



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Využití satelitních dat z dálkového průzkumu Země v protipovodňové ochraně

Application of Satellite Imagery from Remote Sensing in Flood Protection

Bakalářská práce

Studijní program:	Ochrana obyvatelstva
Studijní obor:	Plánování a řízení krizových situací
Autor bakalářské práce:	Ing. Jana Žaloudková
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Anna Schlenker, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Žaloudková** Jméno: **Jana** Osobní číslo: **496214**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**
Studijní program: **Ochrana obyvatelstva**
Studijní obor: **Plánování a řízení krizových situací**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití satelitních dat z dálkového průzkumu Země v protipovodňové ochraně

Název bakalářské práce anglicky:

Application of Satellite Imagery from Remote Sensing in Flood Protection

Pokyny pro vypracování:

Předmětem bakalářské práce bude analýza problematiky využití satelitních snímků v rámci dálkového průzkumu Země. Výstupem práce bude identifikace využívání satelitních snímků v protipovodňové ochraně a komparace se skutečnými dopady povodní. Teoretická část se bude věnovat vymezení základní charakteristiky a principy fungování satelitních snímků družice Sentinel v rámci programu Copernicus řízeného Evropskou unií, a to jak optických, tak radarových. Součástí teoretické části bude také charakteristika vybraných indexů používaných v monitoringu vegetace. Ty budou využity v praktické části pro sledování dopadů povodní. Praktická část bude zaměřena na komparaci leteckých a satelitních snímků a vizuálnímu zobrazení dopadů povodní.

Seznam doporučené literatury:

- [1] TEMPFLI K., Huurneman G.C., BAKKER, W.H., JANSSEN, L.L.F., et al. , Principles of Remote Sensing. University of Twente, Netherlands, 2009. ITC Educational Textbook Series, ed. 4, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009, ISBN 978-90-6164-270-1
- [2] THE EUROPEAN COMMISSION, PWC ADVISORY FRANCE. COPERNICUS: Market Report, February, 2019, ISBN 978-92-79-98973-5
- [3] LAVENDER, S., LAVENDER A., Practical Handbook of Remote Sensing, CRC Press, 2016, ISBN 978-1498704335

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Anna Schlenker, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Michal Reimer

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2023**

doc. Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
děkan

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Využití satelitních dat z dálkového průzkumu Země v protipovodňové ochraně vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne 11.05.2022

.....
Ing. Jana Žaloudková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala paní Ing. Anně Schlenker, Ph.D. za její odborné vedení mé bakalářské práce, vstřícnost a čas, který mi věnovala. Dále pak panu Ing. Michalu Reimerovi za jeho čas na konzultace a cenné rady.

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce je analýza využití satelitních snímků v rámci dálkového průzkumu Země v protipovodňové ochraně. Základ pro vypracování analýzy tvoří teoretická část, která pokrývá dvě hlavní oblasti – vymezení a charakteristiku satelitů Sentinel 1 a Sentinel 2 od Evropské vesmírné agentury a identifikaci vegetačních indexů a jejich využití. Na základě teoretické části jsou pak použity satelitní snímky pro jejich samotnou analýzu.

Metodika bakalářské práce se zakládá na rešerši dostupné literatury a samotné analýze satelitních snímků a vegetačních indexů.

Praktická část je zaměřena na využití satelitních snímků v komparaci s leteckými snímky. V rámci bakalářské práce byly zpracovány tři různé povodňové lokality včetně použití konkrétních vegetačních indexů. Na základě provedené komparace a analýzy byla zjištěna vhodnost a přínosnost satelitních snímků v protipovodňové ochraně spolu s běžnými leteckými snímky. Optické a radarové snímky mohou přinést do protipovodňové ochrany další potřebné informace, které mohou zlepšit a zefektivnit krizové plánování.

Klíčová slova

Dálkový průzkum Země; satelitní snímky; povodně; protipovodňová ochrana; vegetační indexy.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the analysis of application of satellite imagery from remote sensing in flood protection. The basis for the analysis is the theoretical part, which covers two main areas - the definition and characteristics of satellites Sentinel 1 and Sentinel 2 from the European Space Agency and the identification of vegetation indices and their use. Based on the theoretical part, satellite images are then used for its analysis.

The analysis is made through the data research and analysis of satellite imagery itself with the vegetation indices.

The practical part is focused on the use of satellite images in comparison with aerial images. Within the bachelor's thesis, three different flood sites were examined, and specific vegetation indices were applied as well. Based on the performed comparison and analysis, satellite imagery in flood protection is suitable and useful along with conventional aerial images. Finally optical and radar imagery can bring additional useful information to flood protection that can improve and streamline crisis planning.

Keywords

Remote sensing; Satellite Imagery; Floods; Flood Protection; Vegetation Indices.

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíle práce.....	9
3	Přehled současného stavu	10
3.1	Program Copernicus	10
3.1.1	Sentinel-1	10
3.1.2	Radar se syntetickou aperturou (C-SAR)	11
3.1.3	Sentinel-2	14
3.1.4	Optický senzor	14
3.1.5	Spektrální pásma.....	15
3.2	Vegetační indexy	15
3.2.1	Normalized Difference Vegetation Index – NDVI.....	16
3.2.2	Normalized Difference Water Index – NDWI.....	16
3.2.3	Normalized Difference Moisture Index – NDMI	17
3.3	Spektrální vlastnosti vody.....	18
3.4	Použití satelitních snímků.....	19
3.5	Detekce a monitoring povodní.....	19
4	Metodika	22
5	Výsledky.....	23
5.1	Salar de Atacama	23
5.2	Východní Austrálie – Brisbane.....	28
5.3	Východní Belgie – Pepinster	34
6	Diskuze	39
7	Závěr	46
8	Seznam použitých zkratk.....	47
9	Seznam použité literatury.....	48
10	Seznam použitých obrázků	52
11	Seznam Příloh.....	53
11.1	Příloha 1	53

1 ÚVOD

Povodně jsou jedním z nejničivějších přírodních jevů, které se vyskytují celosvětově a mají negativní dopad na životy, majetek či infrastrukturu. Se zvyšováním počtu a intenzity povodní v důsledku změny klimatu roste motivace pro hledání řešení pro mapování povodňových nebezpečí a rizik v reálném čase. Dostupnost a využití tohoto typu dat v krizovém řízení může být při těchto událostech velmi cenným nástrojem a může vést ke zmírnění dopadů těchto událostí.

Současně s pokračujícím technologickým vývojem v oblasti satelitního snímání má tato oblast zkoumání stále větší význam pro krizové řízení. Při řešení krizových situací jsou nezbytné mapy, letecké a satelitní snímky. Letecké snímky či dokonce snímky z dronů mohou poskytnout užitečnou vizualizaci aktuální situace. Naproti tomu právě satelitní snímky díky svým vlastnostem mohou mít další přidanou hodnotu zejména pro preventivní opatření a plánování. Jednotlivé snímky sami o sobě nedokážou účinně poskytnout a zaručit rychlé řešení ale je třeba je umět interpretovat, zasadit do kontextu a využít jejich vlastnosti.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je uskutečnit analýzu využití satelitních snímků v rámci dálkového průzkumu Země v souvislosti protipovodňové ochraně. Základem pro tuto analýzu je teoretická část, která se zaměřuje na 2 oblasti. První oblastí je vymezení a charakteristika satelitů Sentinel 1 a Sentinel 2 provozované Evropskou vesmírnou agenturou. Cílem této oblasti je identifikovat principy fungování satelitního snímání prostřednictvím optického senzoru a radarové techniky. Druhou oblastí teoretické části je identifikace vegetačních indexů a jejich využití v analýze povodňových oblastí.

Praktická část je zaměřena na komparaci leteckých a satelitních snímků s využitím vegetačních indexů identifikovaných v teoretické části. Pro tyto účely byly vybrány tři různé lokality, kde se v nedávné době vyskytly povodně. Cílem praktické části je pomocí komparace snímků, využitím vegetačních indexů a rešerší dostupných zdrojů analyzovat možnost a vhodnost využívání dostupných satelitních snímků s nízkým rozlišením v protipovodňové ochraně.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

Tato kapitola se věnuje představení programu Copernicus a jeho dvěma systémům satelitů – Sentinel-1 a Sentinel-2, jejichž data jsou následně v práci použita. Kromě představení satelitů je zde nastíněn i způsob jejich snímání – tj. radarové a optické. Dále je věnován prostor základnímu popisu nejčastějších vegetačních indexů, které jsou využívány v problematice povodní.

3.1 Program Copernicus

Program Copernicus je program řízený Evropskou unií (konkrétně Evropskou komisí) ve spolupráci s Evropskou kosmickou agenturou (European Space Agency – ESA) určený pro dálkový průzkum Země. Družicemi tohoto programu jsou družice Sentinel (Sentinel 1, 2, 3, 4, 5P, 5, 6). Existuje několik misí těchto družic, každá mise se většinou skládá ze dvou družic. Tyto družice jsou umístěny na stejné dráze kolem Země s fázovým posunem 180 stupňů. To umožňuje sledovat konkrétní území za téměř stejných podmínek dvakrát častěji, než by bylo možné s jednou družicí. V současné době jsou na oběžné dráze 3 kompletní instalace misí (skládající se vždy ze 2 satelitů) a s dalším samostatným satelitem (Sentinel-5P) (1).

3.1.1 Sentinel-1

Sentinel-1 mise se skládá ze dvou satelitů – Sentinel-1A a Sentinel-1B, které sdílejí stejnou orbitální dráhu operující ve dne i v noci a jsou vybaveny stejnými měřicími přístroji. Snímání probíhá prostřednictvím radarového zobrazování v pásmu C se syntetickou aperturou (z angličtiny C-band synthetic aperture radar imaging), což umožňuje získávat snímky bez ohledu na počasí (2). Pomocí získaných dat lze pozorovat hladiny moří (například ledové kry, olejové skvrny), vegetaci (stav lesů a zemědělských plodin) či důsledky katastrof (záplavy, zemětřesení, výbuchy sopek) (2).

První satelit Sentinel-1A byl vypuštěn 3. dubna 2014 a Sentinel-1B byl vypuštěn 25. dubna 2016. Oba satelity odstartovaly z Guyanského vesmírného střediska v Kourou ve Francouzské Guyaně a každý na raketě Sojuz (1). Sentinel-1C a 1D jsou ve vývoji a mají výhledově nahradit stávající dva (3).

Existuje široká škála aplikací pro data shromážděná prostřednictvím mise Sentinel-1. Některé z těchto použití zahrnují monitorování moře a země, reakce na mimořádné události v důsledku ekologických katastrof a ekonomické aplikace. Hlavním cílem mise bylo poskytnout data SAR v pásmu C (2).

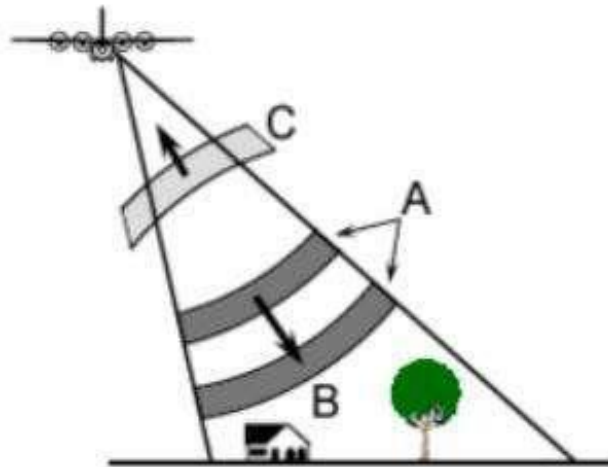
ESA a Evropské komise umožňují snadný přístup k datům Sentinelu-1. Zájemci mohou získat data a používat je pro veřejné, vědecké nebo komerční účely zdarma.

3.1.2 Radar se syntetickou aperturou (C-SAR)

Obě družice Sentinel-1 jsou vybaveny dvěma důležitými nástroji; C-pásmovým radarem se syntetickou aperturou (C-SAR) s elektronikou a úložištěm DSHA (Data Storage and Handling Assembly) na bázi SDRAM (Synchronous dynamic random-access memory) (2).

Jediný měřicí přístroj družic Sentinelů-1 je radar se syntetickou aperturou pracující v pásmu C (neboli SAR) na frekvenci 5,045 GHz. Ten poskytuje data v obvyklém rozlišení 20 m, u vybraných míst až 5 m (4). SAR je typ aktivního shromažďování dat, kdy senzor vyrábí svou vlastní energii a poté zaznamenává množství této energie odražené zpět po interakci se Zemí. Zatímco optické zobrazení je podobné interpretaci fotografie, data SAR vyžadují jiný způsob chápání, protože signál reaguje na vlastnosti povrchu, jako je struktura a vlhkost. Měřicí přístroj tak umožňuje snímání země bez ohledu na atmosférické vlivy jako je například vysoká oblačnost, ve dne i v noci a výsledná data nejsou tímto omezena. Tento typ radaru používá zpracování radarových dat k vytvoření úzkého efektivního paprsku. Radar se pohybuje nad krajinou a vysílá v rychlém sledu sérii impulsů a matematickou analýzou odražených paprsků získává obraz s vyšším rozlišením, než by poskytl statický radar. Zpracovává tedy zároveň informaci nejen o amplitudě, ale i o fázovém posunu odražených vln (5).

Základní princip fungování tohoto principu je zobrazen níže – Obrázek 1:

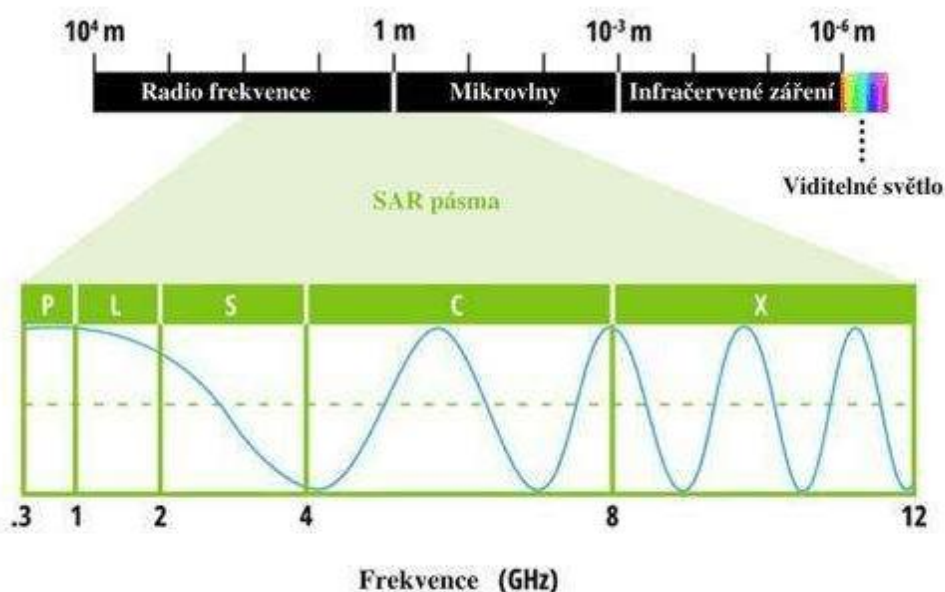


Obrázek 1 Princip radarového snímání (6)

kde A jsou mikrovlnné paprsky generované vysílačem, B znázorňuje vyslaný radarový paprsek a C představuje část, kdy anténa přijímá zpět část energie odražené od různých objektů na Zemi.

Prostorové rozlišení radarových dat přímo souvisí s poměrem vlnové délky senzoru k délce antény senzoru. Pro danou vlnovou délku platí, že čím delší anténa, tím vyšší prostorové rozlišení. Díky syntetické cloně lze sekvenci akvizic z kratší antény kombinovat tak, aby simulovala mnohem větší anténu, čímž poskytuje data s vyšším rozlišením (5).

Optické senzory shromažďují data ve viditelné, blízké infračervené a krátkovlnné infračervené části elektromagnetického spektra. Radarové senzory využívají delší vlnové délky v měřítku centimetr až metr, to jim dává speciální vlastnosti, jako je schopnost vidět skrz mraky, viz Obrázek 2 (5).



Obrázek 2 Vlnové délky (přeloženo autorkou) (5)

Vlnová délka je důležitou vlastností, kterou je třeba vzít v úvahu při práci se SAR, protože určuje, jak radarový signál interaguje s povrchem a jak daleko může signál proniknout do média. Různé vlnové délky SAR jsou často označovány jako pásma s písmenným označením X, C, L a P.

