

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



**VYUŽITÍ DRUŽICOVÝCH RADAROVÝCH DAT
PRO MONITOROVÁNÍ ZÁPLAV V ZÁVISLOSTI
NA TYPU KRAJINNÉHO POKRYVU**

Diplomová práce

Tomáš Rauch

duben 2011

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jan Kolář, Csc.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval.

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

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

V Plzni 28. dubna 2011

.....

Tomáš Rauch

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Doc. Ing. Janu Kolářovi, CSc. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále pak děkuji firmě Gisat s.r.o. za poskytnuté radarové snímky, Ing. Tomášovi Křížovi z Povodní Moravy s.p. za poskytnutá data a informace a plk. Ing. Jaroslavu Morávkovi z pracovního štábu povodňové komise Plzeňského kraje za poskytnuté informace. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia.

Využití družicových radarových dat pro monitorování záplav v závislosti na typu krajinného pokryvu

Abstrakt

Cílem této práce je najít metodu pro monitorování povodní z radarových snímků. Práce se nejdříve věnuje povodním a organizaci povodňové ochrany. Dále je popisován princip fungování zobrazovacích radarů. V práci jsou také uvedeny vybrané družice s parametry instalovaných radarů. Další část se věnuje interakci radarového paprsku s různými typy povrchu. Na tuto část navazuje přehled jednotlivých metod, které využívají radarová data pro detekci povodní.

V praktické části je na vybraná území zasažená povodní aplikovaná metoda na zjišťování rozsahu zaplaveného území. Použitý postup zahrnuje kombinaci klasifikace radarového snímku a analýzy s využitím digitálního modelu terénu. Výsledkem je stanovení hranice zatopeného území.

Výsledné hranice zatopených území jsou porovnávány s dostupnými pozemními údaji, převážně maximálními hranicemi zatopených území z jednotlivých povodní.

Klíčová slova: SAR, monitorování záplav

Flood monitoring using satellite radar data for different land cover categories

Abstract

The aim of this thesis is to find method for flood monitoring from radar images. The thesis deals with flood in general and with organization of flood protection. There are described principles of radar sensors. There is also summary of satellites with their parameters. Next part of the thesis describes interaction between radar beam and different types of surface. Theoretical part is closed by overview of the existing methods for flood monitoring.

In the practical part there is method for flood monitoring applied to areas affected by flood. The process is based on the classification of the radar image. Using classification and digital elevation model is drawn boundary of flooded area.

The result boundaries are compared with the existing maximal flooded areas.

Keywords: SAR, flood monitoring

Obsah

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	9
1 Úvod	10
1.1 Cíle práce.....	11
2 Povodně a organizace povodňové ochrany.....	12
2.1 Povodně.....	12
2.1.1 Příčiny a faktory ovlivňující vznik povodní	12
2.1.2 Druhy povodní v Česku.....	13
2.2 Organizace povodňové ochrany v ČR.....	14
2.2.1 Struktura řízení povodňové ochrany.....	14
2.2.2 Povodňový plán	15
3 Princip radaru s bočním pohledem.....	16
3.1 Geometrie radaru s bočním pohledem	17
3.2 Rozlišení radarových snímků	18
3.3 Parametry určující intenzitu zpětného odrazu.....	20
4 Družice s radary se syntetickou aperturou.....	22
4.1 ERS	22
4.2 Envisat	22
4.3 Radarsat	23
4.4 TerraSAR-X	26
4.5 JERS.....	28
4.6 ALOS	28
5 Mapování rozsahu povodní z radarových dat.....	29
5.1 Radarový paprsek a jednotlivé typy vodních ploch.....	29
5.1.1 Hladké vodní plochy.....	30
5.1.2 Vodní plochy s drsným povrchem	31
5.1.3 Zaplavená vegetace.....	31

5.1.4	Urbanizovaná území	34
5.2	Metody detekce povodní	34
5.2.1	Metoda prahování	35
5.2.2	Řízená Klasifikace.....	36
5.2.3	Multitemporální vyhodnocení snímku	36
5.2.4	Pravděpodobnostní klasifikace.....	37
5.2.5	Objektově orientovaná klasifikace	38
5.2.6	Použití DMT	41
5.2.7	Shrnutí metod	42
6	Metodika	43
7	Použitá data	47
7.1	Radarová data	47
7.2	Ostatní data	51
8	Zpracování dat a výsledky.....	53
8.1	Hodnocení výsledků.....	63
8.1.1	Severní Morava.....	64
8.1.2	Jižní Morava.....	68
8.1.3	Střední Čechy	72
8.1.4	Shrnutí	74
9	Diskuze	75
10	Závěr	77
	Seznam zdrojů a informací.....	78
	Seznam příloh	83

Seznam obrázků

Obrázek 1: SAR.....	16
Obrázek 2: Zjednodušený nákres snímání bočním radarem	17
Obrázek 3: Vliv reliéfu na radarové snímky.....	18
Obrázek 4: Syntetická apertura radaru	19
Obrázek 5: Vliv drsnosti povrchu na rozptyl	21
Obrázek 6: Režimy snímání družice Radarsat 1	24
Obrázek 7: Režimy snímání družice Radarsat 2	25
Obrázek 8: Režimy snímání TerraSAR-X.....	27
Obrázek 9: Mechanismus zpětného rozptylu pro různé typy pokryvu v různých podmínkách a relativní hodnoty zpětného rozptylu	29
Obrázek 10: Histogramy SAR snímků stejného území s rozdílnými úhly dopadu.....	30
Obrázek 11: Braggova rezonance	31
Obrázek 12: Princip odrazu v nezaplavených a zaplavených lesních plochách	32
Obrázek 13: Koeficienty zpětného rozptylu u vegetace, porovnání pásem L, X	32
Obrázek 14: Grafy ukazující průměrné hodnoty intenzit odraženého záření	33
Obrázek 15: Zaplavená zástavba	34
Obrázek 16: Radarový snímek a místní úhly dopadu.....	37
Obrázek 17: Pravděpodobnost pro klasifikaci vody na vybraném území.....	37
Obrázek 18: Objektově orientovaná klasifikace jezera Schulens v Belgii.....	38
Obrázek 19: Inicializované polygony.....	39
Obrázek 20: Externí síla active contour algoritmu	40
Obrázek 21: Vývoj křivky při nastavení úrovní	40
Obrázek 22: Vývoj active contour algoritmu s nastavením úrovní	40
Obrázek 23: Rozdíly ve výškách hladin u referenčního modelu a výsledku vzniklého z klasifikace radarového snímku.....	41
Obrázek 24: Princip ortorektifikace	44
Obrázek 25: Histogramy a klasifikace snímků bez radiometrické korekce.....	44
Obrázek 26: Úseky zájmového území.....	46
Obrázek 27: Zpracovávané území severní Moravy	48
Obrázek 28: Zpracovávané území jižní Moravy	50
Obrázek 29: Graf průtoků na vodoměrných stanicích	50
Obrázek 30: Zpracovávané území středních Čech	51
Obrázek 31: Schéma vzniku DMT	53
Obrázek 32: Postup zpracování radarového snímku.....	54
Obrázek 33: Původní snímek (vlevo) a snímek po aplikaci speciálního filtru.....	55
Obrázek 34: Histogram snímku ze 14.7.1997	55
Obrázek 35: Klasifikované volné plochy.....	56
Obrázek 36: Porovnání původní klasifikace a klasifikace po aplikaci morfologického filtru	57

Obrázek 37: Úseky zájmového území jižní Moravy.....	58
Obrázek 38: Vymezování zaplaveného území.....	58
Obrázek 39: Hranice zatopeného území z 10. 7. 1997.....	59
Obrázek 40: Hranice zatopeného území ze 14. 7. 1997.....	60
Obrázek 41: Hranice zatopeného území z 18. 8. 2002.....	61
Obrázek 42: Hranice zatopeného území z 10. 7. 1997 po korekcích.....	62
Obrázek 43: Hranice zatopeného území ze 14. 7. 1997 po korekcích.....	63
Obrázek 44: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území z Dibavod.....	64
Obrázek 45: Zaplavené území v Olomouci v porovnání s maximálním rozsahem zatopeného území z Dibavod.....	65
Obrázek 46: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a rozlivu povodní v roce 1997.....	66
Obrázek 47: Zaplavené území v Olomouci v porovnání s rozlivem pov. v r. 1997.....	67
Obrázek 48: Porovnání klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území.....	68
Obrázek 49: Nepřesnosti hranice maximálního rozlivu.....	69
Obrázek 50: Klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a rozlivu povodní v roce 1997.....	70
Obrázek 51: Odlišnosti v klasifikaci v okolí Uherského Hradiště.....	71
Obrázek 52: Porovnání klasifikace ze SAR (18. 8. 2002) a maximálního rozsahu zatopeného území.....	72
Obrázek 53: Výškové rozdíly zaplavených oblastí.....	73
Obrázek 54: Nepřesnosti v DMT.....	74
Obrázek 55: Přesné vykreslení zátopového území ve Veselí na Moravě.....	74

Seznam tabulek

Tabulka 1: Oblasti mikrovlnného záření	16
Tabulka 2: Režimy SAR na družici ERS.....	22
Tabulka 3: Technické parametry ASAR	23
Tabulka 4: Parametry SAR družice Radarsat 1	23
Tabulka 5: Režimy snímání družice Radarsat 1	24
Tabulka 6: Režimy snímání družice Radarsat 2	25
Tabulka 7: Inovace a výhody družice Radarsat-2.....	26
Tabulka 8: Režimy snímání družice TerraSAR-X	27
Tabulka 9: Režimy snímání družice ALOS	28
Tabulka 10: Použitá radarová data	47
Tabulka 11: Kulminační průtoky při povodních v roce 1997	49
Tabulka 12: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území z Dibavod	65
Tabulka 13: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a rozlivu povodní v roce 1997	67
Tabulka 14: Porovnání klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území	69
Tabulka 15: Porovnání klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a rozlivu povodní v roce 1997	71
Tabulka 16: Porovnání klasifikace ze SAR (18. 8. 2002) a maximálního rozsahu zatopeného území	73

1 Úvod

V současné době se stále častěji setkáváme s extrémními projevy klimatu. V Česku se nejčastěji vyskytují formou povodní. Způsobují největší škody na majetku a postihují největší počet lidí (The International Disaster database, c2009). Často dochází i k ohrožení na životech, a proto je snaha nalézt nejhodnější informační zdroj monitorování povodní, který by byl schopen rychle a spolehlivě sdělovat informace o probíhající akutní události. V současné době se v Česku spoléhá hlavně na zdroje Českého hydrometeorologického ústavu.

Současné postupy při určování rozsahu povodně krizovými štáby jsou pouze orientační. Vycházejí z naměřených vodních stavů na profilech vodoměrných stanic. Na základě těchto hodnot je použit příslušný model zátopových území. Modely odpovídají statisticky určeným hodnotám N-letých průtoků. Tato data nedokážou zaručit správné určení zaplaveného území, protože po povodních mnohdy dochází k výstavbě protipovodňových opatření, která mohou výsledná zátopová území velmi změnit. Přínosem by mohla být právě data ze zobrazujících radarů, které dokážou reálnou situaci zachytit.

Snahou je využívat v těchto situacích dálkového průzkumu Země. Družicová data jsou velmi užitečným nástrojem pro monitorování přírodních katastrof. Obrovskou výhodou družic je schopnost nasnímat během krátké doby rozsáhlá území. Z dat zhotovené snímky je možné dostat ke koncovému uživateli v řádech hodin až dní. Družicové snímky přinášejí aktuální informace o sledované situaci mnohem rychleji, než by je dokázaly jiné způsoby šetření. Při mapování povodní právě čas hraje velmi důležitou roli, aby se informace dostaly ke krizovým štábům a záchranným složkám.

Pro monitorování katastrof lze využít družicová data, buď optická, nebo radarová. V případě povodní jsou častěji využívána radarová data, jejichž velká výhoda spočívá ve schopnosti získávat informace bez ohledu na oblačnost a denní dobu. Používání optických dat je z tohoto důvodu omezeno. Proto se tato práce věnuje výhradně mapování povodní pomocí radarových snímků. Nespornou výhodou radarových dat je i možnost částečně pronikat skrz koruny stromů. Tím se nabízí možnost mapovat povodeň i na vegetací pokrytých území.

1.1 Cíle práce

Cílem této práce je najít metodu pro využití radarových snímků k vyhodnocování povodní. Aby bylo možné provést konkrétní zpracování dat, bude nejdříve proveden průzkum používaných metod pro určování rozsahu povodní, jemuž budou předcházet informace o principu pořizování radarových snímků a přehled družicových systémů pořizujících radarové snímky. Dále bude popsána interakce radarového paprsku s jednotlivými typy povrchu.

Následná analýza se zaměří na různé druhy povrchu, především na způsoby použitelné pro území a situace, kdy je ztížená detekce na základě přímé viditelnosti vodní hladiny, jako je třeba v zástavbě, lesním porostu nebo dostatečně vzrostlé vegetaci. Každý z těchto povrchů přináší obtíže, které se bude snažit tato práce omezit.

2 Povodně a organizace povodňové ochrany

V první části se kapitola věnuje povodním obecně, jejich příčinám a vymezuje typy povodní. Druhá část je zaměřena na strukturu řízení povodňové ochrany a povodňový plán.

2.1 Povodně

Problematika povodní je velmi rozsáhlá. Tato kapitola se věnuje definici povodní a příčinám a druhům povodní v Česku. Povodně spadají do kategorie přírodních katastrof. Povodeň lze definovat podle Langhammera (2009, s. 2) jako „náhlé zvýšení průtoku v důsledku srážkové činnosti, ale také zmenšením průtočnosti koryta např. ledovou zácpou, či bariérou ze splavených překážek“.

2.1.1 Příčiny a faktory ovlivňující vznik povodní

Většinu povodňových situací způsobují srážky, v zimním období pak náhlé oteplení, při kterém dochází k tání sněhové pokrývky. Povodeň může vyvolat i tvorba a pohyb ledových mas v tocích. V ojedinělých případech vedou ke vzniku povodňové situace lokálního charakteru také jiné zvláštní podmínky, jako je například sesuv půdy, při kterém dojde k přehrazení toku (Matějček a Hladný, 1999).

„Dávka vydatného deště nebo tání sněhu však nemusí být jedinou příčinou vzniku povodně. Záleží rovněž na hydrologické situaci v povodí, zejména na tom, nakolik předešlé srážky nasýtily povodí, aby mohlo pojmout ještě další vodu, anebo zda tání sněhové pokrývky probíhá na zamrzlé půdě, která brání vsaku, či naopak. Ke vzniku povodňového nebezpečí na větších povodích dochází zpravidla až poté, kdy je překročeno určité množství spadlých srážek, anebo až po určité délce trvání kladných teplot vzduchu. Zjednodušeně si lze představit, že o tom rozhoduje kromě počasí také stav čtyř složek krajiny, které jsou schopny, každá svým způsobem, odtok ze spadlých srážek dočasně zadržovat či navíc i shromažďovat“ (Matějček a Hladný, 1999, s. 5). Podle Langhammera (2009) se tyto faktory nazývají předběžné.

Intercepce je vliv, který zadržuje část dešťových srážek povrchem vegetace. Je dán druhem, hustotou a vývojovým stavem porostu, který může navíc zpomalovat pohyb vody na povrchu a tím prodlužovat dobu možného vsaku. Přímé zadržení vody povrchem vegetace dokáže ovlivnit pouze počáteční fázi povodně.

Detence je schopnost zadržovat odtok naplňováním prostorů nerovností, prohlubní a bezodtokých depresí terénního povrchu vodou. Na rovinách se může dočasně akumulovat větší množství vody než ve svažitém terénu.

Infiltrace znamená vsakování vody do půdních vrstev. Půdní prostředí dokáže akumulovat značný objem srážkové vody. Závisí na typu půdy, její mocnosti, pórovitosti, obsahu humusu atd., ale i na její nasycenosti vodou. Pokud je intenzita srážek větší než intenzita vsakování, dochází k povrchovému odtoku.

Objem říční sítě vyjadřuje plnění koryt toků včetně vody vtlačené do přilehlých podpovrchových částí břehové zóny v důsledku hydrostatického tlaku zvětšujícího se při stoupající vodní hladině. Nejdříve se tedy vyplní objem koryta, které se chová jako nádrž. Následně dochází k rozlivu do inundačních území podél toku (objem inundace).

Dalším, ne přírodním, faktorem, který může ovlivnit průběh povodně, jsou vodní nádrže. Zadržováním částí povodňové vlny mohou zmenšovat velikost povodňových průtoků a zpožďovat jejich postup (Matějček a Hladný, 1999) a (Langhammer, 2009).

2.1.2 Druhy povodní v Česku

Matějček a Hladný (1999) rozdělují povodně podle příčin vzniku, doby vzniku a velikosti zasaženého území.

Letní typ povodní z regionálních dešťů trvá obvykle několik dnů, jeho výskyt je možný na celém území republiky. Deště postihují rozsáhlé oblasti a jsou vázány na výskyt atmosférických front a tlakových níží. Rozsáhlé záplavy jsou především na středních a dolních úsecích vodních toků.

Zimní a jarní typ povodní z tání sněhu bývá nejvýraznější, pokud leží sníh i v nížinách a podhůřích. Tento typ povodní může být doprovázen srážkami, které intenzitu povodní ještě zvýší. Záleží také na teplotě, mocnosti sněhové pokrývky, vodní hodnotě sněhu, expozici povodí, nadmořské výšce a na absorpčních vlastnostech půdy. Zaplavená území se vyskytují především v nížinách a pahorkatinách.

Letní typ povodní neboli „bleskové povodně“ vznikají následkem intenzivních krátkodobých srážek, jejich intenzita může v extrémních případech přesáhnout 100 mm/hod. Vyznačují se krátkým trváním a postihují obvykle malé oblasti (obvykle do desítek km²). Záplavy vznikají většinou na malých tocích. Tyto povodně se mohou vyskytnout kdekoli v republice. Vyznačují se obtížnou předpovědí místa výskytu.

Zimní a jarní typ ledových povodní vzniká zmenšením průtočnosti koryta, což má za následek vzestup hladiny toku. Obvyklou příčinou je ledová zácpa.

Povodně ze specifických příčin nastávají např. přehrazením toku sesuvem půdy, masou horniny či sněhu. Může dojít také k poškození či protržení vodních nádrží a rybníků, ucpání mostních otvorů, propustků nebo koryta unášeným splavím (keři,

kmeny stromů, dřevem a jinými spláchnutými předměty). Také jsou možné záplavy ze zpětného vzdutí, kdy vyšší hladina na hlavním toku způsobuje vzdouvání vody v dolních úsecích přítoků.

2.2 Organizace povodňové ochrany v ČR

Základním dokumentem po ústřední řízení povodňové ochrany v Česku povodňový plán. Obsahuje podrobné rozdělení úkolů a činností pro provádění opatření k ochraně před povodněmi. Základní strukturu povodňových plánů tvoří:

- povodňové plány obcí
- povodňové plány správních obvodů obcí s rozšířenou působností
- povodňové plány správních obvodů krajů
- povodňový plán České republiky

2.2.1 Struktura řízení povodňové ochrany

Ochrana před povodněmi je řízena povodňovými orgány státní správy, které ve své územní působnosti plně odpovídají za organizaci povodňové služby, řídí, koordinují a kontrolují činnosti ostatních účastníků ochrany před povodněmi. Ochranu před povodněmi zabezpečují tyto povodňové orgány:

- Mimo povodeň
 - orgány obcí
 - obecní úřady obcí s rozšířenou působností
 - krajské úřady
 - ministerstvo životního prostředí a vnitra
- V době povodně
 - povodňové orgány obcí
 - povodňové orgány obcí s rozšířenou působností
 - povodňové komise krajů
 - ústřední povodňová komise České republiky

Kromě povodňových orgánů všech stupňů jsou dalšími účastníky povodňové ochrany zejména:

- správce povodí a ostatních drobných toků
- Český hydrometeorologický ústav
- vlastníci nebo správci vodních děl a objektů na vodních tocích
- Hasičské záchranné sbory
- složky Policie ČR

- Územní střediska záchranné služby
- složky Armády ČR
- orgány hygienické služby

Zapojení ostatních účastníků ochrany před povodněmi závisí na charakteru povodňové situace a místních podmínkách. Zástupci nejdůležitějších subjektů jsou členy příslušných povodňových komisí (Ministerstvo Životního prostředí ČR, 2011) a (Janko, 2009).

2.2.2 Povodňový plán

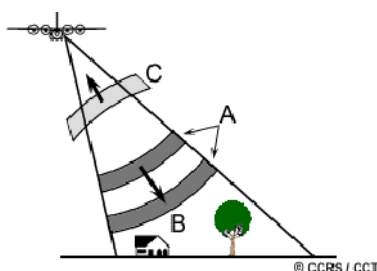
V povodňových plánech je kladen důraz na včasnou a spolehlivou informovanost o vývoji povodně, na možnosti ovlivnění odtokového režimu, na včasnou aktivaci povodňových orgánů, zabezpečení hlídkové služby a ochrany objektů, přípravu a organizaci zabezpečovacích a záchranných prací a zajištění nezbytných povodní narušených funkcí v postiženém území.

Vyrozumění o možnostech vzniku povodní je zabezpečeno předpovědní povodňovou službou, kterou zabezpečuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) ve spolupráci se správcem povodí. Základem předpovědní povodňové služby je soubor hlásných stanic, který je tvořen vybranými limnigrafy, vodními díly, srážkoměrnými stanicemi a profesionálními meteorologickými stanicemi. Po zpracování je zveřejněn na internetu kontinuální přehled o hydrologické situaci. Při nebezpečí povodně nebo při dosažení prvního stupně povodňové aktivity dochází k rozšíření počtu objektů hlásné sítě a zvýšení frekvence. Upozornění, výstrahy a informační zprávy ČHMÚ jsou rozesílány na krajský úřad, na obce s rozšířenou působností a na obce. Za povodňové situace se běžný informační tok rozšiřuje o územně příslušné povodňové komise a o příjem a předávání zpráv hlásné povodňové služby. Hlásná povodňová služba zabezpečuje informace povodňovým orgánům pro varování obyvatelstva v místě očekávané povodně a místech ležících níže na vodním toku. Také informuje povodňové orgány a účastníky ochrany před povodněmi o vývoji povodňové situace prostřednictvím zpráv a hlášení, která jsou potřebná k vyhodnocování. K dispozici jsou naměřená data o průtoku a výšce hladiny toku. Dostupné jsou také mapové vrstvy záplavových území pro jednoletou, pětiletou, dvacetiletou, padesátiletou a stoletou povodeň. Naměřená data slouží k přibližnému určení velikosti povodně a tím se přibližně určí rozsah zátopového území, na základě takto určeného rozsahu zasaženého území vznikají opatření k ochraně před povodněmi (Ministerstvo Životního prostředí ČR, 2011) a (Janko, 2009).

3 Princip radaru s bočním pohledem

Slovo „radar“ je zkráceně „RAdio Detection And Ranging“. Z názvu vyplývá, že radar byl vyvinut proto, aby pomocí elektromagnetického záření uvedeného rozsahu vlnových délek byly rozpoznávány objekty a jejich umístění (Halounová, 2004). „Existují pasivní radiometry, které pouze přijímají mikrovlnné záření vyzařované jinými objekty, a radiometry aktivní, radary, jež používají k ozařování cíle vlastní zdroj energie“ (Součková, 2010, s. 12). Radary se skládají z vysílače, přijímače, antény a elektronického systému pro zpracování a záznam dat. Vysílač generuje po sobě jdoucí krátké dávky (pulsy mikrovlnného záření (A) v pravidelných intervalech, které jsou vysílány anténou v podobě paprsku (B). Paprsek je vyslán šikmo směrem dolů v pravém úhlu ke směru pohybu nosiče radaru (Obrázek 1). Anténa přijímá část odražené energie (zpětný rozptyl) od různých objektů z povrchu (C). Vzdálenost objektů od radaru a do určité míry i jejich poloha na zemském povrchu může být určena měřením zpoždění mezi vysláním pulsu a příjmem zpětného rozptylu.

Obrázek 1: SAR (Canada Center for Remote Sensing, 2007)



Elektromagnetické vlnění mikrovlnného spektra je charakterizováno vlnovou délkou λ (1 mm – 1 cm), nebo frekvencí f (0,3 – 300 GHz). Mikrovlnná část spektra je oproti optickému či infračervenému velká, dělí se proto do jednotlivých pásem (Tabulka 1).

Tabulka 1: Oblasti mikrovlnného záření (Janda, 2005)

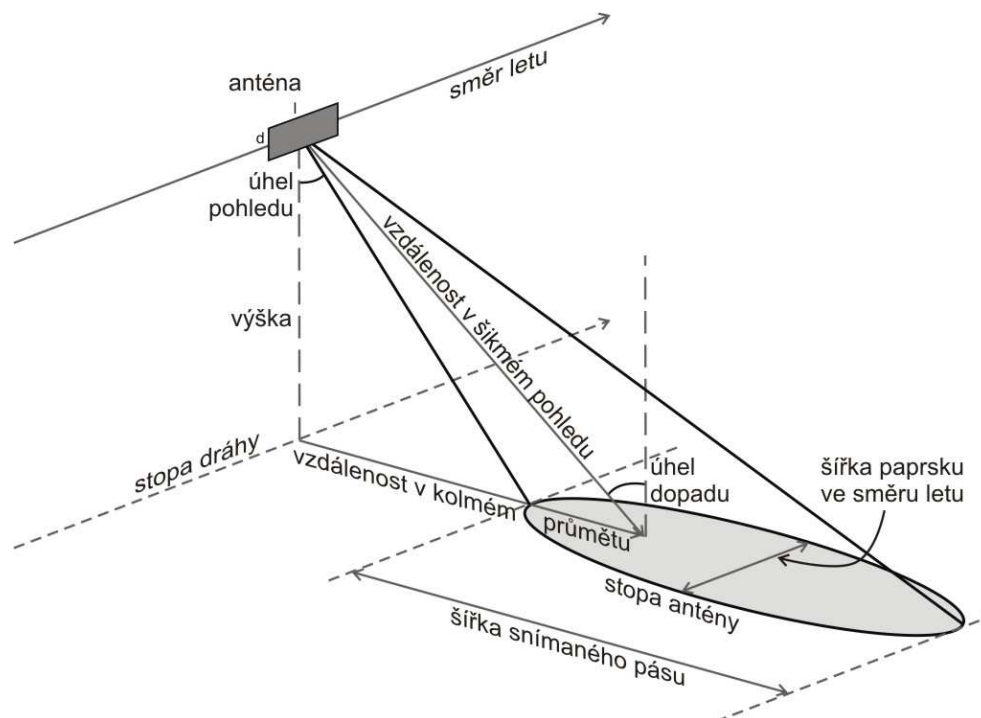
Pásmo	vlnová délka [cm]	frekvence [GHz]
Ka	0,75 - 1,1	40 - 26,5
K	1,1 - 1,67	26,5 - 18
Ku	1,67 - 2,4	18 - 12,5
X	2,4 - 3,75	12,5 - 8
C	3,75 - 7,5	8 - 4
S	7,5 - 15	4 - 2
L	15 - 30	2 - 1
P	30 - 100	1 - 0,3

Polarizace vyjadřuje orientaci vektoru intenzity elektrického pole v elektromagnetické vlně. Vektor intenzity kmitá buď v rovnoběžném směru se zemským povrchem (horizontální polarizace ~ H), nebo v kolmém směru na zemský povrch (vertikální polarizace ~ V). Anténa přijímá podobně horizontálně i vertikálně polarizovanou vlnu, některé radary dokážou přijímat obojí. (Canada Center for Remote Sensing, 2007), (Janda, 2005) a (Součková, 2010). „Radar může vysílat a přijímat mikrovlnné záření o stejné polarizaci (HH,VV), o jiné polarizaci než vysílá (VH,HV), s alternující polarizací (HH, HV se střídá s VV, VH) nebo plně polarizované (HH, VV, HV a VH)“ (Součková, 2010, s. 12).

3.1 Geometrie radaru s bočním pohledem

Radar umístěný na nosiči, vysílá signál šikmo směrem k povrchu pod *úhlem pohledu* a kolmo na *směr letu* (Obrázek 2). Paprsek dopadá na zemský povrch pod *úhlem dopadu*. Území, kde tento paprsek zasáhne povrch, se nazývá *stopa antény*. Šířka snímaného pásu odpovídá poměru vlnové délky a šířky antény (d). Šířka paprsku ve směru letu odpovídá poměru vlnové délky a délky antény (l). Vzdálenost mezi anténou a povrchem ve směru vyslání signálu je určena *vzdáleností v šikmém pohledu*, vzdálenost od stopy dráhy je označena jako *vzdálenost v kolmém průmětu* (Capaliniová, 2006), (Canada Center for Remote Sensing, 2007) a (Součková, 2010).

