	32	26	18

(Zdroj dat: e-HYD)

Odtokový režim značně poznamenal člověk, který vystavěl složitou síť umělých stok a kanálů, díky této síti dochází k převodům mezi dílčími povodími. Na 117. říčním kilometru, před jezem Pilař, odbočuje z řečiště umělý vodní kanál Zlatá Stoka, který Lužnici odebírá až 2,5 m³.s⁻¹ (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996). Zlatá stoka se vlévá zpět do Lužnice na 77. říčním kilometru, tedy již mimo zájmové území.



Obrázek 2.6: Síť srážkoměrných, klimatologických a limnigrafických stanic

(Zdroj dat: ČHMÚ, e-HYD)

Podzemní voda

V rámci rozsáhlého projektu (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996) týkajícího se nivy řeky Lužnice byly v zájmovém území zkoumány pohyby podzemní vody. Horizontální a vertikální pohyby podzemní vody v hyporheické zóně obklopující řeku jsou klíčovými faktory řídicími mnoho hydrologických procesů odehrávajících se v říční nivě. Na transektu probíhající v povodí od nejmladší würmské terasy k řece (nedaleko obce Halámky) byla sledována rychlost horizontálního pohybu podzemních vod označením vodních vzorků Br nuklidy a pozorováním jejich šíření v čase. Přibližná rychlost pohybů vody byla změřena na několik cm za den na hranici s terasou a zhruba 10^{-1} m /den ve středu nivy (měřeno od terasy ke korytu řeky). Ke zvýšení rychlosti blízko koryta dochází hlavně díky permeabilitě nivních sedimentů a souvisí s unášecí schopností (drawdown) toku řeky (Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996).

Povodňové události

Za povodeň se označuje situace, při níž množství protékající vody překročí z různých příčin průtočnou kapacitu koryta (Němec, Hladný, 2006).

Povodeň může být způsobena přírodními jevy, zejména táním sněhu, dešťovými srážkami nebo chodem ledů (Tureček, 2002). Meteorologické faktory, které přirozené povodně způsobují, se dají dále rozdělit na předběžné a příčinné. Předběžné faktory působí několik dnů až měsíců před vznikem povodně. Patří sem nasycenost povodí, promrznutí půdy, ale i výška sněhové pokrývky a její vodní hodnota. Příčinné meteorologické faktory nastávají několik hodin až dnů před vznikem povodně a dají se přirovnat k jejímu spouštěcímu mechanismu. Jsou to dešťové srážky, kladné teploty vzduchu při oblevách, rychlost větru při tání sněhu aj. Mezi hlavní hydrologické předběžné faktory patří míra naplnění objemu koryt vodních toků před povodní a také celkový stav ledových jevů na tocích (ty lze zařadit i mezi příčinné faktory) (Němec, Hladný, 2006).

Důsledkem poruch vodních děl, které mohou vést až k jejich havárii (protržení), nebo nouzovým řešením kritické situace na vodním díle, vznikají povodně označované jako zvláštní (Tureček, 2002).

Členěním povodní pro geografické podmínky Česka se zabývá např. Patera a Kašpárek (2002). Ti vymezují povodně:

- způsobené táním sněhové pokrývky,
- letní či podzimní povodně způsobené déletrvajícými regionálními srážkami,
- letní povodně způsobené krátkodobými (přívalovými) srážkami velké intenzity,
- zimní povodně,
- zvláštní povodně.

Povodně na horní Lužnici

Horní Lužnice je charakteristická tím, že má poměrně výraznou orientaci povodní do jarních měsíců - do období tání sněhu. Pravděpodobnost výskytu jedné nebo více povodní v určitém měsíci v roce (na základě dat z let 1960-1993) ukazuje tabulka 2.2.

Tabulka 2.2: Pravděpodobnost výskytu jedné nebo více povodní v určitém měsíci v roce

Měsíc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Pravděpodobnost	0,2	0,3	0,6	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

(Zdroj: Prach K., Jeník J., R.G. Large A., 1996)

Největší pravděpodobnost výskytu povodní je v brzkých jarních měsících. Toto období záplav obvykle začíná v březnu a zřídka se protáhne přes duben. Nicméně, záplavy se mohou objevovat v téměř každém měsíci, pravděpodobnost jejich výskytu na podzim je však minimální.

Výskyt povodní v jarních měsících je způsoben převážně těmito důvody (Vlasák, 2006):

- relativně malými výškovými rozdíly, které způsobují, že obleva zasahuje zpravidla velkou část nebo dokonce celé povodí a relativně malé odtoky se z velké plochy mohou koncentrovat do nebezpečných průtoků,
- malými sklony a písčitymi půdami, které sice podporují infiltraci dešťových srážek, ale jarní tání probíhající často na promrzlé půdě není schopno tyto prostory zaplnit a odtokový koeficient může být vyšší než v letních měsících.

Krátkodobé výkyvy ve vodních průtocích jsou patrné i během letních měsíců a vyplývají z lokálních, ale intenzivních srážek z letních bouřek v pramenných oblastech povodí. Letní přívalové deště, nejčastěji spojené s přechodem brázd tlakové níže přes naše území, bývají nejvíce zesilovány právě v oblasti Novohradských hor, což se následně projeví i na výskytu povodní na Pilaři (Vlasák, 2006). Nejvyšší zaznamenané stavy ve stanici Pilař zobrazuje tabulka 2.3.

Tabulka 2.3: Nejvyšší zaznamenané vodní stavy ve stanici Pilař

[cm]	datum
485	13.08.2002
448	09.07.1954
438	11.05.1951
425	19.07.1941
423	14.08.1960
421	07.06.1965
418	23.05.1945
416	15.05.1996
382	14.03.1988

(Zdroj dat: ČHMÚ)

Nejnižších průtoků dosahuje řeka typicky během podzimu a v brzké zimě mezi říjnem a lednem. Kolísání vodních průtoků je kompenzováno vlivem vody obsažené v hlubších horizontech propustných sedimentů povodí Lužnice.

Povodňové vlny a jejich charakteristika

Povodně na Lužnici jsou typické především svou dlouhou doběhovou dobou, pomalým postupem povodňové vlny korytem toku a silnou transformací průtoků. Maximální specifické odtoky jsou při povodních zpravidla mnohem menší než při srovnání s povodními ostatních řek v jižních Čechách např. Blaníc (Vlasák, 2006). Na tomto faktu se podílejí hlavně tyto vlastnosti povodí:

- nízká sklonitost střední části povodí,
- vysoká propustnost písčitých půd v Třeboňské pánvi,
- retence vody v rybnících,
- transformační účinek meandrující řeky.

Tyto vlastnosti mimo jiné způsobují, že povodně při ústí Lužnice se často zpozdí za povodňovými vlnami z Vltavy a Otavy. Z hlediska rozložení příčinných srážek není prakticky možné určit zdrojovou oblast. Orografické efekty se zde díky malým rozdílům v nadmořských výškách téměř neprojeví. Díky pomalému odtoku a silné schopnosti retence se po povodních na Lužnici udržuje delší dobu vysoká nasycenost a zvýšené průtoky v řekách. To mimo jiné způsobuje, že Lužnice je velmi citlivá na opakující se srážkové epizody (Vlasák, 2006).

Horní Lužnice po Pilař má díky velmi dlouhým doběhovým dobám obvykle pomalý nástup povodně, který u větších letních povodní bývá při určité úrovni vystřídán naopak velkým prudkým nástupem nebezpečných průtoků. Řeka nad Pilařem velmi silně meandruje v široké nivě, která se pravidelně zatápí a působí tak jako účinná tlumící nádrž pro transformaci průtoků. Vliv této nádrže pravděpodobně mizí v okamžiku, kdy je koryto i s okolní nivou zaplaveno. Za této situace se také velmi významně zkracuje postupová doba mezi Novou Vsí u Suchdola a Pilařem (Vlasák, 2006).

Mezi hlavní rysy povodňového mechanismu povodí horní Lužnice patří tedy:

- menší citlivost na tání sněhu než v ostatních dílčích povodích Lužnice,
- absence oblasti, kde by se častěji koncentrovaly srážky, a která by se dala určit za zdrojovou oblast povodní,
- dlouhé doběhové a postupové doby způsobující mírný nástup povodní, ale také dlouhé trvání povodňových průtoků.

2.3.6. Vegetační pokryv

2.3.6.1. Typy využití půdy a jejich hydrologické vlastnosti

Za jeden ze stěžejních faktorů přispívající k povodňové odolnosti krajiny lze nepochybně považovat její schopnost jímat srážkovou vodu a zadržovat ji. I důsledky poměrně velké srážky mohou dobré retenční schopnosti krajiny zmírnit, takže způsobí minimální škody. Přínosem je také zdržení povodňového průtoku v krajině, které způsobí snížení kulminace povodňové vlny.

Skladba vegetačního pokryvu spolu se způsobem obhospodařování významně ovlivňují infiltrační a retenční schopnosti. Zde jsou uvedeny základní typy využití půdy a jejich hydrologické vlastnosti.

- *Zemědělská půda*

Hydrologické vlastnosti zemědělských půd ovlivňuje především pórovitost, struktura mikroreliefu, ovlivňuje ji i řada vlivů související s hospodářskou činností člověka. Jak uvádí Kasprzak (1998) mají poměrně vysokou infiltrační schopnost plochy s obilovinami a ručně obhospodařovaná pole. Nejmenší infiltrační schopnost vykazují velké mechanicky obhospodařované plochy kukuřice a vojtěšky. Velkým problémem je i utužená vrstva podorničí, ke které dochází důsledkem pravidelného obdělávání půd těžkou mechanizací.

- *Travní porosty*

Travní porosty obecně vykazují lepší vsakovací parametry než orná půda, avšak obvykle horší než lesní porost. Významnou roli v tomto srovnání hraje typ travního porostu, který se může pohybovat od degradované pastviny po luční porost na propustném podloží.

- *Lesní porosty*

Zjednodušeně lze konstatovat, že z lesa odteče takové množství vody, které není spotřebováno na jeho fyzikální výpar (intercepce, evaporace z půdy), fyziologické potřeby (transpirace) a na doplnění zásob půdní vody (Krečmer, 2002).

Intercepce při povodňových srážkách prakticky ztrácí účinek. Sice přispívá ke snížení množství odtékající vody, ale vzhledem k množství, které se takto zachycuje, nemá větší vliv na průběh povodňových stavů. Vodním režimem lesních ekosystémů se zabýval např. Kantor (2002). Na základě dlouhých časových řad experimentálních pozorování v Orlických horách, v Beskydech a analýzou řady zahraničních studií dospěl k závěrům, že středohorské a horské lesy tlumí přívalové srážky o síle do 50 mm. Souvislé srážky o velikosti do 100 mm se již projeví na celkové výši odtoku vody z lesa. Za kritickou mez pro účinné tlumení povodní lesem lze dle Kantora (2002) považovat hranici 150 až 200 mm souvislých srážek. Při tomto

úhrnu je již lesní půda zcela nasycena vodou včetně zaplnění prohlubní jak v půdním povrchu, tak v horninovém podloží. Poté nastává neřízený a spontánní odtok vody celým půdním profilem, vystupující často i na povrch půdy, a to bez ohledu na druhovou skladbu nebo způsoby obhospodařování. Problematikou vlivu lesa na odtok se zabývá celá řada autorů v zahraničí (např. Whitehead, 1993) i u nás (např. Cudlín, 1999).

Také odčerpávání vody z lesní půdy je dalším účinným jevem charakteristickým pro dřevinné porosty. Lesní porost odčerpává vodu z půdy na transpiraci a vydatně tak uvolňuje její vodní kapacitu pro příjem dalších srážek. Krečmer a kol. (2002) uvádí, že lesní porosty odčerpají do 5 mm vody za 24 hodin, do 40 mm za týden za bezesrážkového počasí radiačního typu.

Do infiltrační a retenční schopnosti lesních porostů se promítá také jejich druhová skladba. Listnaté dřeviny jsou vzhledem k bezlistému stavu v mimovegetačních obdobích i menší biomase asimilačních orgánů schopny zadržet a odčerpat méně srážkové vody než dřeviny jehličnaté. Pro účinnost jednotlivých dřevin je však nejpodstatnějším faktorem kořenový systém a nezanedbatelný vliv má rovněž kvalita humusu. Jeho tvar, hloubka prokořenění a další parametry zásadně ovlivňují retenční kapacitu půdy a parametry vsaku (Kantor, 2002).

2.3.6.2. *Změna vegetačního pokryvu v povodí horní Lužnice*

Od roku 1990 dochází na území Česka ke krajinným změnám, které se týkají převážně poklesu rozlohy orné půdy (opuštění méně úrodných, svažitých a jinak nevýhodných pozemků orné půdy) (Bičík a kol., 2005). Dochází k nárůstu rozloh trvalých travních porostů. Tento trend krajinných změn má pozitivní dopad nejen na kvalitu životního prostředí, ale i na hydrologické funkce krajiny. Otázkou je, jak velký vliv má změna vegetačního pokryvu na tvorbu odtoku.

Pro analýzu využití půdy zájmového území byla vybrána pro snadnou dostupnost dat i pro rakouskou část povodí databáze CORINE Land Cover z let 1990 a 2000. Projekt CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover má za cíl vytvořit jednotnou databázi krajinného pokryvu Evropy na základě jednotné metodiky a s podmínkou aktualizací databáze. Výstupem jsou mapy vegetačního pokryvu v měřítku 1:100 000 rozdělené do 44 tříd. Mapy vyjadřují rozložení krajinného pokryvu v daném roce. Jsou také tvořeny změnové databáze, které vyjadřují přírůstky a úbytky ploch jednotlivých tříd mezi dvěma referenčními roky. Na základě těchto podkladů můžeme vegetační pokryv zájmového území blíže kvantifikovat. Povodí horní Lužnice je z více jak 50 % zalesněno. Dlouhodobou lidskou

činností bylo zastoupení dřevin výrazně měněno, takže dnes má většina porostů charakter jehličnatých monokultur. Téměř 25 % plochy zabírá mozaika polí, luk a trvalých plodin nacházející se na rakouské straně povodí. Na základě vizuální interpretace ortofotomap se jedná převážně o směsici polí a luk, které díky malé ploše nedosahují minimální hranice nutné pro zařazení do vlastní kategorie. 6,6 % povodí tvoří louky a pastviny a 6,5 % zabírá orná půda. Stav v letech 1990 a 2000 ukazuje tabulka 2.4 a mapa v příloze číslo 4. Za toto období došlo ke změně krajinného pokryvu na ploše 46,24 km², což odpovídá 4,9 % z celkové plochy povodí. Největší změna se týkala převedení 25,23 km² nezavlažované orné půdy na louky a pastviny. Důvodem byl zánik centrálně řízeného zemědělství a snížení tlaku na využívání zemědělské půdy. V oblasti CHKO Třeboňsko došlo převážně k opuštění hůře využitelných podmáčených luk.

System subvencí do zemědělství je dnes zaměřen spíše na podporu udržování kulturního stavu krajiny a mnohé pozemky jsou udržovány pouze díky tomuto dotačnímu systému nebo jsou rovněž za podpory státních dotací přeměňovány na lesní půdu. V povodí horní Lužnice, především na české straně povodí, můžeme pozorovat navýšení plochy lesa o 17,9 km². Ta byla zapříčiněna převodem převážně z kategorie nízký porost v lese na vysokokmenný les. K převodu lesa vysokokmenného na nízký porost v lese došlo pouze na ploše 47,7 ha.

Tabulka 2.4: Změna vegetačního krytu v povodí horní Lužnice

Vegetační pokryv	Celková rozloha [ha]		Procentuální zastoupení [%]	
	Rok 2000	Rok 1990	Rok 2000	Rok 1990
Rašeliniště	94,3	116,2	0,10	0,12
Vodní plochy	694,2	669,2	0,74	0,71
Mokřiny a močály	722,3	722,3	0,77	0,77
Nízký porost v lese	178,8	1920,8	0,19	2,04
Smíšený les	398,4	388,0	0,42	0,41
Jehličnatý les	48917,2	47165,9	51,90	50,04
Listnatý les	4,2	4,2	0,00	0,00
Zem. oblasti s přirozenou vegetací	4085,9	4094,1	4,34	4,34
Louky a pastviny	6216,0	3710,9	6,60	3,94
Nezavlažovaná orná půda	6094,4	8617,3	6,47	9,14
Oblasti současné těžby	143,8	186,6	0,15	0,20
Silniční a železniční síť s okolím	53,2	53,2	0,06	0,06
Průmyslové a obchodní areály	61,9	61,9	0,07	0,07
Nesouvislá městská zástavba	2945,0	2945,0	3,12	3,12
Sportovní a rekreační plochy	102,9	0,0	0,11	0,00
Směsice polí, luk a trvalých plodin	23539,3	23596,1	24,97	25,04
Celkem	94251,6	94251,6		

(Zdroj dat: CORINE – Land Cover)

3. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH PROCESŮ

Model je vždy zjednodušením reality. Tím se vytváří možnost pracovat s ním tak, jak to není možné s originálem. Současně je třeba si uvědomit, že každý model je jen určitým stupněm poznání originálu a je v důsledku abstrakcí a zjednodušení jednostranný a dílčí.

Hydrologický model povodí je mnohovýznamovým pojmem a začal se používat v souvislosti se simulacemi srážko-odtokového (S-O) procesu (Buchtele, 2002). Modelování hydrologického systému představuje aplikaci matematických a logických operací, které kvantitativně popisují vazbu mezi charakteristikami odtoku (výstup modelu) a faktory ovlivňujícími tvorbu odtoku (vstup modelu) (WMO, 1994).



Tato definice v sobě skrývá široké spektrum odlišných přístupů. Srážko-odtokové modely mají několik kategorií a jsou vyvíjeny pro různé účely, a proto často využívají různé přístupy k vyjádření sledovaných procesů (Daňhelka a kol., 2003). Na jedné straně jsou to čistě empirické modely na principu černé skříňky (black-box), které se nezajímají o vnitřní strukturu a odezvu povodí v modelu, ale porovnávají pouze vstupy a výstupy. Na straně druhé jsou to modely založené na řešení fyzikálních zákonitostí hydrologických procesů, které jsou popsány více či méně složitými matematickými rovnicemi. Mezi těmito dvěma přístupy se nachází celá řada koncepčních modelů, kdy je povodí chápáno jako celek a je reprezentováno průměrnými hodnotami vstupních údajů (charakteristiky povodí). Koncepční modely jsou založeny na fyzikálním základu tvorby odtoku, avšak s jistým zjednodušením základních rovnic, v kterých se uplatňují empirické a semiempirické prvky (Makel' a kol., 2003). Pozdější nároky spojené se studiem procesů uvnitř povodí, ale i rozvoj výpočetní techniky, vedly k vývoji modelů s rozčleněnými parametry tzv. distribuovaných modelů.

Přechod mezi koncepčním a distribuovaným modelem představují modely semidistribuované, které při popisu prostorové heterogenity krajiny vycházejí z myšlenky hydrologické podobnosti (Seibert, 1999). Povodí je děleno např. podle nadmořské výšky do výškových pásem. Jiné členění krajiny se opírá o vymezení jednotek se stejnou hydrologickou odezvou. Flügel (1995) charakterizuje tyto jednotky jako plochy v krajinné mozaice, které mají stejné využití krajiny, stejné klimatické, pedologické, topografické a geologické podmínky kontrolující dynamiku jejich hydrologických procesů.

U distribuovaného modelu je povodí rozčleněno na menší jednotky, u kterých se předpokládá, že prostorová variabilita zkoumaných procesů je v rámci vyčleněné plochy

zanedbatelná. Velikost zvolené elementární plochy je závislá na mnoha faktorech. Plocha by měla být dostatečně malá, aby byla zaručena platnost řídicích rovnic (Daňhelka a kol., 2003). Povodí může být rozčleněno podle různých kritérií. V současné době nejběžnější členění distribuovaných modelů je s ohledem na možnosti geografických informačních systémů dělení na buňky (gridy) nebo do nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN). Podrobnost popisu hydrologických procesů v povodí spolu s technickými zásahy v území ovlivňují schopnost matematického modelu vyjádřit jednotlivé fáze odtoku (Havlík a kol., 2001).

Obecnou i podrobnější charakteristikou hydrologických modelů, jejich klasifikací, možnostmi a využitím se zabývají publikace Buchteleho (2002), Daňhelky (2003) a Bevena (2001).

Jednou z možností uplatnění S-O modelů je využití v ochraně před povodněmi. Jejich použití v povodňové problematice lze rozdělit na dvě základní oblasti. První je využití modelů pro operativní předpovědi s časovým předstihem od několika hodin po několik dnů. Druhá oblast spočívá ve využití S-O modelů v oblasti návrhů a vyhodnocení protipovodňových opatření (Havlík a kol., 2001). Je nutné si uvědomit, že pro různé druhy povodní se liší využití určitých modelů. Pokud například chceme modelovat povodně způsobené táním sněhové pokrývky, je třeba srážko-odtokový model rozšířit o model tání sněhu.

3.1. MODEL HEC- HMS 3.1.0.

S-O model HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) byl vyvinut v šedesátých letech armádou USA, střediskem pro hydrologický výzkum (Hydrologic Engineering Center- HEC). Model byl navržen tak, aby simuloval S-O procesy v dendritických vodních systémech. Je použitelný na řešení široké škály problémů v různých geografických oblastech. Může se jednat o rozsáhlá povodí, malá městská nebo přírodní povodí. Program lze použít pro studie dostupnosti vodních zdrojů, modelování předpovědi průtoků, urbanizačních zásahů do povodí, modelování vlivu nádrží na toku, simulace povodňových škod, management zátopových oblastí a další (HEC, 2006). Modelovací systém je podpořen programovými prostředky, které zajišťují další informační vazby (např. na zdroje dat, na systémy pro grafickou prezentaci vstupů a výstupů atd.).

V případě modelů, které obsahuje HEC-HMS, tvoří vstupní veličinu srážky a výstupem je odtok, nebo může být vstupem průtok v horní část toku a výstupem průtok na dolní části toku (Feldman, 2000).

Podle klasifikace WMO (zdroj) na základě příčiny a důsledku jsou všechny modely, které HEC-HMS zahrnuje deterministické. Některé modely mohou být koncepční (například model výpočtu přímého odtoku Kinematic-wave) a některé čistě empirické (model výpočtu přímého odtoku Snyder's unit hydrograph).

Podle délky časového kroku se rozdělují modely na událostní (epizodní) a kontinuální. Modely epizodní simulují odtok z přívalových dešťů, přičemž trvání srážkové události může být od několika hodin až několik dní (Feldman, 2000). Kontinuální modely simulují delší časové období, s různým časovým krokem vstupních řad (hodin až měsíců). Většina modelů v HEC-HMS jsou modely epizodní. Na základě prostorové diskretizace závisle proměnných funkcí, parametrů a hydrologických charakteristik lze rozdělit modely systému HEC-HMS na celistvé (lumped) a distribuované (Feldman, 2000). Jak již bylo řečeno distribuované modely člení povodí na určitý počet pravidelných elementů, zpravidla ve čtvercové, méně často trojúhelníkové síti. K výpočtům se používají parciální diferencované rovnice v rozměru 1D, 2D, zřídka 3D. Nejčastěji se povodí rozdělí na elementární odtokové plochy ve formě gridu, čímž lze přiřadit vstupům a výstupům modelu, stavovým proměnným a parametrům prostorové závislosti (Daňhelka a kol., 2003). Modely celistvé využívají zjednodušeného přístupu ke geografické schematizaci povodí a předpokládají zjednodušenou prostorovou informaci homogenní z hlediska všech vlastností, charakterizovaných jediným reprezentativním bodem povodí. Modely jsou zjednodušené a tudíž snáze aplikovatelné. Jsou tak vyjádřeny pomocí obyčejných diferenciálních rovnic v rozměru 0D (doplněnými o algebraické vztahy) a jedinou nezávislou proměnnou je tak čas (Daňhelka a kol., 2003). HEC-HMS obsahuje zejména celistvé modely. Výjimkou je například model výpočtu přímého odtoku ModClark.

