

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Linda Vyvialová

**ZMĚNY KRAJINNÉHO POKRYVU NAD HORNÍ HRANICÍ  
LESA V KRKONOŠSKÉM NÁRODNÍM PARKU NA  
ZÁKLADĚ LANDSAT DAT**

**CHANGES OF LAND COVER ABOVE THE TREE LINE IN  
KRKONOŠE NATIONAL PARK BASED ON LANDSAT DATA**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Lucie Červená  
Konzultantka práce: RNDr. Lucie Kupková, Ph.D.

Ostrava, 2017

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Ostravě, dne 14. listopadu 2017

.....  
Linda Vyvialová

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí mé práce Mgr. Lucii Červené za věnovaný čas, cenné připomínky a rady. Dále děkuji konzultantce RNDr. Lucii Kupkové, Ph.D za uvedení do problematiky. Velký dík patří též mé rodině za vytrvalou podporu nejen po dobu zpracovávání mé práce.

## ZMĚNY KRAJINNÉHO POKRYVU NAD HORNÍ HRANICÍ LESA V KRKONOŠSKÉM NÁRODNÍM PARKU NA ZÁKLADĚ LANDSAT DAT

### Abstrakt

Tato studie hodnotí změny krajinného pokryvu se zaměřením na porosty borovice kleče (*Pinus mugo*) v oblasti nad horní hranicí lesa Krkonošského národního parku. Na základě dat Landsat byly dvěma metodami hodnoceny změny ve čtyřech časových horizontech od 80. let až do současnosti (roky 1984, 1992, 2002 a 2013). První metodou byla klasifikace jednotlivých scén klasifikátorem Maximum Likelihood a hodnocení změn na základě jejich překryvů. Celkové přesnosti klasifikací scén od nejstarší po současnost byly 86,04 %, 88,44 %, 86,91 % a 86,43 %. Druhá metoda hodnotí detekci změn nad jedním datasetem, skládajícím se ze scén pro všechny časové horizonty. Celkové přesnosti od nejstarších vyšly 86,63 %, 88,64 % a 86,11 %. Druhá metoda byla pro tuto studii změn krajinného pokryvu vhodnější. Na výsledných mapách je vidět proředování kleče (mezi roky 2002 a 2013, 1984 a 1992) i její přirozené zahušťování a rozrůstání.

### Klíčová slova

KRNAP, tundra, krajinný pokryv, change detection, Landsat

## CHANGES OF LAND COVER ABOVE THE TREE LINE IN KRKONOŠE NATIONAL PARK BASED ON LANDSAT DATA

### Abstract

This study evaluates land cover changes in the area above the tree line in Krkonoše Mts. National Park. The stress is put on the changes of *Pinus mugo* shrub. Two methods of change detection based on Landsat data in four time horizons from the eighties up to now were tested (years 1984, 1992, 2002 and 2013). The first method was classification of scenes with the Maximum Likelihood Classifier individually and evaluation of changes based on their overlay. Overall accuracies from the oldest scene were 86,04 %, 88,44 %, 86,91 % and 86,43 %. The second method evaluates detection of change above one dataset that consists of scenes for all the time horizons. Overall accuracies were from the oldest 86.63 %, 88.64 % and 86.11 %. The second method was more appropriate for this study of land cover changes. On the map results there can be seen thinning of *Pinus mugo* scrub (between the years 2002 and 2013, 1984 and 1992) as well as its natural thickening and spreading.

### Key words

KRNAP, tundra, land cover, change detection, Landsat

## Obsah

Seznam obrázků, grafů a tabulek.....	6
Seznam použitých zkratek .....	8
1 Úvod a cíle práce .....	9
2. Literární rešerše a úvod do problematiky .....	10
2.1. Tundra a kleč v Krkonoších .....	10
2.1.1. Základní informace.....	10
2.1.2. Historie vlivu člověka na klečové porosty v Krkonoších.....	12
2.2. Hodnocení změn land use a land cover v tundře .....	16
2.2.1. Metoda Change detection .....	16
2.2.2. Studie tundry všeobecně a v Krkonoších .....	18
3. Zájmové území .....	19
4. Data.....	20
4.1. Data Landsat .....	20
4.2. Surface Reflectance Data .....	21
4.3. Ortofota ČÚZK .....	22
5. Metodika práce .....	23
5.1. Masky oblačnosti .....	23
5.2. Metoda Maximum Likelihood .....	26
5.2.1. Legenda .....	26
5.2.2. Sběr trénovacích a validačních dat.....	27
5.2.3. Rozdělení pixelů na trénovací a validační.....	30
5.2.4. Získání rozdílů mezi roky pomocí metody Maximum Likelihood .....	32
5.3. Metoda Change Detection.....	33
5.4. Získání rozloh kategorií .....	36
6. Výsledky .....	37
6.1. Hodnocení přesnosti klasifikace .....	37
6.2. Změny v rozlohách.....	39
7. Diskuze .....	45
8. Závěr .....	48
Použitá literatura.....	50
Seznam příloh .....	53

## Seznam obrázků, grafů a tabulek

### Obrázky

Obrázek č. 1: Satelity Landsat a jejich životnost. Zdroj: U.S. Geological Survey, 2016. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>

Obrázek č. 2: Vymezení oblačnosti snímku – barevné kompozity a ROI Tool (zobrazen snímek Landsat Surface Reflectance pro rok 2013)

Obrázek č. 3: Tvorba masky oblačnosti v programu ArcMap – postupné výstupy funkce Erase a Build Mask (pro západní část zájmového území, rok 2013)

Obrázek č. 4: Rozmístění trénovacích a validačních pixelů povrchů travnatých (tvar pixelů je naznačen zelenou sítí čtverců)

Obrázek č. 5: Úbytek křeče na ortofotech z let 2002, 2004 a 2014

Obrázek č. 6: Rozmístění trénovacích a validačních pixelů povrchů travnatých (tvar pixelů je naznačen zelenou sítí čtverců)

### Grafy

Graf č. 1: Graf rozlohy získaný metodou Maximum Likelihood pro jednotlivé snímky (řazení dle roku)

Graf č. 2: Grafy rozlohy získané metodou Maximum Likelihood pro jednotlivé snímky (řazení dle kategorií povrchu)

Graf č. 3: Graf rozlohy získaný metodou Change detection (řazení dle roku)

Graf č. 4: Grafy rozlohy získané metodou Change detection (řazení dle kategorií povrchu)

### Tabulky

Tabulka č. 1: Snímky použité pro klasifikaci

Tabulka č. 2: Barevné syntézy nejčastěji používané pro odstraňování oblačnosti

Tabulka č. 3: Přehled snímků a kombinací snímků s výskytem oblačnosti

Tabulka č. 4: Využití barevné syntézy pro sběr pixelů pro roky 2002, 1992 a 1984

Tabulka č. 5: Počty nasbíraných pixelů pro všechny snímky ( $p$  – počet pixelů,  $pt$  – počet trénovacích pixelů,  $p_v$  – počet validačních pixelů)

Tabulka č. 6: Počty trénovacích ( $pt$ ) a validačních ( $p_v$ ) pixelů nasbíraných pro klasifikace Change detection

*Tabulka č. 7: Přesnosti klasifikace Maximum Likelihood pro jednotlivé snímky*

*Tabulka č. 8: Přesnosti klasifikace Change detection*

*Tabulky č. 9: Rozlohy přepočítané pro 6 kategorií klasifikace Maximum Likelihood a Change detection*

*Tabulka č. 10: Přepočítané rozlohy Change detection a MLC pro všechny hodnocené kategorie + kategorie Oblačnost a stíny*

## Seznam použitých zkratk

ČÚZK	<i>Český úřad zeměměřický a katastrální</i>
GIS	<i>Geografický informační systém</i>
KRNAP	<i>Krkonošský národní park</i>
WMS	<i>Web Map Service</i>
LULC	<i>Land Use and Land Cover</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
ERTS-1	<i>Earth Resources Technology Satellite</i>
CCDC algoritmus	<i>Continuous Change Detection and Classification</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OA	<i>Overall Accuracy</i>
UA	<i>User's Accuracy</i>
PA	<i>Producer's Accuracy</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
MLC	<i>Maximum Likelihood Classification</i>
NDVI index	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>



## 1 Úvod a cíle práce

Oblast nad horní hranicí lesa Krkonošského národního parku je předmětem zájmu několika skupin či organizací s odlišnými názory na způsob, jakým by se měla vyvíjet. Tyto názory byly také v historickém měřítku obměňovány se změnami zájmů tamějších obyvatel a turistů i se změnami politických režimů (Lokvenc 2001).

Zaměření této práce bude spadat převážně do oblasti managementu klečových porostů (*Pinus mugo*), které pokrývají významnou část studované oblasti.

Hlavním cílem bylo zhodnotit změny krajinného povrchu nad horní hranicí lesa v Krkonošském národním parku pomocí snímků ze satelitů Landsat. Vzhledem k prostorovému rozlišení dat bude pozornost zaměřena na změny ve vývoji porostů kleče, které jsou ze snímků identifikovatelné, a jejich vývoj i částečně zdokumentovaný. V nedávné minulosti byly prováděny cílené úpravy klečových porostů za účelem zachování biodiverzity, dřívější generace pak kleč upravovaly např. kvůli retenci vody (Harčarik, 2013, Harčarik a Jiříšně, 2006).

K vyhodnocení změn krajinného pokryvu budou využity dva základní přístupy: klasifikace Maximum Likelihood pro každý snímek a metoda Change detection – klasifikace změn nad snímky současně, a jejich výstupy budou porovnány.

Předpokládá se, že metodou Change detection budou získány přesnější výsledky.

## **2. Literární rešerše a úvod do problematiky**

### **2.1. Tundra a kleč v Krkonoších**

#### **2.1.1. Základní informace**

Krkonošská arкто-alpínská tundra je ve střední Evropě jedinečným prostředím. Na české i polské straně pokrývá nad hranicí lesa asi 47 km<sup>2</sup>. Jedním z možných dělení je na zóny tundry lišejníkové (kryo-eolické), travnaté (kryo-vegetační) a květnaté (Kociánová a kol. 2015, Štursa 1966).

Do kryo-eolické zóny jsou zahrnuty nejvyšší vrcholy Krkonoš. Neustálým vlivem mrazu a větru se zde vyvinuly tzv. kryoplanační terasy, rozlehlá kamenná moře a různé mrazové a soliflukční půdní formy (polygony, brázdy, pruhy, soliflukční valy). Průměrná roční teplota se zde pohybuje okolo + 1°C, sněhová pokrývka je nízká a udrží se zde jen několik měsíců. Z vegetace zde přežívají severské a alpínské mechorosty a lišejníky, zástupci fauny jsou členovci (z hmyzu střevláci, motýli, dvoukřídlí) (Kociánová a kol. 2015).

V nižších nadmořských výškách je zóna kryo-eolické tundry nahrazena zónou tundry travnaté (kryo-vegetační). Její typickou mozaikovitou skladbu tvořenou alpínskými trávničky s převahou smilky tuhé, kleče a rašelinišť lze pozorovat v okolí Luční a Labské boudy. Je zde méně větrno, svahy jsou mírné. Typické je velké množství sněhových a dešťových srážek (asi 1200 mm/rok). Sněhová pokrývka s výškou asi 180 cm zde leží přes půl roku, průměrná roční teplota je asi + 1,6 °C (Kociánová a kol. 2015). Tato zóna tundry byla v minulosti nejvíce ovlivňována zásahy budního hospodaření, a poté výsadbami kleče (Lokvenc 2001).

V závětrných částech anemo-orografických systémů, v hlubokých ledovcových karech, jsou hlavními činiteli ovlivňujícími prostředí sníh a led. Proto je toto prostředí nazýváno niveo-glacigenní zónou krkonošské tundry. Na obnažených skalních stěnách lze pozorovat účinky mrazového zvětrávání, časté jsou zde padající laviny. Nicméně právě lavinami způsobené zmlazování vegetace je faktorem, díky kterému zde lze pozorovat neobyčejně pestré mozaiky ekosystémů. Tato výjimečná druhová diverzita byla

pozorována již v minulosti, kdy dala vzniknout názvů jako jsou Krakonošova či Čertova zahrádka. Hovoří se proto také o zóně tundry květnaté (Kociánová a kol. 2015).

Kvůli klimatickým změnám dochází v prostředí krkonošské tundry k postupným proměnám. Nejviditelnější se zdá být postupné posouvání horní hranice lesa. Ta v Krkonoších kolísá mezi 1200 a 1350 m n. m. (Kociánová et al. 2015). Přirůstají solitéry smrkových skupin nad touto hranicí, lze pozorovat nástup nitrofilních druhů bylin i pozměněné chování některých představitelů zdejší fauny (Flousek 2009; Harčarik 2009; Banaš a kol. 2011, 2012).

Borovice kleč (*Pinus mugo Turra*) je původní dřevinou v supramontánním až alpínském stupni Krkonoš. Nadmořské výšky, ve kterých se klečové porosty přirozeně v Krkonoších vyskytují, se pohybují mezi 1200 až 1550 m n. m. Přirozeně se ale vyskytuje také na rašeliništích Jizerských hor a v supramontánním stupni části šumavských vrcholů. (Holubičková 1980) upozorňuje na proměnlivost kleče v závislosti na podmínkách místa jejího výskytu. Rozdíly způsobené rozdílnými stanovištními podmínkami zahrnují hlavně tvar šišek a vzrůst keřů.

Borovice kleč je dlouhověkou dřevinou a není jednoduché určit její přesné stáří. Větve a starší části kmenů zakořeňují v místech, kde došlo k jejich poškození (např. kvůli lavinám, kamenům, pohybu zvěře nebo lidí), a protože generativní rozmnožování je omezeného rozsahu, toto vegetativní rozmnožování je hlavním mechanismem populační dynamiky kleče (Štursa 1966)

Vzniká tak velmi složitá struktura dceřiných větví a vegetativně vzniklých keříků. Kleč při okrajích mateřského kmene zmlazuje (Štursa 1966), zatímco dřevo původní části kmene podlehne přirozenému rozkladu, čímž znemožňuje přesné identifikace jeho stáří pomocí letokruhů.

Kyncl a Wild (2004) určili obvyklé stáří krkonošské kleče na 150-250 let při průměrné šířce letokruhu 0,155 mm. Nejstarší dochované kmeny byly ojediněle datovány až na 300-350 let.

### 2.1.2. Historie vlivu člověka na klečové porosty v Krkonoších

Vývoj vrcholových částí Krkonoš zůstal člověkem až do 16. století víceméně neovlivněn. Výjimkou je oblast okolo dvou obchodních zemských stezek (Slezské a České), které protínaly hřebeny Krkonoš již ve středověku. Koncem 16. a v 17. století jsou datovány nejstarší boudy v krkonošských horních partiích – bouda Luční a Hamplova u stezky Slezské, boudy Stará Slezská a Dvoračky u stezky České. Jejich existence s sebou přinesla změny jako jsou zásahy do přirozené hranice lesa, odstraňování klečových porostů zvětšování alpského bezlesí a, s nástupem éry budního hospodářství v první polovině 17. a v 18. století, rozšiřování pastvin. Éra budního hospodářství znamenala též stále se zvyšující počet bud ve vrcholových partiích Krkonoš, propojených sítí horských cest (Musil 1981, Lokvenc 2007).

Nad 1100 m n. m. je v 18. století dokumentováno téměř 40 bud. V tomto období dosáhly odlesňovací práce svého vrcholu (Vítková a kol. 2012). Informace o přesném stavu porostů však nejsou charakteru vědeckého, nýbrž spíše romantického, často umělecky zabarveného. Dokumentována je volná, později regulovaná pastva koz a koní, kvůli níž bylo běžné zřizování tzv. travních zahrad okolo horských bud (Lokvenc 1978).

Filip Parenus, který navštěvoval Krkonoše v letech 1564 až 1566, líčí při svých cestách Krkonošemi kleč jako „...*po zemi se plazící stromy, jejichž větve se zvedají do výšky lidských kolen, proto se prý jmenují kleč...*“ (Zuman 1931). Vítězslav Hálek psal o tři století později, roku 1874, o kleči na Labské louce: „*Nuž a jako ta travina malá, zakrslá, jako nedošlá, tak jsou i lesiny těchto výšin. Zmínil jsem se již, že tu výhradně samá kleč, plazivá, spletená, nízká, neproniklá. Ta černavou barvou svého jehličí v nesčíslných ostrovech příšerně se odráží od té bronzové žluti luční. Každý takový ostrov s klečí asi o dvě stopy vyzvedne se nad plochu luční a těchto do černa vyzvednutých ploch naseto tu jako příšer do všech konců a do všech stran. Tato pletiva klečí mohla by býti výborným úkrytem zvěři i člověka.*“

Pro získávání starších informací o krajinném pokryvu jsou vhodnější díla obrazová (Mattis, Richter, Knippel, Tittel) či první kartografické podklady.

V druhé polovině 18. století s narůstajícím turismem docházelo k rozšiřování aktivit majitelů bud. Výnosným například bylo prodávat tzv. „klečové zboží“, tedy výrobky z klečových porostů (Lokvenc 2001). Pokračovalo také prořezávání kleče kvůli vytvoření vhodných podmínek pro pastvu.

Koncem 19. století byly Krkonoše postiženy řadou povodní a sesuvů půd (Bartoš 1997; Lokvenc 1978). Za příčinu bylo v té době považováno výrazné zmenšení krkonošských lesních ploch. Proto se staly začátkem éry zalesňování, tedy rekonstrukce lesních porostů, a zároveň rekonstrukce porostů kleče.

Počátky zalesňování v 19. století jsou označovány podle hraběte Jana Harracha, v průběhu 20. století však ještě zintenzivnily realizaci několika desetiletých plánů Generelu vysokohorského zalesňování Krkonoš (Lokvenc a kol., 1994).

Rozsah pastvy nad horní hranicí lesa byl výrazně snížen po první světové válce, její pozůstatky mohly být výjimečně pozorovány ještě v 50. letech 20. století (Lokvenc a kol., 1994).

V tomto období byly také opuštěny mnohé boudy a po druhé světové válce již vrcholové oblasti Krkonoš nebyly zemědělsky využívány (Lokvenc 1983). V letech 1946–1949 byla zbudována lanovka na Sněžku, což bylo spojeno s výrazným zásahem do klečových porostů. Také v 50. letech byly kleče káceny, a to na česko-polské hranici (Vítková et al. 2012).

Ne vždy vhodné či promyšlené výsadby kleče mezi lety 1952–1992 byly později kritizovány. Harčarik (2007) zpracoval managementový plán, který navrhuje prořezání kleče na přírodovědně hodnotných lokalitách. Tímto by mělo být zabráněno poškozování vzácných geomorfologických fenoménů a měla by tím být chráněna zdejší biodiverzita. V Harčarikově managementovém plánu jsou navrhovány také tzv. pozitivní arondace kleče čili výsadby klečových porostů, obzvláště v oblastech, kde přechody kleče v travinné porosty tvoří nepřirozeně rovné okraje. Tyto pozitivní arondace jsou navrženy také okolo cest, kde by tím mělo být částečně bráněno šíření nepůvodních rostlinných druhů (důsledek turistického ruchu a splavování živin z cest).

### 2.1.3. Ohrožení krkonošské kleče

Přirozené rychlé odumírání klečových porostů bývá způsobeno občasnými většími přírodními disturbancemi typu lavin, silných větrných turbulencí či drobných požárů způsobených blesky (Lokvenc 1978).

Z 19. a 20. století jsou také dochovány záznamy o opakovaném přemnožení škůdců, především bejlomorky borové (*Thecodiplosi brachyntera*) a hřebenule ryšavé (*Neodoprion sertifer*), čímž docházelo k poškození klečových porostů žírem (Kudler a Veber 1965).

Ačkoliv samotný žír většinou nezpůsobuje dostatečné poškození keřů pro jejich odumření, ve 40. a 50. letech 20. století došlo k výraznému odumírání klečových porostů kvůli kombinaci žíru s extrémními klimatickými podmínkami. Totéž lze dokladovat v 70. až 90. letech 20. století kvůli imisnímu ohrožení (Lokvenc a Štursa 1985). Nedošlo však k postihu velkých ploch, pouze k proředění mladších výsadeb náhorních plošin.

