

3 Bilanční posouzení srážek a odtoku

3.1 Posouzení nasycenosti povodí před první a druhou vlnou povodně

Pro nepřímé posouzení nasycenosti povodí a jeho schopnosti absorbovat další srážky se používá tzv. ukazatel předchozích srážek (angl. zkratka API). Pro značnou vypovídací schopnost je součástí několika srážkoodtokových modelů. Počítá se ze vztahu:

$$API_n = \sum_{i=1}^n C^i \cdot P_i \text{ [mm]}, \quad (3.1)$$

kde

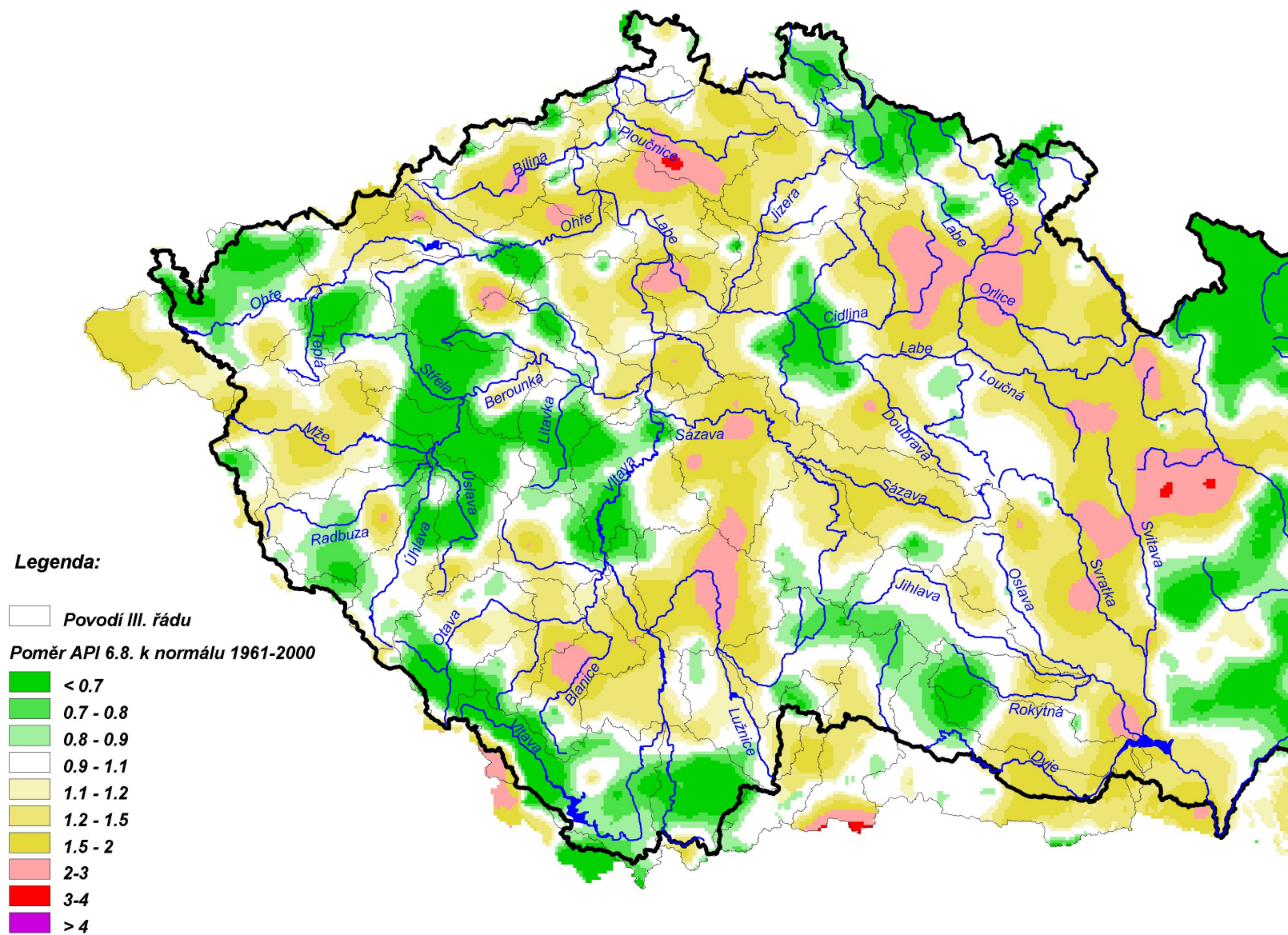
- n znamená celkový počet dní před výskytem příčinné srážky, obvykle se volí $n = 30$,
- i je pořadí dne počítané nazpět ode dne, ke kterému je API určován,
- C je evapotranspirační konstanta, pro naše podmínky obvykle $C = 0.93$,
- P je denní úhrn srážky v milimetrech v i -tém dni před výskytem příčinné srážky.

Hodnoty 30denního API (API_{30}) byly vypočítány pro dny 6. srpna 2002 (počátek první epizody) a 11. srpna 2002 (počátek druhé epizody) v místech srážkoměrných stanic a tyto bodové údaje byly následně plošně interpolovány procedurou geografického informačního systému (GIS), přičemž při výpočtech bylo, kromě dat klimatologické databáze ČHMÚ, využito i dat poskytnutých ze zahraničí. Pro účely porovnání vypočtených hodnot platných pro uvedené dny srpna 2002 byly odvozeny normály hodnot API_{30} pro dny 6. srpna a 11. srpna za období 1961–2000. Na závěr byly odvozeny mapy poměrů aktuálních a normálových hodnot, které jsou uvedeny na obr. 3.1 a 3.2.