Jak již bylo řečeno, HEC-HMS využívá některých dalších programových prostředků pro zpracování vstupních dat a k prezentaci dat výstupních. Jedná se hlavně o předzpracování dat v prostředí GIS, konkrétně v extenzi HEC-GeoHMS vytvořené pro software ArcGIS 9.x (ESRI, Inc. Redlands, CA, USA). ArcGIS 9.x nabízí další nadstavby, které umožňují zpracování analýz při hydrologickém modelování. Spoluprací firmy ESRI a Centrem pro výzkum vodních zdrojů (Center for Research of Water Resource) na Texaské univerzitě v Austinu vznikl nástroj na podporu hydrografických, hydraulických a hydrologických analýz ArcHydro.

3.1.1. *Podpůrné programové prostředky*

Všechny programové prostředky byly instalovány na základě postupu doporučeného ESRI Water Resource Group.

- 1) ApFramework (core data management functionality)
- 2) XML Data Exchange (I/O routines for XML data input and output)
- 3) MSXML 4 (Microsoft's components for XML management)
- 4) Arc Hydro Tools
- 5) HEC-GeoHMS
- 6) HEC-DSSVue

ArcHydro 1.3

Tento nástroj obsahuje dva klíčové komponenty a to:

- ArcHydro Data Model,
- ArcHydro Tools.

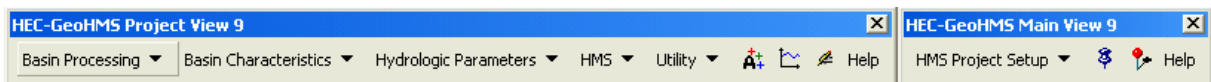
ArcHydro Tools slouží k vytvoření hlavních složek datového modelu a k přiřazení klíčových atributů pro další analýzy. Umožňuje předzpracování digitálního modelu reliéfu, určení rozvodnic a konstrukce říční sítě. Dále přiřazuje vytvořené základní hydrografické síti jedinečné identifikátory toků a povodí (HydroID, DrainID, atd.) a vytváří jejich základní měrné charakteristiky (LengthDown, LongestFlowPath atd.). Nástrojovou lištu zobrazuje obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Nástrojová lišta ArcHydro Tools

HEC-GeoHMS 4.1 Beta Version

Tato nadstavba byla vytvořena jako rozšíření pro ArcGIS 9.x s extenzí Spatial Analyst. Umožňuje interaktivní management dat a procesů pro další použití v programu HEC-HMS. Vytváří povodí z digitálního modelu reliéfu, rozšiřuje výpočty fyzicko-geografických charakteristik povodí, které jsou dále využity k výpočtům hydrologických parametrů. Některé možnosti se kryjí s nadstavbou ArcHydro. HEC-GeoHMS především vytváří schéma hydrologické sítě, které může být dále exportováno se všemi parametry vytvořenými v GIS do programu HEC-HMS. Středisko pro hydrologický výzkum ještě oficiálně nezveřejnilo verzi HEC-GeoHMS pro ArcGIS 9.x, ale je možné získat její beta verzi od Water Resources Group ESRI přes FTP server (ftp.esri.com) nebo na žádost.



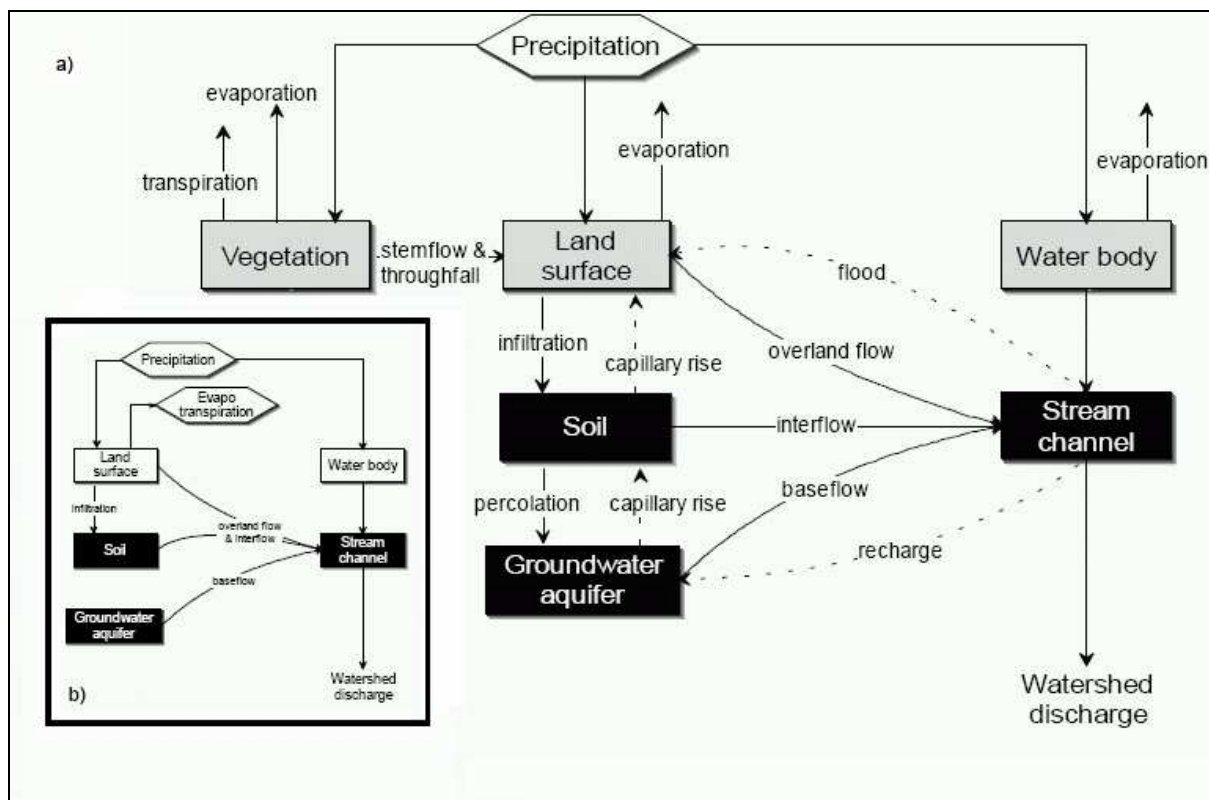
Obrázek 3.2: Nástrojová lišta HEC-GeoHMS

HEC-DSSVue 1.2

HEC-DSSVue (Hydrologic Engineering Center – Data Storage System Visual Utility Engine) je databázový systém vytvořený pro grafické vizualizace, editování a manipulaci rozsáhlých sérií dat. Vše je pak možno exportovat do dalších formátů pro následné zpracování. Je vytvořen na platformě Java (Charley, 2005).

3.2. SLOŽKY HYDROLOGICKÉHO CYKLU V MODELU HEC-HMS

Obrázek 3.3 ukazuje složky srážko-odtokového procesu v měřítku, které odpovídá měřítku použitým v HEC-HMS. Voda z atmosférických srážek dopadá na vegetaci, zemský povrch a vodní plochy. V hydrologickém systému se část vody ze srážek vypaří (evaporace) do atmosféry, část se zadrží intercepčí na vegetaci a povrchu terénu, později se vypaří evapotranspirací. Voda, která dopadne na zemský povrch, se vsákne do půdy (infiltrace) a podílí se na oběhu v půdě. Část se vydá na transpiraci vegetace, část odtéká hypodermickým nebo základním odtokem do hydrografické sítě nebo doplňuje zásoby podzemních vod. Voda, která nebyla zachycena na povrchu vegetace či terénu ani neinfiltrovala do půdy, stéká po půdním povrchu a vytváří povrchový odtok. Voda v korytě je tedy kombinací povrchového odtoku, srážek, které dopadnou přímo na vodní plochy v povodí a hypodermického a základního odtoku (Feldman, 2000).



Obrázek 3.3: Diagram srážko-odtokového procesu v programu HEC-HMS a) detailní popis S-O procesu, b) zjednodušený popis S-O procesu

(Zdroj: Feldman, 2000)

Program HEC-HMS využívá k vyjádření jednotlivých složek odtokového procesu od srážek až po výsledný průtok v závěrovém profilu několik oddělených modelů. Jsou to:

- model objemu odtoku,
- model transformace přímého odtoku,
- model základního odtoku,
- model korytového odtoku.

3.2.1. Model objemu odtoku

HEC-HMS počítá objem odtoku vyhodnocením objemu vody, který se ztratí intercepací, infiltrací, akumulací, evapotranspirací a tuto hodnotu odečte od srážek. V modelech se počítá s tím, že všechen povrch v povodí může být rozdělen do dvou kategorií, a to buď přímo spojený nepropustný povrch a propustný povrch. Pro výpočet odtokové ztráty nabízí program několik metod:

- Initial and constant-rate loss model,
- The deficit and constant-rate model

- The SCS curve number (CN) loss model,
- The Green and Ampt loss model.

Mezi nejpoužívanější pro svou jednoduchost a nenáročnost na vstupní data patří metoda CN–křivek. Efektivní srážka je v tomto modelu určena funkcí souhrnných srážek, vegetačního pokryvu, využití půdy a vlhkosti půdy.

Tato metoda určí na základě půdního pokryvu, indexu předchozích srážek a hydrologické skupiny půd hodnotu CN křivky. Dalšími vstupy do modelu jsou odhad počáteční ztráty v mm a procento nepropustných ploch v povodí. Než akumulovaná srážka přesáhne počáteční ztrátu, mají efektivní srážka a odtok nulové hodnoty.

Čísla odtokových křivek se pohybují v rozmezí 100 (vodní plochy) až po přibližně 30 pro velmi propustné půdy s velkou infiltrací. Hlavní předností je již zmíněná jednoduchost jejího použití, hlavním nedostatkem pak nerespektování časové změny hodnoty CN se změnami nasycenosti půdních zón v průběhu srážkové epizody (Daňhelka a kol., 2003).

Bližším popisem této metody a výpočtem CN-křivek se zabývá kapitola 4.1.3.1.

3.2.2. *Model transformace přímého odtoku*

Jako transformační funkci srážek na odtok používá program HEC-HMS buď jednotkový hydrogram (UH) nebo model kinematické vlny. Model kinematické vlny zohledňuje fyzikální procesy (např. infiltrace, proudění v korytě). HEC-HMS nabízí několik typů jednotkových hydrogramů: User-specified Unit Hydrograph, Clark's UH, Snyder's UH a SCS UH. Nejčastěji je používán Clarkův hydrogram. Ten je odvozen tak, že jasně reprezentuje dva hlavní procesy v transformaci efektivní srážky na odtok a to: převod nebo pohyb srážky z místa původu do závěrového profilu a útlum či snížení velikosti průtoků při rozložení efektivní srážky přes povodí. Parametry vstupující do modelu jsou:

- T_c – doba koncentrace v povodí [hod],
- R_c – transformační faktor [hod] simulující dobu zadržetí vody v povodí (storage coefficient),
- závislost doby dobíhání a velikosti plochy povodí při zasažené celé ploše povodí (tzv. time-area curve).

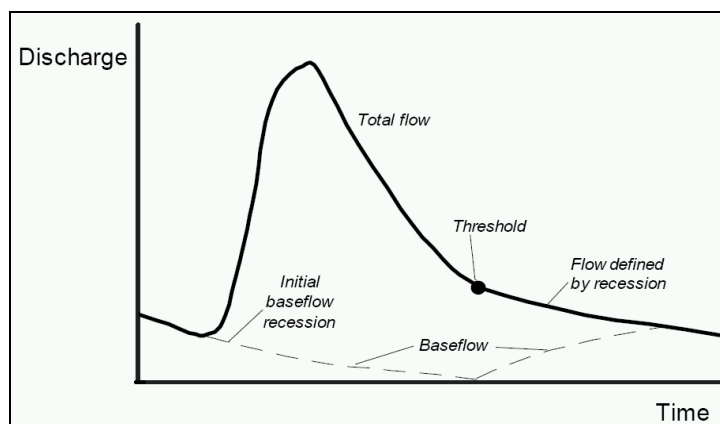
3.2.3. *Model základního odtoku*

Pro modelování základního odtoku obsahuje HEC-HMS tyto tři metody:

- Constant monthly,
- Exponential recession,

- Linear reservoir.

Například pro metodu exponenciálního poklesu je nutné odvodit tyto parametry - podzemní odtok („Baseflow“), poklesovou konstantu („Recession Constant“) a prahovou hodnotu („Threshold“). Model je zobrazen na obr. 3.4.



Obrázek 3.4: Ilustrace modelu základního odtoku

(Zdroj: Feldman, 2000)

Pro základní odtok Q_t v čase t platí tento vztah:

$$Q_t = Q_0 \cdot k^t$$

Kde: Q_0počáteční základní odtok

kpoklesová konstanta

Konstanta k je definována jako poměr základního odtoku v čase t k základnímu odtoku, který se vyskytoval o den dříve.

3.2.4. Model korytového odtoku

Pro odhad postupu povodňové vlny po toku je možné využít několik metod. Jsou to Kinematic wave, Lag, Modified puls, Muskingum, Muskingum-Cunge. Vhodná pro použití v praxi je metoda Muskingum-Cunge, založená na aproximaci kombinace rovnice kontinuity a difúzní formy momentové rovnice (Daňhelka a kol., 2003). K jejím výhodám patří:

- parametry modelu mají fyzikální základ,
- dává dobré výsledky v porovnání s modely s plně aplikovanými rovnicemi neustáleného proudění,
- řešení nezávisí na zadaném výpočetním intervalu.

Nevýhody:

- neuvažuje možnost zpětného vzdutí,
- při náhlém vzestupu vlny a současně malém sklonu koryta metoda nekonverguje (Daňhelka a kol., 2003).

4. PŘÍPRAVA SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU

Srážko-odtokový model v prostředí HEC-HMS se skládá ze základního modelu povodí a meteorologického modelu. Výsledky každého modelu jsou závislé na kvalitě vstupních dat. Velmi důležitá je také jejich interpretace. Obecně bývá problém s daty z povodí, jejichž část se nachází na území jiného státu. Data by měla být přibližně stejného měřítko a měla by splňovat stejné kvalitativní nároky.

Příprava dat probíhala v několika etapách. Nejprve byla zpracována fyzicko-geografická charakteristika v prostředí GIS s využitím nadstavby ArcHydro a HecGeoHMS. Dalším krokem byl export sestaveného schematizovaného povodí se všemi atributy do programu HEC-HMS. V dalším kroku byl vytvořen meteorologický model vycházející z reálných srážkových dat, která byla uložena v databázovém systému HEC-DSSVue a z něho naimportována do HEC-HMS.

4.1. ZPRACOVÁNÍ FYZICKO-GEOGRAFICKÝCH CHARAKTERISTIK POVODÍ

Prvním z kroků při odvozování fyzicko-geografických charakteristik povodí byla příprava modelu terénu, určení průběhu rozvodnic a konstrukce říční sítě. Následovalo určení závěrového profilu povodí, sestavení finální podoby povodí a říční sítě. Posledním krokem byl výpočet fyzicko-geografických podob povodí a export hydrologického modelu povodí se všemi jeho charakteristikami do prostředí HEC-HMS při zachování všech topologických vazeb.

4.1.1. *Tvorba digitálního modelu reliéfu (DMR)*

Pro vytvoření DMR byla použita interpolační metoda Topo to Raster, která je součástí extenze Spatial Analyst v programu ArcGIS 9.2. Funkce Topo to Raster byla specificky navržena pro vytváření hydrologicky korektního digitálního modelu reliéfu. Jako vstupní data nepoužívá pouze vrstevnice, ale i výškové body, vodní toky, vodní plochy a hranice povodí. Využívá tedy výhody všech typů dostupných dat a klade důraz na charakteristiky zemského povrchu. Spojuje přesnost lokální interpolace IDW s metodami spline a kriging, díky kterým neztrácí souvislosti dané globálními metodami.

Jako vstupní data pro DMR byly použity vrstevnice s výškovým rozdílem 5 metrů pro území České republiky a vrstevnice s ekvidistancí 10 m pro území Rakouska. Dalším vstupem byla říční síť pro českou stranu povodí získaná z databáze DIBAVOD a pro rakouskou stranu byla použita říční síť poskytnutá z VÚV TGM. Hranice povodí po závěrový profil Pilař byla rovněž získána z databáze DIBAVOD.

Při zadání vstupních údajů je nutné zadat další kontrolní parametry jako je výsledné rozlišení, počet pixelů zasahujících do interpolace za hranice povodí, minimální a maximální výška výsledného DMR atd. Rozlišení bylo nastaveno na 12x12 metrů (toto rozlišení bylo nastaveno na základě hardwarového omezení), ostatní hodnoty byly ponechány původnímu nastavení.

Další zpracování DMR probíhalo v extenzi ArcHydro využitím extenze Terrain Preprocessing. Výběr metod je závislý na kvalitě počátečního DMR. V tomto případě byly využity funkce „DEM Recondition“ a „Fill Sinks“. První funkce umožňuje modifikovat model reliéfu s říční sítí. Je to implementace metody AGREE vyvinuté na University of Texas v Austinu. Funkce „Fill sinks“ vyplní bezodtoké deprese v terénu, vzniklé chybnou interpolací, na úroveň jejich okolí.

Při porovnání takto upraveného DMR s digitálním modelem reliéfu neupraveným zjistíme, že rozdíl v nejnižší nadmořské výšce povodí dosahuje téměř dvaceti metrů (neupravený DMR 439 m n. m., upravený DMR 419 m n. m.).

4.1.2. *Tvorba říční sítě a subpovodí v extenzi ArcHydro*

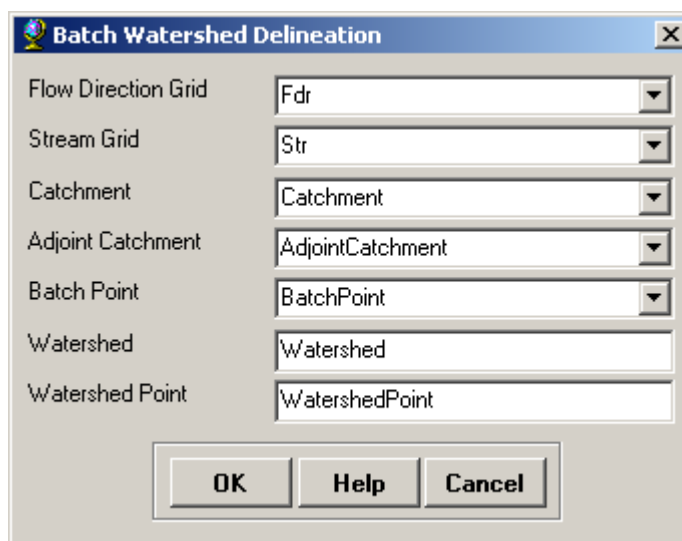
K tvorbě říční sítě a subpovodí na základě vytvořeného DMR se přistoupilo z důvodu nekonzistence dat Čech a Rakouska. Automatickým vygenerováním byla ve stejném měřítku a kvalitě vytvořena data, se kterými se dále mohlo jednoduše pracovat.

K vytvoření říční sítě byla využita funkce Terrain Preprocessing. Funkcí „Flow Direction“ se určí vektory stékání na základě největšího sklonu terénu. V dalším kroku bylo provedeno určení tzv. akumulace vody „Flow Accumulation“, kdy je každému pixelu přiřazena hodnota sumy všech pixelů, ze kterých na základě „Flow Direction“ přitéká voda. Následovala procedura pro definici toků „Stream Definition“ s hodnotou akumulace větší než definovaný práh. Ten je udáván buď počtem pixelů nebo plochou v km² a jeho implicitní nastavení představuje 1 % maximální akumulace. Na jeho základě je vytvořena generalizovaná říční síť, podle které se dále rozčlení povodí na menší subpovodí. Byl vybrán práh 4,5 km². Výsledné subpovodí by na základě metodiky CN-křivek nemělo překročit 10 km², což se sice u několika povodí stalo, ale pokud by se nastavil menší práh, byla by výsledná síť příliš hustá a došlo by k vykreslení ještě většího počtu subpovodí, což bylo vzhledem k velké rozloze povodí horní Lužnice nežádoucí. Dále byl pomocí funkce „Stream Segmentation“ vytvořen grid jednotlivých říčních úseků, kdy každý pixel náležející danému úseku měl stejnou hodnotu. Určily se soutoky, jež je oddělovaly. Takto bylo vymezeno 127 říčních segmentů. Jednotlivým říčním segmentům bylo potřeba pomocí funkce „Catchment

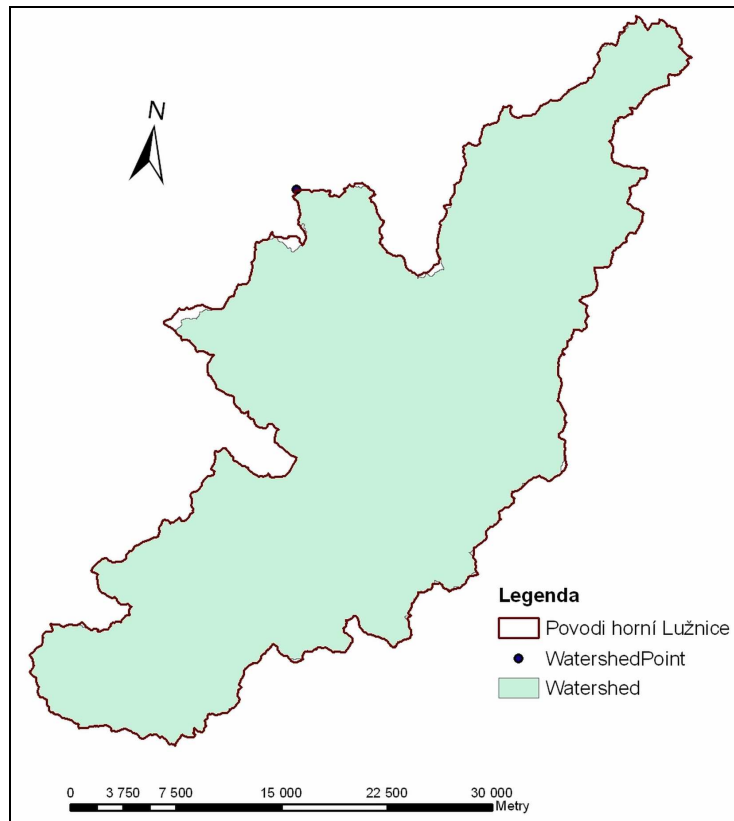
Grid Delineation“ přiřadit konkrétní subpovodí. Tato funkce vytvoří grid, kde každý pixel náleží právě jednomu subpovodí a je shodný s hodnotou příslušného říčního segmentu.

Další tři funkce: „Catchment Polygon Processing“, „Drainage Line Processing“ a „Adjoint Catchment Processing“ konvertují vytvořené rastry do vektorového formátu. Funkcí „Catchment Polygon Processing“ jsou subpovodí převedena na polygony, tj. rozvodnice. Každému polygonu je přiřazeno jedinečné HydroId. Následuje převedení říčních segmentů na linie vodních toků. Vymezení subpovodí je zobrazeno v příloze č. 3. Plochy a délky vektorů jsou automaticky vypočítány v okamžiku, kdy se prvek stane součástí geodatabáze. Funkce „Adjoint Catchment“ proti směru toku agreguje jednotlivá subpovodí, tak aby se v dalším kroku urychlila tvorba bodů, kde tok opouští subpovodí – tj. „Drainage Point Processing“.