K ohrožení kleče však dochází i z čistě antropogenních příčin. Jedním z nejdiskutovanějších témat je zpevnování krkonošských cest nepůvodním bazickým materiálem (dolomit, melafyr). K tomuto došlo v 70. a 80. letech 20. století. To bylo příčinou změn fyzikálně-chemických poměrů v okolní půdě, a následného výskytu synantropních druhů rostlin. Studie o nevhodně použitých materiálech vznikaly již v 70. letech (Soják et al. 1976). Roku 1996 byla zahájena rekonstrukce cest tvořených nevhodným bazickým materiálem a jeho nahrazování vhodnějším substrátem (Vítková a kol. 2012)

V okolí cest, na odpočinkových místech, vyhlídkách apod. se také hovoří o problému sešlapu. Souvisí s ním nástup rostlinných druhů nižšího vzrůstu s větší tolerancí vůči stresu (Vítková a kol. 2012).

Dalším problémem vedoucím k výskytu nepůvodních druhů rostlin je nevhodné ukládání odpadu. Na toto počínání poukazuje např. (Štursa 1964) a (Bradáčová 2001). Přestože je toto ukládání odpadu v současné době zakázáno, nánosy popela a komunálního odpadu lze nalézt např. po stranách koryta Bílého Labe u Luční boudy. Aktuální je též

problém s likvidací nejen tekutých odpadů z horských bud. (Bradáčová 2001) poukazuje dále na problémy s bazickým odpadem hromaděným při již zmíněné stavbě cest.

Samotná hustota cestní sítě je dalším příkladem ovlivnění tundry antropogenními vlivy. Turistické cesty na hřebenech Krkonoš neprošly výraznějšími změnami od 80. let 20. století, kdy bylo několik z nich zrušeno (Vítková a kol., 2012, 1999). Fragmentace krajiny cestní sítí byla tedy větší v první polovině 20. století (55 fragmentů), v současnosti se jedná pouze o 16 fragmentů, které se sice vyznačují větší stabilitou, avšak kvůli větší šířce, zvýšenému provozu i nevhodnému povrchu cest jsou také více izolovány (Vítková a kol. 2012).

Kvůli již dříve zmiňovaným nepůvodním či nevhodně rozmístěným výsadbám kleče, byly v posledních desetiletích prováděny zásahy do krajiny, jejichž cílem je povětšinou proředění těchto výsadeb. První takovýto zásah byl proveden v 90. letech na svazích Studniční hory. Vysazená kleč zde byla proředěna kvůli jejímu rozrůstání do míst s cennou vegetací a strukturními půdami. Systematicky však začaly prořezovací práce až od roku 2005, a to na modelové lokalitě Labská louka (Harčarik a Jiříšně 2006).

## 2.2. Hodnocení změn land use a land cover v tundře

### 2.2.1. Metoda Change detection

Metoda *Change detection* může být definovaná jako proces identifikace rozdílů ve stavu objektu nebo fenoménu pomocí jeho pozorování v různých časech. Obvykle to odkazuje na změny zemského povrchu ve dvou a více časech (Abhishek, 2012).

Používá se pro pozorování změn využití půdy, fragmentace habitatů, rychlosti deforestation, pobřežní změny, urbanizace a jiných kumulativních změn.

Abhishek (2012) dělí metody *Change detection* (celkem 30) do sedmi kategorií dle přístupu k detekci změn, které nazval Přístup založený na algebře, Transformační přístup, Přístup klasifikační, Přístup založený na pokročilých modelech, Přístup GIS, Vizuální analýza a Další metody.

Přístup založený na algebře zahrnuje podle Abhisheka (2012) metody Porovnávání obrazů (*Image differencing*), Regresní závislosti dvou obrazů (*Image regression*), Podílů obrazů (*Image ratioing*), a Analýzu vektorů spektrální změny (*Change vector Analysis*, CVA) a metodu Rozdílů vegetačních indexů (*Vegetation index differencing*).

Společnou charakteristikou je výběr prahových hodnot (*thresholds*) pro určení území, na kterých došlo ke změně. Je zde důležité vybrat vhodná pásma a stanovit vhodné prahové hodnoty, tedy minimální rozdíl hodnot, od kterého je pixel považován za změněný. Jde o velmi jednoduchou metodu, ale kvůli práci s absolutními hodnotami mohou mít pixely, identifikované jako změna, rozdílné významy, i když mají stejné hodnoty.

1. Metoda *Image Differencing* (Porovnávání obrazů), jak uvádí Abhishek (2012), pracuje na principu rozdílů hodnot pixelů mezi dvěma snímky (Datum 1 – Datum 2). Ideálně by pak měl nezměněný pixel vykazovat hodnotu 0, a je třeba stanovit prahovou hodnotu, od níž je pixel hodnocen jako změněný.
2. Metoda *Image Regression* (Regresní závislost dvou obrazů) snižuje vliv atmosférických, senzorových a environmentálních rozdílů v datech na výsledek, závisí však na přesné regresní funkci (Abhishek, 2012).



3. Metoda *Image Rationing* (Podíly obrazů) hodnoty pixelů dělí (Datum 1 / Datum 2), a proto zde ideální nezměněné pixely budou mít hodnotu 1. Stejně jako u metody porovnávání obrazů je třeba dobře zvolit prahovou hodnotu. Metoda je vhodná pro eliminaci úhlu dopadu slunečního záření. Problémem může být, že stejná změna povrchu mění hodnotu podle hodnoceného „směru“ (tedy  $50/100=0,5$  a  $100/50=2,0$ ) (Abishek, 2012).
4. Metoda *Change vector analysis* (Analýza vektorů spektrální změny, CVA) pracuje na principu zobrazení vektorů spektrální změny pixelu v n-dimenzionálním prostoru. Pixel, který se nezměnil, má tedy ideálně vektor nulové délky. Opět je třeba zvolit prahovou hodnotu – minimální délku vektoru indikující změnu. Pro interpretaci změn je možno využít i směry vektorů.
5. *Vegetation Index differencing* (Rozdíly vegetačních indexů) je metoda, při které jsou nejdříve spočítány vegetační indexy obrazů, a poté z nich spočítán rozdíl. Dochází k oslabení nežádoucích topografických efektů a iluminace.

Abhishek dále uvádí možnost data před klasifikací transformovat. Jednou z nejužívanějších metod transformace je Analýza hlavních komponent (*Principal Component Analysis*, PCA), která redukuje nadbytečnost dat.

(Alqurashi a Kumar 2013) ve své studii hodnotí a porovnávají jedenáct různých způsobů detekce změn LULC (*Land Use and Land Cover*), jak metod dálkového průzkumu, tak technik GIS.

Nový přístup k hodnocení LULC přináší Zhu a Woodcock (2014). Jsou autory studie, která popisuje nový algoritmus pro nepřetržitou detekci změn a klasifikaci povrchu (land cover) pomocí všech dostupných snímků Landsat. Tento CCDC algoritmus (*Continuous Change Detection and Classification*) je schopen produkovat mapy zemského povrchu pro kteroukoliv dobu hodnoceného časového úseku. Nejprve jsou algoritmem eliminovány plochy oblaků, jejich stínů a sněhu. Pro klasifikaci jsou použita všechna pásma Landsat (celkem 7). Pro pixely jsou ve všech pásmech stanoveny prahové hodnoty (*thresholds*). Pokud dojde k jejich překročení alespoň třikrát za sebou, je pixel vyhodnocen jako změněný povrch. Klasifikace povrchu je provedena až po vyhodnocení změn.

### 2.2.2. Studie tundry všeobecně a v Krkonoších

Klasifikací krkonošské tundry pomocí dat APEX, AISA Dual a Sentinel-2A se zabývala (Kupková a kol. 2017). Cílem studie bylo zhodnotit a porovnat vhodnost leteckých hyperspektrálních dat (AISA Dual a APEX senzory) a dat Sentinel-2A pro klasifikaci tundry v Krkonošském Národním Parku. Byly srovnány výsledky klasifikací (přesnost, mapy) pixelových (Maximum Likelihood, Support Vector Machine a Neural Net) a objektových přístupů. Nejlepší výsledky klasifikace (OA 84,3 %, Kappa koeficient = 0,81) byly získány pro data AISA Dual pixelovým SVM klasifikátorem, nejlepší výsledky klasifikace APEX vykazovaly přesnost 82,6 %. Výsledky přesnosti klasifikace pro data Sentinel-2A klasifikátorem MLC vyšly po zjednodušení legendy na 77,7 %.

Bernhäuserová (2016) se zabývala změnami rozlohy klečových porostů v Krkonoších. Na několika územích nad horní hranicí lesa prováděla manuální vektorizaci klečových porostů podle ortofot z let 1958/1964 a 2012. Kromě rozlohy klečových porostů se také zabývala schopností a rychlostí jejich expanze. Byla zkoumána závislost mezi rychlostí expanze a nadmořskou výškou. Z výsledků se však tato závislost nepotvrdila. Větší význam měla pro expanzi kleče délka okraje klečových porostů, které jsou v iniciálním stádiu vývoje.

Karvánek (2014) zpracovával změny zemského povrchu pro celé území KRNAP mezi lety 1999 a 2007. Pomocí dat družice SPOT prováděl řízenou klasifikaci Maximum Likelihood pro 8 kategorií, a následně překryv snímků. Celkovou přesnost klasifikace získal pro snímky z roku 1999 81,50 % a pro snímky z roku 2007 83,25 %.

Klasifikacemi biotopů v Krkonošském národním parku se zabývala také (Jakešová 2014). Pro území nad horní hranicí lesa rozlišovala pomocí dvou typů objektově-orientované klasifikace (Example-based a Rule-based) 13 tříd povrchu. Nejlépe zde vyšel výsledek klasifikace Example-based s celkovou přesností klasifikace 75,97 %.

Ze zahraničních studií se klasifikací tundry zabýval např. Stow a kol. (2004).

### 3. Zájmové území

Zájmové území se skládá ze dvou oblastí, ležících nad horní hranicí lesa v Krkonošském národním parku. Při dalším popisu budou označovány jako část západní a část východní. O klimatu a vegetačním pokryvu již bylo hovořeno výše, proto zde bude zmíněno pouze několik faktů z místopisu.

V západní oblasti jsou nejvyššími vrcholy Vysoké kolo (1509 m n. m.) a Violík (1472 m n. m.). Nachází se zde známý pramen Labe i prameny dalších řek, za zmínku stojí Labská louka a Labská bouda.

Nejvyšším vrcholem východní krkonošské tundry je Sněžka (1603,2 m n. m.), v rámci zájmové oblasti poté ještě Luční hora s nadmořskou výškou 1556 m n. m. a hora Studniční (1555 m n. m.). Také se zde nachází Luční bouda s Bílou loukou a několik rozlehlých mokřadů a rašelinišť.

## 4. Data

Práce byla zpracována pomocí dat pořízených družicemi Landsat, která prošla korekcemi potřebnými pro porovnávání družicových snímků z různých let. Jedná se o data Landsat Surface Reflectance. Pro tuto studii byly vybrány snímky z let 2013, 2002, 1992 a 1984.

Jako referenční materiál byla dále využita ortofota poskytována Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním (dále jen ČÚZK).

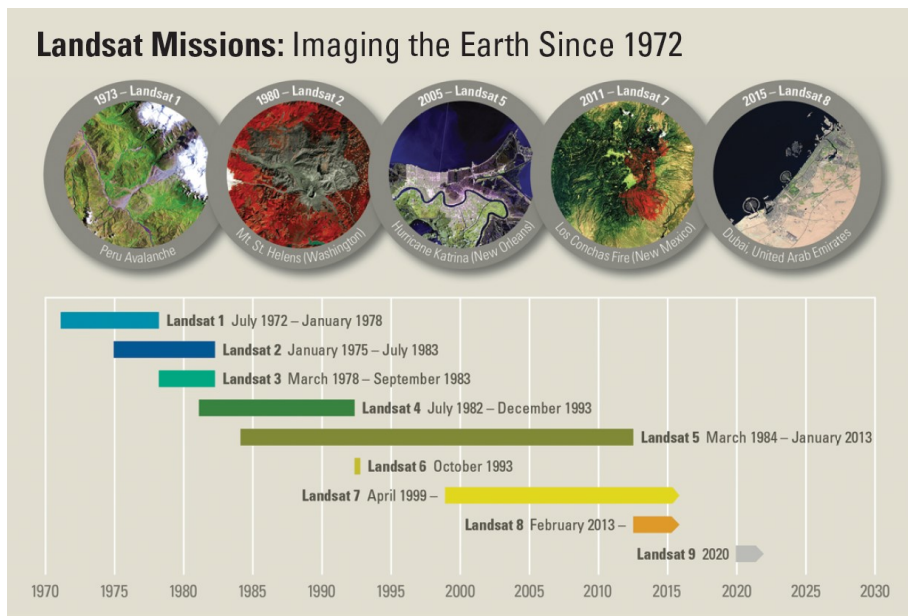
### 4.1. Data Landsat

Mise Landsat představuje jedinečnou, od roku 1972 nepřerušenu řadu dálkových snímků Země, které jsou dále aplikovány v mnoha oblastech včetně lesnictví, zemědělství, geologie, ale také regionálního plánování a vzdělávání. Mise vznikla spoluprací organizací *United States Geological Survey* (USGS) a *National Aeronautics and Space Administration* (Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku, NASA), jak je popsáno v publikaci U.S. Geological Survey (2016).

NASA je zodpovědná za vývoj nástrojů pro dálkový průzkum, za vypouštění satelitů a kontrolu jejich funkčnosti. USGS poté přebírá vlastnictví a řízení satelitů, spolu s řízením veškerého příjmu dat na Zemi. Data archivuje, vytváří z nich produkty a zajišťuje konečnou distribuci dat (U.S. Geological Survey 2016).

První satelit „*Earth Resources Technology Satellite*“ (ERTS-1) byl vypuštěn 23. července 1972. Ten byl později přejmenován na Landsat 1. Vypuštění satelitů Landsat 2, Landsat 3 a Landsat 4 následovala v letech 1975, 1978 a 1982. Landsat 5, vypuštěn v roce 1984, sloužil celých 28 let a 10 měsíců. Landsat 6 nedosáhl v roce 1993 oběžné dráhy, avšak vypuštění Landsatu 7 proběhlo úspěšně v roce 1999, a satelit dodnes pořizuje globální data. Landsat 8, vypuštěn roku 2013, je nyní také v provozu a vypuštění družice Landsat 9 je prozatím plánováno na rok 2020 (U.S. Geological Survey 2016).

O historii mise Landsat bylo sepsáno mnoho publikací. Zabývali se jí mj. Lauer a kol. (1997) a Williams a kol. (2006).



Obrázek č. 1: Satelity Landsat a jejich životnost. Zdroj: U.S. Geological Survey, 2016.  
Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>

Kolář (2008) doporučuje snímky Landsat s prostorovým rozlišením 30 m pro studie krajinného pokryvu na krajské až lokální úrovni.

#### 4.2. Surface Reflectance Data

Produkt Landsat Surface Reflectance byl vyvinut vědci v USGS. Jedná se o datový produkt vyššího stupně, známého jako Level-2.

Level-2 datové produkty byly vyvinuty především, aby pomocí nich bylo možno lépe získávat dlouhodobé informace o změnách klimatu v souladu s požadavky *Global Climate Observing System* (Globální systém pozorování klimatu). Jsou vhodné pro studie změn zemského povrchu v čase.

Atmosféricky korigovaná data Landsat Surface Reflectance jsou prvním Level-2 produktem USGS (U.S. Geological Survey 2015).

Udávají odrazivost, kterou by mohl naměřit senzor přímo nad zemským povrchem bez zkreslení způsobeného průchodem atmosférou, rozdílným osvětlením a úhlem měření. Odstranění těchto zkreslení zvyšuje konzistenci a srovnatelnost mezi snímky Zemského povrchu pořízenými v různých časech (U.S. Geological Survey 2015).

Kvůli staršímu senzoru užívanému družicemi Landsat 1-3, není jimi získané snímky možné upravit na produkty Surface Reflectance. Jsou ovšem k dispozici pro většinu snímků Landsat 4-5 *Thematic Mapper* (TM) od srpna 1982 do května 2012 (s výjimkou řady snímků s odlišným formátováním a kalibrací), dále pro všechny snímky Landsat 7 *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) od roku 1999 až po snímky pořízené během aktuálního týdne, a pro snímky Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI) od 11.dubna 2013 až po snímky pořízené během aktuálního týdne (U.S. Geological Survey 2015).

*Tabulka č. 1: Snímky použité pro klasifikaci*

Datum	Sensor	ID	Družice
11. 07. 1984	TM	LT51910251984193XXX12	Landsat 5
09. 07. 1992	TM	LT41910251992191XXX02	Landsat 4
25. 07. 1992	TM	LT41910251992207XXX02	Landsat 4
21. 07. 2002	ETM+	LE71910252002202EDC00	Landsat 7
27. 07. 2013	OLI	LC81910252013208LGN00	Landsat 8

### 4.3. Ortofota ČÚZK

Při práci bylo využito také archivních ortofot poskytovaných ČÚZK přes WMS službu. Konkrétně se jedná o roky 2014, 2004 a pro západní území 2002. Snímkování pro rok 2014 má velikost pixelu 25 cm, snímky z let 2004 a 2002 mají pixely o velikostech 50 cm. Ortofota pořízená do roku 2001 jsou pouze černobílá.

Ukázky ortofot jsou zobrazeny jako Obrázek č. 5 v metodice práce.

## 5. Metodika práce

Pro jednotlivé snímky musela být nejprve odstraněna oblačnost a její stíny, které by kvůli odlišným hodnotám odrazivosti ovlivňovaly výsledky klasifikací. Následně byly definovány trénovací a validační plochy pro MLC, pomocí kterých byla v programu ENVI 5.1. provedena klasifikace *Maximum Likelihood* a ověřena její přesnost. Výsledné mapy byly sloučeny v programu ArcMap 10.3.1, čímž vznikla výsledná mapa změn povrchu.

Pro metodu *Change detection* byly taktéž definovány trénovací a validační plochy, ovšem klasifikace byla prováděna nad sloučenými daty dvou snímků.

Podrobnosti jsou uvedeny v následujících kapitolách.

### 5.1. Masky oblačnosti

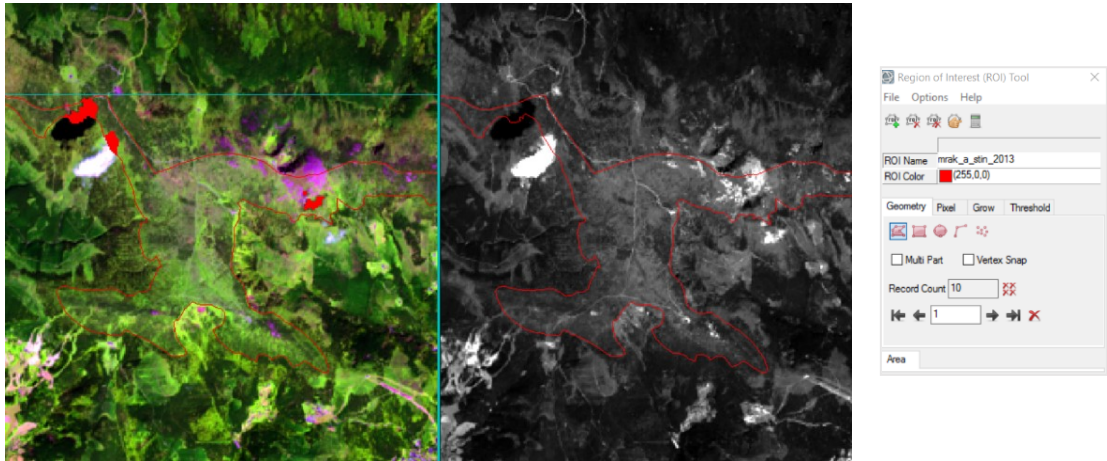
Oblačnost se v zájmovém území nacházela na snímcích pořízených 21. 7. 2013 a 27. 7. 2002. Pro tyto dva snímky bylo potřeba vytvořit masky pro odstranění ploch zakrytých oblačností a stíny. Pro rok 1992 byly k dispozici dva snímky *Surface Reflectance* družice Landsat 4, pořízené 9. a 25. 7. 1992. V žádném z nich nebyla přítomna oblačnost. Poslední hodnocený snímek je z družice Landsat 5 ze dne 11. 7. 1984. Ani na něm oblačnost zjištěna nebyla.