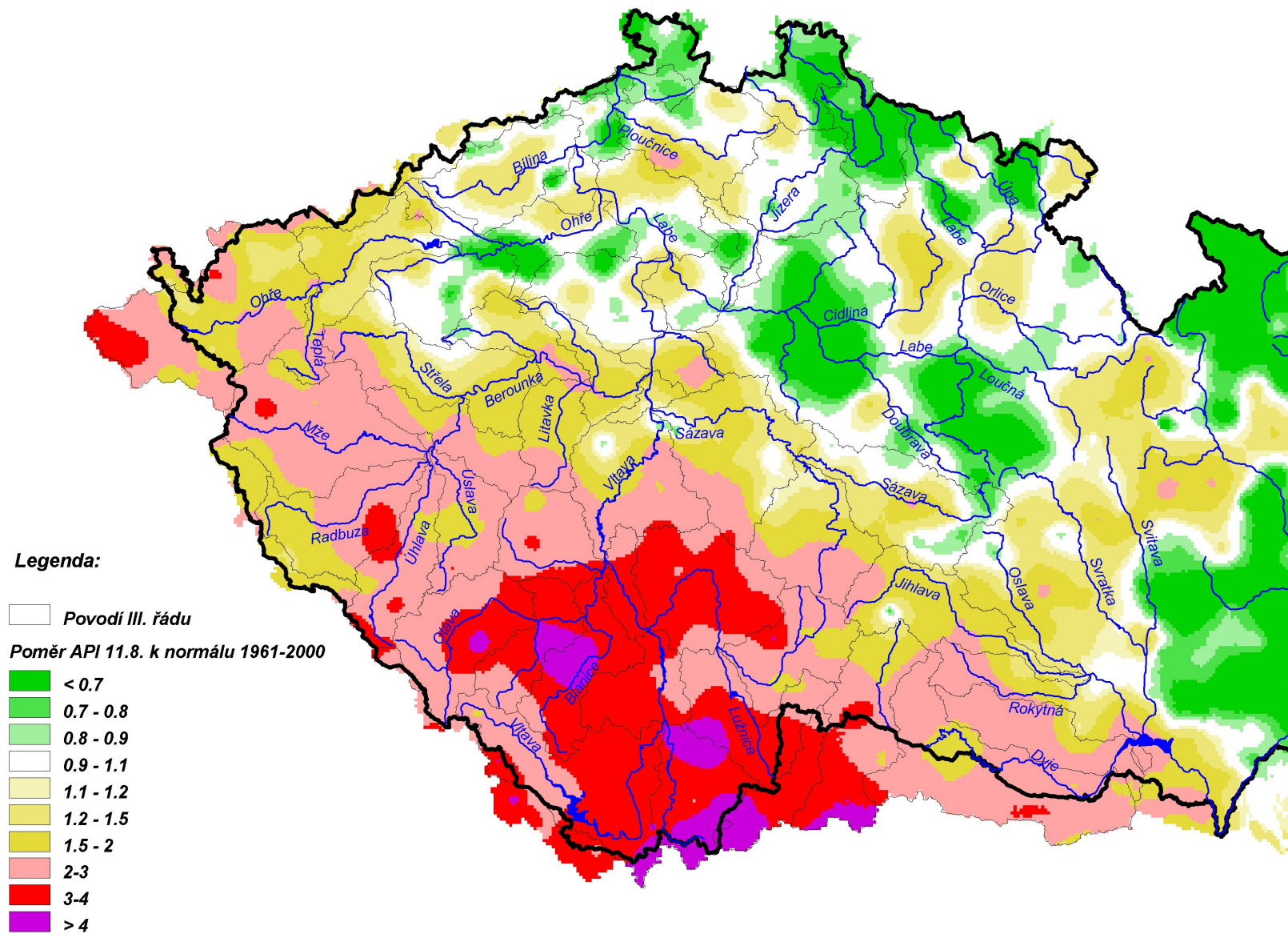
Z obrázků je patrné, že zatímco před první vlnou (obr. 3.1) se nasycenost povodí, kromě ojedinělých míst, pohybovala kolem normálu (v průměru 80–120 % normálu), před nástupem druhé vlny se tato nasycenost vlivem vydatných srážek v první vlně zvýšila v jižních a západních Čechách na 200–400 % normálu (ojediněle i více). Důsledkem potom byl podstatně větší odtok ze srážek druhé vlny, i když jejich velikost byla v řadě lokalit srovnatelná s první vlnou. Před druhou vlnou srážek byla nejvíce nasycena povodí horní Vltavy, Malše, Lužnice, Otavy, Blanice a horní Dyje (v Rakousku), přičemž na nich se vyskytovaly nejvydatnější srážky i během druhé epizody. Hodnoty API_{30} pro vybraná povodí vodoměrných stanic jsou uvedeny v tab. 3.1.

Extrémní nasycenost povodí před druhou povodňovou epizodou vyjadřuje také mapa poměrů hodnot API_{30} z 11. srpna 2002 k hodnotám retenční vodní kapacity půdy (RVK), která je na obr. 3.3. Hodnoty retenční kapacity půdy odvodil VÚMOP na základě klasifikace půdních typů v ČR. Například na povodí Blanice překročila hodnota API retenční kapacitu půdy zhruba 1,5násobně, na povodí Malše dokonce více než 2násobně a na celém povodí Vltavy po profil vodní nádrže Orlík 1,3násobně.