Obrázek 2: Zjednodušený náčrt snímání bočním radarem (Swart, 2000)



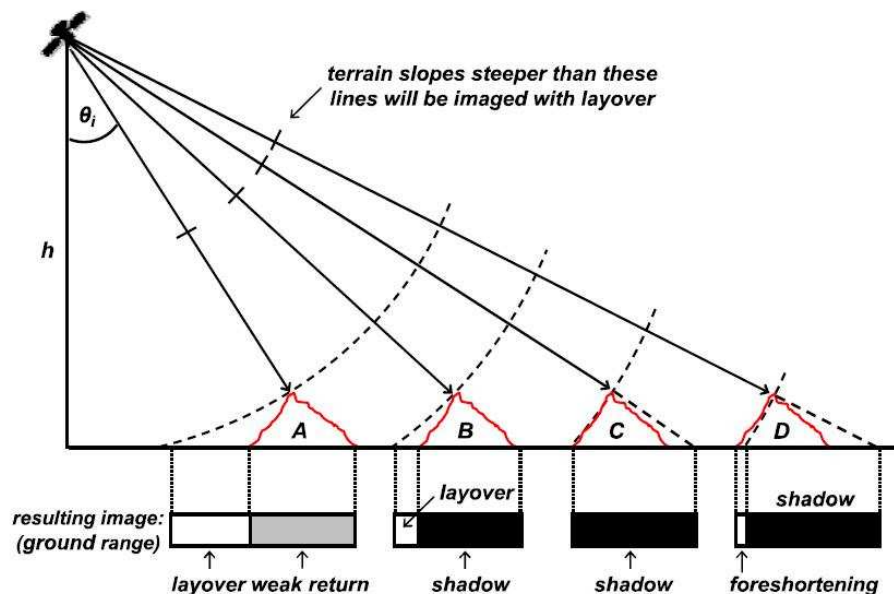
Boční snímání radaru vede k několika důležitým zkreslujícím efektům, hlavně v členitých terénech. Jedná se o překryv (*layover*), krácení (*foreshortening*) a stín (*shadowing*). Tyto efekty závisí hlavně na vztahu mezi sklonitostí terénu a úhlem dopadu.

K překryvu dochází, když se vrátí signál dříve z vrcholu objektu než z jeho paty (Obrázek 3, objekty A, B). To má za následek, že vrchol objektu leží na snímku blíže k senzoru než jeho pata. Nejčastěji k tomuto výsledku dochází za použití malých úhlů dopadu.

Při krácení dochází ke zkracování svahů orientovaných směrem k radaru (Obrázek 3, objekt D). „Nejvíce se projevuje, pokud je svah kolmý na rovinu vysílaného signálu. Úpatí, svah i vrchol jsou na snímku zobrazeny v jednom bodě“ (Součková, 2010, s. 16). Oblasti postižené efektem krácení se jeví jako světlé plochy (Martinis, 2010).

Efekt stínu nastává, když radarový paprsek není schopen ozářit zemský povrch (Obrázek 3, objekt D). Tento efekt vytváří na snímku tmavé plochy. Velikost i počet takto postižených oblastí rostou s úhlem.

Obrázek 3: Vliv reliéfu na radarové snímky (Martinis, 2010)



3.2 Rozlišení radarových snímků

U radarových dat se hodnotí rozlišení ve směru napříč letu (*range direction*) a rozlišení ve směru letu (*azimuth direction*). Rozlišení ve směru napříč letu závisí na délce pulsu. Pro stejnou šikmou vzdálenost platí, že při snižování vzdálenosti v kolmém průmětu bude růst úhel dopadu. Rozlišení ve směru letu je určeno šířkou paprsku. Čím větší je vzdálenost od nosiče, tím je azimutální rozlišení horší. Šířka

paprsku je nepřímo úměrná délce antény, což znamená, že delší anténa dokáže vyslat užší paprsek (Janda, 2005) a (Canada Center for Remote Sensing, 2007).

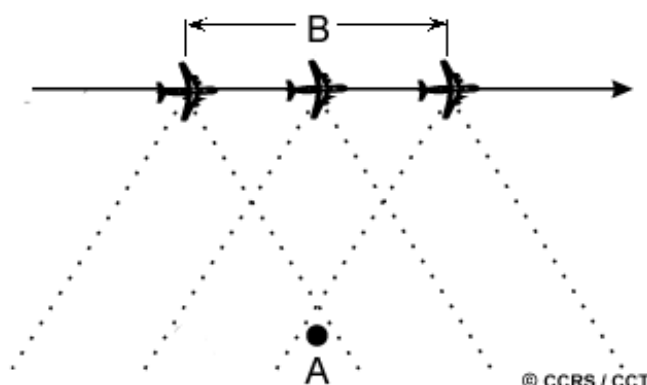
Lepšího rozlišení ve směru napříč letu je možné dosáhnout použitím kratších pulzů. U zlepšení azimutálního rozlišení je limitujícím faktorem délka antény, která je omezena nosností, kterou dokáže letadlo nebo družice unést. Pro zlepšení prostorového rozlišení se používá radar se syntetickou aparaturou (Canada Center for Remote Sensing, 2007) a (Součková, 2010).

Radar se syntetickou aperturou (SAR)

SAR simuluje extrémně dlouhou anténu, pomocí které je schopen získávat data s vysokým rozlišením. Princip syntetické antény (European Space Agency, c2010e) využívá toho, že pohybující se radar ozáří daný objekt postupně z různých směrů. Vysokého rozlišení je tedy dosaženo vícenásobným snímáním objektu (Součková, 2010).

Obrázek 4 ukazuje, jak je toho dosaženo. Jakmile paprsek poprvé dosáhne cíl A, odrazy z jednotlivých pulzů se začnou zaznamenávat. Zatímco se nosič stále pohybuje, všechny odrazy z každého pulzu jsou zaznamenávány po celou dobu, kdy je cíl A v dosahu paprsku. Bod, ve kterém paprsek přestane zachycovat cíl A, určuje délku syntetické antény. Objekty dál od radaru, kde je paprsek širší, budou zaznamenávány déle než objekty bližší.

Obrázek 4: Syntetická apertura radaru (Canada Center for Remote Sensing, 2007)



Dříve bylo řečeno, že azimutální rozlišení je závislé na vzdálenosti od antény. U SARu to však neplatí. Je to dáno tím, že vzdálenější objekty jsou ozařovány déle. To má za následek, že je azimutální rozlišení v celé šíři záběru konstantní (Canada Center for Remote Sensing, 2007). Důležité je, že radar detekuje intenzitu odrazu (tj. amplitudu) i fázi odraženého záření, proto se tento typ radaru nazývá koherentní (Capaliniová, 2006). Koherentní radar porovnává fázi záření odraženého od objektu s fází záření emitovaného vysílačem (Rzemien, 1997). Na základě toho, že radar

dokáže detekovat frekvenční posun, může využít Dopplerova efektu k určení polohy objektu ve směru rovnoběžném s dráhou letu (American Meteorological Society, 2010). „Dopplerův frekvenční posun je změna frekvence signálu v závislosti na relativních rychlostech vysílače a odražeče – rychlost signálu od odražeče se skládá z rychlosti nosiče podle geometrie, a tím vzniká posun ve frekvenci přijatého signálu. Rozdíl fází přijatého signálu závisí na okamžité vzdálenosti předmětu k radaru, takže radiální pohyb předmětu vůči radaru se projeví změnami tohoto rozdílu fází v čase“ (Capaliniová, 2006, s. 7). Díky Dopplerovu efektu je možné rozlišit dva různé objekty nacházející se ve stejné vzdálenosti od radaru v oblasti ozářené paprskem.

3.3 Parametry určující intenzitu zpětného odrazu

Různé typy povrchů vykazují odlišné charakteristiky odrazu. Koeficient zpětného odrazu poskytuje informaci o zobrazeném povrchu, je funkcí vlastností radarového snímání (frekvence, polarizace a úhel dopadu vyslané elektromagnetické vlny) a vlastností povrchu (drsnot, topografie a dielektrické vlastnosti objektů) (European Space agency, c2010d).

Vliv frekvence

Frekvence dopadajícího záření určuje hloubku průniku vlnění a relativní členitost povrchu. Hloubka penetrace se zvyšuje s rostoucí vlnovou délkou. Hloubku však ovlivňuje i vlhkost, mikrovlny neproniknou ve vodě do hloubky větší než několik milimetrů.

Vliv polarizace

V některých případech může polarizace poskytnout informace o různých vrstvách objektu, například zaplavený les. Hloubka penetrace radarových vln závisí na zvolené polarizaci. Polarizace může poskytnout také informace o formě a orientaci malého rozptylu prvků, které tvoří povrch nebo objekty. U vícenásobných odrazů zpětného rozptylu vede k depolarizaci pulzu, v případě křížové polarizace se vrátí vyšší hodnota odraženého signálu než v případě jednoduchého odrazu.

Vliv úhlu dopadu

Úhel dopadu je definován jako úhel mezi kolmicí v místě dopadu a směrem dopadajícího záření. Pro většinu přírodních objektů se koeficient zpětného rozptylu mění s úhlem dopadu.

Vliv drsnosti povrchu

Drsnost je relativní pojem závisející na vlnové délce a úhlu dopadu. Povrch se považuje za drsný nebo hladký vzhledem k dopadající vlnové délce. Podle Rayleighova kritéria se považuje povrch za hladký, pokud platí:

Rovnice 1: Rayleighovo kritérium pro hladký povrch

$$h < \frac{\lambda}{8 \times \cos\theta}$$

a za drsný povrch se považuje, pokud platí:

Rovnice 2: Rayleighovo kritérium pro drsný povrch

$$h > \frac{\lambda}{8 \times \cos\theta}$$

kde h je směrodatná odchylka výšek povrchu, λ vlnová délka a θ úhel dopadu. Obecně platí, že relativně hladké povrchy odrážejí většinu záření směrem od radaru (Obrázek 5).

Obrázek 5: Vliv drsnosti povrchu na rozptyl (Canada Center for Remote Sensing, 2007)



Vliv dielektrické konstanty

Dielektrická konstanta charakterizuje elektrické vlastnosti objektů na povrchu. Skládá se ze dvou částí, permitivity a konduktivity, které jsou vysoce závislé na míře vlhkosti posuzovaných materiálů. Většina přírodních materiálů má za sucha dielektrickou konstantu mezi 3 a 8. Voda má 80, minimálně desetkrát vyšší hodnotu než suchá půda. Změna obsahu vody tedy vyvolává významné změny dielektrických vlastností přírodních materiálů, se zvýšením vlhkosti je spojena i vyšší radarová odrazivost. Hloubka průniku elektromagnetické vlny do objektu je inverzní funkcí obsahu vody (European Space agency, c2010d).

4 Družice s radary se syntetickou aperturou

Existuje řada programů provozující družice s radary se syntetickou aperturou. Patří mezi ně například ERS, Envisat, Radarsat, TerraSAR-X, Jers, Alos a SAR-Lupe.

4.1 ERS

Jedná se o dvě družice provozované Evropskou kosmickou agenturou (ESA). Tyto družice se staly první satelitní řadou pořizující radarová data pro komerční účely. Cíle mise jsou zaměřeny na aplikace v životním prostředí a mapování. Obě družice ERS se pohybují na heliosynchronní dráze s inklinací $98^{\circ} 52'$ a výškou mezi 782 až 785 kilometry. Hlavním přístrojem na palubě je SAR, který dokáže pracovat v několika režimech (Tabulka 2) (Gisat, 2010b).

Tabulka 2: Režimy SAR na družici ERS (Gisat, 2010b)

Senzor	Vlnová délka	Frekvence	Polarizace	Rozlišení
SAR Image Mode	C-band	5.3 Ghz	VV	10-30m
SAR Wave Mode	C-band	5.3 GHz	VV	30m
Wind Scatterometer	C-band	5.3 GHz	VV	50m

První z družic ERS-1 byla vypuštěna v roce 1991 a druhá ERS-2 v roce 1995. Obě družice byly navrženy jako identická dvojčata s jediným důležitým rozdílem – ERS-2 navíc nese nástroj určený k monitorování hladiny ozonu v atmosféře. Krátce po vypuštění ERS-2 se ESA rozhodla pro „tandemovou“ misi obou družic. Během této mise stoupla frekvence pořizování a dostupnost dat pro vědecké účely. Vznikla tak jedinečná příležitost sledování změn ve velmi krátkém čase, rozdíl mezi oběma družicemi byl pouze 24 hodin. V březnu 2000 došlo k poruše na družici ERS-1, což vedlo ke konci operací, ale i tak tato družice přesáhla svou životnost (European Space Agency, c2010c).

4.2 Envisat

Družice byla vynesena na oběžnou dráhu v roce 2002. Je vybavena deseti sofistikovanými optickými a radarovými přístroji umožňujícími neustále pozorování a monitorování povrchu Země, atmosféry, oceánů a ledovců. Data Envisatu poskytují nepřehledné množství informací o fungování systému Země, včetně nahlédnutí do faktorů přispívajících ke změně klimatu (European Space Agency, c2010b). Pro tato pozorování slouží například ASAR, GOMOS, AATSR, MERIS a Radar Altimeter. Cílem vypuštění této družice bylo zajištění plné návaznosti dat z družic ERS, avšak ve vyšší

kvalitě. K tomuto cíli nese družice ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), což je zdokonalený nástupce radaru SAR z družic ERS. Výrazné vylepšení dosahuje v pokrytí území, rozsahu úhlů, polarizaci a operačních režimů (Gisat, c2010a).

Tabulka 3: Technické parametry ASAR (European Space Agency, c2010a)

Přesnost	Radiometrické rozlišení v rozsahu: 1.5-3.5 dB
Prostorové rozlišení	Obrazový, vlnový režim a režim alternativní polarizace: 30x30 m
	Režim širokého záběru: 150x150 m
	Režim globálního monitorování: 1000x1000 m
Šířka záběru	Obrazový režim a režim alternativní polarizace: až 100 km
	Vlnový režim: 5 km
	Režim širokého záběru a globálního monitorování: 400 km a víc
Vlnové pásmo	Mikrovlnné: pásmo C s výběrem 5 druhů polarizace (VV, HH, VV/HH, HV/HH nebo VH/VV)

4.3 Radarsat

K dalším radarovým systémům patří kanadský RADARSAT. Tento systém má již dvě verze a to RADARSAT 1 (vypuštěn v roce 1995) a RADARSAT 2 (vypuštěn v roce 2007). Obě družice snímají povrch pomocí radaru SAR v pásmu C (Tabulka 1).

Radarsat 1 je sofistikovaný satelit pro pozorování Země, vyvinut pro sledování změn v životním prostředí a planetárních přírodních zdrojů. Družice je vybavena výkonným radarem SAR (Tabulka 4), používaným v pásmu C (Canadian Space Agency, 2010).

Tabulka 4: Parametry SAR družice Radarsat 1 (Canadian Space Agency, 2006)

Frekvence/vlnová délka	5,3 GHz/5,6 cm
Velikost antény	15 x 1,5 m
Polarizace	HH

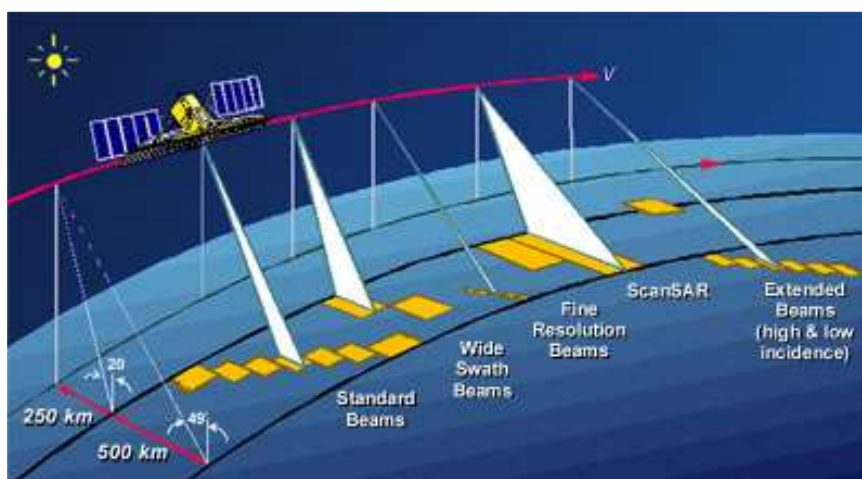
Družice obíhá ve výšce 798 kilometrů na heliosynchronní dráze (14 oběhů za den) s inklinací 98,6 stupňů a dobou oběhu 100,7 minut. Družice může poskytnout pokrytí téměř celé pevniny zemského povrchu. Temporální rozlišení družice je 24 dní, ale Radarsat může poskytovat za použití maximální šířky záběru denní pokrytí v arktických oblastech (severně od 70° severní šířky), každé 4 dny je schopný pokrýt území mezi 48° a 70° severní šířky, zbytek Země (kromě středu Antarktidy, mezi 80° a 90° jižní šířky) je pokryje každých 6 dní. Široká variabilita šířky paprsku umožňuje zachytit scénu v šířce záběru od 45 do 500 kilometrů, s rozlišením od 8 do 100 metrů

a úhlem dopadu od 10 do 60 stupňů (Tabulka 5, Obrázek 6) (Canadian Space Agency, 2006).

Tabulka 5: Režimy snímání družice Radarsat 1 (Canadian Space Agency, 2006)

Režim	Rozlišení [m]	Počet paprsků	Šířka záběru [km]	Úhel dopadu [°]
Fine	8	15	45	37 - 47
Standard	30	7	100	20 - 49
Wide	30	3	150	20 - 45
ScanSAR narrow	50	2	300	20 - 49
ScanSAR wide	100	2	500	20 - 49
Extended high	18 - 27	3	75	52 - 58
Extended low	30	1	170	10 - 22

Obrázek 6: Režimy snímání družice Radarsat 1 (Canadian Space Agency, 2006)



Radarsat 2 je druhá generace komerční družice s radarem. Nabízí technický pokrok, který zlepší námořní dohled, monitorování ledu, zvládnání katastrof, sledování životního prostředí a mapování po celém světě. Tento projekt představuje spolupráci mezi státní institucí a soukromým odvětvím průmyslu. MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. (MDA) vlastní a ovládá družici i pozemní středisko. Kanadská kosmická agentura pomáhá financovat konstrukci a vypuštění družice, investice se jí vrací zpět v podobě poskytování dat kanadské vládě v průběhu celé mise (Radarsat 2, 2010). Oběžná dráha družice Radarsat 2 je stejná jako u Radarsat 1 (Canadian Space Agency, 2007). Radarsat 2 dosahuje rozlišení až 1 metr (Tabulka 6, Obrázek 7).

Tabulka 6: Režimy snímání družice Radarsat 2 (Radarsat-2 Polarization Options, 2010)

BEAM MODE	Nominal Resolution m	Scene Size km x km	Scene Area km ²	Polarization Options						
				Single Pol				Dual Pol		Quad Pol
				HH	VV	HV	VH	HH+HV	VV+VH	HH+VV+HV+VH
Spotlight A	<1	18 x 8	144	✓	✓	✓	✓			
Ultra-Fine	3	20 x 20	400	✓	✓	✓	✓			
Wide Ultra-Fine	3	50 x 50	1,250	✓	✓	✓	✓			
Multi-Look Fine	8	50 x 50	2,500	✓	✓	✓	✓			
Wide Multi-Look Fine	8	90 x 50	4,500	✓	✓	✓	✓			
Fine	8	50 x 50	2,500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Wide Fine	8	150 x 170	25,500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Standard	25	100 x 100	10,000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Wide	30	150 x 150	22,500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
ScanSAR Narrow	50	300 x 300	90,000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
ScanSAR Wide	100	500 x 500	250,000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Extended High	25	75 x 75	5,625	✓						
Extended Low	25	170 x 170	28,900	✓						
Fine Quad-Pol	8	25 x 25	625							✓
Wide Fine Quad-Pol	8	50 x 25	1,250							✓
Standard Quad-Pol	25	25 x 25	625							✓
Wide Standard Quad-Pol	25	50 x 25	1,250							✓

Obrázek 7: Režimy snímání družice Radarsat 2 (McDonald, 2008)

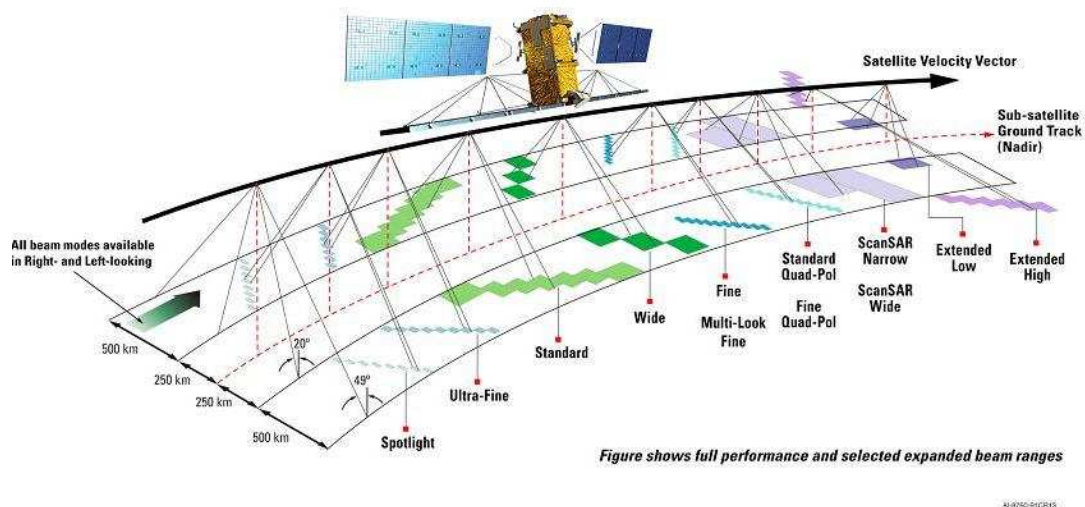


Figure shows full performance and selected expanded beam ranges

Program Radarsat 2 zaručuje kontinuitu dat pro uživatele Radarsat 1. Radarsat 2 je navržen tak, aby režimy snímání byly kompatibilní s předchozí verzí, a zároveň má několik nových režimů (Tabulka 5, Tabulka 6). Zároveň Radarsat 2 má stejnou oběžnou dráhu, dobu oběhu i pozemní dráhu jako Radarsat 1.

Další klíčové vlastnosti družice Radarsat 2 zahrnují:

- schopnost používání všech režimů snímání, po pravé i levé straně směru letu, což dovoluje častější snímání objektů (Tabulka 7)
- linku pro stahování dat s vysokým výkonem, vedoucí ke snížení vstupních nákladů pro pozemní stanice
- zabezpečení dat a telemetrie převodů
- GPS přijímač pro určení polohy v reálném čase a využití vysoce přesného řídicího systému polohy, který určuje a kontroluje polohu družice v prostoru.

Tabulka 7: Inovace a výhody družice Radarsat-2 (Canadian Space Agency, 2007)

	RADARSAT-1	RADARSAT-2	Výhody
Prostorové rozlišení	10 - 100 m	3 -100 m	Ultra-Fine režim zlepšuje detekci a rozpoznávání objektů
Polarizace	HH	HH, HV, VV, VH	Lepší vymezení různých typů pokryvu a lepší schopnost klasifikace terénu
Směr pohledu	pravý pohled (levý pohled pro Antarktické oblasti)	pravý i levý pohled	Rychlejší doba snímání a možnost běžného mapování Antarktidy
Záznamové zařízení	analogové	polovodičové	Vyšší spolehlivost, simultánní čtení a zapisování a dovoluje náhodný přístup k datům
GPS	-	ano	Usnadňuje zpracování obrazu

4.4 TerraSAR-X

Družice byla vypuštěna v roce 2007, do plného provozu byla uvedena v roce 2008. Pohybuje se po polární oběžné dráze ve výšce 514 kilometrů s aktivní anténou o rozměrech 4,78 x 0,7 metru, vysílající ve směru doprava v pásmu X, zaznamenává kvalitní data z celé planety. Činnost družice je nezávislá na povětrnostních podmínkách a slunečním záření a spolehlivě poskytuje radarové snímky s rozlišením až 1 metr.

Technické údaje:

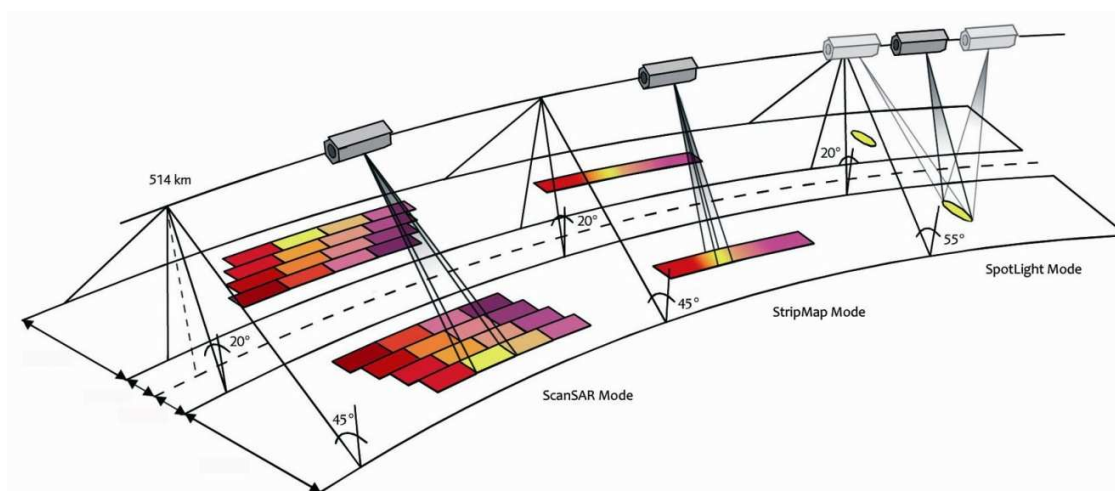
- Aktivní radar SAR v pásmu X
- Jednoduchá, duální a kvadratická polarizace
- Pořizování geometrie bočním pohledem
- Heliosynchronní oběžná dráha
- Časové rozlišení: 11 dní; závisí na šířce záběru, za 2,5 dne (2 dny s pravděpodobností 95 %) dokáže vytvořit snímek stejného území kdekoli na Zemi

Režimy snímání obsahuje Tabulka 8 a Obrázek 8.

Tabulka 8: Režimy snímání družice TerraSAR-X (Infoterra, c2010b)

	Rozlišení	Šířka záběru [km]	Délka záběru [km]
HighResolution Spotlight	až 1 m	5 - 10	5
Spot Light	až 2 m	10	10
StripMap	až 3 m	30	50
ScanSAR	až 18 m	100	150

Obrázek 8: Režimy snímání TerraSAR-X (Infoterra, c2010b)



Existuje také družice TanDEM-X, která je téměř identická jako TerraSAR-X, rozšiřuje misi a spolu s TerraSAR-X se pohybuje v unikátní formaci (pouze několik stovek metrů za sebou), „dvojčata“ nahrávají data synchronně v režimu StripMap. Takto získávají data pro digitální výškový model celé planety s nebývalou kvalitou, přesností a pokryvem. (Infoterra, c2010a) a (Infoterra, c2010b).

4.5 JERS

Japonská družice JERS byla vynesena 11. února 1992. Obíhá po heliosynchronní dráze ve výšce 568 km s časovým rozlišením 44 dní a s inklinací 97,7°. Na palubě družice byl umístěn optický a radarový senzor v pásmu L (Tabulka 1) (Japanese Earth Resources Satellite, 2011). Prostorové rozlišení tohoto senzoru je 18 m a šířka záběru 75 km (Japan Aerospace Exploration Agency, 2011).

4.6 ALOS

Družice ALOS je provozována japonskou společností JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) od ledna roku 2006, kdy byla vypuštěna na oběžnou dráhu. Obíhá po heliosynchronní dráze ve výšce 691,65 km (nad rovníkem) s inklinací 98,16°. Doba celého cyklu je 46 dní, jeden oběh kolem Země trvá 2 dny. Území blízko rovníku s 60% překryvem a oblasti se zeměpisnou šířkou 35° s překryvem 70 % je družice schopná nasnímat každý druhý den, oblasti s vyšší zeměpisnou šířkou než 55° m ůže pořídít každý den. Hlavní cíle družice zahrnují kartografii, regionální mapování pro trvale udržitelný rozvoj, sledování přírodních katastrof a mapování přírodních zdrojů. ALOS nese tři hlavní přístroje, L-pásmový radar se syntetickou aperturou (Palsar, 2011), panchromatický a multispektrální skener (Advanced Land Observing Satellite „DAICHI“, 2011).

Tabulka 9: Režimy snímání družice ALOS (Palsar, 2011)

	Fine Scan		SAR	Polarimetric ¹
Polarizace	HH or VV	HH+HV or VV+VH	HH or VV	HH+HV+VH+VV
Úhel dopadu [°]	8 - 60	8 - 60	18 - 43	8 - 30
Rozlišení [m]	7 - 44	14 - 88	100	24 - 89
Šířka záběru [km]	40 - 70	41 - 70	250 - 350	20 - 65

¹ Experimentální režim, vysoká spotřeba energie limituje trvalé používání.