Prvním krokem při vytváření bezoblačné masky je nahrání snímku, pro který je maska vytvářena, do programu ENVI. Ten byl následně zkoumán v několika barevných syntézách, aby mohlo být rozhodnuto, které pixely je třeba odmaskovat kvůli výskytu oblačnosti a stínů. Postup bude dále konkrétně popsán pro snímek pořízený družicí Landsat 8 v roce 2013. Pro tento snímek jsou syntézy, ve kterých se oblačnost nejlépe zobrazovala, vypsány v tabulce č. 2. Osvědčilo se také zkoumat pouze zelené (3) pásmo snímku.

Tabulka č. 2: Barevné syntézy nejčastěji používané pro odstraňování oblačnosti

R	G	B
Pásmo infračervené 1 (SWIR 1, 6)	Blízké infračervené (NIR 5)	Červené (Red, 4)
Pásmo infračervené 2 (SWIR 2, 7)	Infračervené 1 (SWIR 1, 6)	Blízké infračervené (NIR, 5)

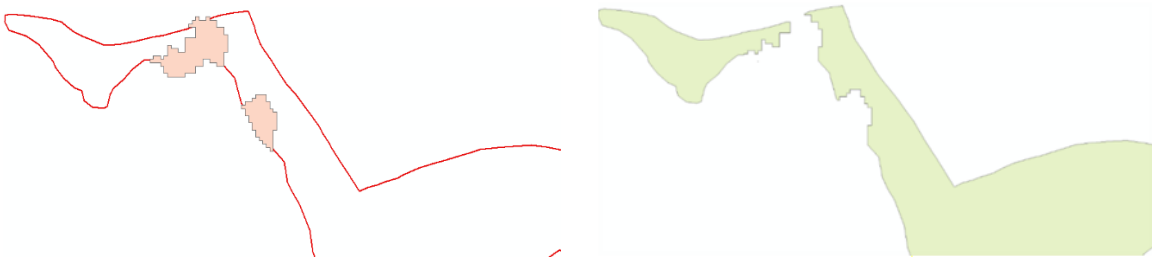
Dále byly pixely oblačnosti a stínů vybrány pomocí nástroje *ROI Tool* v ENVI (obrázek č. 2).



Obrázek č. 2: Vymezení oblačnosti snímku – barevné kompozity a ROI Tool (zobrazen snímek Landsat Surface Reflectance pro rok 2013)

Takto získaná maska oblačnosti byla exportována do shapefilu, aby s ní bylo možno dále pracovat v programu ArcMap.

Shapefile oblačnosti byl dále v programu ArcMap zkombinován se shapefilem hranice území pomocí funkce *Erase*. Výsledný polygon vymežující zájmové území bez oblačnosti a stínů byl zpětně nahrán do softwaru ENVI, kde z něj byla funkcí funkce *Build Mask* vytvořena maska zájmové oblasti bez oblačných částí. Ta bude později sloužit jako hranice (maska) území pro klasifikaci Maximum Likelihood příslušného snímku.







Obrázek č. 3: Tvorba masky oblačnosti v programu ArcMap – postupné výstupy funkce *Erase a Build Mask* (pro západní část zájmového území, rok 2013)

Stejným způsobem bylo postupováno při tvorbě bezoblačné masky pro snímek roku 2002, sloužící k jeho klasifikaci metodou *Maximum Likelihood*. Při následujících klasifikacích *Change detection*, kdy jsou vstupem vždy pásma dvou snímků, bylo třeba při kombinaci roků 2002 a 2013, jejich masky sloučit. Bylo při tom využito již vytvořených bezoblačných masek pro tyto snímky. Ty byly nejprve sloučeny v softwaru ArcMap (pomocí funkce *Clip*), a poté zpracovány v ENVI funkcí *Build Mask*.

Tabulka č. 3: Přehled snímků a kombinací snímků s výskytem oblačnosti

	2013	2002	2002 a 2013	1992 a 2002
Rozloha oblačných ploch [ha]	27,27	43,11	70,65	43,11
Zastoupení oblačných ploch ve snímku	0,76 %	1,2 %	1,97 %	1,2 %

## 5.2. Metoda Maximum Likelihood

Dalšími kroky při klasifikaci *Maximum Likelihood* bylo vymezení legendy a následný sběr trénovacích a validačních dat.

### 5.2.1. Legenda

Při tvorbě legendy muselo být zohledněno prostorové rozlišení snímků Landsat. Ačkoliv Kupková a kol. (2017) rozlišovala pro stejné území 8 kategorií povrchu (data Sentinel-2A), s pixely o velikostech  $30 \times 30$  metrů bylo nutno legendu zjednodušit. Při prvních klasifikacích MLC byly hodnoceny pouze 4 kategorie, které se daly na snímcích nejlépe rozeznat (*Kleč hustá*, *Kleč řídká*, *Travnaté povrchy*, *Kamenná moře a antropogenní plochy*). Poté k nim však byly přidány ještě kategorie *Mokřad* a *Vřes*, čímž bylo zvýšeno množství informace výsledných map za cenu mírného snížení jejich přesnosti.

Hodnocené kategorie povrchu tedy jsou:

- *Kleč hustá*
- *Kleč řídká*
- *Travnaté povrchy*
- *Kamenná moře a antropogenní plochy*
- *Mokřad*
- *Vřes*

Protože na ploše jednoho pixelu klasifikovaného snímku se málokdy vyskytuje pouze jeden typ povrchu, bylo nutností vymežit pro kategorie procentuální hranice pokryvnosti. Tímto bylo možno rozřadit např. pixely, na nichž je 10% pokrytí borovicí kleč, ale 90% pokrytí travinami. Pokryvnosti kategorií byly stanoveny na základě zkušeností, získaných při sběru dat pro klasifikace.

U kategorie *Kleč hustá* byl nutný pokryv touto dřevinou 80–100 %. *Kleč řídká* začínala tedy pokrytím 80 %, avšak proto, aby zde pixel spadal, bylo nutné, aby byl pokryt alespoň 30 % kleče. Pixel, na kterém by byl osamocený klečový keř uprostřed travin, by tak byl přiřazen do kategorie *Travnaté povrchy*, kde bylo podmínkou pokrytí 90-100 %. Kategorii *Kamenná moře a antropogenní plochy* byla stanovena podmínka pokryvnosti 80-100 %, kategorii *Vřes* 30-100 % a kategorii *Mokřady* také 30-100 %.

*Kleč hustá* je poměrně homogenní kategorie, avšak kromě samotné borovice kleč (*Pinus mugo*) sem spadají také jiné porosty dřevin podobné odrazivosti, což je v tomto případě především smrk ztepilý (*Picea abies*).

*Kleč řídká* je naopak velmi rozmanitá skupina, neboť začíná až na 30% pokrytí kleče. Tato procenta mohou být doplněna různými druhy povrchů, nejčastěji se však jedná o traviny.

Kategorie *Travnaté povrchy* zastupuje veškeré druhy v tundře rostoucích travin. Za zmínku stojí výskyt smilky tuhé (*Nardus stricta*), třtiny chloupkaté (*Calamagrostis villosa*), bezkolence modrého (*Molinia caerulea*), metlice trsnaté (*Deschampsia cespitosa*) či metličky křivolaké (*Avenella flexuosa*). Zastoupeny jsou též dvouděložné byliny (Chytrý et al. 2001).

V prvním dělení kategorií, se do kategorie *Travnaté povrchy* řadily také porosty vřesové, nicméně vzhledem k jejich významnému plošnému zastoupení v zájmové oblasti a specifické odrazivosti pro ně byla vytvořena samostatná kategorie pojmenovaná *Vřes*. Ten bývá na některých stanovištích prorostlý brusnicovými druhy vegetace.

*Mokřad* je další kategorie, pro kterou je typická různorodost. Tvořena je vodními plochami, vlhkomilnou flórou (například suchopýr) a též borovicí klečí, která může být různě hustá. Výskyt tohoto druhu v rámci i této třídy může působit potenciální problémy při klasifikacích.

### 5.2.2. Sběr trénovacích a validačních dat

Sběr trénovacích a validačních dat byl započat rokem 2013, protože pro něj byla k dispozici nejlepší data a ortofota.

#### **Snímek Landsat 8 pro rok 2013**

Pro snímek Landsat 8 *Surface Reflectance* pořízený dne 27. 7. 2013 byly nejprve v softwaru ENVI pro všechny kategorie legendy popsané v kapitole 5.2.1 nasbírány pixely pomocí funkce *ROI Tool*. Pro výběr byla použita především barevná syntéza pásem Blízké infračervené – Červené – Zelené (5-4-3). Dále byly pixely exportovány do bodových shapefile souborů (funkce *Export from ROI to polygon – multipoint*), aby s nimi mohlo být dále pracováno v programu ArcMap.

V programu ArcMap byla přesnost zkontrolována pomocí nahraného archivního ortofota z roku 2014 (WMS služba ČÚZK). Pro lepší kontrolu byla nahrána také polygonová vrstva sítě čtverců, která vymezovala přesné hranice pixelů, a tak usnadňovala odhad, kolik procent plochy pixelu zaujímají různé druhy povrchů.

Kategorie *Kleč hustá* zůstala po kontrole téměř beze změny. Je totiž u tohoto snímku snadno rozlišitelná. *Kleč řídká* měla již více chybných pixelů, především z ní byly vyřazeny pixely s pokryvností klečí větší než 80 % a pixely, které zasahovaly do oblastí mokřadů. Z kategorie *Travnaté povrchy* bylo zase nutno odstranit mnohé pixely, na kterých byla kleč na ploše větší než 10 %. Také byly odstraněny vřesové porosty. Kategorie *Kamenná moře a antropogenní plochy* musela být zmenšena téměř na třetinu své původní velikosti, aby na ní nebyly přítomny jiné druhy povrchů na více než 20 %. Zasahovala zde hlavně kleč a vřes. Upravovány byly i kategorie *Mokřad* a *Vřes*, které byly po kontrole podle ortofot ještě rozšiřovány, aby mezi množstvím pixelů nasbíraných pro ně a pro ostatní kategorie nebyl příliš vysoký rozdíl, ale vzhledem k jejich menšímu rozsahu ve snímcích to bylo obtížné.

Kategorie *Mokřad* má nejméně nasbíraných pixelů (70), pro kategorii *Vřes* je to téměř dvojnásobek. Nejvíce pixelů zůstalo vybráno pro kategorii *Travnaté povrchy* kvůli její rozsáhlé ploše na zájmovém území, ale především aby byly zastoupeny všechny druhy travin, které se zde vyskytují.

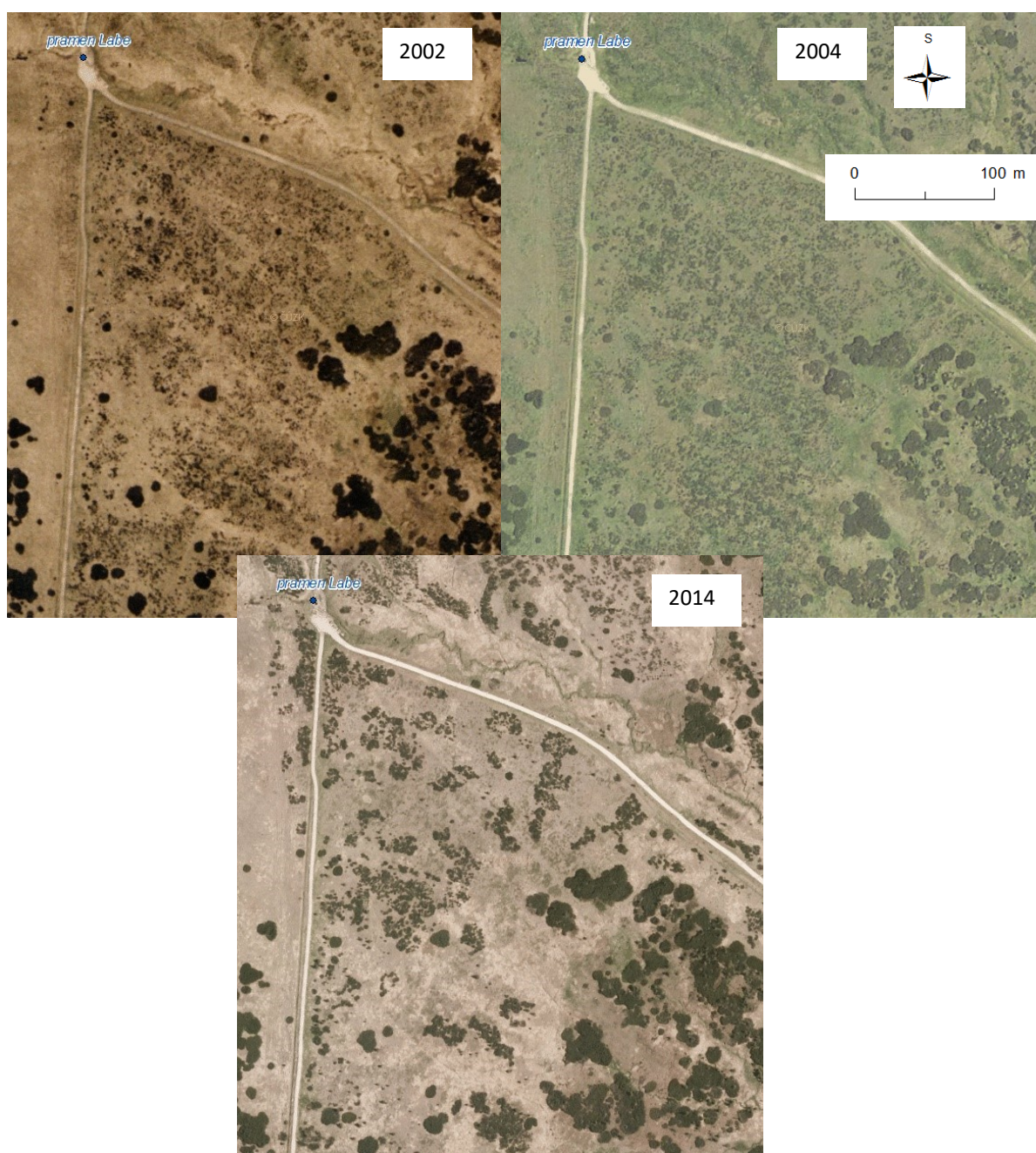
### **Snímky Landsat pro roky 2002, 1992 a 1984**

Při výběru pixelů pro starší snímky byly využity již zhotovené soubory pixelů pro rok 2013, které byly vždy upravovány podle archivních ortofot (byla-li dostupná) a různých barevných syntéz snímků Landsat *Surface Reflectance* (viz tabulka č. 4).

*Tabulka č. 4: Využití barevné syntézy pro sběr pixelů pro roky 2002, 1992 a 1984*

<b>R</b>	<b>G</b>	<b>B</b>
Pásma střední infračervené 1 (5)	Blízké infračervené (4)	Červené (3)
Pásma zelené (2)	Červené (3)	Blízké infračervené (4)
Pásma modré (1)	Zelené (2)	Červené (3)

Pro snímek Landsat *Surface Reflectance*, pořízený 21. 7. 2002, byla kontrola správnosti pixelů poměrně jednoduchá, protože jsou k nim dostupná ortofota. Předběžně byly podle ortofot největší změny kategorie *Travnaté povrchy*, z nichž významná část byla v roce 2002 porostlá klečí. Na obrázku 5 je patrný úbytek (proředování) kleče na archivních ortofotech z let 2002, 2004 a 2014.



Obrázek č. 5: Úbytek kleče na ortofotech z let 2002, 2004 a 2014

Pro rok 1992 byly k dispozici dva bezoblačné snímky družice Landsat 4, pořízené 9. 7. 1992 a 25. 7. 1992. Protože ale nebylo vhodné ortofoto pro toto období, byla úprava pixelů (pro výběr nahrány pixely z roku 2002) značně ztížena. Ve snaze přesněji upravit data byly podrobně zkoumány spektrální vlastnosti jednotlivých pixelů a pro kontrolu byly využity oba dva dostupné snímky Landsat.

Přestože jsou snímky pořízeny v rozmezí pouhých 16 dnů, zobrazují se snímky odlišně. Více bylo využito snímku z 9. 7. 1992, protože na něm byly lépe rozeznatelné definované kategorie. Rozdíly snímků pravděpodobně souvisí s vegetační sezónou – vývojem rostlinstva i změnami teplot a vlhkostí půd.

Poslední hodnocený snímek je z družice Landsat 5 z 11. 7. 1984. Na základě barevných syntéz je vidět, že vegetace evidentně ještě nebyla zelená, což způsobovalo problémy s vizuální interpretací snímku. Pro tyto problémy byl snímek nahrán a zkoumán ve všech dosud využitých barevných kompozitech. Při dalším pokusu o zpřesnění výběru byla později nahrána ještě vrstva barevné syntézy NDVI indexů pro tento a předcházející snímek, na které šlo také částečně rozeznat změny ve vegetaci mezi roky. Ortofoto pro toto období také není k dispozici, a proto bylo pro snímek z roku 1984 nasbíráno pixelů nejméně.

### **5.2.3. Rozdělení pixelů na trénovací a validační**

Při dalším postupu byly pro každou z kategorií nasbírané pixely rozděleny na polovinu. Pro rozdělení byla využita identifikační čísla pixelů v atributové tabulce programu ArcMap v SQL syntaxi  $MOD ("FID", 2) = 0$ . Tímto příkazem byly vybrány pouze pixely se sudou hodnotou pole „FID“ (dělitelnou beze zbytku dvěma).

V tabulce č. 5 jsou uvedeny počty nasbíraných pixelů pro jednotlivé roky s rozdělením mezi trénovací (pt) a validační (pv). V případě lichého počtu pixelů byl pixel navíc přiřazen do kategorie pixelů trénovacích (pt).