Například radar v pásmu X, který pracuje na vlnové délce asi 3 cm, má velmi malou schopnost proniknout do listnatého lesa, a tak většinou interaguje s listy v horní části koruny stromů. Na druhé straně signál v L-pásmu má vlnovou délku asi 23 cm, to umožňuje větší průnik do lesa a umožňuje větší interakci mezi radarovým signálem a velkými větvemi a kmeny stromů. Vlnová délka neovlivňuje pouze hloubku pronikání do lesů, ale také do jiných typů krajinného pokryvu, jako je půda a led (5).

Interpretace snímků z radaru se syntetickou aperturou není vždy přímočará. Například oblasti klidné vody a další hladké povrchy se zdají černé. Větrem zdrsněná voda se může jasně odrážet v přítomnosti kapilárních vln, ke kterým dochází, když se výsledné vlny blíží velikosti vlnové délce dopadajícího radaru (5).

3.1.3 Sentinel-2

Mise Sentinel-2 se skládá ze dvou satelitů – Sentinel-2A a Sentinel-2B, které obíhají po orbitální dráze. Pořizují optické snímky ve 13 spektrálních pásmech; 4 pásma s prostorovým rozlišením 10 metrů, 6 pásem s rozlišením 20 metrů a 3 pásma s rozlišením 60 metrů. Šířka oběžné dráhy je 290 km. Mise podporuje širokou škálu služeb a aplikací, jako je monitorování zemědělství, řízení mimořádných událostí, klasifikace krajinného pokryvu nebo kvalita vody (7).

3.1.4 Optický senzor

Multispektrální přístroj (z angličtiny MultiSpectral Instrument – MSI) na každé palubě Sentinel-2 zaručuje velký záběr, vysoký geometrický a spektrální výkon měření. MSI měří odraženou záři Země ve 13 spektrálních pásmech. MSI senzor jako první umožnil snímat v okraji červeného viditelného světla ve třech spektrálních pásmech. Tento systém je využitelný ve výpočtech vegetačních indexů, a to pro zjišťování chlorofylu v listech, sledování vegetace v čase a tím monitorování jejího zdravotního stavu (8).

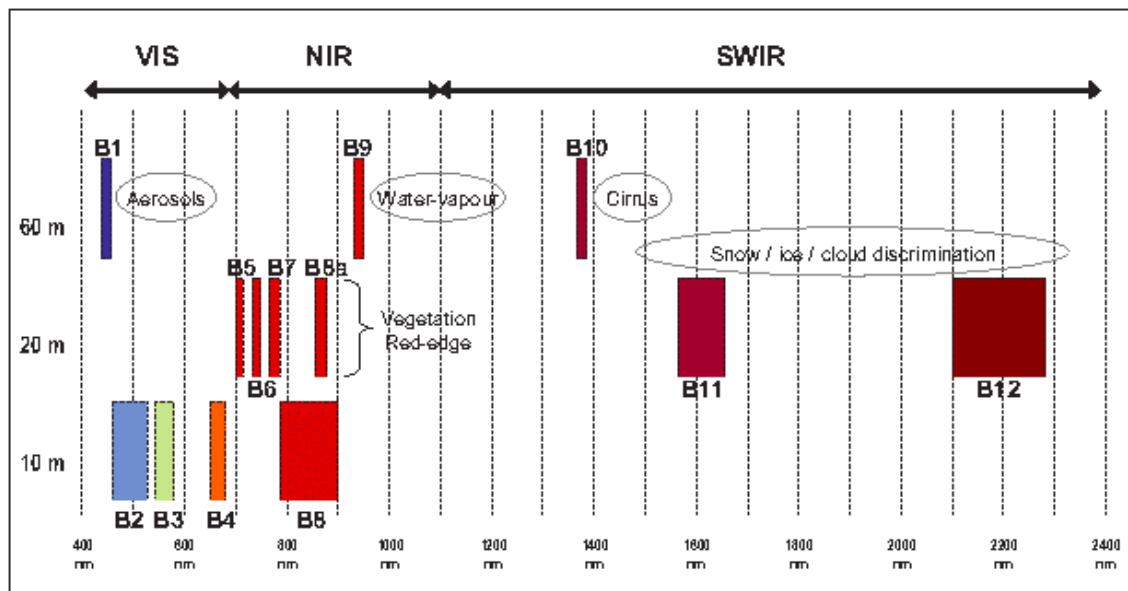
Tento senzor snímá prostřednictvím metody tzv. „push-broom“ neboli po jednotlivých řádcích, a to se záběrem 290 km (8). Mezi základní vlastnosti a vybavení senzoru patří:

- Teleskop se třemi zrcadly (z angličtiny Three Mirror Anastigmat – TMA) s čočkou o průměru 150 mm;
- Dvě ohniskové roviny – jedna je založená na detektorech (konkrétně Monolitický detektor – z angličtiny Complementary Metal-Oxide-Semiconductor – CMOS) pro viditelné a blízké infračervené části spektra a druhá je založena na detektorech určených pro krátkovlnná infračervená pásma (ze sloučeniny rtuti, kadmia a telluridu);
- Rozdělovač paprsků pro viditelné a blízké infračervené záření a krátkovlnné infračervené záření. Spektrální rozdělení v různých pásmech je zajištěno pruhovými filtry na detektoru;
- Dvě odlišné sady 12 detektorů na každé ohniskové rovině pokrývající příslušná spektrální pásma, ve kterých jsou pořizovány snímky;

- Palubní difuzér pro radiometrickou kalibraci pro zajištění kvality radiometrického rozlišení;
- Mechanismus závěrky zabraňující přímému osvětlení přístroje sluncem, který zároveň slouží jako kalibrační zařízení zachycující sluneční záření odražené difuzérem (8).

3.1.5 Spektrální pásma

Snímaná data ve 13 spektrálních pásmech jsou pořizována v prostorovém rozlišení 10 metrů (4 pásma), 20 metrů (6 pásem) a 60 metrů (3 pásma). Všechna pásma pokrývají rozmezí 443–2190 nanometrů (viditelné, blízké infračervené a krátkovlnné infračervené záření) (8), viz Obrázek 3.



Obrázek 3 Spektrální pásma družice Sentinel-2. Aerosols – aerosoly; water-vapour – pára; vegetation red-edge – okraj červené části spektra u vegetace; cirrus – cirrus (oblak); snow/ice/cloud discrimination – rozlišování sněhu/ledu/mraku (9)

3.2 Vegetační indexy

Vegetační indexy kvantifikují vegetační biomasu a vitalitu rostlin na každém pixelu na satelitním snímku. Indexy jsou počítány pomocí několika spektrálních pásem, které jsou citlivé na rostlinnou biomasu a vitalitu. Možnosti využití těchto indexů v monitorování povodňových oblastí se věnuje celá řada autorů (například Farhadi 2021, Cao 2020 či Fayne 2017). Mezi nejčastěji používané a zmiňované patří následující.

3.2.1 Normalized Difference Vegetation Index – NDVI

Normalizovaný rozdílový vegetační index (NDVI) je základní index používaný pro hodnocení zdraví vegetace. Používá rozdíl hodnot odrazivosti červené a blízké infračervené oblasti elektromagnetického spektra k označení stavu zeleně, který se vypočítá následovně:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

kde NIR představuje blízké infračervené záření (near-infrared).

Index ukazuje hodnotu odrazivosti pixelu v blízkém infračerveném pásmu. Hodnota NDVI se pohybuje od -1,0 do 1,0 pro každý pixel a čím vyšší hodnoty tím je vegetace zdravější s vyšším obsahem chlorofylu a/nebo hustším vegetačním krytem. Nižší hodnoty označují vegetaci, která je méně zdravá nebo která půdu osidluje řídce (10). Oblasti neúrodné skály, písku nebo sněhu obvykle vykazují velmi nízké hodnoty (například 0,1 nebo méně). Řídká vegetace, jako jsou křoviny a pastviny nebo stárnoucí plodiny, mohou mít za následek střední hodnoty NDVI (přibližně 0,2 až 0,5). Vysoké hodnoty NDVI (přibližně 0,6 až 0,9) odpovídají husté vegetaci, jako je ta, která se nachází v mírných a tropických lesích nebo plodinách ve fázi jejich vrcholného růstu. NDVI je využíván pro monitorování vegetace, ale vodní plochy se zde zobrazují tmavou barvou, která tak může být velmi dobrým indikátorem pro určení vodních ploch.

Využití rozdílu mezi blízkou infračervenou a červenou vlnovou délkou umožňuje aplikaci NDVI další studie, jako je detekce vody (Lei 2009), a inspirovala podobné spektrální indexy speciálně pro vodní mapování, jako je normalizovaný rozdílový vodní index (NDWI) (11), viz dále.

3.2.2 Normalized Difference Water Index – NDWI

Normalizovaný rozdílový vodní index se hojně využívá v oblasti zemědělského monitorování, zavlažování plodin, celkového hospodaření vodou či monitorování lesa pro hodnocení vlhkosti (12). Stěžejní je při sledování změn souvisejících s obsahem vody

ve vodních útvarech pomocí zelených vlnových délek a vlnových délek blízkého infračerveného záření (NIR), viz výpočet dle úpravy McFeeterseho (13):

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

NDWI je efektivní pro detekci povrchových vod, protože tyto povrchy mají velmi nízkou odrazivost v oblasti NIR spekter na rozdíl od vegetace, která se vyznačuje vysokou odrazivostí v NIR. Z toho důvodu je vhodné použití tohoto indexu, který kombinuje zelené a NIR spektrální pásma, pro vodní útvary a jejich změny (například povodně). Hodnoty tohoto indexu stoupají s obsahem vody ve vegetaci a pohybují se od -1,0 do 1,0, pro tuto modifikaci indexu pak konkrétně hodnoty rovny a pod 0,3 indikují přítomnost vody; v grafickém zobrazení na mapě jsou vyšší hodnoty do červena, naopak nižší hodnoty zeleně a hodnoty kolem nulové hodnoty, kde je přítomna právě vegetace se pak zabarvují do modra (13).

3.2.3 Normalized Difference Moisture Index – NDMI

Normalizovaný rozdílový index vlhkosti se používá ke sledování změn obsahu vody v listech, je citlivý na úroveň vlhkosti ve vegetaci. Je počítán jako poměr mezi NIR a SWIR (z angličtiny krátkovlnné infračervené záření – short-wave infrared) hodnotami (14):

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$$

Kde SWIR1 představuje pásmo velmi citlivé na vlhkost, a proto se používá k indikaci a sledování vegetace a vlhkosti půdy na snímku. Hodnoty indexu se pohybují od -1,0 do 1,0.

Pásmo SWIR odráží změny v obsahu vody ve vegetaci, zatímco odrazivost NIR je ovlivněna vnitřní strukturou listů a obsahem sušiny listů, ale ne obsahem vody. Kombinace NIR s SWIR odstraňuje změny způsobené vnitřní strukturou listů a obsahem sušiny listů, čímž se zlepšuje přesnost při získávání obsahu vody ve vegetaci. Množství vody dostupné ve vnitřní struktuře listu do značné míry řídí spektrální odrazivost v intervalu SWIR elektromagnetického spektra. Odrazivost SWIR tedy negativně souvisí s obsahem vody v listech (14).

Přestože tyto a další indexy mohou být užitečné pro analýzu stavu povrchu, stále se jedná o optická data, která jsou náchylná na atmosférické podmínky jako je oblačnost, stíny mraků, znečištění či rozptýlené světlo z pozemních objektů, které tímto mohou způsobit nevhodnost těchto snímků pro další analýzy. V těchto případech, a zejména v oblastech s vysokou oblačností, se nabízí použití radarových snímků, které neovlivňuje oblačnost (11).

3.3 Spektrální vlastnosti vody

Vodstvo pokrývá více než 71 % zemského povrchu, proto je důležitou součástí dálkového průzkumu Země, a to zejména za účelem popisu jeho barvy, teploty či stavu zdraví ekosystému. Sledováním vodních ploch poskytuje informace o přítomnosti a množství opticky aktivních látek ve vodě, které mají mnoho praktických aplikací v oblasti hospodaření s vodními zdroji. Příkladem může být povrchový odtok ze zemědělské půdy, který sebou nese živiny (tj. dusík a fosfor z hnojení plodin) do vodních útvarů, které by mohly způsobit výkvět řas a mohly by zhoršit kvalitu vody. Indikátory odvozené od satelitního dálkového průzkumu mohou monitorovat výskyt řas, a tak monitorovat kvalitu vody časoprostorovým způsobem (15).

Vodní plochy se vyznačují velmi malou odrazivostí na všech vlnových délkách. Záření odražené od vodní hladiny poskytuje jen málo informací o samotném vodním útvaru. Voda má schopnost absorbovat záření na delších vlnových délkách začínajíc blízkým infračerveným pásmem. Barva vody je tedy ovlivněna rozložením světelného pole a povahou a množstvím látek v ní obsažených. Hodnoty odrazivosti se tedy mění se změnami optických vlastností a koncentrací opticky aktivních látek ve vodě. Zejména se jedná o přítomnost organických a anorganických materiálů, které ovlivňují zakalenost vody. Čistá voda má větší odrazivost na modrém konci spektra (kratší vlnové délky), a proto se hluboké čisté vodní útvary jeví jako modré nebo modrozelené. Nečistoty ve vodě tedy vedou k nazelenalé až žluté barvě. Zároveň pokud se ve vodě vyskytuje chlorofyl tak se mění její odrazivé vlastnosti. Čím vyšší koncentrace chlorofylu tím je nižší odrazivost vody na vlnových délkách v modrých pásmech, a naopak vyšší v zelených pásmech. Absorpce elektromagnetického záření vodou je velmi závislá na vlnové délce. Blízké infračervené vlnové délky jsou zcela absorbovány pouze

v několika desetinách metru vody (16). V důsledku toho se voda na infračervených snímcích jeví jako velmi tmavá. Ve viditelné části spektra kratší modré vlnové délky pronikají hluboko do čisté vody, ale rozsáhlý rozptyl, ke kterému dochází, může vést k podvodnímu oparu. Změny ve spektrálních křivkách vodních ploch se tak využívají k monitorování koncentrace cizích látek, řas či polutantů (17).

3.4 Použití satelitních snímků

Informace z dálkového průzkumu země se využívají pro sledování a mapování povodní a hodnocení škod jimi způsobených. Pro tyto účely byly vyvinuty speciální geografické informační systémy a platformy (například The Copernicus Emergency Management Service – CEMS) (18). Kromě mapování povodní a hodnocení škod byla satelitní data s vysokým rozlišením operativně využívána pro mapování popovodňové konfigurace řeky, protipovodňových prací, oblastí s přetíženým odvodněním, eroze břehů a vytváření map zón ohrožených povodněmi (Rao et al., 1998). Satelitní optické snímky povodní jsou bohužel často negativně ovlivněna atmosférickými vlivy, konkrétně přítomností mraků vedoucí v nedostatek použitelných dat. Naproti tomu radarová data zvyšují dostupnost pravidelného pozorování zemského povrchu, a to i v přítomnosti husté oblačnosti. Data SAR nejsou omezena na mapování povodní, ale mohou být užitečná i pro odhad řady hydrologických parametrů (Pultz et al., 1996). Data SAR byla použita pro odhad půdní vlhkosti pro předpovědi povodní (Heike Bach, 2000). Pomocí informací shromážděných družicemi Evropské vesmírné agentury pro pozorování Země jsou nyní vědci schopni studovat, mapovat a předpovídat následky povodní s velkou přesností. Snímky SAR jsou také užitečné při identifikaci otevřené vody, která na většině snímků vypadá černě. V kombinaci s optickým a infračerveným snímkem z jiných satelitů lze vytvořit přesnou a podrobnou digitální mapu (19).

3.5 Detekce a monitoring povodní

Program Copernicus a konkrétně data z družic Sentinel umožnila významný pokrok v monitoringu krajiny zejména díky relativně dobrému, a hlavně dostupnému prostorovému rozlišení (10 až 60 metrů na pixel) a též časovému rozložení (3 až 5 denní perioda snímání) (20). Satelitní snímky přináší výhodu v komplexním pohledu na zemský povrch ve více spektrálních pásmech, což umožňuje automatickou

klasifikaci krajinné struktury. Jejich informační potenciál se zvyšuje v kombinaci s leteckými snímky. Tato prostorová data lze též kombinovat s jinými prostorovými databázemi či s podklady územního plánování.