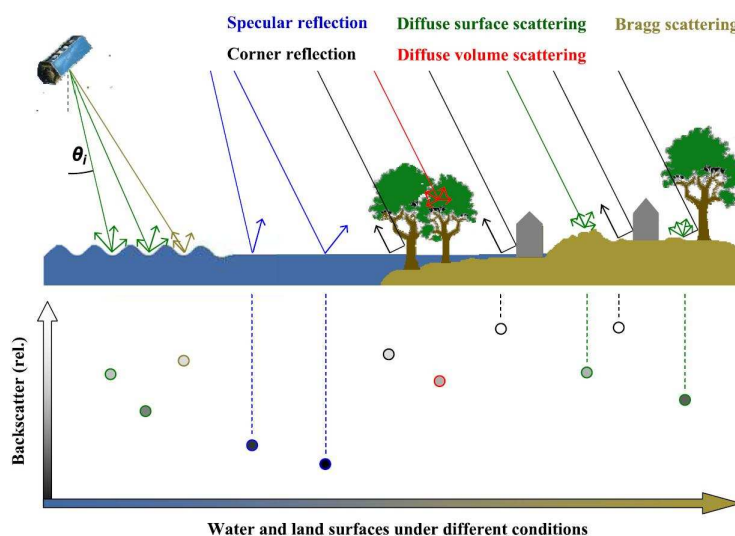
5 Mapování rozsahu povodní z radarových dat

Radarová data jsou velmi cenným nástrojem při mapování povodní hlavně díky tomu, že jejich mikrovlnné záření je méně ovlivněno atmosférou Země, než je tomu u záření s jinou vlnovou délkou. V souvislosti s rozsáhlými povodněmi se často stává, že se nad daným územím vyskytuje oblačnost a srážky. Radarová data jsou méně ovlivněna počasím než optická data, proto jsou vhodnější pro použití po mapování rozsahu povodní. Mapování povodní vyžaduje odlišné metody pro různé typy povrchů. Jinak je tedy nutné detekovat vodu na volných, lesních a zastavěných plochách. Podrobněji se na problematiku jednotlivých typů povrchů a metody mapování povodní zaměřují následující podkapitoly.

5.1 Radarový paprsek a jednotlivé typy vodních ploch

V této kapitole je popisováno chování radarového paprsku při dopadu na různé typy zaplaveného i nezaplaveného zemského povrchu. Detekovatelnost vody z radarových snímků je závislá na kontrastu mezi vodními a ostatními plochami. Kontrast je vysoce závislý na parametrech uvedených v kapitole 3.3. V závislosti na drsnosti či členitosti povrchu můžeme sledovat následující typy odrazů a rozptylů: zrcadlový odraz (Specular reflection), rohový odraz (Corner reflection), difuzní rozptyl z objemu (Diffuse volume scattering), difuzní rozptyl z povrchu (Diffuse surface scattering) a Braggův rozptyl (Bragg scattering). Tyto efekty nastanou, když paprsek reaguje s hladkou a drsnou vodní plochou, zaplavenou vegetací či urbanizovanou plochou (Obrázek 9).

Obrázek 9: Mechanismus zpětného rozptylu pro různé typy povrchu v různých podmínkách a relativní hodnoty zpětného rozptylu (Martinis, 2010)

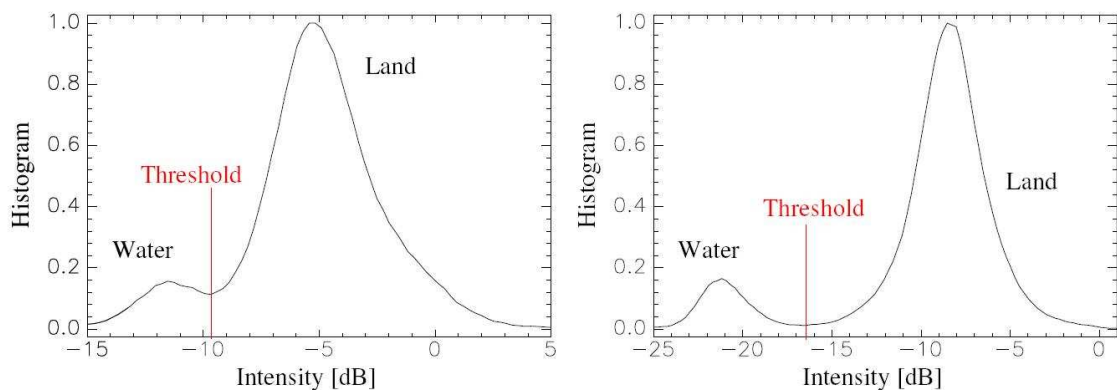


5.1.1 Hladké vodní plochy

Ideální případ pro určení rozsahu vodní plochy je, když má vodní hladina hladší povrch než okolní země. Vodní hladina může být zjednodušeně modelována jako perfektně hladký povrch s vysokou dielektrickou konstantou, který se chová jako zrcadlový odražeč (Obrázek 9) a odráží dopadající mikrovlnné záření směrem od senzoru radaru (Martinis, 2010). Díky velmi silnému odraženému záření se zdají být vodní plochy tmavé. Tyto plochy kontrastují s vyššími intenzitami záření od okolního méně hladkého povrchu, který je charakterizován zvýšením zpětného rozptylu. Podle Rayleighova kritéria (Rovnice 1 a Rovnice 2) a vlastností zrcadlového odrazu je kontrast mezi intenzitou zpětně odraženého záření vodou a zemí závislý na úhlu dopadu a výšce nerovnosti. S vyšším úhlem dopadu se snižuje mezní výška nerovnosti pro zrcadlový odraz a roste i kontrast mezi vodou a zemí (Henderson, 1995), (Martinis, 2010) a (Solbo; Solheim, 2004). To dokazuje i Obrázek 10, kde je pomocí histogramů hodnot zpětně odraženého záření znázorněn vliv úhlu dopadu na rozlišitelnost pevného povrchu a vodní plochy. Nicméně pořizování snímků s vysokými úhly dopadu také znamená vyšší výskyt stínů (Obrázek 3). Vliv stínu se zvyšuje v hornatých terénech, na snímcích s vysokým rozlišením i důsledkem osamocených stromů a budov. Plochy s nízkými nebo žádnými hodnotami signálu jsou snadno zaměnitelné s klidnou vodní hladinou. Plochy s nízkými hodnotami signálu mohou nastat i v terénech s nižší drsností povrchu, jako jsou písečné duny, letiště, holá půda, ulice atd. Na druhou stranu malé úhly dopadu zvyšují míru překryvu. Ztráta těchto informací je překážkou k identifikaci vodní plochy obklopené vysokými stromy nebo břehy (Martinis, 2010).

Volba polarizace také hraje svou roli při detekci vodní plochy. Obecně platí, že HH polarizace poskytuje nejzřetelnější rozlišení mezi vodními a ostatními plochami (Islam, 200-?) a (Martinis, 2010).

Obrázek 10: Histogramy SAR snímků stejného území s rozdílnými úhly dopadu; vlevo: 23°, vpravo 45° (Solbo; Solheim, 2004)



5.1.2 Vodní plochy s drsným povrchem

Vliv větru a deště způsobuje nebezpečí vlnek. S rostoucím stupněm drsnosti roste i intenzita zpětného rozptylu, která může být stejná nebo i vyšší než u okolních ploch (Obrázek 9).

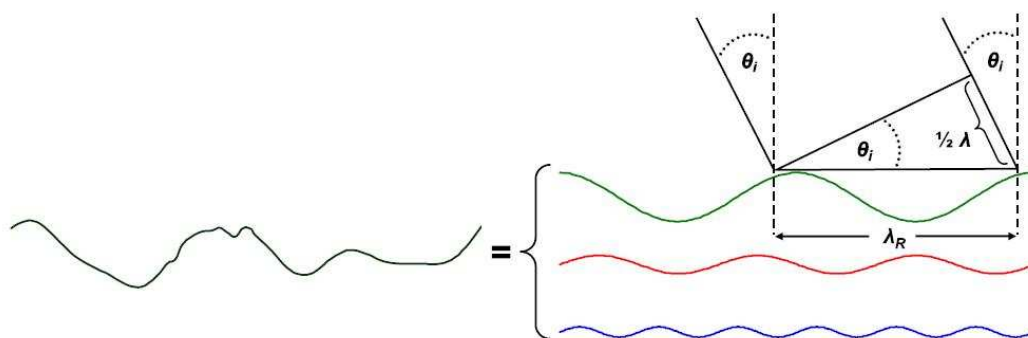
Speciální případ zpětného rozptylu nastává při velmi slabém větru a při úhlech dopadu paprsku přes 30°, kdy se na hladině objevují krátké gravitační vlny a tzv. kapilární vlny (Martinis, 2010). Braggova rovnice (Rovnice 3) popisuje vlnovou délkou periodicky se opakujících vzorů na hladině λ_R jako funkci vlnové délky radaru λ_S a úhlu dopadu θ (European Space Agency, c2011).

Rovnice 3: Braggova rovnice

$$\lambda_R = \frac{\lambda_S}{2 \sin \theta}$$

Podle Braggova modelu je náhodný povrch rozdělen do Fourierových spektrálních komponent (Obrázek 11). K Braggovu rozptylu dochází, pokud šikmá vzdálenost mezi hřebeny po sobě jdoucích vln orientovaných kolmo na *range direction* je $\lambda/2$ (Martinis, 2010).

Obrázek 11: Braggova rezonance (Martinis, 2010)



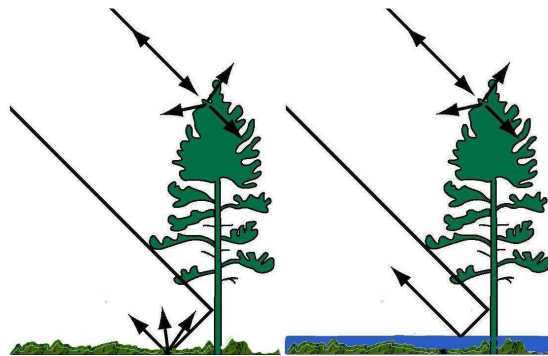
Vznik vln je nejvíce závislý na velikosti vodní plochy. Na úzkých řekách zřídka vznikají vlny, zatímco na hladině oceánů vznikají vlny mnohem častěji. Obecně lze říci, že pravidelné vlny vznikají hlavně na hladině oceánů a moří. Na vnitrozemských velkých vodních plochách je možné většinou pozorovat pouze nepravidelné vzory vlnkovitých útvarů.

5.1.3 Zaplavená vegetace

Předpokladem pro mapování zaplavených lesních ploch je, že radarové vlny jsou schopny proniknout skrz koruny stromů až k zemskému povrchu. Pronikající radarový

puls je odražen od vodní hladiny a kmenů stromů, výsledkem toho je silný odražený signál (Martinis, 2010) a (Townsend, 2001), který je větší než u nezaplavené vegetace (Obrázek 12). Je to zapříčiněno vícenásobným odrazem (*double bouncing*) od objektů, které se svým geometrickým uspořádáním blíží tvaru koutového odražeče (Halounová, 2004).

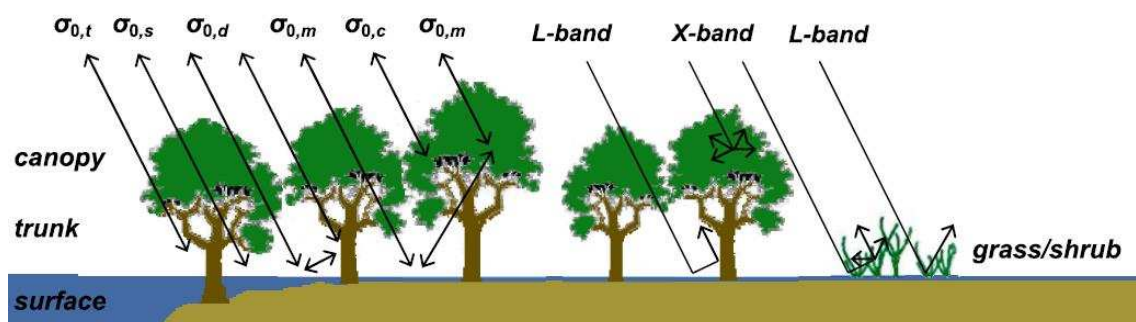
Obrázek 12: Princip odrazu v nezaplavených a zaplavených lesních plochách (Solbo; Solheim, 2004)



Zpětný odraz od zaplavené vegetace je velmi složitý a je závislý na mnoha faktorech, jako jsou vlnová délka, typ koruny, struktura vegetace, úhel dopadu a polarizace (Martinis, 2010) a (Solbo; Solheim, 2004). Obrázek 13 ukazuje jednotlivé typy koeficientů zpětného rozptylu a rozdílné chování radarového záření v pásmu L a X.

Obrázek 13: Koeficienty zpětného rozptylu u vegetace, porovnání pásem L, X (Martinis, 2010)

- $\sigma_{0,c}$ je koeficient zpětného rozptylu pro koruny stromů, drobné větve a listí
- $\sigma_{0,m}$ je mnohonásobný odraz mezi povrchem a korunami stromů
- $\sigma_{0,t}$ je přímý odraz od kmenů
- $\sigma_{0,s}$ je přímý odraz od povrchu
- $\sigma_{0,d}$ je dvojitý odraz od kmenů a povrchu



Snímky pořízené v pásmu L jsou velmi prospěšné pro mapování zaplavených zalesněných oblastí, poskytují lepší propustnost skrz koruny stromů než snímky v pásmu C nebo X (Obrázek 13), protože vlnová délka je delší než velikost listů

v korunách stromů (Townsend, 2001). Obecně platí, čím delší vlnová délka, tím vyšší schopnost proniknout skrz koruny stromů (Martinis, 2010).

Vliv na interpretaci snímků má i polarizace. Při stejné vlnové délce i úhlu dopadu je poměr zpětného rozptylu mezi zaplaveným a nezaplaveným lesem větší v případě horizontální polarizace než při použití vertikální polarizace (Sanyal; Lu, 2004).

Halounová (2004) a Townsend (2001) zkoumají vliv úhlu dopadajícího paprsku na detekci zaplaveného lesa (Obrázek 14). Zmiňují, že úhlová závislost velmi závisí na typu lesa, ale i přesto uvádí podobné hodnoty, při kterých je zaplavený les lépe detekovatelný. Townsend (2001) ukazuje, že menší úhly dopadu než 35° jsou vhodnější než větší úhly. Podle Halounové (2004) jsou vhodné snímky s úhlem dopadu menším než 30° .

Obrázek 14: Grafy ukazující průměrné hodnoty intenzit odraženého záření

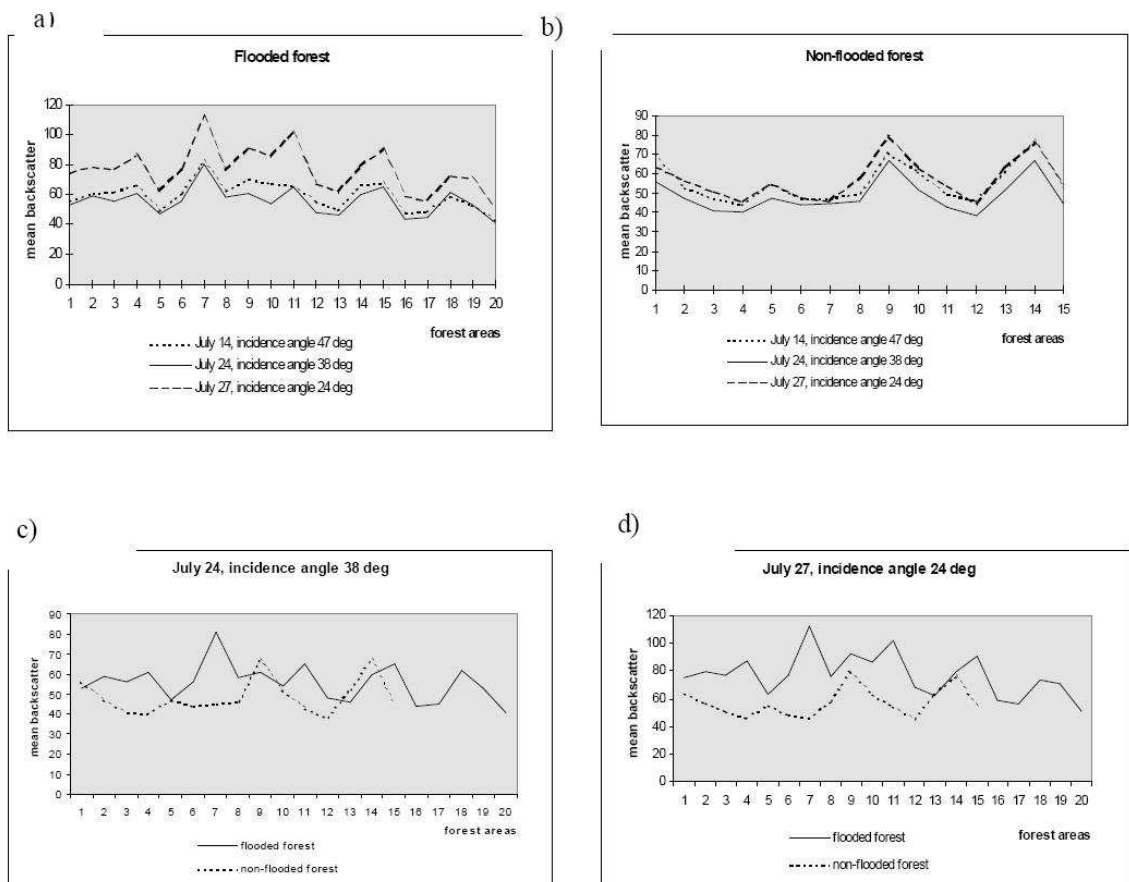
Graf a) ukazuje hodnoty pro 20 zaplavených lesních ploch na třech snímcích s různými úhly dopadu

Graf b) ukazuje hodnoty pro 20 nezaplavených lesních ploch na třech snímcích s různými úhly dopadu

Graf c) porovnává hodnoty zaplaveného a nezaplaveného lesa pro úhel dopadu 38°

Graf d) porovnává hodnoty zaplaveného a nezaplaveného lesa pro úhel dopadu 24°

(Halounová, 2004)

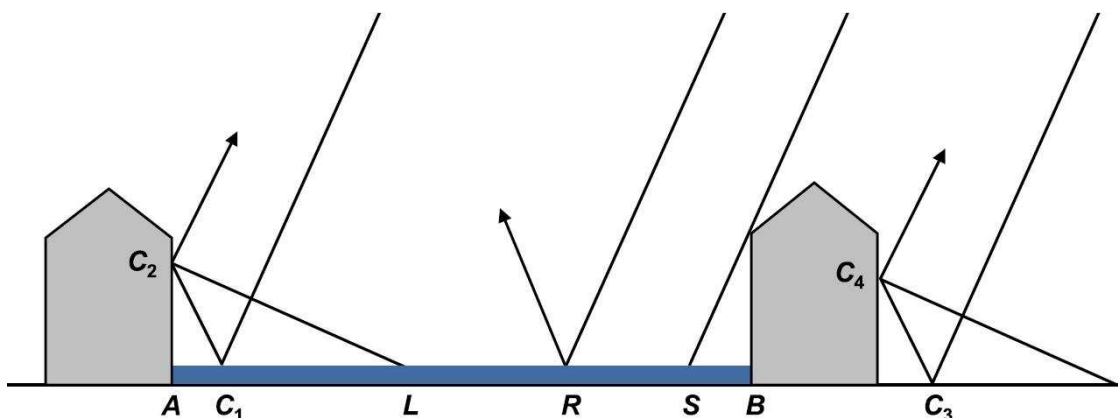


Vliv na detekci vody na území pokrytém vegetací má i fenologický stav vegetace. Závisí tedy na tom, zda vegetace je olistěná či nikoli. Lepších výsledků je dosaženo v oblastech, kde je vegetace bez listů (Townsend, 2001)

5.1.4 Urbanizovaná území

Určování rozsahu záplavy v zastavěných územích pomocí SAR je komplikované kvůli mnoha faktorům. Obrázek 15 ukazuje situaci se dvěma budovami a zaplavenou ulicí. Odrazy od budov stejně jako přítomnost kovových povrchů, rohů a zákoutí vede ke zvýšení zpětného rozptylu, který je téměř stejný při záplavě i za normálních podmínek (Martinis, 2010). Dvojitý odraz mezi budovami a ulicemi je znázorněn body C_1C_2 (zaplavená ulice) a C_3C_4 (nezaplavená ulice). Možnost detekovat záplavy je negativně ovlivněna způsobem pořizování radarových snímků. Kvůli bočnímu snímání a vzniku nežádoucích efektů, způsobených budovami, jako jsou stíny (SB) a překryvy (AL), některá místa nemusí být na snímku viditelná. Jediná možnost pozorovat vodní plochu je mezi body L a S, pouze v této mezeře je radarové záření zrcadlově odrážené směrem od senzoru (např. bod R). Proto, čím větší vzdálenost mezi L a S a vyšší rozlišení radarového snímku, tím větší pravděpodobnost k monitorování záplav v zastavěných oblastech. Nicméně hladké, nezaplavené, člověkem vytvořené plochy se stejně jako voda jeví tmavé, protože na těchto površích dochází také k zrcadlovému odrazu. Proto je velmi problematické rozlišit zaplavenou a nezaplavenou zástavbu (Martinis, 2010) a (Solbo; Solheim, 2004).

Obrázek 15: Zaplavená zástavba (Martinis, 2010)



5.2 Metody detekce povodní

Zpracování radarových snímků se stalo užitečným nástrojem pro určení rozsahu povodní v různých geografických podmínkách. V této části jsou popsány metody, které se touto problematikou zabývají. Radarové snímky lze zpracovat, buď vizuální interpretací, nebo digitálním zpracováním.

Vizuální interpretace vyžaduje manuální vektorizaci linie, která dělí území na nezaplavené a zaplavené. A navíc je velice časově náročná obzvláště, jedná-li se o rozsáhlé území. Kvalita výsledku je taky velice ovlivněna znalostí území osobou, která snímek zpracovává.

Během digitálního zpracování snímku jednotlivé metody klasifikují elementy snímku (pixely nebo segmenty) do kategorií zaplavených a nezaplavených území. Rozdělení do kategorií je zpravidla prováděno na základě vlastností zpětného rozptylu.

Při zpracování radarových snímků je dobré určovat výskyt vodní hladiny zvláště na jednotlivé typy, důvodem jsou různé vlastnosti odrazu od jednotlivých kategorií *land cover* (Solbo; Solheim, 2004) a (Townsend, 2001).

5.2.1 Metoda prahování

V nejjednodušší formě lze říci, že prahování představuje klasifikaci pixelů daného obrazu do dvou tříd (sledovaný objekt a pozadí). Jedna třída obsahuje pixely s hodnotami vyššími než je stanovena prahová hodnota a v druhé třídě jsou pixely s hodnotami, které se rovnají prahové hodnotě anebo jsou pod ní. Tuto situaci lze nazvat jako dvouúrovňové prahování. Obecně lze ale vybrat více než jednu prahovou hodnotu a použít je pro rozdělení celé škály hodnot do několika dílčích skupin. Tento proces je nazýván jako vícestupňové prahování. Většina metod pro prahování využívá tvar histogramu daného datového souboru při výběru prahových hodnot. V ideálním případě, u snímku, který má dvě třídy, jsou jednotlivé třídy rozděleny výrazným „údolím“ (Obrázek 10, vpravo).

Prahování je jedna z nejvíce používaných metod pro rozlišení zaplavených a nezaplavených oblastí na radarovém snímku. Všechny elementy snímku s hodnotami intenzity zpětného rozptylu, které jsou zpravidla nižší, než prahová hodnota, jsou začleněny do kategorie vodní plochy. Díky jednoduchosti je tato metoda výpočetně velmi rychlá. Je závislá na kontrastu mezi vodními a ostatními plochami (Solbo; Solheim, 2004). Pokud je vodní hladina klidná, pomocí této metody je většina vodní plochy dobře určena, protože kontrast mezi vodní hladinou a ostatními plochami je výrazný (Halounová, 2004). V případě dvojitého odrazu u zaplavené vegetace je potřeba nalézt prahovou hodnotu nad hodnotami ostatních ploch. Jestliže je při zpracování k dispozici více snímků, tak pro každý snímek se musí určit nová prahová hodnota, protože je ovlivněna úhlem dopadu záření (Solbo; Solheim, 2004) a (Townsend, 2001). Townsend (2001) použil metodu prahování k mapování zaplavených zalesněných území. Prvním jeho krokem bylo použití masky. Tímto krokem se zmenší rozsah hodnot zpětného rozptylu pouze na zalesněná území, na kterých došlo k výběru trénovacích ploch. Tyto trénovací plochy Townsend (2001) rozděluje do tří kategorií pro celou sérii snímků; nikdy nezaplavený les, trvale zaplavený les a občas zaplavený les. Výběr lesních ploch, které nikdy nebyly

zaplaveny, je prováděn na vyvýšených územích. Na základě povodňových modelů byly určeny zbylé dvě kategorie. Pro jednotlivé snímky pak dojde k jednoznačnému rozdělení na nezaplavené a zaplavené lesní plochy. Nastane-li situace, kdy nejde trénovací plochu jednoznačně identifikovat, není při dalším zpracování brána v úvahu. Z trénovacích ploch byla pomocí klasifikačního stromu určena prahová hodnota, která rozdělovala zaplavený a nezaplavený les. Klasifikační strom je tvořen procesem známým jako binární rekurzivní dělení, ve kterém jsou skupiny dat rozdělovány do menších podskupin (Classification Tree, 2011).

Výhodou této metody je rychlé vytvoření záplavových map. Naopak nevýhodou jsou nepřesnosti ve výsledné klasifikaci, způsobené nehomogenitou radarového snímku s velkým rozptylem odstínů šedi. Tyto nepřesnosti se dají omezit použitím speciálních filtrů, nebo ruční editací, ale to může být časově velmi náročné.

5.2.2 Řízená Klasifikace

Tato metoda je známá ze zpracování optických dat. Metoda je založena na tom, že plochy tvořící tematicky stejné třídy mají blízké hodnoty odraženého záření. U radarových dat to platí pouze pro vodní plochy. Ostatní plochy, představující jeden typ povrchu na výsledném snímku, se pixel od pixelu liší. Na výsledném obrazu jsou zřetelné tečky (*spekles*). Jsou to pixely s nízkými hodnotami – tmavé a naopak s výrazně vysokými hodnotami - světlé. Díky zrcadlovému odrazu je možné pomocí této metody klasifikovat pouze oblasti mimo zástavbu a lesní plochu (Halounová, 2004). De Roo (1999) použil metodu *maximum likelihood* a ke klasifikaci použil pouze dvě kategorie: zaplavené a nezaplavené plochy. Výsledek této klasifikace představoval mnoho malých skupin pixelů, které byly klasifikovány jako zaplavené. Místo ruční editace nebo filtrace obrazu využil pro zlepšení výsledku klasifikace síť vodních toků. Jako zaplavené plochy De Roo (1999) dále bral v úvahu pouze ty, které se překrývaly s vodními toky. V posledním kroku vyplnil otvory, které byly menší, než uživatelem zadaný počet pixelů. Výsledek klasifikace byl porovnán s hranicí zatopeného území určenou z leteckého snímku. Před vyplněním otvorů přesnost dosahovala 74 % a po vyplnění stoupla na 82 %.

5.2.3 Multitemporální vyhodnocení snímku

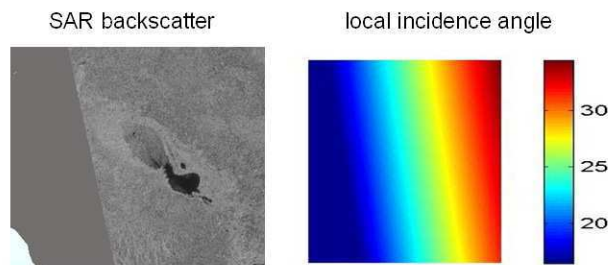
V této metodě dochází k porovnávání více snímků, které byly pořízeny před, během a po záplavě. V mnoha případech prokázalo toto zpracování lepší výsledky než, pokud se zpracovával pouze jeden snímek (Martinis, 2010). Díky změně zpětného rozptylu u zaplavených území mohou být tyto povodně detekovány za použití referenčního snímku. Jedná se o metodu, kdy snímek z doby záplav porovnáme s referenčním snímkem. Porovnáním intenzit zpětného rozptylu se dají rozlišit zaplavená a nezaplavená území (Solbo; Solheim, 2004). Při této metodě je potřebné

mít jeden snímek v době záplav a alespoň jeden snímek před záplavami, může jich být i více. V této metodě se odečtou hodnoty pixelů, popřípadě jejich průměr (je-li referenčních snímků více), od hodnot pixelů ze snímku v době záplav. Pixely s vyšším rozdílem jsou vyhodnoceny jako zaplavené plochy (Islam, 200-?). Pro určení průběhu povodní se používá metoda barevné syntézy. Zahrnuje několik radarových snímků s různými časy pořízení v odstínech šedi. Každému snímku se přiřadí odlišný odstín barvy a sloučí se. Odstíny barev ukazují na změny v čase a intenzita reprezentuje, jak výrazná změna nastala (Halounová, 2004) a (Islam, 200-?). Problémem je, že rozdíly mezi časově posunutými daty nemusí být způsobeny jen změnami na povrchu.