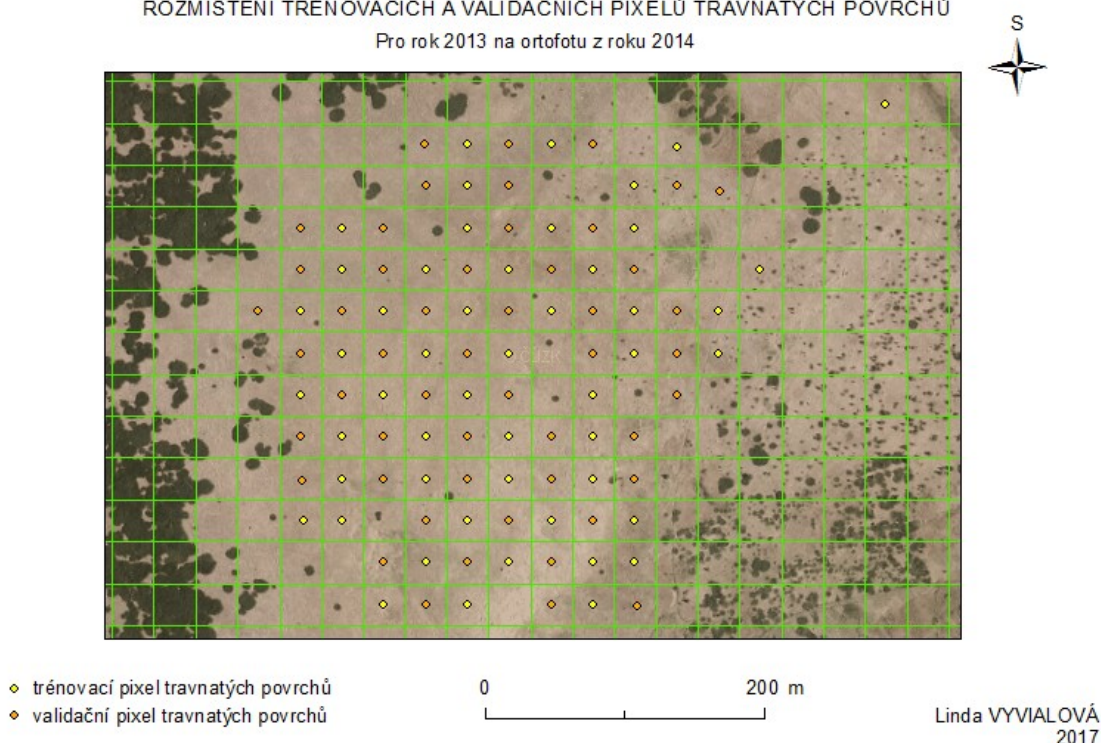
Tabulka č. 5: Počty nasbíraných pixelů pro všechny snímky (p – počet pixelů, pt – počet trénovacích pixelů, pv – počet validačních pixelů)

Kategorie (pokrytí plochy pixelu)	2013			2002			1992			1984		
	p	pt	pv	p	pt	pv	p	pt	pv	p	pt	pv
Kleč hustá (80–100 %)	<b>465</b>	233	232	<b>455</b>	228	227	<b>483</b>	242	241	<b>448</b>	224	224
Kleč řídká (30–80 %)	<b>433</b>	217	216	<b>386</b>	193	193	<b>368</b>	184	184	<b>328</b>	164	164
Povrchy travnaté (90–100 %)	<b>935</b>	468	467	<b>864</b>	432	432	<b>780</b>	390	390	<b>704</b>	352	352
Kamenná moře a antropogenní plochy (80–100 %)	<b>247</b>	124	123	<b>287</b>	144	143	<b>295</b>	148	147	<b>262</b>	131	131
Vřes (30-100 %)	<b>120</b>	60	60	<b>116</b>	58	58	<b>108</b>	54	54	<b>105</b>	53	52
Mokřad (30-100 %)	<b>70</b>	35	35	<b>99</b>	50	49	<b>92</b>	46	46	<b>89</b>	45	44
<b>Součet pixelů</b>	<b>2270</b>	1137	1133	<b>2207</b>	1105	1102	<b>2126</b>	1064	1062	<b>1936</b>	969	967

Na obrázku č. 6 je zobrazena ukázka výběru pixelů kategorie *Travnaté povrchy* nad ortofotem z roku 2014, na které je vidět rozmístění trénovacích a validačních pixelů. Tvar jednotlivých pixelů je naznačen zelenou sítí čtverců.



ROZMÍSTĚNÍ TRÉNOVACÍCH A VALIDAČNÍCH PIXELŮ TRAVNATÝCH POVRCHŮ  
Pro rok 2013 na ortofotu z roku 2014



Obrázek č. 6: Rozmístění trénovacích a validačních pixelů povrchů travnatých (tvar pixelů je naznačen zelenou sítí čtverců)

#### 5.2.4. Získání rozdílů mezi roky pomocí metody Maximum Likelihood

Trénovací pixely byly v programu ENVI použity na trénování klasifikátoru Maximum Likelihood a pomocí validačních pixelů byla poté zkontrolována přesnost výsledků funkcí *Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs*.

Výsledné mapy však zobrazují zájmovou oblast pouze pro jeden hodnocený rok. Pro získání kategorií změn povrchu byly výsledné rastrové mapy nahrány do programu ArcMap, kde byly funkcí *Raster to polygon* převedeny na polygony a funkcí *Union* sloučeny do jednoho souboru. Tento soubor měl v atributové tabulce údaje o změnách povrchu pro každý pixel či skupinu pixelů, a tak z něj mohla být dále vytvořena mapa změn povrchu.



### 5.3. Metoda Change Detection

S týmiž snímky, se kterými byla provedena výše popsaná klasifikace Maximum Likelihood, bylo dále pracováno při zpracovávání změn metodou Change Detection.

V první části příprav pro tuto klasifikaci je potřeba získat trénovací pixely pro kategorie povrchu a jejich změny mezi jednotlivými roky. Počítáme-li všechny kategorie možných změn, a také kategorie povrchu, kde ke změnám nedošlo, pak by bylo nutno z původních 6 kategorií legendy vytvořit celkem 36 kategorií změn povrchu.

V praxi bylo ovšem zjištěno, že mezi některými kategoriemi povrchu ke změnám nedochází. Minimálními změnami procházejí např. kategorie *Kamenná moře* a *antropogenní plochy*. Podle zkoumaných ortofot není přirozené šíření travin, vřesu či kleče do kamenných moří dostatečně rychlé, aby se za hodnocené období na pixelu o rozměrech 30\*30 m projevilo.

Takto bylo zkoumáním ortofot zjištěno, že k prokazatelným změnám dochází pouze mezi následujícími kategoriemi, které byly tedy i nadále hodnoceny:

*Travnaté povrchy* → *Kleč řídká*

*Kleč řídká* → *Kleč hustá*

*Kleč řídká* → *Travnaté povrchy*.

Níže v tabulce číslo 6 jsou vypsány počty nasbíraných pixelů pro šest původních a tři nové změnové kategorie.

#### Rozdíly mezi roky 2002 a 2013

Pro změnovou kategorii *Kleč řídká* → *Travnaté povrchy* nebylo možno nalézt dostatek reprezentativních pixelů pro klasifikaci i její kontrolu. Přesto byla kvůli správnosti a reprezentativnosti konečné mapy do klasifikačního procesu zařazena.

Po nasbírání potřebného množství pixelů (pro klasifikaci MLC je nutnost mít trénovacích pixelů celkem  $n+1$ , přičemž  $n$  představuje počet spektrálních pásem, na kterých je klasifikace prováděna) byla v softwaru ENVI funkcí *Layer Stacking* sloučena spektrální pásma. Ze snímku pořízeného v roce 2002 družicí Landsat 7 byla sloučena všechna pásma, ze snímku z roku 2013 družice Landsat 8 byla sloučena všechna pásma vyjma prvního

pásma „*coastal/aerosol*“, protože to je nejvíce ovlivněno atmosférou, a navíc nebylo přítomno ve starších snímcích. Výsledný soubor měl tedy pásem 12.

Byla vyzkoušena také transformace hlavních komponent (Principal Component Analysis, PCA), která by mohla v tomto případě, kdy pro jednu z kategorií není k dispozici dostatečný počet pixelů, pomoci. Protože se ale výsledek klasifikace po provedení PCA transformace zhoršil, nebyla tato transformace dále využívána a ve výsledcích budou zobrazeny mapy *Change detection* bez PCA transformace.

Nad souborem obsahujícím 12 pásem z let 2002 a 2013 (výstup funkce *Layer Stacking*) byla provedena klasifikace opět metodou *Maximum Likelihood* se vstupními trénovacími pixely pro šest původních a tři nové změnové kategorie povrchu.

Kontrola správnosti byla, stejně jako u dřívějších klasifikací, provedena pomocí funkce *Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs* pomocí validačních pixelů. V tomto případě nebyl dostatek pixelů pro vyhodnocení přesnosti poslední změnové kategorie *Kleč řídká* → *Travnaté povrchy* (pouze 6).

### **Rozdíly mezi roky 1992 a 2002 a mezi roky 1984 a 1992**

Vzhledem k vícero dostupným snímkům bez oblačnosti pro rok 1992, bylo pro klasifikace mezi tímto a dalším rokem využito vždy obou těchto snímků – po uplatnění funkce *Layer Stacking* v ENVI měl tedy výsledný soubor vždy 18 pásem.

Kvůli málu či úplně chybějícím snímkům ortofot pro dva starší hodnocené roky, přibyla nutnost vybrat již předem pixely, na kterých pravděpodobně došlo ke změnám. To bylo provedeno pomocí již provedených výstupů klasifikace *Maximum Likelihood* pro jednotlivé roky. Jejich kombinací (funkce *Union* na polygonové výstupy v programu ArcMap) byl proveden výběr polygonů změn podle jejich atributů. Tyto polygony byly poté prozkoumány pomocí již dříve použitých barevných syntéz (tabulka č. 3) a mezi nimi byly vybrány reprezentativní pixely změnových kategorií.

Podobně byly vybrány také pixely nezměněných kategorií. Pro ty byly nejprve nahrány již vybrané pixely, ze kterých byly funkcí *Erase Point* v programu ArcMap

vymazány pixely, které do své kategorie povrchu nebyly přiřazeny dřívějšími klasifikacemi v obou hodnocených letech.

Ačkoliv postup byl při obou hodnocených časových obdobích stejný, byly zde nalezeny některé odlišné změnové kategorie.

Pro změny mezi lety 1992 a 2002 byly použity tyto změnové kategorie:

*Travnaté povrchy* → *Kleč řídká*

*Kleč řídká* → *Kleč hustá*.

Pro změny mezi lety 1984 a 1992 k nim byly přidány ještě kategorie:

*Kleč řídká* → *Travnaté povrchy*

*Kleč hustá* → *Kleč řídká*.

Tabulka č. 6: Počty trénovacích (pt) a validačních (pv) pixelů nasbíraných pro klasifikace Change detection

Kategorie (pokrytí plochy pixelu)	2002 až 2013			1992 až 2002			1984 až 1992		
	p	pt	pv	p	pt	pv	p	pt	pv
Kleč hustá (80–100 %)	<b>408</b>	204	204	<b>417</b>	209	208	<b>421</b>	211	210
Kleč řídká (30–80 %)	<b>293</b>	147	146	<b>255</b>	128	127	<b>213</b>	107	106
Travnaté povrchy (90–100 %)	<b>818</b>	409	409	<b>725</b>	363	362	<b>568</b>	284	284
Kamenná moře a antropogenní plochy (80–100 %)	<b>222</b>	111	111	<b>250</b>	125	125	<b>245</b>	123	122
Vřes (30-100 %)	<b>93</b>	47	46	<b>79</b>	40	39	<b>69</b>	35	34
Mokřad (30-100 %)	<b>44</b>	22	22	<b>66</b>	33	33	<b>93</b>	47	46
Přechod Kleč řídká → Travnaté povrchy	<b>19</b>	13	6				<b>104</b>	52	52
Přechod Kleč řídká → Kleč hustá	<b>47</b>	24	23	<b>152</b>	76	76	<b>79</b>	40	39
Přechod Travnaté povrchy → Kleč řídká	<b>92</b>	46	46	<b>336</b>	168	168	<b>110</b>	55	55
Přechod Kleč hustá → Kleč řídká							<b>103</b>	52	51
<b>Součet pixelů</b>	<b>2036</b>	1023	1013	<b>2280</b>	1142	1138	<b>2005</b>	1006	999

#### 5.4. Získání rozloh kategorií

Funkcí *Class Statistics* v programu ENVI lze rychle získat rozlohu jednotlivých kategorií v metrech čtverečných i počet do nich zařazených pixelů. Tyto rozlohy však mohou být ještě dále zpřesněny na základě výsledků z chybových matic.

Postup pro výpočet odhadu skutečných rozloh jednotlivých tříd na základě chybových matic popsán (Olofsson et al. 2013). Provádí se ve třech krocích:

1. Z rozlohy kategorie na mapě a celkové rozlohy hodnoceného území byly spočítány váhy kategorií  $W_i$ .
2. Chybová matice byla podle těchto vah přepočítána vzorcem  $\hat{p}_{ij} = W_i \times \frac{n_{ij}}{n_i}$ , kde  $n_{ij}$  značí přepočítávaný řádek kategorie a  $n_i$  značí součet pixelů téže kategorie.
3. Součty hodnot sloupců přepočítané chybové matice (jedna hodnota pro každou z kategorií povrchu) byly vynásobeny celkovou rozlohou všech tříd na mapě. Výsledná hodnota udává přepočítanou hodnotu rozlohy kategorie.

## 6. Výsledky

### 6.1. Hodnocení přesnosti klasifikace

Přesnosti klasifikací byly zjišťovány pro všechny snímky. Při prvních klasifikacích metodou Maximum Likelihood pro jednotlivé snímky vycházela celková přesnost (OA, *Overall Accuracy*) nejhůře pro rok 1984 (86,04 %), což je zřejmě způsobeno chybějícími ortofoty, podle kterých by byly vybrané pixely v opačném případě kontrolovány. Ostatní přesnosti vycházely mezi 86,43 a 88,44 %.

Veškeré přesnosti pro jednotlivé snímky při klasifikacích metodou Maximum Likelihood jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka č. 7: Přesnosti klasifikace Maximum Likelihood pro jednotlivé snímky

PA značí *Producer's Accuracy* čili *Zpracovatelskou přesnost*, UA značí *User's Accuracy* čili *Uživatelskou přesnost*.

	2013		2002		1992 (25.7.)		1992 (9.7.)		1984	
	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA
<i>Kleč hustá</i>	93,53	91,18	90,31	95,79	92,34	95,59	90,64	93,83	92,31	92,73
<i>Kleč řídká</i>	72,99	86,03	76,47	80,34	79,07	83,44	76,74	85,71	74,38	81,51
<i>Travnaté povrchy</i>	93,08	91,45	91,96	92,40	92,49	93,70	91,71	93,90	86,13	94,30
<i>Kamenná moře a antropogenní plochy</i>	78,99	78,33	89,36	92,65	88,28	94,12	83,45	88,97	92,31	92,31
<i>Vřes</i>	76,67	68,66	68,97	64,52	72,22	61,90	85,19	54,76	75,00	53,42
<i>Mokřad</i>	77,14	60,00	81,63	54,05	89,13	60,29	84,78	65,00	90,91	58,82
<b>OA</b>	<b>86,43 %</b>		<b>86,91 %</b>		<b>88,44 %</b>		<b>87,19 %</b>		<b>86,04 %</b>	
<b>Kappa koeficient</b>	0,82		0,83		0,85		0,83		0,82	

Po provedení klasifikací pro jednotlivé snímky byly zjišťovány změny mezi po sobě následujícími roky metodou *Change detection*. Protože je takto zvyšován počet hodnocených kategorií, bylo předpokládáno, že celkové přesnosti OA se o něco sníží. Jak je uvedeno v tabulce č. 8, nejméně přesný byl první výsledek (roky 2002 a 2013, 86,11 %), avšak pouze o 0,5 %.

Tabulka č. 8: Přesnosti klasifikace Change detection

PA značí Producers Accuracy čili Zpracovatelskou přesnost, UA značí Users Accuracy čili Uživatelskou přesnost.

	2002 a 2013		1992 a 2002		1984 a 1992	
	PA	UA	PA	UA	PA	UA
<i>Kleč hustá</i>	91,18	94,90	88,46	94,85	89,52	96,91
<i>Kleč řídká</i>	72,34	73,91	83,61	77,86	80,77	61,76
<i>Travnaté povrchy</i>	93,05	94,94	91,88	94,80	93,24	95,27
<i>Kamenná moře a antropogenní plochy</i>	96,40	82,95	100,00	86,81	99,18	90,98
<i>Vřes</i>	86,96	93,02	79,49	96,88	88,24	96,77
<i>Mokřad</i>	77,27	89,47	66,67	95,65	82,61	88,37
<i>Kleč řídká → Kleč hustá</i>	22,73	27,78	81,33	69,32	58,97	65,71
<i>Travnaté povrchy → Kleč řídká</i>	65,22	47,62	86,90	86,39	69,09	69,09
<i>Kleč řídká → Travnaté povrchy</i>	0,00	0,00			69,23	80,00
<i>Kleč hustá → Kleč řídká</i>					80,77	87,50
<b>OA</b>	<b>86,11 %</b>		<b>88,64 %</b>		<b>86,63 %</b>	
<b>Kappa koeficient</b>	0,82		0,86		0,84	

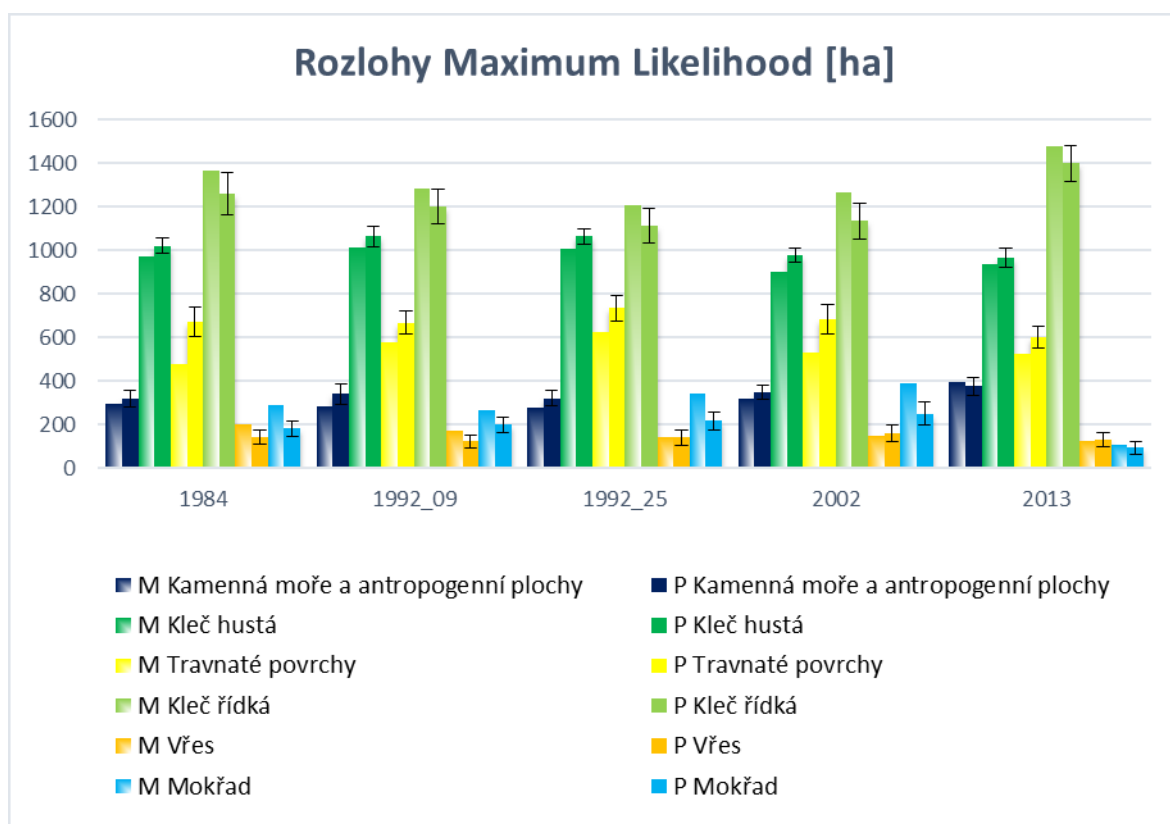
Kategorie *Kleč řídká → Travnaté povrchy* má v tabulce č. 8 pro roky 2002 a 2013 nulové hodnoty PA a UA. Je to kvůli malému počtu pixelů v této kategorii (pouze 6 validačních pixelů).

## 6.2. Změny v rozlohách

Největší rozlohu mají u všech hodnocených let kategorie *Kleč řídká* a *Kleč hustá*, dále *Travnaté povrchy*, *Kamenná moře* a *antropogenní plochy*, *Mokřad* a *Vřes*.

V posledním hodnoceném roce 2013 bylo naměřeno více hektarů pro kategorii *Vřes* (131,5 ha) než pro kategorii *Mokřad* (91,8 ha). Toto je pravděpodobně způsobeno suchem posledních let, kdy v létě bývají některé mokřady dost suché a mohou se na snímku jevit jako holá půda. Rozloha kategorie je také ovlivněna, protože část mokřadů byla na snímku pro rok 2013 zakryta oblačností.