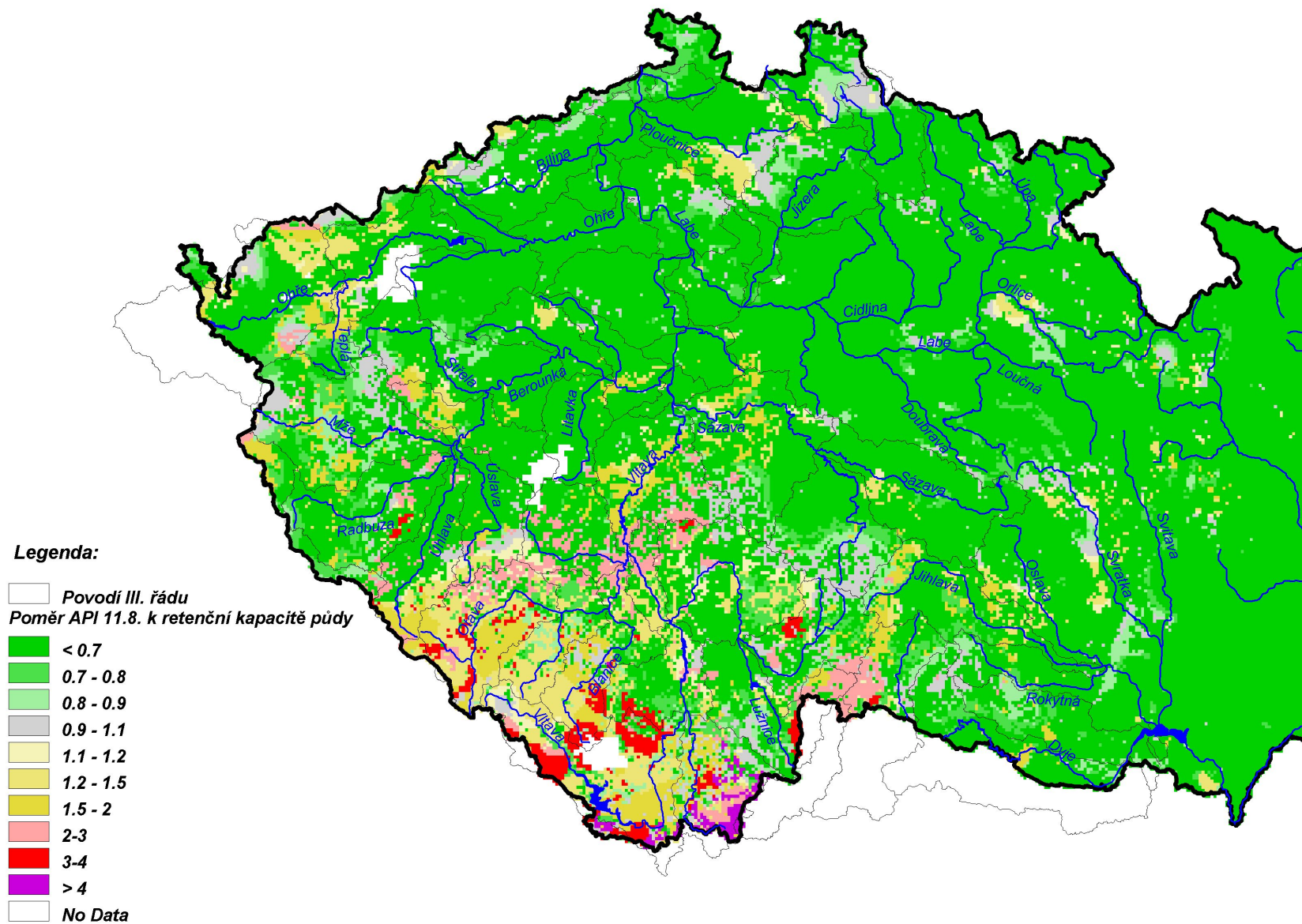
Závěrem nutno konstatovat, že množství srážek spadlé v první vlně vyvolalo takovou nasycenost zasažených povodí, že další spadlé srážky nemohla tato povodí již svojí přirozenou retenční schopností zadržet. To platí jak pro území částečně urbanizovaná, tak i pro území čistě přírodního charakteru.



Obr. 3.1 Poměr ukazatele předchozích srážek (API_{30}) ze dne 6. 8. 2002 k normálu API.



Obr. 3.2 Poměr ukazatele předchozích srážek (API_{30}) ze dne 11. 8. 2002 k normálu API.



Obr. 3.3 Poměr ukazatele předchozích srážek (API_{30}) ze dne 11. 8. 2002 k retenční vodní kapacitě půdy .

3.2 Bilanční posouzení objemu srážek a odtoku, stanovení odtokových koeficientů

Extremitu povodně je také možné částečně prokázat na velikostech tzv. odtokových koeficientů, což je poměr mezi odtokovou výškou v milimetrech a výškou srážek na povodí v milimetrech. Odtoková výška se počítá ze vztahu:

$$R = \frac{W \cdot 1000}{A} \text{ [mm]}, \quad (3.2)$$

kde

W je objem povodňové vlny v milionech m^3 ,
 A je plocha povodí v km^2 .

Pro výpočet odtokové výšky z hydrogramu průtoku lze využít různé způsoby vyčlenění (separace) té části zvýšení průtoku, kterou považujeme za následek příčných srážek. V našem případě byl objem vlny separován nad konstantním průtokem daným počátečním průtokem. Počátkem výpočtu objemu byl čas, kdy začal průtok významně stoupat. Výpočet byl ukončen, když průtok v toku dosáhl hodnoty dlouhodobého průměrného průtoku. Pokud jej nebylo dosaženo do konce srpna 2002, byl výpočet ukončen 1. 9. 2002 v 0:00. V případě ovlivnění poklesové větve vlny dalšími srážkami nebo manipulacemi na nádržích byly průtoky na poklesové větvi nahrazeny plynulým poklesem (odhadem výtokové čáry). Z výše uvedených důvodů je nutno považovat vypočtené odtokové součinitele za orientační hodnoty, které mohou být ještě dále zpřesňovány.