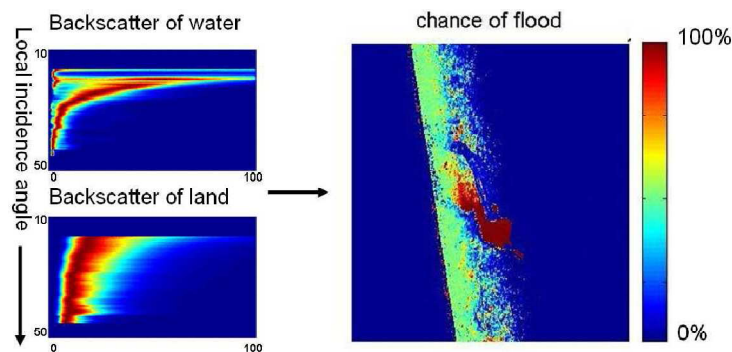
5.2.4 Pravděpodobnostní klasifikace

Metoda se snaží eliminovat chyby, které jsou způsobeny úhlem dopadu. Obecně platí, že zpětný rozptyl klesá při rostoucím úhlu dopadu. Z tohoto důvodu se jeví fixní prahová hodnota jako nevyhovující pro rozlišení ploch v šířce rozsahu snímku. Pro aplikaci této metody byly nejdříve vybrány trénovací plochy vždy ze suchých a vždy ze zaplavených ploch. Za použití hodnot zpětného rozptylu a úhlů dopadu (Obrázek 16), byly vytvořeny histogramy, které ukazují, že při výskytu velkých úhlů dopadu lze snadno rozlišit vodu a půdu (Obrázek 17).

Obrázek 16: Radarový snímek a místní úhly dopadu (Westerhof, 2010)



Obrázek 17: Pravděpodobnost pro klasifikaci vody na vybraném území (vlevo nahoře a dole) a šance klasifikace vody (Westerhof, 2010)



Naopak pro úhly menší než 30° se stávají rozdíly méně viditelné, čímž je rozlišení méně jisté. Za použití histogramu je vždy dané množství zpětného odrazu a úhlu

dopadu pro každý pixel. Rovnice 4 udává, s jakou pravděpodobností bude pixel klasifikován jako zaplavený, kde α je místní úhel dopadu a σ je zpětný rozptyl.

Rovnice 4: Pravděpodobnost povodně

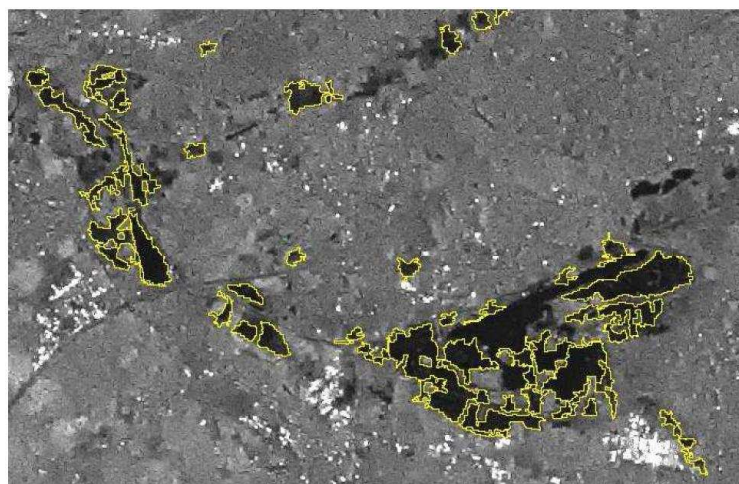
$$P_{povodeň} = \frac{P(\sigma|\alpha)_{voda}}{P(\sigma|\alpha)_{voda} + P(\sigma|\alpha)_{země}}$$

Obrázek 17 zobrazuje výslednou pravděpodobnostní mapu zaplavených území. Tato metoda přináší výhody, zejména za použití více snímků (Westerhof, 2010).

5.2.5 Objektově orientovaná klasifikace

Předchozí analýzy snímků byly založeny na metodách pixelové klasifikace. Existují však i objektově-orientovaná zpracování snímků. Princip této metody se dělí na dva základní kroky, segmentaci a následnou klasifikaci. Jednou z metod segmentace je technika „bottom up“ (zdola nahoru), při které segmentace začíná objektem o velikosti jednoho pixelu. Tento segmentační algoritmus nespolehá jen na hodnoty jednotlivých pixelů, ale i na prostorové závislosti výsledných objektů. Objektový přístup se obejvil také u Halounové (2004). Pro rozlišení zaplaveného a nezaplaveného lesa byly použity průměrné hodnoty vybraných ploch. Heremans ... [et al] (2008) aplikoval segmentaci na dva snímky, referenční snímek a snímek z doby záplav. Segmentované objekty byly klasifikovány dvěma po sobě jdoucími klasifikacemi, buď jako zaplavené, nebo jako nezaplavené území. Během první klasifikace se oddělily vodní plochy od ostatních na základě průměrných hodnot segmentu. Tato třída však neobsahovala pouze zaplavené oblasti, ale i jiné plochy s nízkou hodnotou zpětného rozptylu (např. existující vodní plochy, letiště,...). Druhá klasifikace měla za úkol oddělit skutečné zaplavené plochy od ostatních ploch s nízkou hodnotou zpětného rozptylu. U skutečně zaplavených ploch se předpokládá výrazný pokles hodnot zpětného rozptylu oproti referenčnímu snímku (Obrázek 18) (Heremans ... [et al], 2008).

Obrázek 18: Objektově orientovaná klasifikace jezera Schulens v Belgii (Heremans ... [et al], 2008)



Metody využívající manuální určení prahů nebo segmentačních pravidel, mají nevýhodu v tom, že při jejich zpracování je nutná vizuální interpretace radarových snímků.

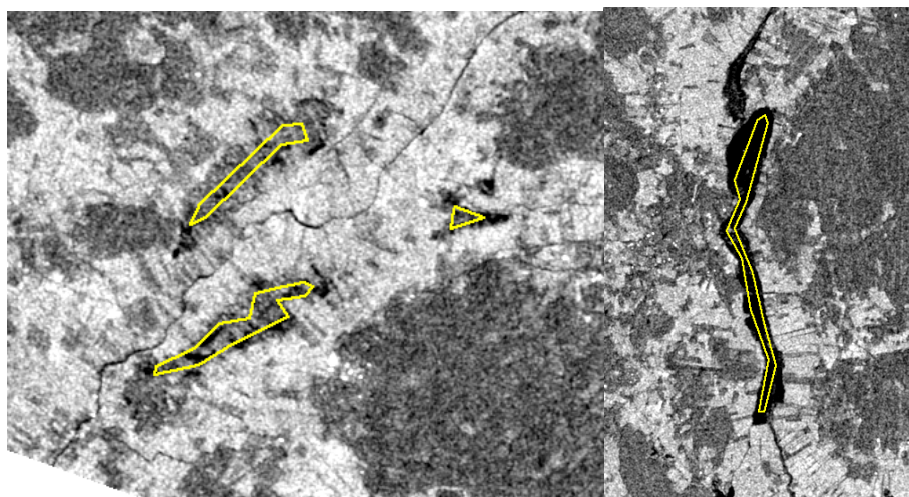
Jedním z druhů objektové segmentace je i *active contour algorithm*, nazývaný také jako *snake algoritmus*. Tento model využívá statistických metod, vhodných pro úpravu přerušovaných hran ve snímku na souvislé linie. Princip je v tom, že „had“ (zastoupený uzavřenou linií) je vložen do relativně homogenní plochy, která má být algoritmem vymezena. Například chceme-li vymežit bílou plochu uvnitř černé plochy, musíme inicializovat plochu („hada“) ve tvaru libovolného mnohoúhelníku tak, aby byly všechny uzlové body uvnitř bílé plochy. Inicializovat polygon je možné manuálně nebo automaticky (Henderson, 1995). V případě manuální inicializace se mohou použít existující data s vodními plochami, v této situaci jsou inicializovány všechny plochy, může se stát, že i nehomogenní (Obrázek 19). Pro hrubé určení vodních ploch se může použít i prahová hodnota. Při použití prahové hodnoty mohou vznikat nepřesnosti o velikosti několika pixelů. Ty je možno odstranit pomocí morfologické operace nazývané dilatace.

Obrázek 19: Inicializované polygony

Vlevo: nehomogenní plochy

Vpravo: homogenní plochy

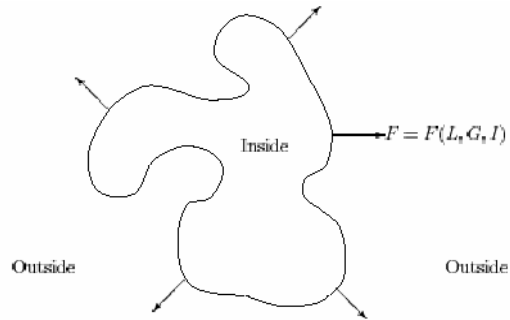
(Ahtonen ... [et al], 2002)



K vymezení inicializační plochy je možné využít i optických družicových snímků (Ahtonen ... [et al], 2002) a (Mason ... [et al], 2008). Henderson (1995) používá k inicializaci polygonů prahovou hodnotu, pomocí které vytvoří binární obraz. Na tento obraz aplikuje morfologické filtry, nejdříve erozi následovanou dilatací. Takto vytvořené plochy zvektorizuje na polygony. Hrany těchto polygonů jsou tvarovány silami k hranicím výsledného objektu. Brány v úvahu jsou dvě síly - interní a externí (Obrázek 20). Interní síly udržují polygon během deformací kompaktní, zatímco externí síly, které jsou počítány z dat snímku, posouvají linii polygonu k hranicím objektu (Airouche;

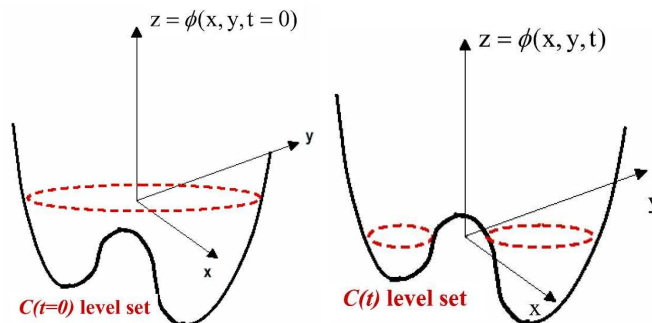
Bentabet; Zelmat, 2009). Přesnost této metody, jak uvádí De Roo (1999), se pohybuje kolem 80 %.

Obrázek 20: Externí síla active contour algoritmu (Airouche; Bentabet; Zelmat, 2009)

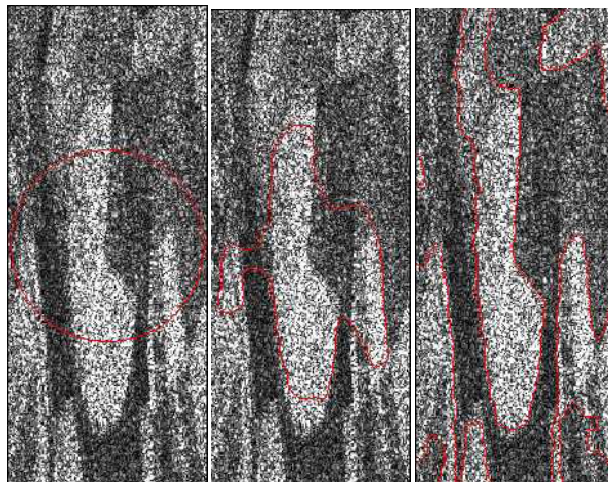


Klasické active contour algoritmy mají omezení hlavně v umisťování inicializačních polygonů, tyto algoritmy nezvládají řešit topologické změny při vývoji křivky. Tento problém lze vyřešit nastavením úrovní k segmentaci radarového snímku na určitý počet homogenních ploch (Airouche; Bentabet; Zelmat, 2009) a (Ayed, 2004). Styčné ploše C (výsledek klasického active contour algoritmu) je nastavena úroveň funkcí ϕ , implicitně je nastavena nulová úroveň (Obrázek 21). Pro ostatní plochy snímku je funkce definována vzdáleností od nulové úrovně (Airouche; Bentabet; Zelmat, 2009). Schopnost segmentace této metody znázorňuje Obrázek 22.

Obrázek 21: Vývoj křivky při nastavení úrovní (Airouche; Bentabet; Zelmat, 2009)



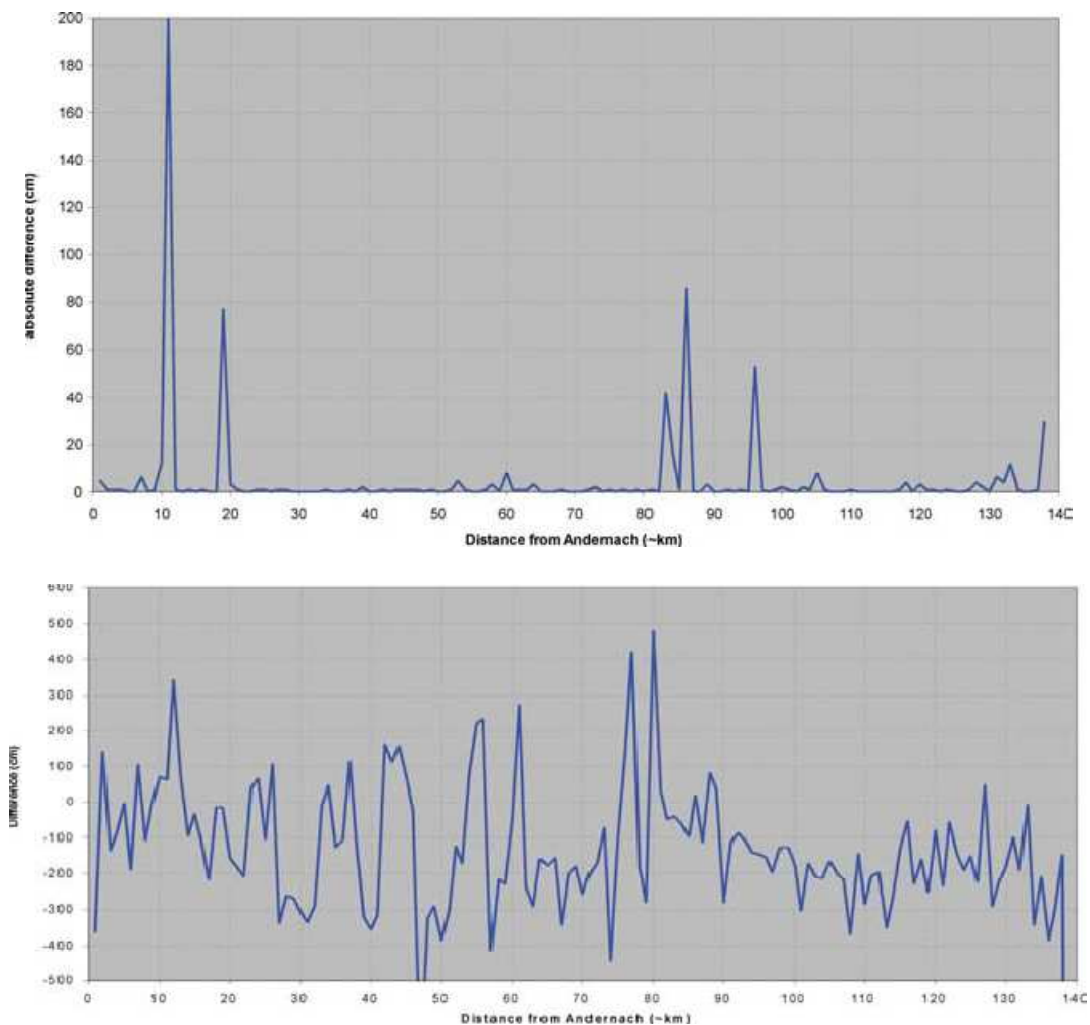
Obrázek 22: Vývoj active contour algoritmu s nastavením úrovní (Ayed, 2004)



5.2.6 Použití DMT

Metoda určení rozsahu povodně pracuje s digitálním modelem terénu (DMT) a již vyklasifikovaným radarovým snímkem, pomocí kterého určuje hranici zatopeného území. Hranice zatopeného území lze dosáhnout, buď ruční interpretací, kterou použila Halounová, nebo digitálním zpracováním. Při kterém se zjišťuje pro každý kilometr toku nejvýše položené zatopené území (Huizinga ... [et al], 2005). Na základě DMT by měl být určen rozliv povodně i tam, kde na radarovém snímku voda nebyla klasifikována. U této metody bylo zjištěno, že je velmi citlivá na malé nepřesnosti v georeferenci. Výška hladiny, vzniklá vyhodnocením klasifikace radarového snímku, byla porovnána s výškou hladiny z referenčního hydrologického modelu (Obrázek 23, nahoře). Následně byl výsledek vzniklý z klasifikace radarového snímku posunut o 50 m na východ (Obrázek 23, dole). Umělým posunutím klasifikace došlo k výrazným odchylkám ve výšce hladiny (Huizinga ... [et al], 2005).

Obrázek 23: Rozdíly ve výškách hladin u referenčního modelu a výsledku vzniklého z klasifikace radarového snímku (Huizinga ... [et al], 2005)



5.2.7 Shrnutí metod

V předchozích podkapitolách byly popsány metody detekce vody z radarových snímků. Jak uvádí Halounová (2004), lze použít pro volné vodní plochy metodu prahování i řízené klasifikace. Řízenou klasifikaci a *snake* algoritmy objektové klasifikace porovnává na volných plochách De Roo (1999). Z jeho závěrů plyne, že obě tyto metody jsou srovnatelné, dosahovaly přesnosti 82 % resp. 81 %.

U ostatních povrchů je detekce zaplavených území horší. Mason (2008) uvádí, že problémem *snake* algoritmů pro zastavěné území je připojení úzkých ulic k zaplaveným územím. Také uvádí, že *snake* algoritmy nedokážou klasifikovat izolované ostrůvky zaplavených území uprostřed zástavby. V tomto případě se jednalo o klasifikaci území, kde docházelo k zrcadlovému odrazu uprostřed zástavby. Solbo a Solheim (2004) uvádí, že zaplavené území v zástavbě lze detekovat pouze za použití více snímků s časovým posunem.

Při detekci záplav v lese byly dosaženy dobré výsledky v případě metody prahování za použití masky, celkově přes 90 % (Townsend, 2001). Jistou roli v tomto výsledku mohl mít způsob verifikace, která proběhla pomocí bodových měření. Výhodou těchto měření bylo, že údaje z těchto bodů spolehlivě určily výšku hladiny vody v daném místě. Tato metoda byla aplikována na snímky v pásmu C, kde Halounová (2004) a Townsend (2001) uvádí, že je možné od sebe odlišit zaplavený a nezaplavený les pouze pokud je snímek pořízen s úhly dopadu menšími než 30°.

Metoda, která využívá DMT pro určení rozsahu záplavy, dokáže poskytnout informace o tom, kam až mohla voda proniknout. Je vhodná k vykreslení zatopeného území, zejména v případech, kdy není možné klasifikovat všechny typy povrchu. Nejužitečnější tato metoda může být v případě záplavy v zastavěných a vegetací pokrytých územích.

6 Metodika

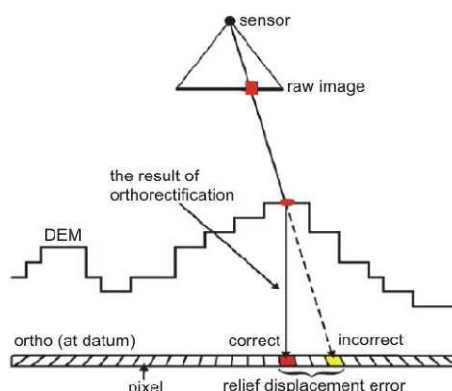
Základní myšlenka metodiky zjišťování rozsahu povodně vychází z výše popsaných metod detekce a ze způsobu chování radarového paprsku na různých typech povrchu. Metodika vyplývá z toho, že hladké vodní plochy lze díky odrazovým vlastnostem odlišit od ostatních povrchů i nejjednodušší používanou metodou, prahováním. U zastavěných ploch, jak uvádí Solbo a Solheim (2004), lze detekovat záplavy pouze za použití referenčního snímku. Proto na zastavěné plochy byla v metodice navržena metoda multitemporálního vyhodnocení. Tento krok však představuje omezení v podobě dostupnosti dat před povodněmi. Pro lesem pokryté povrchy byla navržena metoda prahování za použití masky lesních ploch, protože dosahovala dobrých výsledků. Pro radarová data pořízená v pásmu C, je v této metodě omezení v podobě úhlů dopadu. Metody detekce záplavy v zastavěných a lesem pokrytých území jsou závislé na vstupních datech. Proto tato metodika pracuje nejen s radarovými snímky, ale využívá i digitální model terénu pro vykreslení hranice zatopeného území. V postupu dojde k rozdělení území kolem toku na jednotlivé úseky tak, aby bylo možné vykreslit hranici zatopeného území i tam, kde nebude klasifikováno jako zaplavené.

Před samotnou klasifikací došlo k předzpracování snímku podle Pci Geomatics Enterprises (2007). Prvním krokem byla transformace snímku do potřebného souřadnicového systému.

Dále došlo ke sběru kontrolních bodů (GCPs). K tomu byla využita ortofotomapa a digitální model terénu. Po nasbírání kontrolních bodů byly vypočítány parametry pro polynomickou transformaci.

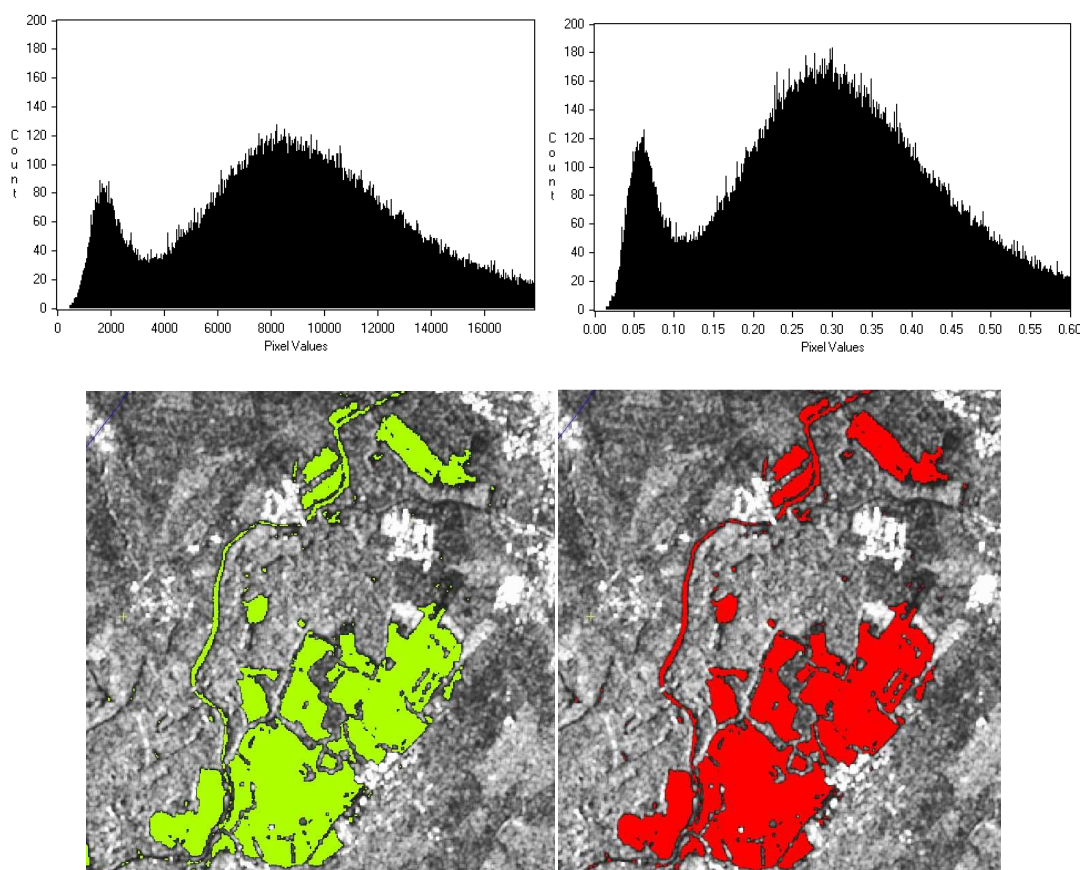
Dalším krokem byla ortorektifikace, ke které byl využit digitální model terénu (DMT). Ortorektifikace je proces, který za použití matematického modelu a dříve vytvořeného DMT, opraví zkreslení obrazu (Obrázek 24). Vstupní data sice již byla geometricky zkorigována, ale v dalším vyhodnocování je geometrická přesnost důležitá. Kvalita ortorektifikace je závislá na přesnosti výškového modelu, proto byl použit DMT s rozlišením odpovídajícím vstupním datům.

Obrázek 24: Princip ortorektifikace (PCI Geomatics Enterprises, 2007)



Spolu s ortorektifikací je možné provést i radiometrické korekce umožňující odstranění či zmenšení radiometrických zkreslení, která vznikají kvůli pohořím, kopcům a dalším sklonitým objektům. V programu, ve kterém byl snímek zpracováván, tato korekce odstraňuje vliv terénu. Na zpracovávaných územích byl rovinatý reliéf, byl proto zkoumán vliv radiometrické korekce na radarový snímek i na výslednou klasifikaci (Obrázek 25). Na obrázku je jasně vidět, že průběhy obou histogramů (nahore) jsou velmi podobné a také že ani na výsledek klasifikace (dole) neměla radiometrická korekce vliv. Radiometrické korekce tedy nebyly aplikovány.

Obrázek 25: Histogramy a klasifikace snímků bez radiometrické korekce (vlevo) a s radiometrickou korekcí (vpravo)



Po ortorektifikaci byl na snímek aplikován speciální filtr na radarová data. Filtr je koncipován tak, aby odstranil vysokofrekvenční šum (*speckles*) a zároveň zůstaly zachovány hrany objektu. Byl aplikován filtr Kuan o velikosti 3x3. Rovnice 5 popisuje algoritmus Kuanova filtru, kde:

$$\begin{aligned}R &= \text{výsledná hodnota pixelu} \\W &= (1 - Cu^2/Ci^2)/(1 + Cu^2) \\Cu &= \text{SQRT}(1/\text{NumberLooks}) \\Ci &= S / Im \\Ic &= \text{prostřední pixel ve filtračním okně} \\Im &= \text{průměrná hodnota intenzity v okně} \\S &= \text{směrodatná odchylka intenzity v okně}\end{aligned}$$

Rovnice 5: Filtr Kuan

$$R = Ic \times W + Im \times (1 - W)$$

Po předzpracování došlo ke klasifikaci radarového snímku. Navrhovaná metodika zahrnuje klasifikaci snímku odděleně pro volné, zastavěné a zalesněné plochy. Pro zastavěná území mělo být použito multitemporální vyhodnocení. Vzhledem k chybějícímu snímku z doby před povodněmi, který by mohl sloužit k analýze zastavěných ploch jako referenční snímek, nebyla tato území tímto způsobem klasifikována. Podobná situace nastala v případě povrchů pokrytých lesy. Úhly dopadu paprsku se u použitých snímků pohybovaly v rozmezích 24-31°, 39-42° a 45-49°. Ja k uvádí Halounová (2004) a Townsend (2001), není možné od sebe jednoznačně odlišit zaplavený a nezaplavený les na radarovém snímku pořízeném v pásmu C s úhly dopadu většími než 30°. Ze zpracovávaných snímků by toto kritérium splňoval pouze jeden snímek. Na zpracovávaném území z tohoto snímku se však nenacházel dostatečný počet lesních ploch, na kterých by bylo možné provést analýzu. Z těchto důvodů mohly být klasifikovány pouze volné plochy. Z těchto důvodů mohly být klasifikovány pouze volné plochy. K této klasifikaci byla použita metoda prahování.

Na klasifikovaná data byl aplikován morfologický filtr – slouží k odstranění špatně klasifikovaných osamocených pixelů. Nejdříve byla provedena eroze tak, aby bylo odstraněno co nejvíce malých ploch, které by mohly negativně ovlivnit další vyhodnocování. Po erozi byla provedena dilatace, aby se odstraněné pixely zbylých ploch znovu vytvořily.

V následující části je binární obraz z morfologického filtru vyhodnocován s digitálním modelem terénu. Před otevřením binárního obrazu je potřeba náležitě připravit podklady pro to, aby bylo možné vykreslit hranici zatopeného území.

Vymezení zájmového území – jedná se o pás území kolem rozvodněného toku. Šířka tohoto pásu je určena tak, aby bylo zaručeno, že zátopové území bude uvnitř tohoto pásu.