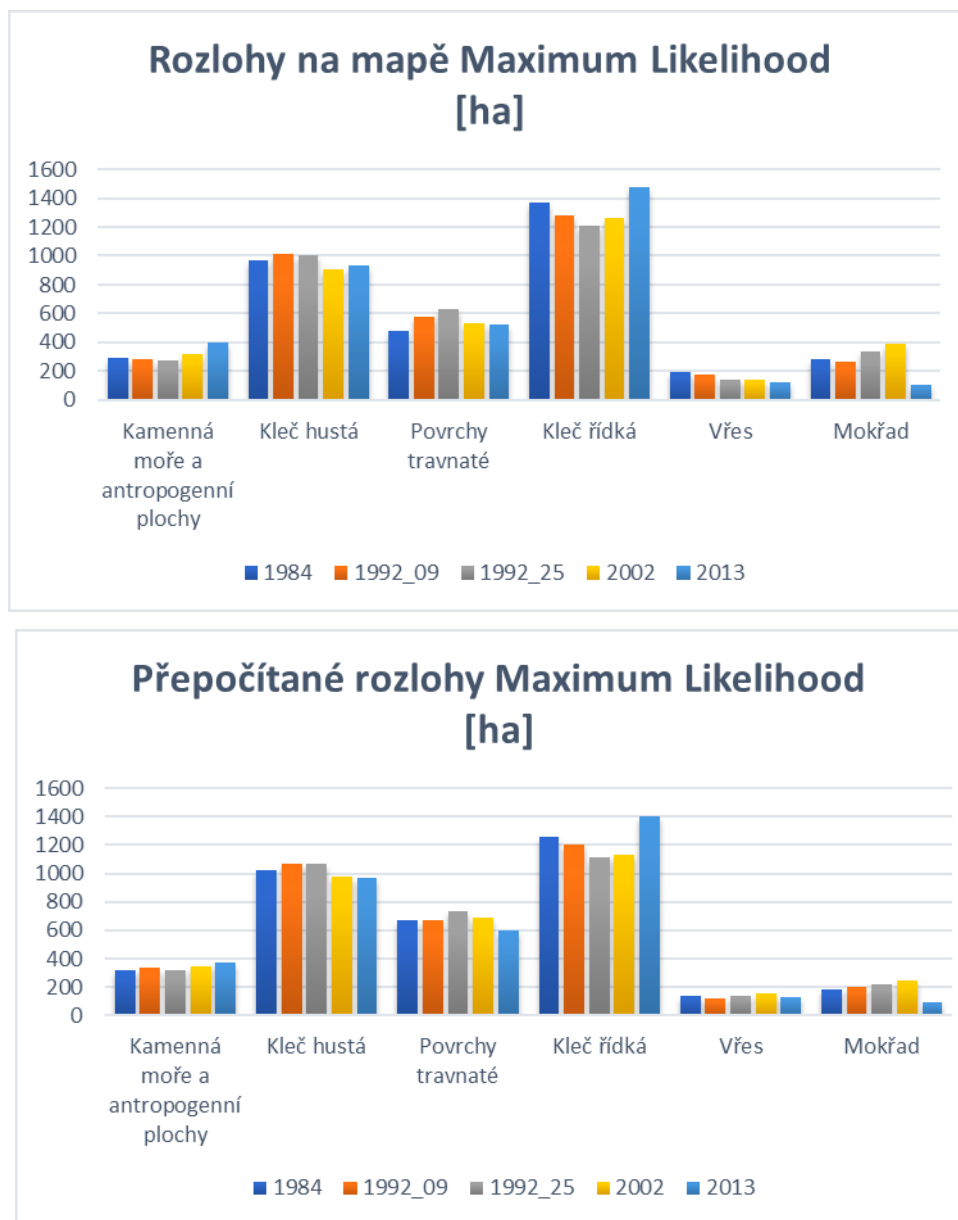
Pro porovnání byly v grafech znázorňujících rozlohy kategorií uvedeny vždy dvě hodnoty téže kategorie. Hodnoty označené M značí rozlohy, jak jsou znázorněny na mapách, hodnoty P jejich změnu po přepočítání podle chybové matice (viz Metodika práce, kapitola 5.4).



Graf. č. 1: Graf rozlohy získaný metodou Maximum Likelihood pro jednotlivé snímky (řazení dle roku)

Stejnými barvami jsou zobrazeny rozlohy totožných kategorií, nejprve na mapě (M), poté přepočítané (P). U přepočítaných rozloh je křivkou znázorněn 95% interval spolehlivosti.

Změny v rozlohách řazené podle kategorií jsou uvedeny vždy ve dvou podobných grafech, kdy první z nich znázorňuje původní rozlohy v hektarech tak, jak jsou zobrazeny na mapách v příloze, na druhém jsou poté znázorněny rozlohy přepočítané podle chybové matice. Dá se předpokládat, že přesnější jsou hodnoty přepočítané.

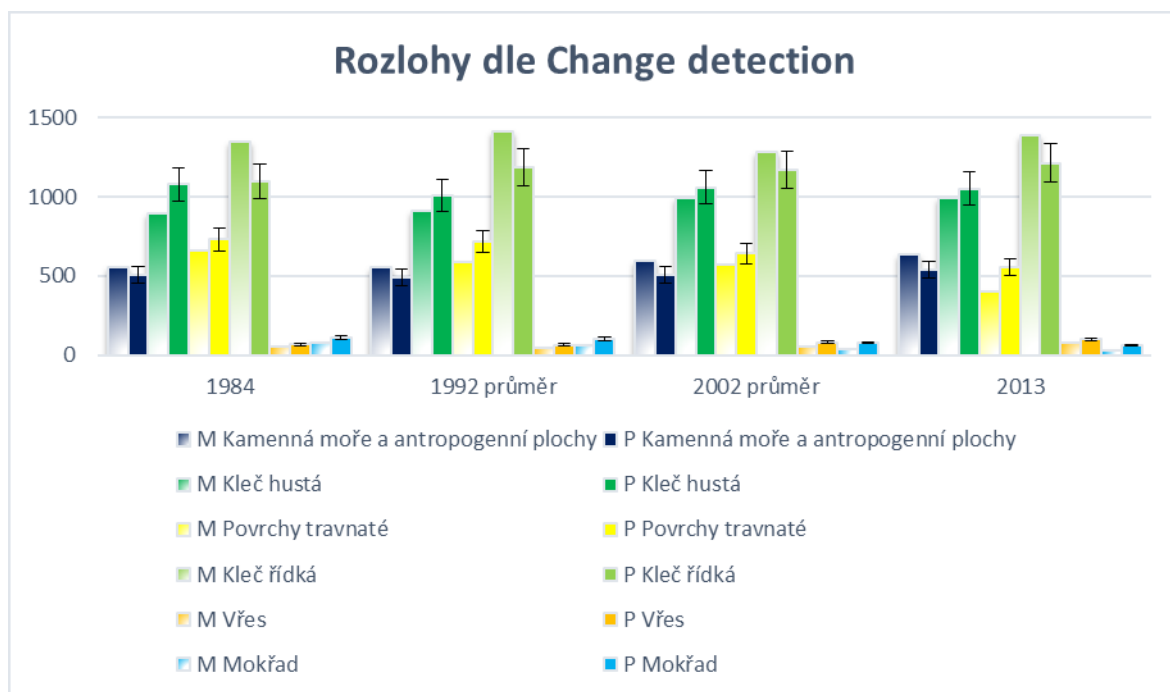


Graf č. 2: Grafy rozlohy získané metodou Maximum Likelihood pro jednotlivé snímky (řazení dle kategorií povrchu)

Uvedeny jsou výsledky obou klasifikací snímků z roku 1992. Přestože by u nich měly vycházet hodnoty stejné, odchylky v odrazivostech snímků, které mohly být způsobeny šestnáctidenním časovým rozdílem čili posunem vegetačního období, odlišnou vlhkostí půd či jinými faktory, způsobily větší rozdíly rozloh zejména u kategorií *Travnaté povrchy* a *Kleč řídká*. Rozdíl viditelný u kategorie *Mokřad* byl po přepočítání rozloh zmenšen.



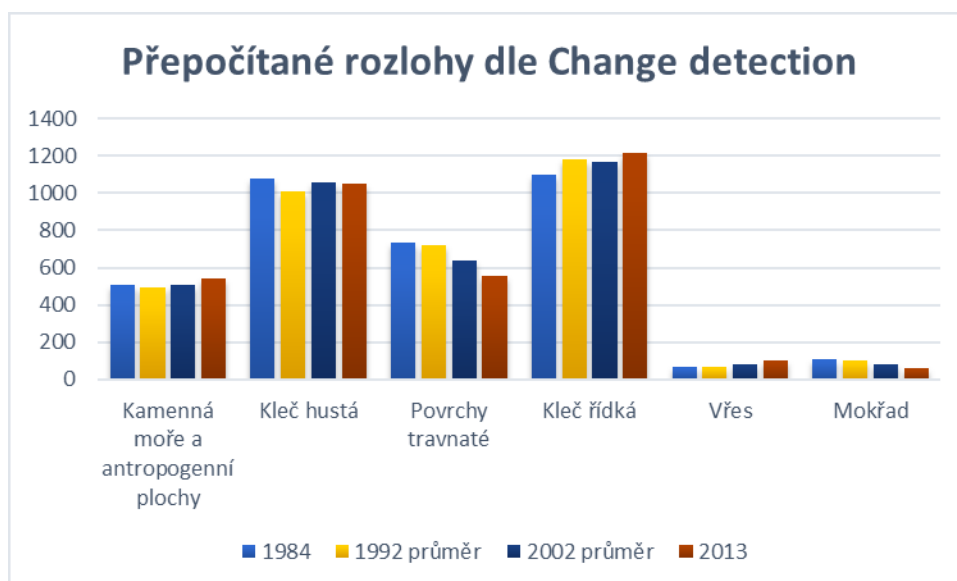
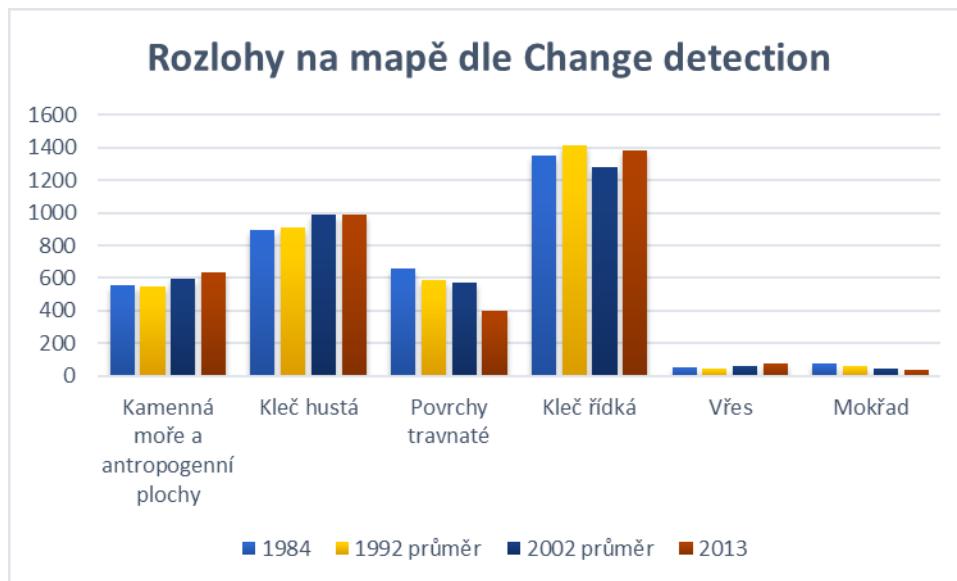
Aby byly pro metodu *Change detection* získány grafy rozlohy kategorií srovnatelné s těmi získanými metodou *Maximum Likelihood*, byly rozlohy změnových kategorií povrchu vždy připočítány k příslušné kategorii příslušného roku. Byla-li tedy k dispozici např. kategorie *Kleč řídká* → *Kleč hustá* pro změny mezi roky 1984 a 1992, byla její rozloha připočítána pro rok 1984 ke kategorii *Kleč řídká* a pro rok 1992 ke kategorii *Kleč hustá*. Tím byly ovšem pro roky 1992 a 2002 získány vždy dvě sady rozloh. Ty byly poté zprůměrovány, a až jejich průměry jsou v tabulkách zobrazeny.



Graf č. 3: Graf rozlohy získaný metodou *Change detection* (řazení dle roku)

Stejnými barvami jsou zobrazeny rozlohy totožných kategorií, nejprve na mapě (M), poté přepočítané (P). U přepočítaných rozloh je křivkou znázorněn 95% interval spolehlivosti.

Výsledky se zdají být věrohodnější než ty získané metodou *Maximum Likelihood*, neboť na grafu již nejsou roky, u kterých by se rozloha kategorií náhle prudce změnila oproti ostatním. Lze na nich naopak pozorovat určité rostoucí (*Kleč řídká*) a klesající (*Povrchy travnaté*) tendence u kategorií. Mírně se zvyšující rozloha kategorie *Kamenná moře a antropogenní plochy* je zde překvapující, neboť na snímcích ortofot u této kategorie změny patrně nebyly. Mohou být způsobeny chybami klasifikace či např. půdní erozí.



Graf č. 4: Grafy rozlohy získané metodou Change detection (řazení dle kategorií povrchu)

Pořadí kategorií dle rozloh kategorií povrchu se při hodnocení metodou Change Detection neměnilo.

V tabulkách 9 a 10 jsou zapsány rozlohy kategorií pro obě metody hodnocení, nejprve pro 6 základních kategorií povrchu (tabulky 9), poté pro rozšířených 10 kategorií (tabulka 10).

Tabulky č. 9: Rozlohy přepočítané pro 6 kategorií klasifikace Maximum Likelihood a Change detection

<i>MLC</i>	1984 [ha]	1984 %	1992 (09) [ha]	1992 (09) %	1992 (25) [ha]	1992 (25) %	2002 [ha]	2002 %	2013 [ha]	2013 %
Kamenná moře a antropogenní plochy	317,1	<b>8,83</b>	339	<b>9,44</b>	320,3	<b>8,92</b>	345,8	<b>9,74</b>	374,4	<b>10,50</b>
Kleč hustá	1021,8	<b>28,45</b>	1063,8	<b>29,62</b>	1064,6	<b>29,64</b>	976,3	<b>27,51</b>	965,2	<b>27,08</b>
Povrchy travnaté	671	<b>18,68</b>	667,4	<b>18,58</b>	735	<b>20,46</b>	684,5	<b>19,29</b>	601,7	<b>16,88</b>
Kleč řídká	1259,8	<b>35,07</b>	1202,9	<b>33,49</b>	1114,8	<b>31,04</b>	1134,2	<b>31,96</b>	1400,3	<b>39,28</b>
Vřes	142	<b>3,95</b>	121,6	<b>3,39</b>	140	<b>3,90</b>	158,3	<b>4,46</b>	131,5	<b>3,69</b>
Mokřad	180,3	<b>5,02</b>	197,3	<b>5,49</b>	217,2	<b>6,05</b>	249,8	<b>7,04</b>	91,8	<b>2,57</b>

<i>Change detection</i>	1984 [ha]	1984 %	1992 průměr [ha]	1992 průměr %	2002 průměr [ha]	2002 průměr %	2013 [ha]	2013 %
Kamenná moře a antropogenní plochy	506,9	<b>14,11</b>	491,2	<b>13,76</b>	508,3	<b>14,38</b>	541,3	<b>15,38</b>
Kleč hustá	1079,0	<b>30,04</b>	1009,9	<b>28,29</b>	1059,0	<b>29,96</b>	1050,2	<b>29,84</b>
Povrchy travnaté	731,3	<b>20,36</b>	718,1	<b>20,11</b>	640,8	<b>18,13</b>	554,5	<b>15,75</b>
Kleč řídká	1098,2	<b>30,57</b>	1185,3	<b>33,20</b>	1168,6	<b>33,07</b>	1214,1	<b>34,49</b>
Vřes	66,3	<b>1,85</b>	63,6	<b>1,78</b>	79,8	<b>2,26</b>	98,8	<b>2,81</b>
Mokřad	110,3	<b>3,07</b>	102,4	<b>2,87</b>	77,8	<b>2,20</b>	60,9	<b>1,73</b>

Tabulka č. 10: Přepočítané rozlohy Change detection a MLC pro všechny hodnocené kategorie + kategorie Oblačnost a stíny

Přepočítaná rozloha	Change detection [ha]			MLC [ha]		
	1984 a 1992	1992 a 2002	2002 a 2013	1984 a 1992	1992 a 2002	2002 a 2013
Mokřad	110,27	94,60	60,90	121,95	149,13	53,28
Vřes	66,28	60,87	98,79	57,87	57,51	54,81
<b>Kleč řídká na Kleč hustá</b>	<b>233,76</b>	<b>389,33</b>	<b>165,02</b>	<b>101,34</b>	<b>76,95</b>	<b>76,95</b>
<b>Kleč řídká na Travnaté povrchy</b>	<b>132,86</b>		<b>16,04</b>	<b>155,79</b>	<b>40,14</b>	<b>101,61</b>
Kleč řídká	731,55	877,96	1021,01	946,98	961,20	1013,67
<b>Travnaté povrchy na Kleč řídká</b>	<b>235,36</b>	<b>257,28</b>	<b>193,13</b>	<b>62,19</b>	<b>139,77</b>	<b>75,69</b>
Travnaté povrchy	495,98	549,98	538,43	381,42	448,65	401,40
<b>Kleč hustá na Kleč řídká</b>	<b>136,32</b>			<b>88,29</b>	<b>56,79</b>	<b>188,55</b>
Kleč hustá	942,66	843,47	885,22	839,52	790,47	693,18
Kamenná moře a antropogenní plochy	506,95	475,39	541,28	202,59	211,86	239,13
Oblačnost a stíny	0,00	43,11	70,65	0,00	43,11	70,65
<b>Ostatní kategorie změn</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>634,05</b>	<b>616,41</b>	<b>623,07</b>

## 7. Diskuze

Ačkoliv metoda klasifikace pomocí klasifikátorů Maximum Likelihood je jedna z nejužívanějších metod, je u ní potřeba pečlivě vybírat trénovací plochy. U snímků Landsat, které se vyznačují prostorovým rozlišením pixelu pouze 30x30 m, bylo velmi obtížné získat pro některé kategorie povrchu pixely, na kterých se jiný druh povrchu nevyskytuje.

Ačkoliv byly přesně stanoveny procentuální pokryvnosti povrchu, které pixely měly splňovat, bylo určení některých kategorií obtížné. Zejména *Kleč řídká* je specifická různorodostí svých pixelů, neboť do ní spadají jak pixely jen zčásti pokryté hustými klečovými porosty, tak pixely pokryté stejnoměrně porosty kleče řídké a nesouvislé.

*Kleč řídká* měla při určování podmínku pokryvnosti alespoň 30 %. Zbýlých 30 % povrchu pixelu mohlo spadat do kterékoli z ostatních hodnocených kategorií (s výjimkou kategorie *Kleč hustá*).

Kategorii *Mokřad* bylo obtížné podle ortofot odlišit, protože je často prorostlá hustou i řídkou klečí.

Po provedení obou metod klasifikace (klasifikace jednotlivých scén metodou *Maximum Likelihood* a hodnocení změn na základě jejich překryvů a přímá detekce změn nad jedním datasetem skládajícím se ze scén pro všechny hodnocené časové horizonty) lze s jistotou tvrdit, že druhou metodou (*Change detection*) bylo dosaženo výsledků vhodnějších pro porovnávání změn v čase.

Metoda klasifikace jednotlivých scén *Maximum Likelihood* je vhodná pro klasifikaci samostatných snímků, a zároveň jako pomůcka při výběru vhodných trénovacích pixelů pro metodu *Change detection* (jejich volba by jinak, obzvláště pro roky bez dostupného ortofota, byla velmi obtížná).