Hodnoty odtokových koeficientů (viz tabulku 3.1) jsou logicky nejvyšší v povodích, která byla zasažena nejvyššími srážkami. Nejvyšších koeficientů odtoku bylo dosaženo v povodí Malše, kde z objemu spadlých srážek za obě srážkové vlny přímo odteklo více než 70 %, přičemž z objemu srážek v první vlně to bylo 65 %, ale ve druhé vlně až 90 % při podstatně nižších srážkách (povodí po profil Pořešín). Zde se prokázal vliv silného nasycení povodí srážkami první vlny, které tak již nebylo schopno další srážky absorbovat.

S nárůstem plochy povodí a s poklesem průměrné výšky srážek na povodí se hodnoty odtokových koeficientů snižovaly. V Praze odteklo Vltavou necelých 50 % objemu srážek, v Ústí nad Labem to bylo již „jen“ necelých 40 % objemu vody ze srážek. V absolutních číslech se jednalo v profilu Praha-Chuchle o 2,5 mld. m^3 proteklé vody při objemu spadlých srážek 5,2 mld. m^3 .

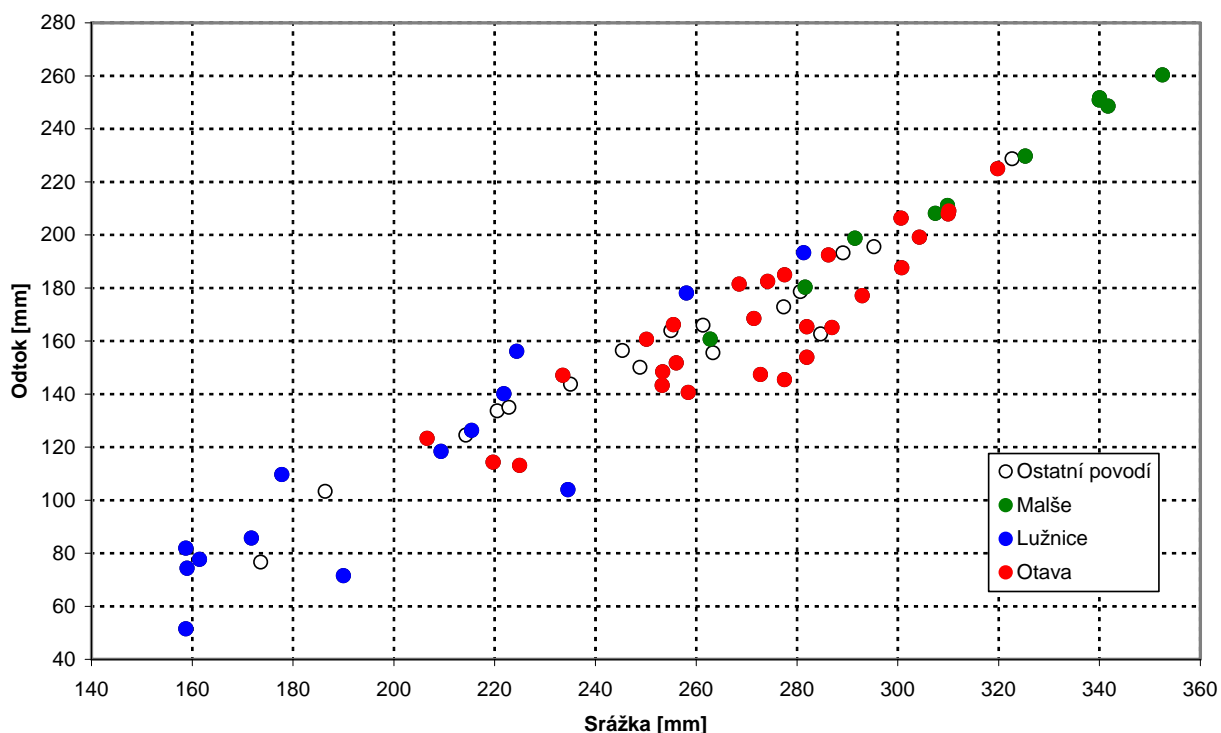
Na obr. 3.4 je znázorněn vztah mezi srážkami a odtokem na povodí Vltavy po VD Orlick. Vztahy byly vyšetřeny pro všechna povodí vodoměrných stanic na daném území a k nim příslušná mezipovodí. V grafu jsou barevně odlišena jednotlivá dílčí povodí, z čehož opět povodí Malše vyznívá celkově jako nejvíce postižené. Srážkoodtokové vztahy posloužily i při vlastním vyhodnocení průtočných množství (viz kap. 2) jako velmi důležitý zdroj informací.

3.3 Výpočet mapy odtokových výšek pomocí modelu

Stanovení odtokové výšky jako průměrné hodnoty na povodí je popsáno v kapitole 3.2. I když se nejedná o jednoznačnou záležitost, výpočet je poměrně jednoduchý a přesnost výsledné hodnoty závisí spíše na přesnosti vyhodnocení průtoků než na samotné metodě stanovení odtokové výšky. Výpočet odtokových výšek v gridové (distribuované) formě je však značně složitější, neboť odtok vody ve skutečnosti stanovujeme v jediném profilu uzavírajícím povodí. Nadto za povodně voda stéká z povodí i po svazích mimo síť koryt vodních toků, kde značný podíl má i hypodermický odtok. Jedinou možností je proto stanovit odtokové výšky v jednotlivých pixelech pomocí vhodně zvoleného modelu a výsledky poté upřesnit v rámci jednotlivých povodí na základě poměru průměrů modelované a „pozorované“ odtokové výšky na povodí vodoměrných stanic.

Tab. 3.1 Průměrné hodnoty ukazatele předchozích srážek (API_{30}) a srážek na povodí vybraných vodoměrných stanic, odtoková výška a koeficient odtoku.