Využití satelitních dat z dálkového průzkumu země v případě povodní je velmi široké. Mohou se uplatňovat v prevenci, monitoringu průběhu povodní a jsou též snahy o vyvinutí algoritmů na predikci povodní. Během povodní jsou pro úřady klíčové včasné a přesné informace a data k lokalizaci a identifikaci postižených oblastí pro zmírňování škod a koordinaci nouzové situace (jako je například evakuace, odvádění povodňové vody, znečištění vody či zdravotní rizika).

Pro účely této práce je věnován prostor zejména problematice prevence povodní. Ta zahrnuje především podporu preventivních opatření, mapování povodí (zejména půdní vlhkosti, propustnosti a krajinného reliéfu), rozsah a četnost předchozích povodní (21).

Mapování povodní založené na dálkovém průzkumu Země v podstatě zaznamenává, jaká země byla skutečně zaplavena nebo nezatapena na základě topografie, hydrologických dat a hydraulického modelování (11). Mapování těchto událostí tak, jak k nim v průběhu let dochází, může poskytnout informace s ohledem na vyhodnocení povodňového nebezpečí i škod, které povodně způsobily na okolním prostředí, i změny využití území. Brakenridge et al (2003) poznamenali, že satelitní pozorování umožňuje zachovat rozsah povodní a definovat místní historii povodní. Schopnost satelitu poskytnout úplné a vícečasové pokrytí velmi rozsáhlých oblastí během krátké doby byla velmi cenná při monitorování a řízení povodní. Povodňové mapy, které jsou odvozeny ze satelitních snímků, hrají zásadní roli při zlepšování modelování povodní a předpovídání povodní (22), stejně jako budoucích strategií plánování a řízení. Podle Jeyaseelana (2003) závisí použití dálkového průzkumu Země k monitorování povodní na faktorech, jako je topografie, klima a také na některých faktorech životního prostředí, jako je vegetace a populace.

Důležitou roli během mimořádných událostí jako jsou povodně, hraje vegetace. Většina studií zdůraznila důležitost studia vegetačních vzorců před a po povodních. Povodňové poruchy jsou jedním z důležitých faktorů, které mají vliv na břehovou vegetaci na říčních nivách. Výsledky povodní na vegetačním krytu mohou být pozitivní i negativní. Množství srážek určuje, kolik vody se v různých hloubkách zadrží v půdě

a jak vegetace reaguje z hlediska klíčení a růstu. Ve většině případech povodní vegetace nemůže odolat síle povodňové vody a je rozbita nebo vyvrácena (17). Další studie poukazují na fakt, že zvyšující se trend povodní vyvolaných klimatem má takové dopady, že miliony stromů umírají v důsledku zvýšených povodní a zamokření. Vegetační podmínky jsou ve většině suchých oblastí pozitivně spojeny se srážkami. Má však také negativní korelaci s vydatnými srážkami ve vlhkých oblastech (22).

4 METODIKA

Metodika práce spočívá v první fázi v rešerši literatury a analýze využití optických a radarových snímků. V praktické části jsou komparovány optické a radarové snímky ve vybraných povodňových lokalitách, které mají za cíl ilustrovat rozdíly na těchto typech snímcích. Všechny optické snímky jsou ze satelitů Sentinel-2, všechny radarové snímky jsou ze satelitů Sentinel-1.

Jako vhodný nástroj k jednoduchému získání a zpracování těchto snímků byla zvolena on-line analytická platforma společnosti SpaceKnow, inc. – www.analytics.spaceknow.com. Pomocí této platformy lze vyhledávat a stahovat satelitní snímky přímo pro konkrétní zvolené lokality. Pro dané lokality se vytvoří jednotlivé polygony, nad kterými se pomocí API vyhledávají a filtrují snímky přímo z databáze ESA, a to dle zadaných kritérií – pro tyto účely zejména dle časového pokrytí a množství oblačnosti. Vyfiltrovaná data se stahují z databáze ESA nad vybranými lokalitami na tuto platformu do ucelených analýz. Pro optická data lze spočítat navolené vegetační indexy, které se graficky zobrazí nad staženými snímky prostřednictvím heat mapy. Hodnoty indexů jsou vyjádřeny též číselně. Pro tvorbu ročního srovnání dat indexů jsou tyto hodnoty exportovány z této platformy a dále analyzovány prostřednictvím programu MS Excel.

5 VÝSLEDKY

Pro tuto práci byly vybrány lokality, které byly významně zasaženy povodní a zároveň v dané lokalitě byly dostupné vhodné satelitní snímky. Jako příklad byly zvoleny povodně na solné pláni v Chile – Salar de Atacama (začátek roku 2019), dále ve východní Austrálii v Brisbane (začátek roku 2022) a nakonec ve východní Belgii (polovina roku 2021). Všechny snímky jsou od Evropské vesmírné agentury, konkrétně ze satelitů Sentinel-1 a Sentinel-2.

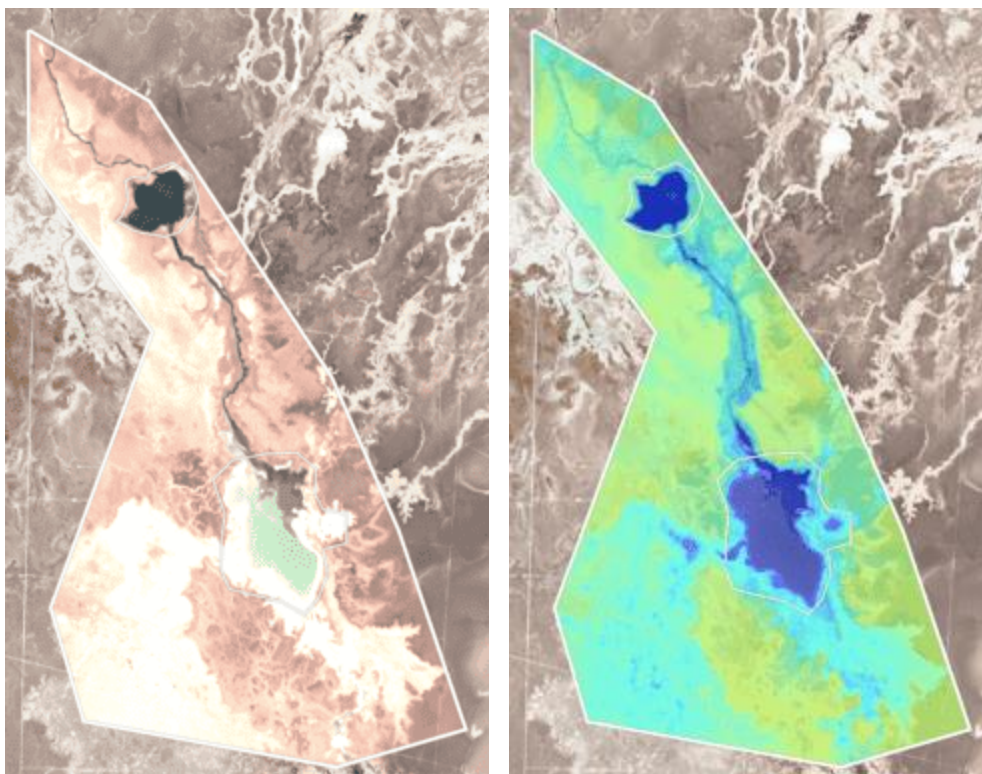
5.1 Salar de Atacama

Solná pláň Salar de Atacama v Chile je jedním z největších zdrojů lithia (23), v blízkosti dolu se nachází odpařovací jezírka. Souřadnice analyzované lokality jsou: - 23.354170, - 68.157626. Hlavní zdrojem povrchové vody jsou zde laguny – laguna Chaxa a laguna Barros Negros, viz Obrázek 4. V únoru 2019 způsobily deště v andských horách přívaly vody, které zalily oblast Atacama a smetly i domy a cesty v nejbližším městě San Pedro de Atacama (23).



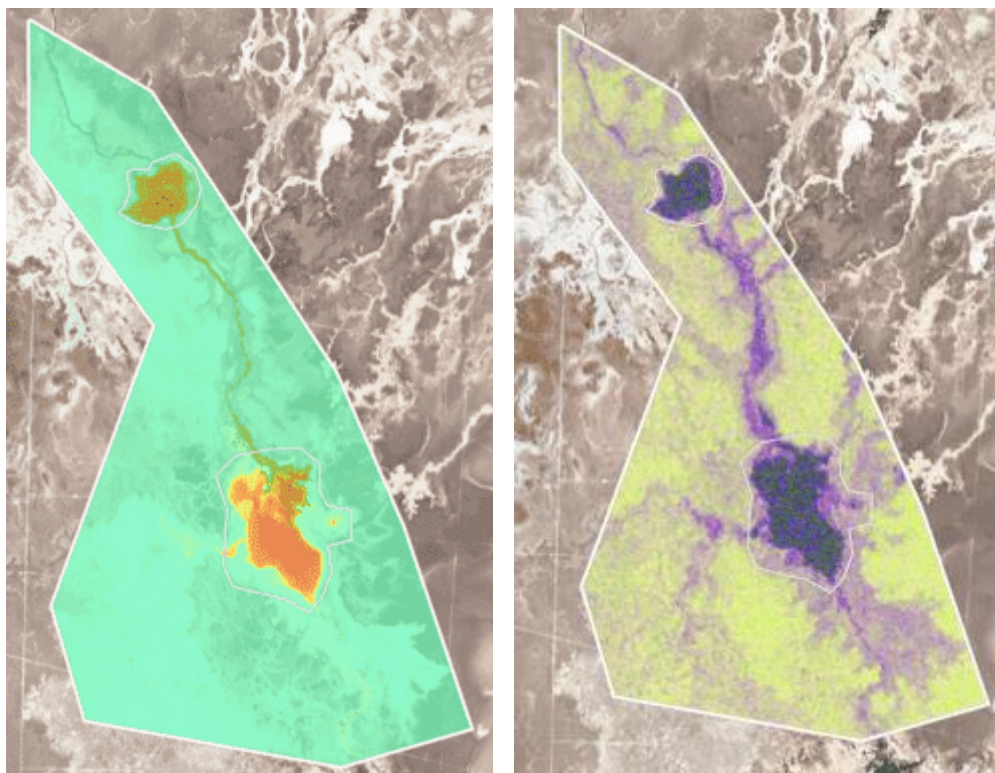
Obrázek 4 Lithiový důl s lagunami (Google Maps, upraveno v programu Qgis)

Situaci před povodněmi v oblasti obou lagun představuje Obrázek 5. níže. Snímek vlevo je ze 14. ledna 2019 ze Sentinelu-2, v pravé části je použit na oblast snímku index NDMI. Modrá barva indikuje přítomnost vody jak povrchové, tak v půdě.



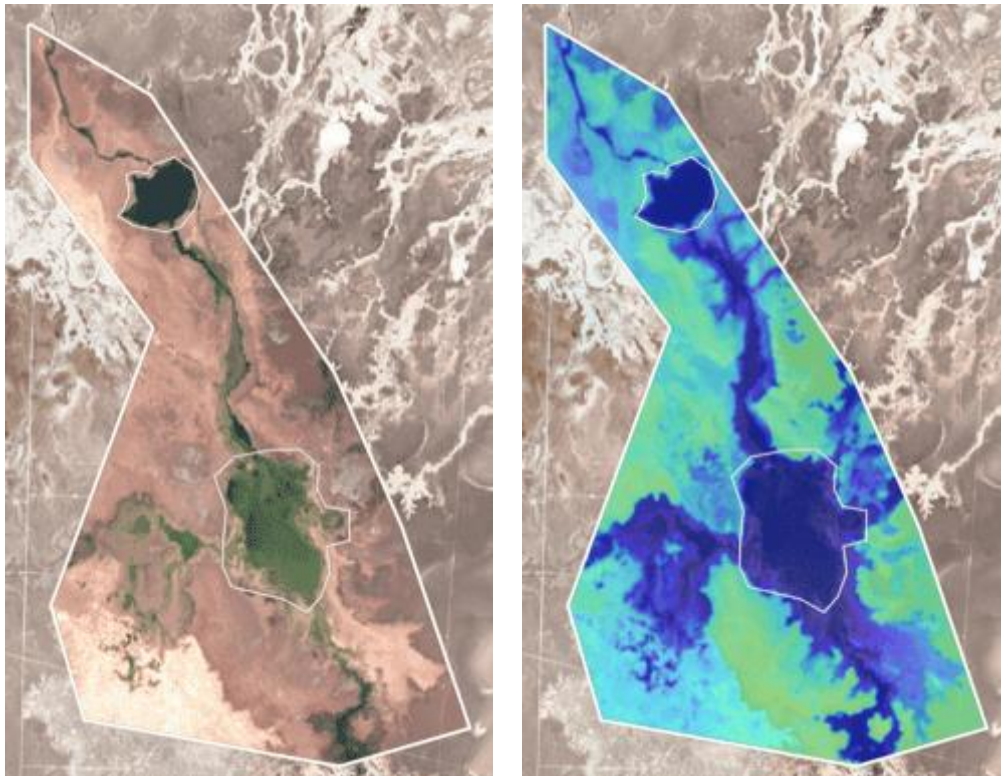
Obrázek 5 Laguny - leden 2019

Na stejném optickém snímku na Obrázek 6 je použit index NDWI, na kterém lze pozorovat vodní plochu koncentrovanou do oblastí lagun. Radarový snímek vpravo pochází ze 17. ledna 2019 ze Sentinelu-1. Voda v oblasti lagun nabývá tmavých barev.



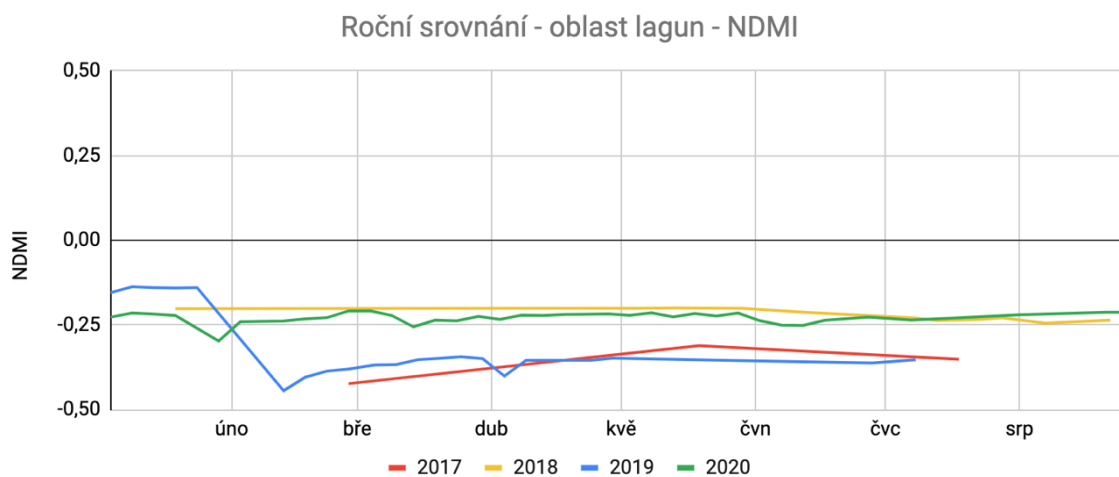
Obrázek 6 Laguny, NDWI a SAR – leden 2019

Snímek z 13. února 2019 ze Sentinelu-2 vlevo ukazuje rozlitou vodu v oblasti obou lagun, na pravém obrázku je na snímku použit index NDVI. Zabarvení oblasti modrou barvou, která indikuje přítomnost vody (čím tmavší modrá tím vyšší koncentrace vody) je zde mnohem rozsáhlejší, než je patrné ze snímku v levé části na Obrázek 7. Vyšší vlhkost půdy je zde na mnohem větším území než lze pozorovat pouhým okem.