Při klasifikacích *Maximum Likelihood* jednotlivých snímků bylo vidět rozdíly mezi kategoriemi. Zatímco kategorie *Kleč hustá*, *Travnaté povrchy* a *Kamenná moře a antropogenní plochy* měly vždy podobné hodnoty přesnosti zpracovatelské (PA) a uživatelské (UA), kategorie *Kleč řídká* měla vždy přesnost uživatelskou (UA) nižší než zpracovatelskou (PA). Kategorie *Vřes* a *Mokřad*, pro které byl nasbíráán jen malý počet

pixelů a často mají heterogenní povrch pixelu, mají naopak vždy vyšší přesnost zpracovatelskou (PA) než uživatelskou (UA). Kappa koeficienty vycházely mezi 0,82 a 0,85.

Při klasifikacích *Change detection* pro dataset dvou časových horizontů již vycházely podobné hodnoty zpracovatelských (PA) a uživatelských (UA) přesností pouze pro kategorie *Travnaté povrchy a Kamenná moře a antropogenní plochy*. Ostatní kategorie neměly mezi přesnostmi PA a UA stálý klesající či stoupající trend. Nejnižší hodnoty vyšly při změnách mezi roky 2002 a 2013 pro kategorii *Kleč řídká* → *Kleč hustá* (PA 22,73 %, UA 27,78 %). Pixely této kategorie byly většinou mylně zařazovány mezi *Kleč řídkou*. Koeficienty Kappa zde vycházely nejhůře pro změny mezi roky 2002 a 2013 (0,82), nejlépe pro změny mezi roky 1992 a 2002 (0,86).

Celkové přesnosti OA pro hodnocení snímku pouze z jednoho roku metodou *Maximum Likelihood* a pro hodnocení změn mezi dvěma snímky metodou *Change detection*, byly velmi podobné. Pohybovaly se mezi hodnotami 86,04 % (rok 1984 MLC) a 88,64 % (rozdíl mezi roky 1992 a 2002 *Change detection*).

Při postklasifikační kombinaci výsledků jednotlivých let MLC bylo nutno chyby kombinovaných snímků sečíst, čímž by nejlepší přesnost OA mohla vycházet mezi roky 2002 a 1992 na 75,35 %. OA pro další kombinace klasifikací MLC vyšla pro roky 1984 a 1992 73,48 % a pro roky 2002 a 2013 74,87 %.

Při klasifikaci snímku pro rok 1984 metodou *Maximum Likelihood* lze na západní části území pozorovat větší množství pixelů zařazených do kategorie *Vřes*. To pravděpodobně souvisí se samotným snímkem *Landsat Surface Reflection* pro rok 1984, na kterém ještě není vegetace zelená. V následujícím hodnoceném roce 1992 pixely kategorie *Vřes* na většině západního území vymizí, stejně jako v letech 2002 a 2013. Klasifikace *Change detection* v tomto sporném území žádné pixely do kategorie *Vřes* nepřiradila, a ani zkoumání snímku *Landsat* neukazuje pravděpodobnost jejich výskytu.

Kupková a kol. (2017) se zabývala klasifikací krkonošské tundry pomocí dat APEX, AISA Dual a Sentinel-2A. Pomocí dat Sentinel-2A je zpracována mapa pro stejné

zájmové území metodou *Maximum Likelihood*. Z deseti hodnocených kategorií povrchu nejlépe vycházely kategorie *Klečové porosty* (PA 100 %, UA 88,51 %) a *Kamenná moře a antropogenní plochy* (PA 92,68 %, UA 95 %), což se potvrdilo i u této studie. Přesnost kategorie Vřes měla jednu z nejnižších přesností (PA 37,78 %, UA 42,5 %), což je také podobné, avšak u kategorie Mokřad vyšla velmi vysoká uživatelská přesnost (PA 56,76 %, UA 91,3 %). Přesnost OA zde vyšla 77,7 %, což je menší přesnost, než vyšla v této studii.

Také Karvánek (2014) zpracovával řízenou klasifikaci *Maximum Likelihood* pro 8 kategorií krajinného pokryvu a následný překryv snímků, ovšem pro data z družice SPOT. Pro snímky z roku 1999 dosáhl celkové přesnosti OA 81,5 %, pro snímky z roku 2007 83,25 %. Dosáhl tedy touto metodou vyšší přesnosti než tato studie.

Změny, které byly zkoumány v teoretické části práce, konkrétně odlesňovací práce, výsadby kleče pouze do roku 1992 (Harčarik a Jiříšťa 2006; Harčarik 2013; Flousek 2010) jsou sice od určité rozlohy na mapách změn krajinného pokryvu patrné, jak je dále uvedeno v závěru, k určení přesných rozloh změnových kategorií bych je ale nedoporučovala.

Také je na všech mapách změn krajinného povrchu (přílohy č. 6-11) vidět přirozené šíření a zahušťování porostů kleče.

## 8. Závěr

V práci jsou pomocí teoretického popisu, grafů, tabulek a map zdokumentovány změny krajinného pokryvu nad horní hranicí lesa v Krkonošském národním parku. Při klasifikacích bylo hodnocení provedeno ve čtyřech časových horizontech od 80. let až do současnosti pomocí dat Landsat (roky 1984, 1992, 2002 a 2013). K šesti hodnoceným kategoriím povrchu (*Kleč hustá*, *Kleč řídká*, *Travnaté povrchy*, *Vřes*, *Mokřad* a *Kamenná moře a antropogenní povrchy*) bylo při hodnocení kleče přidáno několik kategorií změnových, a to podle konkrétních změn v hodnocených časových horizontech (*Travnaté povrchy* → *Kleč řídká*, *Kleč řídká* → *Kleč hustá*, *Kleč řídká* → *Travnaté povrchy*, *Kleč hustá* → *Kleč řídká*).

Nejprve byla provedena klasifikace jednotlivých scén pomocí klasifikátoru Maximum Likelihood, a následně hodnocení změn na základě jejich překryvů. Celková přesnost samostatných scén vycházela nejlépe pro snímek z roku 1992 (88,44 %), nejhůře pro snímek nejstarší (1984, celková přesnost 86,04 %). Z hodnocených kategorií povrchu měly nejlepší přesnosti kategorie *Kleč hustá*, *Kleč řídká* a *Travnaté povrchy*. Nejhorších přesností dosahovaly kategorie *Vřes* a *Mokřad*.

Hodnocení změn na základě jejich překryvů by mělo odhadem dle celkových přesností pro jednotlivé snímky celkové přesnosti mezi 73,48 % (pro hodnocení změn mezi roky 1984 a 1992) a 75,35 % (mezi roky 1992 a 2002).

Druhým způsobem hodnocení krajinných změn byla jejich přímá detekce nad datasetem vícera snímků. Nejlepší výsledek byl opět získán pro změny mezi roky 1992 a 2002 (celková přesnost 88,64 %, Kappa koeficient 0,86). Změny mezi roky 1984 a 1992 byly určeny s celkovou přesností 86,63 % (Kappa koeficient 0,84) a nejhůře dopadla celková přesnost pro změny mezi roky 2002 a 2013 (86,11 %, Kappa koeficient 0,82).

Bylo zjištěno, že klasifikace přímou detekcí dosahuje výrazně lepších přesností. Pro zkoumané území byly touto metodou s vysokou přesností zařazeny kategorie *Kamenná moře a antropogenní plochy* (nejhorší zpracovatelská a uživatelská přesnost 96,40 % a 82,95 %), a dále kategorie *Kleč hustá* (88,46 % a 94,85 %).



Změny v podobě prořezávání kleče uvedené v Plánu péče o Krkonošský národní park (Flousek 2010) jsou na mapách změn mezi roky 2002 a 2013 (přílohy č. 10 a 11) patrné, metody se však neshodují v rozloze těchto změn. Také u map změn krajinného pokryvu mezi lety 1984 a 1992 (přílohy č. 6 a 7) je vidět na souvislých územích úbytek kleče (kategorie *Kleč řídká* → *Travnaté povrchy*).

Na všech mapových výstupech změn krajinného pokryvu (přílohy č. 6–11) lze pozorovat přirozené rozšiřování a zahušťování klečových porostů.

Přestože byly přesnosti klasifikací na datech Landsat poměrně vysoké, nedoporučovala bych tato data pro studie, malých oblastí, kde je potřeba získat přesné rozlohy změn krajinného povrchu. Podstatnou část hodnoceného území tvoří plochy, kde se na území jednoho pixelu (30×30 m) mísí více druhů krajinného pokryvu.

Krkonošská arкто-alpínská tundra je jedinečným přírodním reliktem z dob ledových. Zájmem vědců dnešní doby je toto prostředí zachovat a chránit. Aby bylo krkonošskou tundru možno zachovat co možná nejlépe, jsou zpracovávány studie zaměřené na její vývoj v minulosti i pravděpodobný vývoj do budoucna.

Studie území pomocí dat Landsat sice má význam, avšak pro zkoumání rozloh změn území nad horní hranicí lesa v Krkonošském národním parku bych spíše doporučila data s lepším prostorovým rozlišením.

## Použitá literatura

1. ABHISHEK, B. (2012): Seminar on a review of change detection techniques. Indian Institute of Technology Roorkee.
2. ALQURASHI, A. F., KUMAR, L. (2013): Investigating the Use of Remote Sensing and GIS Techniques to Detect Land Use and Land Cover Change: A Review. *Advances in Remote Sensing*, 02, 02, 193–204.
3. BARTOŠ, M. (1997): Největší povodeň v Krkonoších 1897. Správa KRNAP (Krkonošské muzeum), Vrchlabí.
4. BERNHÄUSEROVÁ, V. (2016): Změny rozlohy porostů borovice kleče v Krkonoších. Univerzita Karlova v Praze, Praha.
5. BRADÁČOVÁ, J. (2001): Mapování výskytu a početnosti vybraných antropofyt z čeledí Asteraceae a Urticaceae v Krkonoších. Pdf UHK, Hradec Králové.
6. FLOUSEK, J. ed. (2010): Plán péče o Krkonošský národní park a jeho ochranné pásmo (2010-2020) část B. Správa Krkonošského národního parku Vrchlabí.
7. HÁLEK, V. (2005): Jak viděli Krkonoše: Vítězslav Hálek - Labská louka. *Krkonoše - Jizerské hory*, 2, 50–51.
8. HARČARIK, J. (2009): Krkonoše a klimatické změny: Klimatické změny a rostlinstvo. *Krkonoše - Jizerské hory*, 5, 42, 24–25.
9. HARČARIK, J. (2013): Management klečových porostů v Krkonošském národním parku. *Ochrana přírody*, 2, 20–22.
10. HARČARIK, J., JIŘIŠTĚ, L. (2006): Rozvolňování výsadeb kleče na přírodovědně hodnotných lokalitách. *Ročenka KRNAP 2005*, 37–39.
11. HOLUBIČKOVÁ, B. (1980): Autochtonní a introdukovaná *Pinus mugo* Turra v sudetských pohořích. *Opera Corcontica*, 17, 15–29.
12. CHYTRÝ, M., KUČERA, T., KOČÍ, M., ŠUMBEROVÁ, K., SÁDLO, J., NEUHÄUSLOVÁ, Z., HÁJEK, M., RYBNÍČEK, K., KRAHULEC, F., KUČEROVÁ, A., KOLBEK, J., HUSÁK, Š. (2001): Katalog biotopů České republiky. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha.
13. JAKEŠOVÁ, L. (2014): Možnosti objektově-orientované klasifikace pro určování vybraných biotopů nad horní hranicí lesa v Krkonošském národním parku. *Bakalářská práce*, 1–60.
14. KARVÁNEK, M. (2014): Hodnocení změn krajiny v Krkonošském národním parku s využitím dálkového průzkumu Země a krajinných metrik. *Bakalářská práce*, 1–56.
15. KOCIÁNOVÁ, M., ŠTURSA, J., VANĚK, J. (2015): Krkonošská tundra. Správa Krkonošského národního parku, Vrchlabí.

16. KOLÁŘ, J. (2008): Digitální zpracování obrazových dat. Czech Space Office, Praha.
17. KUDLER, J., VEBER, J. (1965): Poznatky o oscilaci hustoty hřebenule ryšavé neodiprion sertifer v Krkonoších v roce 1964 a výsledky introdukce virové nákazy. *Opera Corcontica*, 2, 99–113.
18. KUPKOVÁ, L., ČERVENÁ, L., SUCHÁ, R., JAKEŠOVÁ, L., ZAGAJEWSKI, B., BŘEZINA, S., ALBRECHTOVÁ, J. (2017): Classification of Tundra Vegetation in the Krkonoše Mts. National Park Using APEX, AISA Dual and Sentinel-2A Data. *European Journal of Remote Sensing*, 1, 50, 29–46.
19. KYNCL, T., WILD, J. (2004): Použití letokruhové analýzy pro datování velkoplošného odumírání kleče v Krkonoších. *Opera Corcontica*, 41, 434–440.
20. LAUER, D. T., MORAIN, S. A., SALOMONSON, V. V. (1997): The Landsat program: Its origins, evolution, and impacts. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 7, 63, 831–838.
21. LOKVENC, T. (1966): Přemnožení hřebenule ryšavé (*Neodiprion sertifer*) na kosodřevině v Krkonoších v letech 1880-1884. *Opera Corcontica*, 3, 189–191.
22. LOKVENC, T. (1978): Toulky krkonošskou minulostí. Kruh, Hradec Králové.
23. LOKVENC, T. (1983): Společenský vývoj v Krkonoších. *Krkonošský národní park*, 116–137.
24. LOKVENC, T. (2001): History of the Giant Mts.' dwarf pine (*Pinus mugo Turra* ssp. *pumilio* Franco). *Opera Corcontica*, 38, 21–42.
25. LOKVENC, T. (2007): Budní hospodářství. Miloš Uhlíř - Baset, Praha, 491–500.
26. LOKVENC, T., MINX, A., NEHYBA, J., STEJSKAL, O. (1994): Rekonstrukce porostů kleče horské (*Pinus mugo turra*) v Krkonoších. *Opera Corcontica*, 31, 71–92.
27. LOKVENC, T., ŠTURSA, J. (1985): Vliv podmínek prostředí na fruktifikaci dřeviny (*Pinus mugo Turra*) v roce 1981. *Opera Corcontica*, 22, 121–138.
28. MUSIL, J. (1981): Přehled vývoje komunikací v oblasti Krkonoš a Podkrkonoší. *Opera Corcontica*, 18, 105–138.
29. OLOFSSON, P., FOODY, G. M., STEHMAN, S. V., WOODCOCK, C. E. (2013): Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129, 122–131.
30. SOJÁK, J., REJMÁNEK, M., KOVÁŘ, P. (1976): Některé naléhavé problémy ochrany přírody. *Živa*, 4, 122–123.
31. STOW, D. A., HOPE, A., MCGUIRE, D., VERBYLA, D., GAMON, J., HUENNRICH, F., HOUSTON, S., RACINE, C., STURM, M., TAPE, K., HINZMAN, L., YOSHIKAWA, K., TWEEDIE, C., NOYLE, B., SILAPASWAN,

- C., DOUGLAS, D., GRIFFITH, B., JIA, G., EPSTEIN, H., WALKER, D., DAESCHNER, S., PETERSEN, A., ZHOU, L., MYNENI, R. (2004): Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 3, 89, 281–308.
32. ŠTURSA, J. (1964): Synantropní vegetace v okolí Luční boudy. *Opera Corcontica*, 1, 160–161.
33. ŠTURSA, J. (1966): *Pinus mugo* subsp. *pumilio* (Haenke) Franco ve Východních Krkonoších (Studie dendroekologická). *Opera Corcontica*, 3, 31–76.
34. ŠTURSA, J. (2013): The development of opinions on the geo-biodiversity of the Giant Mountains' arctic-alpine tundra and its conservation. *Opera Corcontica*, S, 50, 55–74.
35. U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2015): Landsat Surface Reflectance Data, Fact Sheet 2015-3034, <https://pubs.usgs.gov/fs/2015/3034/> (19. 9. 2017).
36. U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2016): Landsat—Earth observation satellites, Fact Sheet 2015-3081, <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081> (19. 9. 2017).
37. VÍTKOVÁ, M., VÍTEK, O., BRANIŠ, M. (1999): Cestní síť v subalpínském a alpínském stupni západních Krkonoš - historie a současnost. *Opera Corcontica*, 36, 133–152.
38. VÍTKOVÁ, M., VÍTEK, O., MÜLLEROVÁ, J. (2012): Antropogenní změny vegetace nad horní hranicí lesa v Krkonosském národním parku s důrazem na vliv turistiky. *Opera Corcontica*, 49, 5.
39. WILLIAMS, D. L., GOWARD, S., ARVIDSON, T. (2006): Landsat: yesterday, today, and tomorrow. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 10, 72, 1171–1178.
40. ZHU, Z., WOODCOCK, C. E. (2014): Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171.
41. ZUMAN, F. (1931): Kolonisté v Krkonoších. *Český časopis historický*, 37, 349–354.

## **Seznam příloh**

*Příloha č. 1: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 1984*

*Příloha č. 2: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 1992 (výstup ze snímku pořízeného 9. 7. 1992)*

*Příloha č. 3: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 1992 (výstup ze snímku pořízeného 25. 7. 1992)*

*Příloha č. 4: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 2002*

*Příloha č. 5: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 2013*

*Příloha č. 6: Mapa klasifikace Change detection pro roky 1984 a 1992*

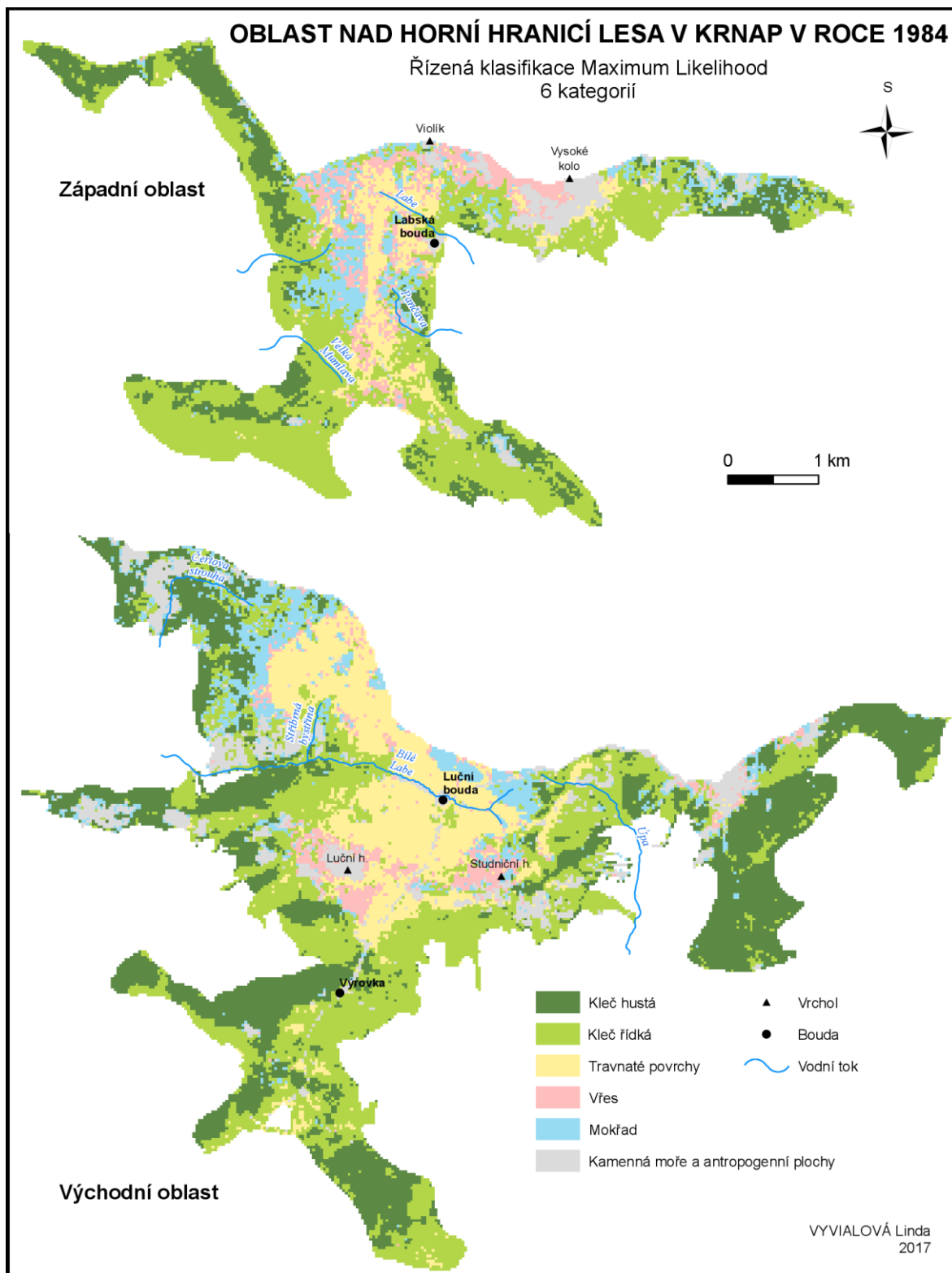
*Příloha č. 7: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro roky 1984 a 1992*