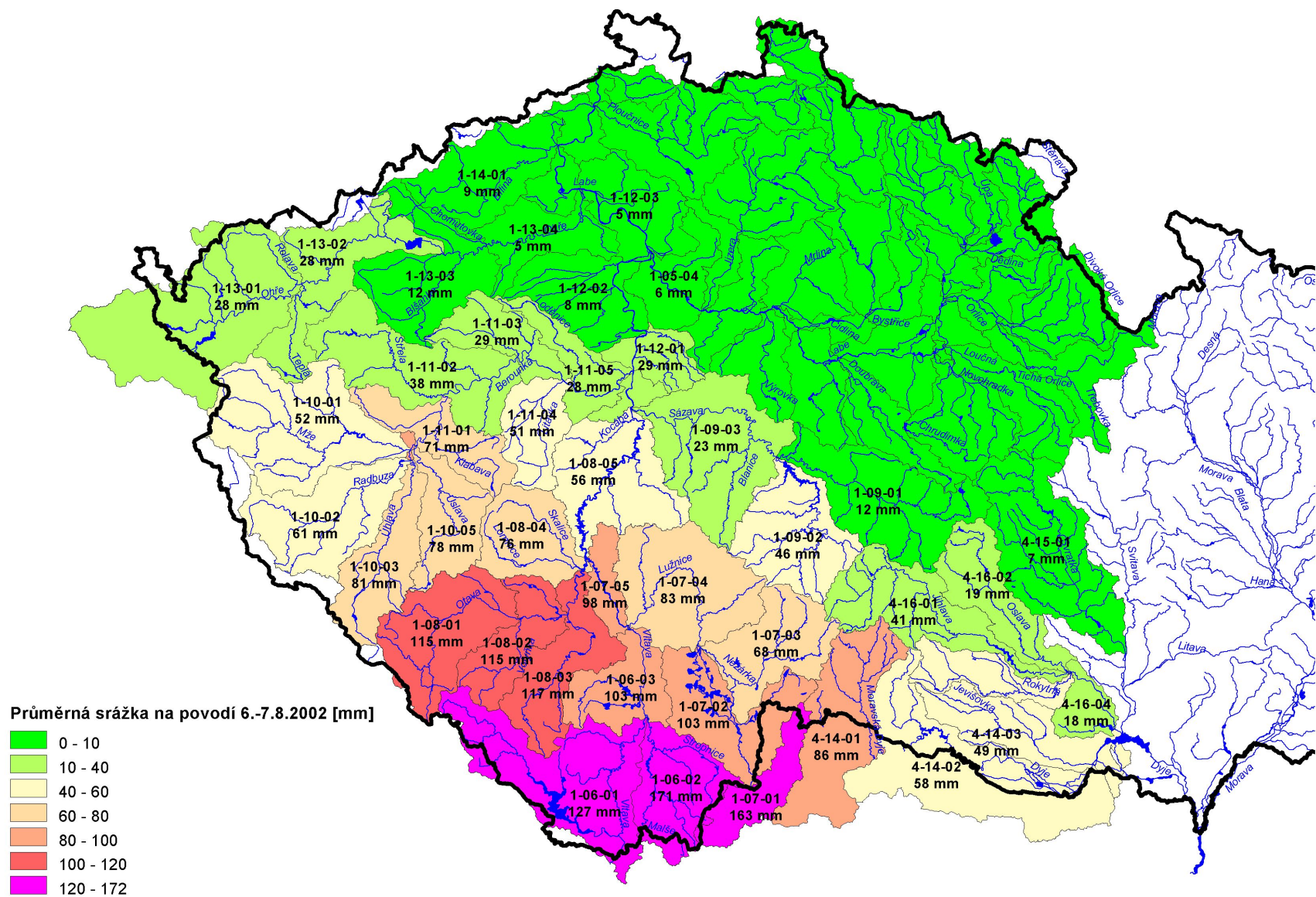
Id	Profil	Tok	API 6. 8. [mm]	API 11. 8. [mm]	Srážky [mm]	Odtok [mm]	koeficient odtoku
0845	Jablonec nad Jizerou	Jizera	36.8	30.5	203.8	72.5	0.36
0910	Železný Brod	Jizera	31.7	26.2	121.4	37.5	0.31
1018	Předměřice	Jizera	34.8	28.0	83.1	13.8	0.17
1040	Brandýs nad Labem	Labe	40.7	31.0	78.5	8.8	0.11
1110	Břeží	Vltava	31.6	119.1	273.6	165.0	0.60
1120	Kaplice	Malše	39.9	174.7	324.9	240.1	0.74
1125	Ličov	Černá	36.7	209.0	395.2	299.0	0.76
1126	Pořešín	Malše	37.2	176.9	340.0	251.5	0.74
1130	Římov	Malše	35.8	170.7	330.9	238.4	0.72
1150	Roudné	Malše	31.6	161.2	321.8	223.6	0.69
1151	České Budějovice	Vltava	31.7	133.5	289.5	185.4	0.64
1310	Klenovice	Lužnice	38.9	104.8	219.5	119.6	0.54
1330	Bechyně	Lužnice	41.5	102.1	213.5	107.3	0.50
1380	Sušice	Otava	31.3	117.8	280.1	141.6	0.51
1430	Němčice	Volyňka	38.1	113.0	250.6	148.4	0.59
1500	Heřmaň	Blanice	47.8	119.3	266.7	154.1	0.58
1510	Písek	Otava	39.3	113.8	250.8	136.4	0.54
1520	Dolní Ostrovec	Lomnice	37.2	85.8	182.7	106.5	0.58
1530	Varvažov	Skalice	26.9	70.2	174.1	70.6	0.41
1610	Zruč nad Sázavou	Sázava	40.5	40.2	144.0	35.2	0.24
1672	Nespeky	Sázava	43.8	50.7	141.9	32.4	0.23
1690	Zbraslav	Vltava	38.5	92.0	210.0	105.6	0.50
1730	Stříbro	Úhlavka	33.9	62.6	117.1	37.7	0.32
1790	Staňkov	Radbuza	27.2	60.6	134.1	42.8	0.32
1799	Lhota	Radbuza	29.5	70.7	152.6	61.1	0.40
1820	Klatovy	Úhlava	38.2	109.8	250.6	104.3	0.42
1830	Štěnovice	Úhlava	32.7	95.7	222.6	96.8	0.43
1860	Plzeň-Bílá Hora	Berounka	32.0	75.6	156.9	60.1	0.38
1870	Koterov	Úslava	28.1	78.3	218.3	110	0.50
1880	Nová Huť	Klabava	23.9	74.8	226.9	100.6	0.44
1900	Plasy	Střela	22.5	45.5	126.6	12.8	0.10
1910	Liblín	Berounka	28.4	70.6	164.7	64.4	0.39
1960	Čenkov	Litavka	23.8	71.1	204.3	73.2	0.36
1973	Beroun	Litavka	21.6	58.9	181.5	49.8	0.27
1980	Beroun	Berounka	27.7	66.3	163.9	65.9	0.40
2001	Praha-Chuchle	Vltava	35.0	82.9	193.9	92.5	0.48
2210	Ústí nad Labem	Labe	36.2	61.8	147.1	54.7	0.37
2260	Trmice	Bílina	36.5	32.5	142.6	24.5	0.17
3200	Hrádek	Lužická Nisa	42.3	36.9	156.9	51.9	0.33
3230	Frydlant	Smědá	36.2	30.6	205.0	120.8	0.59
4290	Janov	Moravská Dyje	28.7	65.2	146.8	47.4	0.32
4300	Podhradí	Dyje	37.7	88.7	180.4	70.1	0.39
4320	Vysočany	Želetavka	24.9	72.8	148.9	45.2	0.30
4340	Vranov	Dyje	34.9	84.2	172.3	62.7	0.36
4350	Znojmo	Dyje	34.6	81.4	166.4	56.0	0.34
4370	Trávní Dvůr	Dyje	34.2	76.1	150.6	36.8	0.24
4650	Dvorce	Jihlava	26.9	55.3	151.5	47.3	0.31