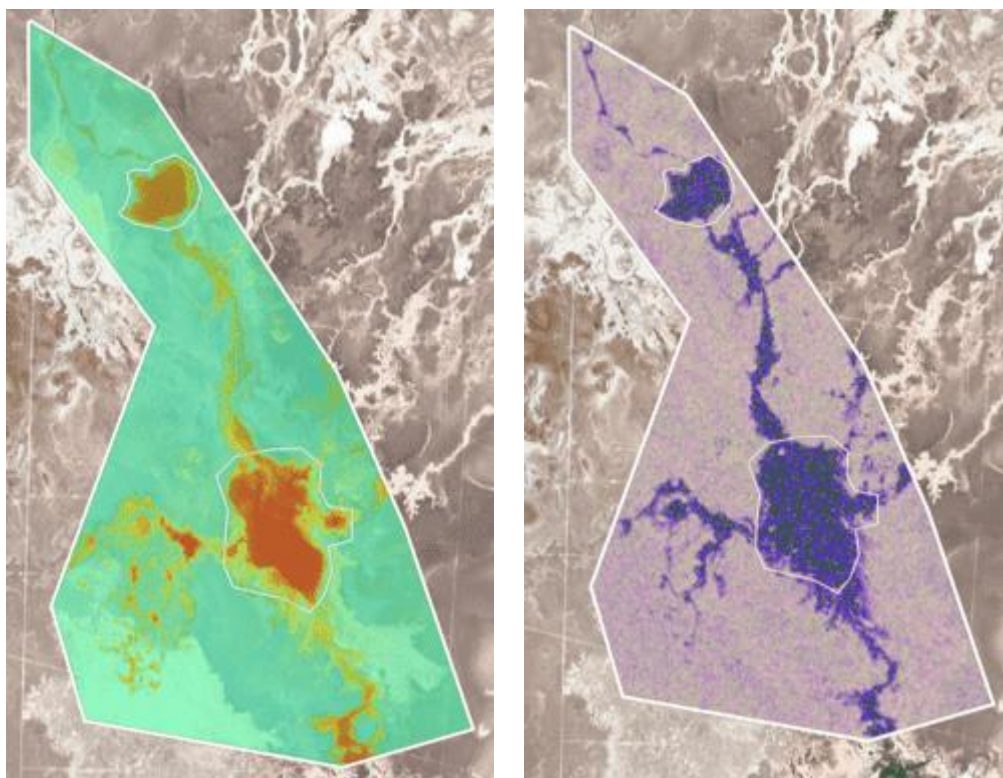
Obrázek 7 Laguny - únor 2019

Pro lepší demonstraci změny hodnot použitého indexu NDVI, resp. výkyv hodnot nad běžný průměr byly do analýzy přidány hodnoty indexů za období první poloviny roků 2017-2020. Jak lze vidět z grafu, který reprezentuje Obrázek 8, hodnota indexu je ve zmíněném období srovnatelná, jediný velký pokles hodnot, které indikují pokles vody, je během února 2019, kdy oblast postihla povodeň. Nižší hodnota tohoto indexu představuje vyšší vlhkost půdy.



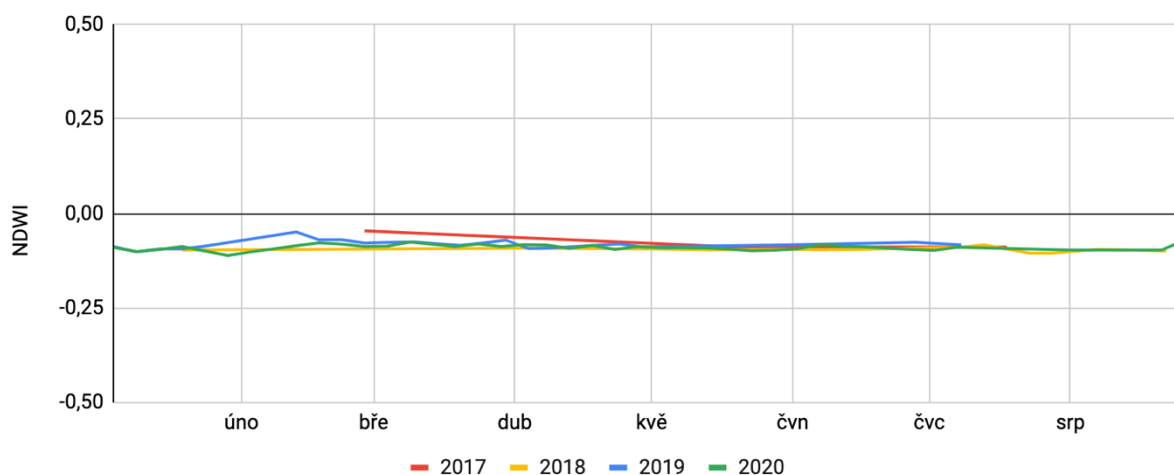
Obrázek 8 Roční srovnání - Laguny – NDMI. Vlastní zpracování

Na stejném optickém snímku je použit též index NDWI, který detekuje zvýšené množství vody nejen v lagunách ale též v oblastech mimo laguny, viz Obrázek 9. Radarový snímek z 10. února 2019 ze Sentinelu-1 doplňuje tuto situaci.



Obrázek 9 Laguny, NDWI a SAR – únor 2019

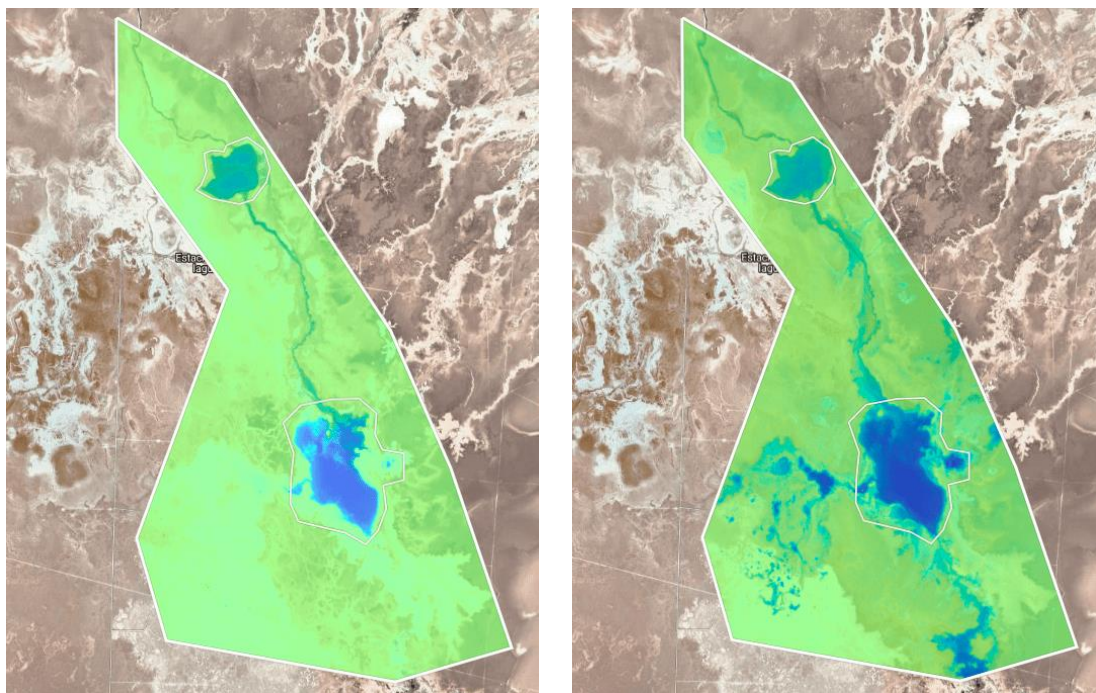
Roční srovnání - oblast lagun - NDWI



Obrázek 10 Roční srovnání - laguny – NDWI. Vlastní zpracování

Index NDWI je též spočítán za období první poloviny roků 2017-2020 pro větší kontext dané situace, viz Obrázek 10. I zde je vidět vyšší hodnota indexu, tj. vyšší obsah vody v daný měsíc. Oproti tomu zbylé období roku 2019 vykazuje obdobný průběh jako ostatní roky.

Pro kompletní ilustraci všech zmiňovaných indexů je na obou optických snímcích použit index NDVI, viz Obrázek 11. V pravé části je zobrazena situace před povodní a na levé části pak situace po povodni ve stejných dnech jako předchozí příklady. I zde je patrná větší saturace vodou mimo samotné oblasti laguny oproti samotnému snímku.



Obrázek 11 Laguny, NDVI – leden a únor 2019

5.2 Východní Austrálie – Brisbane

Povodně ve východní Austrálii na začátku roku 2022 jsou jedny z nejhorších zaznamenaných povodní v zemi. Jejich příčinou byly zejména vysoké srážky (24). Souřadnice analyzované lokality jsou: -27.699110, 153.193067.

Situace před povodněmi na začátku roku 2022 ve východním Brisbane je demonstrována na leteckém snímku z 28. února 2022 (25) - Obrázek 13 a zároveň pro větší kontext je doplněna i celá analyzovaná oblast - Obrázek 12.

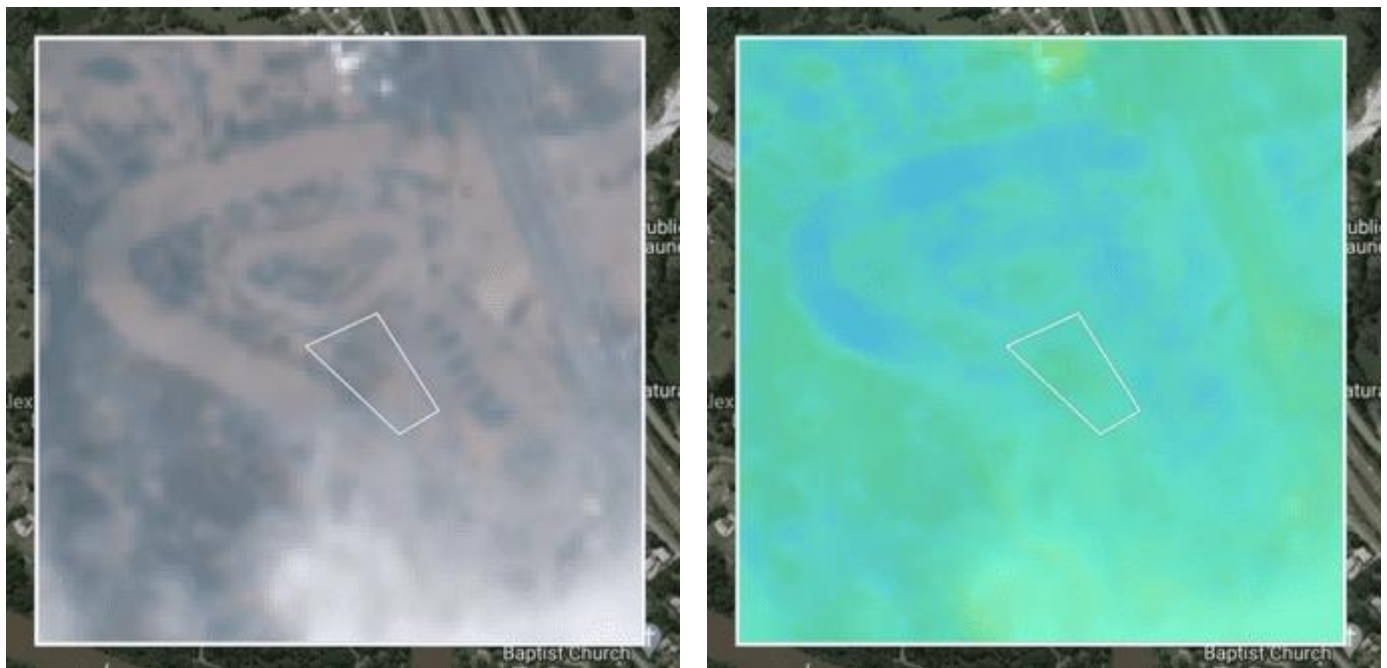


Obrázek 12 Brisbane celkový pohled, červeně vyznačená oblast leteckého snímku , před povodní



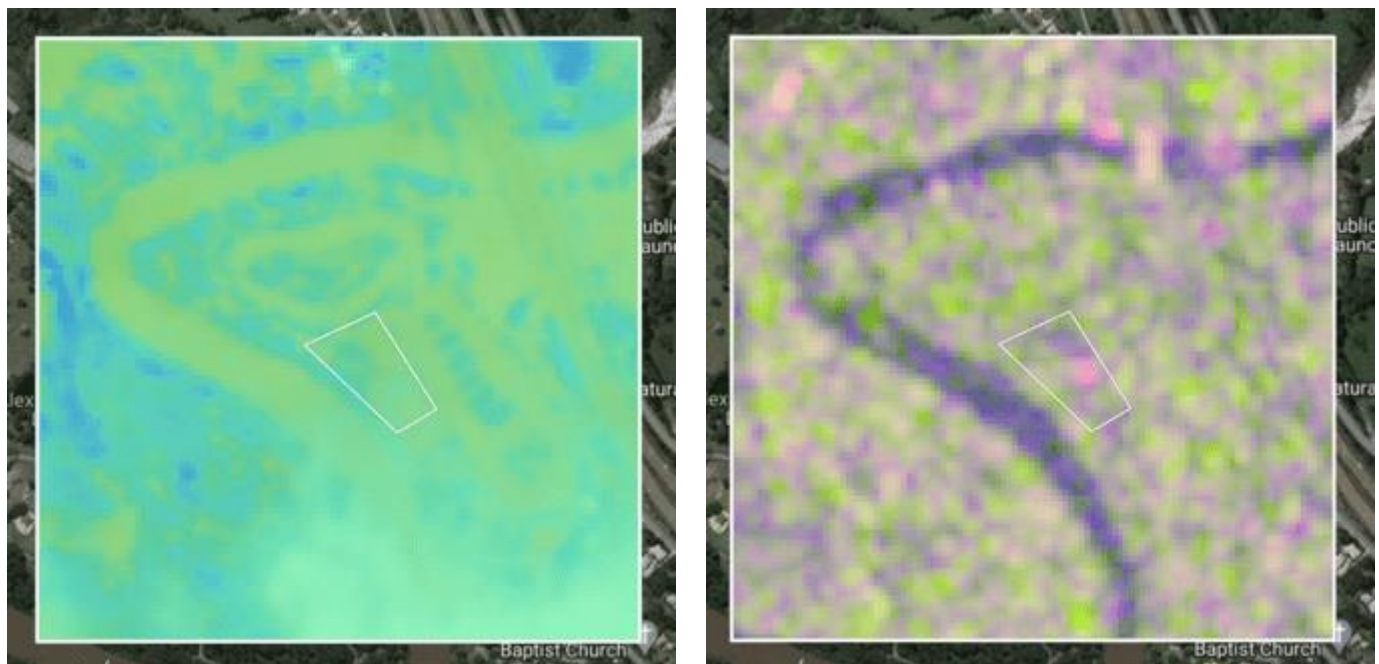
Obrázek 13 Brisbane - letecký snímek, před povodní

Níže je satelitní snímek ze satelitu Sentinel-2 ze stejného dne, tj. z 28. února 2022, viz Obrázek 14. Zobrazený polygon představuje lokalitu prezentovanou na detailním leteckém snímku. Dále je na stejném satelitním snímku použit index NDMI. Modrá barva indikuje přítomnost vody na snímku.



Obrázek 14 Brisbane únor 2022

Dále je na stejném snímku použit index NDWI - Obrázek 15. Pro výchozí komparaci stavu těsně před povodní je přidán i radarový snímek z 23. února 2022 (snímek ze stejného data není k dispozici).