*Příloha č. 8: Mapa klasifikace Change detection pro roky 1992 a 2002*

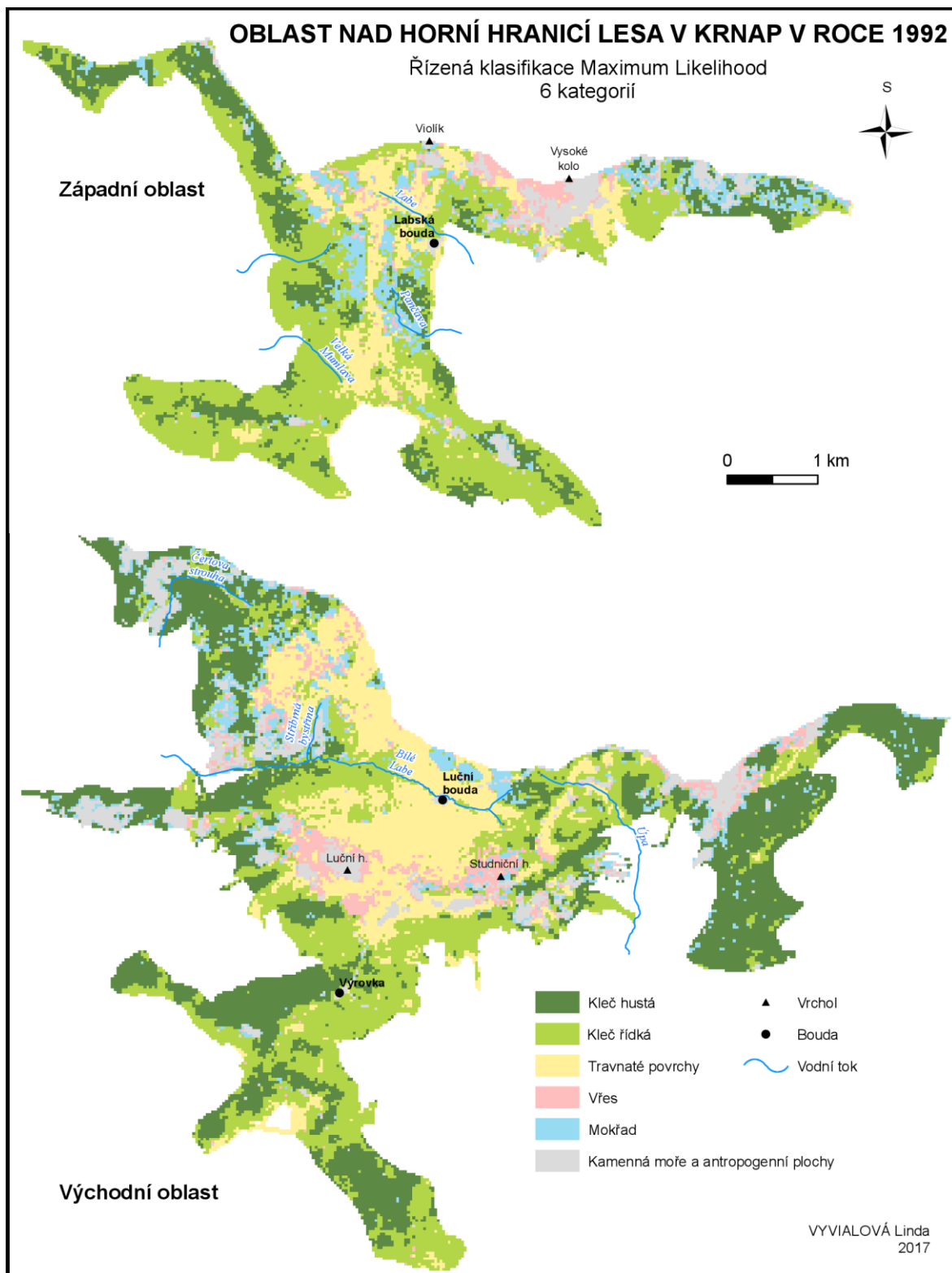
*Příloha č. 9: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro roky 1992 a 2002*

*Příloha č. 10: Mapa klasifikace Change detection pro roky 2002 a 2013*

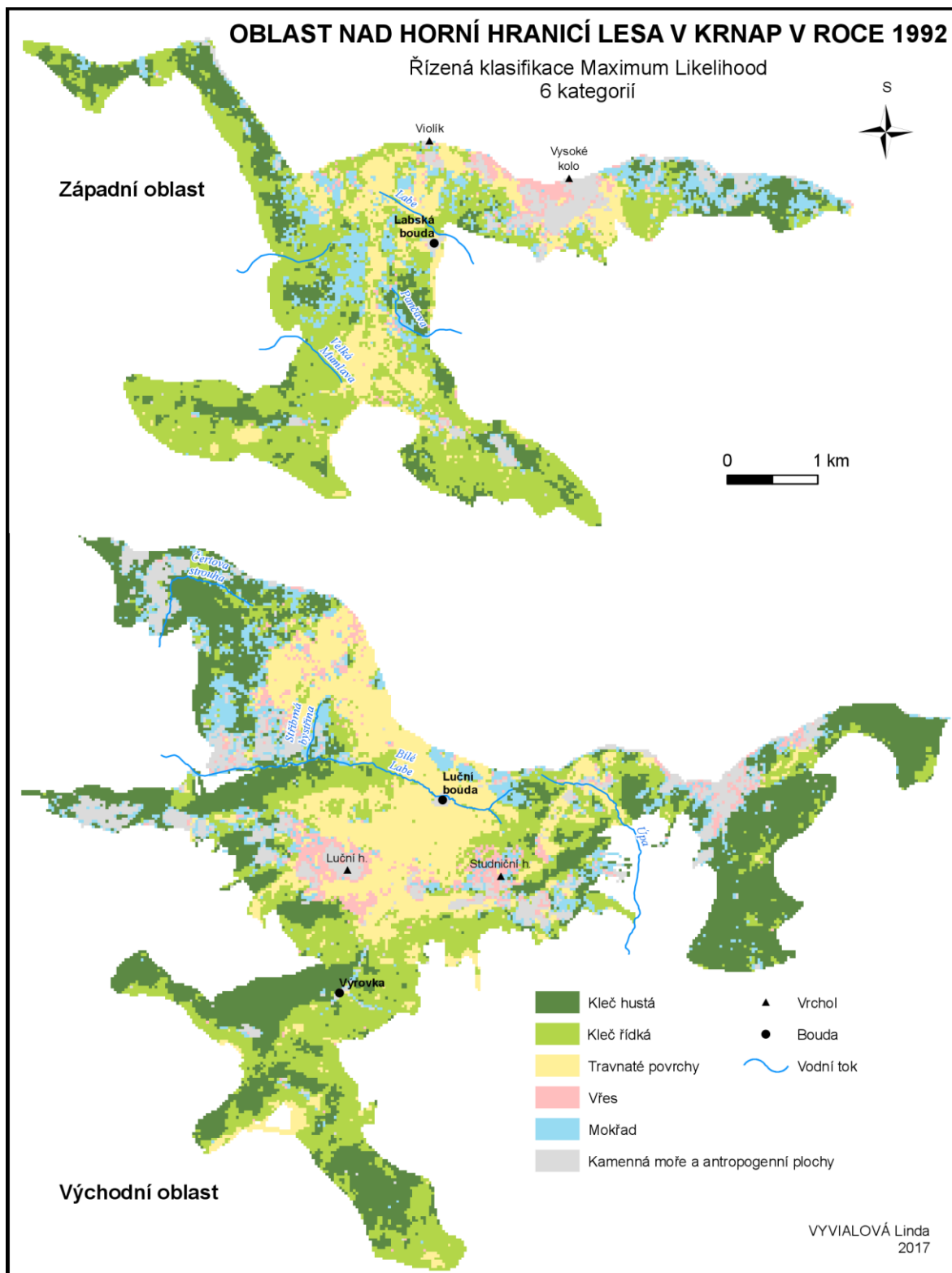
*Příloha č. 11: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro roky 2002 a 2013*



*Příloha č. 1: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 1984*

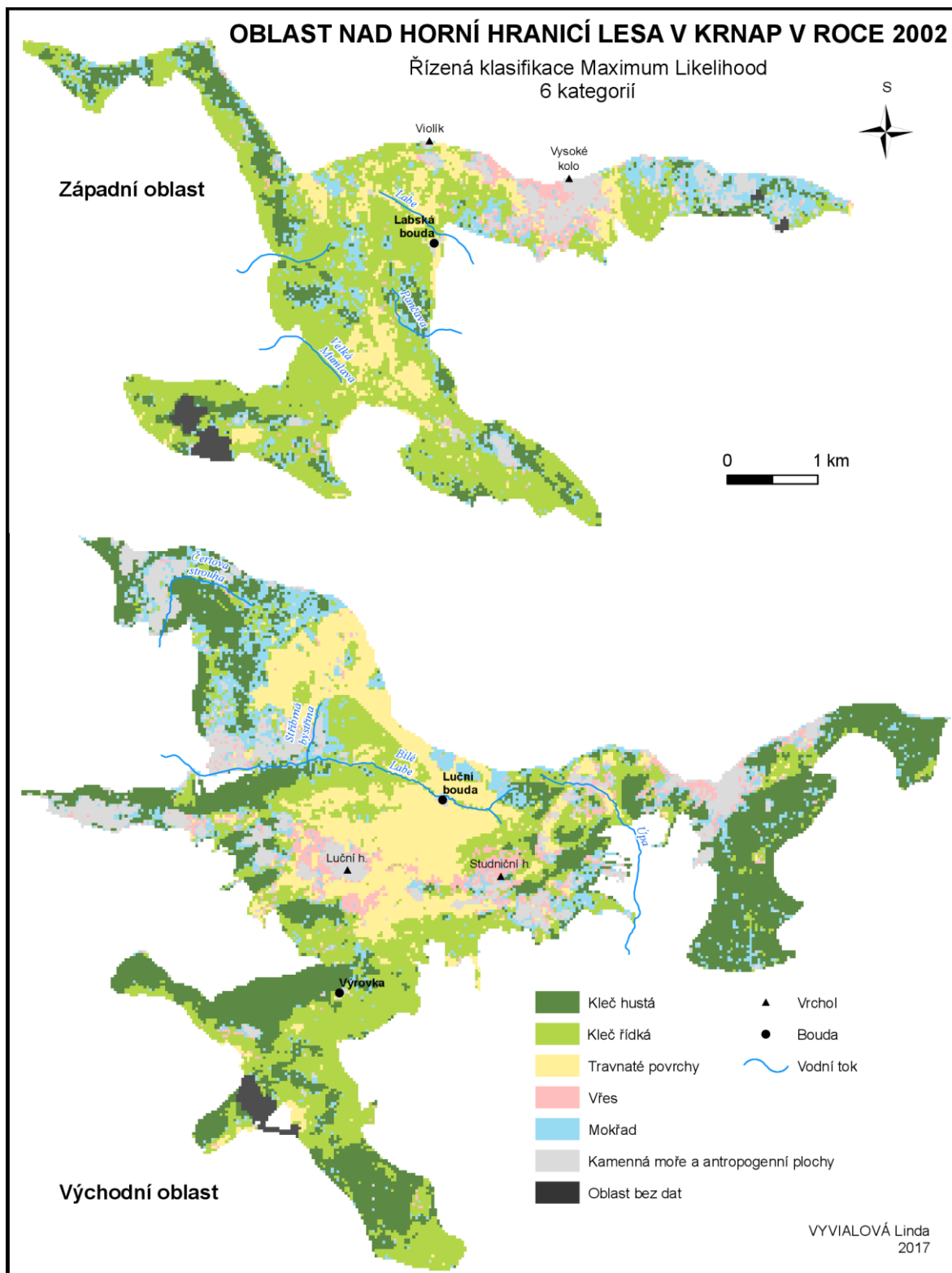


*Příloha č. 2: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 1992 (výstup ze snímku pořízeného 9. 7. 1992)*

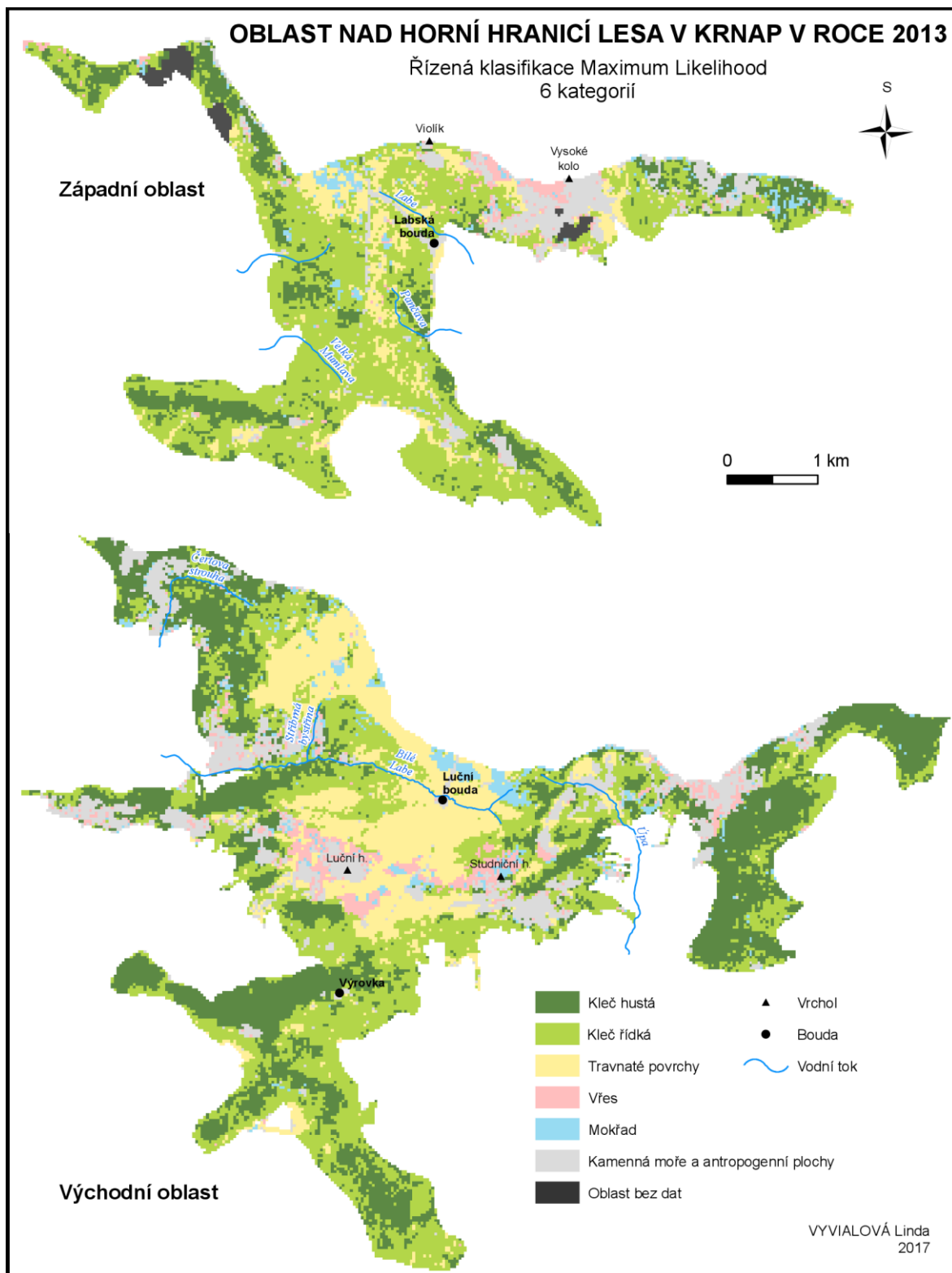


Příloha č. 3: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 1992 (výstup ze snímku pořízeného 25. 7. 1992)