Rozdělení zájmového území na úseky - tyto úseky vznikají proto, aby vyrovnávaly spád vodního toku. Nejde tedy o rozdělení na úseky s konstantní vzdáleností, jako území dělili Huizinga ... [et al] (2005), ale dělení úseků bude provedeno podle spádu toku. Dojde tedy k vytvoření „terasových stupňů“ (Obrázek 26). K rozdělení území dojde na předem vytvořených bodech. Dělicí body vznikají na průsečících vrstevnic a linie vodního toku na základě předem zvoleného intervalu vrstevnic. Výsledkem jsou různě dlouhé úseky, jejichž délka závisí na sklonu toku. Platí zde nepřímá úměra, čím větší sklon, tím menší úseky. Pro každý úsek je vytvořen nebo oříznut předem vytvořený DMT.

Obrázek 26: Úseky zájmového území



Ve stadiu, kdy je každý úsek reprezentován digitálním modelem terénu, je možné přistoupit k závěrečné části vyhodnocování. Na základě binárního obrazu a digitálního modelu terénu se určí maximální výška zatopeného území pro daný úsek.

7 Použitá data

Povodně přicházejí náhle a jejich maxima netrvají příliš dlouhou dobu. K tomu když se přidá časové rozlišení jednotlivých přeletů družic na daném území, je jasné, že je získání časové řady družicových dat obtížné. Pro vyhodnocení zaplaveného území byla použita vedle družicových dat i data podpůrná. Pro verifikaci výsledků byla použita data získaná z hydrologických modelů a pozemních šetření.

7.1 Radarová data

V této práci jsou zpracovávána radarová data družice RADARSAT (Tabulka 10). Radarová data byla ve formátu CEOS. Tento formát se skládá z pěti souborů (volume directory file, SAR leader file, SAR data file, SAR trailer file a null volume directory file). Data jsou georeferencována za použití orbitálních dat ze satelitu. To umožňuje výpočet hodnot zeměpisné šířky a délky pro každý pixel. Každá řádka obrazu obsahuje pomocné údaje o souřadnicích prvního, prostředního a posledního pixelu na řádce (Radarsat International, 2000). Zároveň jsou na datech provedené geometrické a radiometrické korekce. Jeden ze snímků je pořízen na vzestupné dráze letu, zbývající dva na sestupné dráze letu. Vzestupná dráha letu družice nastane, pokud průmět dráhy na Zemi vytváří křivku se zvětšující se zeměpisnou šířkou. Analogicky je to se sestupnými drahami (Rezková, 2009).

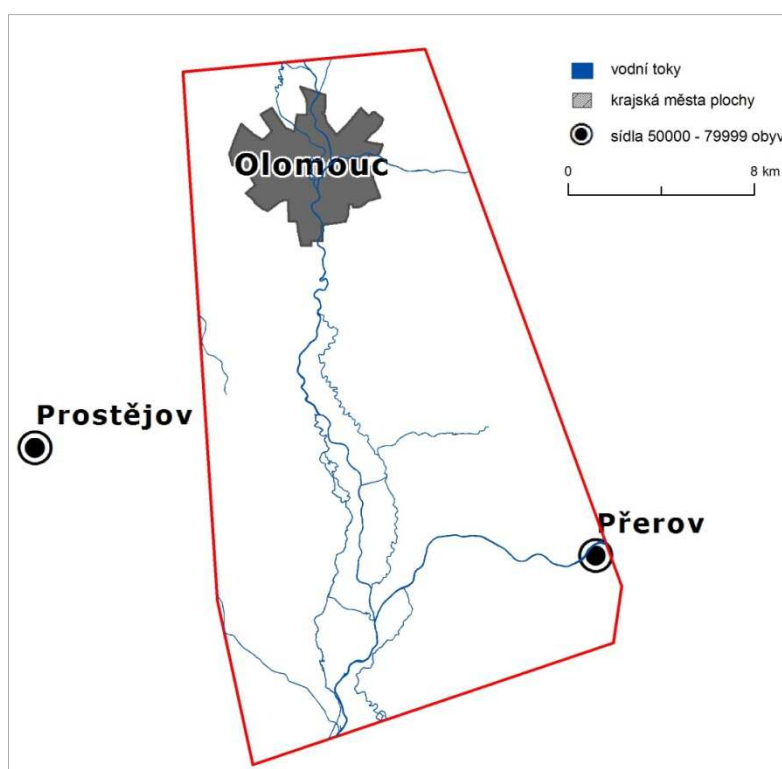
Tabulka 10: Použitá radarová data

režim snímání	datum pořízení	oblast	dráha letu	rozlišení	úhel dopadu
Standard 2	10. 7. 1997	sev. Morava	vzestupná	30 m	24 - 31°
Standard 7	14. 7. 1997	jížní Morava	sestupná	30 m	45 - 49°
Fine 2	18. 8. 2002	střední Čechy	sestupná	8 m	39 - 42°

Severní Morava 10. 7. 1997

Z tohoto snímku bylo zpracováno území od Olomouce po soutok s Bečvou (Obrázek 27). Snímek je pořízen až po maximálních průtocích na řece Moravě i Bečvě. Nejdříve dosahovala kulminačních průtoků řeka Bečva v Přerově, v noci ze 7. na 8. 7. Dosáhla maximálního průtoku $840 \text{ m}^3/\text{s}$. Den poté (9. 7. v 19 hodin) dosáhla maximálního průtoku $860 \text{ m}^3/\text{s}$ i řeka Morava v Olomouci. Povodňová vlna se z Olomouce dostala do Kroměříže za 16 hodin. V Kroměříži dosahovala Morava maximálního průtoku 10. 7. v 11 hodin, v té době zde protékalo $1034 \text{ m}^3/\text{s}$ (Vodohospodářský dispečink Povodí Moravy, 1998). Snímek byl pořízen v 16 hodin 30 minut, tedy až po maximálním průtoku v Kroměříži.

Obrázek 27: Zpracovávané území severní Moravy



Jižní Morava 14. 7. 1997

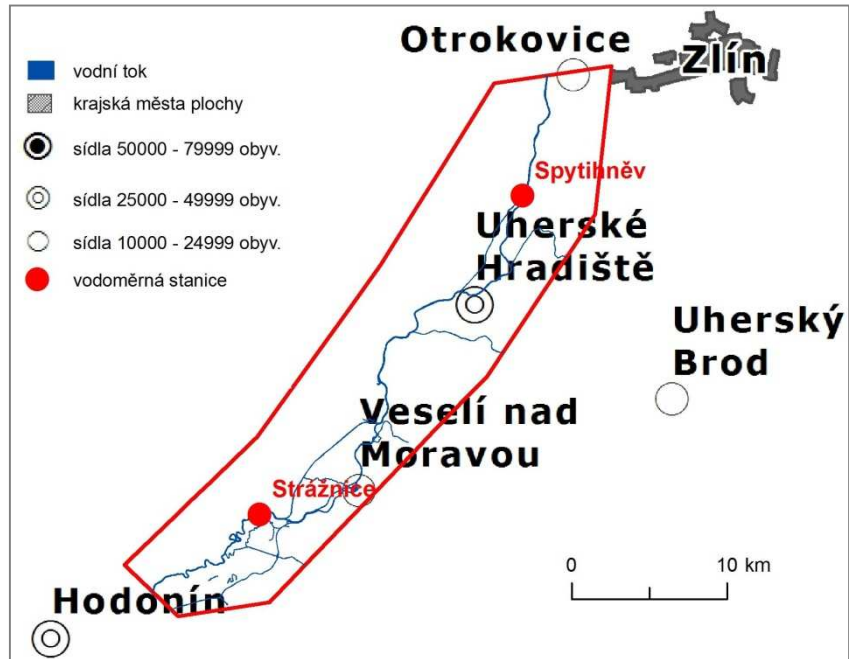
Snímek jižní Moravy ze dne 14. 7. byl vybrán s ohledem na datum pořízení a průběh povodně v tomto roce. Kulminační průtok na stanici Českého hydro-meteorologického ústavu ve Strážnici byl 14. 7. v 5 hodin (Tabulka 11). Radarový snímek byl pořízen stejný den a dokonce téměř i ve stejném čase, a to ve 4:50. Jedná se tedy o snímek, na kterém by měl být zachycen maximální rozliv z těchto povodní. Důvodem, pro vyhodnocování snímku s maximálním rozsahem zatopeného území, jsou i dostupná data pro verifikaci výsledku této analýzy.

Tabulka 11: Kulminační průtoky při povodních v roce 1997 (Soukalová, E.; Řehák, T.; Šihar, Z., 2008)

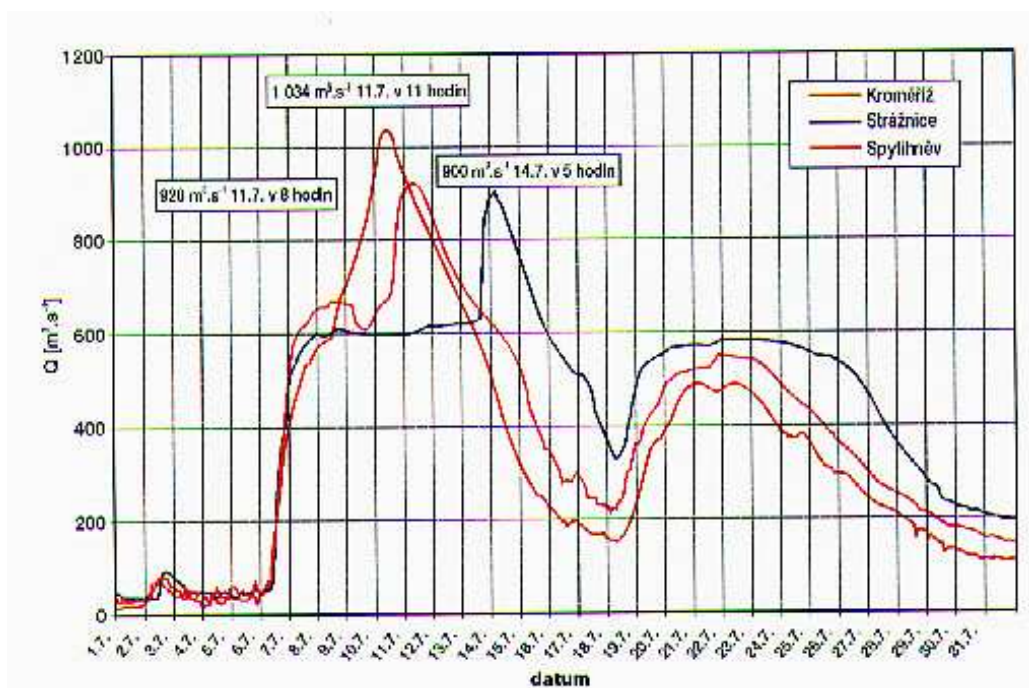
Tok	Stanice	Plocha pov. [km ²]	Den	Ho-dina	Průtok [m ³ s ⁻¹]	N - letost
Moštěnka	Prusy	229,91	7.7.	21	223	> 100 L
Morava	Kroměříž	7014,44	10.7.	11	1034	> 100 L
Rusava	Chomýž	27,32	7.7.	14	40,5	> 100 L
Rusava	Třebětice	59,73	7.7.	19	44,6	20–50 L
Dřevnice	Zlín	311,99	7.7.	4	282	> 50 L
Morava	Spytihněv	7890,71	11.7.	8	920	> 100 L
Olšava	Uher. Brod	401,23	8.7.	9	140	10–20 L
Morava	Strážnice	9146,92	14.7.	5	900	> 100 L
Dyje	Vranov	2223,86	17.7.	16	54,6	5 d
Dyje	Trávní Dvůr	3448,53	20.7.	16	58,1	> 1/2 L
Svratka	Borovnice	128,09	8.7.	1	41	5 L
Svratka	Dalečín	367,01	8.7.	2	128	50 L
Svratka	Vlč. p.p.	486,38	19.7.	19	61	10 L
Svratka	Vév. Blýška	1480,17	8.7.	7	115	5 L

Zpracovávané území pokrývalo území podél toku Moravy v rozmezí od Otrokovic po Strážnici (Obrázek 28). Další území nebylo bráno v úvahu, protože průtokové stavy na tocích mimo vybrané území dosahovaly výrazně nižších hodnot oproti maximálním průtokům (Obrázek 29). Dokonce na vodoměrné stanici Spytihněv dosáhla řeka Morava maximálního průtoku o 69 hodin dříve než ve Strážnici (Tabulka 11). Obě stanice jsou přitom vzdáleny pouze 27 km vzdušnou čarou. Jednalo se o velmi nevídanou situaci. Za normální situace předchází kulminační průtoky řeky Bečvy o dva až tři dny kulminační průtoky horní Moravy. Za těchto povodní se však povodňové vlny téměř setkaly na soutoku obou řek a tato vlna měla v důsledku obrovských rozlivů nepředvídatelný průběh, a to zejména ve střední a dolní části povodí, tedy na zkoumaném území. Oproti předpokládaným postupovým dobám při stoletých povodních docházelo k mnohahodinovým zpožděním. Příčinou byly hlavně průtrže hrází. Voda se navíc akumulovala v zaplaveném území, hlavně kvůli hrázím, silničním a železničním náspům. Proto hrozilo nebezpečí náhlého protržení překážek a zvýšení hladiny (Soukalová, E.; Řehák, T.; Šihar, Z., 2008).

Obrázek 28: Zpracovávané území jižní Moravy



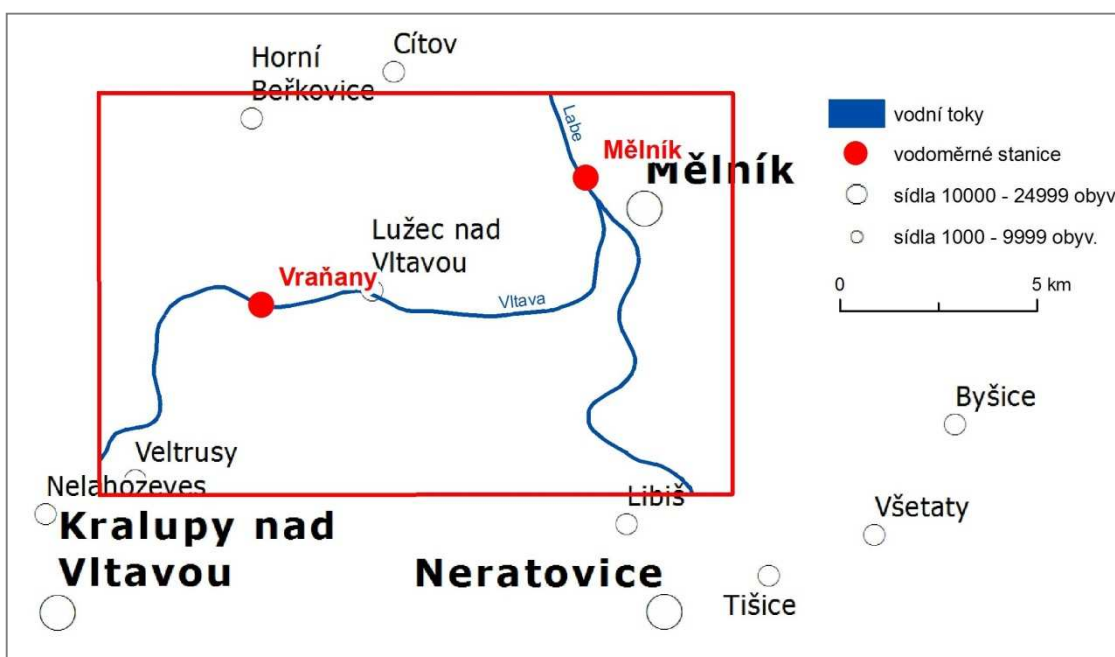
Obrázek 29: Graf průtoků na vodoměrných stanicích (Soukalová, E.; Řehák, T.; Šihar, Z., 2008)



Střední Čechy 18. 8. 2002

Z tohoto snímku bylo zpracovávané území soutoku Labe a Vltavy (Obrázek 30). Snímek je pořízen po maximálních průtocích na obou řekách. Na vodoměrné stanici Vraňany byl naměřen maximální průtok 14. 8. ve 20 hodin. Vodoměrnou stanicí Mělník protékalo maximální množství vody 15. 8. ve 13 hodin. Na soutoku obou řek došlo k velkým rozlivům hlavně z toho důvodu, že obě řeky dosahovaly velmi vysokých průtoků a zároveň se obě povodňové vlny potkaly téměř ve stejnou dobu (Ministerstvo Životního prostředí ČR, 2004). I když byl snímek pořízen přibližně 62 hodin po maximálním průtoku, vlivem detence zůstala řada míst stále zatopených.

Obrázek 30: Zpracovávané území středních Čech



7.2 Ostatní data

ZABAGED

K nejdůležitějším datům patří výškový model ZABAGED, který je nutný pro ortorektifikaci radarových snímků, ale hraje také důležitou roli i v dalším vyhodnocování a vykreslování hranice zatopeného území. Tento model je tvořen vrstevnicemi s ekvidistancí 2m.

Ortofotomapa

Dále byla použita ortofotomapa České republiky. Ortofotomapa byla načtená z národního geoportálu INSPIRE jako WMS služba rozlišením 50 cm. Ortofotomapa byla použita jako prostředek ke sběru kontrolních bodů pro radarová data. Dále také k vizualizaci výsledků.

DIBAVOD

Byly využity také vrstvy Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD). Jedná se o referenční geografickou databázi vytvořenou primárně z odpovídajících vrstev ZABAGED a cílově určenou pro tvorbu tematických kartografických výstupů s vodohospodářskou tematikou a tematikou ochrany vod. Z této databáze byla použita síť vodních toků, maximální hranice záplavových území a data s hydrologickým členěním. „Rozsah rozlivů byl zdokumentován leteckým snímkováním a byl vyhodnocen fotogrammetrickými metodami“ (Vodohospodářský dispečink Povodí Vltavy, 2003, s. 46).

Rozliv povodní v roce 1997

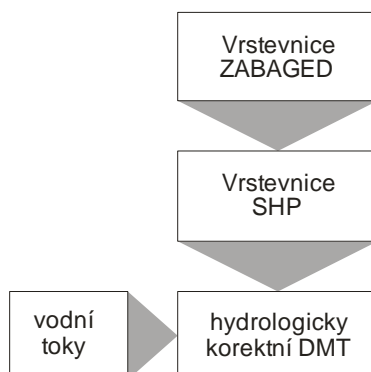
Povodí Moravy s. p. poskytlo křivku s rozlivem povodní v roce 1997. Linie rozlivu byla určena kombinací místního šetření a leteckých snímků.

8 Zpracování dat a výsledky

Radarový snímek je zpracováván v programu Geomatica. OrthoEngine je využíván k vytvoření geometricky korektního snímku. K následné klasifikaci je využíván Focus. Na výsledek klasifikace jsou aplikovány morfologické filtry v programu Matlab, kde jsou uložena ve formátu *.tif, aby bylo možné s výsledným rastrem pracovat v ArcMap. V něm dochází k vykreslení zaplaveného území na základě digitálního modelu terénu.

Před samotným zpracováním radarového snímku bylo potřeba si vytvořit digitální model terénu (Obrázek 31). K dispozici byl výškový model ZABAGED. Výška je v něm uložena ve formě vrstevnic. Tento model je uložen po jednotlivých mapových listech ve formátu *.dgn. Pro lepší práci s tímto modelem byly všechny soubory s vrstevnicemi převedeny do formátu *.shp, aby se s nimi lépe pracovalo v programu ArcMap. Dosaženo toho bylo pomocí skriptu v programovacím jazyce Python. Následně byly všechny soubory ve formátu *.shp spojeny do jedné vrstvy. Poté mohl být vektorový výškový model převeden na rastrový. K tomu byla využita i vrstva vodních toků, která umožnila vytvořit hydrologicky korektní model terénu.

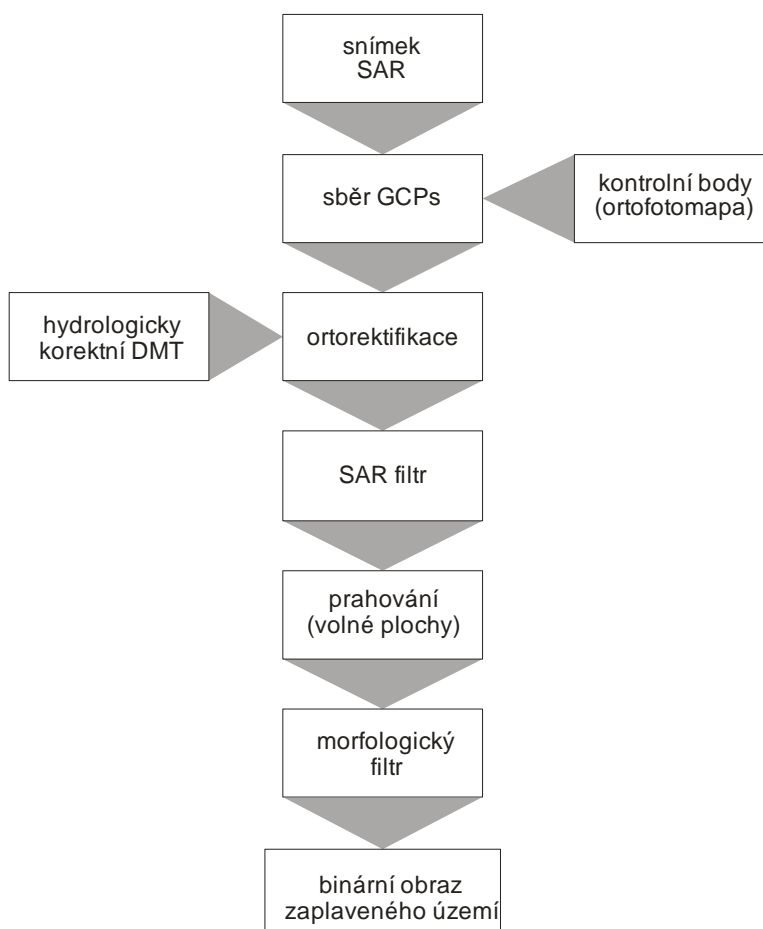
Obrázek 31: Schéma vzniku DMT



V další fázi byl řešen podklad pro sběr kontrolních bodů radarového snímku. Jelikož nebyla k dispozici ortofotomapa v souboru, byla načtena ortofotomapa pomocí WMS serveru. Nad touto ortofotomapou byla vytvořena bodová vrstva s kontrolními body.

Nyní je možné přistoupit k předzpracování a klasifikaci radarového snímku. Obrázek 32 znázorňuje přehled jednotlivých kroků.

Obrázek 32: Postup zpracování radarového snímku

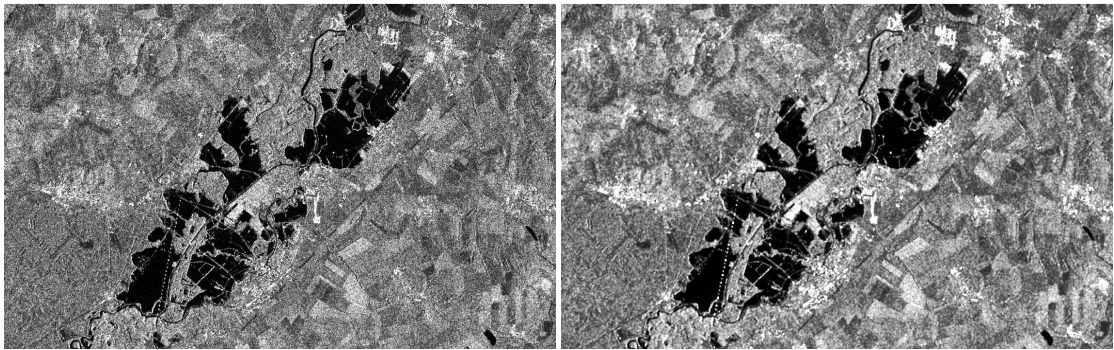


Pro další práci s radarovým snímek bylo nejprve nutné načíst všechna data ke zpracovávání scéně. Načtený snímek s družicovými záznamy byl následně transformován z výchozího souřadnicového systému WGS84 do systému SJTSK. Tato transformace byla provedena z důvodu toho, že DMT i kontrolní body jsou v tomto souřadnicovém systému uloženy. Následně došlo ke sběru kontrolních bodů (GCPs) a výpočtu parametrů polynomické transformace.

Nyní proběhla ortorektifikace snímku metodou nejbližšího souseda (*nearest neighbour*). K tomu byl použit vygenerovaný DMT z předchozího kroku.

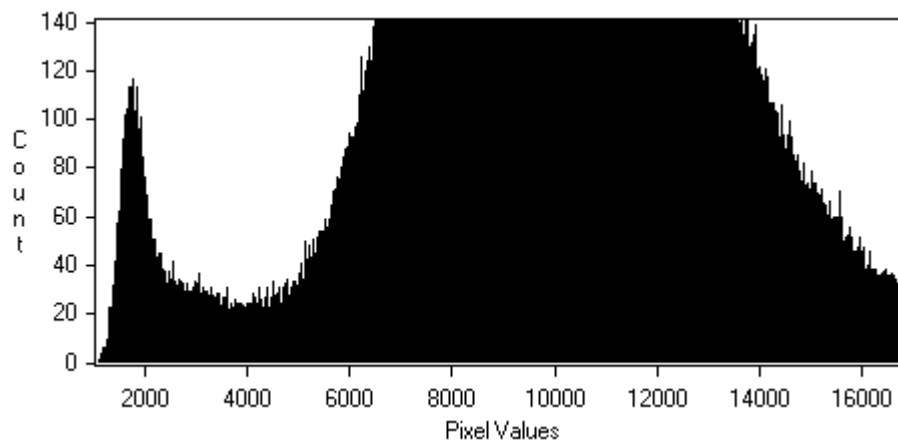
Po ortorektifikaci byl na snímek aplikován speciální filtr na radarová data. Filtr je koncipován tak, aby odstranil vysokofrekvenční šum (*speckles*) a zároveň zůstaly zachovány hrany objektů. Na snímek byl aplikován filtr Kuan o rozměrech 3x3 pixely (Obrázek 33).

Obrázek 33: Původní snímek (vlevo) a snímek po aplikaci speciálního filtru



Dále byla provedena klasifikace radarového snímku. Z výše uvedených důvodů byla provedena klasifikace volných vodních ploch pomocí prahování. Prahová hodnota byla stanovena podle histogramu (Obrázek 34).

Obrázek 34: Histogram snímku ze 14.7.1997

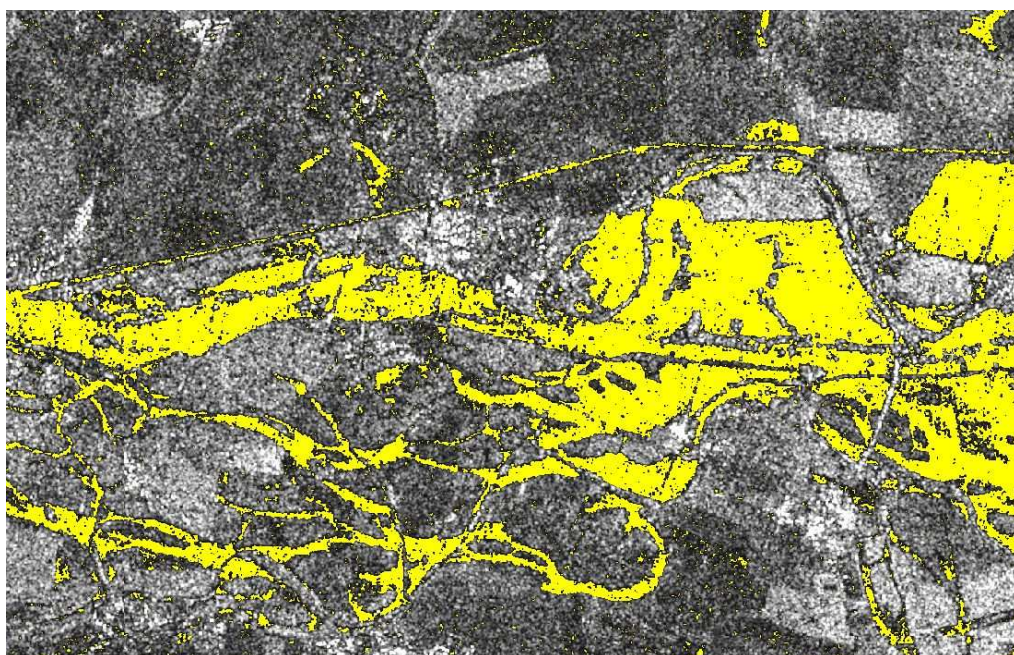
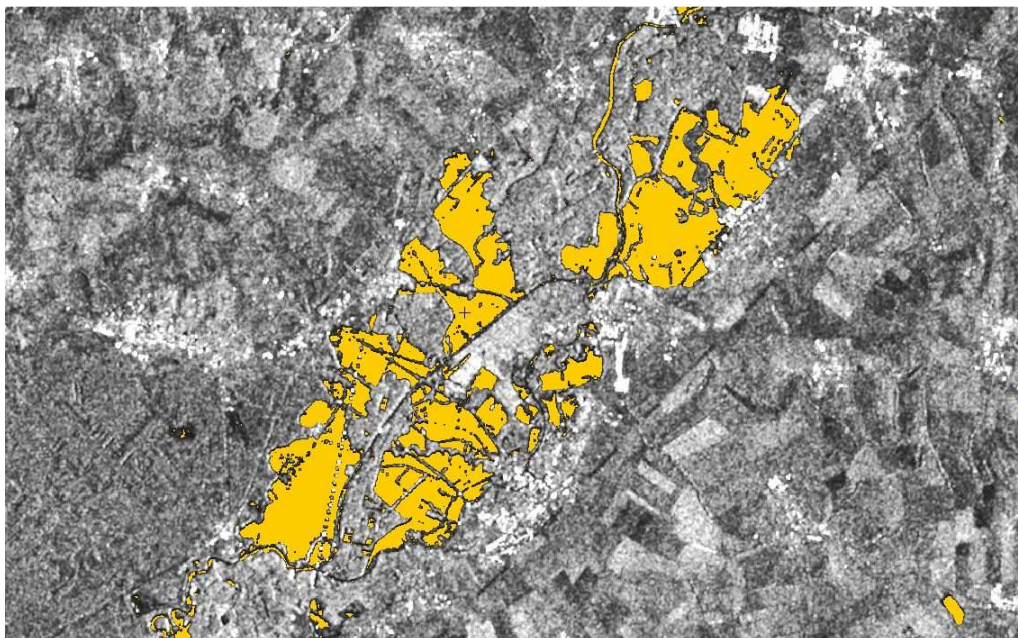


Na základě prahové hodnoty byl vytvořen binární obraz s hodnotami 0 a 1 (Obrázek 35).