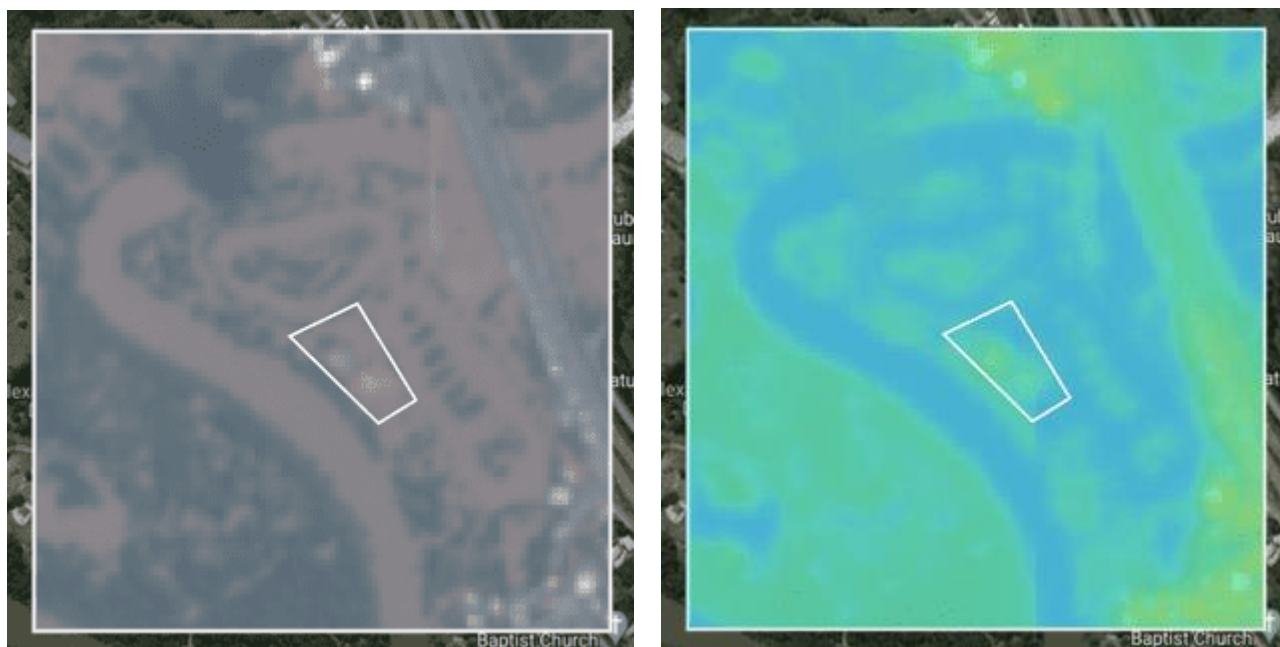
Obrázek 15 Brisbane, NDWI a SAR – únor 2022

Letecký snímek z 2. března 2022 zobrazuje zcela zatopenou oblast viz Obrázek 16, vodní plocha zde razantně stoupla.



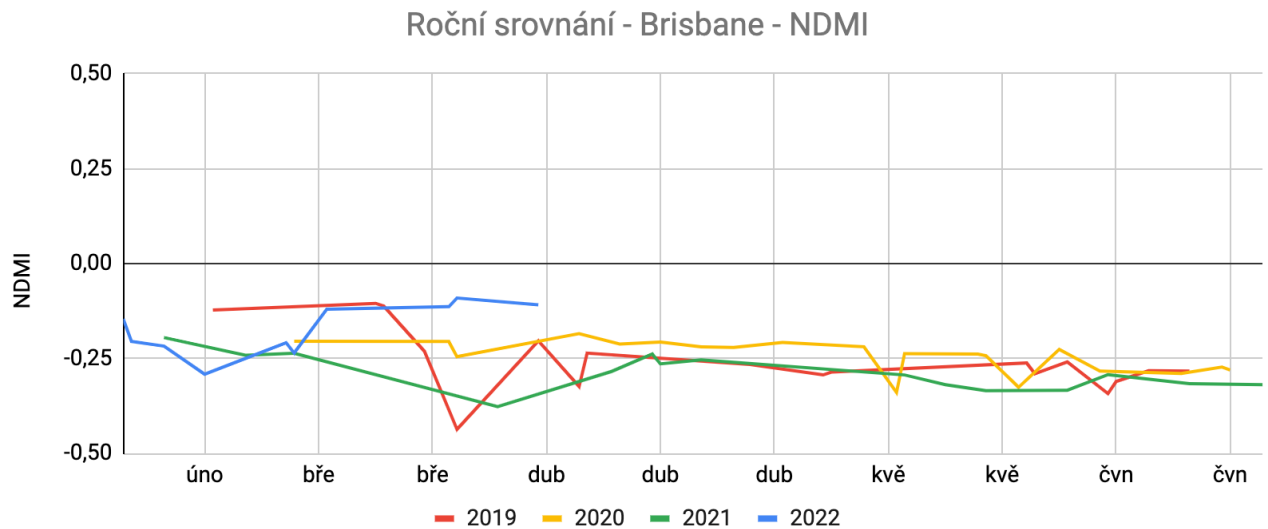
Obrázek 16 Brisbane - letecký snímek, po povodni

Stejná situace je zobrazena na satelitním snímku z 1. března 2022 (snímek ze stejného data není k dispozici) viz Obrázek 17.



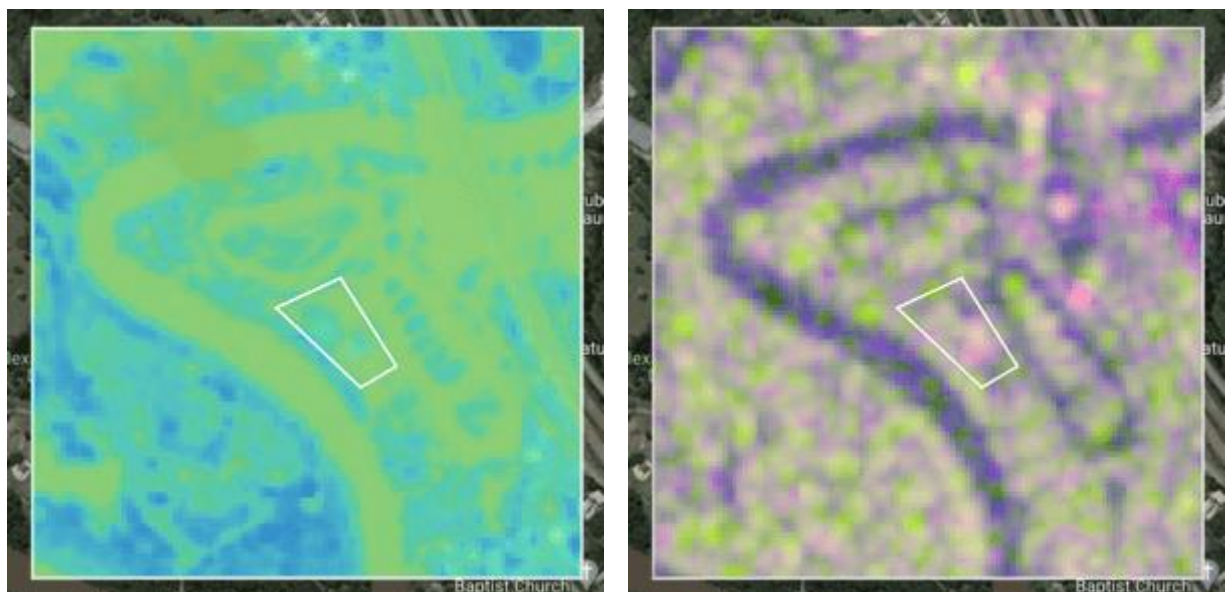
Obrázek 17 Brisbane, březen 2022

Na zmíněném satelitním snímku je též použit index NDMI, na kterém lze pozorovat převažující modrou až tyrkysovou barvu, která značí vysokou přítomnost vody. Oproti předchozímu snímku je tato oblast značně větší, tj. sahá i mimo oblast vodního toku. Pro větší kontext je situace doplněna grafem s ročním srovnáním, kde lze pozorovat nižší hodnoty indexu NDMI oproti ostatním rokům v tomto období, viz Obrázek 18.



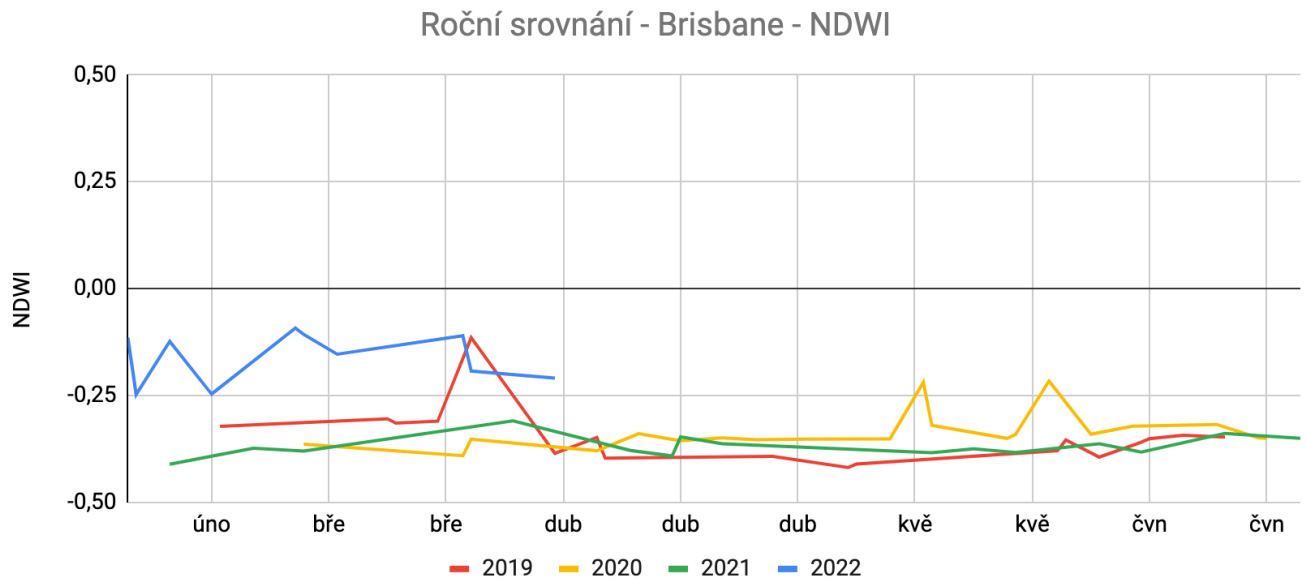
Obrázek 18 Roční srovnání - Brisbane – NDMI. Vlastní zpracování

Pro stejný satelitní snímek je též použit index NDWI – Obrázek 19, z něhož je patrná zvýšená velikost vodní plochy oproti předchozímu snímku. Stejně tak na radarovém snímku ze stejného data lze vidět zvýšené množství vodních ploch oproti předchozímu radarovému snímku.



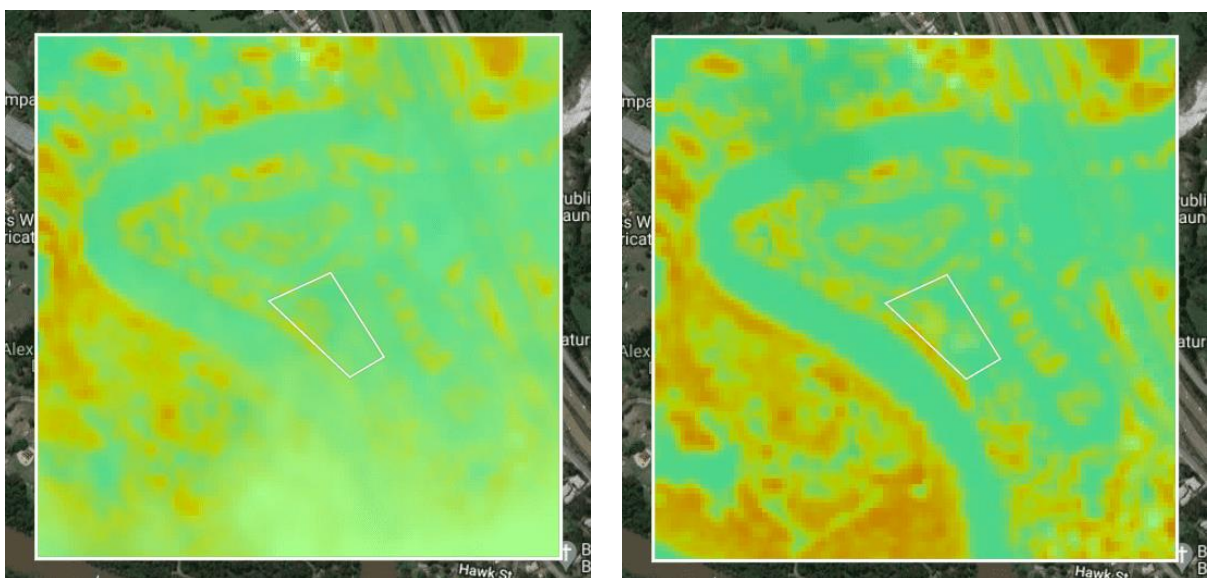
Obrázek 19 Brisbane, NDWI a SAR – březen 2022

Srovnáním s předchozími roky lze vidět, že hodnoty indexu NDWI jsou v tomto období vyšší, jak je graficky demonstrováno níže – Obrázek 20.



Obrázek 20 Roční srovnání - Brisbane – NDWI. Vlastní zpracování

Posledním srovnáním je použití indexu NDVI - Obrázek 21. I zde je tento index aplikován na stejné optické snímky před a během povodni. Plochy, kde je detekována voda jsou značně rozsáhlejší, než je tomu na optickém i leteckém snímku.



Obrázek 21 Brisbane, NDVI – únor a březen 2022

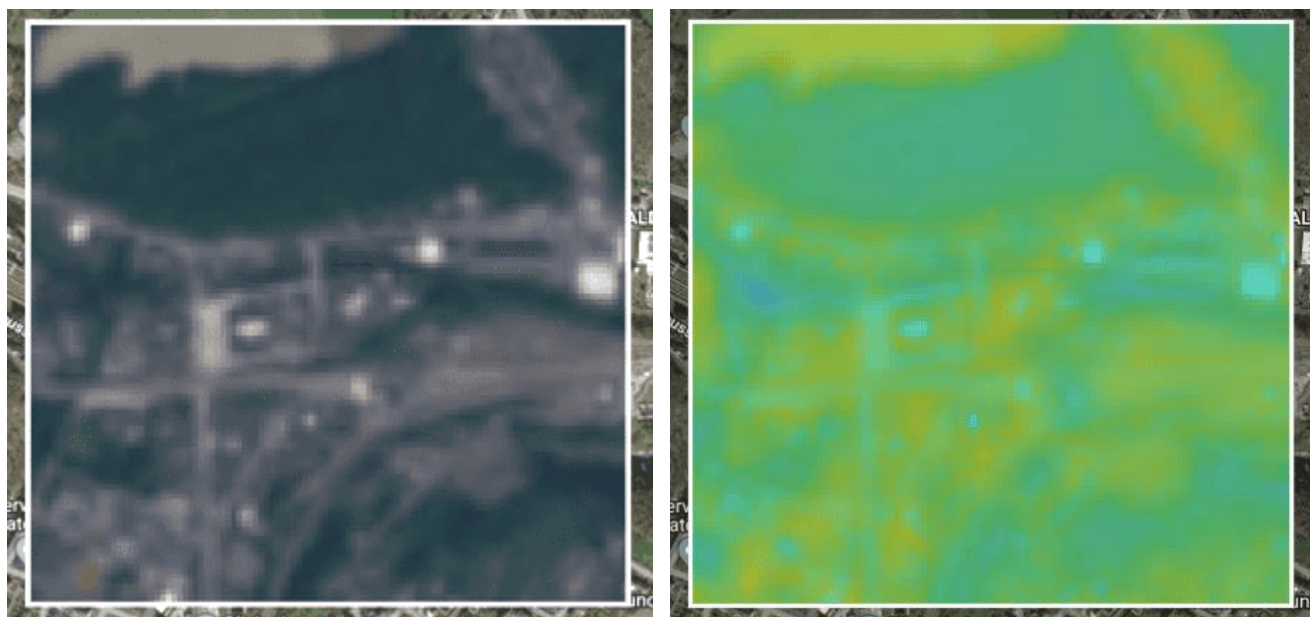
5.3 Východní Belgie – Pepinster

V polovině července 2021 byla východní Belgie výrazně postižena povodní. Jednou z velmi zasažených oblastí byla obec Pepinster v provincii Lutych (26). V obci je soutok dvou řek – Hoëgne a Vesdre, viz Obrázek 22. Souřadnice analyzované lokality jsou: 50.569076, 5.804373.