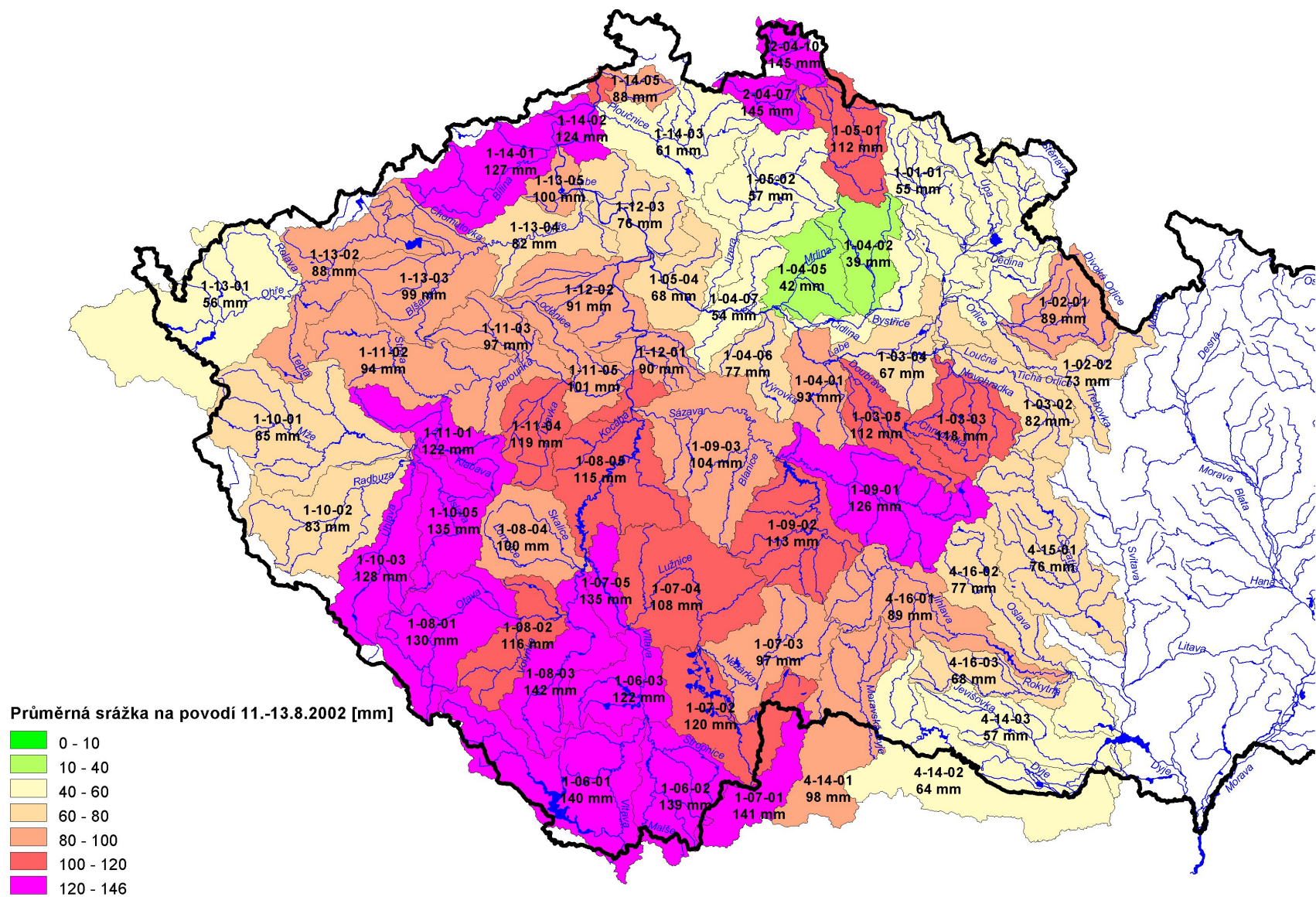
Obr. 3.4 Srážkoodtokový vztah na povodí Vltavy nad vodním dílem Orlik.