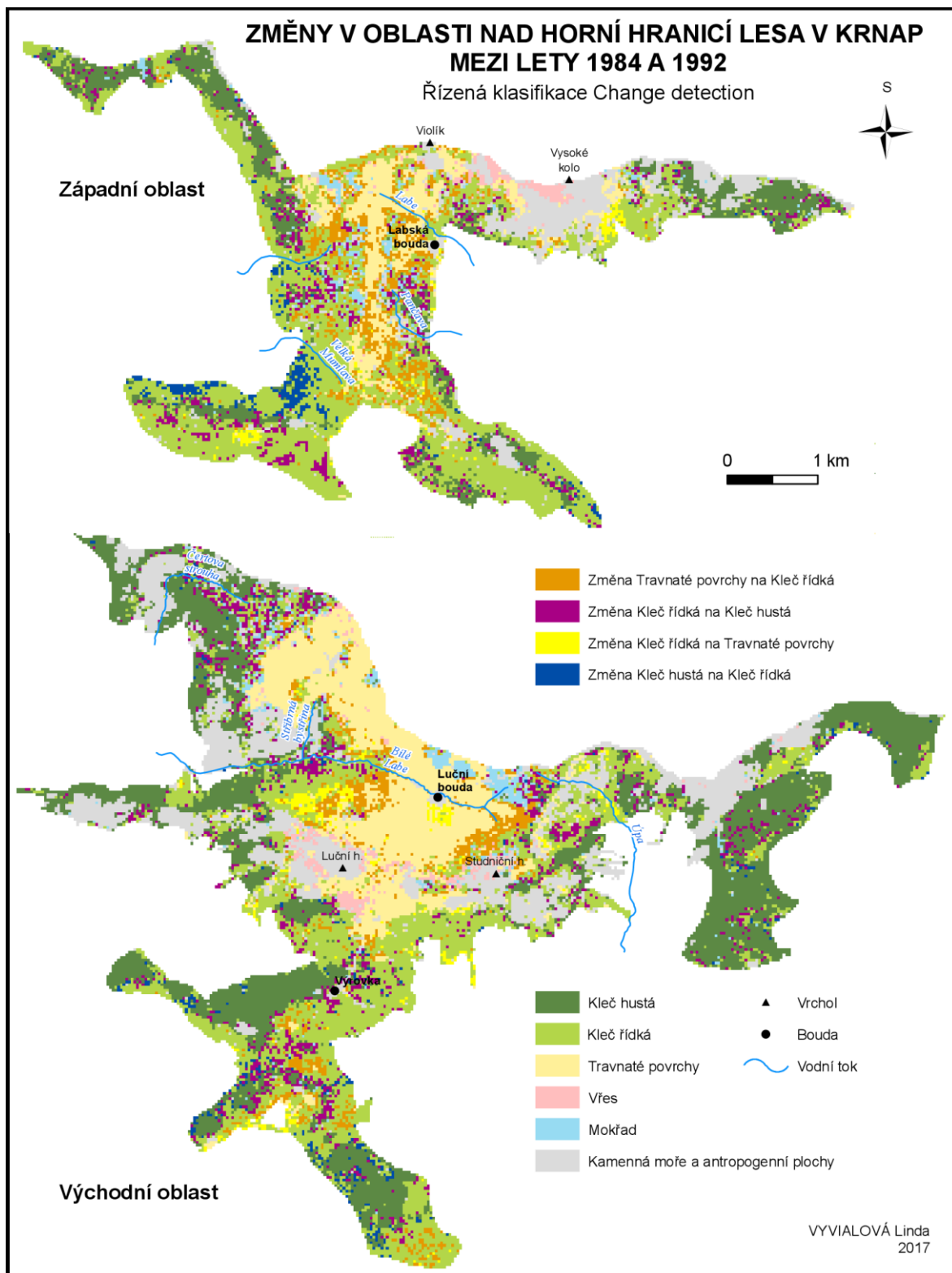




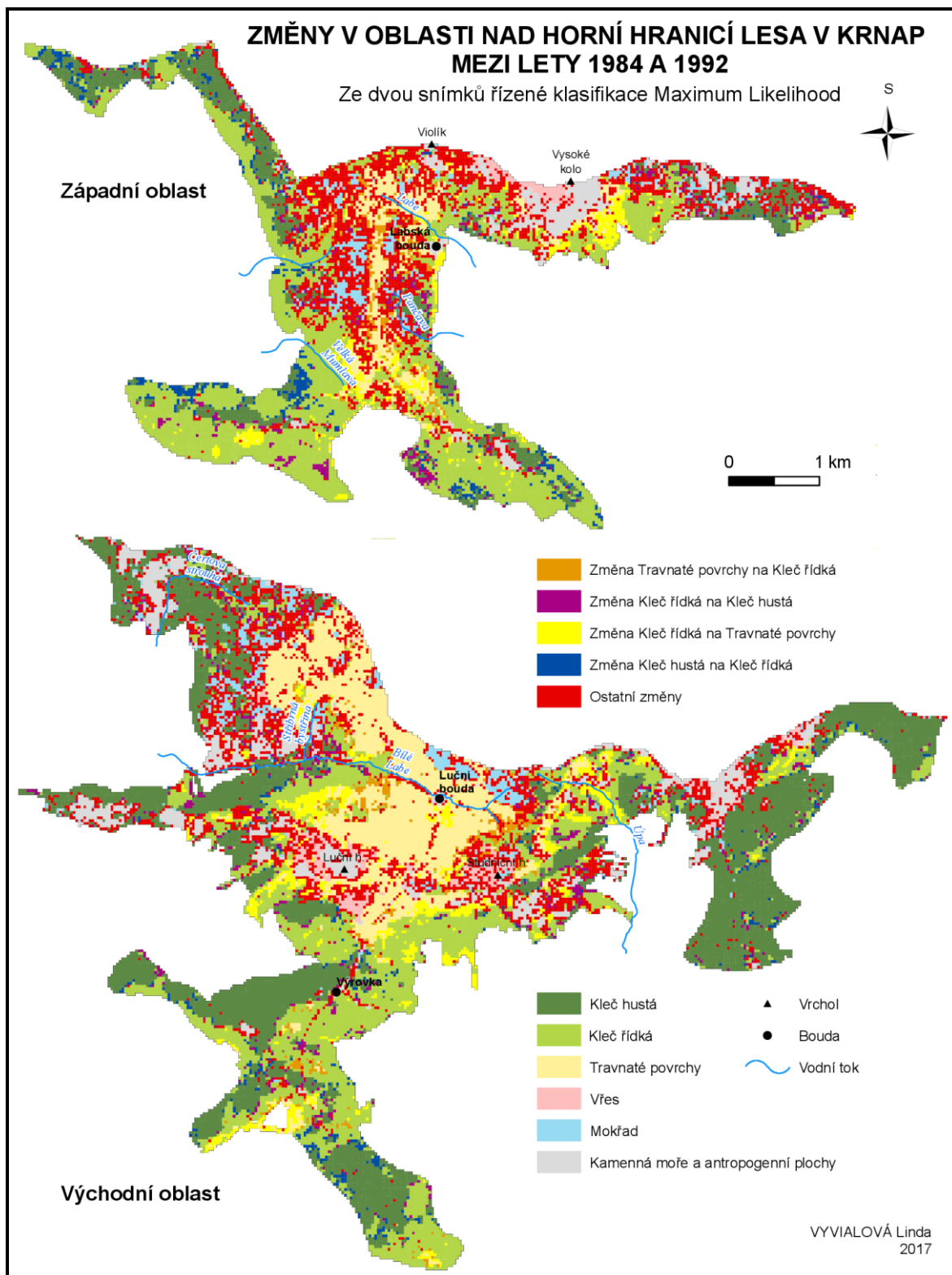
Příloha č. 4: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 2002



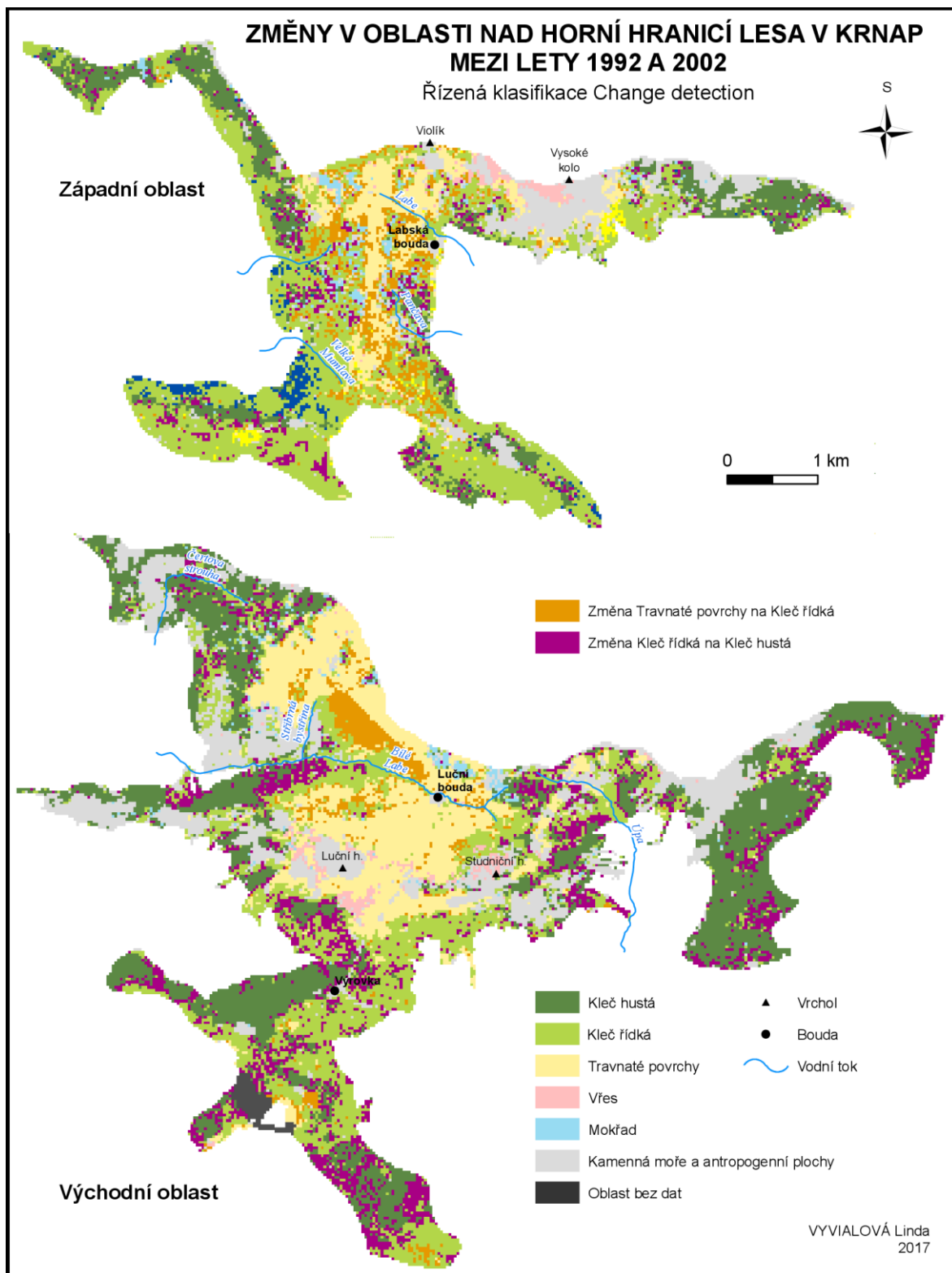
Příloha č. 5: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro rok 2013



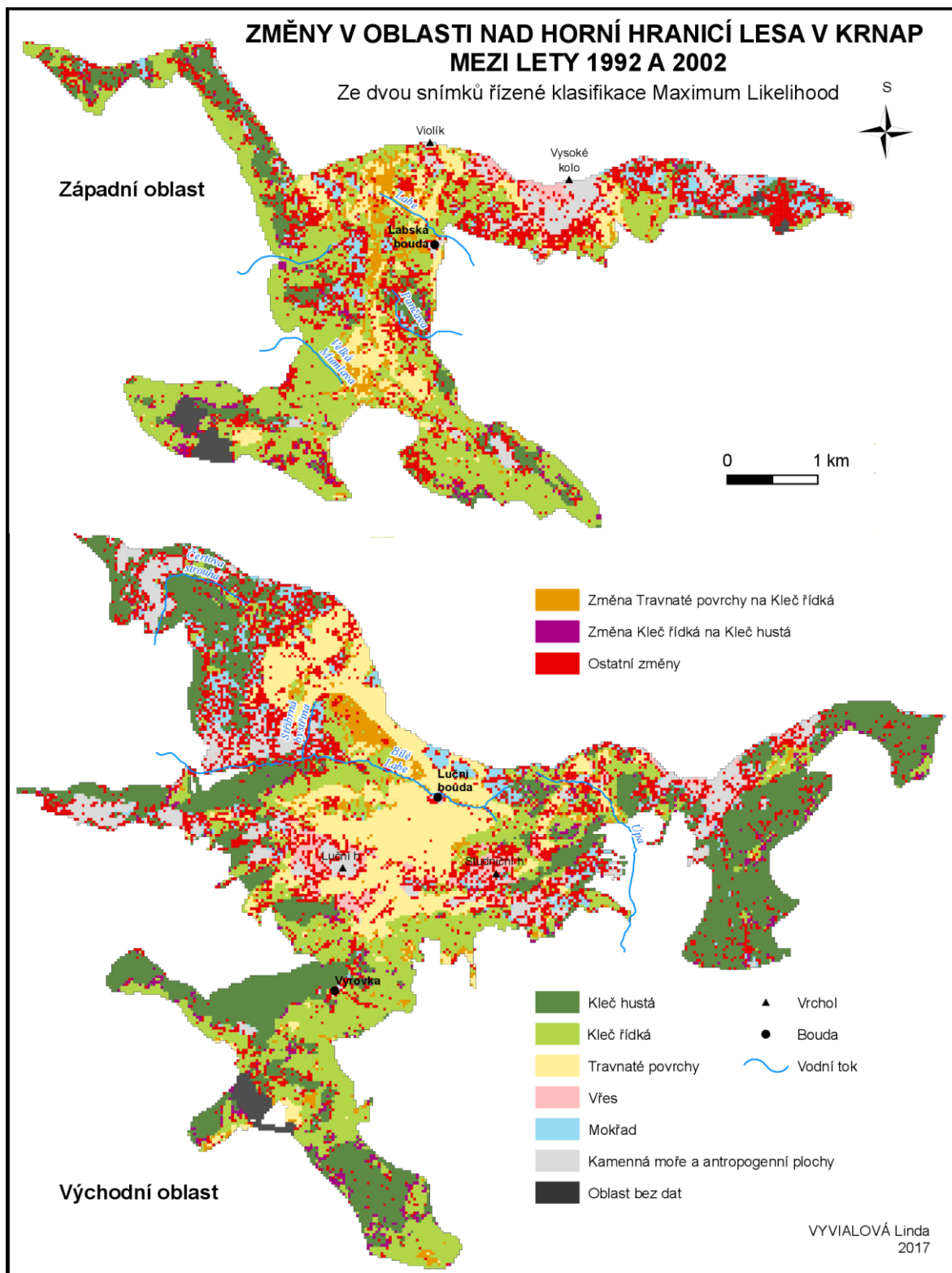
Příloha č. 6: Mapa klasifikace Change detection pro roky 1984 a 1992



Příloha č. 7: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro roky 1984 a 1992

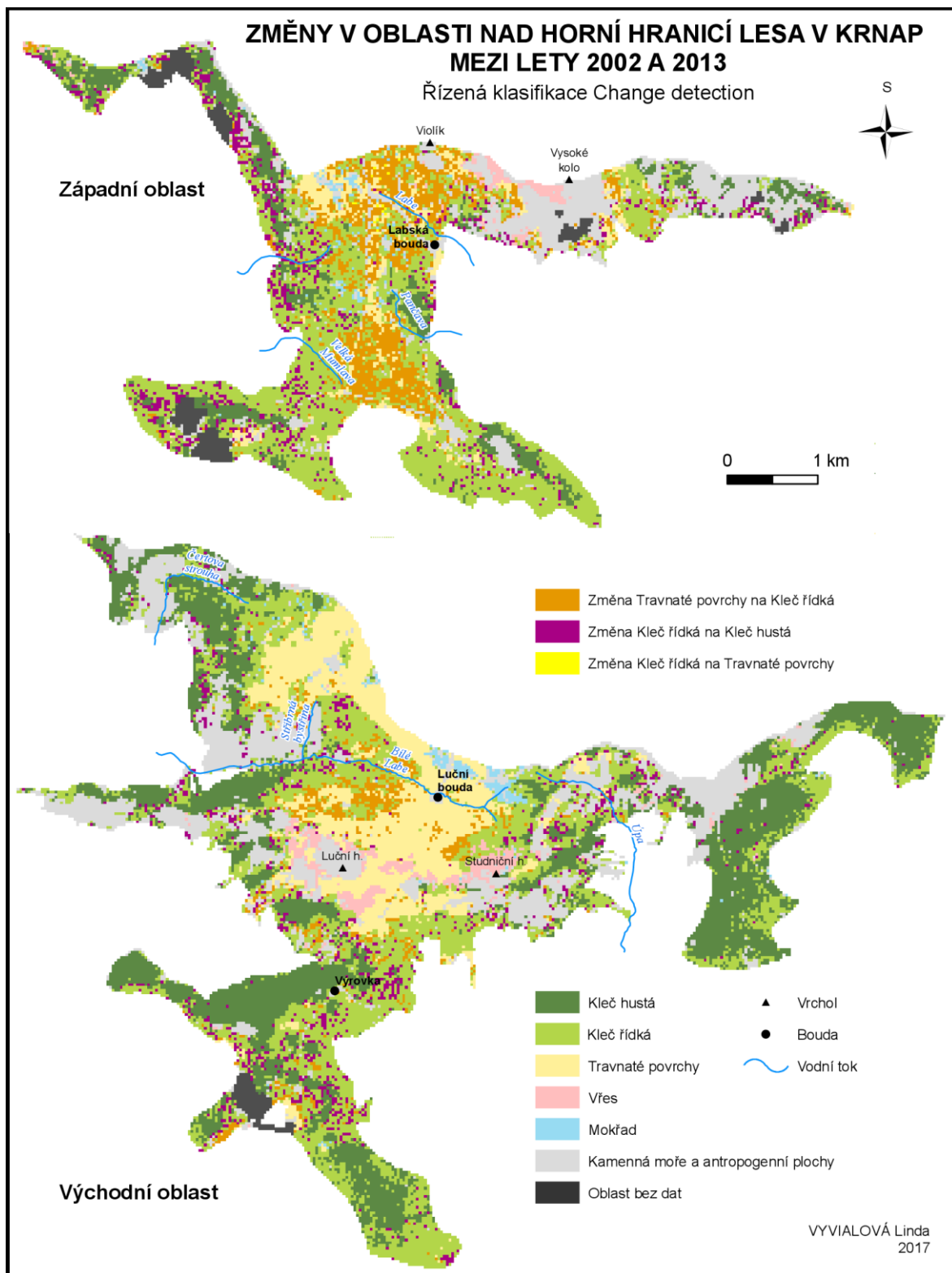


Příloha č. 8: Mapa klasifikace Change detection pro roky 1992 a 2002

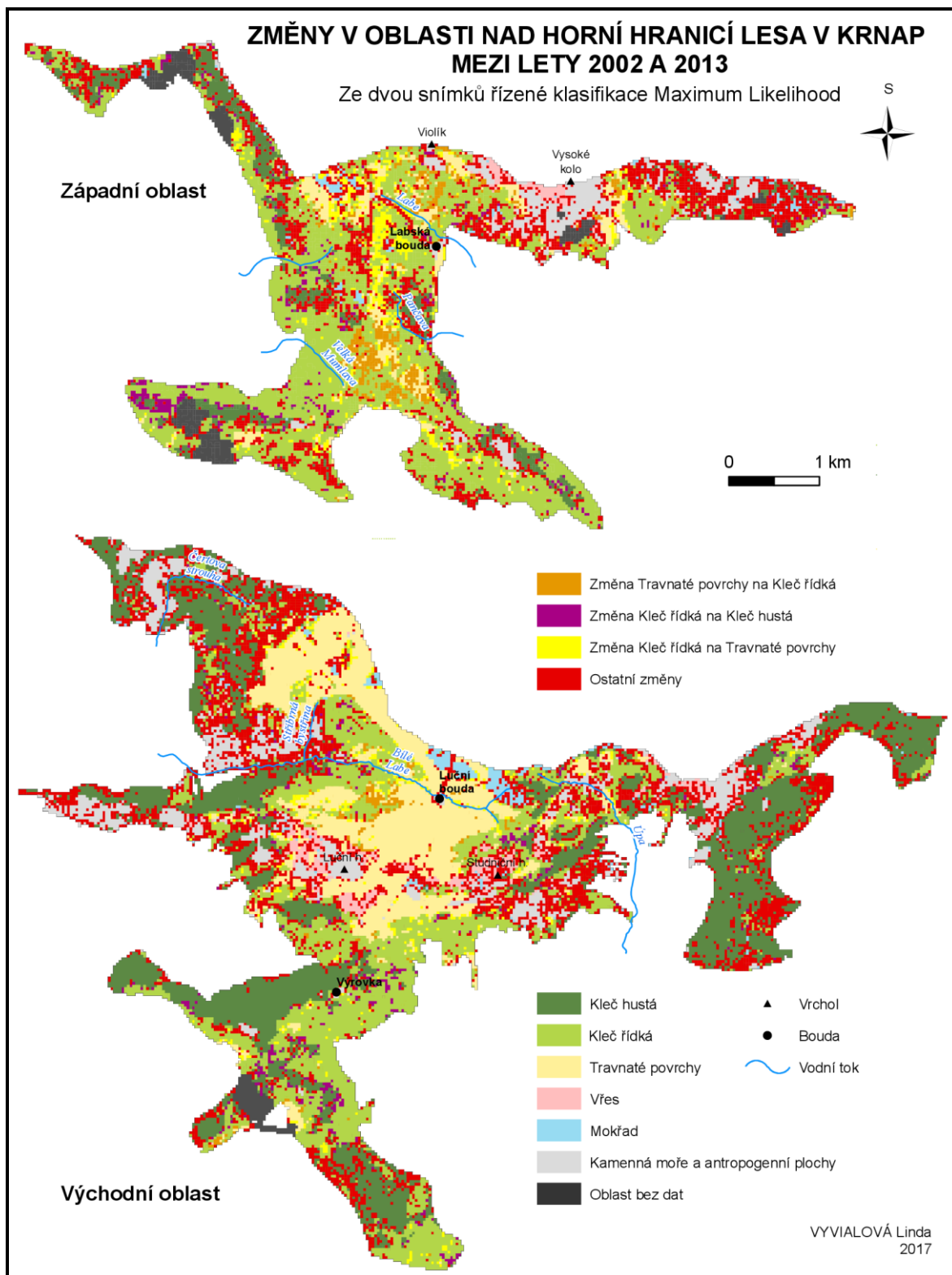


Příloha č. 9: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro roky 1992 a 2002





Příloha č. 10: Mapa klasifikace Change detection pro roky 2002 a 2013



Příloha č. 11: Mapa klasifikace Maximum Likelihood pro roky 2002 a 2013