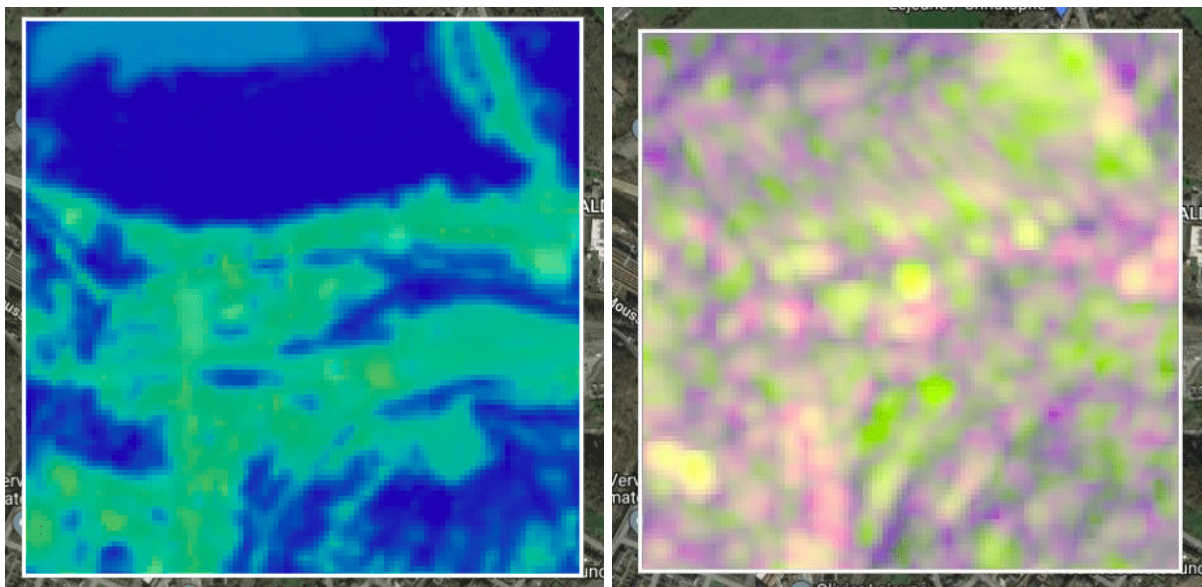
Obrázek 22 Obec Pepinster

Na satelitním snímku z 14. června 2021 je zobrazena situace před povodní a zároveň je na stejném snímku použit index NDMI - Obrázek 23.



Obrázek 23 Pepinster, červen 2021

Dále je na tomtéž snímku použit index NDWI, viz Obrázek 24. Pro výchozí komparaci stavu těsně před povodní je přidán též radarový snímek z 15 června 2021 (snímek ze stejného data není k dispozici).



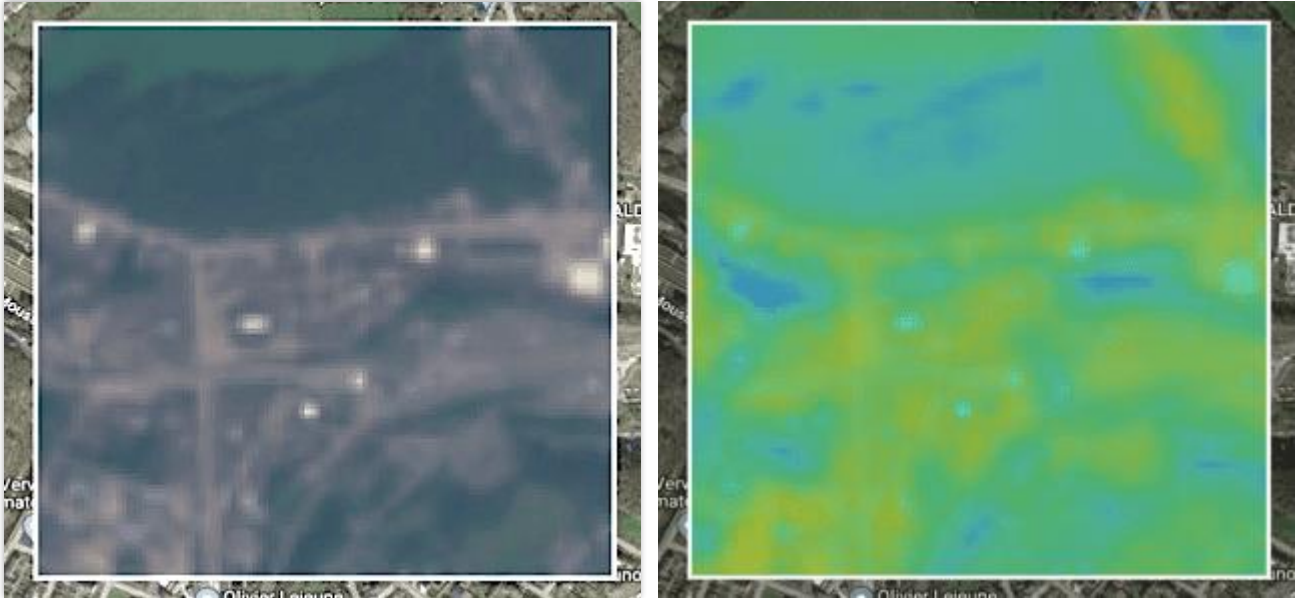
Obrázek 24 Pepinster, NDWI a SAR – červen 2021

Letecký snímek z 16. července 2021 zobrazuje zatopenou oblast viz Obrázek 25 (jde o stejnou část obce jako je uvedeno na snímku před povodněmi).



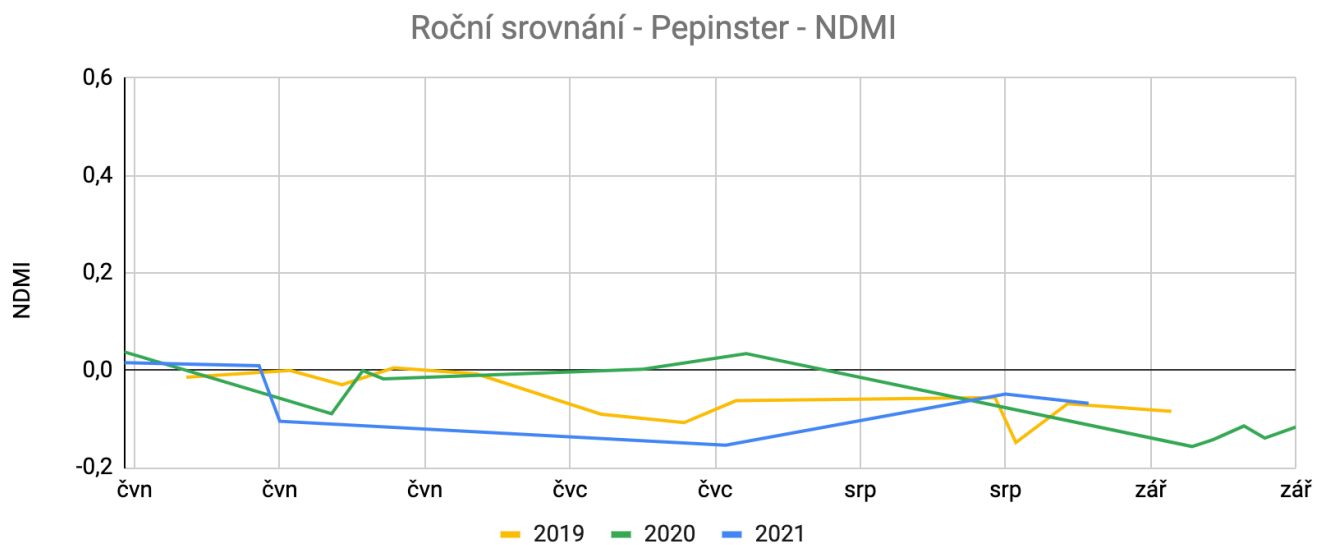
Obrázek 25 Pepinster během povodní (27)

Stejná situace je zobrazena na satelitním snímku z 19. července 2021 (snímek ze stejného data jako je letecký je celý pokrytý mraky tudíž není vhodný k analýze), viz Obrázek 26. Na tomto satelitním snímku je též použit index NDMI, na kterém lze pozorovat zvětšené území ploch obsahující více vody oproti předchozímu.



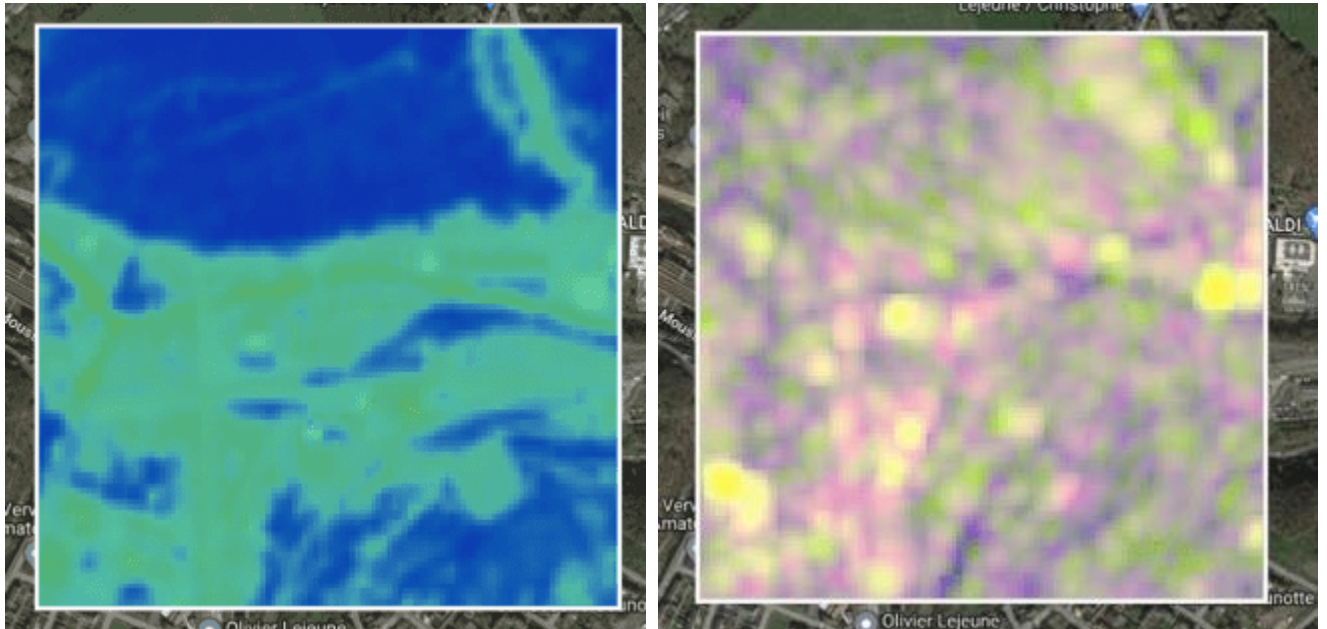
Obrázek 26 Pepinster, červenec 2021

Pro větší kontext je situace doplněna grafem s ročním srovnáním s předchozími dvěma roky, kde lze pozorovat nižší hodnoty indexu NDMI oproti předešlým rokům v průběhu druhé poloviny července 2021, viz Obrázek 27.



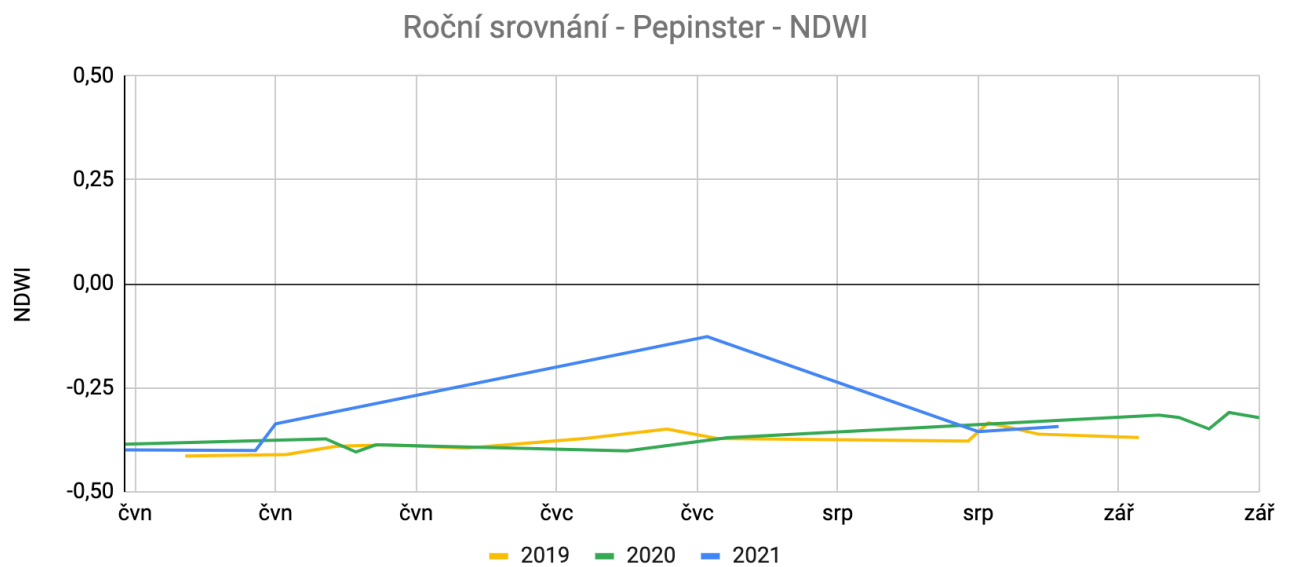
Obrázek 27 Roční srovnání - Pepinster – NDMI. Vlastní zpracování

Na stejném optickém snímku je opět použit i index NDWI, který zobrazuje zvýšené množství vodní hladiny v obci. Radarový snímek z 16. července 2021 doplňuje tuto situaci – Obrázek 28.



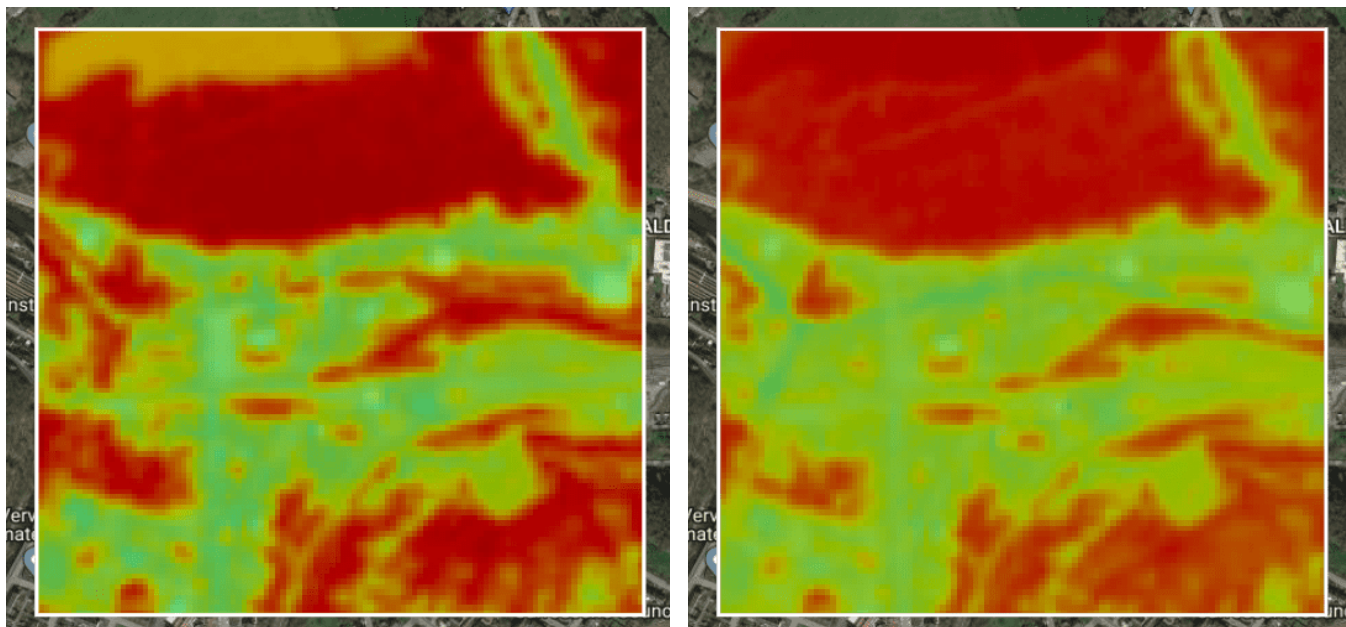
Obrázek 28 Pepinster, NDWI a SAR – červenec 2021

Srovnáním s předchozími dvěma roky lze vidět výrazně vyšší hodnoty indexu NDWI v průběhu července 2021 jak je demonstrováno na Obrázek 29.