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy (VÚMOP) odvodil některé hydrologické charakteristiky půd, které jsou důležité pro posuzování retenční schopnosti povodí a jsou podstatným zdrojem informací pro modelování povodňového odtoku. Konkrétně se jedná o rychlost infiltrace a retenční vodní kapacitu půd. Tyto hodnoty jsou v rastru 1×1 km k dispozici v rámci celé ČR jako charakteristické hodnoty pro každý pixel. Protože jako model pro stanovení povodňového odtoku ze srážek je hojně využívána metoda CN-křivek, a byla využita i v našem případě, byly na základě jmenovaných charakteristik půd stanoveny tzv. hydrologické skupiny půd. Hodnoty CN byly poté určeny v GIS z překryvu vrstev využívání území (Corine Land Cover) a zmíněných hydrologických skupin půd.

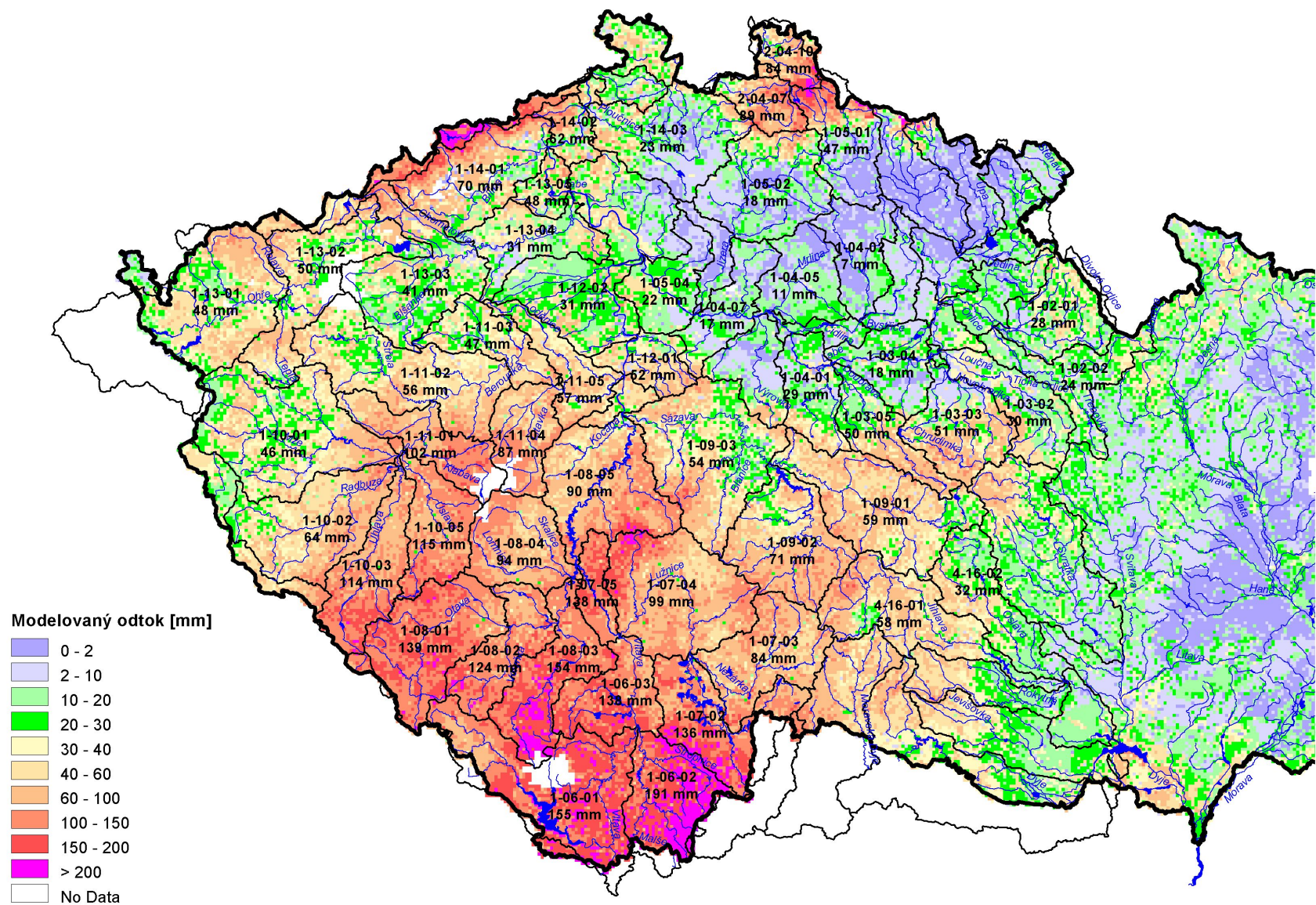
V rámci I. etapy Projektu byly zpracovány gridové mapy srážek za jednotlivé dny obou povodňových epizod. Tyto mapy byly nyní využity ke zpracování map průměrných srážek na vybraných povodích (III. řádu dle čísel hydrologického pořadí) za obě povodňové epizody. Mapy průměrných srážek na povodí jsou uvedeny na obrázcích 3.5 a 3.6. V mapách je uvedeno u vybraných povodí číslo hydrologického pořadí a hodnota průměrné srážky na povodí za příslušnou epizodu.