Obrázek 35: Klasifikované volné plochy

nahoře snímek ze 14. 7. 1997

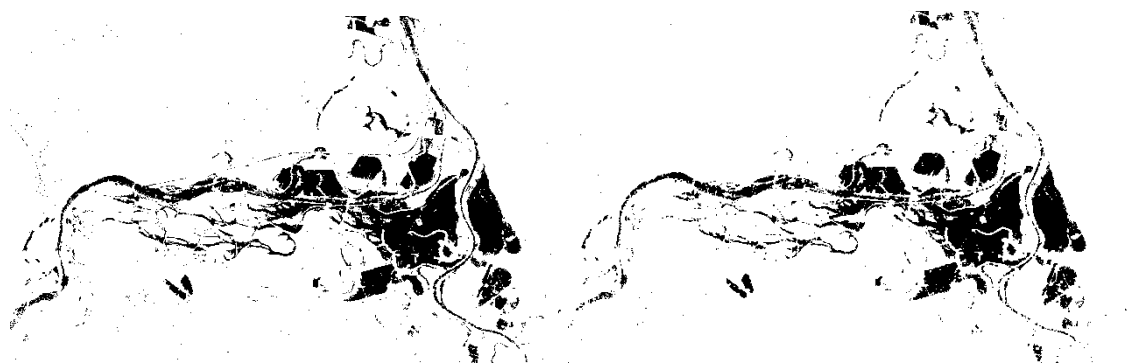
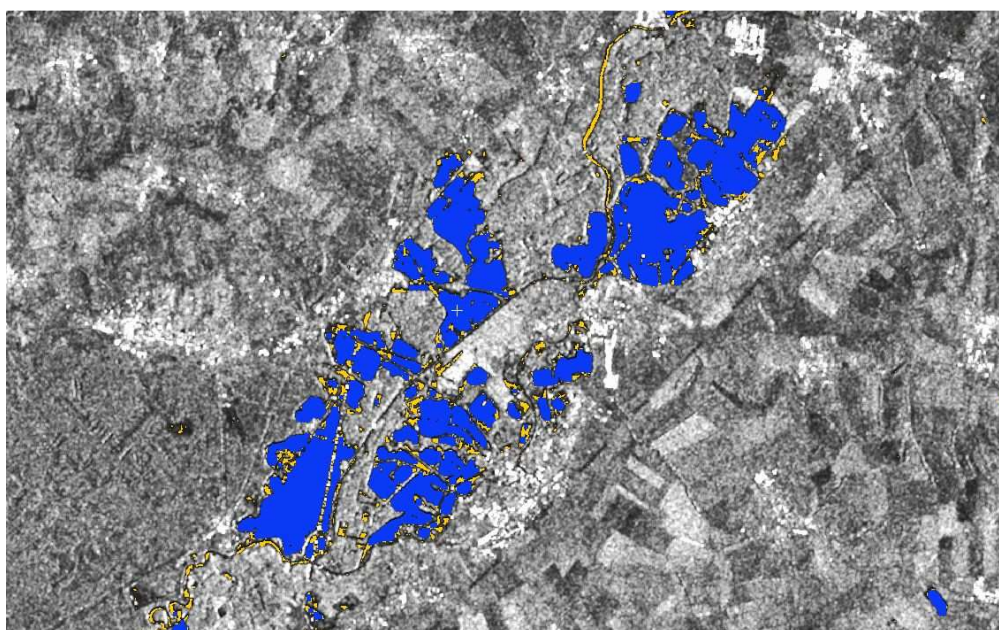
dole snímek z 18. 8. 2002



Klasifikace vybrala na snímku plochy s nejnižšími hodnotami zpětného odrazu. Většina pixelů, které byly vybrány jako zaplavené plochy, byly klasifikovány správně. Místy se nacházely osamocené pixely, které byly na základě vizuálního porovnání s ortofotomapou vyhodnoceny jako chybně klasifikované. Tyto pixely musely být

odstraněny, aby nezpůsobovaly chyby v dalším vyhodnocování. K tomuto účelu byly použity morfologické filtry. Nejdříve byla aplikovaná eroze s hodnotou 2. Tento filtr odebral ode všech ploch 2 krajní pixely. Aby nedošlo k výraznému úbytku velikosti klasifikovaných ploch, následovala dilatace s hodnotou 2, která zbylým objektům opět přidala 2 pixely. Tímto krokem došlo k odstranění osamocených pixelů. Porovnání morfologického filtru a původní klasifikace zobrazuje Obrázek 36. Je vidět, že kromě osamocených a malých skupin pixelů ubyl na klasifikaci i tok řeky Moravy a výběžky velkých ploch. Tento zásah do původní klasifikace byl nezbytný, protože další vyhodnocování je velmi náchylné na chybně klasifikované pixely mimo vodní plochy.

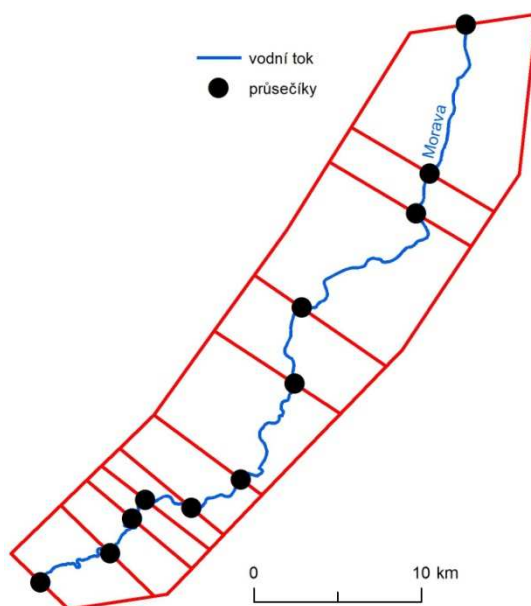
*Obrázek 36: Porovnání původní klasifikace a klasifikace po aplikaci morfologického filtru
nahore snímek ze 14. 7. 1997
dole snímky z 18. 8. 2002 (vlevo původní klasifikace, vpravo po morfologické filtraci)*



Před dalším vyhodnocováním zaplaveného území, je potřeba připravit podklady. Tím je myšleno rozdělení zájmového území na úseky. K rozdělení je nutné mít k dispozici hydrologicky korektní DMT území a linii vodního toku. Z DMT byly vygenerovány vrstevnice s intervalem 2 m. Byly generovány nové vrstevnice, protože mezi vrstevnicemi ze ZABAGEDu a tokem řeky nebylo možné najít průsečíky.

Mezi vrstevnicemi a linií toku byly nalezeny průřečníky. Vzniklé body sloužily k rozdělení zájmového území na jednotlivé úseky (Obrázek 37).

Obrázek 37: Úseky zájmového území jižní Moravy



Tímto byly vytvořeny podklady a bylo možné přistoupit dalšímu vyhodnocování. Do dalších analýz byly vstupními daty vytvořené úseky a binární obraz (Obrázek 38).

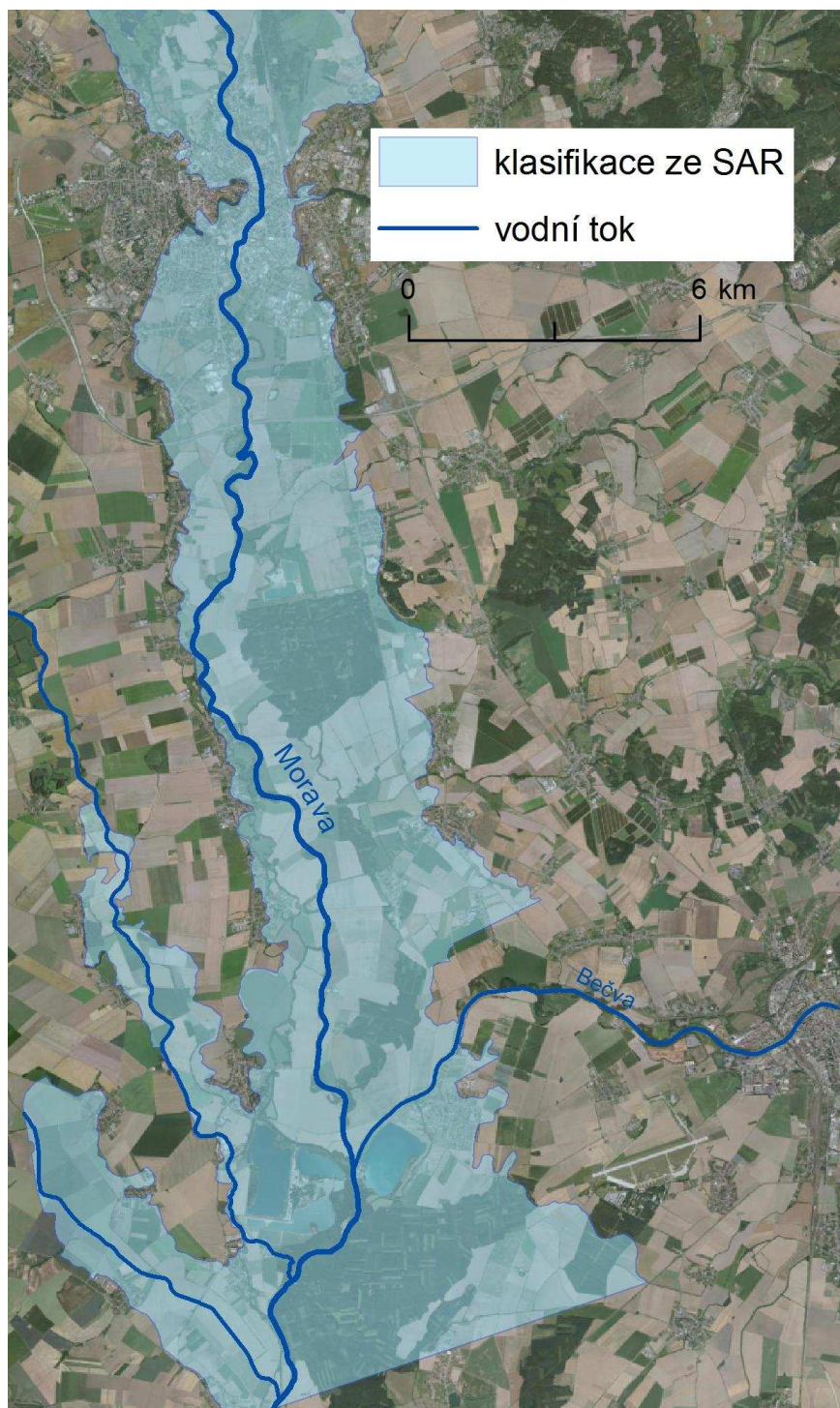
Obrázek 38: Vymezování zaplaveného území



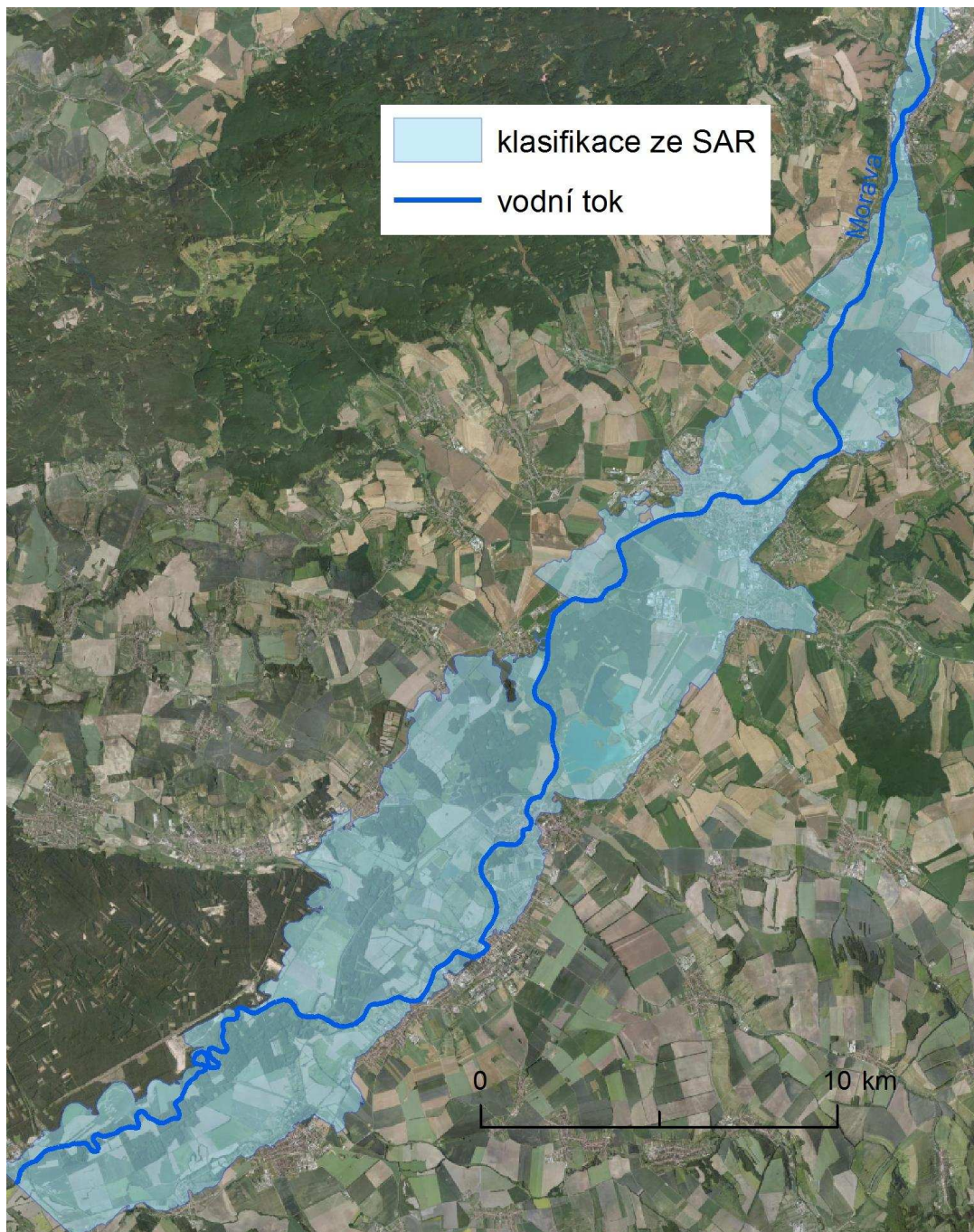
Pro každý úsek byla zjištěna maximální nadmořská výška z ploch, které byly na binárním obraze klasifikované jako zaplavené území. Před zjištěním nadmořské výšky je nutné z binárního obrazu odstranit trvalé vodní plochy. To lze provést dvěma způsoby, buď ručním zásahem, nebo za použití dat *land cover*. Data o trvalých vodních plochách však musejí být přesné, aby nedošlo k chybnému určení nadmořské výšky. Tento krok zabraňuje případům, kdy by se mohla trvalá vodní plocha nacházet ve vyšší nadmořské výšce a tím ovlivnit určení nadmořské výšky zatopeného území. I jediný

pixel může určení nadmořské výšky výrazně ovlivnit. Nejvyšší nadmořská výška sloužila k vykreslení hranice zatopeného území. Výsledkem byly linie vymezující zaplavené plochy v jednotlivých úsecích. Ty byly následně spojeny a vznikla výsledná plocha (Obrázek 39, Obrázek 40, Obrázek 41).

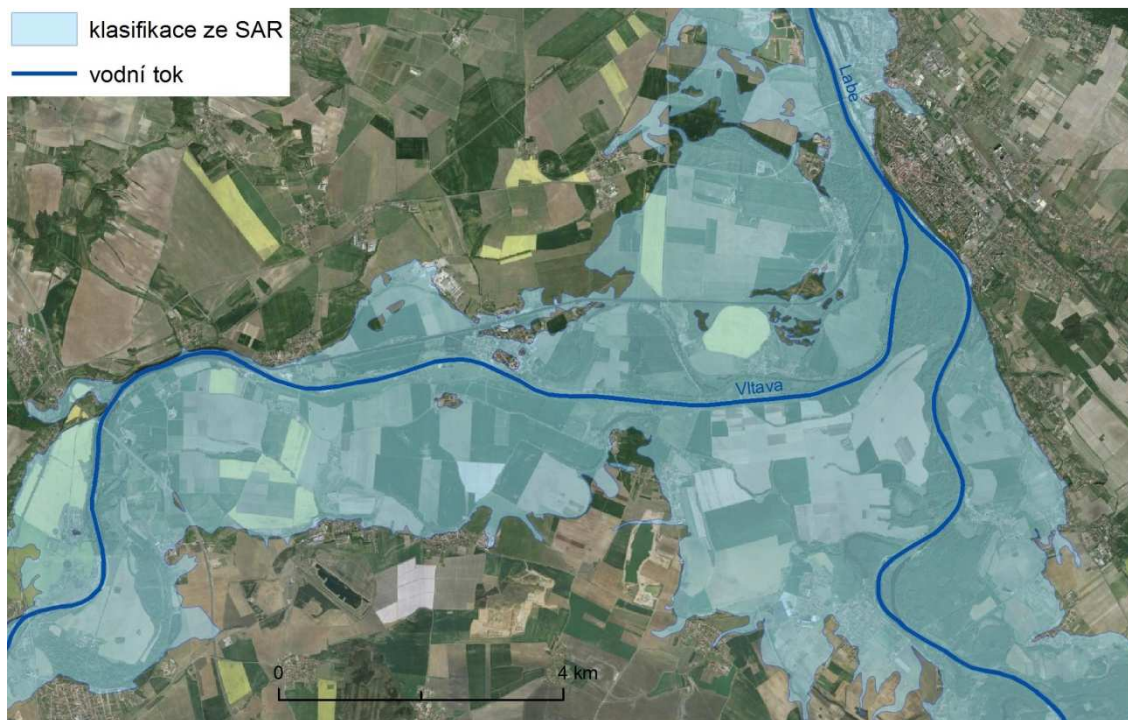
Obrázek 39: Hranice zatopeného území z 10. 7. 1997



Obrázek 40: Hranice zatopeného území ze 14. 7. 1997

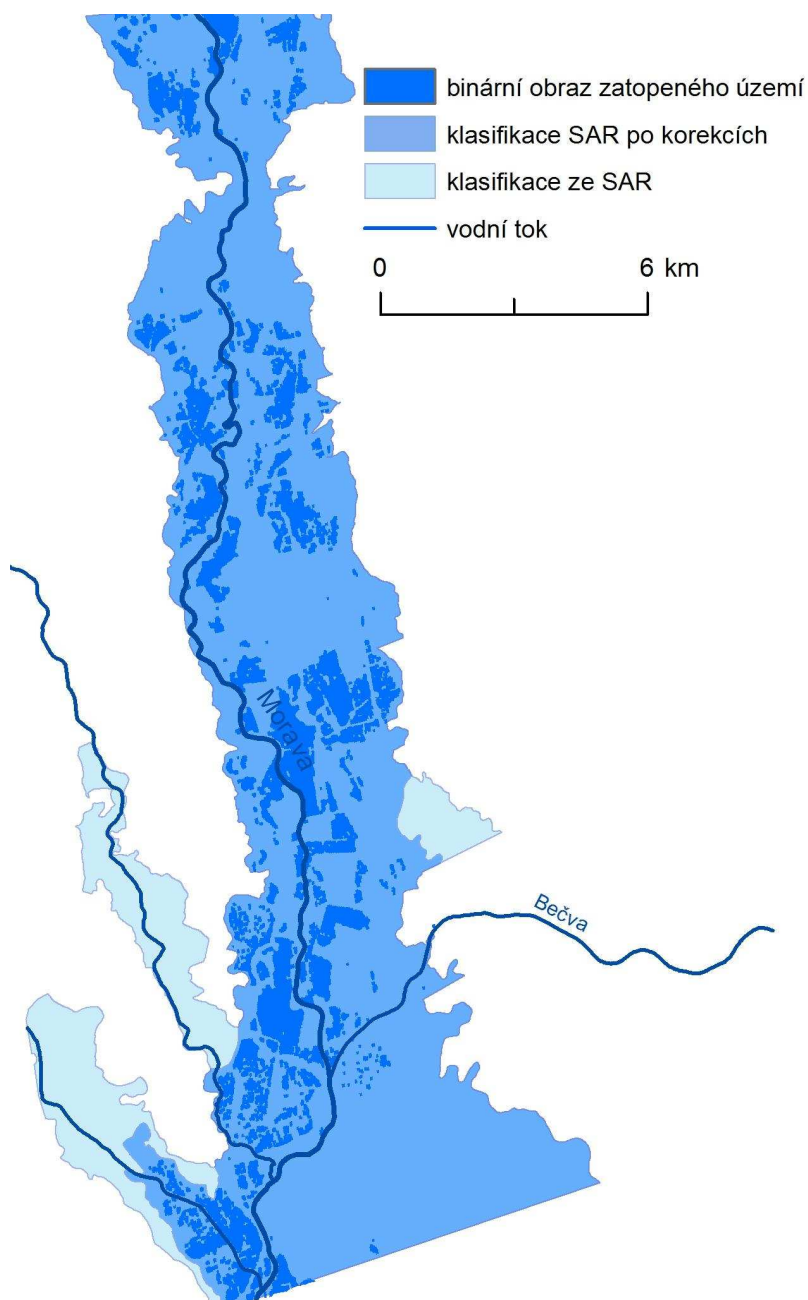


Obrázek 41: Hranice zatopeného území z 18. 8. 2002



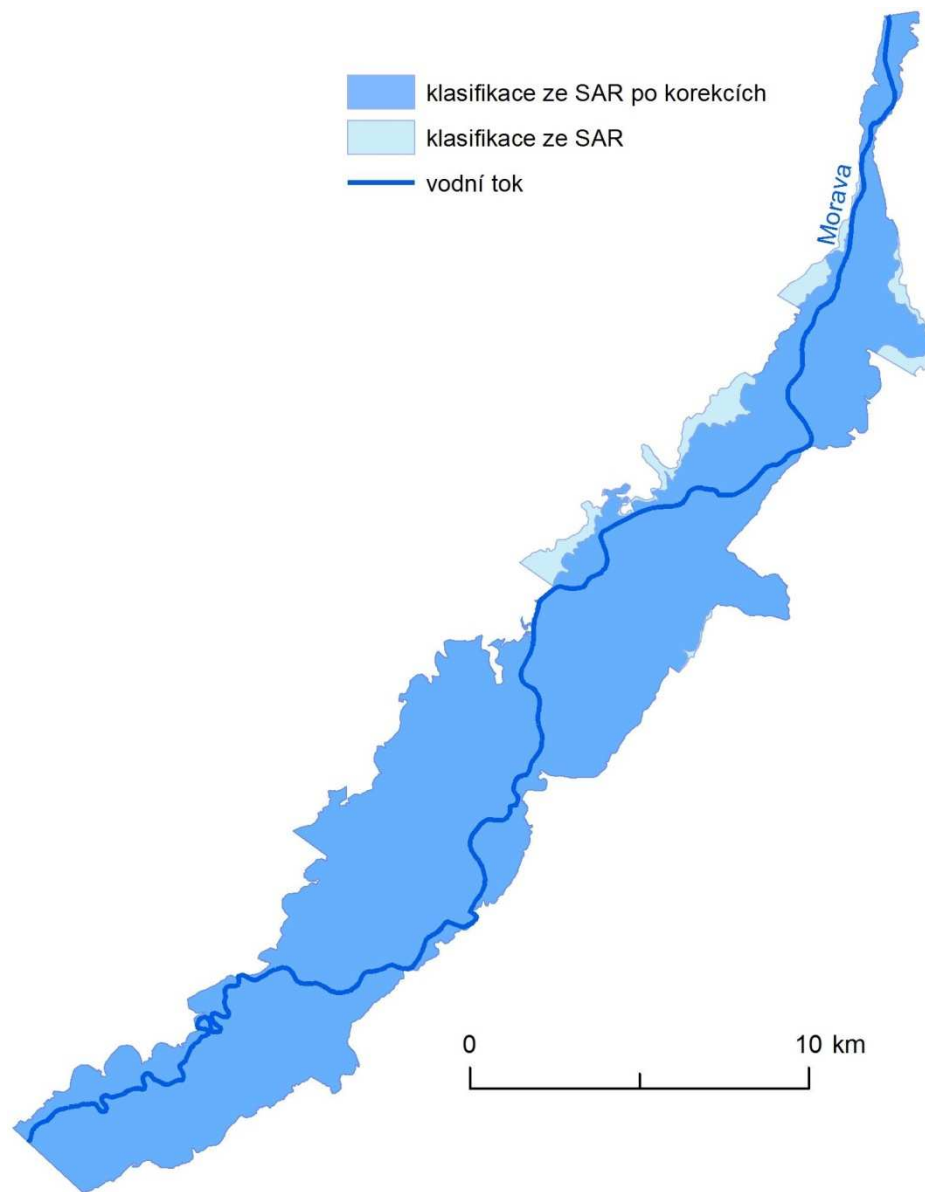
Nepřesnosti mohou vzniknout, nachází-li se v daném území soutok (Obrázek 39). Na výsledné klasifikaci jsou zaplavená i sousední údolí. Je to důsledek toho, že zájmové území bylo rozdělené na jednotlivé úseky. Nastala tedy situace, kdy se na jednom úseku nacházelo více údolí. Křivka s určenou nadmořskou výškou se tedy vykreslila v obou údolích. Řešením této chybné klasifikace je takové, že se k zájmovému území musí přistupovat na úrovni jednotlivých povodí. K těmto povodím pak lze přistupovat opět po jednotlivých úsecích. Obrázek 42 znázorňuje opravenou klasifikaci. Je zde dobře vidět, jak opravená klasifikace zasahuje pouze do spodních částí bočních povodí.

Obrázek 42: Hranice zatopeného území z 10. 7. 1997 po korekcích



Při vykreslování linie zatopených území také docházelo k nepřesnostem v napojení jednotlivých úseků. K tomuto docházelo zejména v oblasti jižní Moravy (Obrázek 40), u ostatních území byla tato napojení bez větších nepřesností. Tento jev vzniká především u delších úseků. U dlouhých úseků proto došlo k rozdělení tak, aby se zlepšila návaznost křivky (Obrázek 43).