ArcHydro také nabízí rozsáhlou řadu možností pro další práci s povodím a jednotlivými subpovodími. Pomocí „Batch Point Generation“ byl vytvořen závěrový profil celého povodí. Poté bylo příkazem „Batch Watershed Delineation“ vygenerováno celistvé povodí „Watershed“ a k němu vztažený závěrový profil „WatershedPoint“. Vstupy zobrazuje obrázek 4.1.



Obrázek 4.1: Vytvoření povodí a závěrového profilu



Obrázek 4.2: Porovnání původního a vygenerovaného povodí (Watershed)

Povodí „Watershed“ vygenerované na základě předcházejících kroků má jinou rozlohu v porovnání s původním povodím získaným z databáze DIBAVOD. Je menší o 10,4 km². Jeho plocha je tedy 932,1 km². Rozdíl těchto povodí je znázorňuje mapa na obr. 4.2.

4.1.3. Výpočet charakteristik povodí v extenzi HEC-GeoHMS

Nástroj HEC-GeoHMS nám umožňuje nejen získání nezbytných informací o charakteru povodí z prostorových dat, ale i vytvoření schematizovaného povodí.

Pomocí nástroje „Add Project Points“ se určil závěrový profil, který musí být totožný s předchozími body „BatchPoint“ a „WatershedPoint“. Dále se spustila procedura „Generate Project“. Tímto byla vytvořena nová složka v pracovní složce s názvem projektu, do které se zkopírovala všechna rastrová a vektorová data.

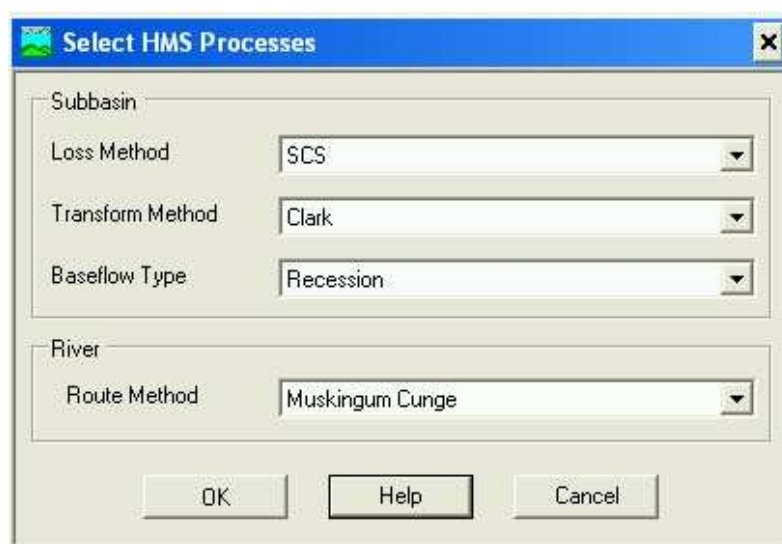
Po vytvoření modelu povodí a říční sítě se mohlo přistoupit k výpočtu nezbytných charakteristik povodí. K tomu bylo využito menu „Basin Characteristics“. Nejdříve se vypočítala délka a sklon vodních toků a průměrný sklon jednotlivých subpovodí. Délka a sklon maximální délky toku (nejdelší údolnice povodí) byla zjištěna na základě metody

„Longest Flow Path“ a metodou „Basin Centroid“ byla určena těžiště povodí podle dvou různých metod („Center of Gravity Method“ a „Longest Flow Path Method“).

Center of Gravity Method určí těžiště jako centrum těžiště subpovodí, jestliže se nachází vně, je přichyceno k nejbližší hranici. Longest Flow Path Method vypočítá těžiště jako centrum maximální délky toku uvnitř subpovodí. Pro každé těžiště byla funkcí „Centroidal Elevation Update“ zjištěna nadmořská výška a díky metodě „Centroidal Flow Path“ vypočítána délka toku z průmětu těžiště povodí na hlavní tok k závěrovému profilu.

Všechny charakteristiky byly automaticky zapsány do atributové tabulky jednotlivých nově vytvořených vektorů.

V HecGeo-HMS můžeme také specifikovat modely, které budou v HEC-HMS použity, vybrané modely zobrazuje obr. 4.3. Dojde tak k vytvoření nových sloupců v atributových tabulkách subpovodí a vodních toků. Vše je možné uvnitř programu HMS později změnit.



Obrázek 4.3: Výběr procesů v HEC-GeoHMS

4.1.3.1. Stanovení hodnot pro výpočet odtokové ztráty

Pro hodnocení S-O procesu v krajině byla v institutu Soil of Conservation Service (SCS) v USA vyvinuta metoda čísel odtokových křivek. Pro naše poměry byla tato metoda upravena a publikována např. Janečkem (Janeček, 2005). Metoda CN–křivek umožňuje odhad objemu přímého odtoku způsobeného přívalovými dešti z povodí o ploše 5-10 km². Přímý odtok zahrnuje odtok povrchový a odtok hypodermický. Podíly těchto odtoků ze složek celkového odtoku se oceňuje pomocí čísel odtokových křivek. Čím je větší CN, tím je pravděpodobnější, že se přímý odtok týká povrchového odtoku.

Základním vstupem metody CN–křivek je srážkový úhrn, za předpokladu jeho rovnoměrného rozložení po ploše povodí. Objem srážek je dále transformován na objem odtoku. Hodnoty CN–křivek jsou závislé na hydrologických vlastnostech půd, resp. infiltraci, vegetačním pokryvu, obsahu vody v půdě a velikosti nepropustných ploch.

- Zařazení půd do hydrologických skupin (HSP)

Hydrologické skupiny půd A – D (tab. 4.1) jsou rozlišeny na základě minimálních rychlostí infiltrace.

Tabulka 4.1: Hydrologické skupiny půd

Skupina	Charakteristika hydrologických vlastností
A	Půdy s vysokou rychlostí infiltrace ($> 0,12$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky.
B	Půdy se střední rychlostí infiltrace ($0,06-0,12$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité.
C	Půdy s nízkou rychlostí infiltrace ($0,02-0,06$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité.
D	Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace ($< 0,02$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy na téměř nepropustném podloží.

(Zdroj: Janeček, 2005)

Do hydrologické skupiny lze půdu přibližně zařadit podle kódu BPEJ (HPJ). Více informací lze najít v metodice Janečka (2002). Další možností je využití digitalizované mapy ČR v rastru kilometrových sítí s převažujícími hodnotami retenční vodní kapacity a hodnotami rychlosti infiltrace zpracované Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd (Šercl, 2006). Vzhledem k nedostatku kvalitativně odpovídajících dat k těmto uvedeným z rakouské strany povodí, byly HSP určeny na základě níže uvedeného postupu.

Nejprve byly vektorizovány části mapových listů půdních map ČR 1:50 000 zasahujících na povodí: 23-34 Jindřichův Hradec, 33-13 České Velenice, 33-31 Pohoří na Šumavě (AOPK ČR, 2005) a listů 33-11 Třeboň, 33-12 Nová Bystřice (ČGÚ Praha, 1995). Na základě půdotvorného substrátu a na základě charakteristiky půdních subtypů byly

přiřazeny kategorie hydrologických skupin půd a výsledná mapa byla porovnána s rastrem kilometrové sítě infiltračních rychlostí vydanou VÚMOP.

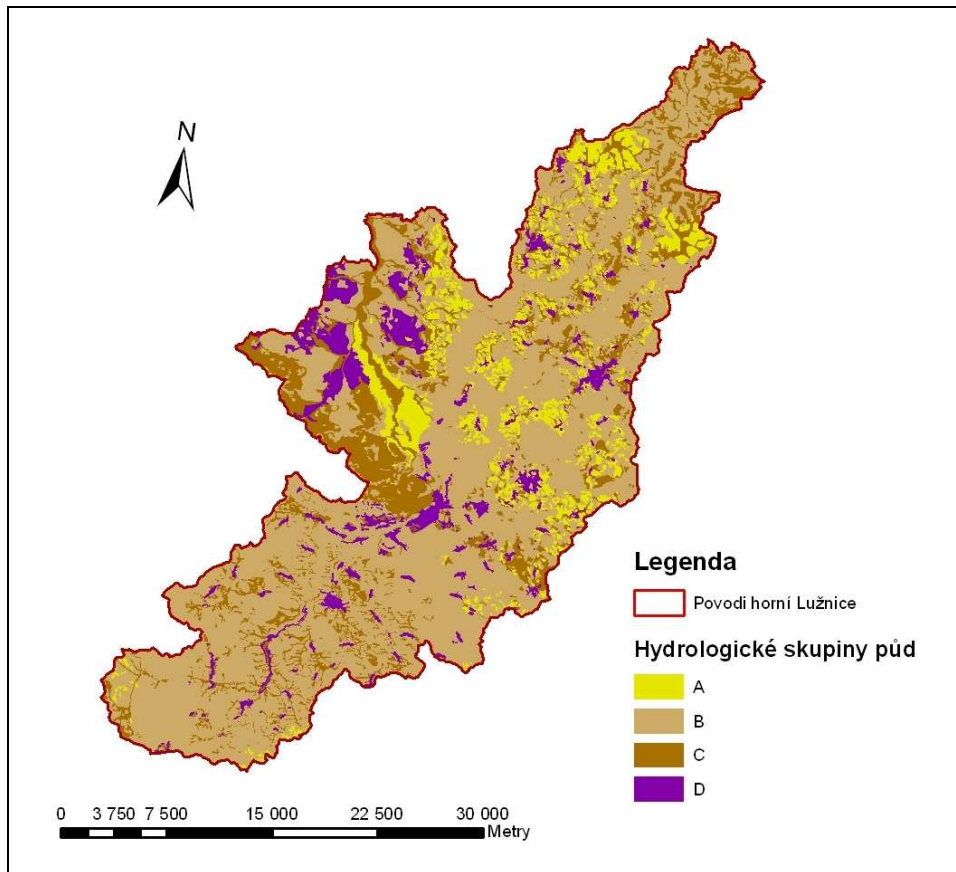
Dále byly vektorizovány půdní mapy 1:30 000 z rakouské části povodí dostupné v aplikaci e-BOD. Nejprve bylo nutné půdní mapu převést v programu Adobe Photoshop do formátu binárního obrázku, kde každý pixel může nabývat pouze dvou hodnot a to 0 nebo 1. K vektorizaci byla použita extenze programu ArcGIS 9.2 ArcScan. Z té se již daly automaticky vygenerovat linie, které bylo možno dále převést na polygony. Celkem bylo vygenerováno 7000 polygonů bez atributů, které se k nim váží. Na základě aplikace e-BOD byly ručně doplněny do atributové tabulky ke každému polygonu tyto hodnoty: půdní typ, půdní substrát, humus, hloubka jednotlivých horizontů a infiltrační schopnost. Infiltrační schopnost půd je zde rozdělena do devíti kategorií (viz tabulka 4.2). Na základě těchto informací bylo možné půdní typy rozdělit do čtyř kategorií hydrologických skupin půd. Vše bylo upřesněno na základě rozborů z půdních sond nacházejících se na ploše povodí (zdroj dat e-BOD). Celkem se zde nachází 35 sond, které pokrývají všechny půdní typy rakouské části povodí.

Půdní mapy na rakouském území neurčují lesní půdy a intravilán. Vzhledem k nedostatku jiných podkladů byly lesní půdy zařazeny do hydrologické skupiny B a intravilán do skupiny D. Územní rozložení takto vzniklých hydrologických skupin půd znázorňuje mapa na obr. 4.4.

Tabulka 4.2: Ukázka části atributové tabulky s půdními typy a jejich propustností

	Bodentyp	Durchlaessigkeit
gsBA	schwach vergleyter, kalkfreier Brauner Auboden aus vorwiegend feinem, silikatischem Schwemmaterial der Lainsitz	3
gsBA	vergleyter Brauner Auboden aus silikatischem Schwemmaterial	3
gsBA	vergleyter, kalkfreier Brauner Auboden aus feinem Schwemmaterial	5
gsFB	schwach vergleyte, kalkfreie Felsbraunerde aus Granit (Schutt und aufgemürbter Fels)	5
gsFB	vergleyte, kalkfreie Felsbraunerde aus Granit	7
sLB	Lockersediment-Braunerde aus silikatischem Material	9
sEG	Extremer Gley aus altem, silikatischem Verwitterungsmaterial	1

(Zdroj dat: e-BOD)



Obrázek 4.4: Hydrologické skupiny půd v povodí horní Lužnice

(Zdroj dat: DIBAVOD, e-BOD, půdní mapy ČR)

- Vegetační pokryv

Ke stanovení vegetačního pokryvu byly použity mapy krajinného pokryvu CORINE Land Cover z let 2000 a 1990. Na území povodí horní Lužnice se vyskytuje celkem 15 tříd CORINE. Mapy vegetačního pokryvu jsou zobrazeny pro jednotlivé roky v příloze č. 4.

- Vytvoření gridu CN-křivek za použití HEC-GeoHMS

Přípravené HSP a třídy vegetačního pokryvu můžeme překrýt a přiřadit tak každému polygonu číslo křivky CN. Nejprve vytvoříme v tabulce, která obsahuje HSP pole s názvy PctA, PctB, PctC a PctD (tabulka 4.3.). Sloupec PctA definuje, kolik procent plochy polygonu zabírá HSP A, PctB definuje, kolik procent zabírá skupina HSP B atd.

Tabulka 4.3: Ukázka tabulky obsahující HSP

HSP	Půdní typ	SoilCode	PctA	PctB	PctC	PctD
C	Glej modální	C	0	0	100	0
C	Glej histický	C	0	0	100	0
C	Glej histický	C	0	0	100	0
B	Kambizem dystrická	B	0	100	0	0
B	Kambizem dystrická	B	0	100	0	0
B	Kambizem dystrická	B	0	100	0	0
B	Kambizem dystrická	B	0	100	0	0
B	Kambizem dystrická	B	0	100	0	0
B	Kambizem dystrická	B	0	100	0	0
C	Pseudoglej modální	C	0	0	100	0

Poté můžeme pomocí nástroje „Overlay⇒ Union“ v extenzi Analysis Tools překrýt polygony s krajinným pokryvem (nejprve pro rok 2000 a poté pro rok 1990) s polygony obsahující hodnoty hydrologických skupin půd. Tento překryv obsahuje atributy obou vstupujících vrstev. Dalším krokem je vytvoření tabulky „Look-up Table“ (tab. 4.4), která obsahuje hodnoty CN křivek pro různé kombinace krajinného pokryvu a hydrologické skupiny půd.

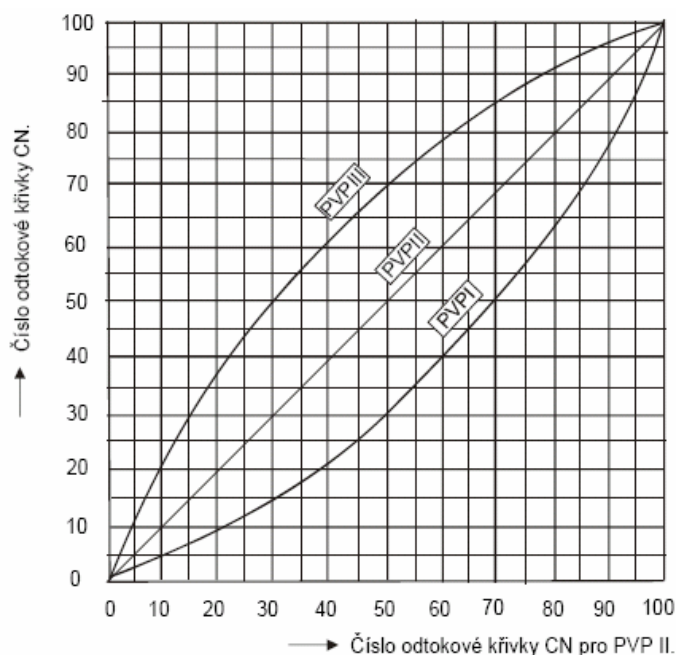
HEC-GeoHMS používá k vytvoření CN gridu vytvořený překryv, „Look-up Table“ a digitální model reliéfu. Pomocí funkce „Utility Create Parameter Grid“ se vygeneruje CN grid. Vytvořený grid pro rok 2000 s rozlišením 12x12 metrů (tedy se stejným rozlišením jako digitální model reliéfu) je zobrazen v příloze č.5.

Tabulka 4.4: Určení hodnoty CN podle vegetačního krytu a hydrologické skupiny půd–„Look-up Table“

OID	LUValue	Descriptio	A	B	C	D
0	112	Nesouvisla mestska zastavba	77	85	90	92
1	121	Prumyslove a obchodni arealy	85	90	93	94
2	122	Cestni, zeleznicni sit a prilehle arealy	85	90	93	94
3	131	Tezba nerostnych surovin	85	90	93	94
4	142	Arealy sportu	77	85	90	92
5	211	Orna puda	64	73	83	87
6	231	Louky a pastviny	49	69	79	84
7	242	Pole,louky,kultury	54	72	82	87
8	243	Zemedelske arealy	71	82	87	90
9	311	Listnate lesy	45	61	74	80
15	312	Jehlicnate lesy	45	61	74	80
10	313	Smisene lesy	45	61	74	80
11	324	Leso-kroviny	45	58	72	78
12	411	Mocaly a raseliniste	85	90	93	94
13	412	Raseliniste	85	90	93	94
14	512	Vodni plochy	100	100	100	100

(Zdroj dat: ČHMÚ)

Takto získaná čísla CN platí pro průměrnou (střední) počáteční nasycenost půdy. Metodika CN–křivek umožňuje rozlišit 3 kategorie předchozích vláhových podmínek (PVP) na základě celkového úhrnu srážek během pěti dnů, které předcházejí příčinnému dešti. Kdy PVP I odpovídá suché půdě, při PVP III je půda přesycena předcházejícími dešti. Pro návrhové účely se uvažuje PVP II (Janeček, 2002). Pro vlhkostní poměry PVP I a PVP III je nutno použít pro určení hodnot CN-křivek přepočtový nomogram uvedený v Janečkovi (2002) viz obrázek 4.5.



Obrázek 4.5: Nomogram pro odvození CN-křivek

(Zdroj: Janeček, 2002)

Potenciální retence S [mm] se vypočítá z CN křivky:

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN}$$

S ... potenciální maximální retence [mm]

Pro odhad počáteční ztráty I_a (Initial Abstraction) je možné použít vztah SCS:

$$I_a = 0,2 \cdot S$$

I_a ... velikost počáteční ztráty [mm]

Efektivní srážka je pak zjištěna na základě vztahu:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

kde:

P_e ...kumulativní efektivní srážka v čase t [mm]

P ...kumulativní srážka v čase t [mm]

Hodnoty pro počáteční ztráty byly zapsány do sloupce v atributové tabulce „InitAbst“.

Do modelu CN-křivek je nutné ještě zadat podíl nepropustných ploch jednotlivých subpovodí. Ten se stanoví následujícím způsobem. Jako nepropustné plochy byly zvoleny kategorie vodních ploch, městské zástavby a průmyslových areálů. Pomocí extenze Spatial Analyst a její funkce „Zonal Tabulate Area“ byla určena rozloha těchto ploch. Dále byl

určen procentuální podíl nepropustné plochy na celkové ploše subpovodí a zadán do sloupce „PctImp“.

Funkce „Basin Curve Number“ byla použita k překrytí vrstvy subpovodí gridem CN a vypočítala tak průměrnou hodnotu CN křivky pro jednotlivá subpovodí.

Tímto byla dokončena příprava dat pro model objemu odtoku.

4.1.3.2. Výpočet hydrogramu odtoku z povodí

Pro parametrizaci přímého odtoku byl použit jednotkový hydrogram dle Clarka. Extenze HEC-GeoHMS umožňuje výpočet podle metodiky TR-55 (USDA, 1986), ale vzhledem k tomu, že byla použita beta verze uvedené extenze, která se ukázala v tomto případě jako nestabilní, byl použit vzorec podle SCS (Soil Conservation Service v USA). V atributové tabulce vrstvy subpovodí byly nejprve vytvořeny položky T_c , T_{lag} a R_c .

Doba koncentrace T_c je čas potřebný pro odtok z nejvzdálenějšího bodu v povodí do závěrového profilu povodí. Ovlivňuje tvar a vrchol hydrogramu odtoku. Oproti tomu je T_{lag} (Lag time) čas, který uplyne od okamžiku výskytu maximální intenzity srážky po okamžik výskytu kulminačního průtoku v závěrovém profilu povodí. Pro výpočet T_{lag} byl použit vzorec SCS:

$$T_{lag} = L^{0,8} \frac{(S + 1)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}} \text{ [hod]}$$

kde: L....maximální délka toku v povodí [feet]

S....maximální retence v povodí vypočtená z CN křivky [inches]

Y...sklon povodí [%]

Pro výpočet doby koncentrace byl použit následující vztah mezi T_c a T_{lag} :

$$T_c = \frac{T_{lag}}{0,6} \text{ [hod]}$$

Parametr R_c (storage coefficient) představuje dobu zdržení vody v povodí neboli retenční konstantu. Pro výpočet byl použit vzorec odvozený pro Clarkův jednotkový hydrogram:

$$R_c = A \cdot L^B \cdot S_{10-85}^C$$

kde: L.....maximální délka toku v povodí [mi]

S_{10-85}průměrný sklon povodí podél maximální délky toku v úseku mezi 10 % – 85 % délky [ft/mi]

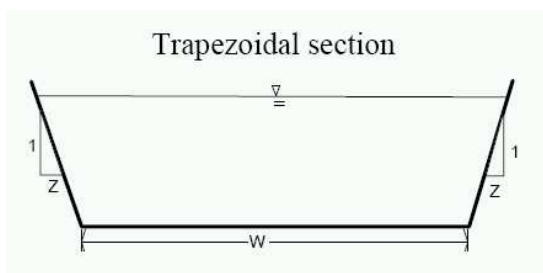
A, B, C..... koeficienty odvozené ČHMÚ pro ČR na hodnoty $A=80$, $B=0,342$, $C=0,79$

Výpočet parametrů proběhl v ArcGIS v extenzi ArcHydro, kde byly vytvořeny z linií „Longest Flow Path“ 3D linie a z nich body na 10% a 85% délce.

4.1.3.3. Výpočet odtoku v korytech

Jako metoda výpočtu odtoku v korytech byla zvolena metoda „Muskingum_Cunge“. Pomocí menu v extenzi HECGeoHMS „Hydrologic Parameters“ – „Muskingum Cunge“ byly vyplněny tyto parametry: šířka dna koryta a boční sklon, Manningův koeficient drsnosti povrchu a tvar koryta. Tyto parametry se daly zadat najednou pro celý tok a pak je bylo možné editovat. Ostatní parametry jako délka úseku a podélný sklon již byly vypočítány.

Povodí bylo rozděleno na základě dělení v kapitole 1.2 na tři segmenty vztahující se k celému povodí – pramenná oblast (tvar koryta „Trapezoidal“ (obr- 4.6); šířka dna dva metry; Manningův koeficient drsnosti 0,035;); vrchovinná oblast (tvar koryta „Trapezoidal“; šířka dna 5,5 metrů; Manningův koeficient drsnosti 0,035;), oblast Třeboňské pánve (tvar koryta „Trapezoidal“, šířka dna 10 metrů; Manningův koeficient drsnosti 0,04;). Manningův koeficient drsnosti byl odhadnut na základě doporučení U.S. Geological Survey.



Obrázek 4.6: Parametry profilu koryta

(Zdroj: Feldman, 2000)

4.1.3.4. Výpočet základního odtoku

Pro stanovení základního odtoku byla použita recesní metoda základního odtoku („Recession Baseflow Method“). V této metodě je třeba zadat hodnotu počátečního odvozeného podzemního odtoku, poklesovou konstantu (možné dle manuálu HEC-HMS zadat 0,85) a prahový odtok.

Pro stanovení základního odtoku byla použita metoda BFI (base flow index), což je poměr objemu základního odtoku a odtoku celkového. Tato metoda byla vyvinuta v roce 1980 britským hydrologickým insitutem (the British Insitute of Hydrology). Kombinuje analýzu lokálních minim spolu s křivkou vyprazdňování. Pro výpočet byl použit jednoduchý program,

BaseFlow (Vaculovičová, 2006). Vstupem jsou série dat průtoků v MS Excel a výstupem pak graf a odpovídající série hodnot základních odtoků v téže aplikaci. Tento program je volně ke stažení na <http://www.fi.muni.cz/~xforejt/baseflow>.

4.1.4. Sestavení a export hydrologického modelu povodí

„HMS menu“ obsahuje nástroje pro exportování dat do HEC-HMS. V menu bylo nutné nastavit jednotky SI. „HMS Check data“ slouží jako kontrola topologie, jejíž výsledek je zapsán do textového souboru. Ukázka části textového souboru je na obr. 4.7. Pokud nejsou nalezeny žádné chyby, je možné přejít k vytvoření schematizovaného povodí.

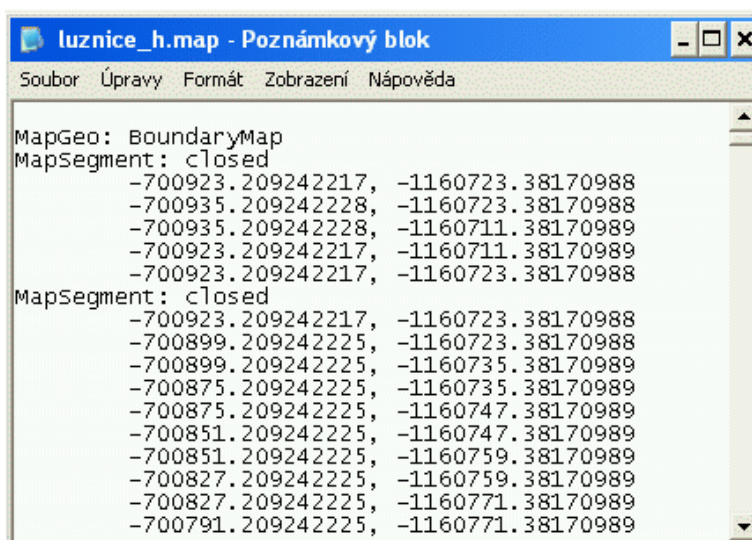
```
CHECKING SUMMARY
*****

Unique names           - no problems.
River containment     - no problems.
Center containment    - no problems.
River connectivity    - no problems.
VIP relevance         - no problems.
```

Obrázek 4.7: Ověření kontroly topologie

Schematizované povodí se vytvořilo procedurou „HMS Schematic“. Tímto nástrojem je sestavena na základě subpovodí, říční sítě, těžiště a závěrového profilu síť se základními prvky jako těžiště povodí, soutoky a segmenty toků. Díky menu „HMS Legend“ je možné vytvořit speciální legendu schématu. Takto schematizované povodí zobrazuje příloha č.6. Následovalo přiřazení prostorových souřadnic pomocí „Add Coordinates“.

Textový soubor luznice_h.map (obr. 4.8) s geometrií říční sítě a rozvodnic připravila funkce „Background Map File“.



Obrázek 4.8: Textový soubor se souřadnicemi říční sítě a rozvodnic

Nezbytným krokem bylo vytvoření dalšího textového souboru schematizovaného hydrologického modelu ve formátu HMS luznice_h.basin.

4.2. ZPRACOVÁNÍ METEOROLOGICKÝCH DAT V HEC-DSSVUE

Pro zpracování dat byly k dispozici tyto podklady:

- denní úhrny srážek ze stanic Haugschlag, Reinberg – Dobersberg, Siebenlinden, Weikertschlag, Pfaffenschlag, Liebenau, Gmünd, Vitis, Pyhrabrück, Karlstift a Altmanns, které byly získány z aplikace e-HYD a denní úhrny srážek ze stanic Byňov, Chlum u Třeboně, Hranice u Nových Hradů, Kunžak, Nová Bystřice, Pohorská Ves, Suchdol nad Lužnicí poskytnuté ČHMÚ,
- hodinové srážkové úhrny ze stanic Pyhrabrück, Altmanns, Gmünd, Vitis a Karlstift (Niederschlagshydrologie und Lawinenwarndienst NÖ) a ze stanice Byňov (ČHMÚ),
- průměrné denní průtoky z limnigrafické stanice Pilař (ČHMÚ) a ze stanic Oberlainsitz, Hoheneich, Amaliendorf a Ehrendorf (e-HYD),
- hodinové průtoky ze stanice Pilař, Hoheneich a Ehrendorf (ČHMÚ).

Řady byly poskytnuty pro různá časová období, při jejich zpracování a následné simulaci byla vybrána období letní povodňové události z roku 1991 a 2002.

4.2.1. *Zpracování srážkových dat*

Na ověření homogenity srážkových dat byla použita metoda podvojných součtových řad (DMA – Double Mass Analysis), kdy byly porovnány vždy dvě sousední stanice, jedna byla určena jako sledovaná a druhá jako kontrolní. Aby se předešlo výskytu nahodilých chyb, byla data graficky zobrazena.

Cílem zpracování srážkových dat bylo stanovení průměrné srážky na celé povodí a na jednotlivá subpovodí ve vhodném časovém kroku. Jako vhodný časový krok byla určena jedna hodina. Data ze stanic, která tomuto kroku neodpovídala, se musela převést na odpovídající časový krok.

Hodinový krok je pro epizodní simulace nezbytný, jelikož odezva povodí na příčinnou srážku je v řádech hodin. Údaje o hodinových úhrnech jsou k dispozici pouze ze šesti stanic (zmíněných výše v úvodu kapitoly 4.2), ostatní stanice bylo nutné přepočítat denní krok na hodinový. Pro výpočet nebyly použity všechny stanice, které byly k dispozici. Pro rozdělení

povodí pomocí Thiessenových polygonů postačilo použít 13 stanic, takže se přepočítaly srážky u sedmi stanic. Pro účely simulace byl předpokládán stejný průběh srážek během dne. Na data ze stanic, které měřily v denních intervalech, byly aplikovány charakteristiky rozložení hodinových srážek z okolních stanic. A to tak, že se spočítá podíl mezi srážkou v dané hodině a celkovým denním úhrnem a ten se vynásobil denním úhrnem srážky na příslušné nepozorované stanici. Ke stanici, kde se data musela odvozovat, byla přiřazena vždy stanice nejbližší. Výsledkem byla hodinová srážka na všech potřebných stanicích.

Průměrná srážka na povodí a na jednotlivá subpovodí byla stanovena metodou Thiessenových polygonů (obr. 4.9). Ta je počítána jako vážený průměr srážkových úhrnů na jednotlivých stanicích, kde váhou je plocha odpovídajícího Thiessenova polygonu.

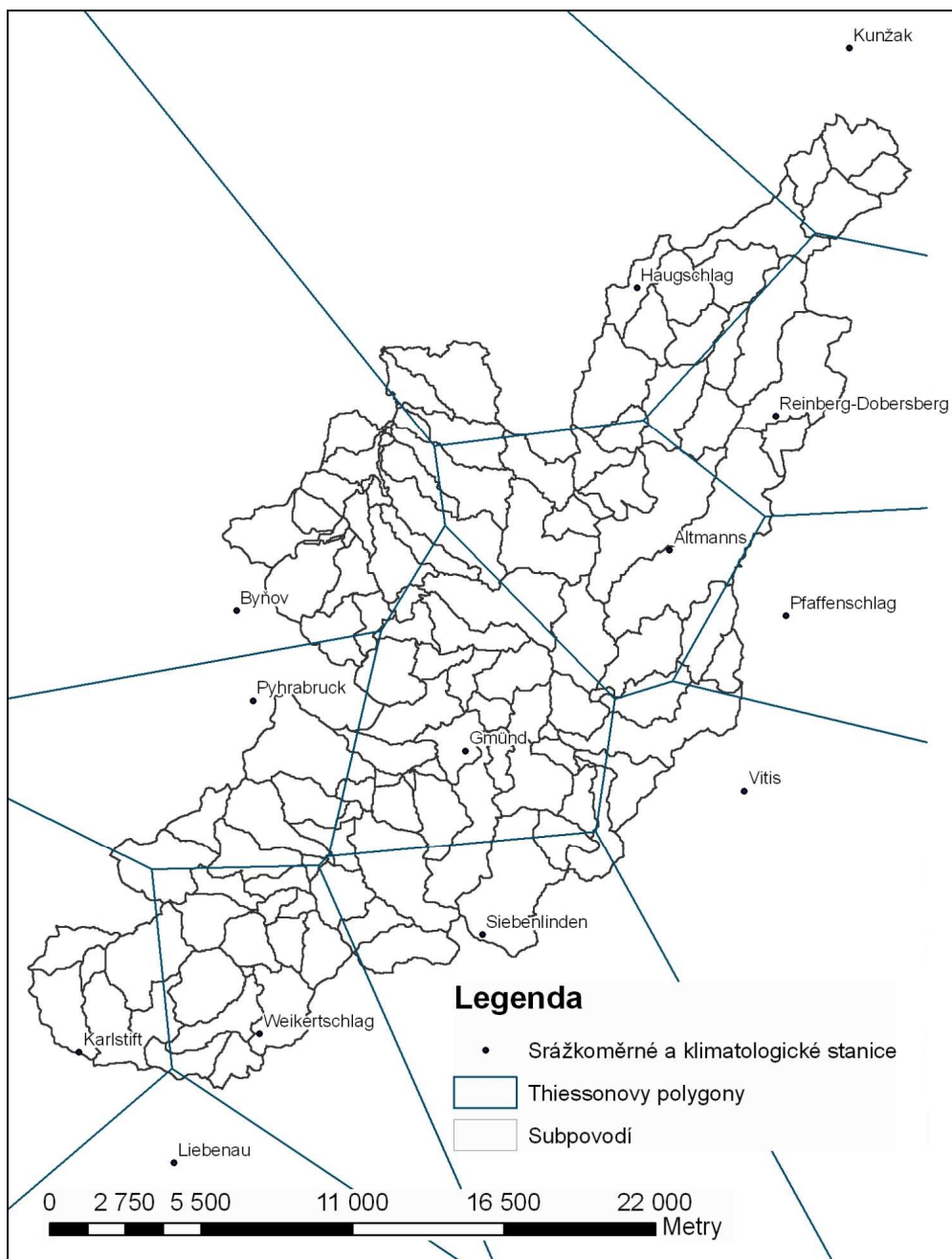
Do meteorologického modelu programu HEC-HMS je možné exportovat meteorologická data uložená v databázi HEC-DSS. Vytvořená srážková data ve formátu *.xls s hodinovým krokem byla vložena do databázového souboru pomocí funkce „Manual Data Entry“. Každému subpovodí byl přiřazen vlastní soubor.

4.2.2. *Zpracování dat o průtocích*

Řady průtoků jsou důležité zejména jako srovnávací soubor při kalibraci modelu. Jako optimální se jevílo použití hodinových průtoků.

Pro zpracování dat o průtocích byly k dispozici denní průtoky ze stanice Pilař z let 1965 až 2002 a hodinové průtoky pro povodňové vlny z letních měsíců let 2002, 1991, 1987, 1975 a 1965.

Data o hodinových průtocích z let 2002 a 1991 byly stejným způsobem jako srážky vložena do databáze HEC-DSS.



Obrázek 4.9: Rozdělení povodí Thiessenovými polygony

(Zdroj dat: DIBAVOD, e-HYD, ČHMÚ)

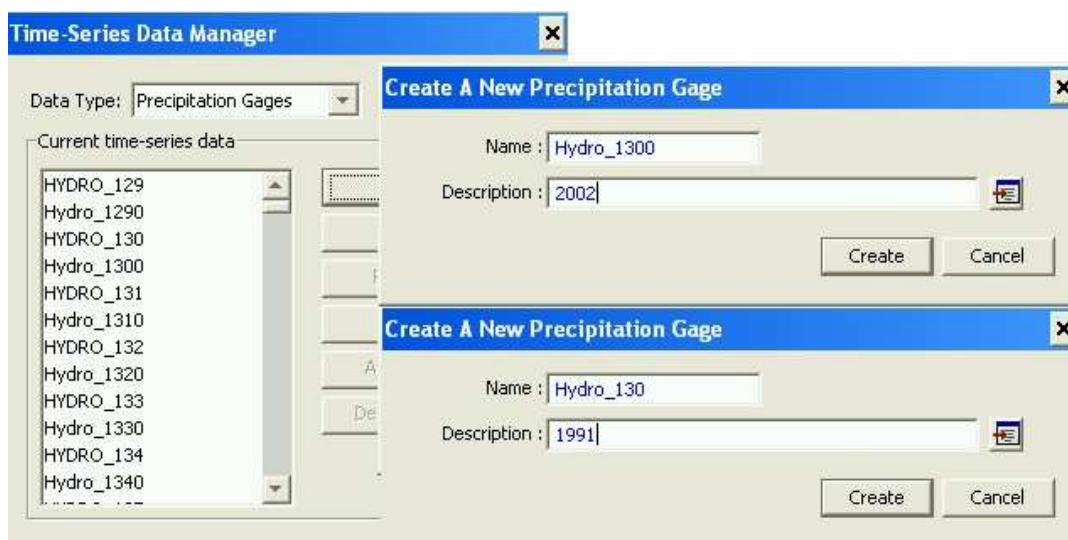
5. PRŮBĚH A VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ

Tato kapitola se věnuje vlastnímu průběhu modelování. Popisuje sestavení modelu, nastavení vstupních podmínek, kalibraci a validaci modelu, tvorbu hypotetických scénářů a interpretaci výsledků. Období pro kalibraci modelu byla simulace letní události z roku 1991 a jako validační období byla vybrána povodeň ze srpna 2002.

5.1. SESTAVENÍ MODELU

První krok byl import vytvořených dat o předzpracovaném modelu luznice_h.basin a luznice_h.map s geometrií říční sítě a subpovodí. HMS obsahuje čtyři komponenty: Basin model, Meteorologic model, Data Time Series a Control Specification.

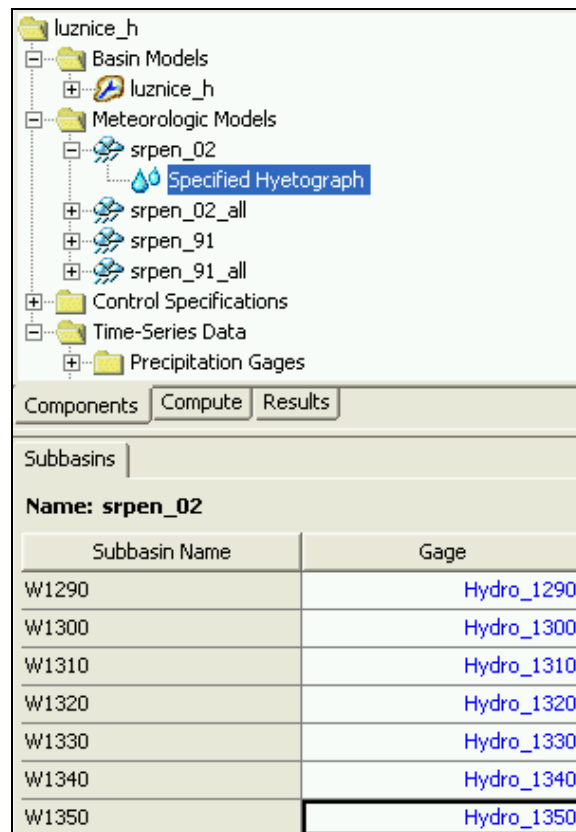
Pomocí „Time-Series Data Manager“ následovalo zadání časových řad do modelu pro každé subpovodí. Jelikož je model sestavován pro dva roky – rok 1991 pro kalibraci a rok 2002 pro validaci, vytvořili se pro každé subpovodí řady dvě.



Obrázek 5.1: Vytvoření časových řad

Obdobným způsobem se také vytvořily časové řady průtoků obou událostí. Dále následoval import srážkových a průtokových dat uložených ve formátu *.dss. V nastavení jednotlivých „Gages“ (měřících stanic) lze pomocí položky „Data Source“ vybrat soubor, kde se data nachází a z něj pak vybrat potřebnou časovou řadu.

Obdobným způsobem byl vytvořen (pomocí menu „Components“) meteorologický model pro událost z roku 1991 a událost z roku 2002. Pro zpracování srážek byla vybrána metoda „Specified Hyetograph“. Evapotranspirace byla zanedbána. Dále se propojil meteorologický model s modelem povodí a nyní bylo možné navázat časové řady na jednotlivá subpovodí (obr. 5.2).



Obrázek 5.2: Přiřazení časových řad subpovodím

Důležitý byl také import průtoků pro konkrétní simulaci. Jak již bylo řečeno jsou průtoky důležité pro kalibraci modelu.

Metody, které byly pro výpočet odtoku použity, jsou přednastavené již z HEC-GeoHMS, je možné je dále samozřejmě měnit přímo v programu.

5.2. ZADÁNÍ KONTROLNÍCH SPECIFIKACÍ

Finální část přípravy modelu zahrnovala založení přesného časového období a výpočetního kroku modelu. Nastavení proběhlo pomocí modulu „Control Specification“, který se využívá k simulaci jednotlivých srážkových epizod. Pro modelování srážko-odtokových procesů bylo vybráno období od 31. července do 13.8. 1991, kdy například 1.8. 1991 dosáhla v srážkoměrné stanici Gmünd hodnota 24 hodinového úhrnu srážek 73 mm (odpovídá dešti s pravděpodobností opakování jednou za 20 let) a na stanici Pohorská Ves 51,5 mm. Program HEC-HMS dovoluje modelovat odtoky i pro delší časové intervaly, ale podle manuálu se nedoporučuje modelovat odtoky pro delší časový interval než je 14 dní, protože se mění vláhové podmínky půdy a tím je ovlivněna hodnota CN–křivek a dalších transformačních parametrů srážek na odtok.

Jako validační období bylo vybráno období od 5. až 18. srpna roku 2002.

5.3. KALIBRACE A VALIDACE SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU

Pro většinu modelů je nevyhnutelnou a zároveň nejkomplikovanější částí proces kalibrace. Bedient a Huber (1988) definují kalibraci modelu jako proces, kdy se na základě známých údajů stanovují parametry modelu. Jejím cílem je najít konkrétní hodnoty parametrů, které vedou k nejlepší shodě mezi modelovanou a měřenou veličinou. Provádí se na historických událostech, kde je možné pravdivost výpočtu ověřit.

Kalibrace má pro přesnost modelu zásadní význam, jelikož je se spolehlivostí hydrologického modelu těsně spojena. Pokud jsou totiž ponechány všechny vstupní veličiny nezměněny, bývá výsledný hydrogram nepřesný. Kalibračními postupy lze docílit poměrně dobré shody se skutečnou odtokovou křivkou. Na druhou stranu je nekalibrovaná simulace dobrým prověřením zadaných vstupních parametrů.

Za každou kalibrací modelu by měla následovat i jeho validace. Podle Bedienta a Hubera (1988) je to proces, kdy se odvozené parametry testují na jiné časové řadě, než pro kterou byly vygenerovány. Kromě pojmu validace modelu je možné se v literatuře setkat i s termínem verifikace modelu. Verifikovat (lat. veritas, pravda) znamená ověřit pravdu, což je něco, co je z hlediska vědy a modelování obzvláště těžko dosažitelné (Seibert, 1999).

Je možné testovat chování hydrologického modelu: kalibrovat na jednom časovém období, validovat na jiném, tzv. split-sample test, kalibrovat na období s určitými poměry (klimatickými, využití krajiny), validovat na období s poměry odlišnými, tzv. differential split-sample test (Klemeš, 1986).

V programu HEC-HMS je možné pomocí funkce „Optimization Trial“ optimalizovat vstupní parametry, které ovlivňují průběh výsledného hydrogramu – například hodnotu CN-křivek, dobu koncentrace T_c , retenční koeficient R_c , počáteční ztrátu I_a apod. Pro optimalizaci parametrů je možné si vybrat z několika výpočetních algoritmů, které porovnávají naměřený a vymodelovaný hydrogram. Jsou to metody minimalizace čtverců odchylek, minimalizace rozdílů vrcholů hydrogramů atd.

5.3.1. Metody hodnocení úspěšnosti modelování

Úspěšnost modelování byla hodnocena pomocí standardních kritérií užívaných v hydrologii pro hodnocení hydrologických modelů a také pomocí vizuální interpretace grafických příloh.

Jako kritéria pro posouzení hydrologického modelu byly stanoveny tyto hodnoty:

- maximální hodnota ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), datum výskytu maxima,
- kritérium Nash-Sutcliffe:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{skut_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{skut_i} - \bar{Q}_{skut_i})^2}$$

kde:

Q_{skut_i} je i-tá pořadnice skutečného průtoku

Q_{sim_i} je i-tá pořadnice vypočítaného průtoku

\bar{Q}_{skut_i} průměrný skutečný průtok.

Při:

$E = 1$ absolutní shoda

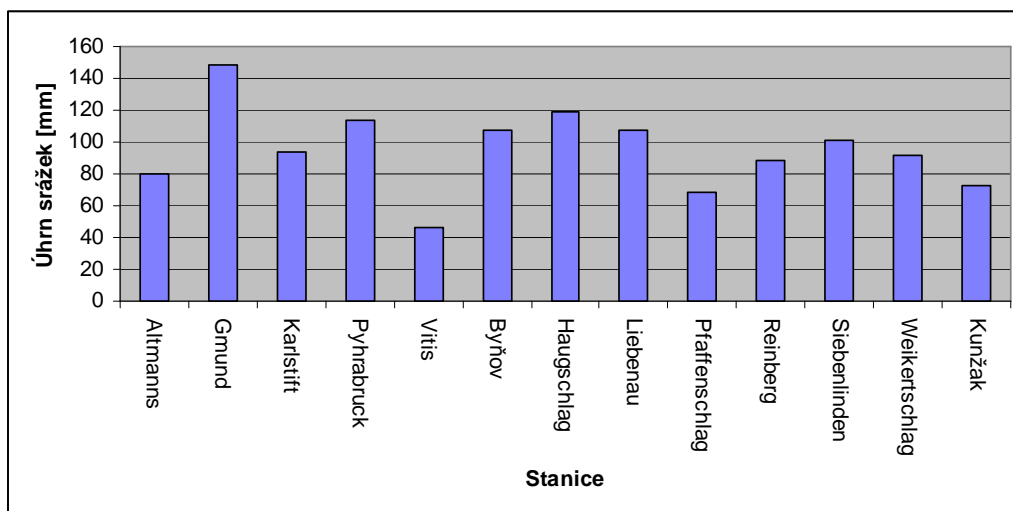
$E > 0,5$ uspokojivá shoda

- procentní objemová chyba VE popisuje rozdíl mezi objemem pozorované a modelované vlny (Daňhelka a kol., 2003) :

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{skut_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^N Q_{skut_i}} \cdot 100$$

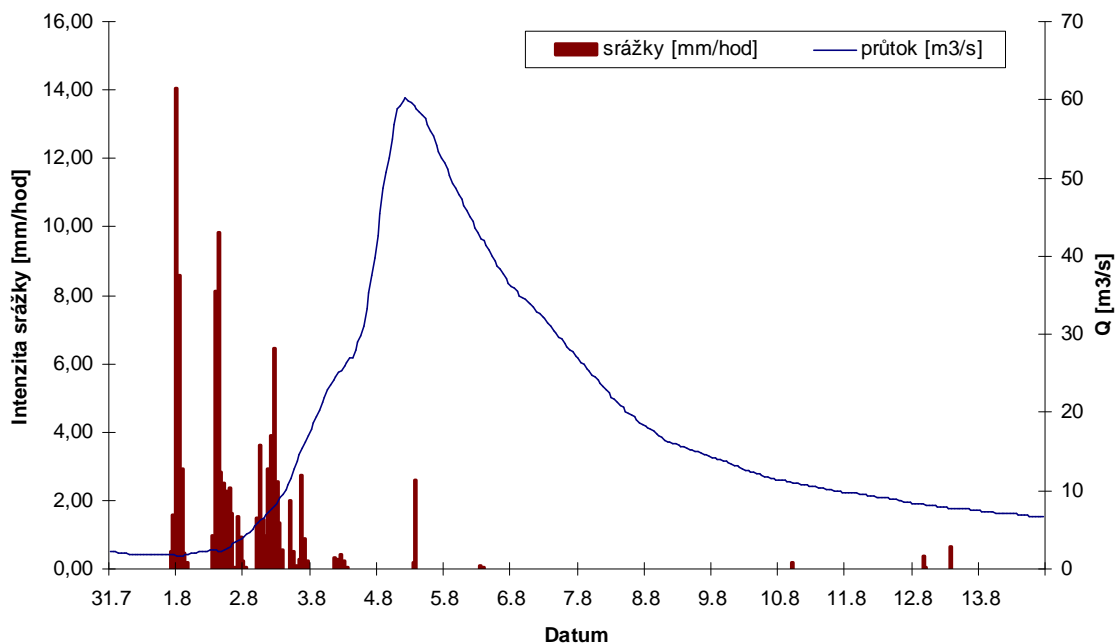
5.3.2. Kalibrace události v srpnu 1991

Tato povodňová událost proběhla na počátku srpna roku 1991. Nevyznačuje se nijak výraznou hodnotou kulminačního průtoku, je však typickou povodní způsobenou silným regionálním letním deštěm. Tento déšť trval od 31.7. do 4.8. 1991. Úhrny srážek na jednotlivých stanicích na povodí zobrazuje graf 5.1. Kulminační průtok na limnigrafu Pilař byl dosažen 4.8. 1991 v 11:00 a měl hodnotu 60,3 m³/s. Průběh povodňové vlny a příčné srážky na celé povodí o hodinové intenzitě zobrazuje graf 5.2.



Graf 5.1: Úhrny srážek v období 31. 7. - 4. 8. 1991 v jednotlivých stanicích

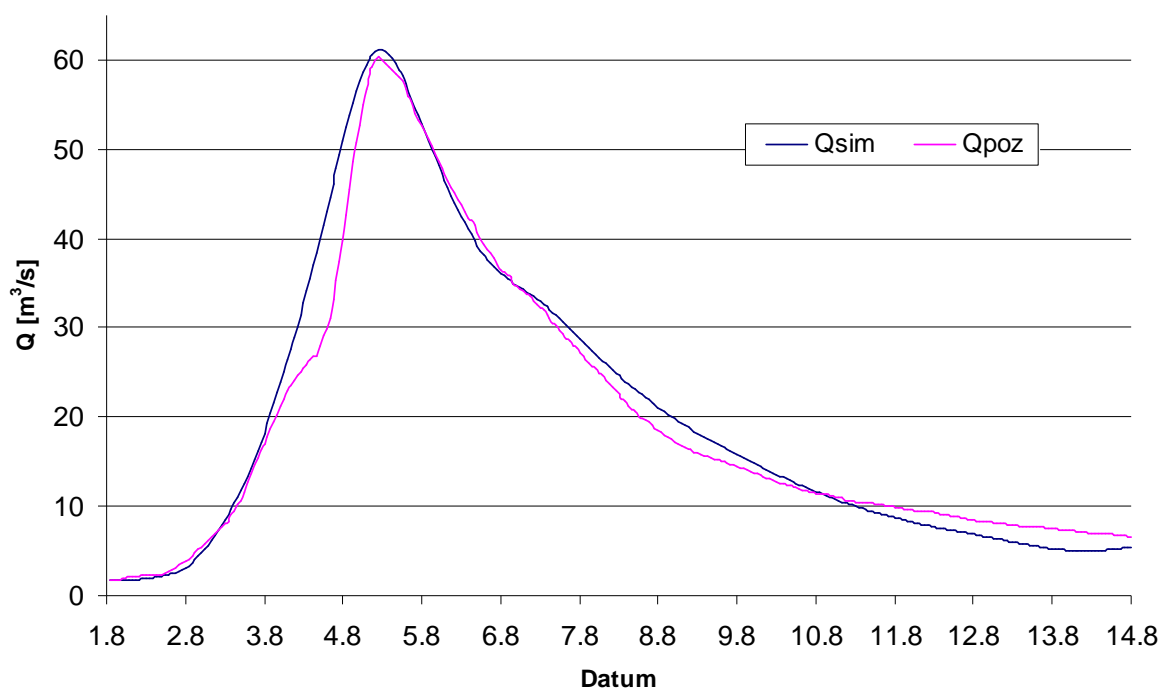
(Zdroj dat: e-HYD, ČHMÚ)



Graf 5.2: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 31.7. do 13.8. 1991

(Zdroj dat: e-HYD, ČHMÚ)

Pro první běh simulace byla uvažována počáteční sestava všech parametrů, které byly odvozeny na základě fyzicko-geografických parametrů povodí s krajinným pokryvem odpovídajícím roku 1990. Při automatické optimalizaci parametrů bylo jako kritérium optimalizace zvolena minimalizace rozdílů vrcholů hydrogramů. Pro optimalizaci byly vybrány parametry CN a Muskingum-Cunge, které jsou zatíženy největší nepřesností. Automatickou optimalizací došlo ke snížení parametrů CN. Podle těchto nových čísel CN-křivek byly přepočítány parametry Ia a Tc. Dále byly ručně dokalibrovány parametry recesní konstanta a prahová hodnota na základě několika simulací. Recesní konstanta byla nastavena na 0,75 a prahová hodnota nastavena na 0,4. Na následujícím grafu 5.3 je znázorněn výsledek simulace a pozorovaný hydrogram v závěrovém profilu Pilař.

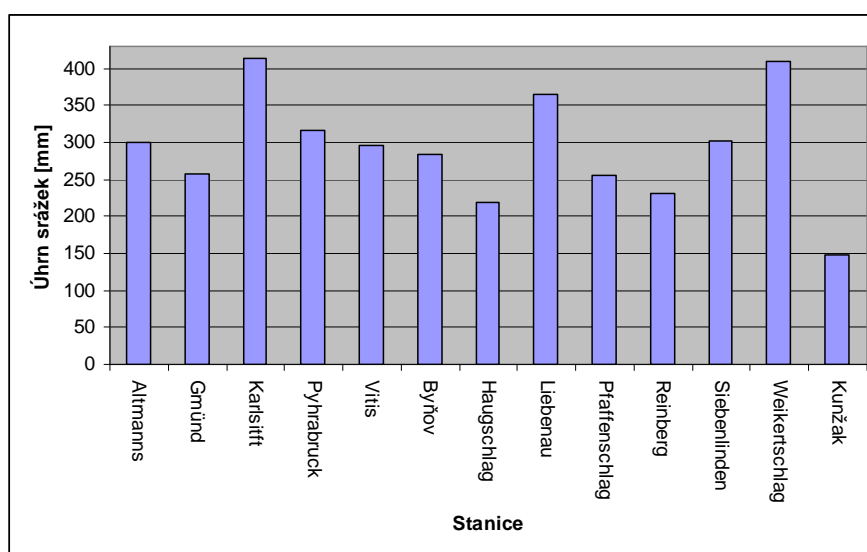


Graf 5.3: Simulovaný a pozorovaný hydrogram v závěrovém profilu Pilař v srpnu 1991

Z výsledků vyplývá poměrně dobrá shoda simulované a skutečné odtokové křivky. Nash-Sutcliffův koeficient dosáhl hodnoty 0,96. Procentní objemová chyba činí 2,28 %, což znamená, že objem simulované vlny byl větší než odpovídalo skutečnosti. Rozdíl mezi simulovaným a skutečným kulminačním průtokem činí 0,8 m³/s. Maxima dosáhly obě povodňové vlny shodně v 11 hodin 4.8. 1991. Získané hodnoty optimalizačních kritérií ukazují, že kalibrace srážko-odtokového modelu byla úspěšná.

5.3.3. Validace modelu na události ze srpna 2002

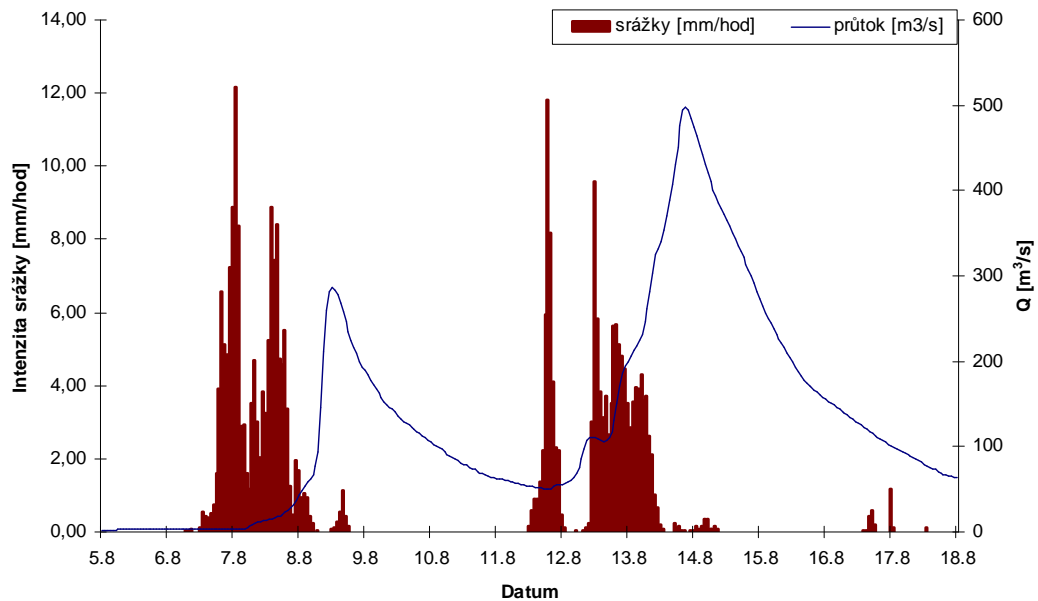
Tato povodňová událost byla způsobena postupem dvou výrazných tlakových níží v krátkém časovém odstupu za sebou. První vlna přišla 6.-7. srpna a nejvyšší srážkové úhrny za tyto dva dny byly naměřeny na stanici Weikertschlag, kde spadlo 247 mm srážek. Přes 200 mm bylo naměřeno ještě na stanici Karlstift a to 231 mm. Druhá vlna srážek byla v této části území 11.-12. srpna 2002, v některých částech povodí trvala až do 13. srpna. 11. srpna dosáhly srážky nejvyšších hodnot na stanici Altmanns (67,4 mm) a Vitis (64,7 mm) a následující den přesáhly úhrny srážek 100 mm na stanicích Karlstift (124,8), Liebenau (117,2) a Altmanns (108,1). Celkové úhrny srážek na jednotlivých stanicích za období 5.-13.8 2002 zobrazuje graf 5.4.



Graf 5.4: Úhrny srážek v období 5. 8. - 13. 8. 2002 v jednotlivých stanicích

(Zdroj dat: e-HYD, ČHMÚ)

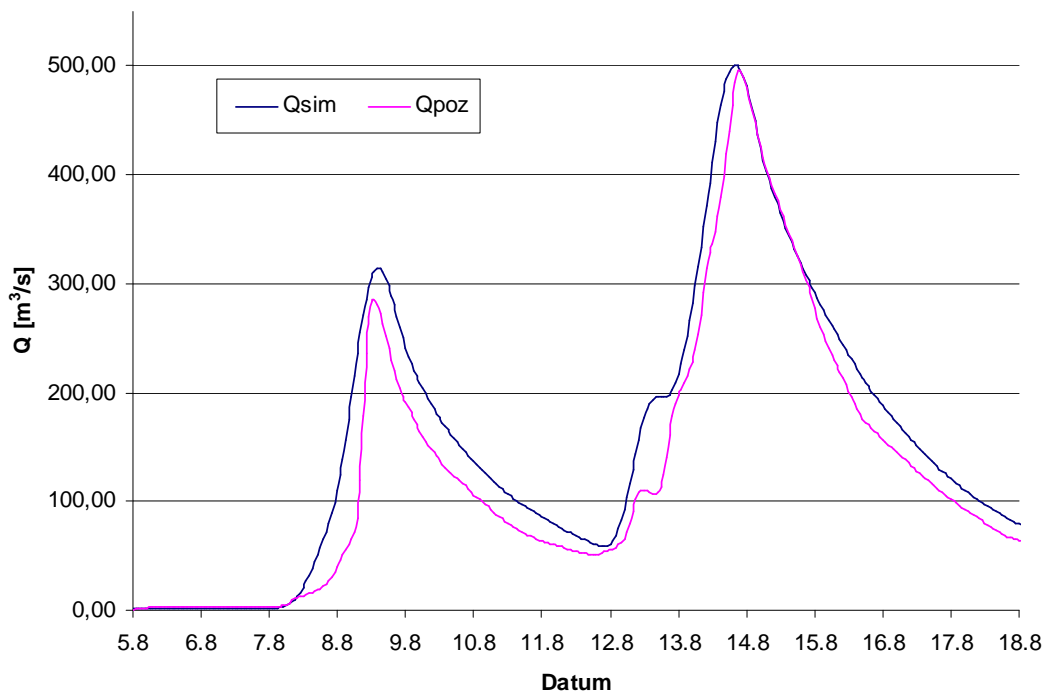
První povodňová vlna dosáhla kulminace 8.8. 2002 ve 12:00 hodin a tento kulminační průtok měl na limnigrafu Pilař hodnotu 285 m³/s. V důsledku velmi vysokého nasycení povodí po předcházející povodni nastal těsně po nástupu druhé vlny srážek 11.8. opět velmi rychlý vzestup hladiny. V porovnání s první vlnou byl kulminační stav během druhé vlny značně vyšší. Kulminační průtok druhé vlny na limnigrafu Pilař byl dosažen 13.8. 2002 v 19:00 a měl hodnotu 498 m³/s. Průběh povodňové vlny a příčinné srážky na celé povodí o hodinové intenzitě zobrazuje graf 5.5.



Graf 5.5: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 5.8. do 18.8. 2002

(Zdroj dat: e-HYD, ČHMÚ)

Ověřování kalibrovaných parametrů daného modelu na nezávislé řadě vstupních údajů proběhlo na období od 5.5. do 18.5. Jednalo se o tzv. differential split-sample test, jelikož v tomto období byl na území horní Lužnice jiný vegetační pokryv, tudíž jiné poměry. Změnily se tedy vstupní parametry, tak aby odpovídaly krajinnému pokryvu v roce 2000 a bylo využito optimalizace CN-křivek z předešlé kalibrace.



Graf 5.6: Simulovaný a pozorovaný hydrogram v závěrovém profilu Pilař v srpnu 2002

Graf 5.6 dokumentuje poměrně dobrou vizuální shodu tvaru simulované a skutečné odtokové křivky. Nash-Sutcliffův koeficient má hodnotu 0,91; procentní objemová chyba činí 9,8 %. Celkový objem simulované vlny byl větší než odpovídalo skutečnosti.

Rozdíl mezi prvním simulovaným a skutečným kulminačním průtokem činí 28,6 m³/s, což odpovídá 10 %. Maxima dosáhla simulovaná povodňová vlna ve 14 hodin 8.8. 2002, kulminace proběhla tedy až o dvě hodiny později než ve skutečnosti.

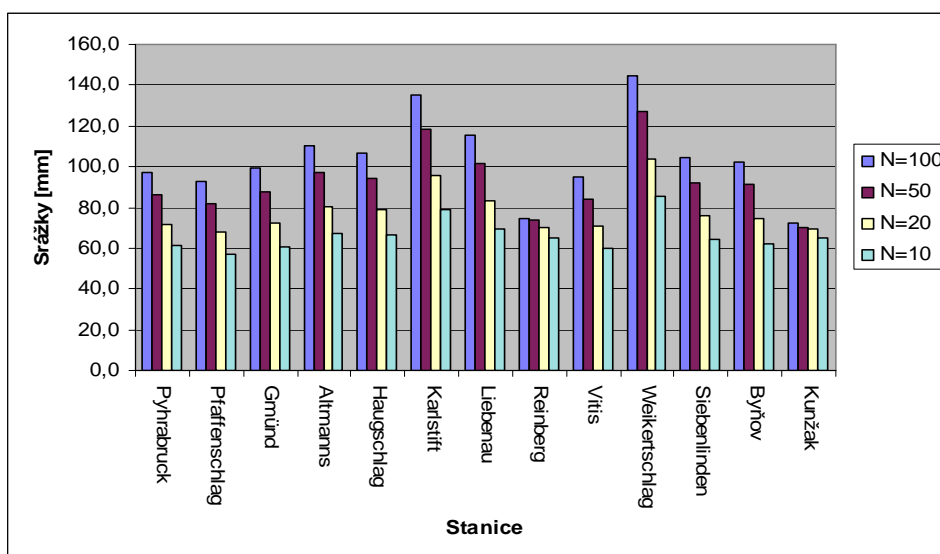
Druhá simulovaná vlna kulminovala 13.8. 2002 při 501,1 m³/s o hodinu dříve, tedy ve 20:00, než vlna pozorovaná. Kulminační průtok této simulované vlny byl o 1 % vyšší než průtok vlny pozorované.

Při druhé vlně došlo k protržení pískovny Cep a voda obtékala stanici Pilař mimo koryto řeky. Ze záznamu stanice Pilař nebylo možné spolehlivě odhadnout průběh povodně, a proto průtoková vlny byla nakonec zkonstruovaná odborným odhadem. Je tedy zatížena větší nejistotou. Kulminační průtok byl ovšem ověřován hydraulickým výpočtem z maximální hladiny a rozsahu zatopení, a proto by se měl blížit realitě (Povodí Vltavy, 2003) .

5.4. SCÉNÁŘOVÉ MODELOVÁNÍ

Pro hodnocení vlivu změny využití půdy na S-O procesy bylo vybráno scénářové modelování, v kterém byly využity různé vegetační pokryvy půdy na ploše povodí. První scénář představuje vegetační pokryv odpovídající roku 1990, druhý scénář odpovídá pokryvu v roce 2000. V dalším scénáři byly převedeny kategorie orné půdy a mozaika polí luk a trvalých plodin na trvalé travní porosty a čtvrtý scénář představuje zalesnění všech kategorií využití půdy kromě vodních ploch, intravilánu a komunikací. V případě trvalých travních porostů došlo ke zvýšení plochy z 6,6 % na 38 %. V případě lesních porostů došlo k navýšení plochy z 51,9 % na 96 %. Scénář s navýšením plochy lesa je nereálný v plné šíři, ale byl zahrnut jako extrémní varianta s nejvyšším retenčním účinkem.

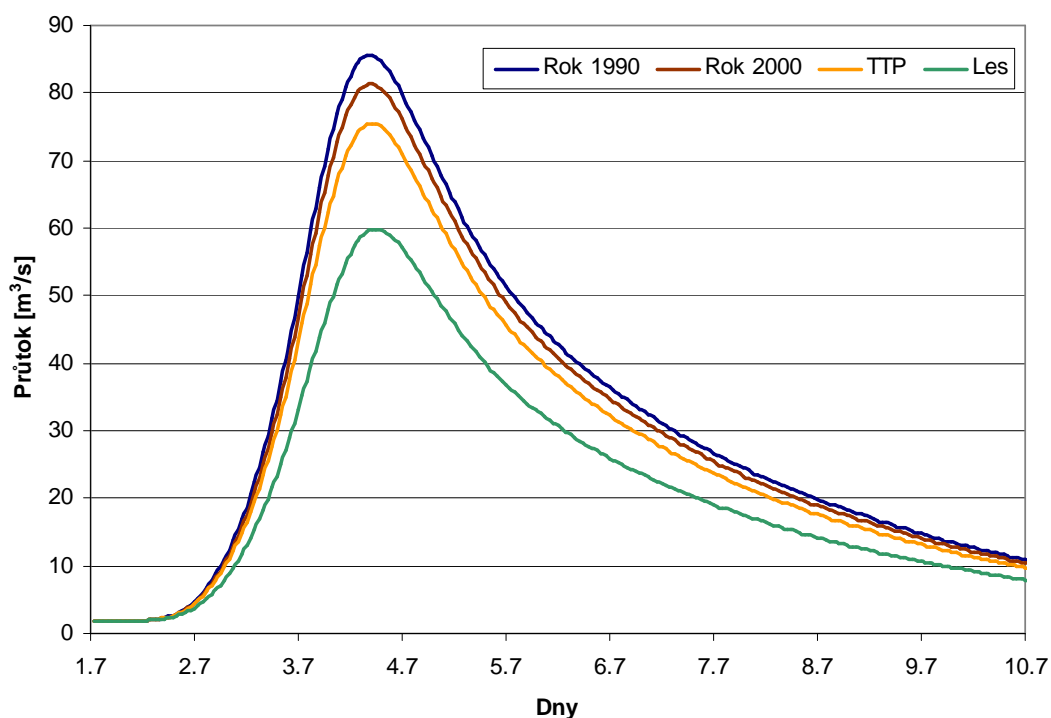
Všechny tyto scénáře proběhly pro čtyři srážkové události. První z nich byla návrhová srážka s dobou opakování 10 let a další s dobami opakování 20 let, 50 let a 100 let. Tyto návrhové srážky s trváním jeden den byly stanoveny za předpokladu logaritmicko normálního rozdělení maximálních denních úhrnů srážek z roční řady z let 1981 - 2004 a jejich hodnoty pro jednotlivé stanice zobrazuje graf 5.7. Výpočetní krok byl ve všech případech jedna hodina a při simulacích byl pro rozdělení srážek do 24 hodin použit hyetogram ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku. Evaporace a transpirace nebyly uvažovány. Pro porovnání výsledků modelování byly využity hydrogramy jednotlivých scénářů a sumární tabulky odtoků v závěrovém profilu a v subpovodích. Hydrogram sloužil pro vizuální porovnávání časového rozložení průtoků v závěrovém profilu. Sumární tabulky byly použity pro porovnání času kulminace, kulminačního průtoku a celkového množství vody, která otekla.



Graf 5.7: Návrhové srážky s trváním jeden den na jednotlivých stanicích

(Zdroj dat: ČHMÚ, vlastní výpočet)

5.4.1. Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 100 let



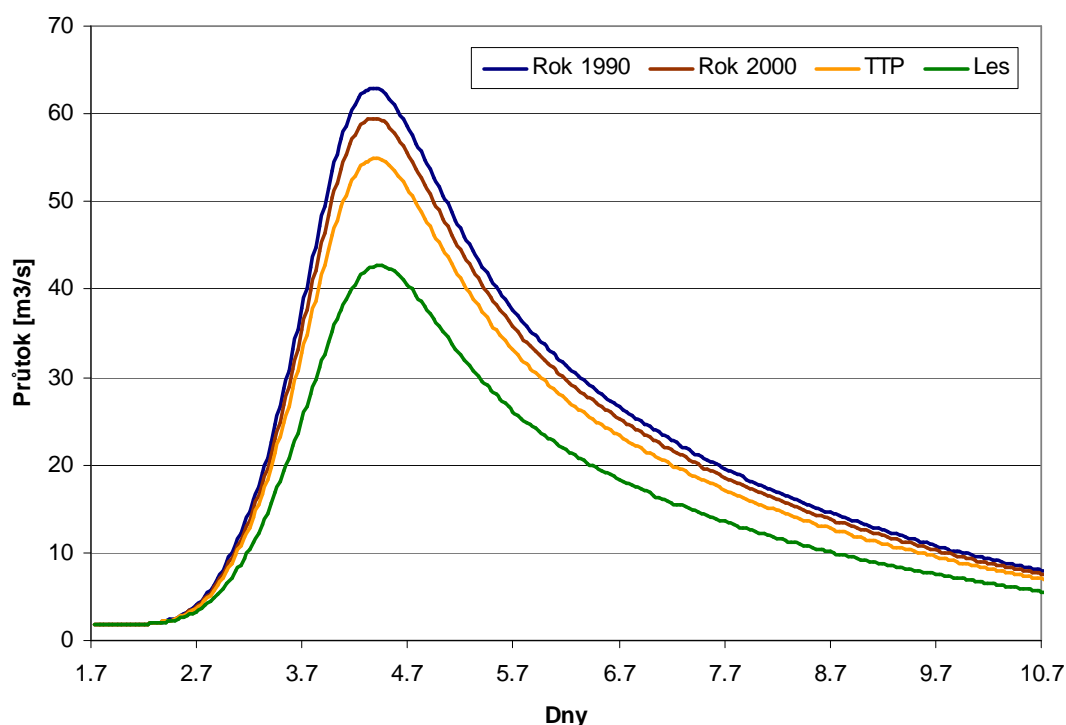
Graf 5.8: Simulované křivky průtoků v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 100 let

Při úhrnu srážek s průměrnou dobou opakování sto let mají hydrogramy průtoků jednotlivých scénářů v závěrovém profilu Pilař velmi podobný průběh. Křivky průtoků zobrazuje graf 5.8. Bližší charakteristiku rozdílů mezi jednotlivými hydrogramy lze zjistit z tabulky 5.1. Snížení kulminačního průtoků povodňové vlny dosáhlo při scénáři pro rok 2000 (oproti roku 1990) 4,2 m³/s, což je snížení o 4,9 %. Zpoždění povodňové vlny nenastalo. Objem povodňové vlny se snížil také o 4,9 %. Při scénáři zatravnění části povodí došlo k snížení kulminačního průtoků oproti roku 1990 o 11,8 % a objem povodňové vlny se snížil o 11,5 %. Velký rozdíl v maximálním průtoků je patrný zejména ve scénáři s lesním porostem, kde došlo dokonce ke snížení o 30 %. Nastalo také zpoždění kulminačního průtoků, a to o jednu hodinu.

Tabulka 5.1: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař

Scénář	Čas kulminace [3.7.]	Q _{max} [m ³ /s]	Q _{celk} [10 ³ m ³]
Rok 1990	17:00	85,5	25258,7
Rok 2000	17:00	81,3	24026,3
TTP	17:00	75,4	22354,1
Les	18:00	59,8	17878,3

5.4.2. Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 50 let



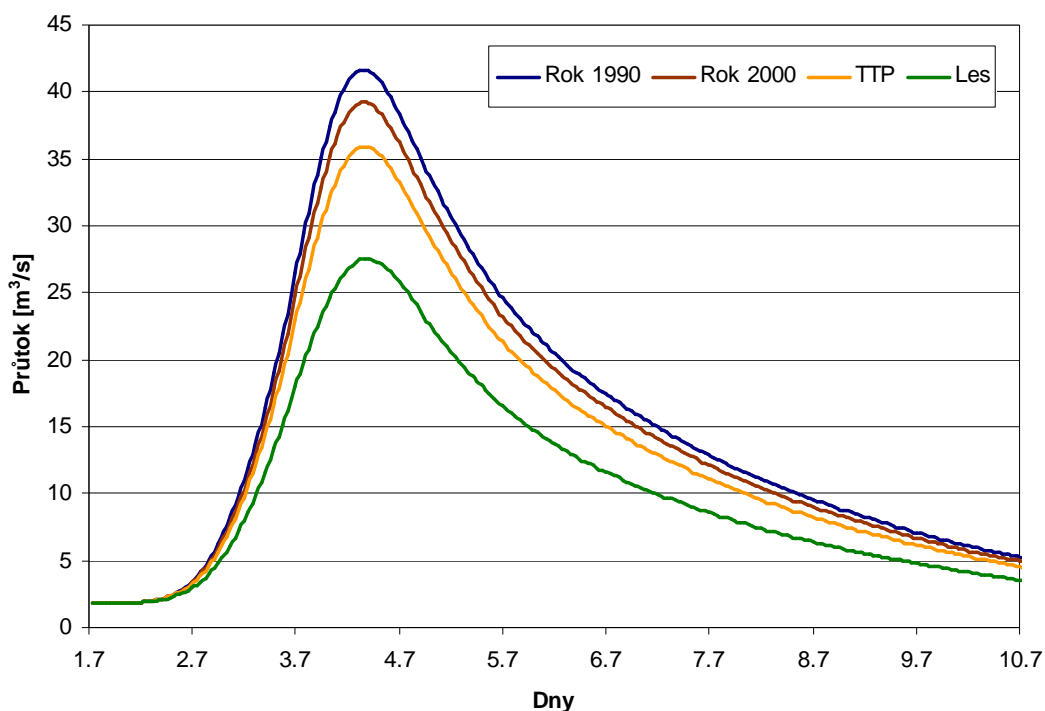
Graf 5.9: Simulované křivky průtoku v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 50 let

Z hydrogramů průtoků v závěrovém profilu Pilař, které zobrazuje graf 5.9, je patrné, že tvar povodňových vln pro jednotlivé scénáře je velmi podobný. Bližší charakteristiku rozdílů mezi jednotlivými hydrogramy lze zjistit z tabulky 5.2. Snížení kulminačního průtoku povodňové vlny dosáhlo při scénáři pro rok 2000 (oproti roku 1990) $3,4 \text{ m}^3/\text{s}$, což je snížení o 5,4 %. Zpoždění povodňové vlny nenastalo. Objem povodňové vlny se snížil o 5,3 %. Při scénáři zatravnění části povodí došlo k snížení kulminačního průtoku oproti roku 1990 o 12,7 % a objem povodňové vlny se snížil o 12,3 %. Povodňová vlna se zpozdila o jednu hodinu. Velký rozdíl v maximálním průtoku je patrný zejména ve scénáři s lesním porostem, kde došlo dokonce ke snížení o 32 %. Nastalo také zpoždění kulminačního průtoku, a to o dvě hodiny.

Tabulka 5.2: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař

Scénář	Čas kulminace [3.7.]	Q_{\max} [m^3/s]	Q_{celk} [10^3 m^3]
Rok 1990	16:00	62,9	18692,1
Rok 2000	16:00	59,5	17704,9
TTP	17:00	54,9	16381,4
Les	18:00	42,7	12906,1

5.4.3. Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 20 let



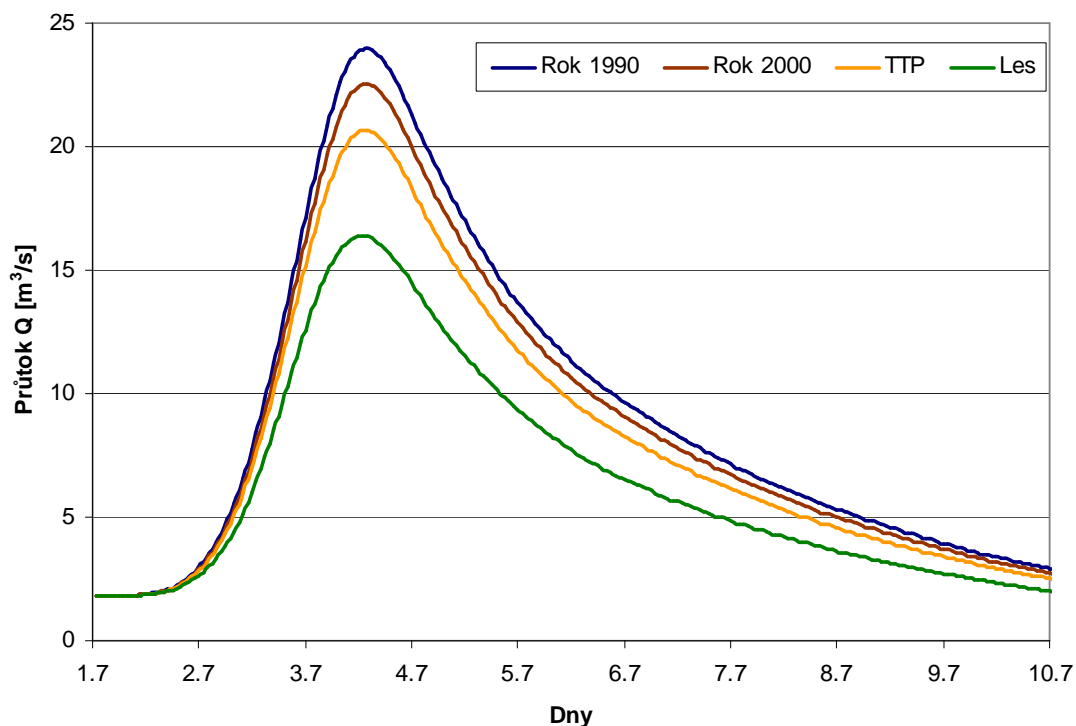
Graf 5.10: Simulované křivky průtoku v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 20 let

I při úhrnu srážek s průměrnou dobo opakování dvacet let mají hydrogramy průtoků jednotlivých scénářů v závěrovém profilu Pilař velmi podobný průběh (graf 5.10). Bližší charakteristiku rozdílů mezi jednotlivými hydrogramy lze zjistit z tabulky 5.3. Snížení kulminačního průtoku povodňové vlny dosáhlo při scénáři pro rok 2000 (oproti roku 1990) $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, což je snížení o 6 %. Zpoždění povodňové vlny nenastalo. Objem povodňové vlny se snížil také o 5,7 %. Při scénáři zatravnění části povodí došlo k snížení kulminačního průtoku oproti roku 1990 o 13,9 % a objem povodňové vlny se snížil o 13,3 %. Velký rozdíl v maximálním průtoku je patrný zejména ve scénáři s lesním porostem, kde došlo dokonce ke snížení o 34 %. Zpoždění povodňové vlny nenastalo.

Tabulka 5.3: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař

Scénář	Čas kulminace [3.7.]	Q_{\max} [m³/s]	Q_{celk} [10^3 m3]
Rok 1990	16:00	41,7	12482,2
Rok 2000	16:00	39,2	11768,2
TTP	16:00	35,9	10827,6
Les	16:00	27,5	8449,8

5.4.4. Výsledky modelování při úhrnu srážek s dobou opakování 10 let



Graf 5.11: Simulované křivky průtoku v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 10 let

Z hydrogramů průtoků v závěrovém profilu Pilař, které zobrazuje graf 5.11 lze usoudit, že průběh jednotlivých scénářů má velmi podobný tvar. Bližší charakteristiku rozdílů mezi jednotlivými hydrogramy lze zjistit z tabulky 5.4. Snížení kulminačního průtoku povodňové vlny dosáhlo při scénáři pro rok 2000 (oproti roku 1990) $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, což je snížení o 6,25 %. Zpoždění povodňové vlny nenastalo. Objem povodňové vlny se snížil o 5,8 %. Při scénáři zatravnění části povodí došlo k snížení kulminačního průtoku oproti roku 1990 o 14,2 % a objem povodňové vlny se snížil o 12,5 %. Velký rozdíl v maximálním průtoku je patrný zejména ve scénáři s lesním porostem, kde došlo dokonce ke snížení o 32 %. Zpoždění povodňové vlny nenastalo.

Tabulka 5.4: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař

Scénář	Čas kulminace [3.7.]	Q_{\max} [m^3/s]	Q_{celk} [10^3 m^3]
Rok 1990	14:00	24	7257,3
Rok 2000	14:00	22,5	6837,2
TTP	14:00	20,6	6760
Les	14:00	16,4	5081,7

6. DISKUZE

Obecně platí, že použití modelu na konkrétní účel nebo povodí závisí na dostupnosti vstupních údajů, jejich množství, kvalitě a na charakteru požadovaných výstupů.

Největší problém v případě modelu HEC-HMS představuje fakt, že téměř 71 % plochy povodí horní Lužnice leží na území Rakouska a tudíž bylo obtížné získat data ve stejném měřítku a kvalitě pro obě části povodí. Navíc podle doporučení Daňhelky (2003) by z praktických důvodů plocha zkoumaného povodí neměla překročit 500 km². Povodí horní Lužnice má téměř 2x větší plochu než je toto doporučení, tudíž zpracování vstupních dat bylo velmi časově náročné.

Spolehlivost modelování zásadně ovlivňuje existence časově a prostorově přesných údajů o srážkách. Informace o těchto datech se získávají především ze sítě pozemních pozorovacích stanic, které poskytují bodově orientované údaje. Jelikož se srážky vyskytují nerovnoměrně v čase i prostoru, obzvláště v horském a podhorském terénu, je důležité správné zachycení prostorové distribuce informace. Pro zachycení prostorové variability byla využita metoda Thiessenových polygonů, kdy byly sestaveny časové řady úhrnů srážek zvlášť pro každé dílčí povodí, čímž se zajistilo relativně přesné vystižení distribuce srážek na povodí. Zpřesněním by bylo použití hustější sítě srážkoměrných stanic a zohlednění nadmořské výšky jednotlivých částí povodí, které by ještě lépe vystihlo členitost terénu. V poslední době je stále častější použití radarových odhadů, které jsou dostupné pro malý časový krok (minutový krok) a umožňují detailní prostorové rozlišení srážek (grid 1x1 km) (Daňhelka a kol., 2003). Tato data by mohla eliminovat odchylky modelovaného odtoku od pozorovaného. Také změna časového kroku může ovlivnit výsledný simulovaný průtok. V případě modelu pro horní Lužnici byl zvolen krok jedna hodina, který se vzhledem k dostupným datům jeví jako optimální. Použitím různých časových intervalů se zabýval např. Jeníček (2005) v povodí Černé vody v Krušných horách, kdy při změně výpočetního kroku na 6 hodin došlo ke zpoždění a ke snížení kulminačního průtoku povodňové vlny.

Dalším z významných charakteristik povodí jsou informace o půdních vlastnostech. Každá simulační metoda vyžaduje různé vstupy. V tomto případě byla použita metoda SCS CN, která na základě druhu půdního pokryvu a hydrologické skupiny půd určí hodnotu CN-křivky a umožňuje tak modelování vlivu změn vegetačního pokryvu na srážko-odtokový proces. Největším problémem bylo získání dat o hydrologických skupinách půd. Zatímco u nás je k dispozici několik možností, jak tyto informace získat, např. z digitálních map hydropedologických charakteristik půd ČR (Novák, Vopravil, 2003) či z BPEJ na základě

metodiky Janečka (2005), obdobná data pro rakouskou část povodí se získat nepodařilo. Bylo tedy využito údajů z půdních map zpracovaných pro Česko a Rakousko v obdobném měřítku a pro rakouskou část území zpřesněno na základě dat o vlastnostech půdního profilu (infiltrace). Pro rakouskou stranu povodí nebyly k dispozici údaje pro lesní půdy. Zadané hodnoty byly tedy zatíženy určitou mírou nejistoty a bylo nutné je optimalizačními procesy zpřesnit. Metoda CN-křivek je empirická metoda a nerespektuje mnohé faktory, které rozhodují o objemu přímého odtoku. Zejména nejsou zohledněny časové změny hodnoty CN se změnami nasycenosti půdních zón v průběhu srážkové epizody.

Výsledný hydrogram také výrazně ovlivňuje nastavení počátečního nasycení půdy, které se dá určit již při zjišťování hodnoty CN. CN-křivka se upravuje na základě 5-denního úhrnu předchozích srážek ve třech stupních. Provedené simulace proběhly pro podmínky průměrného počátečního nasycení (PVP II), což sice pro návrhové účely postačuje, ale při zohlednění vlivu obsahu vody v půdě by došlo při kalibraci modelu k dalšímu zpřesnění simulovaného hydrogramu.

Další nejistota vzniká při určování charakteristik koryta, které jsou potřebné pro model postupu povodňové vlny říční sítí. Uživatel zadává pro jednotlivé úseky vodního toku délku, sklon, Manningův drsnostní součinitel, reprezentativní příčný profil koryta, šířku dna a sklon svahů. Nejmenší chybou je zatížen výpočet sklonu a délky říčního úseku, které lze vypočítat v GIS, a které je závislé na kvalitě digitálního modelu reliéfu. Nejistota ale vzniká při odhadu drsnostního součinitele a příčného profilu koryta. Příčný profil koryta lze změřit v terénu, což ale vzhledem k velikosti povodí nebylo možné. Je tedy vhodné tyto hodnoty kalibrovat a tím přesněji modelovat pohyb povodňové vlny korytem.

V modelu je také možné použít data týkající se evapotranspirace. Tyto údaje nejsou jednoduše dostupné. Jelikož stojí na počátku srážko-odtokového procesu a jejich význam při povodňových událostech je malý, nebyly uvažovány, čímž sice došlo k jistému zjednodušení, ale na výsledný odtok by to nemělo mít výrazný vliv.

Jedním z cílů předložené práce byla také kalibrace samotného srážko-odtokového modelu HEC-HMS. Ta obvykle spočívá v nalezení jedné optimální sady parametrů, která reprezentuje celé povodí a má vliv na správný běh modelu. Optimalizace probíhala automaticky pomocí kritéria minimalizace rozdílů vrcholů hydrogramů. Kalibrace je časově náročný proces a její výsledky mohou dávat nerealistický odhad hodnot. Proto je důležitá jejich kontrola, která je často závislá na zkušenostech hydrologa a může být subjektivní. Model HEC-HMS umožňuje kalibrovat téměř všechny parametry, které do něj vstupují a to zvlášť pro každé subpovodí a dílčí úseky vodního toku. Pro kalibraci byly vybrány parametry,

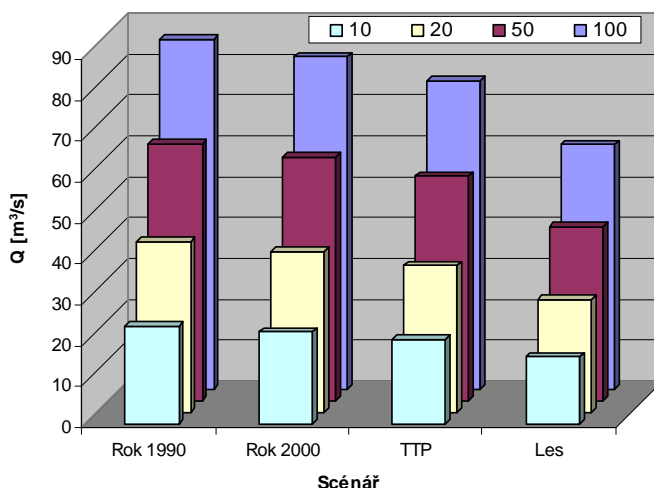
které byly zatíženy největší nejistotou při jejich výpočtu. Týkalo se to hodnot CN-křivky pro každé dílčí subpovodí a Manningova součinitele drsnosti pro dílčí úseky vodního toku. Kalibrací bylo dosaženo dobré shody, kdy Nash-Suttclifův koeficient dosáhl hodnoty 0,96. Při validaci došlo k nadhodnocení první i druhé povodňové vlny a Nash-Suttclifův koeficient dosáhl hodnoty 0,91. Vzhledem k problematické situaci při povodni v srpnu 2002 (konstrukce druhé povodňové vlny na základě odborného odhadu), která byla použita pro validaci modelu, by bylo vhodné ověřit data ještě na jiné povodňové události. Kalibrované parametry byly dále použity pro scénářové modelování vlivu změn krajinného pokryvu na srážko-odtokové poměry.

7. ZÁVĚR

Předložená diplomová práce je zaměřená na modelování vlivu změn krajinného pokryvu na srážko-odtokové poměry v povodí horní Lužnice po vodoměrný profil Pilař. Pro potřeby modelování byl vybrán nekomerční hydrologický software HEC-HMS. Hydrologický model obecně představuje užitečný nástroj v rozhodovacím procesu v oblasti protipovodňové ochrany.

K modelování vlivu změn krajinného pokryvu povodí byla použita metoda scénářového modelování, kde se v jednotlivých scénářích mění krajinný pokryv. Jako varianty krajinného pokryvu povodí byly zvoleny roky 1990 a 2000, pro které je k dispozici databáze CORINE Landcover, a dále hypotetické varianty možných způsobů krajinného pokryvu (zatravnění zemědělské půdy a zalesnění povodí kromě intravilánů, komunikací a vodních ploch).

Pro výpočet odtokové ztráty byla použita metoda SCS CN, která umožňuje stanovit vliv vegetace na odtokové poměry. Hodnoty CN-křivek a počáteční ztráty na odtoku pro jednotlivé scénáře a dílčí subpovodí jsou zobrazeny v příloze č.7. Pro výpočet objemů odtoků a kulminačních průtoků byly vybrány jednodenní návrhové srážkové úhrny s pravděpodobností opakování 10, 20, 50 a 100 let.



Graf 7.1: Závislost velikosti kulminačního průtoku na krajinném pokryvu pro úhrny návrhových srážek s průměrnou dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let

Z výše uvedeného grafu je zřejmý rozdíl v kulminačním průtoku v závislosti na variantách využití povodí. Rozdíly mezi stavem, kdy se les rozkládá na 96 % plochy povodí a stavem v roce 1990 (les 51 %) se liší ve všech případech nejméně o 30 %. Největších rozdílů

dosahuje při návrhové srážce s průměrnou dobou opakování 20 let, kdy se kulminační průtok snížil o 34 %, při srážce s průměrnou dobou opakování 100 let to bylo 30 %. U modelování změny v roce 2000 došlo k poklesu kulminace v závěrovém profilu Pilař oproti roku 1990 o 4,9 % při srážce s průměrnou dobou opakování 100 let a až o 6,3 % při srážce s průměrnou dobou opakování 10 let.

Z výsledků je zřejmý pokles vlivu krajinného pokryvu na odtokové poměry se vzrůstající extremitou srážky. Ten se projevil i ve výzkumech Jeníčka (2007) a Podhrazské (2002).

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že analyzované povodí je citlivé na změny krajinného pokryvu. Již poměrně malý zásah do poměru zastoupení jednotlivých pokryvů způsobuje výrazné kolísání odtokových poměrů. Pro zpřesnění závěrů by bylo vhodné porovnat výsledky na stejném povodí jinou modelovací metodou.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- ALBRECHT, J. a kol. (2003): Českobudějovicko. In: Mackovčín P. a Sedláček M. (eds.): Chráněná území ČR, svazek VIII. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR a EkoCentrum Brno, Praha, 808 str.
- BALATKA, B., KALVODA, J. (2006): Geomorfologické členění reliéfu Čech. Kartografie Praha, Praha, 79 str.
- BEVEN, K. (2001): Rainfall-runoff modelling: the primer. Wiley&Sons, Ltd., Chichester, 360 str.
- BIČÍK, I. a kol. (2005): Zhodnocení dosavadních výsledků výzkumů krajinných změn Česka z hlediska možných dopadů na hydrologický režim. Dílčí zpráva projektu VaV SM/2/57/05, PřF UK, Praha, 15 str.
- BUCHTELE, J. (2002): Úvod k metodám a modelům hydrologických předpovědí. In: Patera A., Váška J., Zezulák J., Eliáš V. (eds.): Povodně: prognózy, vodní toky a krajina, ČVUT a ČVTS, str. 33-35.
- CUDLÍN, P. a kol. (1999): Příčiny snížení vodohospodářské funkce lesa v krajině. Závěrečná zpráva úkolu Vav 610/2/98, DÚ 01/07. České Budějovice, Ústav ekologie krajiny AV ČR, 84 str.
- DAŇHELKA, J. a kol. (2003): Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU, Praha, 196 str.
- FELDMAN, A.D. (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. USACE, Davis, 155 str.
- FLÜGEL, W. A. (1995): Delineating hydrological response units by geographical information system analysis for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of River Bröl, Germany. Hydrol. Process., 9, str. 423–436.
- HAVLÍK, A. a kol. (2001): Matematické modely v ochraně před povodněmi. MŽP, ČVUT, Praha, 11 str.
- HEC (2006): Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Quick Start Guide. USACE, Davis, 45 str.
- CHÁBERA, S. a kol. (1985): Jihočeská příroda. Neživá příroda. Jihočeské nakl., České Budějovice, 270 str.
- CHÁBERA, S. (1998): Fyzický zeměpis jižních Čech. Přehled geologie, geomorfologie, horopisu a vodopisu. Jihočeská univerzita České Budějovice, 139 str.

- CHARLEY, W.J. (2005): HEC Data Storage System Visual Utility Engine. User's Manual. USACE, Davis, 322 str.
- JANEČEK, M. a kol.(2002): Ochrana zemědělské půdy před erozí. ISV, Praha, 201 str.
- JANEČEK, M. a kol.(2005): Ochrana zemědělské půdy před erozí. ISV, Praha, 195 str.
- JENÍČEK, M. (2005): Aplikace matematického modelu NASIM pro simulace srážko-odtokových poměrů v povodí Černé vody. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 104 str.
- JENÍČEK, M. (2007): Modelování vlivu krajinného pokryvu na srážko-odtokové procesy metodou CN křivek. In: Langhammer, J. (ed) a kol. (2007): Sborník příspěvků semináře Povodně a změny v krajině, PřF UK, Praha, 251 str.
- KANTOR, P, ŠACH, F. (2002): Možnosti lesů při tlumení povodní [online]. Referát v rámci Výzkumného projektu 526/02/0851 a výzkumného záměru MSM 434100005. [cit. 18.5. 2008] Dostupné z: <<http://lesprace.silvarium.cz/content/view/643/79/>>
- KASPRZAK, K. a kol. (1998): Vliv některých zemědělských plodin na povrchový odtok z deště. In: Hydrologická bilance a možnosti zvyšování složek retence a akumulace vody. Sborník přednášek. Praha, ČZU, VÚMOP, 123 str.
- KAŠPÁREK, L., PATERA, A. (2002): Klasifikace povodní. In Patera A., Váška J., Zezulák J., Eliáš V. (eds.): Povodně: prognózy, vodní toky a krajina, ČVUT a ČVTS, str. 23-24.
- KLEMEŠ, V. (1986): Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological Sciences Journal, 31, str. 13–24.
- KREČMER, V., ŠVIHLA, V., ŠACH, F., KANTOR, P., ČERNOHOUS, V., (2003): Lesy a povodně - souhrnná zpráva [online]. MŽP, Praha [cit. 9.5. 2008]. Dostupné z: <<http://lesprace.silvarium.cz/content/view/497/>>
- KUBÁT a kol. (2002): Předběžná souhrnná zpráva o hydrometeorologické situaci při povodni v srpnu 2002 [online]. ČHMU, Praha [cit. 9.5. 2008]. Dostupné z: <<http://www.imgw.pl/wl/internet/zz/wiadomosci/wiad2002/020823001/wiadomosc.html>>
- KUCHAŘOVÁ, K. (2006): Modelování odtoku z tajícího sněhu v povodí horního Hronu. Disertační práce. Masarykova univerzita v Brně, 106 str.
- LANGHAMMER, J. (2005): Dlouhodobé změny poříčních ekosystémů v nivách toků postižených extrémními záplavami. Zpráva o výsledcích řešení projektu Vav SM/2/57/05, PřF UK, 23 str.
- MAKEL', M. a kol. (2003): Príručka pre ďalšie vzdelávanie pracovníkov hydrologickej služby. SHMÚ, Bratislava, 279 str.
- NĚMEC, J., HLADNÝ, J. (2006): Voda v České republice. Consult, Praha, 256 str.

- NOVÁK, P. a kol. (2003): Zpracování digitálních map hydroopedologických charakteristik půd České republiky. Závěrečná zpráva a výstup 02 projektu QD 1368, VÚMOP, Praha, 11 str.
- PODHRAZSKÁ, J., TOMAN, F. (2002): Vliv hospodaření v povodí na změny odtokových poměrů. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě 2.-4. září 2002, str. 352-356.
- POVODÍ VLTAVY (2003): Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002. Povodí Vltavy, s.p., 95 str.
- PRACH, K., JENÍK, J., R.G. LARGE, A. (1996): Floodplain ecology and managment. SPB Academic Publishing bv, Amsterdam, 285 str.
- PRACH, K., PIKHART, D., FRANCÍKOVÁ, T. (2003): Ekologické funkce a hospodaření v říčních nivách. Botanický ústav AV ČR, Třeboň, 122 str.
- QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Studia geogr., 16. Geografický ústav ČSAV Brno, 64 str.
- SEIBERT, J. (1999): Conceptual runoff models – fiction or representation of reality? Acta Univ. Ups., Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 436, Uppsala, 52 str.
- SHARFFENBERG, W.A., FLEMING, M.J. (2006): Hydrologic Modeling Systém HEC-HMS, User's Manual . USACE, Davis, 278 str.
- ŠERCL, P. (2006): Metoda CN křivek – průběžná zpráva za ČHMÚ Praha. In: Rozvoj a testování modelovacího systému pro predikci povodňových odtoků v malých povodích. Zpráva za rok 2005 projektu VaV 1D/1/5/05. DHI Hydrofirm a ČHMÚ Praha, 50 str.
- TUREČEK, K. a kol. (2002): Zákon o vodách č. 254/2001 Sb. SONDY s.r.o, Praha, 240 str.
- USDA (1986): Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55 [online]. [cit. 13.6. 2008] Dostupné z:< <http://www.ecn.purdue.edu/runoff/documentation/tr55.pdf> >
- VACULOVIČOVÁ, L. (2006): Hydrogeologické poměry lokality Košetice. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, 51 str.
- VLASÁK, T. (2006): Přehled a klasifikace povodní na Lužnici. In Langhammer, J. (ed.): Změny krajiny jako ovlivňující faktor průběhu a projevu extrémních povodní. PřF UK, Praha, str. 37-45.
- WHITEHEAD, P.G., ROBINSON, M. (1993): Experimental basin studies – an international and historical perspective of forest impacts. Journal of Hydrology, 145, str. 217-230.
- WMO (1994): Guide to hydrological practices - Data Acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications. WMO-No. 168, Geneva, 735 str.

9. SEZNAM MAPOVÝCH A DATOVÝCH PODKLADŮ

9.1. MAPY

- Půdní mapa ČR 1:50 000, list 23-34 Jindřichův Hradec, AOPK ČR, 2005
- Půdní mapa ČR 1:50 000, list 33-13 České Velenice, AOPK ČR, 2005
- Půdní mapa ČR 1:50 000, list 33-31 Pohorí na Šumavě, AOPK ČR, 2005
- Půdní mapa ČR 1:50 000, list 33-11 Třeboň, ČGÚ, Praha, 1995
- Půdní mapa ČR 1:50 000, list 33-12 Nová Bystřice, ČGÚ, Praha, 1995
- DIBAVOD, VÚV TGM, [online], dostupné z: <<http://ww.heis.vuv.cz>>
- ArcCR, ARCDATA Praha
- ArcIMS Server, <http://geoportal.cenia.cz>
- Mapová aplikace e-BOD, [online], dostupné z:
<http://gis.lebensministerium.at/ebod/frames/index.php?&gui_id=eBOD>

9.2. DATOVÉ ZDROJE

- Srážková data ze stanic Byňov, Chlum u Třeboně, Hranice u Nových Hradů, Kunžak, Nová Bystřice, Pohorská Ves, Suchdol nad Lužnicí (ČHMÚ)
- Denní úhrny srážek ze stanic Haugschlag, Reinberg–Dobersberg, Siebenlinden, Weikertschlag, Pfaffenschlag, Liebenau, Gmünd, Vitis, Pyhrabrück, Karlstift a Altmanns (aplikace e-HYD, [online], dostupné z:
<http://gis.lebensministerium.at/eHYD/frames/index.php?&gui_id=eHYD>)
- Hodinové úhrny srážek ze stanic hodinové srážkové úhrny ze stanic Pyhrabrück, Altmanns, Gmünd, Vitis a Karlstift (Niederschlagshydrologie und Lawinenwarndienst (NÖ))
- Denní průtoky a hodinové průtoky z limnigrafické stanice Pilař (ČHMÚ)
- Průměrné denní průtoky ze stanic Oberlainsitz, Hoheneich, Amaliendorf a Ehrendorf (e-HYD[online], dostupné z:
<http://gis.lebensministerium.at/eHYD/frames/index.php?&gui_id=eHYD>)
- Hodinové průtoky ze stanice Hoheneich a Ehrendorf (ČHMÚ)
- Data vegetačního pokryvu CORINE-Landcover (EEA, [online], dostupné z:
<http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/>)
- Hodnoty CN křivek (ČHMÚ)

10. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK, GRAFŮ A PŘÍLOH

10.1. SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 2.1: Mapa povodí horní Lužnice	9
Obrázek 2.2: Geomorfologické členění povodí	15
Obrázek 2.3: Obecné uspořádání půdních typů na terasovém systému Lužnice	17
Obrázek 2.4: Izohyety ročního průměrného úhrnu srážek	19
Obrázek 2.5: Hydrografická síť povodí horní Lužnice	21
Obrázek 2.6: Síť srážkoměrných, klimatologických a limnigrafických stanic	23
Obrázek 3.1: Nástrojová lišta ArcHydro Tools	33
Obrázek 3.2: Nástrojová lišta HEC-GeoHMS	34
Obrázek 3.3: Diagram srážko-odtokového procesu v programu HEC-HMS a) detailní popis S-O procesu, b) zjednodušený popis S-O procesu	35
Obrázek 3.4: Ilustrace modelu základního odtoku	37
Obrázek 4.1: Vytvoření povodí a závěrového profilu	40
Obrázek 4.2: Porovnání původního a vygenerovaného povodí (Watershed)	41
Obrázek 4.3: Výběr procesů v HEC-GeoHMS	42
Obrázek 4.4: Hydrologické skupiny půd v povodí horní Lužnice	45
Obrázek 4.5: Nomogram pro odvození CN-křivek	47
Obrázek 4.6: Parametry profilu koryta	49
Obrázek 4.7: Ověření kontroly topologie	50
Obrázek 4.8: Textový soubor se souřadnicemi říční sítě a rozvodnic	50
Obrázek 4.9: Rozdělení povodí Thiessenovými polygony	53
Obrázek 5.1: Vytvoření časových řad	54
Obrázek 5.2: Přiřazení časových řad subpovodím	55

10.2. SEZNAM TABULEK:

Tabulka 2.1: Charakteristika jednotlivých segmentů horní Lužnice	11
Tabulka 2.2: Pravděpodobnost výskytu jedné nebo více povodní v určitém měsíci v roce	24
Tabulka 2.3: Nejvyšší zaznamenané vodní stavy ve stanici Pilař	25
Tabulka 2.4: Změna vegetačního krytu v povodí horní Lužnice	29
Tabulka 4.1: Hydrologické skupiny půd	43
Tabulka 4.2: Ukázka části atributové tabulky s půdními typy a jejich propustností	44

Tabulka 4.3: Ukázka tabulky obsahující HSP	45
Tabulka 4.4: Určení hodnoty CN podle vegetačního krytu a hydrologické skupiny půd–„Look-up Table“	46
Tabulka 5.1: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař	64
Tabulka 5.2: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař	65
Tabulka 5.3: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař	66
Tabulka 5.4: Vybrané parametry simulovaných povodňových vln v závěrovém profilu Pilař	67
10.3. SEZNAM GRAFŮ:	
Graf 2.1: Podélný profil toku	10
Graf 2.2: Hypsografická křivka povodí horní Lužnice	16
Graf 2.3: Sezónní úhrny srážek na rakouských stanicích	20
Graf 2.4: Sezónní úhrny srážek na rakouských stanicích	20
Graf 5.1: Úhrny srážek v období 31. 7. - 4. 8. 1991 v jednotlivých stanicích	58
Graf 5.2: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 31.7. do 13.8. 1991	58
Graf 5.3: Simulovaný a pozorovaný hydrogram v závěrovém profilu Pilař v srpnu 1991	59
Graf 5.4: Úhrny srážek v období 5. 8. - 13. 8. 2002 v jednotlivých stanicích	60
Graf 5.5: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 5.8. do 18.8. 2002	61
Graf 5.6: Simulovaný a pozorovaný hydrogram v závěrovém profilu Pilař v srpnu 2002	61
Graf 5.7: Návrhové srážky s trváním jeden den na jednotlivých stanicích	63
Graf 5.8: Simulované křivky průtoku v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 100 let	64
Graf 5.9: Simulované křivky průtoku v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 50 let	65
Graf 5.10: Simulované křivky průtoku v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 20 let	66

Graf 5.11: Simulované křivky průtoku v závěrovém profilu Pilař pro jednotlivé scénáře při návrhové srážce s dobou opakování 10 let 67

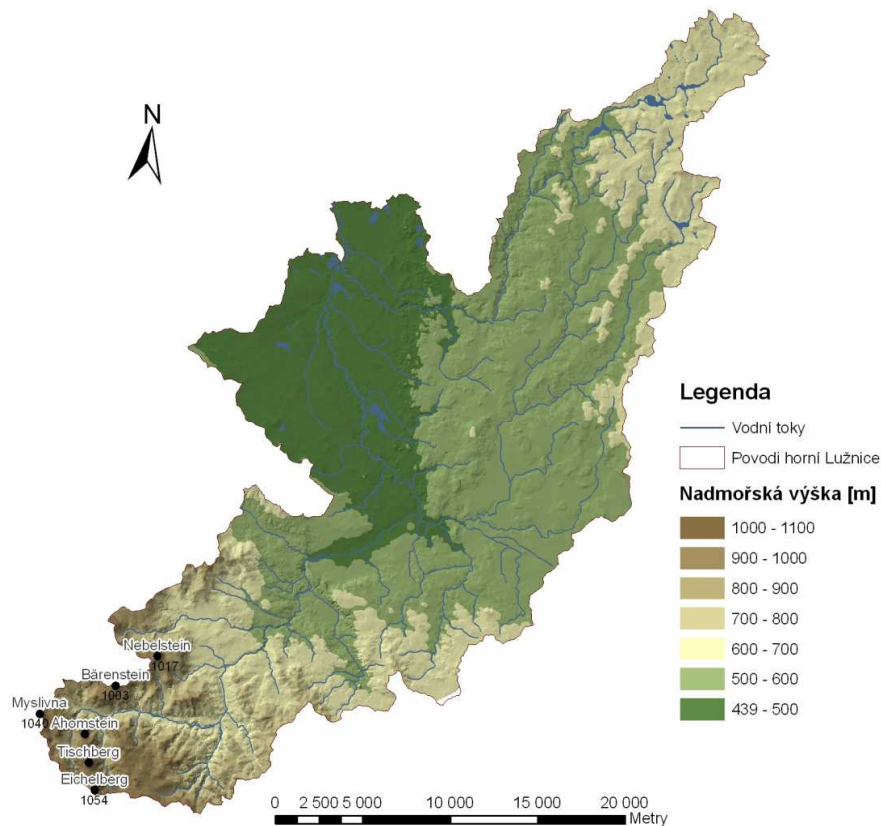
Graf 7.1: Závislost velikosti kulminačního průtoku na krajinném pokryvu pro úhrny návrhových srážek s průměrnou dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let 71

10.4. SEZNAM PŘÍLOH:

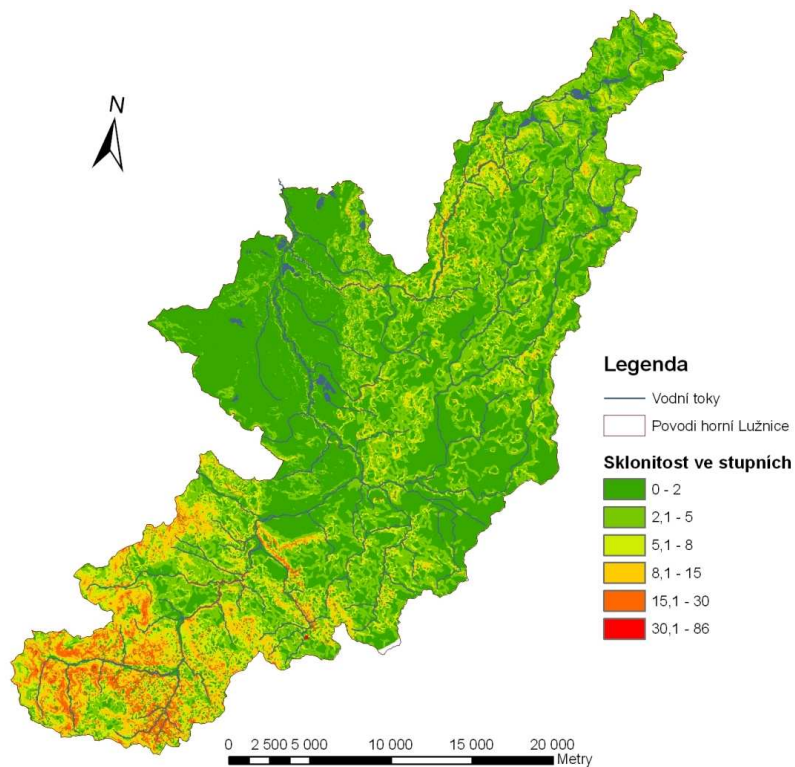
Příloha 1: Výškové poměry v povodí horní Lužnice.....	80
Příloha 2: Sklonitostní poměry v povodí horní Lužnice.....	80
Příloha 3: Vymezení supovodí.....	81
Příloha 4: Krajinný pokryv v povodí horní Lužnice.....	82
Příloha 5: Grid CN-křivek pro rok 2000.....	83
Příloha 6: Schematizované povodí horní Lužnice	84
Příloha 7: Vybrané parametry subpovodí pro jednotlivé scénáře.....	85

PŘÍLOHY

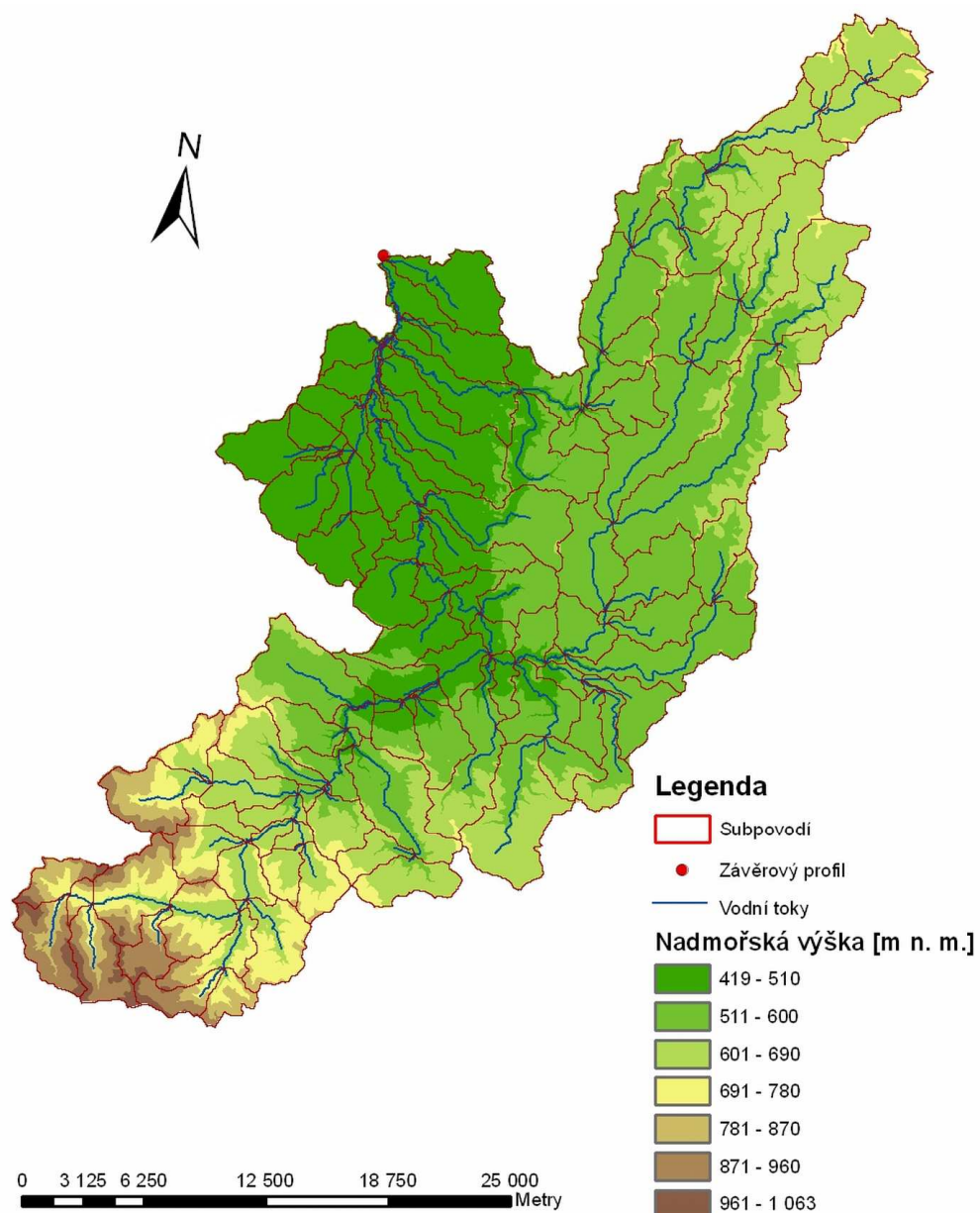
Příloha 1: Výškové poměry v povodí horní Lužnice (Zdroj: DIBAVOD, VÚV)



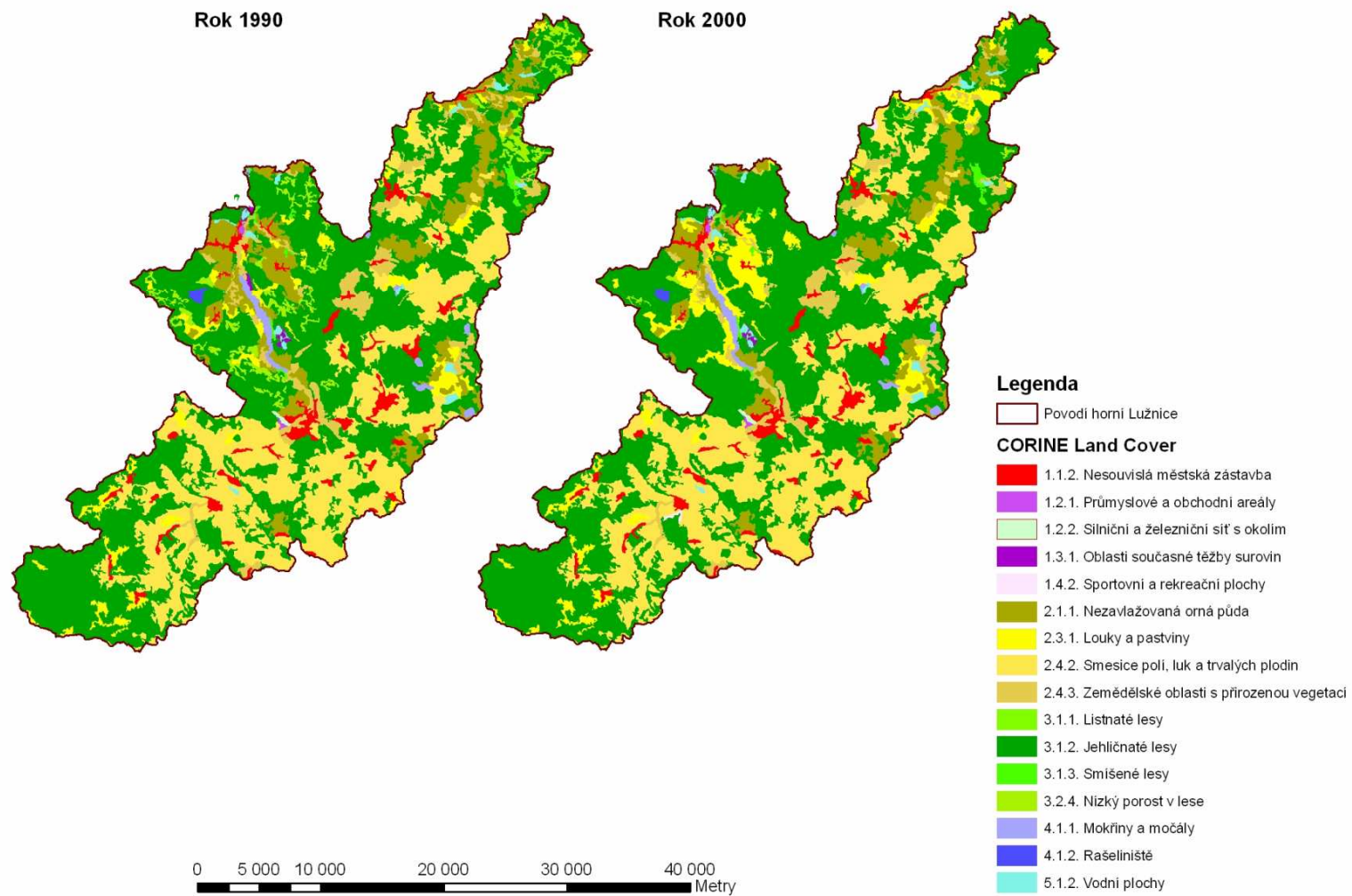
Příloha 2: Sklonitostní poměry v povodí horní Lužnice (Zdroj: DIBAVOD, VÚV)



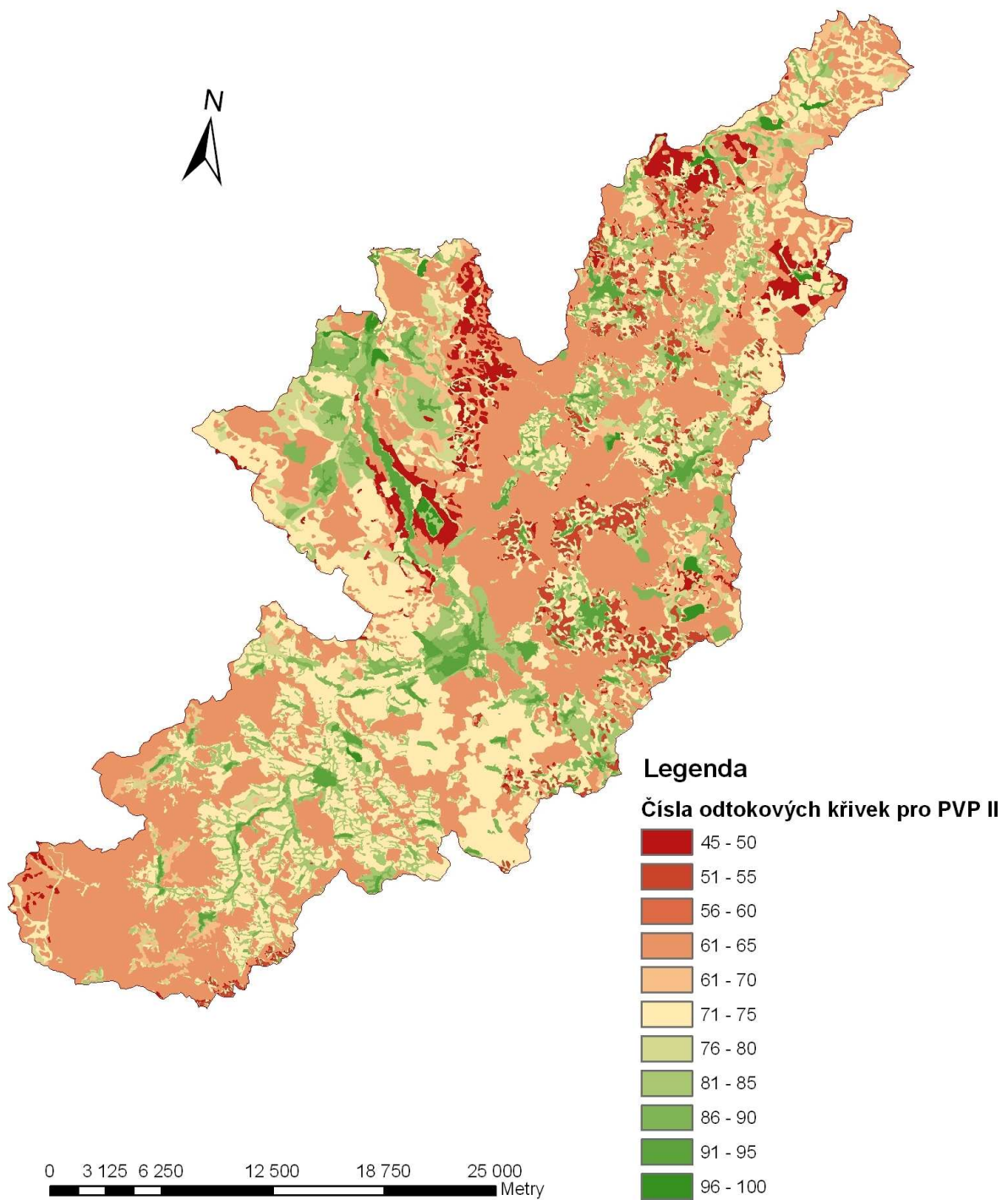
Příloha 3: Vymezení subpovodí



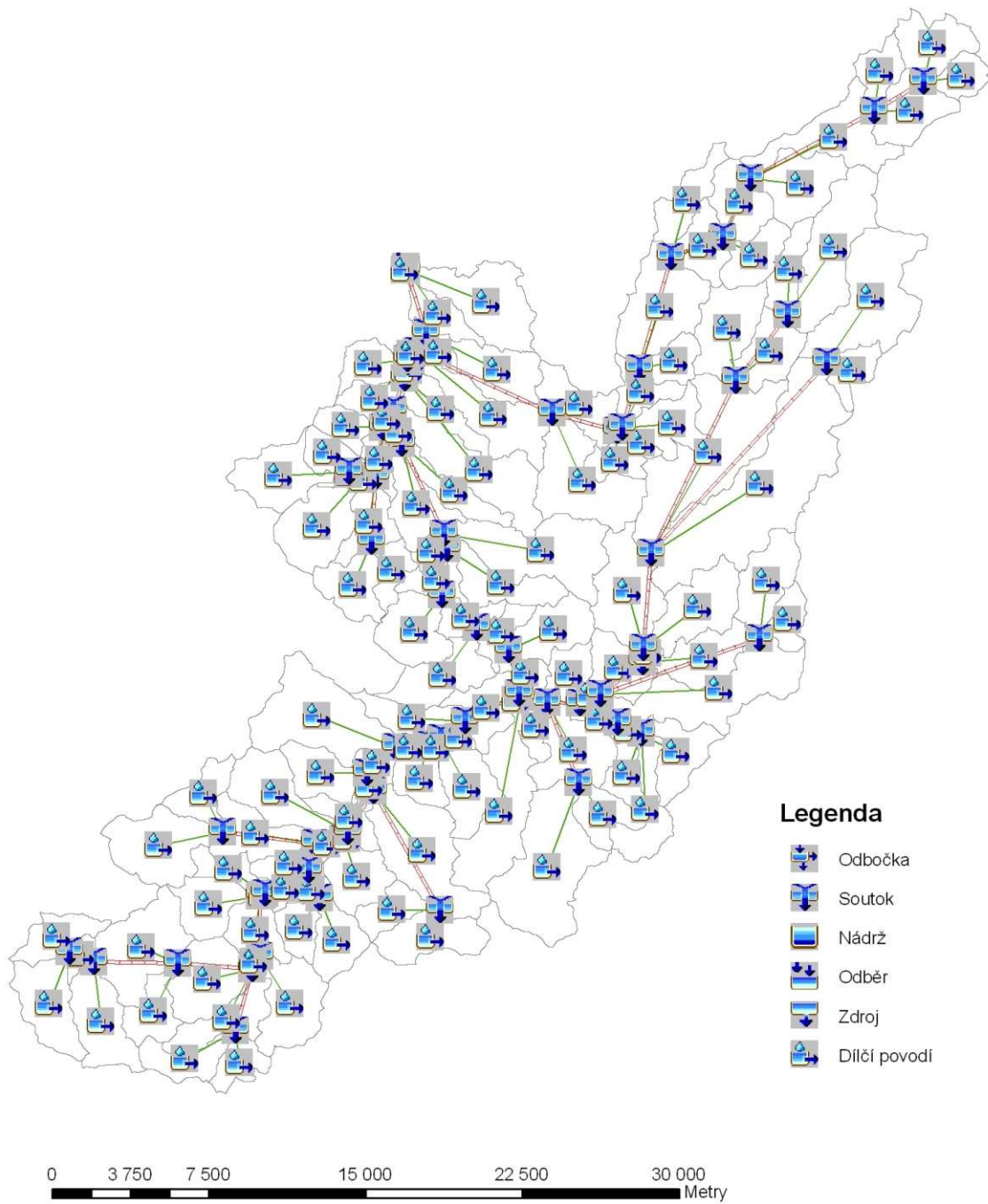
Příloha 4: Krajinný pokryv v povodí horní Lužnice (Zdroj: CORINE Land Cover)



Příloha 5: Grid CN-křivek pro rok 2000



Příloha 6: Schematizované povodí horní Lužnice



Příloha 7: Vybrané parametry subpovodí pro jednotlivé scénáře

Subpovodí	Plocha [km ²]	Rok 1990		Rok 2000		TTP		LES	
		CN [-]	la [mm]	CN [-]	la [mm]	CN [-]	la [mm]	CN [-]	la [mm]
W1290	8,17	47,0	57,2	51,8	47,2	51,8	47,2	51,1	48,6
W1300	4,32	49,2	52,4	54,0	43,2	54,0	43,2	52,8	45,3
W1310	8,76	54,5	42,5	53,7	43,7	53,2	44,6	51,7	47,4
W1320	5,01	57,6	37,5	56,7	38,8	55,5	40,7	50,6	49,7
W1330	12,89	58,5	36,0	56,9	38,5	55,8	40,3	51,6	47,6
W1340	10,24	53,2	44,6	51,6	47,7	49,5	51,9	45,4	61,0
W1350	8,15	47,4	56,3	46,5	58,4	45,8	60,1	43,8	65,3
W1360	6,86	51,6	47,6	51,5	47,9	50,7	49,5	47,5	56,2
W1370	17,01	55,1	41,4	54,4	42,6	52,9	45,2	50,1	50,5
W1380	6,59	53,4	44,4	52,7	45,6	52,0	46,9	46,9	57,5
W1390	15,59	55,0	41,6	54,3	42,8	53,3	44,5	49,2	52,4
W1400	0,03	61,1	32,3	60,4	33,4	60,4	33,4	57,7	37,2
W1410	6,65	50,8	49,1	50,2	50,4	49,0	53,0	46,9	57,4
W1420	14,36	51,7	47,4	51,2	48,4	50,7	49,4	49,4	52,1
W1430	20,55	50,4	50,0	49,8	51,2	49,6	51,7	47,5	56,2
W1440	5,63	52,4	46,2	51,7	47,5	49,5	51,8	47,3	56,7
W1450	5,45	52,3	46,2	51,7	47,5	51,7	47,5	51,2	48,5
W1460	11,07	51,9	47,1	51,2	48,3	49,7	51,5	47,6	55,9
W1470	1,97	58,3	36,4	57,3	37,9	56,6	38,9	54,9	41,7
W1480	9,61	48,1	54,8	47,4	56,3	47,4	56,4	46,8	57,8
W1490	0,14	64,5	27,9	63,7	28,9	63,7	28,9	56,8	38,6
W1500	12,79	52,9	45,3	51,7	47,5	51,6	47,7	49,0	52,9
W1510	5,02	62,7	30,3	61,5	31,9	60,6	33,1	58,4	36,2
W1520	8,17	56,3	39,4	55,6	40,6	53,8	43,6	49,9	51,0
W1530	0,12	61,1	32,4	60,3	33,5	60,3	33,5	55,2	41,2
W1540	4,51	51,1	48,6	50,4	49,9	49,3	52,3	46,7	57,9
W1550	4,71	65,4	26,9	64,5	27,9	63,3	29,5	59,8	34,2
W1560	40,7	54,2	42,9	53,5	44,1	52,0	46,8	49,3	52,3
W1570	0,41	62,9	30,1	62,0	31,1	60,7	32,9	56,0	39,9
W1580	5,17	52,3	46,4	51,6	47,6	49,9	51,0	46,7	57,9
W1590	4,42	51,1	48,7	50,4	49,9	49,1	52,7	47,0	57,3
W1600	15,67	55,3	41,1	53,7	43,7	53,7	43,8	51,4	47,9
W1610	5,85	62,9	29,9	61,0	32,5	60,8	32,8	57,5	37,6
W1620	26,12	53,2	44,6	52,6	45,8	51,5	47,9	49,2	52,5
W1630	7,99	47,9	55,3	47,3	56,6	47,3	56,6	46,8	57,8
W1640	0,28	56,6	39,0	55,8	40,2	55,4	41,0	51,9	47,2
W1650	1,25	58,0	36,8	57,2	37,9	56,1	39,7	50,3	50,1
W1660	7,25	56,6	38,9	55,9	40,1	54,1	43,1	49,8	51,3
W1670	1,41	61,1	32,3	60,4	33,4	60,1	33,7	49,3	52,2
W1680	4,14	62,4	30,7	61,6	31,7	60,1	33,7	56,1	39,8
W1690	3,23	64,0	28,6	62,6	30,4	60,5	33,1	55,1	41,4
W1700	4,36	53,4	44,3	52,8	45,5	51,9	47,1	46,2	59,1

W1710	8,58	58,6	36,0	56,4	39,2	54,9	41,8	47,1	57,2
W1720	4,05	60,0	33,9	59,3	34,9	59,3	34,9	59,1	35,1
W1730	9,89	54,3	42,8	53,4	44,4	53,4	44,4	52,9	45,2
W1740	0,99	62,1	30,9	58,9	35,5	58,9	35,5	54,6	42,3
W1750	5,8	53,5	44,2	52,7	45,5	52,7	45,5	51,7	47,4
W1760	0,57	60,0	33,9	58,4	36,2	58,4	36,2	56,8	38,6
W1770	6,05	60,9	32,6	59,8	34,1	59,4	34,7	57,3	37,8
W1780	11,82	56,8	38,7	56,2	39,6	55,9	40,0	53,6	44,0
W1790	16,34	52,7	45,6	52,0	46,9	52,0	46,9	46,0	59,6
W1800	2,14	55,0	41,5	53,1	44,9	53,1	44,9	46,8	57,6
W1810	7,72	54,3	42,7	53,8	43,6	53,6	44,0	53,3	44,5
W1820	4,12	54,5	42,5	54,0	43,2	54,0	43,2	53,7	43,8
W1830	8,26	52,4	46,1	52,1	46,6	50,8	49,2	49,3	52,2
W1840	18,59	49,8	51,3	49,1	52,7	48,8	53,2	48,1	54,8
W1850	4,17	55,8	40,2	53,9	43,5	52,6	45,9	45,5	61,0
W1860	13,82	51,1	48,7	50,4	49,9	49,2	52,6	47,1	57,1
W1870	9,56	57,4	37,7	56,6	38,9	55,8	40,3	49,1	52,7
W1880	9,68	56,8	38,7	56,1	39,7	56,1	39,7	55,1	41,3
W1890	3,75	58,0	36,7	57,0	38,2	56,1	39,8	49,4	52,1
W1900	8,51	50,2	50,4	49,7	51,5	49,2	52,4	47,0	57,2
W1910	9,55	56,9	38,4	56,3	39,5	55,7	40,4	54,5	42,3
W1920	11,44	51,6	47,7	50,9	49,0	50,1	50,7	48,2	54,6
W1930	4,26	51,0	48,9	50,3	50,1	49,3	52,2	45,6	60,6
W1940	18,48	52,9	45,2	52,3	46,4	50,1	50,6	46,8	57,9
W1950	4,23	56,4	39,3	55,7	40,4	54,7	42,1	50,2	50,5
W1960	0,6	62,8	30,0	62,0	31,1	60,2	33,5	58,0	36,8
W1970	3,15	61,3	32,1	60,5	33,2	60,1	33,8	52,5	46,1
W1980	8,75	53,0	45,1	52,3	46,3	51,4	48,1	48,0	55,1
W1990	7,22	57,4	37,8	56,6	38,9	54,6	42,3	51,4	48,1
W2000	7,05	67,8	24,2	66,9	25,1	66,4	25,7	63,1	29,7
W2010	0,2	72,5	19,3	71,6	20,2	71,6	20,2	71,6	20,2
W2020	5,26	53,5	44,1	52,8	45,3	52,1	46,8	50,4	50,0
W2030	0,72	53,3	44,4	52,7	45,7	52,2	46,5	51,1	48,7
W2040	17,11	53,6	44,0	52,9	45,2	51,7	47,5	48,9	53,2
W2050	3,49	56,3	39,5	55,6	40,6	55,0	41,6	51,0	48,8
W2060	2,63	53,9	43,5	53,2	44,7	52,6	45,8	50,9	48,9
W2070	8,47	54,6	42,2	54,0	43,4	51,2	48,4	48,8	53,4
W2080	6,81	59,1	35,1	58,4	36,2	56,7	38,9	52,7	45,7
W2090	1,16	60,6	33,1	59,8	34,1	57,7	37,3	52,2	46,4
W2100	0,36	48,8	53,2	48,2	54,6	48,2	54,6	48,2	54,6
W2110	7,98	56,9	38,4	56,2	39,6	54,5	42,4	51,3	48,3
W2120	4,54	59,7	34,2	59,0	35,3	57,3	37,9	54,2	42,9
W2130	10,68	56,5	39,0	55,8	40,2	54,6	42,2	50,9	49,1
W2140	0,44	61,2	32,2	60,4	33,2	58,4	36,2	53,6	44,0
W2150	9,04	56,6	39,0	55,9	40,1	54,1	43,1	49,5	51,9

W2160	0,92	60,9	32,6	60,2	33,6	58,4	36,2	53,9	43,5
W2170	19,54	55,9	40,1	55,2	41,3	53,8	43,6	50,2	50,4
W2180	5,25	55,4	40,9	54,7	42,1	53,2	44,7	49,6	51,5
W2190	2,43	56,6	38,9	55,9	40,1	54,3	42,7	50,3	50,3
W2200	7,25	54,1	43,1	53,4	44,3	52,2	46,5	49,3	52,2
W2210	1,01	58,4	36,2	57,6	37,3	56,4	39,3	53,2	44,7
W2220	23,71	55,4	41,0	54,7	42,2	52,8	45,4	48,3	54,5
W2230	5,91	54,1	43,1	53,4	44,3	52,0	46,9	48,6	53,7
W2240	4,68	58,8	35,6	58,1	36,7	56,3	39,4	52,2	46,5
W2250	18,49	56,6	38,9	55,9	40,1	54,5	42,5	51,1	48,6
W2260	11,18	52,5	46,0	51,8	47,2	51,0	48,8	49,1	52,6
W2270	5,81	53,5	44,1	52,8	45,3	52,3	46,3	50,4	50,0
W2280	13,64	52,0	46,9	51,4	48,1	51,1	48,5	49,9	51,1
W2290	9	54,0	43,3	53,3	44,5	52,3	46,3	49,9	51,0
W2300	0,16	72,5	19,2	71,6	20,1	71,6	20,1	71,6	20,1
W2310	1,07	60,6	33,0	59,8	34,1	58,2	36,5	50,0	50,7
W2320	8	56,3	39,4	56,2	39,5	55,1	41,4	51,3	48,3
W2330	3,46	59,6	34,4	58,9	35,5	57,6	37,4	51,9	47,1
W2340	2,14	58,7	35,7	58,0	36,8	57,0	38,4	53,5	44,2
W2350	1,82	58,3	36,4	57,5	37,5	56,1	39,7	49,8	51,2
W2360	7,69	51,3	48,3	50,6	49,5	50,2	50,5	48,6	53,8
W2370	4,08	53,3	44,6	52,6	45,8	51,7	47,5	49,5	51,8
W2380	0,04	69,1	22,8	68,2	23,7	68,2	23,7	68,2	23,7
W2390	6,47	57,6	37,4	56,8	38,6	55,3	41,1	51,6	47,6
W2400	4,6	56,0	39,8	55,3	41,0	54,0	43,3	49,9	51,1
W2410	7	55,9	40,1	55,2	41,2	53,8	43,6	50,3	50,3
W2420	5,2	56,1	39,8	55,4	41,0	54,0	43,3	50,7	49,5
W2430	9,06	57,5	37,5	56,8	38,6	55,5	40,8	50,5	49,9
W2440	6,06	48,0	55,1	47,4	56,5	47,4	56,5	47,0	57,2
W2450	10,51	49,8	51,2	49,2	52,5	49,2	52,5	49,0	52,9
W2460	1,96	49,2	52,5	48,6	53,8	48,6	53,8	48,6	53,8
W2470	15,03	50,8	49,3	50,1	50,5	49,9	51,0	49,1	52,7
W2480	0,29	63,3	29,4	62,5	30,4	60,2	33,6	55,7	40,4
W2490	10,72	49,0	52,8	48,4	54,1	48,4	54,1	48,2	54,5
W2500	6,12	51,3	48,2	50,6	49,5	50,5	49,7	49,3	52,1
W2510	7,84	52,3	46,3	51,6	47,6	51,1	48,6	48,9	53,1
W2520	11,52	53,4	44,3	52,8	45,5	52,2	46,6	50,3	50,1
W2530	11,28	54,4	42,6	53,7	43,8	52,2	46,5	48,9	53,0
W2540	5,93	49,3	52,2	48,7	53,5	48,7	53,6	48,1	54,9
W2550	4,57	48,0	55,0	47,4	56,3	46,7	58,0	45,7	60,2