Obrázek 29 Roční srovnání - Pepinster – NDWI. Vlastní zpracování

Posledním indexem je NDVI, kde jsou níže srovnány obě situace – před a po povodni, viz Obrázek 30. Oproti předchozím příkladům v jiných lokalitách je vizualizace tohoto indexu značně odlišná. Zobrazená plocha ukazuje proměnu vegetace během této doby. Je zde vidět rozšíření území, kde se nachází řeka (pravá část obrázku).



Obrázek 30 Pepinster, NDVI – červen a červenec 2021

6 DISKUZE

Hlavním cílem bakalářské práce byla analýza využití satelitních snímků v rámci dálkového průzkumu Země v protipovodňové ochraně. Tohoto cíle bylo dosaženo pomocí rešerše stávající literatury, práci s daty a vlastní analýzou a komparací satelitních snímků. Hypotézou pro analýzu byla možnost a vhodnost využití satelitních snímků s nízkým rozlišením v protipovodňové ochraně. Pro tuto komparaci byly vybrány tři různé lokality, kde se vyskytly povodně.

Využití satelitních snímků s nízkým rozlišením v monitoringu povodní a obecně v protipovodňové ochraně je v jisté míře rozšířené; ESA provozuje vlastní webové stránky pro krizové řízení prostřednictvím poskytování svých snímků (18). Mezi oblastí zájmu patří nepřetržité monitorování oblastí z hlediska povodní, požárů a sucha. Pro výzkumné instituce či akademickou sféru mají snímky s nízkým rozlišením od ESA bezesporu velkou výhodu v dostupnosti snímků. Tato dostupnost je ve dvou rovinách: snímky jsou dostupné bezplatně a zároveň satelity Sentinel mají vysokou periodu opětovné návštěvy (anglicky revisit) lokalit, takže pořízené snímky jsou v lokalitách relativně časté.

I přes nízké rozlišení optických snímků má Sentinel-2 komparativní výhodu v tom, že senzor má celkem 13 spektrálních pásem. Ty z výsledných snímků činí opticky často hodnotnější snímky, než jsou konkurenční s vyšším rozlišením.

Negativním aspektem optických snímků pro oblast protipovodňové ochrany zůstává jejich ovlivnitelnost atmosférickými jevy, konkrétně vysokou oblačností. Pro využití během povodní (např. pro získání nejaktuálnější dat) se v případě vysoké oblačnosti tyto snímky stávají téměř nepoužitelnými. K tomu lze doplnit, že mezi hlavní příčiny povodní patří právě vysoká úroveň srážek (28).

Tímto negativem nejsou zatíženy radarové snímky díky své technologii snímání. Nicméně SAR data jsou obtížněji interpretovatelná oproti optickým snímkům. To lze demonstrovat na praktickém příkladu v lokalitě Pepinster, kde radarové snímky před a po povodni mají bez většího kontextu a na takto malé oblasti velmi nízkou vypovídací

hodnotu, obzvláště pro laické publikum. Pro lepší orientaci v této lokalitě je větší oblast těchto dvou radarových snímků součástí Přílohy 1. Kromě samotného faktu metody pořízení těchto snímků je jejich přidaná hodnota pro laiky v tomto případě nízká kvůli zvolené lokalitě – kromě soutoku dvou řek jde o obydlenou obec, tudíž míra odrazivosti je zde nad celým polygonem oblasti různá a lze obtížně odlišovat jednotlivé objekty či oblasti. Využití radarových snímků v krizovém řízení a konkrétně v protipovodňové ochraně je z hlediska technické náročnosti samostatná oblast výzkumu – například Liu et al. 2019 (29), Musa (30) či Ouled et al. 2018 (31).

Naproti tomu v lokalitách jako je uveden příklad povodní v Austrálii lze radarové snímky poměrně jednoduše interpretovat na základní úrovni, resp. pro účely této analýzy dostačujícím způsobem. Zde je totiž oblast nejen větší ale hlavně jde o vodní tok s okolní vegetací (parky) a jen s několika zařízeními či budovami, které mají vyšší odrazivost. Tím dochází ke snížení „šumu“ v čitelnosti u těchto dvou snímků. Lze tu tak lépe sledovat změnu vodního toku.

Použití radarové technologie v satelitním snímání tedy představuje značnou výhodu oproti optickému snímání zejména pro svou nezávislost na atmosférických jevech. Mise Sentinel-1 má navíc výhodu častého pokrytí oblastí. Bohužel satelit Sentinel-1B se od 23. prosince 2021 potýká s technickými problémy (32), které doposud nebyly vyřešeny (aktuální k 20. 4. 2022). Důsledkem je nižší dostupnost radarových snímků od ESA, tj. snímky jsou dostupné pouze ze satelitu Sentinel-1A, čím se snížila dostupnost snímků na polovinu.

Radarové snímky mají velký potenciál v oblasti protipovodňové ochrany díky nezávislosti na atmosférických jevech. To potvrzuje i fakt, že dochází ke zlepšování této technologie. Příkladem je finská společnost Iceye vyvíjející vlastní satelity, které umožňují pořizovat radarové snímky s rozlišením až 1 metr na pixel (33). Jde tak o první satelity se SAR technologií, které dokážou snímat ve vysokém rozlišení. Nevýhodou je, že tato data jsou zatím stále velmi drahá.

Dalším důležitým aspektem v používání satelitních snímků v protipovodňové ochraně je využívání vegetačních indexů. Ty umožňují sledovat trendy a zachycovat aktuální stavy díky spektrálním pásmům satelitních snímků, tj. díky vlastnostem snímků

umožňují monitorovat stavy, které nemusí být na první pohled zřejmé pouhým okem. Indexy nabývají hodnot od -1,0 do 1,0; to je reflektováno i v grafech v praktické části práce.

Mezi často používané indexy v oblasti povodní se využívá zejména index NDWI a NDMI. Tím, že NDWI využívá ve svém výpočtu zelené spektrální pásmo tak nižší hodnoty se ve výsledném grafickém zobrazení projevují zelenou barvu, tj. hodnoty, kde je detekována vyšší koncentrace obsahu vody, tím že pracují se zeleným pásmem. Na příkladu v Austrálii lze detekovat změnu v lokalitě před a během povodně, kdy větší část území je podbarvena do zelena, tj. je zde zachyceno více vodní plochy. Navíc při srovnání obou grafických zobrazení NDWI indexu lze pozorovat, že přítomnost vodních ploch je obecně mnohem vyšší než lze vidět na normálním snímku. Vodní plochy jsou detekovány i na území parku a přilehlých oblastí, tento fakt není viditelný z leteckého snímku ani ze samotného satelitního snímku.

Obdobná situace je u příkladu povodní v Belgii, kde je opět patrné zvětšení celkové plochy, kde je detekována přítomnost vody. Zároveň tato plocha je i před povodní větší než lze pozorovat na leteckém či satelitním snímku pouhým okem.

Trochu odlišná situace je u prvního příkladu povodní v oblasti solných jezer. I zde je plocha, kde je detekována voda během povodní větší, než lze pozorovat na leteckém či satelitním snímku. Nicméně grafické zobrazení hodnot indexu se zde liší, a to z toho důvodu, že se jedná o značně odlišné složení prostředí a půdy. Obě laguny jsou útvary se slanou povrchovou vodou a nacházejí se v suché pouštní oblasti v blízkosti lithiového dolu, to má za následek odlišné podbarvení této oblasti.

Dalším používaným indexem je NDMI, díky kterému lze indikovat a sledovat vlhkost půdy a vegetaci na snímku. I zde na příkladu povodní v Austrálii lze pozorovat změnu v množství detekované vody napříč vybraným územím během povodně. Zároveň je i zde rovněž patrná větší koncentrace vody mimo oblast vodního toku i na snímku před povodní.

Příklad povodní v belgické obci je z hlediska interpretovatelnosti grafického zobrazení dat obtížnější. Na snímku před povodní je převažující tyrkysová barva

a zabarvení do žluta s méně zastoupenými modrými místy, jež indikují přítomnost vody. To může být zářezí vzhledem k soutoku dvou řek (i přes jejich nižší průtok a šíři). Nicméně vzhledem k tomu, že tento index popisuje též úroveň vodního stresu ve vegetaci, která je zde zastoupená zejména v okolí vodní plochy tak je možné toto interpretovat i s ohledem právě na tuto vegetaci, která se jeví jako relativně zdravá s vysokým obsahem vlhkosti. Na snímku během povodní je již více patrné zvýšené množství vody a vodních ploch, které jsou indikovány modrou barvou na grafickém zobrazení snímku. Současně je zde stále vidět mnoho oblastí, které značí vegetaci a její nasycenost vlhkostí, která je v souvislosti s vysokými srážkami pochopitelná.

Na příkladu pouštních povodní v chilské oblasti poskytuje použití indexu NDMI dodatečné informace. Na snímku před povodní je vidět vodních plocha koncentrována zejména do oblastí lagun a spojující řeky ale současně je detekována i na širší oblasti v okolí. Na snímku během povodní je přítomnost vody detekována na mnohem širší a rozsáhlejší oblasti, než jak je patrné ze samotného satelitního snímku. Kromě zvětšených vodních ploch obou lagun a spojující řeky je značně rozšířena i oblast na západní stranu od větší spodní laguny. Tato oblast je přítomna na samotném snímku též větší ale v mnohem menším měřítku, než je zde vodní úroveň pomocí tohoto indexu detekována. Jde tedy shrnout, že v tomto případě je použití indexu NDMI velmi užitečné a přináší důležitá zjištění ve změně obsahu vody na povrchu a v půdě.

Analýzu doplňuje použití indexu NDVI. Ten patří mezi základní vegetační indexy nicméně je též dobrým indikátorem pro určení vodních ploch. I zde velmi záleží na snímané lokalitě a jejím kontextu. Satelitními senzory měří vlnové délky světla absorbovaného a odraženého zelenými rostlinami. Některé pigmenty v listech rostlin silně absorbují vlnové délky viditelného (červeného) světla. Samotné listy silně odrážejí vlnové délky blízkého infračerveného světla, které je pro lidské oči neviditelné. Jak rostliny mění z raného jarního růstu do pozdní zralosti a stárnutí, mění se také tyto odrazové vlastnosti.

Jak je uvedeno na příkladu povodní v Austrálii, tak lze na zobrazené vizualizaci dobře pozorovat přítomnost vodní plochy a její rozšíření během povodni. Oproti tomu belgický příklad je obtížněji čitelný z hlediska své interpretace. Rozšíření vodní plochy

je patrné, avšak bez znalosti dané lokality, resp. leteckého či satelitního snímku je toto rozšíření obtížně identifikovatelné.

Chilský příklad je oproti tomu z hlediska interpretace velmi přímočarý. Daná lokalita se skládá z lagun, spojující říčky, která pravidelně vysychá a zároveň se rozvodňuje a dále pouštní půdy, tj. bez hojného zastoupení vegetace. Důsledkem toho je jasně vizualizovaná vodní plocha, a tak zřejmé i její rozšíření v důsledku povodní.

Obecně lze shrnout, že NDVI je zvláště užitečný pro monitorování vegetace v globálním měřítku, protože dokáže kompenzovat měnící se podmínky osvětlení, sklon povrchu a úhel pohledu. To znamená, že NDVI má tendenci se nasytit hustou vegetací a je citlivý na základní barvu půdy.

Využití vegetačních indexů sebou přináší doplnění a rozšíření analýz samotných satelitních snímků. Přesto je nutné a důležité znát, co jaký index s čím porovnává, tj. jaká pásma mezi sebou porovnávají a podle toho posuzovat jejich vhodnost a vypovídací schopnost na dané lokality. Jejich další nespornou přidanou hodnotou je možnost tvorby časových řad (pokud jsou samozřejmě satelitní data ve vybraných lokalitách hojně dostupná i historicky) a tím si vytvářet a sledovat modely ročního srovnání. Na základě těchto dat lze pak pozorovat trendy či opakující se jevy a podle toho přizpůsobovat též i krizové plány.

Samotné satelitní snímky se mohou v určité míře vyznačovat též vadnými pixely, takzvanými defekty, jež se objevují buď při samotném snímání anebo při následném zpracovávání. Tím dochází k částečnému znehodnocení snímku a poklesu vypovídací hodnoty, zejména pokud je tento defekt nad územím zájmu či se vyskytuje často. Bohužel s tímto je nutno stále počítat.

V neposlední řadě se může praktická využitelnost satelitních snímků v protipovodňové ochraně potýkat s problémy její implementace do infrastruktury krizového řízení. V tomto kontextu se jedná zejména o technickou infrastrukturu, kvalifikovaný personál a jistou osvětu v této oblasti.

Díky neustálému vývoji na poli výpočetní techniky jsou nyní i nároky a požadavky na získání satelitních snímků, konkrétně na snímky s nízkým rozlišením od ESA, relativně nízké. Technická infrastruktura je tedy pro toto využití relativně nenáročná. Již zmíněný portál od ESA pro řízení krizových situací (18) umožňuje snadné vložení specifikace oblasti, četnosti snímání a rychlosti odezvy. Zůstává otázkou, zda by toto řešení bylo možné též implementovat do stávající technické infrastruktury v českém krizovém řízení (a zároveň s tím vyvstává i otázka, zda není rozhraní od ESA dostačující pro tyto účely).

Důležitým a klíčovým faktorem jsou pak personální kapacity pro práci se satelitními daty. Tím, že data jsou ve velké míře dostupná a jejich množství je velké je třeba s nimi umět pracovat a interpretovat je efektivně. Je zřejmé, že informace získané ze satelitů samy o sobě nestačí k vytvoření smysluplné analýzy dané mimořádné události. Zkušenosti získané prací se satelitními snímky ukazují, že je absolutním klíčem spojit satelitní informace s dalšími daty, aby byly prezentovány ve správném geoprostorovém kontextu. Kromě odborných znalostí v oblasti analýzy obrazu je tedy neméně důležitým prvkem vytváření komplexních a snadno použitelných mapových produktů (kam lze zařadit referenční soubory dat jako jsou názvy míst, silniční síť, řeky, kritická infrastruktura a topografické informace).

Přehlednost leteckých snímků je velkou výhodou pro jejich využití v krizovém managementu. Letecké a satelitní snímky jsou snadno srozumitelným základem pro rozhodování v krizovém managementu. Výhodou použití leteckých snímků v krizovém managementu je jejich dobrá a jednoduchá srozumitelnost (srozumitelnější než mapa) a představují nižší nároky na abstraktní myšlení, které může být důsledkem stresu sníženo. Nicméně pro dlouhodobější plánování se naopak satelitní snímky ukazují přínosnější právě pro svoji širší vypovídací hodnotu.

Používání geoinformačních technologií umožňuje efektivnější řízení práce krizového managementu ve všech jeho fázích. V mnoha fázích vývoje krizí je pro rozhodování krizového managementu nutné mít dobrou vizualizaci prostorových informací. Geografické informace, znalosti a zkušenosti lze v období prevence využít nejen pro posouzení území z hlediska míry náchylnosti ke škodlivým jevům a procesům,

ale také pro plánování optimálního zásahu v případě jeho výskytu, řešení aktuální situace události a také k nápravě vzniklých škod.

Lidská interpretace a vnímání těchto dat se liší. I přes současný technologický pokrok je lidské vnímání a interpretace stále klíčovými složkami krizového řízení. Interpretace satelitních snímků se liší nejčastěji v několika aspektech – zobrazení oblastí z často neznámé či neobvyklé perspektivy (zde velmi záleží na úhlu pořízeného snímku, tj. v jakém úhlu je průsečík kolmice na horizontální rovině pozorovaného místa s nebeskou sférou), interpretace vlnových délek mimo viditelnou část spektra a dále zobrazení zemského povrchu v neznámých měřítcích a rozlišeních. Schopnost interpretovat snímky se také mění s věkem (34). Problematice vizualizace prostorových informací pro krizové řízení se věnuje řada autorů, například Svatoňová (34) či Konečný (35).

S neustálým vývojem a zlepšováním technologií satelitů, jak už s optickým snímáním, tak s radarovým, lze očekávat i větší provázanost a integraci s krizovým řízením, protože satelitní data poskytují cenné informace v téměř okamžitém čase.

Predikce povodní je samostatná oblast výzkumu. Běžně se skládá z alespoň dvou základních komponent, tj. numerického modelu předpovědi počasí pro poskytování předpovědí srážek a hydrologického/hydraulického modelu.