Obrázek 43: Hranice zatopeného území ze 14. 7. 1997 po korekcích



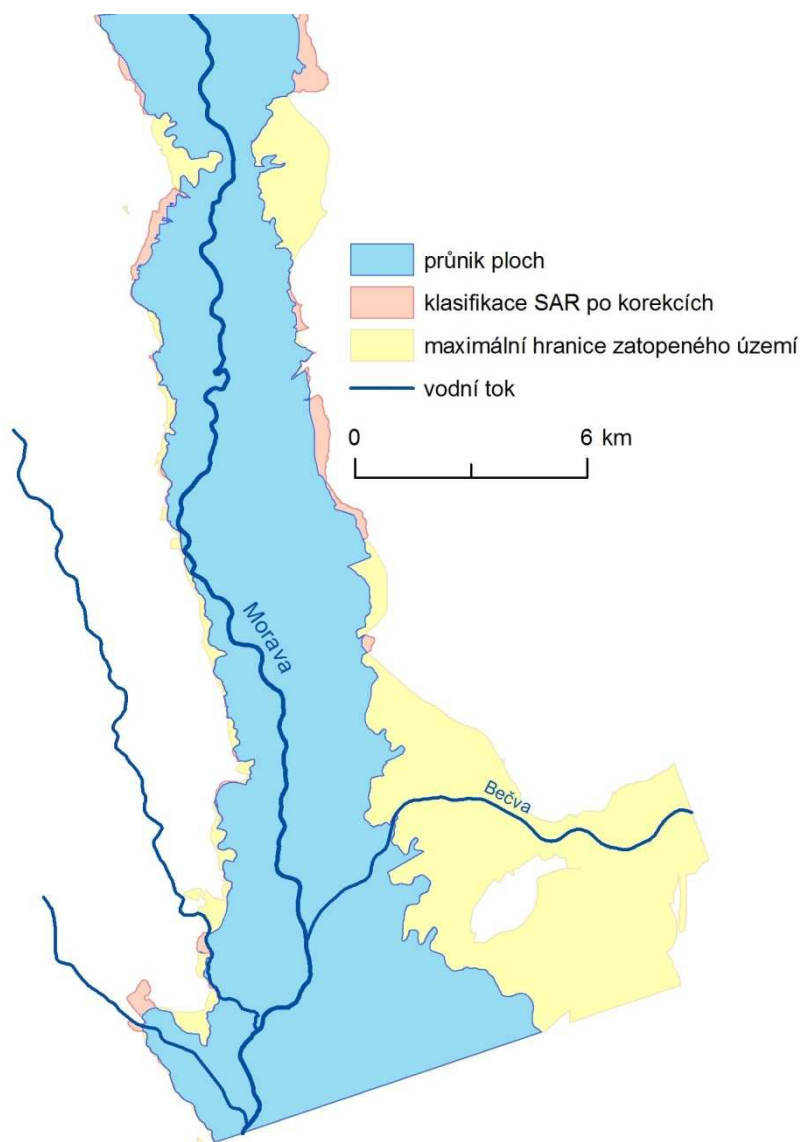
8.1 Hodnocení výsledků

K hodnocení výsledků klasifikace byla použita plocha zaznamenávající maximální rozsah zatopeného území při povodních v roce 1997 a 2002 z databáze DIBAVOD. Výsledek zatopeného území při povodních v roce 1997 byl porovnáván také s linií rozlivů, která byla poskytnuta Povodím Moravy s. p.

8.1.1 Severní Morava

Nejprve došlo k porovnání výsledku klasifikace s maximální hranicí zatopeného území z databáze DIBAVOD (Obrázek 44). Průnik ploch označuje území společné pro vyklasifikované území ze SAR a maximální hranice zatopeného území. Na první pohled jsou patrné výraznější odchylky na území Olomouce a na soutoku s Bečvou. V případě soutoku s Bečvou mohou být rozdíly odůvodněny průběhem povodně. Bečva dosahovala maximálního průtoku přibližně 60 hodin před pořízením vyhodnocovaného snímku. Zatímco Morava dosahovala svých maxim mezi 5 – 21 hodinami před pořízením snímku. Tento časový rozptyl je dán dostupnými údaji. Jedním z nich je maximální průtok v Olomouci (9. 7. v 19 hodin) a druhým maximální průtok v Kroměříži (10. 7. v 11 hodin), který leží přibližně 20 kilometrů po proudu od soutoku s Bečvou. Vzdálenost Olomouce od soutoku s Bečvou činí přibližně 25 kilometrů.

Obrázek 44: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území z Dibavod



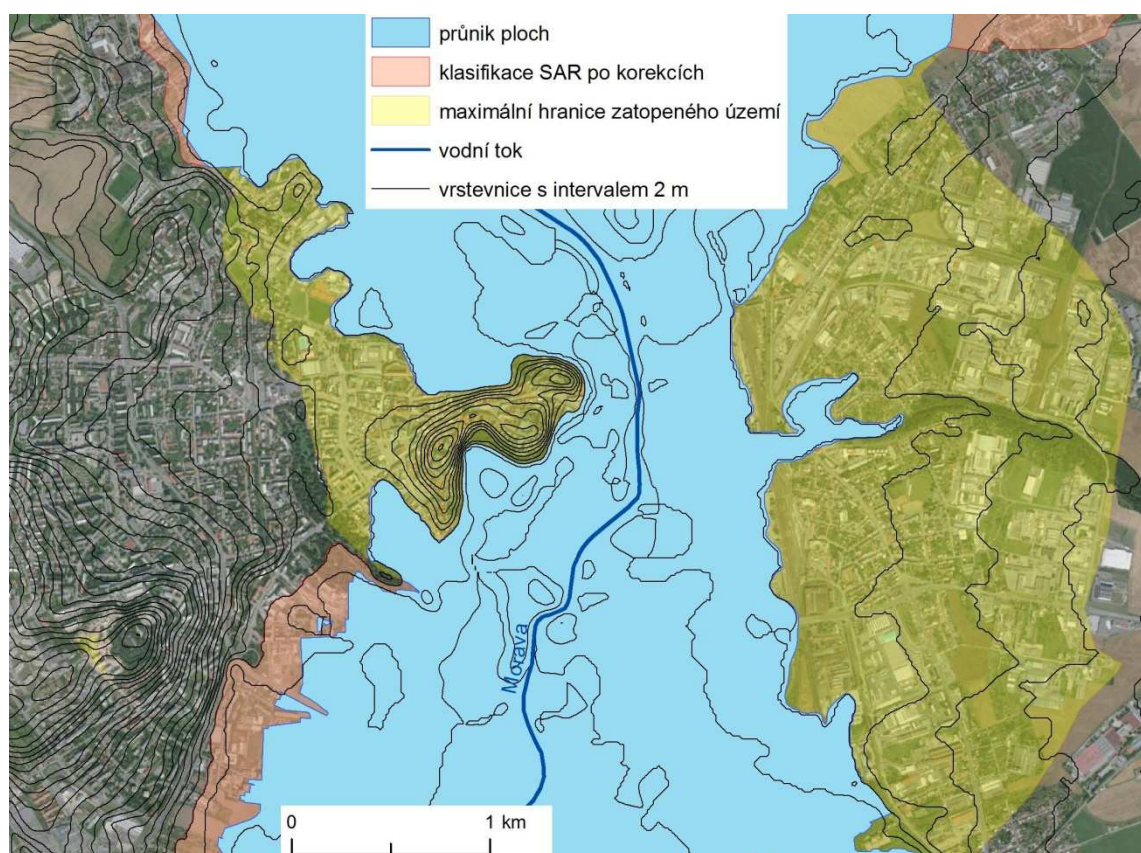
Tabulka 12 porovnává jednotlivé rozlohy ploch. Podíl společné plochy představuje procentuelní zastoupení průniku ploch v jednotlivých vrstvách. Klasifikace mimo společnou plochu udává, kolik procent z dané vrstvy se nachází mimo průnik ploch. Velmi znatelně se zde projevuje rozsáhlé území kolem toku Bečvy.

Tabulka 12: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území z Dibavod

	rozloha [km ²]	podíl společné plochy [%]	klasifikace mimo společnou plochu [%]
maximalní zátopové území	177,821	70,18	42,49
klasifikace ze SAR	128,752	96,93	3,17

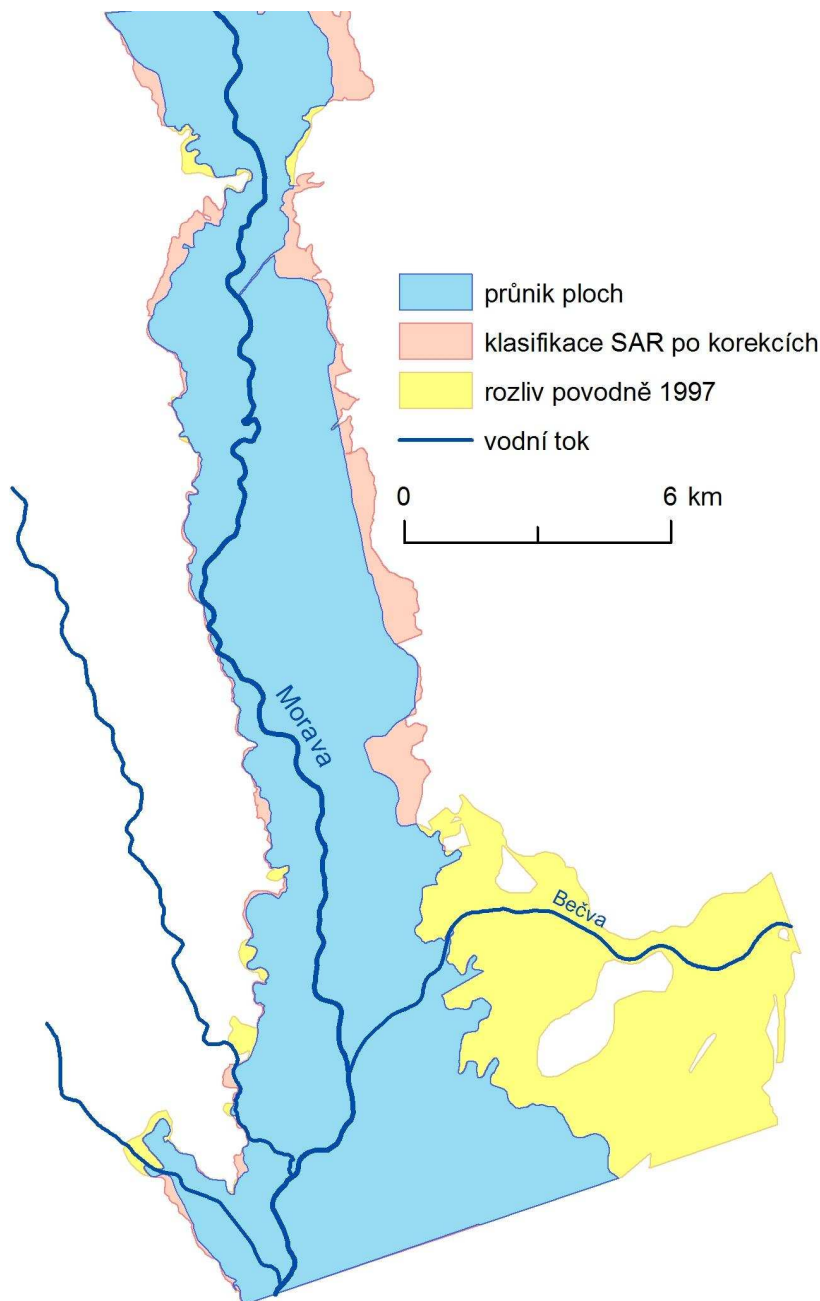
Obrázek 45 zobrazuje zaplavené území v Olomouci. Je zde vidět, jak se klasifikace radarového snímku výrazně liší od maximálního zatopeného území z databáze DIBAVOD. V pravé části to mohlo být způsobeno časovým rozdílem maximálního průtoku a pořízením snímku. V levé části je to však velmi nepravděpodobné. Voda by se musela této části dostat až o 12 metrů výše než na druhém břehu řeky.

Obrázek 45: Zaplavené území v Olomouci v porovnání s maximálním rozsahem zatopeného území z Dibavod

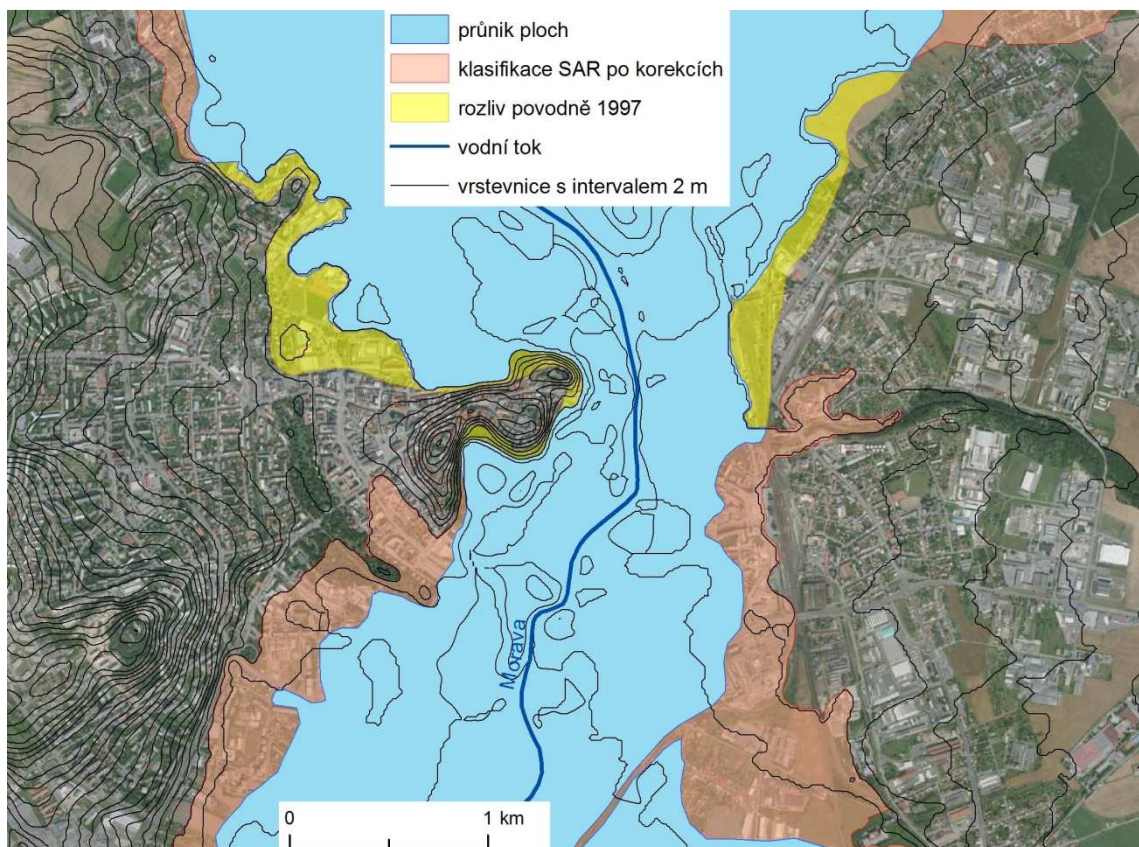


Následně došlo k porovnání s hranicí rozlivu povodně v roce 1997 poskytnutou Povodím Moravy (Obrázek 46). Na první pohled jsou výrazné odlišnosti pouze kolem toku Bečvy, které jsou pravděpodobně také způsobeny průběhem povodně. V ostatních částech území došlo k méně výrazným odchylkám než v předchozím případě. Zejména na území Olomouce (Obrázek 47).

Obrázek 46: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a rozlivu povodní v roce 1997



Obrázek 47: Zaplavené území v Olomouci v porovnání s rozlivem povodní v roce 1997



V číselném porovnání je stále znatelné zkreslení způsobené přítokem Bečvy.

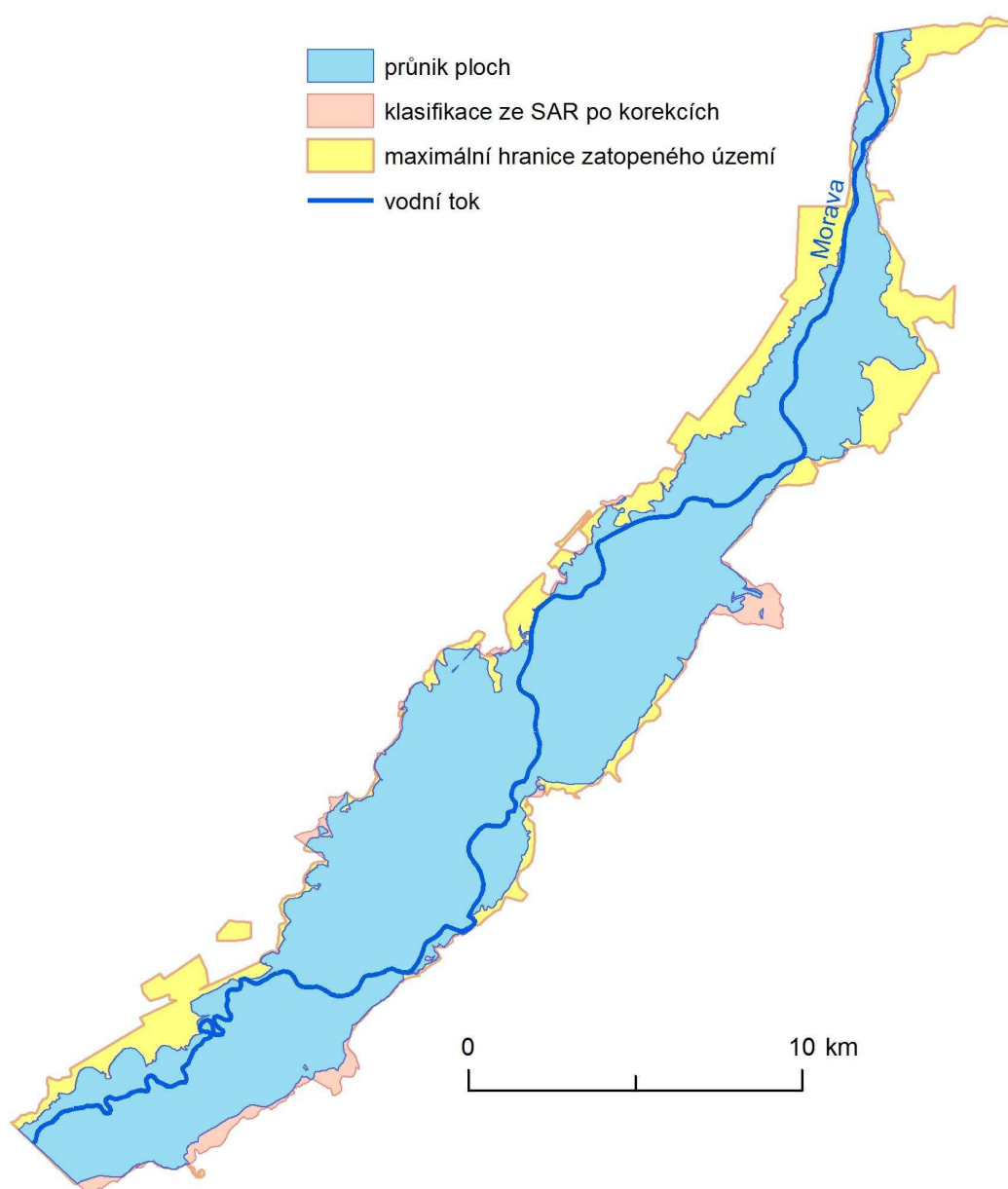
Tabulka 13: Porovnání klasifikace ze SAR (10. 7. 1997) a rozlivu povodní v roce 1997

	rozloha [km ²]	podíl společné plochy [%]	klasifikace mimo společnou plochu [%]
maximalní zátopové území	157,345	74,94	33,44
klasifikace ze SAR	129,370	91,58	9,19

8.1.2 Jižní Morava

Jako v případě severní Moravy došlo nejdříve k porovnání klasifikace ze SAR se zátopovým územím databáze DIBAVOD. Na srovnání je vidět (Obrázek 48), že klasifikace ze SAR výrazněji přesahuje ze společné plochy pouze v okolí Uherského Hradiště (Obrázek 51, vlevo). Výrazněji však společnou plochu přesahuje hranice maximálního zatopeného území. Patrné rozdíly jsou zejména horní a dolní části území. V horní části by mohl být důvodem rozdílné klasifikace průběh povodně. V době pořízení snímku v této části území uběhly od maximálního průtoku téměř 3 dny. Tento důvod však nemůže platit pro dolní úsek, protože v době pořízení snímku dosahoval průtok Moravy na vodoměrné stanici Strážnice maxima.

Obrázek 48: Porovnání klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území

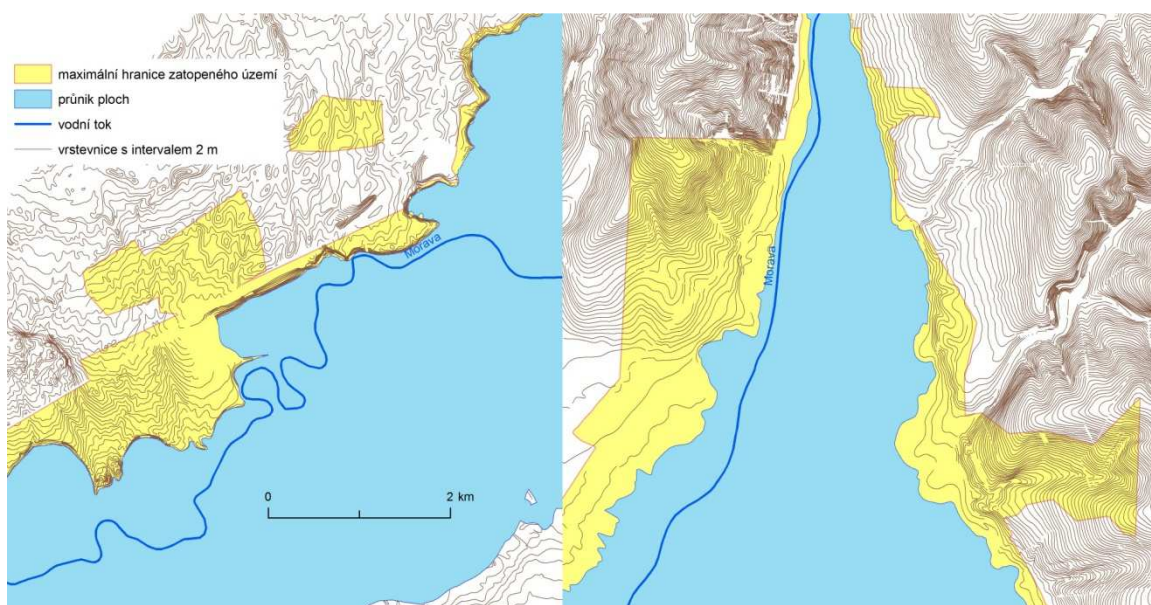


Došlo tedy k bližšímu prozkoumání lokalit s největšími rozdíly (Obrázek 49). Z obrázku je patrné, že v těchto lokalitách je s velkou pravděpodobností chybně určená hranice maximálního zatopeného území. Vyplývá to výškového modelu, voda by v těchto lokalitách musela překonat velké převýšení.

Obrázek 49: Nepřesnosti hranice maximálního rozlivu

vlevo: dolní část území

vpravo: horní část území



Tabulka 14 uvádí vysoký podíl společné plochy na ploše vyklasifikované z radarového snímku. Takto vysoké procentuelní zastoupení je s největší pravděpodobností dáno nepřesnostmi v hranici maximálního zatopeného území, což dokazuje i hodnota téměř 18 %.

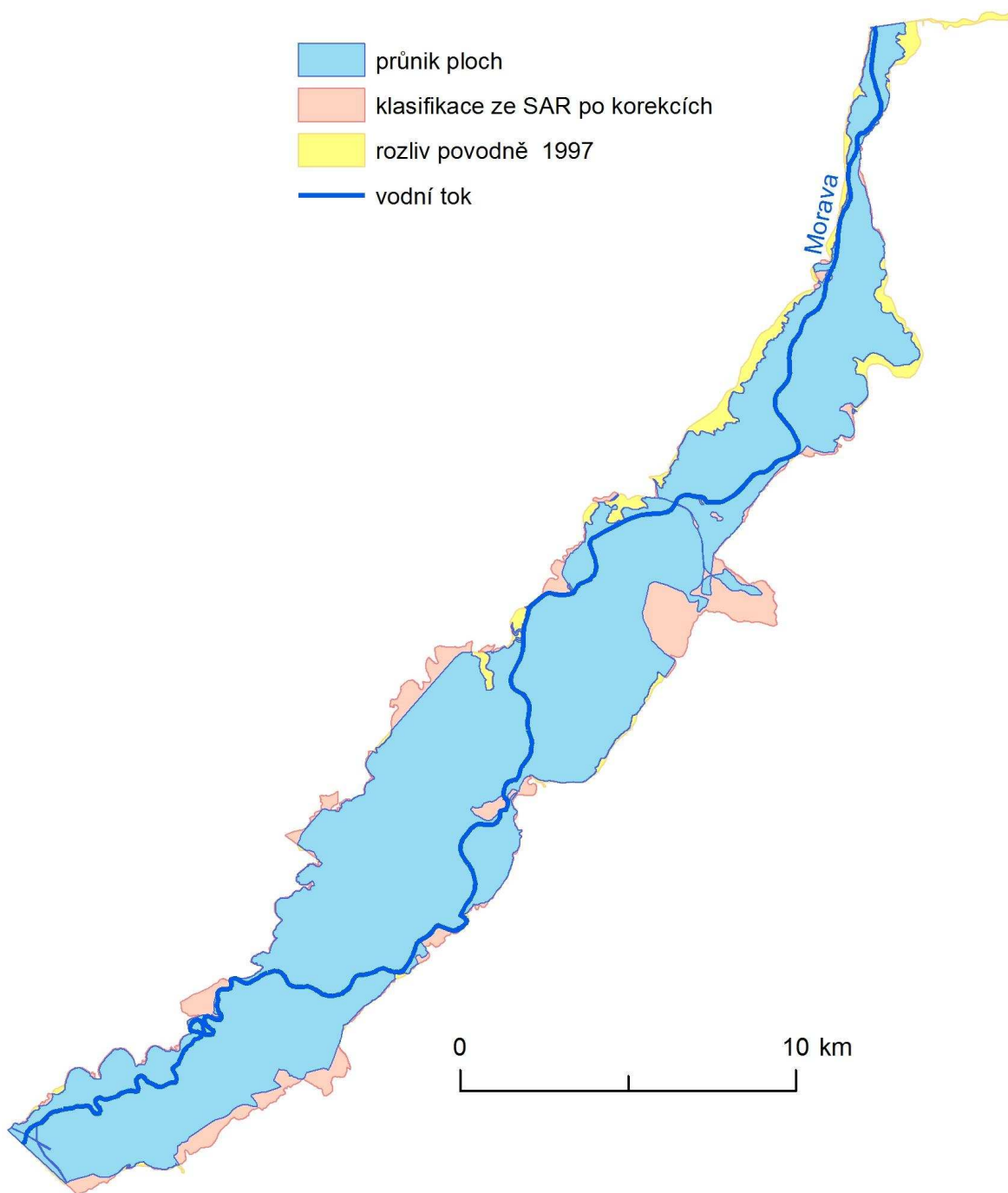
Tabulka 14: Porovnání klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a maximálního rozsahu zatopeného území

	rozloha [km ²]	podíl společné plochy [%]	klasifikace mimo společnou plochu [%]
maximalní zátopové území	176,260	81,87	17,78
klasifikace ze SAR	149,346	96,62	3,49

Z předchozího srovnání vyplývá, že data sloužící k porovnání výsledků obsahovala řadu nepřesností. Stejně jako v případě oblasti kolem Olomouce byl k dispozici na tomto území rozliv povodní od Povodí Moravy. Na první pohled je zjevný úbytek rozdílů v klasifikaci radarového snímku a hodnotících dat (Obrázek 50). Oproti

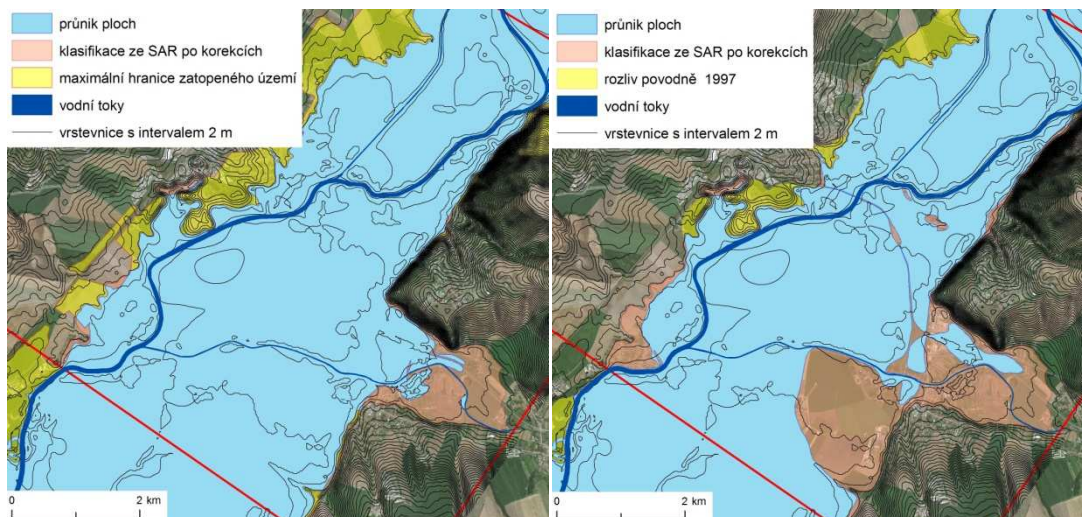
předchozímu případu přesahuje společnou plochu více hranice zaplaveného území vzniklá klasifikací. Rozliv z povodně v roce 1997 přesahuje společnou plochu zejména v horní části území. V tomto případě je s největší pravděpodobností příčinou průběh povodně. Maximální průtok byl na tomto území téměř 3 dny před pořízením snímku.

Obrázek 50: Klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a rozlivu povodně v roce 1997



Klasifikace radarového snímku je opět nejvíce odlišná v oblasti pod Uherským Hradištěm (Obrázek 51, vpravo). V tomto místě jsou odlišnosti zapříčiněny tvarem reliéfu a rozdělením úseků. Nejedná se o území s příliš velkým převýšením a zároveň se toto území nachází ve spodní části úseku, čímž se projevuje vykreslování hranice záplavy po skocích na základě jednotlivých úseků.

Obrázek 51: Odlišnosti v klasifikaci v okolí Uherského Hradiště



Ze všech dosud srovnávaných výsledků, v tomto případě dosahuje klasifikace s ověřovacími daty největší shodu (Tabulka 15). Podíl společné plochy s oběma plochami (rozliv povodně z roku 1997 a výsledek klasifikace) přesahuje 90 %.

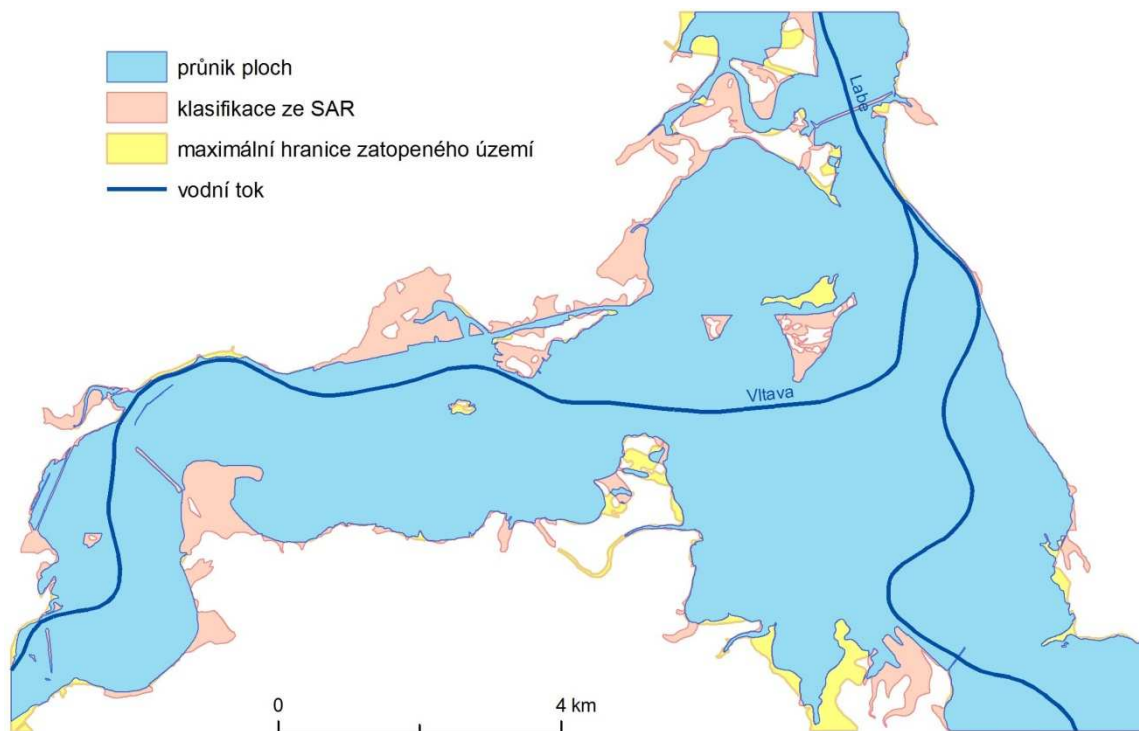
Tabulka 15: Porovnání klasifikace ze SAR (14. 7. 1997) a rozlivu povodní v roce 1997

	rozloha [km ²]	podíl společné plochy [%]	klasifikace mimo společnou plochu [%]
maximální zátopové území	142,895	95,00	5,26
klasifikace ze SAR	149,346	90,90	10,01

8.1.3 Střední Čechy

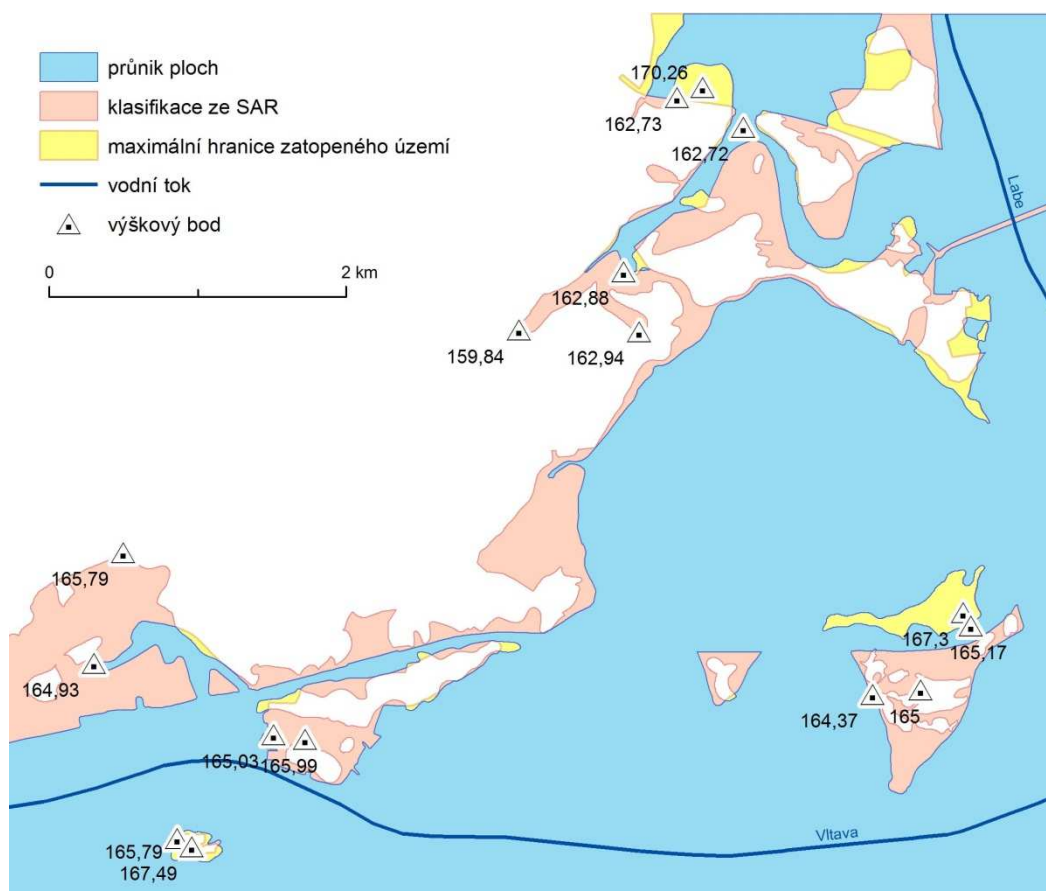
Na tomto území je k dispozici k ověření výsledku pouze maximální hranice zatopeného území z databáze DIBAVOD. Stejně jako snímek zachycující soutok Moravy a Bečvy, je tento snímek pořízen až několik dní po povodni. Přesto výsledek klasifikace do velké míry odpovídá maximálnímu rozlivu (Obrázek 52). Je to dáno především tím, že je v této lokalitě reliéf s velmi malým převýšením a voda se zde snadno rozlila. Na řadě míst setrvaly vodní plochy z dob maximálního průtoku.

Obrázek 52: Porovnání klasifikace ze SAR (18. 8. 2002) a maximálního rozsahu zatopeného území



Velmi malé výškové rozdíly v této oblasti měly za následek rozlišení mezi klasifikací a daty sloužícími k ověření. Obrázek 53 znázorňuje velmi malé výškové rozdíly v místech, kde se klasifikace nejvíce lišila od maximální hranice zatopeného území. V místech, kde se od společné plochy liší výsledek klasifikace, jsou výškové rozdíly velmi malé ve většině případů do 2 metrů. Naopak tam, kde se maximální rozliv liší od společné plochy, jsou výškové rozdíly větší než 2 metry.

Obrázek 53: Výškové rozdíly zaplavených oblastí



Tabulka 16 ukazuje, že vyklasifikovaný rozsah povodně přesahuje společnou plochu víc než plocha maximálního zatopeného území. Je to dáno hlavně reliéfem s malým převýšením, kde i nepatrné výškové rozdíly mají výrazný vliv na výměru plochy.

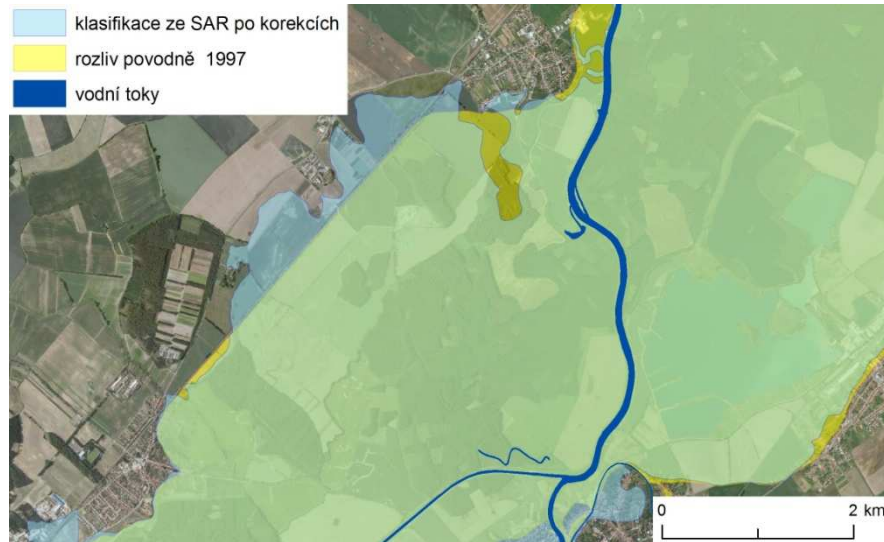
Tabulka 16: Porovnání klasifikace ze SAR (18. 8. 2002) a maximálního rozsahu zatopeného území

	rozloha [km ²]	podíl společné plochy [%]	klasifikace mimo společnou plochu [%]
maximální zátopové území	65,912	96,50	3,63
klasifikace ze SAR	70,144	90,68	10,28

8.1.4 Shrnutí

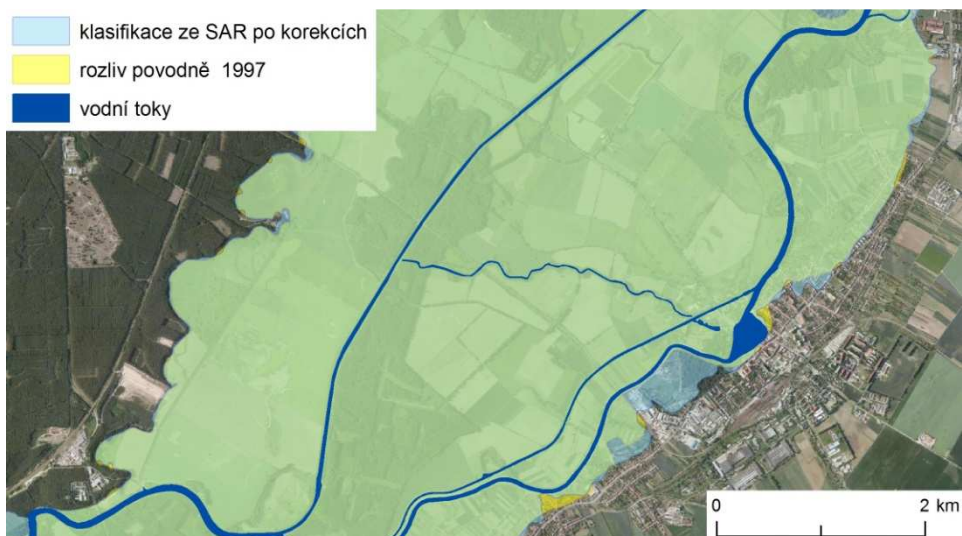
Po porovnání všech výsledků lze dojít k závěru, že výsledek zkoumané metody se blíží maximální hranici zátopového území, i když byl snímek pořízen v řádu hodin až dní po maximálních průtocích. Výsledek zkoumané metody je v rovinatých územích velmi citlivý na výškové rozdíly. Některé nepřesnosti může do vyhodnocení vnést i digitální model terénu (Obrázek 54). Na příkladu je vidět jaký vliv na výsledek může mít železniční násep, se kterým není počítáno v digitálním modelu terénu.

Obrázek 54: Nepřesnosti v DMT



Zkoumaná metoda dosahuje v některých oblastech velmi dobrých výsledků (Obrázek 55), a to zejména v oblastech kde je na snímku zachycen maximální povodňový stav. Na ukázce se nachází okolí Veselí na Moravě, kde v době pořízení snímku dosahovala řeka Morava téměř maximálních průtoků.

Obrázek 55: Přesné vykreslení zátopového území ve Veselí na Moravě



9 Diskuze

Monitorování povodní pomocí radarových dat má svá pozitiva i negativa. Hlavními pozitivy jsou nezávislost na počasí a době pořízení. V případě povodní tyto dva faktory hrají významnou roli, protože rozsáhlé a nebezpečné povodně vznikají převážně z vydatných srážek, které jsou spojeny s mohutnou oblačností. Družice potřebují k tomu, aby byly schopny zachytit stejné území, mnohdy více než 10 dní. Výhodou je u družic možnost měřit údaje v různých režimech, díky tomu se časové rozlišení některých družic blíží jednomu dni. Jedná se o zachycení alespoň částečně překrývajících se území. Časové rozlišení lze zlepšit i použitím dat z více družic. Pokud vyžaduje metodika srovnávání naměřených hodnot, musí se vybírat družice pracující na stejné frekvenci, aby bylo možné jednotlivé snímky porovnávat.

V porovnávání snímků hraje roli i to, zda je snímek pořízen na vzestupné či sestupné dráze letu. Při každé dráze letu dochází k velmi rozdílným hodnotám zpětného odrazu.

V případě povodní je porovnávání jedna z mála metod, kterou lze využít pro detekci zaplavené zástavby. K aplikaci této metody byly překážkou chybějící snímky z doby před povodní.

Při srovnávání snímků hraje roli také prostorové rozlišení a úhly dopadu. Úhly dopadu jsou velmi důležité například pro rozlišení zaplaveného a nezaplaveného lesa. Zpracovávaná data ve většině případů neumožňovala spolehlivě tyto plochy odlišit. Důvodem byly nejen úhly dopadu, ale i frekvence, se kterou byly snímky pořízené. Problém byl i u dat, u kterých bylo rozlišení těchto ploch možné. V tomto případě nebylo na zpracovávaném území dostatek lesních ploch, na kterých by bylo možné analýzu provést. Snímky pořízené s vyšší vlnovou délkou, oproti zpracovávaným datům pořízených v pásmu C, by byly schopny lépe prostupovat korunami stromů (Townsend, 2001).

Výsledku bylo dosaženo po klasifikaci pouze zaplavených volných ploch, ale i tak dosahovaly po porovnání s referenčními daty dobrých výsledků. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při vyhodnocení snímku ze 14. 7. 1997, na kterém byl zachycen nejvyšší stav povodně. Na snímcích pořízených až po maximálních průtocích, výsledná hranice zatopeného území do velké míry odpovídala maximální zatopené hranici z daných povodní. Důvod je pravděpodobně v tom, že na územích zaplavených za maximálního stavu povodní zůstala stát voda.

Otázkou také je, jak moc by byl ovlivněn výsledek, kdyby bylo možné vyklasifikovat i ostatní typy povrchu. Z mého pohledu by výsledek příliš ovlivněn nebyl. Volné plochy je totiž možné z radarového snímku vyklasifikovat oproti ostatním plochám velmi snadno. Ostatní plochy by byly klasifikovány s větší nejistotou

v přesnosti. Vzhledem k metodice mapování rozsahu povodní, by mohla vést méně přesná klasifikace k nepřesnostem v určení zatopeného území.

Výhodou postupu je také to, že k vyhodnocení výsledku používá digitální model terénu. Je sice pravda, že záleží na jeho přesnosti, ale přináší do vyhodnocení cenná data. Doplnuje tak data z radarových snímků, u kterých lze téměř vždy získat informaci o zaplavených volných plochách. Určení záplavy na ostatních typech povrchu už dále závisí na dalších okolnostech pořízení dat nebo dostupnosti jiných snímků. Největší nevýhodou metody zůstává vyhodnocování zaplaveného území po úsecích. Z výsledků je však vidět, že při vhodně zvoleném intervalu lze tento nedostatek velice snadno omezit.

10 Závěr

Tato práce se věnuje problematice mapování rozsahu povodní z radarových snímků. Od počátku pořizování radarových snímků je snaha najít vhodnou metodiku pro zjišťování zaplavených území z těchto dat. Pro sledování povodňových situací pomocí radarových dat existují dvě nesporné výhody, nezávislost na denní době a na počasí.

Zpracovaná území a povodňové situace byly vybrány z lokalit zasažených povodní v letech 1997 a 2002. Příčiny obou povodňových situací byly intenzivní regionální deště. Červencová povodeň v roce 1997 byla výjimečnou událostí, která v Česku nebyla ve 20. století zaznamenána (Kokešová, 2007). Také v případě povodní v roce 2002 byl pozorován v Praze největší vyhodnocený průtok na Vltavě (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2004). Tyto povodňové situace byly vybrány právě díky svému rozsahu. Dostupné radarové snímky totiž nedosahují dostatečného rozlišení k tomu, aby bylo možné detekovat menší povodně, obzvláště pak ty na menších tocích.

Po seznámení s problematikou byla navržena metodika k mapování rozsahu povodní z radarových dat. Metodika vychází z předpokladu, že je nutné jednotlivé typy povrchů klasifikovat odděleně. Důvodem jsou odlišné vlastnosti odrazu radarového paprsku. Pro každý typ povrchu existují různé metody detekování zaplavených území. Vzhledem k dostupným radarovým datům, byla provedena pouze klasifikace na volných plochách, kde dochází k zrcadlovému odrazu. Pomocí digitálního modelu terénu byla vykreslena hranice zatopeného území na všech typech povrchů. Cíl práce se tedy podařilo splnit.

Využití metodiky pro mapování rozsahu povodní je do jisté míry závislé na dostupnosti a četnosti pořízení dat. K tomu, aby bylo možné sledovat průběh povodně, musela by být data pořizována alespoň jednou denně. Pro využití výsledků povodňovými orgány by musela být dostupnost ještě vyšší. Důležitou roli by hrál i celkový čas od pořízení až po zpracování dat. Z časového hlediska je možné k výsledku dojít velmi rychle. Podmínkou však jsou připravené podklady v podobě digitálního modelu terénu pro ortorektifikaci a pro jednotlivé úseky. Řada kroků ve zpracování dat je možné automatizovat, a tím dosáhnout výrazně kratší doby pro dosažení výsledku.

Seznam zdrojů a informací

- ADVANCED LAND OBSERVING SATELLITE „DAICHI“ [online]. [citováno 2011-01-03]. Dostupné z URL <http://www.alos-restec.jp/aboutalos_e.html>
- AHTONEN, P. ... [et al], 2002, *SAR and Optical Algorithms for Discrimination of Water Bodies*. Helsinky: Helsinky University of Technology, Norut Information Technology, 36 s., 2002.
- AIROUCHE, M.; BENTABET, L.; ZELMAT, M., 2009, *Image Segmentation Using Active Contour Model and Level Set Method Applied to Detect Oil Spills*. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Londýn, 2009. 5 s.
- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. Glossary of Meteorology [online]. [citováno 2010-12-10]. Dostupné z URL <<http://amsglossary.allenpress.com/glossary>>
- AYED, I., B., a kol., 2004, *SAR Image Segmentation with Active Contours and Level Sets*. Montreal: Institut National de la Recherche Scientifique, 2004. 4 s.
- CANADA CENTER FOR REMOTE SENSING. 2007. *Fundamentals of Remote Sensing*. 2007. 258 s.
- CANADIAN SPACE AGENCY, 2006. *Components and specifications* [online]. poslední aktualizace 11. 9. 2006 [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL <<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/components.asp>>
- CANADIAN SPACE AGENCY, 2007. *Built fo Performance and versatility* [online]. poslední aktualizace 29. 11. 2007 [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/inf_tech.asp>
- CANADIAN SPACE AGENCY, 2010. *RADARSAT-1* [online]. poslední aktualizace 15. 6. 2010 [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL <<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/>>
- CAPALINIOVÁ, K., 2006. *Filtrace interferometrických dat*. Praha: ČVUT. Fakulta stavební. Katedra mapování a kartografie. 2006. 85 s. Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Lena Halounová, CSc.
- CLASSIFICATION TREE [online]. c2011 [citováno 2011-01-05]. Dostupné z URL <http://www.resample.com/xlminer/help/Ctree/ClassificationTree_intro.htm>
- DE ROO, A. ... [et al], 1999, *Assessing Flood Damages of the 1997 Oder Flood and the 1995 Meuse Flood*. In: *2th International Symposium on Operationalization of Remote Sensing*, Enschede, 1999. 9 s.

- EUROPEAN SPACE AGENCY. *ASAR* [online]. c2010a [citováno 2010-12-21].
Dostupné z URL
<<http://envisat.esa.int/earth/www/object/index.cfm?fobjectid=3772>>
- EUROPEAN SPACE AGENCY. *Envisat overview* [online]. c2010b [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL
<http://www.esa.int/esaEO/SEMWYN2VQUD_index_0_m.html>
- EUROPEAN SPACE AGENCY. *ERS overview* [online]. c2010c [citováno 2010-12-21].
Dostupné z URL <http://www.esa.int/esaEO/SEMGWH2VQUD_index_0_m.html>
- EUROPEAN SPACE AGENCY. *Parameters affecting radar backscatter* [online].
c2010d [citováno 2010-12-10]. Dostupné z URL
<http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/parameters_affecting.htm>
- EUROPEAN SPACE AGENCY. *Synthetic Aperture Radar (SAR)* [online]. c2010e
[citováno 2010-12-09]. Dostupné z URL
<http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_II/synthetic_aperture_radar_SAR.htm>
- EUROPEAN SPACE AGENCY. *Bragg scattering* [online]. c2011 [citováno 2011-04-25].
Dostupné z URL
<http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/bragg_scattering.htm>
- GISAT. *Envisat* [online]. c2010a [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL
<<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/envisat>>
- GISAT. *ERS* [online]. c2010b [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL
<<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/ers>>
- HALOUNOVÁ, L. 2004. *Radary v dálkovém průzkumu Země - pro dokumentaci povodňových stavů a ochranu před povodněmi*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie. 2004. 26 s.
- HENDERSON, F. M., 1995. *Environmental factors and the detection of open surface water areas with X-band radar imagery*. International Journal of Remote Sensing, 1995, svazek 16, č. 13, s. 2423-2437.
- HEREMANS, R. ... [et al], 2008, *Automatic Detection of Flooded Areas on ENVISAT/ASAR Images Using an Object-Oriented Classification Technique and an Active Contour Algorithm*. Brusel: Royal Military Academy – Signal and Image center, 2008. 4 s.

- HUIZINGA, H.J. ... [et al], 2005, *On-line flood mapping using spaceborne SAR-images, waterlevel deduction techniques and GIS-based flooding models in the river Rhine*. In: *Floods, from Defence to Management Symposium*, 2005. s. 225-229.
- INFOTERRA. *TanDEM-X – a Valueable Partner for TerraSAR-X* [online]. c2010a [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL <<http://www.infoterra.de/tandem-x-satellite>>
- INFOTERRA. *TerraSAR-X Satellite and Mission* [online]. c2010b [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL <<http://www.infoterra.de/terrasar-x-satellite>>
- ISLAM, Z., 200-?. *Determination of Flood Extent Using Remote Sensing*. Edmonton: University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering. 200-?. 19 s.
- JANDA, M., 2005. *Radarová analýza*. Praha: ČVUT. Fakulta Stavební. Katedra mapování a kartografie, 2005. 40 s.
- JANKO, M., 2009. *Povodňový plán Plzeňského kraje* [online]. [citováno 2011-02-21]. Dostupné z URL <<http://www.kr-plzensky.cz/article.asp?sec=1623>>
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. *Earth Observation Satellite* [online]. c2003 [citováno 2011-01-03]. Dostupné z URL <http://www.eorc.jaxa.jp/en/hatoyama/satellite/sendata/sar_e.html>
- JAPANESE EARTH RESOURCES SATELLITE, 2004. [online]. poslední aktualizace 1. 5. 2004 [citováno 2011-01-03]. Dostupné z URL <<http://www.eorc.jaxa.jp/JERS-1/en/index.html>>
- KOKEŠOVÁ, J., 2007. *Komplexní hydrometeorologická analýza největších povodní na Moravě a ve Slezsku*. Brno: Masarykova Univerzita. Přírodovědecká fakulta. Geografický ústav. 2007. 113 s. Vedoucí diplomové práce: Prof. RNDr. Rudolf Brázdil, DrSc.
- LANGHAMMER, J., 2009. *Typologie povodní, extrémní povodně v Evropě a ČR*. Praha: UK. Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geologie, 2009. 31 s.
- MACDONALD, DETTWILER AND ASSOCIATES LTD (MDA). 2008. *A New Era in Synthetic Aperture Radar*. 2008.
- MATĚJČEK, J.; HLADNÝ, J., 1999. *Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 1999. 60 s. ISBN 80-7212-067-3

- MARTINIS, S., 2010. *Automatic near real-time flood detection in high resolution X-band synthetic aperture radar satellite data using context-based classification on irregular graphs*. Mnichov: Ludwig-Maximilians-Universität München. Fakultät für Geowissenschaften. 2010. 111 s.
- MASON, D. C. ... [et al], 2008. *Using TERRASAR-X for Improved Urban Flood Model Validation*. University of Reading, 2008. 9 s.
- MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR, 2004. *Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002 a návrhu úpravy systému prevence před povodněmi*. Praha: Ministerstvo Životního prostředí ČR. Praha, 2004. 174 s.
- MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR. *Povodňový plán České republiky* [online]. c2011 [citováno 2011-02-21]. Dostupné z URL <http://www.dppcr.cz/html_pub/dpp_cr_content_static.html>
- PALSAR [online]. c2011 [citováno 2011-01-03]. Dostupné z URL <http://www.alos-restec.jp/aboutalos6_e.html>
- PCI GEOMATICS ENTERPRISES. 2007. *SAR Processing with Geomatica*. Richmond Hill, 2007, 62 s.
- RADARSAT-2 POLARIZATION OPTIONS [online]. [citováno 2010-12-21]. Dostupné z URL <http://www.radarsat2.info/product/beam_modes_pol_options.asp>
- RADARSAT INTERNATIONAL. 2000. *RADARSAT Data Products Specification, 2000*, 125 s.
- REZKOVÁ, K., 2007. *Oprava orbitálních chyb s pomocí georeferencování intenzitních radarových snímků*. Praha: ČVUT. Fakulta stavební. Katedra mapování a kartografie. 2009. 70 s. Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Lena Halounová, CSc.
- RZEMIEN, R., 1997. *Coherent Radar: Guest Editor's Introduction*. Technical digest, 1997, svazek 18, č. 3, s. 344-347.
- SANYAL, J.; LU, X.X., 2004. *Application of Remote Sensing in Flood Management with Special Reference to Monsoon Asia: A Review*. Natural Hazards, 2004, svazek 33, č. 2, s. 283-301.
- SOLBO, S.; SOLHEIM, I. 2004. *Towards operational flood mapping with satellite SAR*. Tromsø: Norut Information Technology AS, 2004. 8 s.
- SOUČKOVÁ, J., 2010. *Stanovení rozsahu sněhové pokrývky z radarových dat*. Praha: UK. Přírodovědecká fakulta. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, 2010. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Markéta Potůčková, PhD.

- SOUKALOVÁ, E.; ŘEHÁK, T.; ŠIHAR, Z., 2008. *Odtoková situace za povodně v červenci 1997 v povodích Odry, Moravy a Labe* [online]. [citováno 2011-04-05]. Dostupné z URL < <http://www.mzp.cz/ris/ais-ris-info-copy.nsf/aa943fb38bfdd406c12568e70070205e/73f03554b637e76880256804002ac260?OpenDocument>>
- SWART, L. M. Th., 2000. *Spectral filtering and oversampling for radar interferometry*. Alphen aan den Rijn: Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen – Afdeling Geodesie, 2000. 166 s.
- THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE. Natural Disaster Trends [online]. c2009 [citováno 2011-01-31]. Dostupné z URL <<http://www.emdat.be/natural-disasters-trends>>
- TOWNSEND, P. A. 2001. *Mapping Seasonal Flooding in Forested Wetlands Using Multi-Temporal Radarsat SAR* [soubor PDF]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, svazek 67, č. 7, s. 857-864.
- VODOHOSPODÁŘSKÝ DISPEČINK POVODÍ MORAVY, 1998. *Souhrnná zpráva o povodňové situaci v povodí Moravy a Dyje v červenci 1997*. Brno: Vodohospodářský dispečink Povodí Moravy, a.s. Brno, 1998. 138 s.
- VODOHOSPODÁŘSKÝ DISPEČINK POVODÍ VLTAVY, 2003. *Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002 za Povodí Vltavy*. Praha: Vodohospodářský dispečink Povodí Vltavy, s.p. v Praze, 2003. 95 s.
- WESTERHOF, R. ... [et al], 2010. *Operational satellite based flood mapping using the Delft-FEWS System*. In: Proceedings of the ESA Living Planet Symposium. Bergen, 2010. 6 s.

Seznam příloh

Příloha 1 CD s elektronickou verzí práce