Obr. 3.5 Průměrné srážky na vybraných povodích v první srážkové epizodě.



Obr. 3.6 Průměrné srážky na vybraných povodích ve druhé srážkové epizodě.



Obr. 3.7 Odtokové výšky modelované na základě metody SCS (pomocí hodnot CN-křivek).

Tab. 3.2 Porovnání velikosti odtoku vyhodnoceného z objemu povodňové vlny (odtok) a odtoku modelovaného na základě metody SCS (metoda CN-křivek)

Id	Profil	Tok	Odtok [mm]	Odtok modelovaný [mm]
0845	Jablonec nad Jizerou	Jizera	72.5	101.3
1040	Brandýs nad Labem	Labe	8.8	23.4
1125	Líčov	Černá	299.0	235.5
1126	Pořešín	Malše	251.5	192.0
1150	Roudné	Malše	223.6	189.7
1151	České Budějovice	Vltava	185.4	165.4
1330	Bechyně	Lužnice	107.3	112.6
1380	Sušice	Otava	141.6	145.4
1430	Němětice	Volyňka	148.4	135.5
1500	Heřmaň	Blanice	154.1	159.4
1510	Písek	Otava	136.4	141.3
1610	Zruč nad Sázavou	Sázava	35.2	59.1
1672	Nespeky	Sázava	32.4	60.1
1690	Zbraslav	Vltava	105.6	111.5
1799	Lhota	Radbuza	61.1	62.1
1830	Štěnovice	Úhlava	96.8	114.3
1860	Plzeň-Bílá Hora	Berounka	60.1	67.2
1870	Koterov	Úslava	110	115.1
1880	Nová Huť	Klabava	100.6	129.0
1900	Plasy	Střela	12.8	48.0
1910	Liblín	Berounka	64.4	74.6
1960	Čenkov	Litavka	73.2	100.4
1973	Beroun	Litavka	49.8	88.7
1980	Beroun	Berounka	65.9	72.6
2001	Praha-Chuchle	Vltava	92.5	98.0
2210	Ústí nad Labem	Labe	54.7	66.8
3200	Hrádek	Lužická Nisa	51.9	88.4
3230	Frýdlant	Smědá	120.8	113.9

Gridové mapy srážek ale posloužily zejména k modelovému výpočtu odtokových výšek, a to rovněž v gridové formě. Pro jejich výpočet byla použita metoda SCS (Soil Conservation Service), která využívá vztahu:

$$ACEXS_i = \frac{(ACRAN_i - IA)^2}{ACRAN_i - IA + S} \text{ [mm]}, \quad (3.3)$$

kde

$ACEXS_i$ je velikost efektivního deště (odtoku) v mm v součtu od počátku události po časový interval i ,

$ACRAN_i$ je velikost srážky v mm v součtu od počátku události po časový interval i ,

$$S = \frac{25400 - 254 \times CN}{CN} \text{ [mm]} \quad \text{je maximální retence povodí,} \quad (3.4)$$

IA je počáteční ztráta na povodí v mm, vypočítaná ze vztahu $n \times S$ (n je obvykle rovno hodnotě 0,2).

Uvedený vzorec (3.3) se využívá v případě následného výpočtu průběhu povodňové vlny. V našem případě bylo cílem stanovit pouze celkovou hodnotu odtokové výšky a zároveň bylo důležité vyjádřit změnu hodnoty počáteční ztráty na základě předchozí nasycenosti povodí. Koeficient n byl proto určen jako násobek poměru API ke dni 6. srpna 2002 vůči normálu API. Rovněž bylo nutné vypočítat odtok z obou srážkových epizod, ale vzhledem k tomu, že mezi výskytem obou epizod byl časový interval několika dní, byly srážky za první epizodu uvažovány ve formě API k datu začátku druhé epizody. Tím byl částečně zohledněn vliv evapotranspirace v bezsrážkovém období. Mapa gridových hodnot odtoku určených dle vzorce (3.3) a na základě výše uvedené mírně modifikované metodiky je uvedena na obrázku 3.7. Mapa obsahuje také vypočítané průměrné hodnoty odtoku na vybraných povodích III. řádu (stejných jako na obr. 3.5 a 3.6). Mapa vcelku dobře vystihuje rozložení modelovaných odtokových výšek na základě plošného rozložení srážek.

Pro účely porovnání modelovaného odtoku se skutečným odtokem byly vypočteny průměrné hodnoty modelovaného odtoku na povodích vybraných vodoměrných stanic. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.2.

V tabulce jsou tučně označeny hodnoty modelovaného odtoku, který se liší od skutečného odtoku o méně než 15 %, naopak kurzívou ty hodnoty modelovaného odtoku, které se liší o více než 50 %. Největší shody bylo dosaženo v povodí Otavy a na Lužnici, relativně dobře vychází Berounka a Vltava. Horší jsou naopak výsledky v povodích, kde nebyla taková extremita povodně. Lze si to vysvětlit tím, že značná část odtoku byla zachycena nádržemi (např. na Želivce) a další retencí, např. rozlivy a dodatečným vsakem vody do půdy a podloží. Nelze z toho v žádném případě vyvozovat závěr, že v případech velkých rozdílů průtoky mohly být či dokonce byly chybně vyhodnoceny, spíše to poslouží k hlubší detailní analýze fungování použitého modelu a možnostem jeho využívání k odvozování návrhových povodňových vln v posudkové praxi ČHMÚ.

V rámci III. etapy Projektu předpokládáme upřesnění mapy na obrázku 3.7, a to na podkladě vyhodnocení průtoků a stanovení odtokových výšek ve všech vodoměrných stanicích, které v době zpracování gridové mapy odtoku ještě všude nebylo k dispozici.