V posledních letech se vědecké příspěvky v oblasti dálkového průzkumu povodní značně zvýšily a věda představila inovativní výzkum a metody pro získávání informačního obsahu z vícerozměrného pokrytí katastrofálních povodní po celém světě. Informace získané z dálkového průzkumu povodní se stávají dostatečně vyzrálé, aby mohly být nejen integrovány s počítačovými simulacemi povodní, aby bylo možné lépe předpovídat, ale také pomáhat agenturám pro reakci na povodně při jejich operacích.

7 ZÁVĚR

Ochrana obyvatelstva je jedním z nejdůležitějších úkolů složek integrovaného záchranného systému (IZS) a orgánů krizového řízení. Znalost prostorových informací a orientace v nich je nezbytná v případě mimořádné události velkého rozsahu, na jejímž řešení se podílejí stovky či tisíce lidí. Povodně jsou na území České republiky stále častější a mají rozsáhlé dopady na obyvatelstvo, majetek a životní prostředí.

Tato bakalářská práce se věnovala analýze využití satelitních snímků v protipovodňové ochraně. V rámci práce byly představeny a vysvětleny principy fungování satelitů s optickým snímáním a s radarovým snímáním, konkrétně satelity z misí Sentinel od ESA. Dále byly v práci rozebrány základní vegetační indexy používané v souvislosti se sledováním obsahu vody ve vegetaci a ve vodních plochách.

Hlavním cílem práce byla analýza využití satelitních snímků v rámci dálkového průzkumu Země v protipovodňové ochraně. Tato analýza zahrnovala práci se satelitními daty (optickými a radarovými). V rámci bakalářské práce byly použity příklady třech různých lokalit, kde byly satelitní snímky použity včetně příslušných vegetačních indexů a byla rozebrána jejich vypovídací hodnota, vhodnost a komparace s leteckými snímky.

Závěrem práce je konstatování, že satelitní snímky jsou svými vlastnostmi zahrnující více spektrálních pásem (platí pro optická data) a schopností být nezávislé na atmosférických jevech (platí pro radarová data) přínosné pro využití v protipovodňové ochraně, a to i přes zkoumané nízké rozlišení snímků. Přesto byly identifikovány potenciální překážky jako je obtížnější interpretace či integrace do stávající technické infrastruktury krizového řízení. Nicméně další vývoj a pokrok v satelitním snímání může dále v budoucnu zefektivnit a zvýšit protipovodňovou ochranu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

API	Rozhraní pro programování aplikací (Application Programming Interface)
C-SAR	C-pásmovým radarem se syntetickou aperturou (C-band synthetic aperture radar imaging)
CEMS	The Copernicus Emergency Management Service
DSHA	Data Storage and Handling Assembly
ESA	European Space Agency
IZS	Integrovaný záchranný systém
MSI	Multispektrální přístroj (MultiSpectral Instrument)
NDMI	Normalizovaný rozdílový index vlhkosti (Normalized Difference Moisture Index)
NDVI	Normalizovaný rozdílový vegetační index (Normalized Difference Vegetation Index)
NDWI	Normalizovaný rozdílový vodní index (Normalized Difference Water Index)
NIR	Blízké infračervené záření (Near-Infrared)
SDRAM	Synchronous dynamic random-access memory
SWIR	Krátkovlnné červené záření (Short-wavelength infrared)
TMA	Teleskop se třemi zrcadly (Three Mirror Anastigmat)

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Europe's Copernicus programme. *The European Space Agency* . [Online]
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Europe_s_Copernicus_programme.
2. Sentinel-1. *The European Space Agency*. [Online]
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>.
3. Mission Summary. *The European Space Agency* . [Online]
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview/mission-summary>.
4. SAR Instrument. *The European Space Agency*. [Online]
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/sar-instrument>.
5. What is Synthetic Aperture Radar? *NASA Earth Data* . [Online] 04 16, 2020.
<https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>.
6. Fundamentals of Remote Sensing. [Online] Canada Centre for Remote Sensing.
https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundamentals_e.pdf.
7. Sentinel 2 - Overview . *The European Space Agency*. [Online]
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>.
8. MultiSpectral Instrument (MSI) Overview. *Sentinel Online* . [Online] [Cited: 01 20, 2022.] <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>.
9. Martimort, P., Fernandez, V. and Meygret, A. *Sentinel-2 MultiSpectral imager (MSI) and calibration/validation*. s.l. : IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012. Computer Science.
10. What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)? . *GISGeography*. [Online] 2021. <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>.
11. *Optical and Physical Methods for Mapping Flooding with Satellite Imagery*. Fayne, Jessica, Bolten, John D and Lakshmi, Venkat. 11 2017, Remote Sensing of Hydrological Extremes. DOI:10.1007/978-3-319-43744-6_5.

12. *A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space*. Gao, Bo-Cai. 3, s.l. : Elsevier Science Inc, 1996, Remote Sensing of Environment, Vol. 58. ISSN 0034-4257,.
13. *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. McFeeters, S. K. s.l. : Informa UK Limited, 01 04, 1996, International Journal of Remote Sensing, pp. 1425-1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
14. Indices gallery. *Esri*. [Online] <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>.
15. Kawsar, R. Water resource management and Remote Sensing, a prospective issue that requires considerable attention. *Geo Awesomeness* . [Online] 8 28, 2015. <https://geoawesomeness.com/water-resource-managment-and-remote-sensing-a-prospective-issue-that-requires-considerable-attention/>.
16. *Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality*. Ritchie, Jerry C. 69 (6), 2003, Photogrammetric engineering and remote sensing. DOI:10.14358/PERS.69.6.695.
17. Verbyla, D. L. *Satellite remote sensing of natural resources*. Florida : CRC Press LLC, 1995. ISBN: 1-55670-107-4.
18. Copernicus Emergency Service. *Emergency Management Service*. [Online] <https://emergency.copernicus.eu/faq.html>.
19. Jeyaseelan, A.T. *Droughts and floods assessment and monitoring using remote sensing and GIS*. Govt. of India, Hyderabad : Crop Inventory and Drought Assessment Division National Remote Sensing Agency Department of Space, 2004. <http://www.wamis.org/agm/pubs/agm8/Paper-14.pdf>.
20. Soukup, Tomáš, et al. Aplikace dálkového průzkumu Země. *Česká informační agentura životního prostředí*. [Online] 2021. https://www.cenia.cz/wp-content/uploads/2022/02/DPZ_listy_final_dvojstran.pdf. 978-80-7674-027-3.
21. Kolář, J. *Informační služby s využitím pozorovacích družic: studie*. Praha : Czech Space Office, 2008.
22. Gangashe, Andani Theophenia. Assessing the impacts of flooding on vegetation cover in the Shashe-Limpopo confluence area using earth observation data. s.l. : Faculty of Science, University of the Witwatersrand.
23. Heubl, Ben. Lithium firms depleting vital water supplies in Chile, analysis suggests. *Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina*. [Online] 8 29, 2019.

<https://www.ocmal.org/lithium-firms-depleting-vital-water-supplies-in-chile-analysis-suggests/>.

24. Silk, Marty. Queensland flood damage bill set to top \$2.5 billion, according to early estimates. *7 News*. [Online] 03 07, 2022. <https://7news.com.au/news/qld/queensland-flood-damage-bill-set-to-top-25-billion-according-to-early-estimates-c-5957460>.

25. Patel, Kasha. Before and after images show record-breaking flooding in Australia. *The Washington Post*. [Online] 03 10, 2022. <https://www.washingtonpost.com/weather/2022/03/10/australia-flooding-sydney-brisbane-images-record/>.

26. Thomas-Peter, Hannah. Germany and Belgium floods: Victims pick up the pieces as Belgian village left devastated by deluge. *Sky News*. [Online] 07 16, 2021. <https://news.sky.com/story/germany-and-belgium-floods-victims-pick-up-the-pieces-as-belgian-village-left-devastated-by-deluge-12357338>.

27. Flooding in the Belgian city of Pepinster | AFP. *Youtube.com*. [Online] 07 16, 2021. https://www.youtube.com/watch?v=pvP_78_oNkY.

28. Hlásná a předpovědní povodňová služba ČHMÚ. *Český hydrometeorologický ústav*. [Online] https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/verejnost_povoden_definice.html.

29. J, Liu, Xu, Z and Chen, F. Flood Hazard Mapping and Assessment on the Angkor World Heritage Site, Cambodia. *Remote Sensing*. 2019, Vol. 11, 1.

30. Z, Musa, Popescu, I and Mynett, A. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015, Vol. 19, 9.

31. S., Ouled, et al. Flood extent mapping from timeseries SAR images based on texture analysis and data fusion. *Remote Sensing*. 02 04, 2018, Vol. 10, 2.

32. Mission Status Report 401. *Sentinel Online*. [Online] 2022. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4742744/Sentinel-1-Mission_Status_Report_401-Period-5-11_Apr_2022.pdf.

33. SAR Data Brochure. *Iceye*. [Online] https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/SAR_Data_Brochure_ICEYE.pdf.

34. *Aerial and Satellite Images in Crisis Management*. Svatoňová, Hana. Brno : IEEE, 2015. International Conference on Military Technologies.

35. *Early Warning and Crisis Management Cartographic and Geographic Information Research Agenda*. Konečný, Milan. s.l. : 4th International Conference on Cartography and GIS, Vol. 2, 2012.

36. COPERNICUS: Market Report - February 2019. *The European Commission*.

[Online] 02 2019.

https://www.copernicus.eu/sites/default/files/PwC_Copernicus_Market_Report_2019.pdf. 978-92-79-98973-5.

37. Lavender, S., Lavender A. *Practical Handbook of Remote Sensing*. s.l. : CRC Press, 2016. 978-1498704335.

38. Tempfli K., Huurneman G.C., Bakker, W.H., Janssen, L.L.F., et al. *Principles of Remote Sensing I*. [ed.] ITC Educational Textbook Series. s.l. : University of Twente, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009. Vol. 2. 978-90-6164-270-1.

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

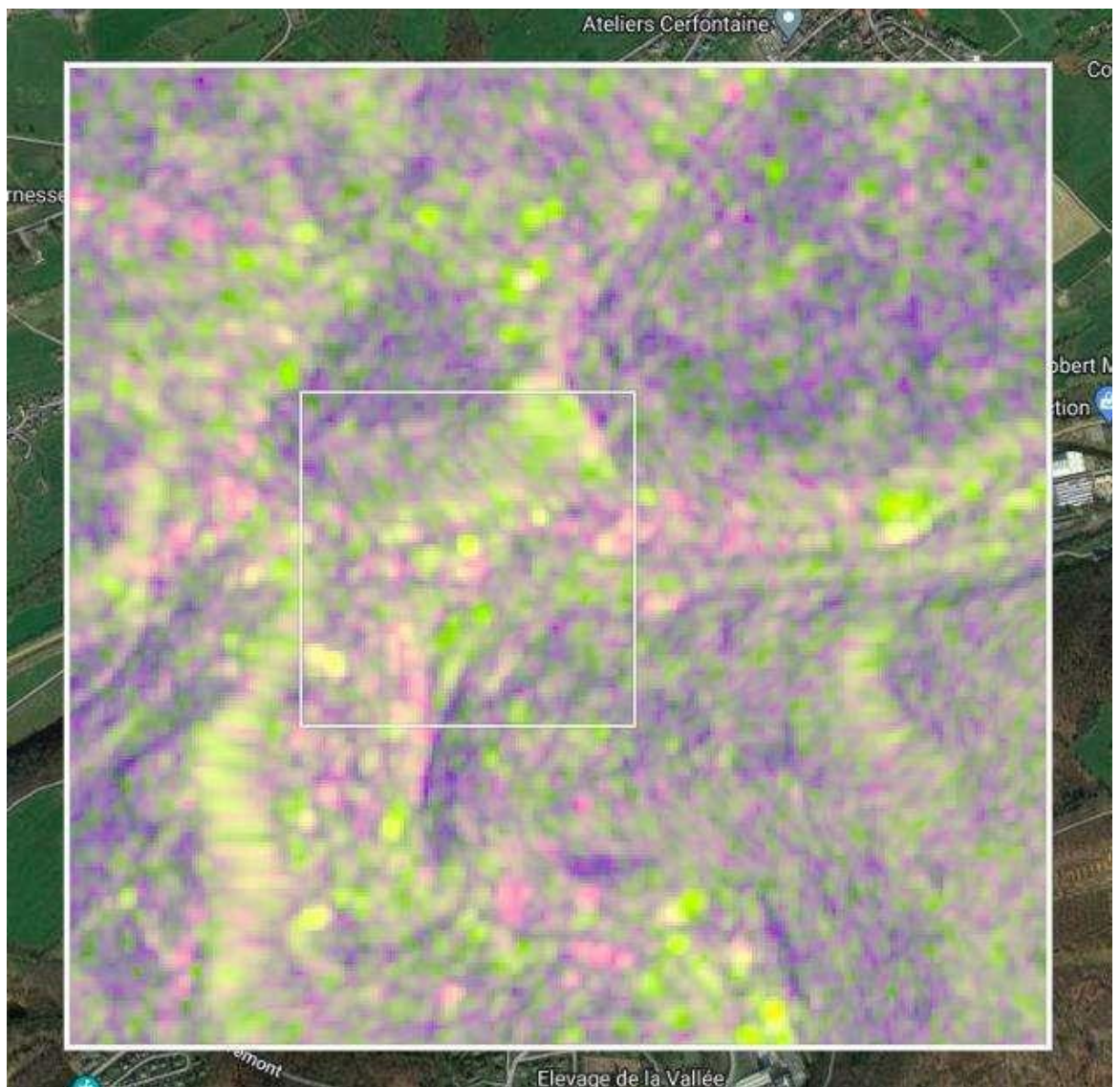
Obrázek 1 Princip radarového snímání (6)	12
Obrázek 2 Vlnové délky (přeloženo autorkou) (5)	13
Obrázek 3 Spektrální pásma družice Sentinel-2. Aerosols – aerosoly; water-vapour – pára; vegetation red-edge – okraj červené části spektra u vegetace; cirrus – cirrus (oblak); snow/ice/cloud discriminatino – rozlišování sněhu/ledu/mraku (9)	15
Obrázek 4 Lithiový důl s lagunami (Google Maps, upraveno v programu Qgis).....	23
Obrázek 5 Laguny - leden 2019	24
Obrázek 6 Laguny, NDWI a SAR – leden 2019	24
Obrázek 7 Laguny - únor 2019	25
Obrázek 8 Roční srovnání - Laguny – NDMI. Vlastní zpracování.....	26
Obrázek 9 Laguny, NDWI a SAR – únor 2019	26
Obrázek 10 Roční srovnání - laguny – NDWI. Vlastní zpracování.....	27
Obrázek 11 Laguny, NDVI – leden a únor 2019	28
Obrázek 12 Brisbane celkový pohled, červeně vyznačená oblast leteckého snímku , před povodní	29
Obrázek 13 Brisbane - letecký snímek, před povodní	29
Obrázek 14 Brisbane únor 2022.....	30
Obrázek 15 Brisbane, NDWI a SAR – únor 2022	30
Obrázek 16 Brisbane - letecký snímek, po povodni	31
Obrázek 17 Brisbane, březen 2022	31
Obrázek 18 Roční srovnání - Brisbane – NDMI. Vlastní zpracování.....	32
Obrázek 19 Brisbane, NDWI a SAR – březen 2022	32
Obrázek 20 Roční srovnání - Brisbane – NDWI. Vlastní zpracování	33
Obrázek 21 Brisbane, NDVI – únor a březen 2022	33
Obrázek 22 Obec Pepinster	34
Obrázek 23 Pepinster, červen 2021	34
Obrázek 24 Pepinster, NDWI a SAR – červen 2021	35
Obrázek 26 Pepinster, červenec 2021	36
Obrázek 27 Roční srovnání - Pepinster – NDMI. Vlastní zpracování.....	36
Obrázek 28 Pepinster, NDWI a SAR – červenec 2021	37
Obrázek 29 Roční srovnání - Pepinster – NDWI. Vlastní zpracování.....	37
Obrázek 30 Pepinster, NDVI – červen a červenec 2021	38
Obrázek 25 Pepinster během povodní (26).....	35

11 SEZNAM PŘÍLOH

11.1 Příloha 1

Radarový snímek – oblast východní Belgie – Pepinster.

- Lokalita před povodní z 15 června 2021:



- Lokalita během povodní ze 16 července 2021:

