

TARTU ÜLIKOOL
BIOLOOGIA-GEOGRAAFIA TEADUSKOND
GEOGRAAFIA INSTITUUT

Tõnis Kärdi

Linnade kaugseire: spektrisegu lineaarne lahutamine Landsat Thematic Mapper
satelliidipiltidelt Tartu linna näitel

Magistritöö

Juhendajad:

Professor Rein Ahas (PhD)
TÜ geograafia instituut

Teadur Urmas Peterson (PhD)
Tartu Observatoorium

TARTU 2007

Sisukord

TABELITE LOETELU	3
JOONISTE LOETELU	4
SISSEJUHATUS	6
1. TEOREETILINE TAUST	9
1.1 MUUTUSED LINNARUUMIS, URBANISEERUMINE.....	9
1.2 LINNARUUMI KIRJELDAMINE KAUGSEIRE MEETODITEGA.....	13
1.3 SPEKTRISEGU LAHUTAMINE.....	16
1.3.1 Spektrisegu lahutamise põhimõtted.....	16
1.3.2 Algliikmete valiku põhimõtted.....	17
1.4 VIS MUDELI OSISED ALGLIIKMETENA SPEKTRISEGU MUDELIS.....	19
1.5 SPEKTRISEGU MUDELI SOBIVUSHINNANG.....	21
2. MATERJAL JA METOODIKA	23
2.1 UURITAVA ALA ISELOOMUSTUS.....	23
2.2 KASUTATUD SATELIIDIPILDID JA TARKVARA.....	25
2.3 METOODIKA.....	26
2.3.1 Satelliidipiltide ettevalmistus.....	26
2.3.2 Satelliidipiltide normeerimine.....	26
2.3.3 Algliikmete valik.....	28
2.3.4 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutuste analüüs.....	31
2.3.5 Normeeritud spektrisegu mudeli sobivushinnang.....	32
2.3.6 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutuste sobivushinnang.....	33
2.3.7 Regressioonseose leidmine.....	34
3. TULEMUSED	36
3.1 VETTPIDAVA PINNA FRAKTSIOONIDE ARVUTAMINE JA AJAVAHEMIKUS 1995-2001 VETTPIDAVAS PINNAS TOIMUNUD MUUTUSTE ANALÜÜS.....	36
3.1.1 Normeeritud spektrisegu lahutamine.....	36
3.1.2 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutused ajavahemikus 1995-2001.....	38
3.2 SOBIVUSHINNANG.....	44
3.2.1 Normeeritud spektrisegu lahutamine.....	44
3.2.2 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutused ajavahemikul 1995-2001.....	47
3.3 REGRESSIOONSEOS VETTPIDAVA PINNA PINDALAS TOIMUNUD MUUTUSTE LEIDMISEL.....	51
4. ARUTELU	57
4.1 SATELLIIDIPILTIDE ETTEVALMISTUS JA SPEKTRISEGU LAHUTAMINE.....	58
4.2 SOBIVUSHINNANG JA TULEMUSTE INTERPRETATSIOON.....	61
4.3 MÄRKUSED SPEKTRISEGU LINEAARSE LAHUTAMISE TULEMUSTE KASUTAMISE OSAS.....	65
4.4 TÖÖ TULEMUSED INIMGEOGRAAFIA KONTEKSTIS JA EDASINE UURIMISTÖÖ.....	70
6. KOKKUVÕTE	74
7. SUMMARY	78
KASUTATUD KIRJANDUS	81

TABELITE LOETELU

Tabel 1	Vettpidava pinna (VPP) pindalas toimunud absoluutsed muutused (m ²) ning suhtelised muutused (%) kolmel kontrollalal ajavahemikul 1995-2001. Eraldi on välja toodud ka muutus kõigi kolme kontrollala peale kokku. OF – ortofotolt tuvastatud vettpidav pind, LSM – spektrisegu lineaarsel lahutamisel tuvastatud vettpidav pind, VPP – vettpidav pind.....lk	39
Tabel 2	1995. aasta andmete alusel leitud veamaatriks E_{1995} , mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.....lk	44
Tabel 3	2001. aasta andmete alusel leitud veamaatriks E_{2001} , mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.....lk	44
Tabel 4	1995. ja 2001. aasta andmete aslusel leitud veamaatriks $E_{Fr2001-1995}$, mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt ja 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide vahede sobivust vettpidava pinna pindalas toimunud muutuste kirjeldamisel. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.....lk	48
Tabel 5	Vettpidava pinna (VPP) pindalas toimunud absoluutsed muutused (m ²) ning suhtelised muutused (%) kolmel kontrollalal ajavahemikul 1995-2001. Eraldi on välja toodud ka muutus kõigi kolme kontrollala peale kokku. OF – ortofotolt tuvastatud vettpidav pind, LSM – spektrisegu lineaarsel lahutamisel tuvastatud vettpidav pind, mille pind on korrigeeritud regressiooniseostega, VPP – vettpidav pind.....lk	51
Tabel 6	1995. aasta andmete alusel regressiooniseose abil leitud veamaatriks E_{Fr1995} , mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust peale vettpidava pinna fraktsioonipildi parandamist regressiooniseosega $Fr_{1995} = 0.027 + 1.155 * Fr_{1995}$. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.....lk	52
Tabel 7	2001. aasta andmete alusel regressiooniseose abil leitud veamaatriks E_{Fr2001} , mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust peale vettpidava pinna fraktsioonipildi parandamist regressiooniseosega $Fr_{2001} = 0.013 + 1.446 * Fr_{2001}$. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.....lk	52
Tabel 8	1995. ja 2001. aasta andmete aslusel leitud veamaatriks $E_{Fr2001-1995}$, mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt ja 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud ning regressiooniseostega parandatud vettpidava pinna fraktsioonide vahede sobivust vettpidava pinna pindalas toimunud muutuste kirjeldamisel. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.....lk	52
Tabel 9	Valemi 9) alusel leitud üldiste vigade P võrdlus regressiooniseose kasutamisel (P_{reg}) ja regressiooniseoseta (P). Välja on toodud kõik kolm kontrollala realdi ja kõik koos võetuna. Eristatud on ka 1995. ja 2001. aasta tulemused ning vettpidava pinna pindalas toimunud muutuse kirjeldamise täpsus. Kõik esitatud vead on samasuunalised – ortofotolt leitud fraktsioonid või fraktsioonide muutused on suuremad kui spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud algliikmete fraktsioonid või nende muutused.....lk	52

JOONISTE LOETELU

Joonis 1	Urbaniseerumise faaside tsükliline mudel, mis põhineb rahvastiku muutumisel kesklinnas ja äärelinnades. U – linnastumise, S – eeslinnastumise, D – vastulinnastumise ja R – taaslinnastumise faas. Jämedam must joon näitab terve linnalise aglomeratsiooni populatsiooni muutust. [Berg et al 1982, joonis Antrop 2004 järgi].....lk	10
Joonis 2	Mõned linna- ja linnalähedased alad VIS mudelis [Allikas: Ridd 1995]. CBD – Ärila (<i>Central Business District</i>).....lk	14
Joonis 3	Väljalõige Tartu linna ja selle lähiümbrust kujutavast Landsat TM 1995. aasta kaadrist. Töös kasutatud osa pildist on toodud kastis.....lk	23
Joonis 4	Töös kasutatud 1995. aasta Landsat TM kaadri segunemisruumi projektsioon, mis on moodustatud peakomponentide teisendusega saadud kolme esimese peakomponendi hajuvusgraafikutest. Hajuvusgraafikutel on toodud võimalike algliikmete umbkaudsed asukohad.....lk	27
Joonis 5	Heleda ja tumeda taimkatte, taimkatteta mullapinna ning vettpidava pinna spektraalsed signatuurid enne normeerimist 1995. aasta kaadrit.....lk	27
Joonis 6	Heleda ja tumeda taimkatte, taimkatteta mullapinna ning vettpidava pinna spektraalsed signatuurid pärast normeerimist 1995. aasta kaadrit.....lk	28
Joonis 7	Kolmest esimesest peakomponendist moodustatud hajuvusgraafikud pärast normeerimist kõikidele töös kasutatud satelliidipiltidele.....lk	29
Joonis 8	Kolmest esimesest peakomponendist moodustuv segunemisruum peale veepindade väljamaskimist 1995. aasta kaadrit. Hajuvusgraafikutel on toodud töös kasutatavate algliikmete umbkaudsed asukohad segunemisruumis. VPP – vettpidav pind, TMP – taimkatteta mullapind.....lk	30
Joonis 9	Spektrisegu lahutamisel kasutatavate algliikmete spektraalsed signatuurid töös kasutatud satelliidipiltidelt.....lk	31
Joonis 10	Sobivushinnangu andmiseks kasutatud kontrollalade paiknemine Tartu linnas.....lk	32
Joonis 11	Segu lahutamisel vastavalt valemitele 1) ja 2) saadud VIS mudeli osiste fraktsioonipildid.....lk	36
Joonis 12	1995. aasta tumeda taimkatte algliikme fraktsioon (vasakul) ja taimkatte algliikme fraktsioon (paremal).....lk	37
Joonis 13	Spektraalse segu lahutamise modelleerimata jäänud jääkide alusel leitud mudeli ruutkeskmiste vigade pildid.....lk	38
Joonis 14	Uus-Ihaste kontrollala. a) 1995. aasta ortofoto; b) 2001. aasta ortofoto; ning muutused spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipildilt, kus c) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kasvanud; d) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kahanenud.....lk	40
Joonis 15	Ränlinna kontrollala. a) 1995. aasta ortofoto; b) 2001. aasta ortofoto; ning muutused spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipildilt, kus c) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kasvanud; d) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kahanenud.....lk	41
Joonis 16	Kesklinna kontrollala. a) 1995. aasta ortofoto; b) 2001. aasta ortofoto; ning muutused spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipildilt, kus c) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kasvanud; d) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kahanenud.....lk	43

Joonis 17	Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide võrdlus kõigi kolme kontrollala puhvrites aastatel 1995 ja 2001.....lk	45
Joonis 18	Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide võrdlus kontrollalade kaupa aastatel 1995 ja 2001.....lk	46
Joonis 19	Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide vahede erinevus kõigi kolme kontrollala puhvrites. Positiivsed väärtused näitavad vettpidava pinna fraktsiooni suurenemist puhvris ajavahemikul 1995-2001.....lk	48
Joonis 20	Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide vahede erinevus kolme kontrollala puhvrites. Positiivsed väärtused näitavad vettpidava pinna fraktsiooni suurenemist puhvris ajavahemikul 1995-2001.....lk	49
Joonis 21	Spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide vahepildid enne (vasakus veerus) ja peale parandamist (paremas veerus) kontrollalade kaupa.....lk	53
Joonis 22	Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide võrdlus peale vettpidava pinna fraktsioonipiltide „parandamist” regressioonseosega kõigi kolme kontrollala puhvrites.....lk	55
Joonis 23	Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide vahede erinevuse võrdlus peale vettpidava pinna fraktsioonipiltide „parandamist” regressioonseosega kõigi kolme kontrollala puhvrites. Positiivsed väärtused näitavad vettpidava pinna fraktsiooni suurenemist ja negatiivsed väärtused vähenemist puhvris ajavahemikul 1995-2001.....lk	56
Joonis 24	Uus-Ihaste kontrollalal asuvatel elamumaana registreeritud katastriüksustel ajavahemikul 1995-2001 toimunud muutused vettpidava pinna pindalas....lk	68

Sissejuhatus

Linnades elavate inimeste arv on kasvanud kümnelt protsendilt 1900. aastal umbes viiekümne protsendini ning prognoositavalt tõuseb see 2030. aastaks kuuekümne protsendini kõigist maakera elanikest [O'Meara Sheehan 2002, Schneider et al. 2003]. Linnaalad katavad tänasel päeval maismaa pinnast vähem kui ühe protsendi, kuid see pind on kiiresti suurenemas, kuna järjest enam lainevad linnaalad looduslike ja põllumajanduslike maade aladele [Carlson & Arthur 2000]. O'Meara Sheehan [2002] märgib, et paljudel juhtudel, kus linnas elavate inimeste arv pole suurenenud (või on see isegi vähenenud), on linn pindalaliselt siiski suuremaks kasvanud, ning et enamalt jaolt toimub linnade kasv ümberkaudsete põllumajanduslikus kasutuses olevate maade arvelt, sest see osutub kinnisvara arendustegevusel soodsamaks kui kasutuses olnud elamu- vms maade taaskasutamine. Lisaks jääb põllumajandus teistele ärivaldkondadele vaba majandusliku konkurentsi tingimustes alla, mistõttu võib põllumajandust vähem tulusaks pidada kui näiteks elamuehitust või kinnisvaraarendust [Tammaru 2000a].

Linnastumist on Eestis uuritud peamiselt rahvastikuandmete baasil (nt Sjöberg & Tammaru 1999b, Tammaru 2000b, 2001, Leetmaa 2004 jne), sest linnastumist iseenesest on defineeritud rände protsesside kaudu. Kaugseire võimalused on siinjuures suhteliselt läbi uurimata. Kaugseire vahenditega ei ole võimalik hinnata otseselt elanikkonna paiknemist ja rännet ruumis. Samas toob elanikkonna "ümberpaiknemine" linnaruumis ja selle lähiümbruses kaasa maakasutuse muutuse, mille läbi muutub nende alade maakate. Maakatte muutust on aga võimalik kaugseire vahenditega jälgida. Peamiseks muutuseks, mille linnaliste alade laienemine kaasa toob, on looduslike maakatete asendamine ehitatud pindadega.

Vettpidava pinna võib lugeda maakattetüübiks, mis on omane ehitatud keskkonnale. Vettpidav pind on iseenesest koondnimetus erinevatele materjalidele, mis ei lase sademeveel allasadamise kohas maapinda imbuda, nt asfalt, betoon, klaas, plekk jne. Muutused vettpidava pinna pindalas on tihedalt seotud urbaniseerumise protsessidega. Eeslinnastumise käigus tekkinud uus-asumid endisele põllumajanduslikus kasutuses olnud maa-alale toovad endaga kaasa vett läbilaskva pinna osalise muutmise vettpidavaks pinnaks – auto- ja kõnniteedeks, parkimisplatsideks, hooneteks jne.

Kui linnastumise protsesside puhul võib vettpidava pinna lugeda linnastumise „indikaatoriks“, siis nt sademevee veeäravoolu ja üleujutuste seisukohast on see otseselt määravaks teguriks. Linnalistel aladel on tekitatud ulatuslikke vettpidava pinnaga kaetud alasid, mis juhivad

sademevee kiiresti minema, tekitades äravoolu suubumisaladel suuri üleujutusi, mis on Lääne-Euroopas hetkel suureks probleemiks. Seetõttu võib linnaalade ja nende lähikümbruse vettpidava pinna kaardistamise lugeda oluliseks kahest aspektist. Ühelt poolt inimlik huvi (linnastumisega kaasnevate protsesside mõistmine), teisalt praktiline vajadus (maakattemuutusest tulenevate võimalike probleemide ennetamine).

Kaugseire vahendite plussiks võrreldes teiste andmeallikatega (nt rahvaloenduse andmed) on asjaolu, et võrdlevat analüüsi on võimalik läbi erineval skaalal (alates ühe riigi piirkonnast kuni erinevate riikide territooriumiteni) ilma, et tekiks suuremat probleemi erinevate andmete kokkusobitamisest. Kaugseire tehnoloogia pakub vettpidava pinna kaardistamiseks ja selle ulatuse hindamiseks erinevaid võimalusi, millest käesolevas töös tuleb käsitleda üks, spektrisegu lineaarne lahutamine. Kasutatavad satelliidipildid on satelliidi Landsat vahendatud ja nende piksli külje pikkuseks maapinnal on 30 meetrit.

Antud töö eesmärgiks on kontrollida spektrisegu lineaarse lahutamise meetodiga vettpidava pinna suhtelise paiknemise kaardistamise täpsust satelliidi Landsat vahendatud keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidelt. Seega on uurimisülesande raskuskese satelliidipiltide töötlusel ja veahinnangul, reaalne maakattemuutuseid põhjustavate linnastumise protsesside uurimine jääb praegusel hetkel antud töö raamistikust välja. Samas on äärmiselt vajalik selle töö tulemused lahti mõtestada ka inimgeograafia seisukohast, mida saab teha pärast töö praktilise osa tulemuste selgumist ja analüüsi. Magistritöö eesmärgi täitmiseks kavatsen: 1) kaardistada vettpidava pinna suhtelise paiknemise Tartu linnas ja selle lähikümbruses satelliidi Landsat vahendatud keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidelt 1995. ja 2001. aastal; 2) anda sobivushinnang leitud vettpidava pinna kaartidele nii mõlemal uuritud aastal eraldi kui ka leitud muutuse-kaardile ortofotodelt digitaliseeritud vettpidava pinna kaartide abil; 3) analüüsida leitud vettpidava pinna suhtelise pindala kaartide sobivust linnades ja nende lähikümbruses toimuvate maakatte muutuse uurimiseks, tuues välja peamised kitsaskohad; 4) saadud tulemused kokku võtta ja panna need inimgeograafia konteksti.

Selle saavutamiseks annan magistritöö esimeses, teoreetilises osas lühiülevaate linnastumise olemusest, peatun kaugseire võimalustel linnadega tegelemisel ning tutvustan spektrisegu lineaarse lahutamise meetodit. Teises osas tutvustan töös kasutatavat metoodikat. Kolmas osa tutvustab magistritöö praktilise töö tulemusi. Magistritöö neljas, diskussiooniosa esitab peamised arutelulised küsimused, mis on seotud spektrisegu lineaarse lahutamise meetodi rakendamisega vettpidava pinna kaardistamiseks. Selle käigus soovin ka välja tuua kasutatud meetodi peamised puudused ja selle plusspooled vettpidava pinna kaardistamisel.

Diskussiooniosa lõpetuseks püüan magistritöö tulemused panna inimgeograafia konteksti, ja tuua välja edasised võimalikud sammud uurimistöö jätkamisel.

Lõpetuseks soovin tänada oma juhendajaid prof Rein Ahast Tartu Ülikooli geograafia instituudist ja Urmas Petersoni Tartu Observatooriumist kasulike näpunäidete eest magistritöö kirjaliku osa valmimisel. Ken Stewartit Ordnance Survey of Northern Irelandist abi eest ajakirjas Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology. Ecology selle magistritöö praktilise osa baasil kirjutatud artikli inglisekeelse käsikirja ettevalmistamisel. Tartu Observatooriumit abi eest magistriõpingute finantseerimisl. Ning oma perekonda mõistva suhtumise ja moraalse toe eest magistrieksamikis õppimisel ja selle töö käsikirja valmimisel.

1. Teoreetiline taust

1.1 Muutused linnaruumis, urbaniseerumine

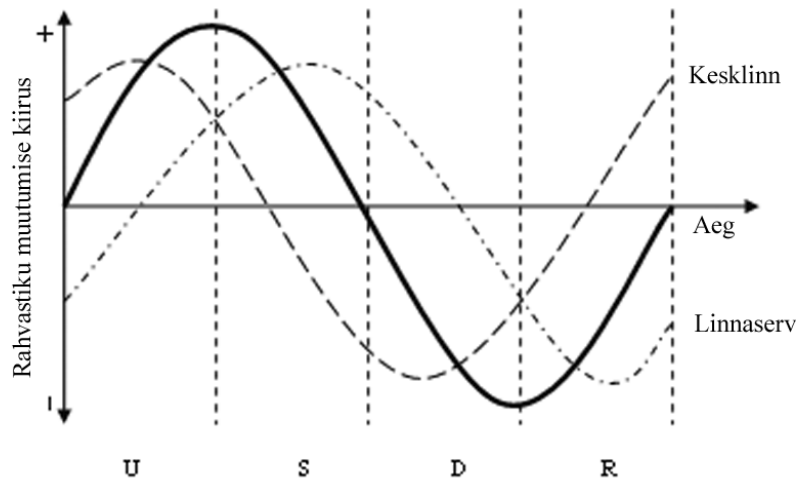
Kaasaegse linnaruumi näol on tegu tehisliku maastikuga, mida luues asendatakse traditsiooniliste maastike elemendid uute struktuuridega [Antrop 2005], fragmenteeritakse seniseid maastikke [Luck & Wu 2002] ja luuakse ühelt poolt ruumilist heterogeensust ning teisalt ruumi funktsionaalset homogeensust [Antrop 2004]. Viimaste aastakümnete jooksul on esile tõusnud *rurbaansed* maastikud [Antrop 2000; Claval 2005], mis kätkevad endas ruraalsete ja urbaansete maastike elementide ja neile maastikele iseloomulike tunnuste sünteesi.

Urbaniseerumine või linnastumine on üldiseks terminiks, mida kasutatakse seletamaks muutusi maapiirkondades, mille on esile kutsunud linnad [Antrop 2004]. Alates linnade kui selliste tekkest on nende äärealade maapiirkonnad etendanud tagamaa osa [Antrop 2000], olles alaks, mille ülesandeks on üleval pidada linnades elavaid inimesi, nii loodussaaduste kui ka linnalisele tööstusele vajalike ressurssidega [Kant 1927].

Antropi [2004] järgi on linnastumine Euroopa tsivilisatsiooni üks fundamentaalsemaid tunnuseid – linnad ja nende võrgustikud on alati olnud olulisteks faktoriteks muutuste põhjustamisel ja seeläbi oma ümbruse kujundamisel. linnastumine kui nähtus ei ole uus [Claval 2005]. Euroopa puhul on täheldatav linnastumise levik Kagu-Euroopast umbes 700. aastal e.m.a üle kontinendi [Antrop 2004]. Samas on alles hiljaaegu hakatud linnastumisele suuremat tähelepanu pöörama, seda seoses nn valglinnastumisega, mis on alles viimase aja nähtus [Robinson et al. 2004] ja on otseselt seotud nii inimeste [O'Meara Sheehan 2002] kui ka kapitali, kaupade ja sõnumite mobiilsuse suurenemisega [Martinotti 1994]. Laialivalgumise puhul on täheldatud, et eelnevalt juba asustatud alast hakkavad mitmete kilomeetrite kaugusel tekkima väga madala tihedusega elamurajoonid, mis hiljem täis ehitatakse [Robinson et al. 2004].

Carlson & Arthuri [2000] järgi on valglinnastumist traditsiooniliselt hinnatud demograafilise informatsiooni baasil. Põhiprobleemiks sellise käsitluse juures on asjaolu, et valglinnastumise näol on tegu nähtusega, millel pole tegelikult kindlat definitsiooni [Sutton 2003; Hasse & Lathrop 2003], mistõttu selle kvantitatiivne iseloomustamine osutub piiratuks. Lisaks rahvastiku dünaamikale on valglinnastumise lahtimõtestamisel tuginetud ka rahvastiku tihedusele ja paigutusele ruumis, selle autosõltuvuslikele, loodus- ja sotsiaalset keskkonda

mõjutavatele tunnustele [Hasse & Lathrop 2003] ning toimuvate muutuste muustrile [Sutton 2003, Robinson et al. 2004].



Joonis 1. Urbaniseerumise faaside tsükliline mudel, mis põhineb rahvastiku muutumisel kesklinnas ja äärelinnades. U – linnastumise, S – eeslinnastumise, D – vastulinnastumise ja R – taaslinnastumise faas. Jämedam must joon näitab terve linnalise aglomeratsiooni populatsiooni muutust. [Berg et al 1982, joonis Antrop 2004 järgi].

Linnastumise puhul on kirjeldatud erinevaid faase (nn. elutsükli teooria), mis on defineeritud kesklinna ja äärelinnade rahvaarvu kombineeritud kasvu ja kahanemise abil (joonis 1) [Tammaru 2000a]. Antrop [2004] märgib, et mõned mudelid viitavad linnastumise – vastulinnastumise – taaslinnastumise tsüklilisusele, mida ei ole küll veel otseselt tõestatud [Champion 2001, cit Antrop 2004].

Elutsükli teooria järgi toimub esimeses faasis rahvastiku kiire koondumine maalt kompaktsetsesse linnadesse, mille on üldjuhul kaasa toonud rahvaarvu kasv maapiirkondades ning sotsiaalmajanduslikud muutused [Tammaru 2000a]. Teises faasis jätkub kogu linnalise aglomeratsiooni rahvaarvu kasv, vähenedes kesklinna piirkonnas, samas kui linnaservades on see kiiresti kasvamas [Antrop 2004], tekitades hulgaliselt satelliitlinnakuid [Tammaru 2000a]. Selle põhjuseks on üldjuhul inimeste sissetulekute suurenemine ja nende teadlikud keskkonnamuutused oma elukoha valikul [Tammaru 2000a]. Kolmandas faasis jätkub inimeste lahkumine kesklinna piirkonnast, kuid rahvastik hakkab vähenema ka linnaservades ja seeläbi kogu linnalises aglomeratsioonis [Tammaru 2000a, Antrop 2004]. Neljandas faasis

hakkavad inimesed algul kesklinna piirkonda ja hiljem ka äärelinnadesse tagasi kolima [Antrop 2004]. Samas ei ole taaslinnastuise faas tegelikult päris selge ja see on toimunud ainult juhtudel, kus linna- või keskvalitsus on linnastumisprotsessi aktiivselt sekkunud [Tammaru 2000a].

Samas juhib Antrop [2004] tähelepanu asjaolule, et antud käsitlusega pole erinevate linnade võrdlemine eriti adekvaatne. Esiteks pole linnaalal kui nähtusel olemas täpset definitsiooni ja teiseks kasutatakse sellistes mudelites rahvastikuandmeid, mis on ruumiliselt agregeeritud ja ei kujuta endast seega ruumis pidevat suurust. Lisaks, nagu on näidanud Sjöberg & Tammaru [1999a], võivad ametlikud rahvastikuandmed olla ebatäpsed ja mitte kajastada reaalses olukorda.

Sisuliselt on linnastumist võimalik lugeda nii linnastunud maa-ala suhtelise osakaalu kasvuks riigis [Jauhiainen 2005] kui ka elustiili muutuseks [Antrop 2005]. Claval [2005] on siinjuures sidunud maapiirkondade urbaniseerumise sinna kolivate linnaelanike *Arkaadia* – kui maapealse paradiisi – ihalusega, mis on viinud maapiirkondade elanikkonna sotsiaalse koosseisu muutumisele viimastel aastakümnetel. Koos põllumajandusliku toodangu pideva suurenemisega on põllumajanduslike tootjate arv tugevalt vähenenud, mis on omakorda viinud inimeste maapiirkondadest lahkumisele [Claval 2005]. Kohtades, kus inimeste arv on jäänud samaks, on see saavutatud ainult tänu inimeste tegevusalade/elustiili muutusele [Claval 2005], mis on enamalt jaolt seotud linnainimeste kolimisega ruraalaladele [Tammaru 2000a]. Paljudel juhtudel on see elustiili muutus niivõrd drastiline, et endised ruraalpiirkonnad on muutunud nii väljanägemiselt kui tegelikult ka olemuslikult madaltihedateks *suburbiateks*, mille asukad ei jaga enam klassikaliste maaomanike nägemusi elust maal [Claval 2005]. Seetõttu on ruraalalad paljuski kaotamas oma traditsioonilist maastikupilti, sest väga vähesed uustulnukad ruraalpiirkondades hakkavad tegelema põllumajandusega [Tammaru 2000a]. Moodsate rurban-asumite elanikud hindavad pigem *tõelist* loodust, sest see pakub võimalusi harrastata mitmesuguseid tegevusi, mille jaoks on palju ruumi vaja [Claval 2005].

Seega võib urbaniseerumist ühelt poolt lugeda inimeste koondumiseks mõtteliselt piiratud pindalale, teisalt aga nende sooviks *pöörduda tagasi loodusesse*, kuid mõlemat poolust ühendab siiski eelnevas lõigus märgitud elustiili muutus. Veelgi enam: elustiil on järjest enam muutumas aluseks kogukondade kujunemisel ja nende ruumilise paiknevuse määratlemisel [Law & Wolch 1993]. Sõnaga, samalaadset nagu elustiil on paljuski olnud osaks traditsiooniliste maastike kujunemisel ja säilimisel, on see osaks ka uute urbaansete/rurbansete maastike tekkel ja traditsiooniliste maastike kadumisel või

muundumisel. Kokkuvõttes on linnastumise tulemuseks muu seas spetsiifiline maakasutus ja ehitatud keskkond [Jauhiainen 2005].

Tammaru [2000, 2001] on osundanud, et kui suburbaniseerumine läänelikus mõistes tähendab linliku elustiili laienemist, siis sotsialismimaades tähendas see hoopis agraarse elustiili süvenemist, mistõttu ei saa üksüheselt üle kanda lääne urbanisatsiooni kontsepte Eestis nõukogude ajal toimunu kirjeldamiseks. Alates Eesti taasiseseisvumisest on hakanud toimuma selgepiirilised muutused, kuigi ka hetkel on suburbaniseerumisel oma spetsiifilised jooned säilinud ja edasised arengud sõltuvad konkreetselt elanikkonna jõukuse kasvust [Tammaru 2000a].

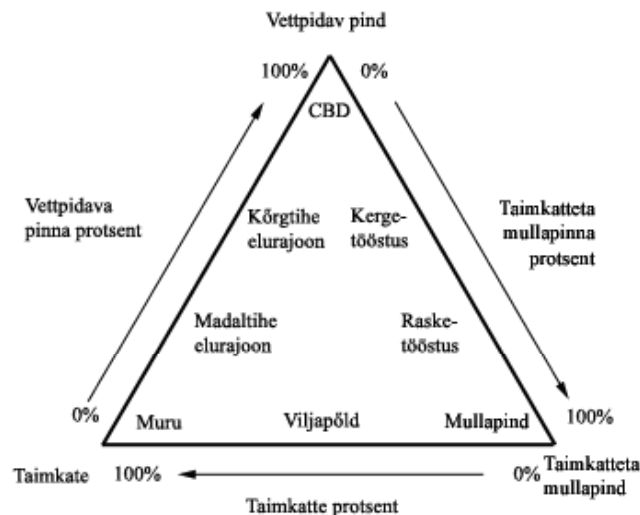
1.2 Linnaruumi kirjeldamine kaugseire meetoditega

Linnade kaugseires on edukalt kasutatud kaitseotstarbeliste meteoroloogiasatelliitide programmi *Defence Meteorological Satellite Program Operational Linescan System* (DMSP OLS) vahendatud öiseid satelliidipilte koos erinevate andmebaasidega. Näiteks uurisid Elvidge et al. [1997] DMSP OLS öiste piltide abil valgustatud alade pindala seost rahvaarvu, sisemajanduse koguprodukti ja energiatarbimisega, leides, et kaks viimast korreleeruvad esimesega väga hästi, samas kui rahvaarvu ja valgustatud pindala seose puhul esines kohati tugevaid kõrvalekaldeid. Sutton [2003] tuletas DMSP OLS öiseid pilte ja 1990. aasta USA rahvaloenduse andmeid kasutades regressiooniseose naturaallogaritmitud linna pindala ja rahvaarvu vahel, defineerides sellega nn valglinnastumise sirge (*sprawl line*). Schneider et al. [2003] kasutasid DMSP OLS öiseid pilte koos rahvastikuandmete ja keskmise ruumilise lahutusega satelliidi *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) piltidega, rakendasid õpetava valimiga otsustuspuuga klassifitseerimist ja kaardistasid linnade pindalalist ulatust. Milesi et al. [2003] hindasid valglinnastumise mõju taimede primaarproduksioonile USA kaguosas, kasutades MODISe ja DMSP OLS andmeid ning leidsid, et antud viisil on võimalik anda hinnanguid maakattemuutustele linnades ja nende ümbruskonnas.

Linnade kaugseires on edukalt kasutatud ka satelliidi Landsat pilte. Small [2001] uuris Landsat *Thematic Mapper* (TM) piltidelt New Yorki kesklinna piirkonna taimkatte ohtrust [Small 2001] ja selle muutumist ajas [Small 2002], kasutades spektrisegu lahutamise meetodikat. Gillies et al. [2003] leidsid Landsat TM ja Landsat skanneri *Multispectral Scanner System* (MSS) pilte kasutades vettpidava pinna pindalas toimunud muutusi Atlanta (USA) lähedal Greek Line'i valgallas aastate 1979-1997 vahemikus ning kasutasid saadud pindalalist muutust ökoloogilise indikaatorina mageveeliste karbipopulatsioonide dünaamika hindamisel.

Clapham Jr [2003], kes uuris valglinnastumist Clevelandis (USA), on toonitatud, et linnakeskkonna puhul tuleks klassifitseerimisel lähtuda pidevusest, kontiinumist, ning mitte kasutada linliku keskkonna kirjeldamisel maakattetüüpide kategoorilisi klastreid. Ridd [1995] pakkus linnaruumi kirjeldamiseks välja mudeli: taimkate – vettpidav pind – taimkatteta mullapind (*vegetation – impervious surface – soil*) ehk VIS mudeli, mille alusel on linnaruumi mistahes paika võimalik defineerida taimkatte, taimkatteta mullapinna ja vettpidava pinna omavaheliste proportsioonide kaudu (joonis 2). Ta kirjeldas oma mudeliga

Salt Lake City (USA) kesklinna piirkonda, kasutades prantsuse skannersüsteemi *Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre SPOT* pilte ja õpetava valimita klassifitseerimist. Samas rõhutab Ridd [1995], et tegu ei ole mitte maakasutust kirjeldava mudeliga, vaid maakatet kirjeldava mudeliga, mis võimaldab erinevaid linnasid edukalt võrrelda.



Joonis 2. Mõned linna- ja linnalähedased alad VIS mudelis [Allikas: Ridd 1995]. CBD – Ärila (Central Business District)

Seega sobib Riddi VIS mudel hästi kokku kaugseire tehnoloogia rakendustega linnaaladel, sest nagu märgivad Nagendra et al. [2004], tegeleb satelliitpõhine kaugseire just *maakatte* seirega, kuigi *maakasutus* on see, mis on tinginud vastava *maakatte*.

Phinn et al. [2002] kirjeldasid VIS mudeliga Brisbane'i (Austraalia) linna maakatet ning kasutasid erinevaid pilditöötlemise meetodeid (sh õpetava valimita klassifitseerimine, ortofoto interpreteerimine ja spektrisegu lineaarne lahutamine) VIS komponentide ruumilise paiknemise hindamisel. Ka Wu & Murray [2003] lähtusid VIS mudeli seatud raamistikust, kuid nende töö oli seotud ainult vettpidava pinna ruumilise paiknemise leidmisega Columbuse (USA) linnas kasutades lineaarse spektrisegu lahutamist.

Herold et al. [2005] on märkinud, et linnade optilise kaugseire puhul on optimaalseteks skannersüsteemid, mille hetkvaateväli maapinnal on väiksem kui 5 meetrit. Jämedama ruumilise resolutsiooni puhul osutub raskeks linnade kirjeldamine kategooriliste *maakatte*

klassidega. Tunnistatud on segupikslite ehk mikslite (*mixed pixels*) suurt kaalu linnaaladest tehtud satelliidiülesvõtete pikslite seas [Ridd 1995; Small 2002, 2003; jne]. Mikslid raskendavad tavapärase statistiliste klasteriseerimisalgoritmidega klassifitseerimist [Small 2003]. Üheks võimaluseks mikslite probleemi vähendamiseks on suurema ruumilise resolutsiooniga piltide kasutamine [Ridd 1995], mis läbi reeglina paraneb pildi ruumiline interpreteeritavus. Samas on Small [2003] oma töös märkinud, et ka kõrglahutusega skanneri IKONOS piltide ruumiline lahutusvõime ei ole tegelikult piisav linnamosaiigi kõigi detailide eristamiseks.

Pikslisese informatsiooni tuvastamise meetodeid on mitmeid ja laias laastus on neid võimalik jagada modelleerimiseks ning proportsionaalse pikslisese osakaalu empiiriliseks hindamiseks (nt hädusa klassikuuluvuse funktsiooni kasutamine, spektrisegu lahutamine jne) [Defires et al. 2000].

1.3 Spektrisegu lahutamine

1.3.1 Spektrisegu lahutamise põhimõtted

Spektrisegu lahutamine on üks enamkasutatavatest meetoditest mikslite probleemiga tegelemisel [Lu et al. 2003]. Lunetta [1998] järgi töötati spektrisegu lahutamise meetodika välja 1990. aastate algul suure spektraalse lahutusega spektromeetri *High Spectral Resolution Advanced Visible/Infrared Image Spectrometer* (HSR AVIRIS) piltide interpreteerimiseks ning hiljem laiendati meetodit ka Landsat TM ja Landsat MSS piltide jaoks.

Spektrisegu lahutamise meetod on leidnud edukat kasutamist metsade kaugseires. Lu et al. [2003] kasutasid spektrisegu lahutamist sekundaarse suktsessiooni alade leidmisel Amazonase vihmametsades. Souza Jr et al. [2003] kasutasid meetodit Ida-Amazonase vihmametsades raiete ning põlengute tagajärjel hävinenud ning taastuvate metsaalade kaardistamiseks. Lunetta [1998] arvates on spektrisegu lahutamise meetodi eeliseks see, et meetodiga on võimalik kaardistada juba suhteliselt väikseid maakatte muutuseid (nt metsade hõrenemine).

Spektrisegu lineaarse lahutamise meetodika põhineb eeldusel, et iga uuritava pildi piksel on mitmete komponentide (algliikmete) segu ja sensoris mõõdetud spekter on algliikmete spektrite lineaarne kombinatsioon [Tompkins et al. 1997]. Samas toonitatakse, et lineaarse segunemise eeldus kehtib juhul kui domineerib ühekordne hajumine erinevatelt aluspindadelt ning aluspinnatüüpide-vaheline mitmekordne hajumine on tühine. [Tompkins et al. 1997, Wu & Murray 2003]. Juhul kui võib eeldada mitmekordset hajumist taimkattelt ja taimkatteta mullapinnalt, tuleks arvestada mitte-lineaarse spektriseguga [Wu & Murray 2003]. Kuigi mitmekordne hajumine võib osutuda oluliseks, võib eelnevatest töödest lähtudes lugeda spektrisegu linnade puhul peamiselt lineaarseks [Small 2002; Wu & Murray 2003].

Seega, lineaarse segunemise puhul võrdub pildi ühe piksli heledus piksli piiresse jäävate objektide/materjalide heleduste pindalaga kaalutud summaga pikslis:

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + ER_i \quad 1)$$

kus $i = 1, \dots, m$ (spektraalkanalite arv); $k = 1, \dots, n$ (algliikmete arv); R_i on piksli heledus kanalis i ; f_k on algliikme k fraktsiooni suurus pikslis; R_{ik} on algliikme k heledus kanalis i ; ja ER_i on kaasnev jääk kanalis i [Weng et al. 2004]. Kusjuures:

$$\sum_{k=1}^n f_k = 1 \text{ ja } 0 \leq f_k \leq 1 \quad 2)$$

ja valemi 1) jääkide alusel leitav mudeli ruutkeskmise viga [Weng et al. 2004]:

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (ER_i^2) / m} \quad 3)$$

Kressler ja Steinnocher [1999] on märkinud, et spektrisegu lahutamise tulemuste hindamisel on lisaks mudeli ruutkeskmisele veale võimalik kasutada ka fraktsioonipiltide visuaalset hindamist, mis eeldab uurijalt piirkonna küllaldast tundmist ja lisainformatsiooni allikate olemasolu, või fraktsiooni ületäitumise (*fraction overflow*) arvutamist. Viimatinimetatu puhul ei võeta arvesse valemit 2), seega saab hinnata kuivõrd hästi jäävad algliikmete fraktsioonid ühes pikslis ilma piiranguteta nulli ja ühe vahemikku, andes seeläbi lisahinnangu kasutatud algliikmete sobivusele.

1.3.2 Algliikmete valiku põhimõtted

Spektrisegu lahutamisel kasutatavad algliikmed võivad olla tuletatud pildilt endalt (nn pildialgliikmed) või mõõdetud kas uuritava alal või laboris (referentsalgliikmed) [Lunetta 1998]. Tompkins et al. [1997] on kirjeldanud ka virtuaalseid algliikmeid ehk algliikmeid, mis on oma spektraalsetelt omadustelt puhtamad kui potentsiaalsed algliikmed pildil. Üldiselt on enimkasutatavateks pildialgliikmed, sest neid on suhteliselt kerge leida ja nad esindavad mõõdetud signatuure pildi ülejäänud pikslitega samas heleduse mõõtkavas [Weng et al. 2004].

Spektrisegu lahutamise õnnestumine sõltub paljuski algliikmete valiku täpsusest [Tompkins et al. 1997]. Üldtunnustatud arvamuse kohaselt tuleks pildialgliikmed leida pildi spektraalse tunnusruumi äärmusväärtuste seast. See seisukoht põhineb eeldusel, et äärmusväärtused esindavad spektraalsete omaduste poolest pildi kõige puhtamaid (s.t ainult ühest algliikmest koosneva) pikslid [Roberts et al. 1998a]. Eelnevad uurimused hüperspektraalsete piltidega (nt Green & Broadman 2000, cit Small 2002) viitavad, et maapinda on võimalik kirjeldada sadade spektraalselt eristuvate tunnuste abil. Lairiba sensorite (nt Landsat TM) spektraalsed omadused projekteerivad selle mitmemõõtelise segunemisruumi vähemamõõtelisse segunemisruumi ning kui viimases on vähem algliikmeid kui sensoril kanaleid, on võimalik arvutada algliikmete fraktsioone [Small 2002].

Põhimõtteliselt võib segunemisruumi ette kujutada kui koordinaatide süsteemi, milles piksli asukohta on võimalik kirjeldada spektraalsete algliikmete seguna, mistõttu on oluline mõista

segunemisruumi kuvatud piksliparve kuju. [Small 2004]. Selleks kasutasid näiteks Wu ja Murray [2003] oma töös Green et al. [1988] poolt defineeritud maksimaalse mürafraktsiooni teisenduse teel saadud komponentpilte, Small [2002, 2003] ja Weng et al. [2004] maksimaalse mürafraktsiooni teisendusega sarnaneva minimaalse mürafraktsiooni teisenduse teel saadud komponentpilte. Nii maksimaalse kui ka minimaalse mürafraktsiooni teisendus sarnaneb põhimõtteliselt peakomponentide teisendusega, kuid ei järjesta tekkivaid komponentpilte mitte variatsiooni suuruse, vaid signaal-müra suhte järgi [Green et al. 1988]. Esimesel puhul järjestatakse komponentpildid suureneva ja teisel väheneva signaal-müra suhte järgi [Small 2002].

Segunemisruumi topoloogia ja mõõtmelisuse kindlakstegemiseks võib kasutada ka peakomponentide teisendust [nt Smith et al. 1985, cit Wu & Murray 2003, Small 2004] või erinevaid spektraalseid kanaleid arvestavaid hajuvusgraafikuid [nt Rashed et al. 2001, cit Wu & Murray 2003]. Kuid nagu märgib Small [2004], pakuvad peakomponentidest moodustatud hajuvusgraafikud siiski kõige optimaalsema segunemisruumi projektsiooni, sest peakomponentide teisendus reastab komponendid vastavalt nende poolt kirjeldatavale variatsioonile pildil. Kahe-kolme esimese komponendiga on võimalik kirjeldada segunemisruumi, millega on kaetud suurem osa pildi variatsioonist.

1.4 VIS mudeli osised algliikmetena spektrisegu mudelis

Lähtudes VIS mudeli komponentidest kui lineaarse spektrisegu mudeli algliikmetest tuleb kindlasti arvestada nende heleduste varieeruvusega üle pildivälja [Song 2005]. Kõige suurema muutlikkusega on siinjuures vettpidavad pinnad – heledatest objektidest (nt klaaskatused ja betoonpinnad) kuni tumedate objektideni (nt asfaltväljakud ja tänavad) [Herold et al. 2004]. Analoogselt esineb heleduse varieeruvust ka taimkattega pindade (pargid ja muruväljakud) ja taimkatteta mullapinna (laoplatsid) puhul [Wu 2004].

Roberts et al. [1998b] kasutasid Santa Monica (USA) mägedes taimkatte kaardistamiseks mitme algliikmega spektrisegu lahutamise (Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis) meetodit. Lubades algliikmeid ja ka nende arvu suure spektraalse lahutusega spektromeetri AVIRIS pildil pikslilt pikslile varieeruda, valiti sobivaid, just vastavale pikslile sobivad referentsalgliikmeid või nende kombinatsioone.

Small [2004] kasutas töös Landsat ETM+ segunemisruumist heleduste varieeruvuse spektrisegu mudelisse sobitamiseks sama algliikme n.ö koopiaid – samasisulisi, kuid erinevate spektraalsete signatuuridega algliikmeid. See tähendaks näiteks kahe erineva algliikme kasutamist taimkatteta mullapinna jaoks: üks heleda ja teine tumeda mullapinna jaoks. Viimane lähenemine võib siiski olla pisut problemaatiline kuna kasutatavate algliikmete arvu määrab sateliitandmestiku dimensionaalsus [Radeloff et al. 1999] ja sobivaimaks peetakse väikseima võimaliku algliikmete arvuga spektrisegu mudelit [Song 2005].

Song [2005] pakkus välja Bayesi teoreemil põhineva spektrisegu lahutamise meetodika (Bayesian Spectral Mixture Analysis – BSMA), kus algliikme signatuuri ei loeta muutumatuks, vaid see on tõenäosusliku jaotusega. Kokkuvõttes väidab Song [2005], et tavalise spektrisegu lahutamise meetodikaga on võimalik saada sama hea ning mõnel juhul isegi parem tulemus kui BSMA meetodiga, kuid viimane pakub lisaks ka fraktsioonide tõenäosuse hinnangu.

Wu [2004] pakkus välja normeeritud spektrisegu analüüsi meetodika, mille abil saab tunduvalt vähendada VIS mudeli komponentide heleduste varieeruvust. Tänu sellele on põhimõtteliselt võimalik spektrisegu lahutamisel kasutada algliikmetena taimkatet, vettpidavat pinda ja taimkatteta mullapinda. Pildi piksli normeeritud heledus \bar{R} kanalis b võrdub [Wu 2004]:

$$\bar{R}_b = \frac{R_b}{\mu} \times 100 \quad 4)$$

kus

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N R_b \quad 5)$$

kus

R_b on piksli algne heledus kanalil b , N on kanalite arv ja μ on piksli keskmine heledus kõigis kanalites. Antud meetodikat on hiljem edukalt kasutanud näiteks Zhang et al. [2005] erinevat liiki samblike katvuse hindamiseks kivisel pinnal.

1.5 Spektrisegu mudeli sobivushinnang

Phinn et al. [2002] töö üheks eesmärgiks oli leida eksperthinnangutena VIS mudeli komponentide fraktsioone ka ortofotodelt, kasutades neid järgnevalt ka veahinnangu andmisel. Nad paigutasid neli ühe kilomeetri laiust transekti läbi Brisbane'i linna ja jagasid need 1x1 km suurusteks ruutudeks. Edasi kuvati igasse aknasse 13 juhupunkti, mille pildi interpreteerija luges kas taimkatteks, vettpidavaks pinnaks või taimkatteta mullapinnaks. Analoogset metoodikat kasutas ka Ridd [1995]. Wu & Murray [2003] ja Wu [2004], hindasid vettpidava pinna fraktsiooni klassifitseerimistäpsust mustvalgetelt ortofotodelt, kasutades kahtesada 3x3 Landsat ETM+ piksli suurust akent, milles vettpidava pinna ala ortofotodel digitaliseeriti ning leiti selle suhteline osakaal vastavas aknas.

Small [2001, 2002] kasutas oma töös spektrisegu lahutamisel saadud taimkatte fraktsioonipildil sisulise vea hindamiseks värvilisi ortofotosid, kasutades kanalite suhet roheline/(punane+sinine). Selline metoodika sobib taimkatte katvuse kindlakstegemiseks, kuid ei sobi vettpidava pinna pindala hindamiseks, sest vastavalt VIS mudeli tingimustele esineb vettpidav pind ja taimkate linnas koos taimkatteta mullapinnaga. Seega ei tähenda väiksemad taimkatte fraktsioonid automaatselt suuremaid vettpidava pinna fraktsioone. Kuna vettpidav pind mingil alal kas on olemas või mitte, saab seda edukalt kõrglahutusega piltidelt (nt ortofotodelt) digitaliseerida või välitingimustes GPS mõõdistusega kaardistada. Teisalt võib jälle võtta taimkatet ja taimkatteta mullapinda kui ühtset klassi (vett läbilaskev pind), sest üldjuhul esinevad need koos, nt kevadine viljapõld, kus on hõre taimkate ja taimkatteta mullapind koos. Võrreldes järgmiseks tegelikke pindasid ja spektrisegu lahutamisel leitud piksliseseid fraktsioone, on seejärel võimalik hinnata satelliidipiltidelt leitud vettpidava pinna ja vett läbilaskva pinna sobivust. Üldiselt soovitatakse ka kaardistusviga veamaatriksi alusel kvantifitseerida.

Nagu on märkinud Foody [2002], ei ole pikslisestele pindaladele sobivushinnangu andmisel otstarbekas kasutada tavapärast veamaatriksit. Lewis & Brown [2001] pakkusid välja üldistatud pindalalise veamaatriksi (*generalized area-based confusion matrix*), mida saab kasutada nii olukorras „üks piksel üks klass” kui ka pikslisese varieeruvusega klassifikatsioonide veahinnangu analüüsil. Veahinnang leitakse $m \times c$ sihtmaatriksi (*target matrix*) T ja $m \times c$ väljundmaatriksi (*output matrix*) Y abil, kus m on kasutatud pikslite arv ning c klasside arv. Sihtmaatriksis on pikslite kaupa vastavate klasside fraktsioonid

tegelikkuses ja väljundmaatriksis samades pikslites klassifitseerimisel saadud fraktsioonid. Üldistatud pindalaline veamaatriks \mathbf{C} võrdub [Lewis & Brown 2001]:

$$\mathbf{C} = \mathbf{T}^T \mathbf{Y} \quad 6)$$

Parimal võimalikul juhul on tegelikud fraktsioonid ja klassifitseerimisel saadud fraktsioonid samad ning veamaatriks on sümmeetriline. Lewis & Brown [2001] toovad selle ideaalse juhu kirjeldamiseks sisse $c \times c$ viitemaatriksi (*reference matrix*) \mathbf{R} , mis leitakse sihtmaatriksi \mathbf{T} abil:

$$\mathbf{R} = \mathbf{T}^T \mathbf{T} \quad 7)$$

Selleks, et selgitada erinevused veamaatriksi \mathbf{C} ja viitemaatriksi \mathbf{R} vahel, tuleb leida veamaatriks (*error matrix*) \mathbf{E} [Lewis & Brown 2001]:

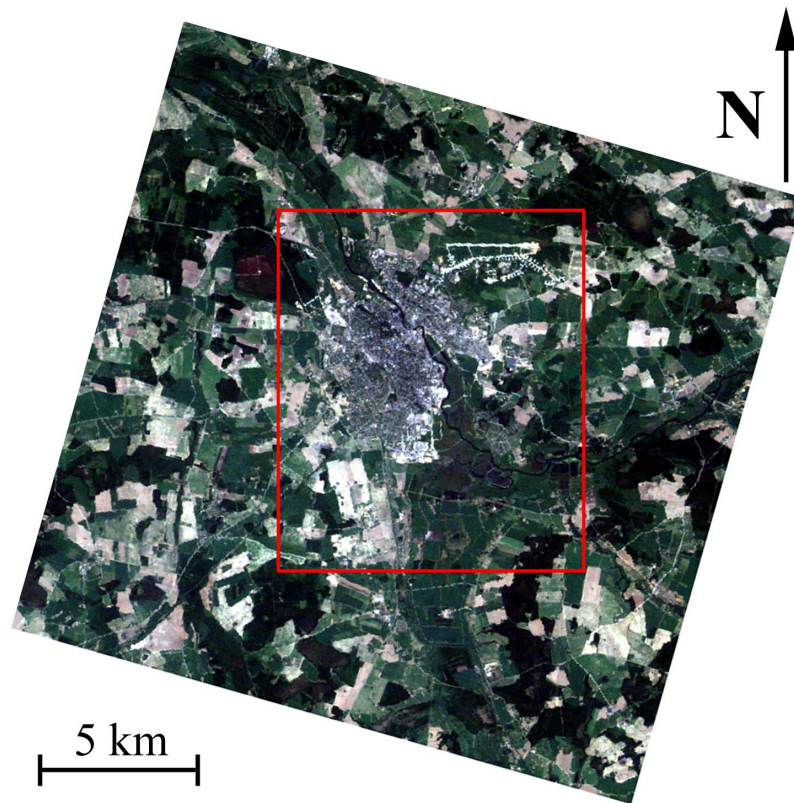
$$\mathbf{E} = \mathbf{R} - \mathbf{C} \quad 8)$$

Arvestades, et ühes pikslis summeeruvad nii tegelikud kui ka klassifitseerimisel leitud fraktsioonid kokku üheks, on veamaatriksi i -nda rea elementide summa 0 ja j -nda veeru elementide summa võrdne tegeliku fraktsiooni ja klassifitseerimisel saadud fraktsiooni üldise erinevusega vastavas klassis. Veamaatriksi \mathbf{E} veergude summade absoluutväärtuste kokkuliitmise alusel on võimalik omakorda leida üldine pindala proportsiooni viga \mathbf{P} jagades selle läbi kasutatud pikslite arvuga m [Lewis & Brown 2001]:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_{j=1}^c \left| \sum_{i=1}^c E_{ij} \right|}{m} \quad 9)$$

2. Materjal ja metoodika

2.1 Uuritava ala iseloomustus



Joonis 3. Väljalõige Tartu linna ja selle lähiümbrust kujutavast Landsat TM 1995. aasta kaadrist. Töös kasutatud osa pildist on toodud kastis.

Uuritav ala hõlmab Tartu linna ja selle lähiümbrust (joonis 3). Tartu on Baltimaade vanemaid linnu [Marksoo 2005], mis kujunes keskajal oma soodsa asendi tõttu arvestatavaks kaubanduslinnaks [Palamets 2003]. Kant [1927, lk 201] pidas Tartut oma asendi tõttu „juba kauges minevikus vahemeheks ja siirdumiskohaks Lääne ja Ida, Põhja ja Lõuna vahel [ühendades] liiklemiseograafiliselt jõelinna hüved (lääne ↔ ida) made- ehk sildlinna omaga (lõuna ↔ põhi).“ Oma ajaloo jooksul on Tartu palju muutunud [Palamets 2003], eriti linna tehismaastik (s.o rajatud hoonestik ja igasugused muud elu- ja tootmistegevuseks vajalikud rajatised), mille pindala on kordades suurenenud [Marksoo 2005].

Ajalooliselt on Tartus tegu madaltiheda asustusega (nt Karlova, Supilinn, Tammelinn jne), nõukogude ajal lisandusid ka kõrgtihedad asumid (nt Annelinn, Ränilinn). Linnast

põhjasuunas asub Raadi lennuväli. Linnalist ala ümbritsevad põllumajanduslikus kasutuses olevad alad ning metsad. Linnast voolab läbi Emajõgi ning uuritava ala piiridesse jäävad suurematest seisuveekogudest Anne kanal ja Haaslava kalatiigid.

Tartu linn on elamuehituses võtnud peamiseks suunaks seniste hoonestusalade renoveerimise, kuid siiski on reserveeritud elamistingimuste mitmekesistamiseks linna äärealadel maad ka suuremate kruntidega eramute jaoks [Marksoo 2005]. Seetõttu on Tartus ka ehitustegevus viimasel kümnendil piirdunud valdavalt senise hoonestusalaga. Samas on rajatud seni hoonestamata aladele väikeelamurajoone kokku kolm: Uus-Ihaste linna kagupiiril, Kvissentali linna põhjapiiril Emajõe idakaldal ja Tammelinna ning Maarjamõisa piirialadel Aardla, Ringtee tänavate ja Viljandi mnt vahele jääval alal [Marksoo 2005]. Lisaks on viimased aastad kaasa toonud väikeelamute ehitamise hoogustumise ka linna administratiivpiiridest kaugemal, nt Võru mnt läheduses Ülenurme suunal, Viljandi mnt Märja suunal, Valga mnt Ränilinna ümbruses jne.

Marksoo [2005] on osundanud, et vaatamata riigivõimuse ja ühiskondlikus korras toimunud muutustele, on Tartu linna territoriaalset arengut alates 18. sajandist suunatud plaanipäraselt, vastavalt iga ajajärgu võimalustele – üldiseks püüdluseks on olnud linnaosade ja asumite funktsionaalne spetsialiseerimine ja nende üksteise suhtes sobiv paigutamine.

2.2 Kasutatud sateliidipildid ja tarkvara

Töös kasutasin kahest erinevast aastast pärinevaid sateliidipilte: 24. august 1995 (Landsat 5 TM) ja 3. mai 2001 (Landsat 7 ETM +). Mõlemad pildid on tehtud suhteliselt heades atmosfääri läbipaistvuse tingimustes, mistõttu atmosfäärikorreksiooni läbiviimiseks otsene vajadus puudus. Kuigi mõlema aasta kaadrid on Landsati satelliidisüsteemi vahendatud, on tegu erinevate sensorite tehtud piltidega. See ei oma uurimisülesande läbiviimise seisukohast suuremat tähtsust, sest kummagi aasta kaadrit töödeldi teisest sõltumatult.

Sateliidipiltide töötamiseks kasutasin pilditöötluste ja ruumianalüüsi tarkvarapaketti IDRISI 32 Release Two [juhendid: Eastman 2001a, 2001b], tabelarvutuseks ning graafikute joonistamiseks programmi MS Excel. Spektrisegu lahutamisel saadud fraktsioonipiltide sobivushinnangu leidmiseks ja toimunud muutuste analüüsiks kasutasin ruumianalüüsi tarkvarapaketti MapInfo Professional 6.5.

2.3 Metoodika

2.3.1 Satelliidipiltide ettevalmistus

Satelliidipildid teisendasin Eesti põhikaardi projektsiooni ja koordinaatide süsteemi kasutades selleks 1995. aasta mustvalgeid Eesti põhikaardi tarbeks pildistatud ortofotosid. Sobituse ruutkeskmise viga jäi väiksemaks kui 0.3 Landsat TM pikslit.

Suurematest piltidest lõikasin edasise töötamise tarbeks ala Eesti põhikaardi koordinaatidega 655163; 664973; 6466400; 6478100 (vastavalt X_{\min} ; X_{\max} ; Y_{\min} ; Y_{\max}), mis on toodud joonisel 3 punase ristkülikuna. Piltide ridade arvuks jäi 327, veergude arvuks 390 ja piksli suuruseks maapinnal 30 meetrit. Pidasin silmas, et pildidel oleks kogu Tartu linn koos Raadi lennuväljaga, ümberkaudsed põllumajanduslikud alad ja metsad ning linnalähedased asumid (nt Ülenurme, Ihaste ja Uus-Ihaste).

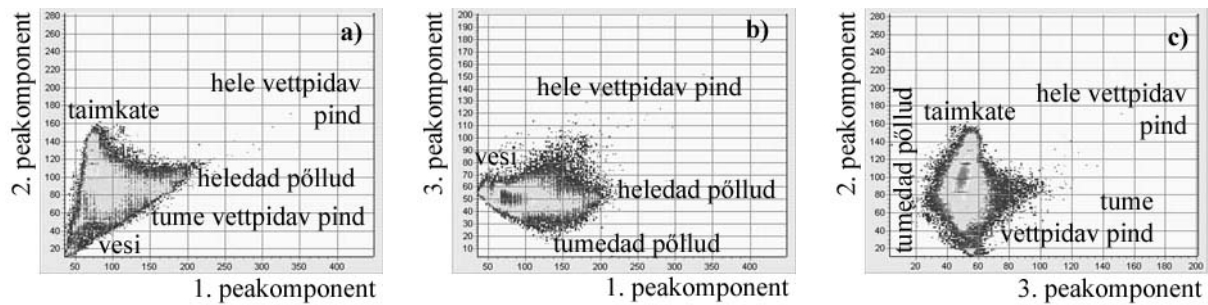
Geokorreksiooniks kasutasin IDRISI 32 protseduuri *Resample*.

Mõningates töodes on väidetud, et lineaarse segu lahutamise puhul tuleks pildid teisendada skanneri Landsat TM 8-bitilise mõõteskaala suhtelistest heleduse ühikutest DN (*Digital Number*) heledusühikutesse mõõdetuna atmosfääri välispiiril [Small 2001, 2002, 2004, Wu & Murray 2003] või heleduskoeffitsiendi ühikutesse maapinnal. Teistes töodes on segu lahutamist tehtud ka atmosfäärimõjude suhtes korrigeerimata piltidega [Kressler & Steinnocher 1999, Souza Jr et al. 2003]. Antud töös jätsin ma pildid suhtelistesse DN ühikutesse. See ei mõjuta oluliselt leitavate fraktsioonipiltide sisulist täpsust [Song et al. 2001], kuna algliikmete spektraalsed signatuurid leidsin kummagi kuupäeva pildil teise pildist sõltumatult.

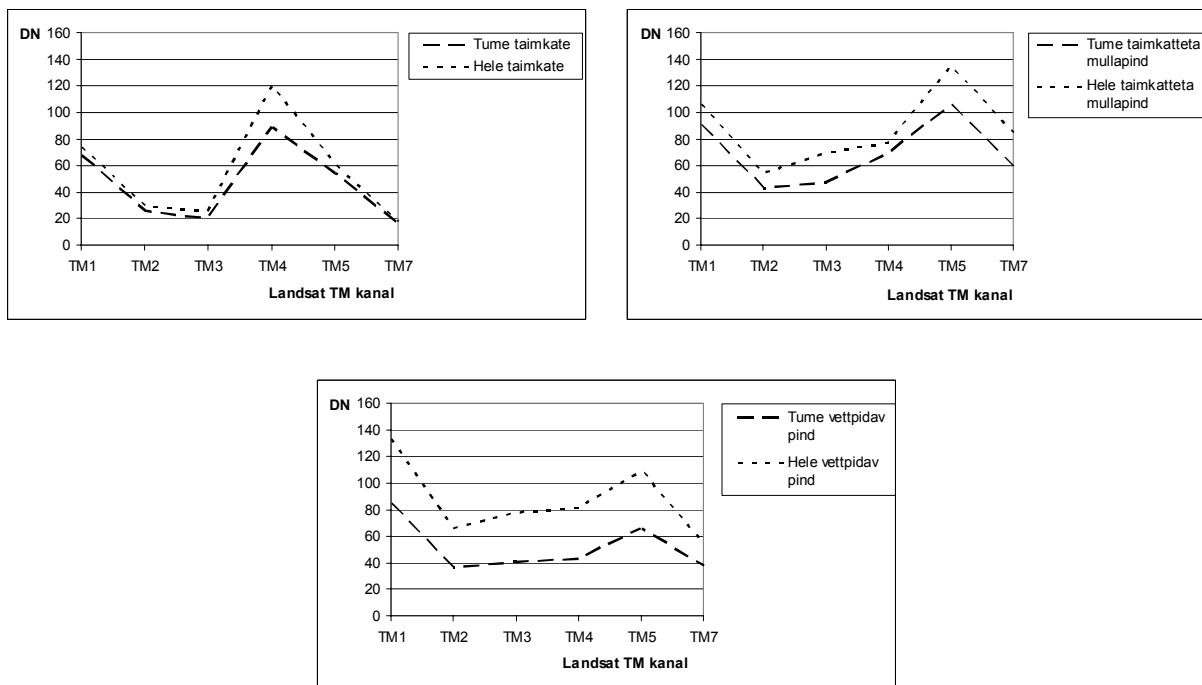
2.3.2 Satelliidipiltide normeerimine

Joonisel 4 on toodud töös kasutatud 24. augusti 1995. aasta Landsat 5 TM kaadri segunemisruumi projektsioonid, mis on moodustatud peakomponentide teisendusega saadud kolme esimese peakomponendi hajuvusgraafikutest. Selle ja kanalite TM4, TM3 ning TM2 kolmevärvilise liitkujutise abil, mille alusel on eristatud heledad ning tumedad objektid [Wu 2004], leitud spektraalsed signatuurid nii heledale kui tumedale taimkattele, vettpidavale pinnale ja taimkatteta mullapinnale on toodud joonisel 5. Heleda taimkatte objektideks on madala ja tiheda taimkattega alad. Tumedaks taimkatteks aga pildivälja piiresse jäävad okaspuumetsad. Joonisel 4 on hajuvusgraafikuile märgitud heledate ja tumedate põldude (ehk taimkatteta mullapinna), heledate ja tumedate vettpidavate pindade, vee ning taimkatte

suhteline paiknemine segunemisruumis. Nagu näha paiknevad taimkatteta mullapinnad (heledad ja tumedad põllud) ja vettpidavad pinnad segunemisruumis läbiseigi, mistõttu on raskendatud nende kahe VIS mudeli komponendi spektraalne eristamine. Sama täheldasid Wu & Murray [2003] puistute varjude ja tumedate vettpidavate pindade puhul.



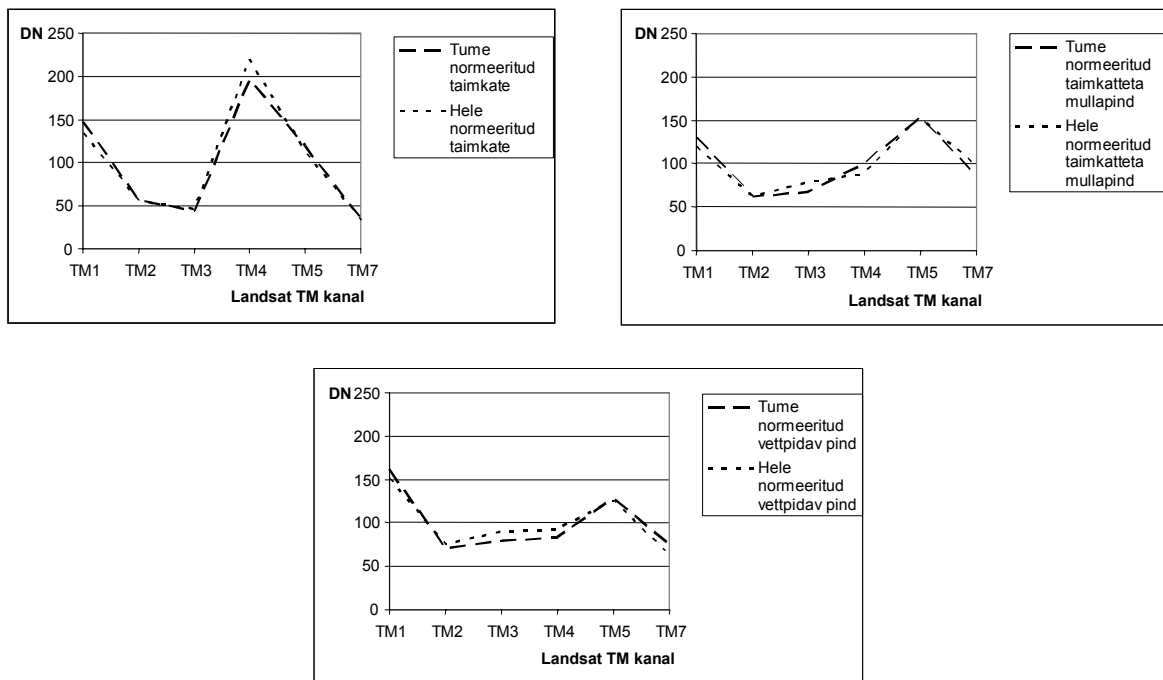
Joonis 4. Töös kasutatud 1995. aasta Landsat TM kaadri segunemisruumi projektsioon, mis on moodustatud peakomponentide teisendusega saadud kolme esimese peakomponendi hajuvusgraafikutest. Hajuvusgraafikutel on toodud võimalike algliikmete umbkaudsed asukohad.



Joonis 5. Heleda ja tumeda taimkatte, taimkatteta mullapinna ning vettpidava pinna spektraalsed signatuurid enne normeerimist 1995. aasta kaadrilt.

Nagu spektraalsete signatuuride graafikutelt (joonis 5) näha, on heledate ja tumedate VIS komponentide heledused küll varieeruvad, kuid evivad siiski teineteisega sarnast kuju. Kasutades Wu [2004] pakutud spektraalse normeerimise meetodikat (valemid 4) ja 5)) on võimalik vähendada heleduste varieeruvust säilitades siiski spektraalse signatuuri kuju.

Joonisel 6 on näha joonisel 5 toodud spektraalsed signatuurid pärast normeerimist kasutades valemid 4) ja 5). Mõningal määral on heleduste varieeruvus siiski säilinud, kuid variatsioon on normeerimisele eelnenud olukorraga võrreldes tunduvalt väiksem.



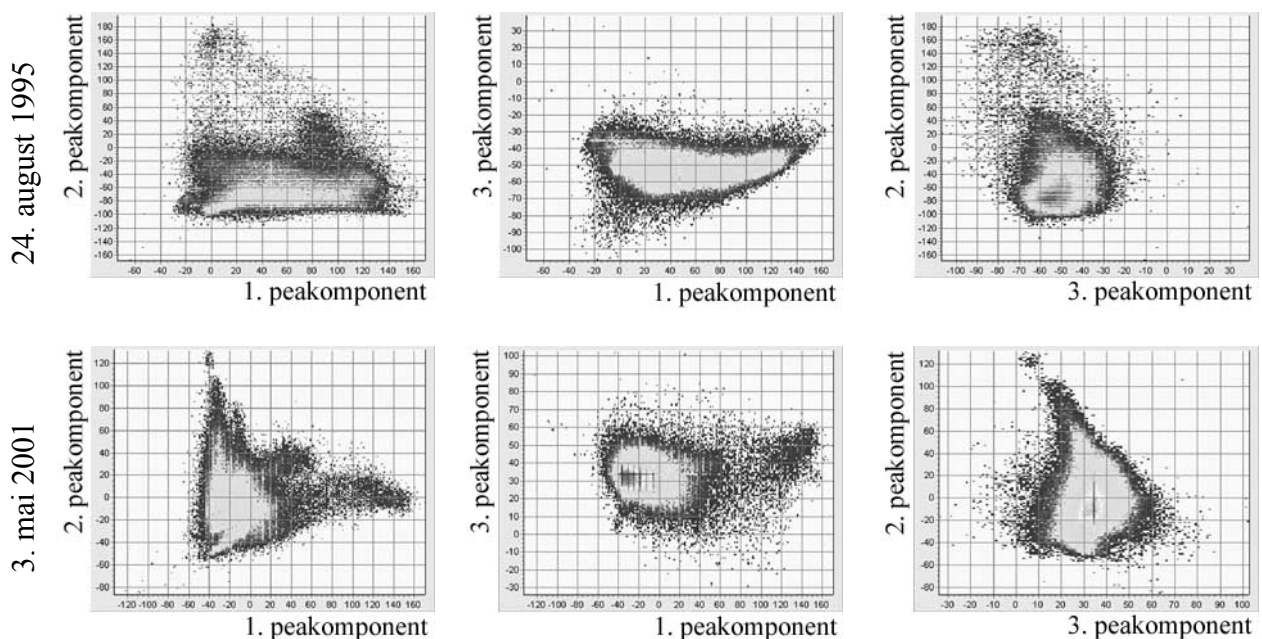
Joonis 6. Heleda ja tumeda taimkatte, taimkatteta mullapinna ning vettpidava pinna spektraalsed signatuurid pärast normeerimist 1995. aasta kaadrilt.

2.3.3 Algliikmete valik

Algliikmete spektraalsete signatuuride leidmisel võib kasutada kas kõigil kaadritel samade geograafiliste koordinaatidega pikseleid, mis esindaksid nn pseudomuutumatuid objekte/alasid [Small 2002], või leida iga satelliidipildi kaadrilt algliikmeid kõige paremini esindavad objektid/alad. Antud töös kasutasin viimatinimetatud võimalust. Peamiselt sellepärast, et kuna kasutatud satelliidipildid olid erinevatest fenoloogilistest ajahetkedest (mai algus ja augusti lõpp), oleks algliikmeid esindavate objektide/alade muutumatus eeldamine mõneti problemaatiline. Seda eriti tingimuses, kus algliikmete fraktsioonid pikslis peavad

summeeruma üheks (vt valem 2), mistõttu taimkatte fraktsiooni reaalne suurenemine piksliga esindatud pinnas (nt kesklinnas on puud lehte läinud) viiks teiste fraktsioonide vähenemisele (nt vettpidava pinna vähenemine). Samuti on raske leida ala, mis oleks mõlemal kasutatud aastal taimkatteta mullapinna algliikme defineerimiseks sobiv.

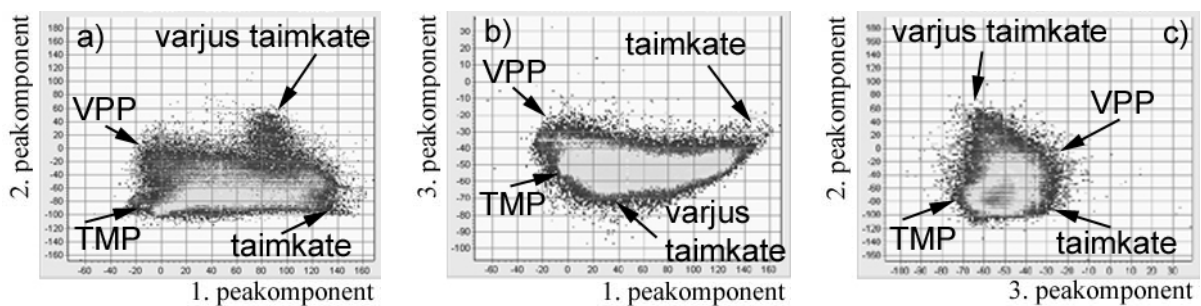
Algliikmete signatuuride leidmiseks tegin spektraalselt normeeritud Landsat TM kaadritega peakomponentide teisenduse (IDRISI protseduur PCA) ja tekitasin igast Landsat TM pildist kuus komponentpilti. Esimesed kolm komponenti kirjeldasid kõigil juhtudel kokku üle 95 % Landsat TM kaadrite piksliväärtuste variatsioonist. Saamaks ettekujutust kaadrite segunemisruumidest, moodustasin kummagi aasta jaoks eraldi kolmest esimesest peakomponendist hajuvusgraafikud, mis on toodud joonisel 7. Segunemisruumi topoloogiat ja peakomponentide teisenduse komponentpilte analüüsid selgus, et mõlemal aastatel asuvad segunemisruumis oleva piksliparve nurkades taimkatte, taimkatteta mullapinna ja vee pikslid.



Joonis 7. Kolmest esimesest peakomponendist moodustatud hajuvusgraafikud pärast normeerimist kõikidele töös kasutatud satelliidipiltidele.

Uuritavale alale jäävad suurematest veekogudest Emajõgi, Anne kanal ja Haaslava kalatiigid. Kuna vesi on VIS mudelis „segavaks” lisandiks, siis tuleb ta edasisest pilditööst välja jätta. Selleks moodustasin binaarsed maskid kasutades kummagi aasta kaadri lähisinfra punase kanali pilti. Leidnud piltide histogrammide alusel veepindade keskmised DN väärtused

klassifitseerisin ümber kõik sellest väiksema väärtusega pikslid nulliks ja kõik suuremad üheks. Seejärel kasutasin vee ja muude komponentide segupikslite eemaldamiseks maskipildist 3x3 Landsat TM piksli suurust miinimumfiltrit, mis annab kerneli keskmise asuvale pikslile väärtuseks minimaalse väärtuse, mis on kerneli piires. See protseduur on vajalik lisaks veel selleks, et algliikmena oleks võimalik kasutada vettpidavat pinda, mis peale vee väljamaskimist moodustab uue segunemisruumis oleva piksliparve nurga (joonis 8). Kuid koos vee pikslite eemaldamisega joonistub mõlema aasta segunemisruumi projektsioonis välja väike „sarv” (joonis 8.a). Asudes segunemisruumis vee pikslite (tumedus) ja taimkatte pikslite vahel on selle „sarve” puhul tegu tumeda taimkattega, mida kinnitab ka komponentpiltide lähem uurimine (nt okaspuumetsad Tartust loodes ja kagus).

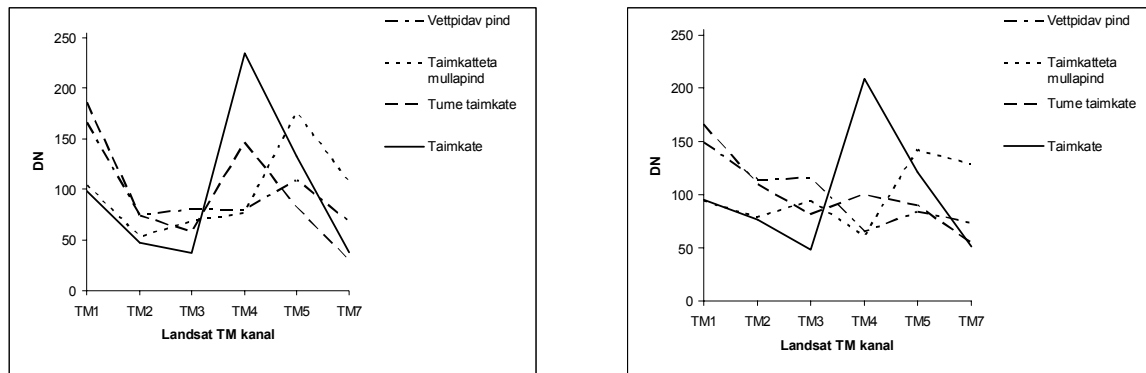


Joonis 8. Kolmest esimesest peakomponendist moodustuv segunemisruum peale veepindade väljamaskimist 1995. aasta kaadri. Hajuvusgraafikutel on toodud töös kasutatavate algliikmete umbkaudsed asukohad segunemisruumis. VPP – vettpidav pind, TMP – taimkatteta mullapind.

Kuna selle „sarve” puhul on tegu segunemisruumis väljajoonistuva nurgaga, on mõttekas see algliikmena spektrisegu mudelisse sisse võtta. Seda seetõttu, et vastasel juhul tingib segunemisruumi kuju „sarve” pikslite jagunemise taimkatte ja vettpidava pinna fraktsiooni. Et vältida järgnevas töös segadust ja eristada teda algliikmest „taimkate”, nimetan „sarve” algliiget edaspidises tekstis „tumedaks taimkatteks”. Kuna taimkatte jagamine heledaks ja tumedaks on tinglik, siis pärast spektrisegu lahutamist on mõttekas nende algliikmete fraktsioonid kokku liita, et tulemuseks oleks ühine taimkatte fraktsioon.

Järgmiseks vaatlesin erinevate aastate peakomponentide pilte ükshaaval ning otsisin neilt segunemisruumi nurkadele vastavaid piksleid, märgistades neid vettpidava pinnana, taimkatteta mullapinnana, taimkatte või tumeda taimkattena. Iga aasta kaadri algliikme

spektraalse signatuuri leidsin kahekümne erineva piksli heledusi keskmistades. Joonisel 9 on toodud leitud spektraalsed signatuurid.



1995

2001

Joonis 9. Spektrisegu lahutamisel kasutatavate algliikmete spektraalsed signatuurid töös kasutatud satelliidipiltidel.

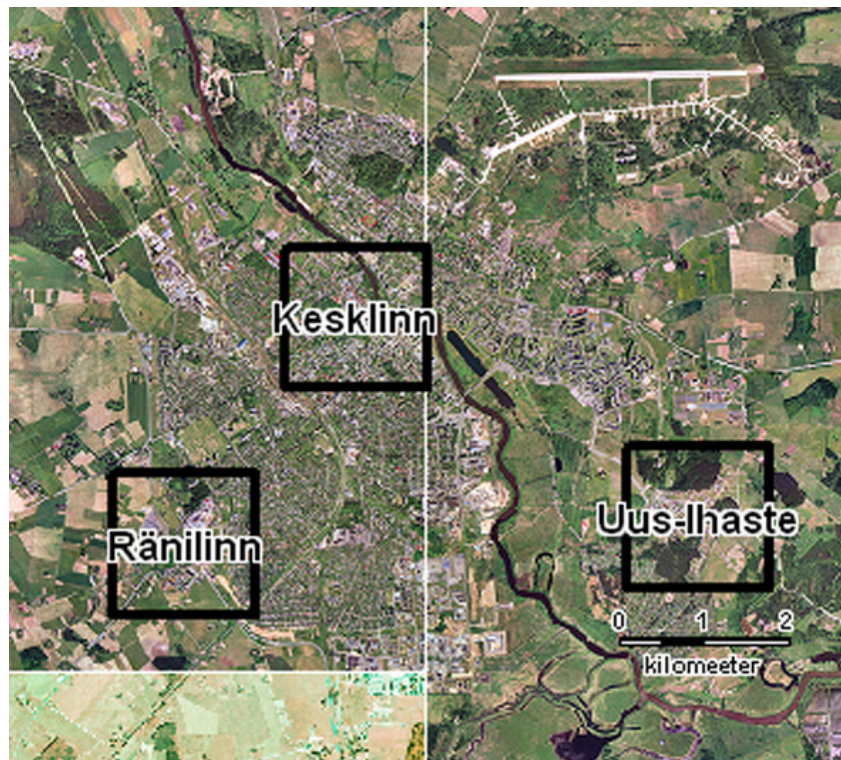
Spektrisegu lahutamiseks kasutasin IDRISI 32 Release Two moodulit UNMIX. Selle protseduur Linear Spectral Unmixing vajab sisendina signatuuride rühmafaili ja annab väljundina arvutatud algliikmete fraktsioonide pildid ja modelleerimata jäänud jäägi.

2.3.4 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutuste analüüs

Ajavahemikus 1995-2001 toimunud muutustest aimu saamiseks kasutasin spektrisegu lineaarsel lahutamise leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide vahelilte lahutades 2001. aasta fraktsioonipildist 1995. aasta fraktsioonipildi. Sellisel vahelildil on muutused, mille puhul vettpidava pinna fraktsiooni väärtus 1995. aastal väiksem kui 2001. aastal, positiivsed ning vastupidi, muutused, kus vettpidava pinna fraktsiooni väärtus 1995. aastal oli suurem kui 2001. aastal, on negatiivsete väärtustega. Et vähendada satelliidipiltide geokorreksioonist tingitud vea mõju tulemustele, kasutasin kõigil piltidel kõigepealt 3x3 Landsat TM piksli suurust keskmistavat filtrit. See protseduur annab 3x3 Landsat TM piksli suuruses aknas kerneli keskmisele pikslile väärtuseks 9 akna piiresse jääva piksli keskmise väärtuse. Lisaks geokorreksioonist tingitud vea mõju vähendamisele aitab see „siluda” ka üksikuid muutunud piksleid ning neid tausta sulatada, mistõttu väiksesed muutused välja ei paistaks.

Võrdlesin toimunud muutuseid visuaalselt, asetades spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonide piltide vahelildi vastava ala ortofotode väljalõigetele.

2.3.5 Normeeritud spektrisegu mudeli sobivushinnang



Joonis 10. Sobivushinnangu andmiseks kasutatud kontrollalade paiknemine Tartu linnas.

Saamaks informatsiooni spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsiooni piltide sobivuse kohta kasutasin Wu & Murray [2003] töös rakendatule analoogset meetodikat. Eelmainitud töös kasutust leidnud üle pildivälja asuvale 200. juhupunkti asemel kasutasin juhupunkte valitud 1.7x1.7 km suurustel kontrollaladel. See meetodiline võte osutus mõttekamaks, sest aitas paremini hinnata spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud fraktsioonipiltide sobivust erinevate linnapiirkondade vettpidava pinna pindala leidmisel. Kokku kasutasin kolme kontrollala (Uus-Ihaste, Ränilinn ja Kesklinn), igaühes 200 juhupunkti. Iga 600. juhupunktile tekitasin paketi MapInfo vahenditega kahe Landsat TM piksli laiuse (60m) raadiusega puhvervööndid (puhvri pindala 10805.48 m²), et vähendada satelliidipiltide geokorreksiooni veast tingitud mõju. Kontrollalade paiknemine Tartu linnas on näidatud joonisel 10.

Taimkatte ja taimkatteta mullapinna fraktsioonipiltidele on sobivushinnangu andmine mõneti problemaatiline, sest mõlemad need maakattetüübid on tugevasti mõjutatud aastaajast ning konkreetse, pildistamise hetkele vastavate taimkatte ja taimkatteta mullapinna katvuskartide

saamine on raskendatud. Seega osutuks mõttekamaks arvestada taimkatet ja taimkatteta mullapinda ühe ja sama klassina (vett läbilaskev pind). See on seda mõttekam, et antud töö uurimisülesande üheks etapiks on leida vettpidava pinna kaardid spektrisegu lineaarse lahutamise meetodika alusel aastatel 1995 ja 2001. Seetõttu tuleks leida ainult vettpidava pinna tegelik pindala vastavatel aastatel.

Digitaliseerisin vettpidava pinna puhvrites 2001. ja 2002. aastate ortofotodelt, et saada 2001. aasta vettpidava pinna kaart. Samuti kontrollisin 1995. aasta ortofotodelt, kas Eesti Põhikaardi baasil saadud vettpidava pinna 1995. aasta kaardid kontrollaladel vastavad samadele digitaliseerimispõhimõtetele. Arvutasin vettpidava pinna pindala puhvervööndites 1995. ja 2001. aastal ning leidsin selle osakaalu puhvri pindalast.

Rasterkujult vektorkujule teisendatud vettpidava pinna fraktsioonipildid importisin Idrisi keskkonnast MapInfo keskkonda. Seejärel arvutasin vettpidava pinna fraktsioonid juhupunktides ka spektrisegu lahutamisel saadud fraktsioonipiltidelt. Tulemused avasin MS Exceli töölehel, kus tegin sobivushinnangu arvutusliku osa kasutades Lewis & Brown [2001] väljapakutud üldistatud pindalalist veamaatriksit.

2.3.6 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutuste sobivushinnang.

Selleks, et hinnata leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust aastate 1995 kuni 2001 vahemikus toimunud muutuste kirjeldamisel, kasutasin sama andmestikku, mida kasutasin ka normeeritud spektrisegu mudelite sobivushinnagu jaoks. Arvutasin puhvrite vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutused nii ortofotode põhjal saadud kaartidelt kui ka spektrisegu lahutamisel saadud fraktsioonipiltidelt. Leidsin vahe 2001. aasta ja 1995. aasta seisu vahel mõlemal juhul. Arvutasin spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsiooni muutuse erinevuse ortofotolt saadust. Kuna muutuste erinevus võib olla nii positiivne kui ka negatiivne kasutasin keskmise muutuse erinevuse leidmiseks absoluutset muutuse erinevust, mille keskmistamisel üle kasutatud puhvrite arvu on võimalik saada keskmine fraktsiooniväärtus, mis kirjeldaks kuivõrd täpselt suudavad töös leitud fraktsioonipildid ortofotodelt saadavate vettpidava pinna kaartidega võrreldes tegelikku muutust kirjeldada. Eraldi uurisin veel puhvervööndeid, kus muutus vettpidava pinna fraktsioonis oli ortofotode järgi väiksem kui satelliidipiltide järgi ning vastupidi.

Toimunud muutuste vea kvantitatiivseks hindamiseks kasutasin taaskord Lewis & Brown [2001] pakutud üldistatud pindalalist veamaatriksit, sest sisuliselt võib toimunud muutuseid

fraktsioonides võtta kui kaardistatud vettpidava pinna fraktsioone. Üldistatud pindalalise veamaatriksi omapära tõttu skaleerisin ortofotodelt kaardistatud muutused ja spektrisegu lineaarse lahutamise kaardistatud muutused väärtuste vahemikku 0.00-1.00, kus muutumatuna püsinud puhvrid said väärtuseks 0.50. See meetodiline võte sundis veaarvutusest välja jätma viis puhvrit, kus ortofotolt leitud muutus oli >0.50 ja ühe puhvri, kus spektrisegu lineaarse lahutamise alusel oli >0.50 muutus.

2.3.7 Regressioonseose leidmine

Eelnevates uurimustes (nt Wu & Murray 2003), mille käigus on kaardistatud spektrisegu lineaarse lahutamise meetodiga vettpidava pinna paiknemist Landsat TM/ETM+ satelliidipiltidelt, on täheldatud, et spektrisegu lineaarse lahutamise meetod hindab väiksemaks väga suuri vettpidava pinna fraktsioone. See on üldiselt tingitud sellest, et taimkatteta mullapinna ja vettpidava pinna signatuurid on suhteliselt sarnase kujuga ning kui uurida nende algliikmete asukohta segunemisruumis olevas piksliparves (joonis 8), siis sealgi asuvad nad teineteisele suhteliselt lähedal, mistõttu võib osa vettpidavast pinnast oma spektraalsete omaduste tõttu klassifitseeruda taimkatteta mullapinnaks. Kuna üldjuhul spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud väiksemad vettpidava pinna fraktsioonid korreleeruvad paremini tegelike vettpidava pinna fraktsioonidega, siis peaks olema võimalik skaleerida suuremad vettpidava pinna fraktsiooniväärtused näiteks ortofotode järgi paika. Antud töös ma esitan ja seejärel kontrollin, kas regressioonseose abil on võimalik „parandada” spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipilte. Kuna tegu oleks lineaarse seosega peaks olema võimalik piltlikult regressioonisirget „tõsta” ilma, et väiksemad fraktsiooniväärtused oluliselt muutuks, kuid suuremad väärtused korreleeruks paremini.

Regressioonanalüüsiks tekitasin esmalt 100 juhupunkti töös kasutatud Landsat kaadri alale. Neile punktidele tegin kahe Landsat TM piksli (60m) raadiusega puhvrid. Digitaliseerisin MapInfos vettpidava pinna nendes puhvrites nii 1995. kui ka 2001. aasta ortofotode põhjal ja arvutasin vettpidavas pinnas toimunud muutused. Seejärel arvutasin neis samades puhvrites vettpidava pinna fraktsioonid ka spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipiltidelt.

Regressioonanalüüsi tegin MS Exceli andmeanalüüsi tööriistaga *Regression*. Leitud regressioonvõrrandeid kasutasin Idrisi keskkonnas 1995. ja 2001. aasta vettpidava pinna fraktsioonipiltide põhjal uute, parandatud vettpidava pinna fraktsioonipiltide arvutamiseks.

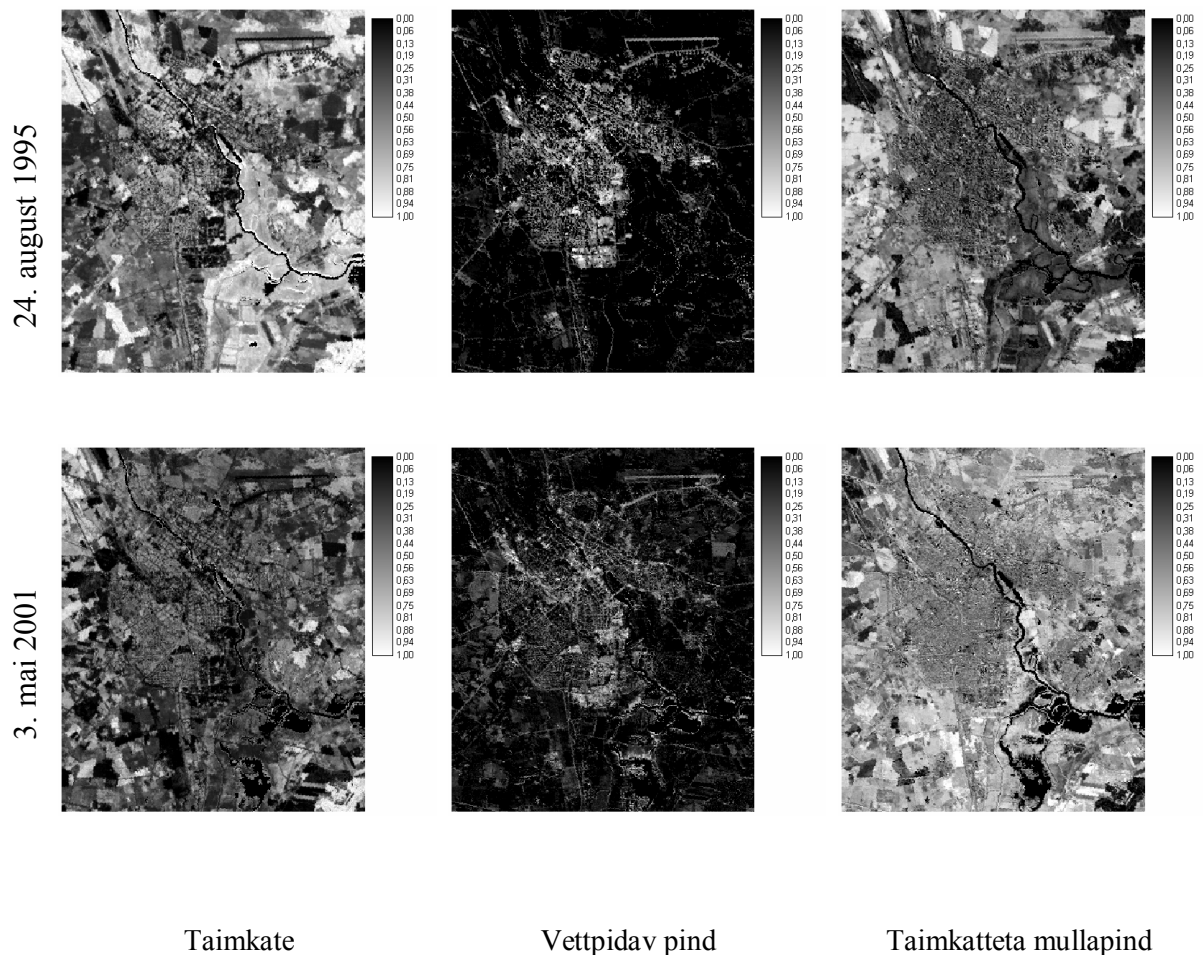
Seejärel küllastasin mõlemal parandatud pildil >1.00 fraktsiooniväärtused väärtusel 1.00, et fraktsioonid jääksid väärtuste 0.00-1.00 vahemikku.

Seejärel arvutasin MapInfo abil sobivushinnanguks kasutatud 600. puhvris kolmel kontrollalal vettpidava pinna pindalad parandatud fraktsioonipiltidelt ning tegin sobivushinnangu nii nagu on kirjeldatud peatükis 2.3.5 Normeeritud spektrisegu mudeli sobivushinnang. Samuti võrdlesin parandatud vettpidava pinna fraktsioonipiltidelt ja ortofotodelt tuvastatud muutuseid ajavahemikus 1995-2001 nagu on kirjeldatud peatükis 2.3.6 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutuste sobivushinnang.

3. Tulemused

3.1 Vettpidava pinna fraktsioonide arvutamine ja ajavahemikus 1995-2001 vettpidavas pinnas toimunud muutuste analüüs

3.1.1 Normeeritud spektrisegu lahutamine

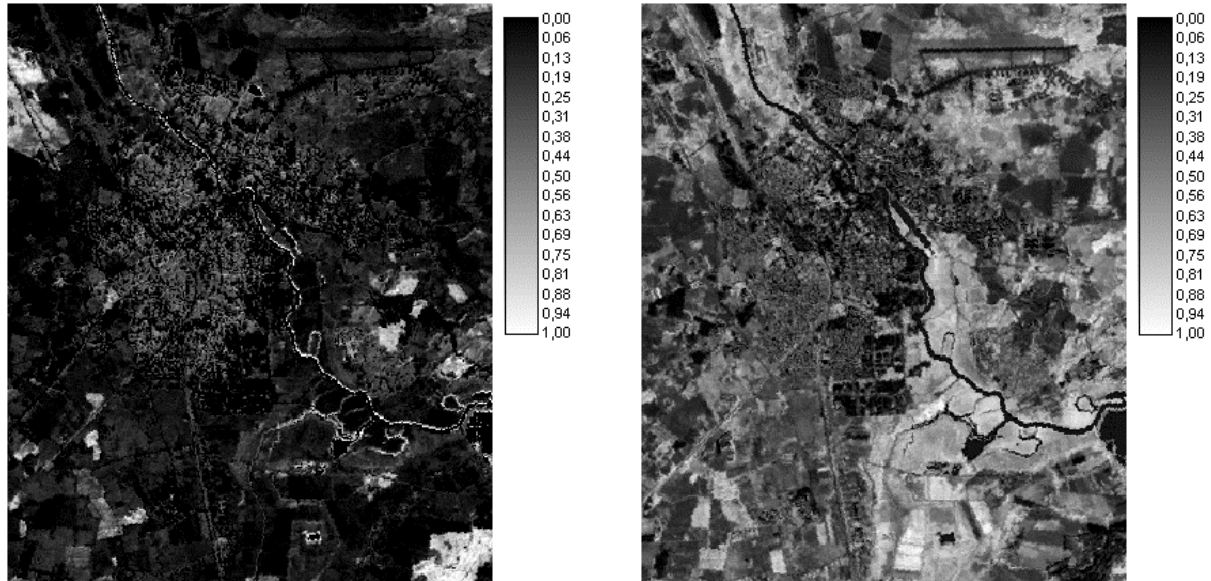


Joonis 11. Segu lahutamisel vastavalt valemitele 1) ja 2) saadud VIS mudeli osiste fraktsioonipildid.

Joonisel 11 on toodud normeeritud lineaarse spektrisegu lahutamisel vastavalt valemitele 1), 2) saadud VIS mudeli osiste pildid. Taimkate fraktsioonide¹ (joonis 11 vasakpoolne veerg) leidmiseks liitsin kokku taimkate ja tumeda taimkate algliikmete fraktsioonid. Joonisel 12 on toodud näide eelnimetatud 1995. aasta fraktsioonipiltidest. Nagu näha on tumeda taimkate suured fraktsioonid seotud metsaaladega Tartust kagu- ja loodesuunal ning Emajõe

¹ Siin ja edaspidi: Taimkate fraktsioon – VIS mudeli taimkate osakaal pildi pikslis; taimkate algliikme fraktsioon – lineaarse spektraalse segu lahutamiseks kasutatud algliikme osakaal pildi pikslis.

kaldapealsetega. Keskmisest väiksemad fraktsioonid on linna haljastatud aladel (nt Raadi kalmistu) ja nullilähedased põllumajanduslikel (nt Ülenurme ümbrus) ja vettpidava pinnaga kaetud aladel (nt kesklinna piirkond, Ropka tööstusrajoon). Taimkatte algliikme suured fraktsioonid asuvad tiheda ja madala taimkattega aladel, need on madalamad metsadega kaetud aladel ja nullilähedased vettpidava pinna alla jäävates piirkondades.



Joonis 12. 1995. aasta tumeda taimkatte algliikme fraktsioon (vasakul) ja taimkatte algliikme fraktsioon (paremal)

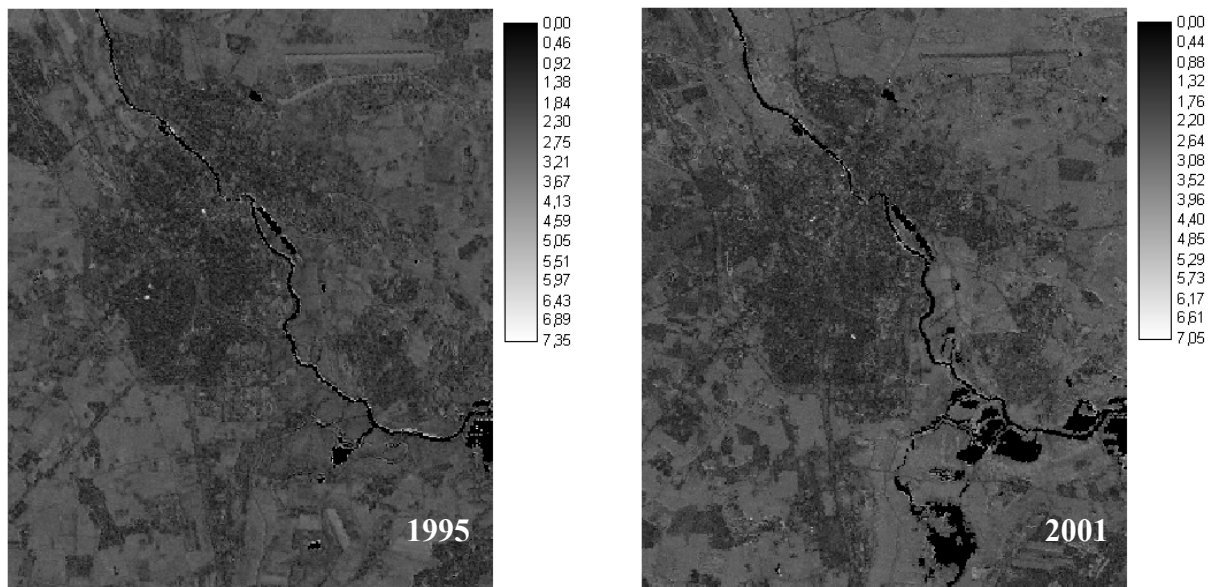
Võrreldes taimkatte fraktsioone üle aastate on näha mõningat muutlikust läbi aja, mis on ilmselt osalt seotud aastaajaliste erinevustega ja taimkatte üldise seisundiga.

Vettpidava pinna fraktsioonid on toodud joonisel 11 keskmises veerus. Need on peamiselt seotud linnaliste aladega ja teadaoleva vettpidava pinna piknemisega Tartus. Sellegipoolest on siia sattunud piksleid väga madalate fraktsioonidega põllumajanduslikelt aladelt. Need on ilmselt tingitud mõningasest taimkatteta mullapinna ja vettpidava pinna omavahelisest spektraalsest eristamatusest segunemisruumis.

Vettpidava pinna fraktsioonide puhul on täheldatav ajaline püsivus aladel, kus fraktsioonid on keskmisest suuremad (nt endise lihakombinaadi ümbrus, Ropka tööstusrajoon, Betooni tänava tööstuskompleks).

Taimkatteta mullapinna fraktsioonipildid on toodud joonisel 11 parempoolses veerus. Nagu joonistelt näha, on need fraktsioonid läbi aastate keskmisest väiksemad linnalistel aladel ning keskmisest suuremad Tartut ümbritsevatel põllualadel.

Joonisel 13 on toodud segu lahutamise jääkide (valem 1)) alusel leitud mudelite ruutkeskmiste vigade (valem 3)) pildid. Keskmiselt on mõlemal aastal jäänud lineaarse spektrisegu mudelites igas kanalis modelleerimata ~2 DN (s.o < 5% algsest andmestikust). Üldjuhul on spektrisegu mudelisse halvasti mahtunud Emajõe kaldapealsed alad.



Joonis 13. Spektraalse segu lahutamise modelleerimata jäänud jääkide alusel leitud mudeli ruutkeskmiste vigade pildid.

3.1.2 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutused ajavahemikus 1995-2001

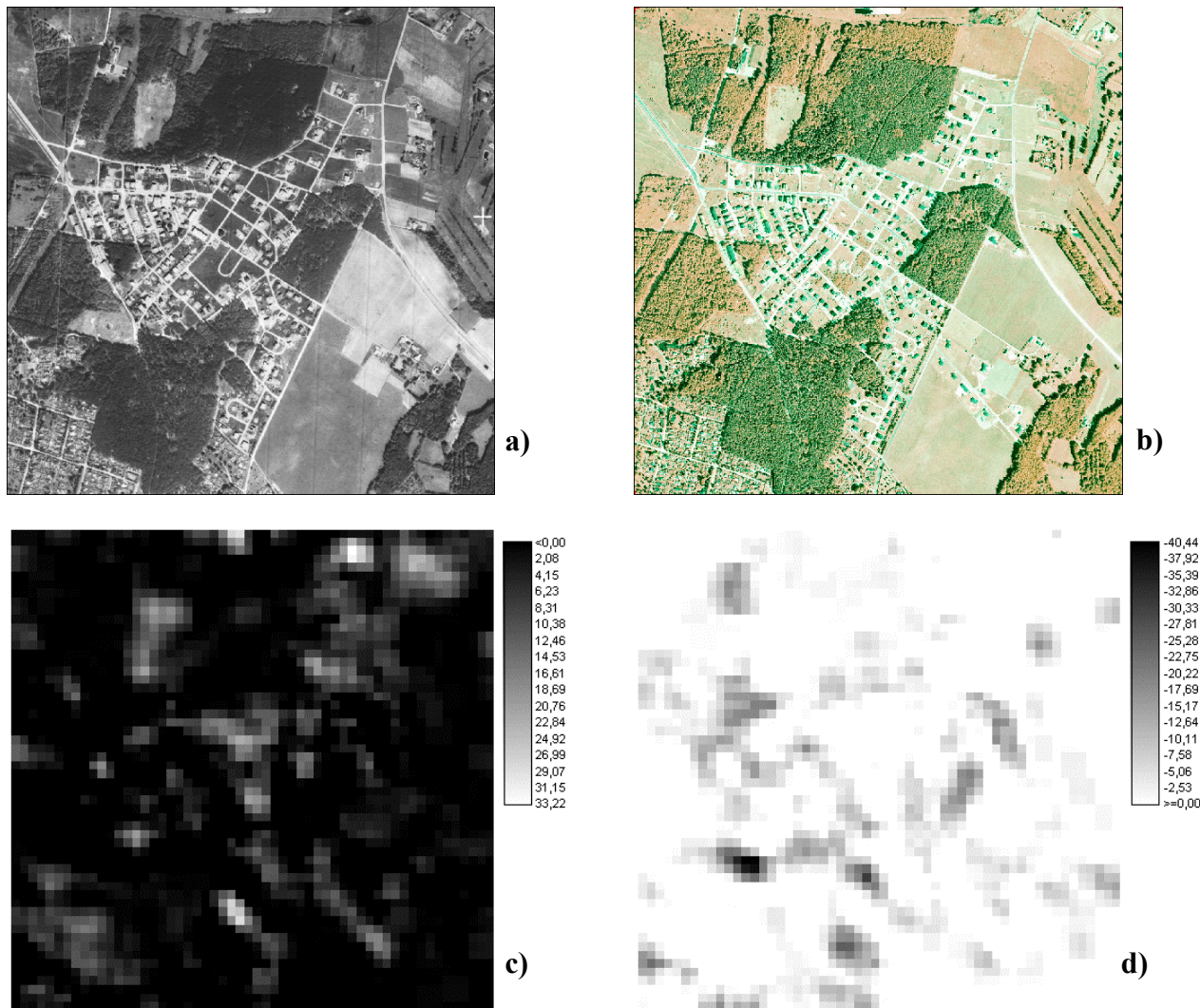
Tabelis 1 on toodud absoluutsed muutused, mis on toimunud töös kasutatud kolme kontrollala (Uus-Ihaste, Ränilinn ja Kesklinn) vettpidava pinna pindalas. Nii Uus-Ihaste kui ka Ränilinna puhul on näha vettpidava pinnaga kaetud maa pindala suurenemist ajavahemikus 1995-2001. Samas Kesklinna kontrollalal on ortofotodelt digitaliseeritud kaartide järgi vettpidava pinna pindala suurenenud, samas kui spektrisegu lahutamisel saadud fraktsioonipiltide alusel on see vähenenud.

Tabel 1. Vettpidava pinna (VPP) pindalas toimunud absoluutsed muutused (m²) ning suhtelised muutused (%) kolmel kontrollalal ajavahemikul 1995-2001. Eraldi on välja toodud ka muutus kõigi kolme kontrollala peale kokku. OF – ortofotolt tuvastatud vettpidav pind, LSM – spektrisegu lineaarsel lahutamisel tuvastatud vettpidav pind, VPP – vettpidav pind.

	Uus-Ihaste		Ränilinn		Kesklinn		KOOS	
	OF	LSM	OF	LSM	OF	LSM	OF	LSM
VPP 1995 (m ²)	214665	189561	578273	439894	1113986	941893	1906923	1571348
VPP 2001 (m ²)	244990	206184	599739	492891	1128270	763809	1972999	1562884
Muutus (m ²)	+30325	+16624	+21466	+52997	+14284	-78084	+66076	-8464
Muutus (%)	+14	+9	+4	+12	+1	-19	+3	-1

Kui vaadata kontrollalaid eraldi, siis on näha, et Uus-Ihaste kontrollalal on ortofotode järgi toimunud suurem muutus (vettpidava pinna pindala on kontrollalal suurenenud 14%) kui spektrisegu lineaarse lahutamise tulemuse järgi (pindala on suurenenud 9%). Samas Ränilinna puhul on vastupidi. Ortofotode järgi on vettpidava pinna pindala muutunud 4% kui spektrisegu lineaarsel lahutamisel on tulemuseks suurenemine 12% võrra. Kesklinnas on ortofotode järgi jäänud vettpidava pinna pindala suhteliselt stabiilseks (suurenemine 1%), kuid spektrisegu lineaarse lahutamise tulemuse järgi on see pindala vähenenud 19%. Kolme kontrollala peale kokku on ortofotode järgi vettpidava pinna pindala suurenenud 3% kui spektrisegu lineaarse lahutamise tulemuse järgi on see vähenenud 1%.

Et paremini võrrelda ja seeläbi välja tuua erinevused spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipiltidel aastatel 1995 ja 2001, on joonistel 14, 15 ja 16 toodud kasutatud kontrollalade a) ortofoto 1995. aastal; b) ortofoto 2001. aastal; spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipildid, kus c) 2001. aasta satelliidifoto pikslitel on vettpidava pinna fraktsioonid suuremad 1995. aasta fraktsioonidest ning d) 1995. aasta satelliidifotol on fraktsioonid suuremad 2001. aasta omadest. Kõik satelliidifotod joonistel 14, 15 ja 16 on filtreeritud 3x3 Landsat TM piksli suuruse keskmistava filtriga et vähendada geokorreksioonist tingitud vea mõju.

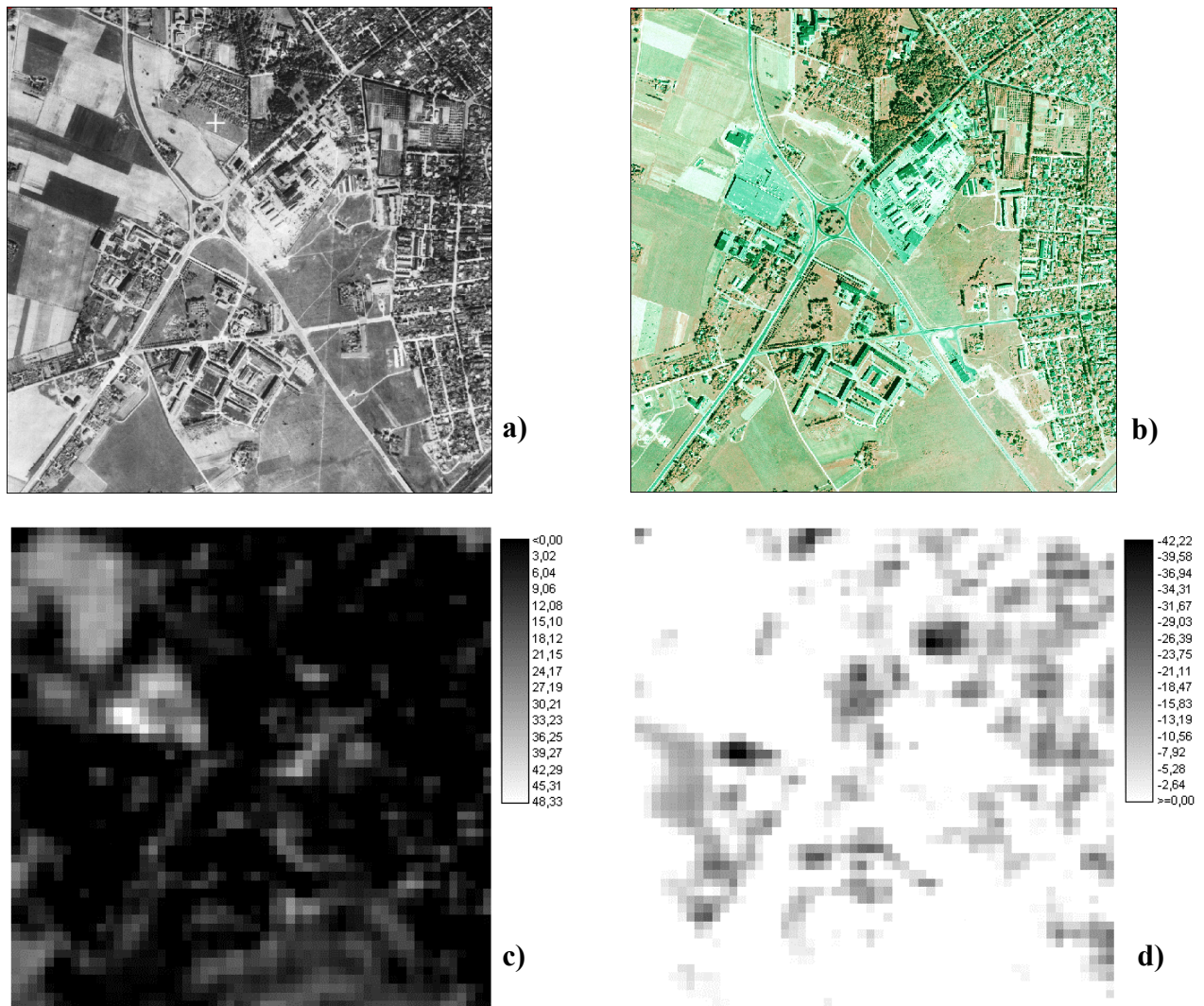


Joonis 14. Uus-Ihaste kontrollala. a) 1995. aasta ortofoto; b) 2001. aasta ortofoto; ning muutused spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipildilt, kus c) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kasvanud; d) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kahanenud.

Uus-Ihaste kontrollala (joonis 14) puhul on täheldatav vettpidava pinna suurenemine võrreldes aastaid 1995 ja 2001. Jooniselt 14c on näha, et ekslikult on siinjuures suurenemiseks klassifitseerunud ka kaks ortofotodelt (joonis 14a ja 14b) selgelt eristuvat looduslikku ala (põld joonise kirdenurgas ja võsastuv rohumaa joonise keskkohast loodesuunas). Nende mõlema ala puhul on fraktsioonid suurenenud ca 0.15 (s.o 15%) võrra, kusjuures 1995. aastal on mõlemal alal vettpidava pinna fraktsioon 0.00. Joonise 14c keskkohast lõunasuunas on samuti näha vettpidava pinna fraktsioonide kasvu, mõne piksli puhul kuni 50%. Selles kohas on ortofotodelt tuvastatav aktiivne ehitustegevus ajavahemikus 1995-2001. Samast kohast pisut lõunapoole on joonisel 14d omakorda täheldatav vettpidava pinna fraktsioonide

vähenev ca 15%. Ortofotode järgi on see ala 2001. aastal ligikaudu samasuguse hoonestatusega kui 1995. aastal. Jooniselt 14c on veel täheldatav osaline vettpidava pinna fraktsiooni kasv kontrollala kaguveerandis, kus ortofotode järgi on osa põllumajanduslikus kasutuses olnud maast hoonestatud.

Üldiselt on jooniselt 14c nähtav Uus-Ihastele iseloomuliku kuju väljajoonistumine ajavahemikus 1995-2001 ning jooniselt 14d eelnevalt hoonestatud alade vettpidava pinna fraktsioonide mõningane vähenemine.



Joonis 15. Ränlinna kontrollala. a) 1995. aasta ortofoto; b) 2001. aasta ortofoto; ning muutused spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipildilt, kus c) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kasvanud; d) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kahanenud.

Ränilinna kontrollalal (joonis 15) on samuti täheldatav üldine vettpidava pinna fraktsioonide kasv ajavahemikus 1995-2001. Joonisel 15c joonistub välja kontrollala keskkohast loodesse jääv suure kaubanduskeskuse ala, kus 1995. aasta ortofoto järgi oli põllumajanduslikus kasutuses olev maa. Samas on ekslikult vettpidavaks pinnaks 2001. aastal klassifitseerunud ka ortofotode järgi põllumajanduslikus kasutuses olevad maa-alad Ränilinna kontrollala loodenurgas ja lõunaservas. Sama on täheldatav jooniselt 15d 1995. aasta puhul kontrollala keskkosast idas. Viimastel juhtudel on tuvastatav fraktsiooni muutumine umbes 15%.

Joonisel 15c ja 15d toodud vettpidava pinna fraktsioonide vahepiltidel vihjavad kaks muutust võimalikule veale satelliidipiltide geokorreksioonis. Eriti selgelt tuleb see välja jooniselt 15d. Kontrollala põhjapiirile jääb Raja tn haigla, mis on jooniselt 15d nähtav kui ala, mille vettpidava pinna fraktsioon on tugevalt vähenenud ajavahemikus 1995-2001. Joonisel 15c on samast alast kirdes näha pikslid, mille vettpidava pinna fraktsioon ajavahemikul 1995-2001 on kasvanud. Samasugune juhtum on nähtav ka kontrollala keskkohast lääne poole jääval alal.

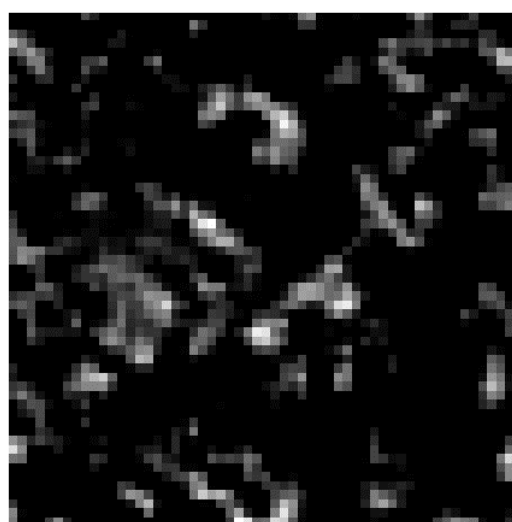
Kesklinna kontrollalal (joonis 16) tervikuna on vettpidava pinna fraktsioonid laias laastus vähenenud. Fraktsioonide vähenemine võrreldes 1995. aastaga on täheldatav vanalinna osas ligikaudu 15% ulatuses. Samas on märgata jooniselt 16c vettpidava pinna fraktsioonide suurenemist ajavahemikul 1995-2001 vanalinnas botanikaaiia lähedal (ca 25%) joonise keskosast põhjasuunas ning Küüni tn ümbruses (ca 25%) joonise keskosas. Vettpidava pinna fraktsioonide vähenemine umbes 50% on märgata lisaks joonise 15d keskosast põhja poole jäävatel pikslitel, mis on ortofotode järgise endise Meltsiveski tiigi alal olev jäätmaa. Sealt lõunapoole piki Emajõe jookseb suurem pikslite grupp, kus samuti on vettpidava pinna fraktsioonid vähenenud, kuid see on ilmselt tingitud erinevatest binaarsetest maskidest, mida kasutati vee eemaldamiseks klassifitseeritavate pikslite seast. Ülejäänud osas on Kesklinna kontrollalal toimunud muutused väga väikesed (ca 50% muutusest jääb fraktsioonide erinevuse -0.15...+0.15 vahemikku).



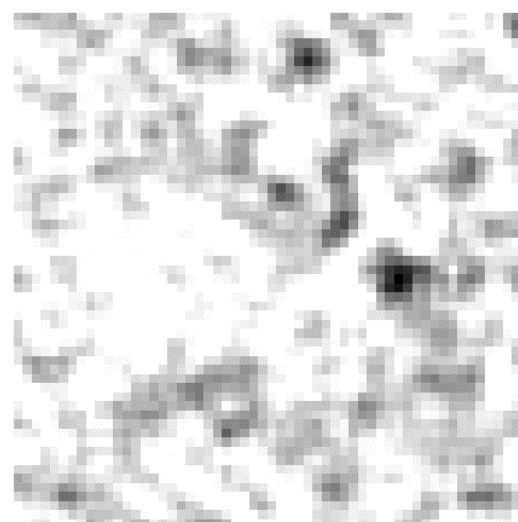
a)



b)



c)



d)

Joonis 16. Keslinna kontrollala. a) 1995. aasta ortofoto; b) 2001. aasta ortofoto; ning muutused spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipildilt, kus c) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kasvanud; d) vettpidava pinna fraktsioonid ajavahemikus 1995-2001 on kahanenud.

3.2 Sobivushinnang

3.2.1 Normeeritud spektrisegu lahutamine

Veahinnangu maatriksarvutuse tein nii valitud kolmel kontrollalal eraldi kui ka kõikidel neil koos. Tabelis 2 on toodud kõikide kontrollalade punktide väärtustel põhinev veamaatriks E_{1995} (vt valem 8)) 1995. aastal ja tabelis 3 veamaatriks E_{2001} 2001. aastal.

Tabel 2. 1995. aasta andmete alusel leitud veamaatriks E_{1995} , mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.

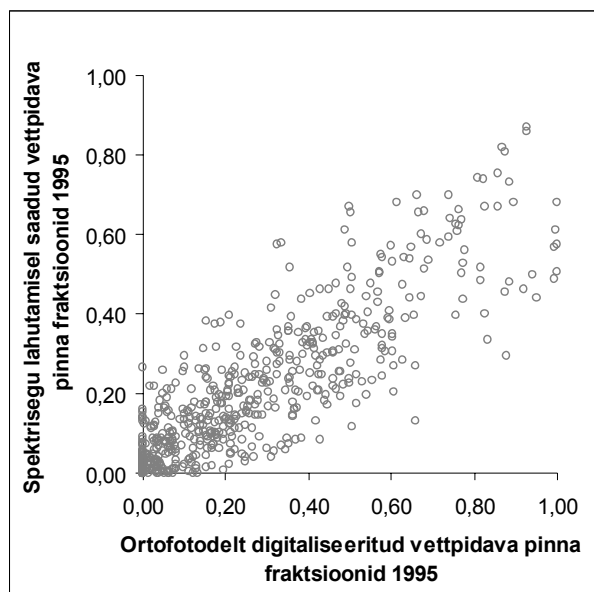
	VPP	VLP	KOKKU
VPP	22,40	-22,40	0,00
VLP	12,66	-12,66	0,00
KOKKU	35,06	-35,06	

Tabel 3. 2001. aasta andmete alusel leitud veamaatriks E_{2001} , mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.

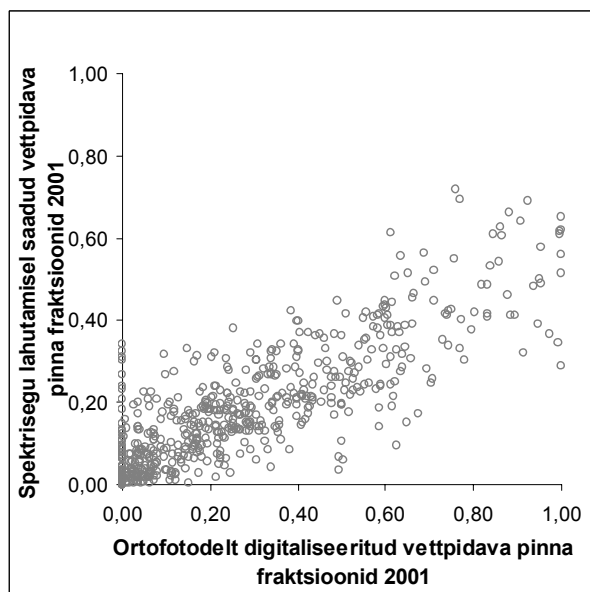
	VPP	VLP	KOKKU
VPP	36,85	-36,85	0,00
VLP	20,57	-20,57	0,00
KOKKU	57,43	-57,43	

Vaadates veamaatriksite E_{1995} ja E_{2001} peadiagonaali on näha, et töös kasutatud spektrisegu lahutamise mudel on võrreldes ortofotodelt digitaliseeritud kaartidega hinnanud vettpidava pinna fraktsioone väiksemaks. Seejuures viga on 1995. aastal väiksem kui 2001. aastal.

Valemi 9) alusel leitud üldine viga 1995. aastal on 12% ning 2001. aastal 19%. Parim sobivus oli 1995. aasta vettpidava pinna fraktsioonipildil Uus-Ihaste kontrollalal (viga 0.3%), halvim Kesklinna kontrollalal 2001. aastal (viga 37%). Samas olid kõikidel kontrollaladel eraldivõetuna spektrisegu lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonid ortofoto kaardistuse tulemusega võrreldes väiksemad.



1995

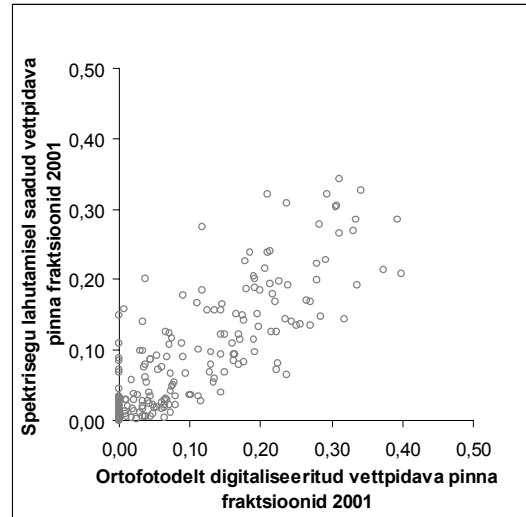
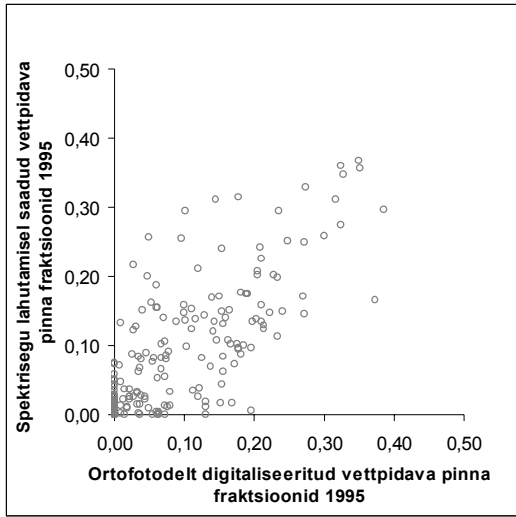


2001

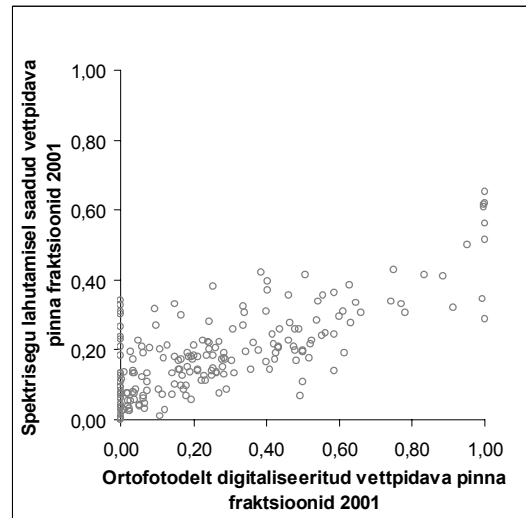
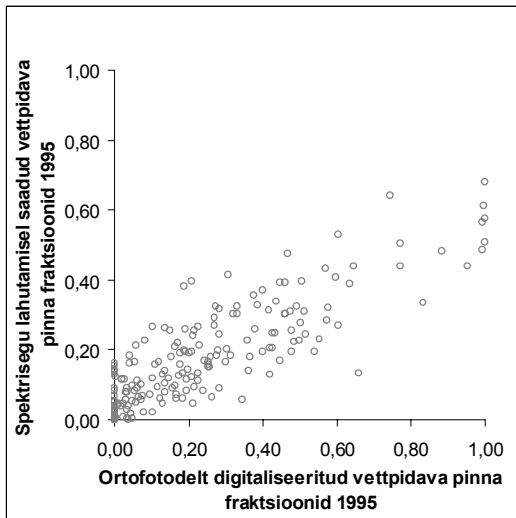
Joonis 17. Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide võrdlus kõigi kolme kontrollala puhvrites aastatel 1995 ja 2001.

Joonisel 17 on kasutatud puhvrite vettpidava pinna fraktsioonide väärtused hajuvusgraafikutele kuvatuna. Joonisel 17a on 1995. aasta väärtused ja joonisel 17b on 2001. aasta väärtused. Nagu näha korreleeruvad 1995. aasta tulemused omavahel paremini ($R=0.86$) kui 2001 aasta tulemused ($R=0.83$). Eriti selgelt tuleb jooniselt 17b välja see, et 2001. aastal on spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud suured vettpidava pinna fraktsioonid ortofotolt leitud tunduvalt madalamad. Täpselt sama vettpidava pinna fraktsiooniga puhvreid oli 1995. aastal 53 ja 2001. aastal 27. Samas puhvreid, kus fraktsioonide erinevus jäi vahemikku $-0.10 \dots +0.10$ oli 1995. aastal 390 (65% koguarvust) ja 2001. aastal 322 (54% koguarvust).

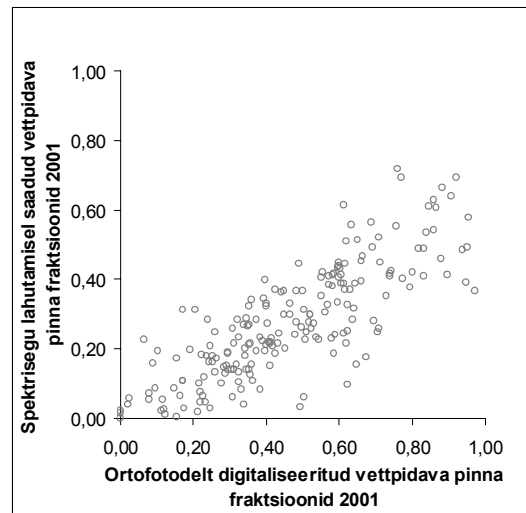
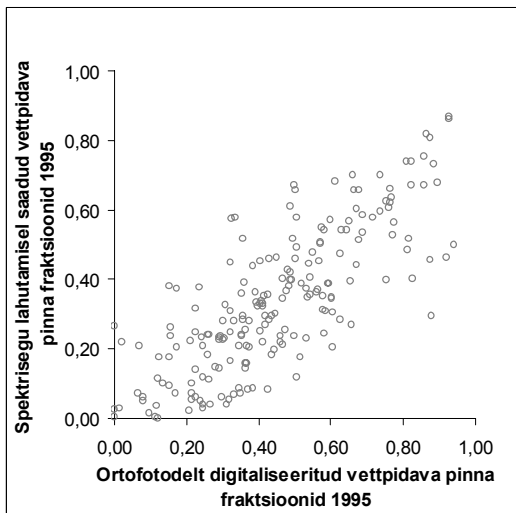
Uus-Ihaste kontrollala



Ränlinna kontrollala



Kesklinna kontrollala



1995

2001

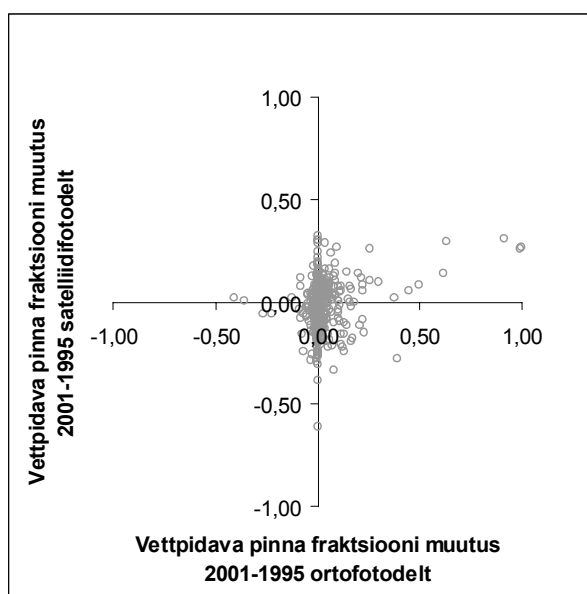
Joonis 18. Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide võrdlus kontrollalade kaupa aastatel 1995 ja 2001.

Joonisel 18 on toodud kasutatud puhvrite vettpidava pinna fraktsioonide väärtused hajuvusgraafikutele kuvatuna kõikide kontrollalade kohta eraldi. Siit hakkab silma, et tulemused korreleeruvad suhteliselt hästi nii 1995. kui ka 2001. aastal Uus-Ihaste kontrollalal, kus on küll tegu <0.50 fraktsioonidega. Ränilinna kontrollalal on nii 1995. kui ka 2001. aastal väiksemaks hinnatud suuremad fraktsioonid, seejuures 2001. aastal rohkem kui 1995. aastal. Kesklinna kontrollalal on 1995. aastal korreleeruvus hea, kuid 2001. aastal on suured vettpidava pinna fraktsioonid kohati tugevalt allahinnatud. Nii Uus-Ihaste kui ka Ränilinna kontrollala puhul võib täheldada, et 2001. aastal on väga väikesed (0.00-lähedased) fraktsioonid ortofotodelt üle hinnatud spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonide osas. Uus-Ihaste kontrollalal on ülehinnatud fraktsioonid väärtustega <0.15 , Ränilinna kontrollalal väärtustega <0.35 . Seega spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioonipiltide järgi esineb väikestes kogustes vettpidavat pinda ka seal, kus seda ortofotode järgi pole. Nagu oli näha joonistelt 14 ja 15 oli tegu mõne üksiku põllumajanduslikus kasutuses oleva maalapiga.

Kesklinna kontrollalal esineb väikeste vettpidava pinna fraktsioonide ülehindamist vähem, mis on ilmselt tingitud sellest, et Kesklinnas on üleüldiselt suuremad vettpidava pinna fraktsioonid. Näiteks on Kesklinnas 2001. aasta ortofoto järgi kokku 10 puhvrit, kus vettpidava pinna fraktsioon on <0.10 , samas kui Ränilinna kontrollalal on selliste puhvrite arv 67 ja Uus-Ihaste kontrollalal 115.

3.2.2 Vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutused ajavahemikul 1995-2001

Joonisel 19 on toodud hajuvusgraafik, mis näitab vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutuseid, võrreldes omavahel spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud tulemusi ja ortofotodelt digitaliseeritud vettpidava pinna kaarte kõigis kolmes töös kasutatud kontrollalal. Nagu jooniselt näha jääb enamuse nii ortofotodelt kui ka spektrisegu lineaarsel lahutamisel tuvastatud muutusest vettpidavas pinnas vahemikku $-0.25...+0.25$. Kusjuures täheldatav on joonisel oleva punktiparve mõningane väljavenitatus piki y-telge. See viitab sellele, et paljudel juhtudel, kus ortofotodelt leitud vettpidava pinna fraktsioon ei muutunud ajavahemikus 1995-2001, on spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioon siiski muutunud. Samuti on üksikuid kontrollpunkte näha hajuvusgraafiku selles osas, mis näitab suurt vettpidava pinna fraktsiooni suurenemist ortofotodelt, kuid spektrisegu lineaarsel lahutamise tulemuste alusel on neis puhvrites muutus küll samasuunaline, kuid mitte sama suur.

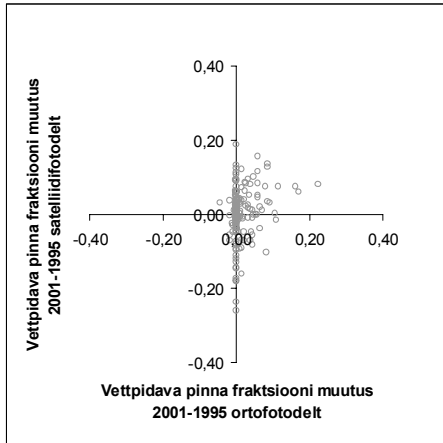


Joonis 19. Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide vahede erinevus kõigi kolme kontrollala puhvrites. Positiivsed väärtused näitavad vettpidava pinna fraktsiooni suurenemist puhvris ajavahemikul 1995-2001.

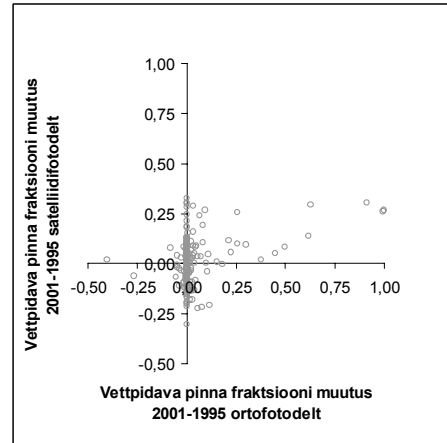
Tabel 4. 1995. ja 2001. aasta andmete aslusel leitud veamaatriks $E_{Fr2001-1995}$, mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt ja 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide vahede sobivust vettpidava pinna pindalas toimunud muutuste kirjeldamisel. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.

	VPP	VLP	KOKKU
VPP	11,92	-11,92	0,00
VLP	6,44	-6,44	0,00
KOKKU	18,36	-18,36	

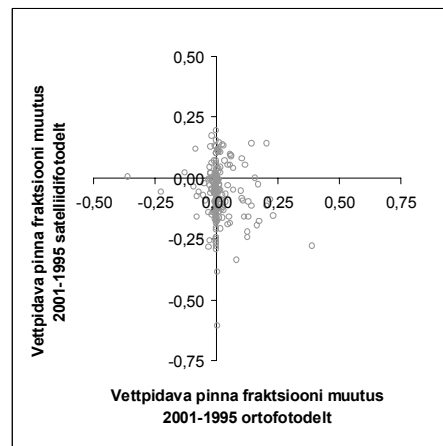
Tabelis 4 on toodud valemi 8) alusel leitud veamaatriks $E_{Fr1995-2001}$. Keskmiseks veaks vettpidava pinna pindalas toimunud muutuste leidmisel spektrisegu lineaarse lahutamisega võrreldes ortofotodelt saadud tulemusega on 6%. Keskmise erinevus ortofotolt leitud vettpidava pinna fraktsiooniväärtuste ja spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsiooniväärtuste vahel on 0.09. Seejuures erinevus neis puhvrites, kus ortofotode järgi on vettpidava pinna pindala vähenenud, on keskmine muutuste erinevus 0.08 ja neis, kus ortofotode järgi on see pindala suurenenud on keskmine muutuste erinevus 0.12. Keskmise erinevus neis puhvris, kus ortofoto järgi muutust ei toimunud on 0.07.



Uus-Ihaste



Ränilinn



Kesklinn

Joonis 20. Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide vahede erinevus kolme kontrollala puhvrites. Positiivsed väärtused näitavad vettpidava pinna fraktsiooni suurenemist puhvris ajavahemikul 1995-2001.

Joonisel 20 on toodud hajuvusgraafikud, mis näitavad vettpidava pinna fraktsioonides toimunud muutuseid, võrreldes omavahel spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud tulemusi ja ortofotodelt digitaliseeritud vettpidava pinna kaarte kasutatud kontrollaladel eraldi.

Uus-Ihaste kontrollalal oli keskmiseks toimunud muutuste erinevuseks satelliidifotodelt võrreldes ortofotolt digitaliseeritud vettpidava pinna kaartidega 0.05. Viga üldistatud pindalalise veamaatriksi järgi oli 2%. Puhvrites, kus ortofotode järgi oli vettpidava pinna pindala vähenenud, oli erinevus 0.04 ja puhvrites, kus ortofotode järgi suurenenud, oli erinevus 0.06. Jooniselt 20 on näha, et kasutatud puhvrite järgi iseloomustavad Uus-Ihaste kontrollala suhteliselt väikesed muutused vettpidavas pinnas (ortofoto järgi -0.04...0.22)

võrreldes teiste kontrollaladega (Ränilinn $-0.40...+1.00$ ja Kesklinn $-0.36...+0.39$), kuigi nagu näha tabelist 1 on Uus-Ihastes toimunud absoluutne muutus ortofotode järgi suurim. Joonisel 20 Uus-Ihaste kontrollala hajuvusgraafikult on nähtav ka punktiparve venitatus piki y-telge. See tähendab seda, et paljudes puhvrites, kus ortofotode järgi muutust ei ole toimunud või on toimunud muutus suhteliselt väikene, on spektrisegu lahutamise meetodiga saadud vettpidava pinna fraktsioonipiltidelt leitud muutus suurem.

Ränilinna kontrollalal oli keskmiseks toimunud muutuste erinevuseks 0.11. Viga üldistatud pindalalise veamaatriksi järgi oli 5%. Puhvrites, kus ortofotode järgi oli vettpidava pinna pindala vähenenud, oli erinevus 0.09 ja puhvrites, kus ortofotode järgi suurenenud, oli erinevus keskmiselt 0.15. Joonisel 20 on Ränilinna kontrollala hajuvusgraafikult näha osade punktide tugevat hajumist x-telje suuremate väärtuste suunas. See tähendab seda, et ortofotodelt tuvastatud muutus on mõnede puhvrite puhul oluliselt suurem satelliidipiltidelt tuvastatud muutusest.

Kesklinna kontrollalal oli keskmiseks muutuse erinevuseks 0.12, viga üldistatud pindalalise veamaatriksi järgi oli Kesklinna kontrollalal 15%. Puhvrites, kus ortofotode järgi oli vettpidava pinna pindala vähenenud, oli keskmine erinevus 0.09 ning puhvrites, kus ortofotode järgi suurenenud, oli keskmine erinevus 0.15. Joonisel 20 on Kesklinna hajuvusgraafikul punktid suures osas hajunud piki y-telje vahemikku $-0.20...+0.10$. See tähendab, et nende puhvrite puhul ei ole ortofotode järgi muutust toimunud või on toimunud muutus väga väike. Samas aga spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud fraktsioonipiltide järgi on toimunud muutus suurem ja enamuse sellest muutusest seisneb vettpidava pinna vähenemises ajavahemikus 1995-2001.

Kokkuvõtlikult kirjeldas kõige paremini puhvrite järgi toimunud muutuseid ajavahemikus 1995-2001 spektrisegu lineaarse lahutamise mudel Uus-Ihaste kontrollalal ja kõige halvemini Kesklinna kontrollalal.

3.3 Regressioonseos vettpidava pinna pindalas toimunud muutuste leidmisel

MS Exceli andmeanalüüsi tööriista *Regression* abil leitud regressioonvõrrandiks 1995. aasta vettpidava pinna fraktsioonipildile oli:

$$\mathbf{Fr}_{1995} = 0.027 + 1.155 * \mathbf{Fr}_{1995} \quad 10)$$

kus \mathbf{Fr}_{1995} on regressioonseosega parandatud vettpidava pinna fraktsioon 1995. aastal, \mathbf{Fr}_{1995} spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioon 1995. aasta Landsat TM kaadrilt.

Võrrand 2001. aasta vettpidava fraktsioonipildile:

$$\mathbf{Fr}_{2001} = 0.013 + 1.446 * \mathbf{Fr}_{2001} \quad 11)$$

kus \mathbf{Fr}_{2001} on regressioonseosega parandatud vettpidava pinna fraktsioon 2001. aastal, \mathbf{Fr}_{2001} spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud vettpidava pinna fraktsioon 2001. aasta Landsat ETM+ kaadrilt. Olulisuse nivool 0.05 võib lugeda mõlemad seosed statistiliselt olulisteks.

Tabel 5. Vettpidava pinna (VPP) pindalas toimunud absoluutsed muutused (m²) ning suhtelised muutused (%) kolmel kontrollalal ajavahemikul 1995-2001. Eraldi on välja toodud ka muutus kõigi kolme kontrollala peale kokku. OF – ortofotolt tuvastatud vettpidav pind, LSM – spektrisegu lineaarsel lahutamisel tuvastatud vettpidav pind, mille pind on korrigeeritud regressiooniseostega, VPP – vettpidav pind.

	Uus-Ihaste		Ränilinn		Kesklinn		KOOS	
	OF	LSM	OF	LSM	OF	LSM	OF	LSM
VPP 1995 (m ²)	214665	223389	578273	516559	1113986	1095848	1906923	1835796
VPP 2001 (m ²)	244990	299785	599739	709727	1128270	1085455	1972999	2094967
Muutus (m ²)	+30325	+76396	+21466	+193168	+14284	-10393	+66076	+259171
Muutus (%)	+14	+34	+4	+37	+1	-1	+3	+14

Tabelis 6 on toodud kõikide kontrollalade punktide väärtustel põhinev veamaatriks $\mathbf{E}_{\mathbf{Fr}_{1995}}$ 1995. aastal ja tabelis 7 veamaatriks $\mathbf{E}_{\mathbf{Fr}_{2001}}$ 2001. aastal. Tabelis 8 on toodud 594. puhvri väärtusel põhinev veamaatriks $\mathbf{E}_{\mathbf{Fr}_{1995-2001}}$, mis kajastab regressioonseose abil muudetud vettpidava pinna fraktsioonipiltide sobivust 1995-2001 vettpidavas pinnas toimunud muutuste kirjeldamisel.

Tabel 6. 1995. aasta andmete alusel regressiooniseose abil leitud veamaatriks $E_{Fr_{1995}}$, mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust peale vettpidava pinna fraktsioonipildi parandamist regressiooniseosega $Fr_{1995} = 0.027 + 1.155 * Fr_{1995}$. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.

	VPP	VLP	KOKKU
VPP	13,58	-13,58	0,00
VLP	1,44	-1,44	0,00
KOKKU	15,02	-15,02	

Tabel 7. 2001. aasta andmete alusel regressiooniseose abil leitud veamaatriks $E_{Fr_{2001}}$, mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt leitud vettpidava pinna fraktsioonide sobivust peale vettpidava pinna fraktsioonipildi parandamist regressiooniseosega $Fr_{2001} = 0.013 + 1.446 * Fr_{2001}$. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.

	VPP	VLP	KOKKU
VPP	15,67	-15,67	0,00
VLP	-6,46	6,46	0,00
KOKKU	9,21	-9,21	

Tabel 8. 1995. ja 2001. aasta andmete alusel leitud veamaatriks $E_{Fr_{2001-1995}}$, mis kirjeldab spektrisegu lahutamisel 2001. aasta Landsat ETM+ satelliidipildilt ja 1995. aasta Landsat TM satelliidipildilt leitud ning regressiooniseostega parandatud vettpidava pinna fraktsioonide vahede sobivust vettpidava pinna pindalas toimunud muutuste kirjeldamisel. VPP – vettpidav pind, VLP – vett läbilaskev pind.

	VPP	VLP	KOKKU
VPP	-2,48	2,48	0,00
VLP	-6,78	6,78	0,00
KOKKU	-9,26	9,26	

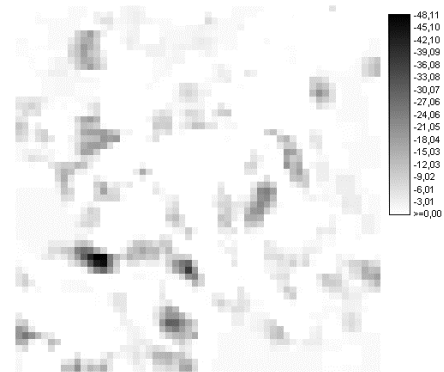
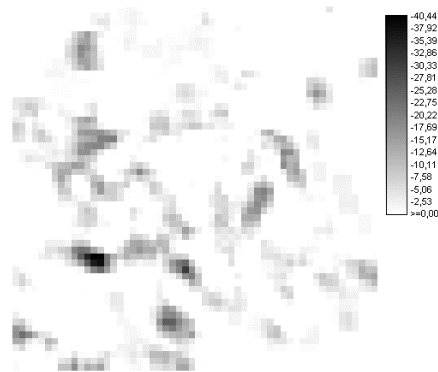
Tabel 9. Valemi 9) alusel leitud üldiste vigade **P** võrdlus regressiooniseose kasutamisel (P_{reg}) ja regressiooniseoseta (**P**). Välja on toodud kõik kolm kontrollala realdi ja kõik koos võetuna. Eristatud on ka 1995. ja 2001. aasta tulemused ning vettpidava pinna pindalas toimunud muutuse kirjeldamise täpsus. Kõik esitatud vead on samasuunalised – ortofotolt leitud fraktsioonid või fraktsioonide muutused on suuremad kui spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud algliikmete fraktsioonid või nende muutused.

	1995		2001		Muutus 1995-2001	
	P (%)	P_{reg} (%)	P (%)	P_{reg} (%)	P (%)	P_{reg} (%)
Uus-Ihaste	0.3	3	3	6	2	3
Ränilinn	12	6	17	0.3	5	6
Kesklinn	22	12	38	15	15	3
Koos	12	5	19	3	6	3

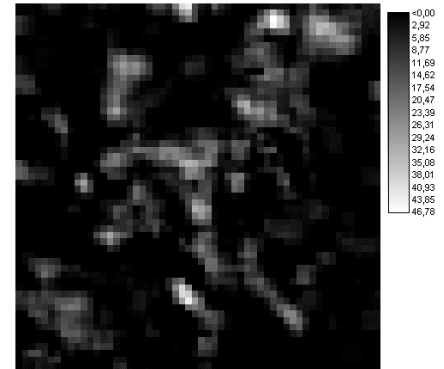
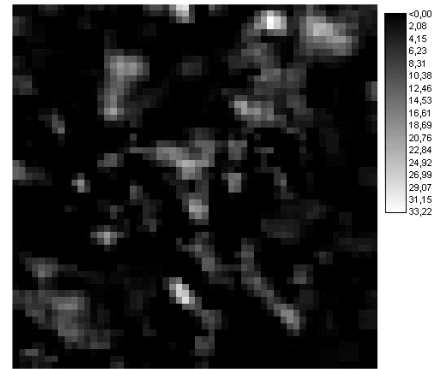
Nii Ränilinna kui ka Kesklinna kontrollalal paranes tänu regressiooniseose loomisele satelliidipildidelt leitava vettpidava pinna pindala sobivushinnang. Ainult Uus-Ihaste

kontrollala puhul on märgata vea mõningast suurenemist (vt tabel 9). Samuti on paranenud sobivushinnang üle kõigi kontrollalade. Koos regressioonseose kasutamise on paranenud ka muutuse kirjeldamise täpsus kui võtta kõik kontrollalad koos. Kui parandamata piltidel oli muutuse hinnangu viga 6% siis pärast parandamist on viga vaid 3%. Oluliselt on paranenud sobivushinnang muutuste kirjeldamisele Keslinna kontrollalal (enne viga 15%, pärast parandust 3%). Nii Uus-Ihaste kui ka Ränilinna kontrollala puhul on vettpidava pinna pindalas toimunud muutuste kirjeldamise täpsus 1% võrra langenud.

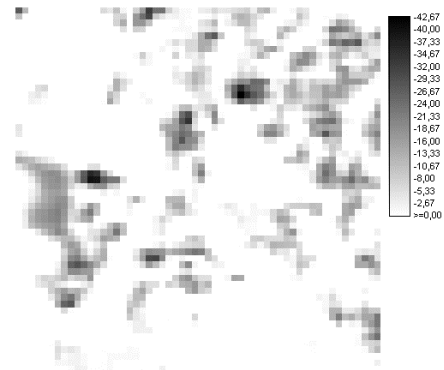
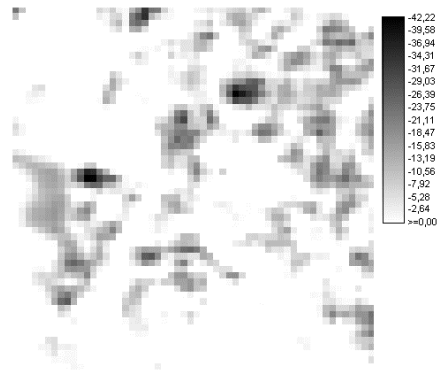
Uus-Ihaste alad,
kus vettpidav pind
1995-2001 on
vähenenud



Uus-Ihaste alad,
kus vettpidav pind
1995-2001 on
suurenud



Ränilinna alad,
kus vettpidav pind
1995-2001 on
vähenenud

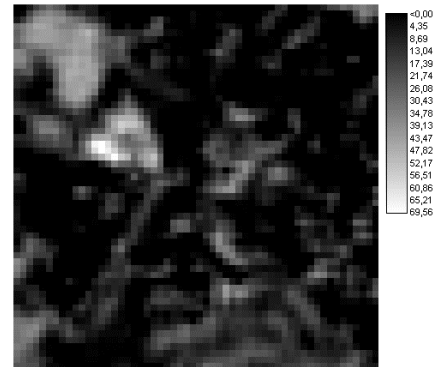
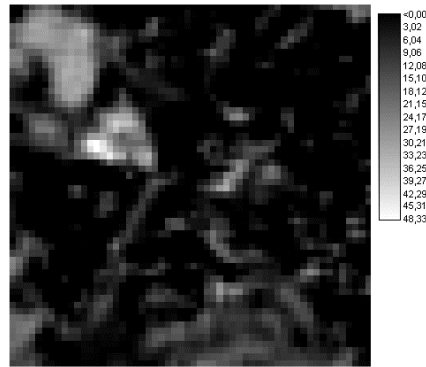


Regressiooniseoseta

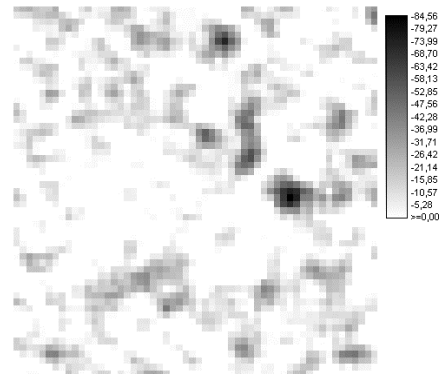
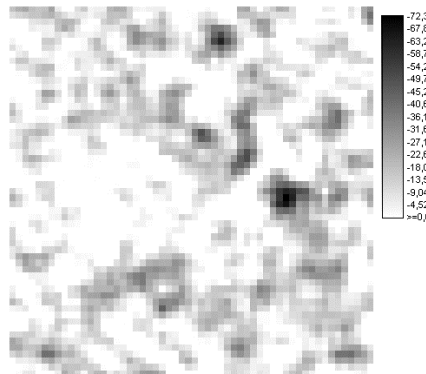
Regressiooniseosega

Joonis 21. Spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide vahepildid enne (vasakus veerus) ja peale parandamist (paremas veerus) kontrollalade kaupa (järgneb järgmisel leheküljel).

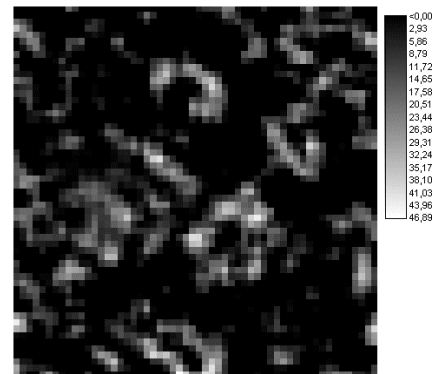
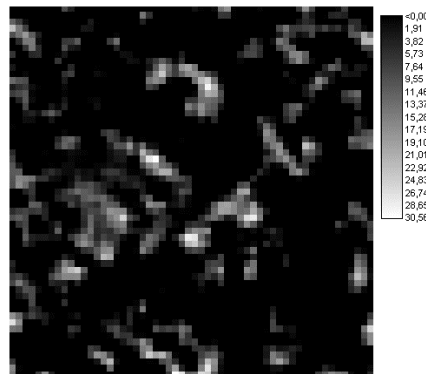
Ränilinna alad,
kus vettpidav pind
1995-2001 on
suurenenud



Kesklinna alad,
kus vettpidav pind
1995-2001 on
vähenenud



Kesklinna alad,
kus vettpidav pind
1995-2001 on
suurenenud



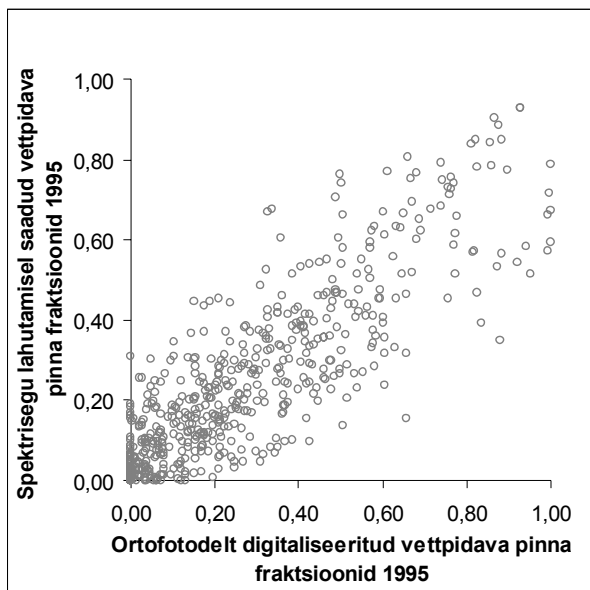
Regressiooniseoseta

Regressiooniseosega

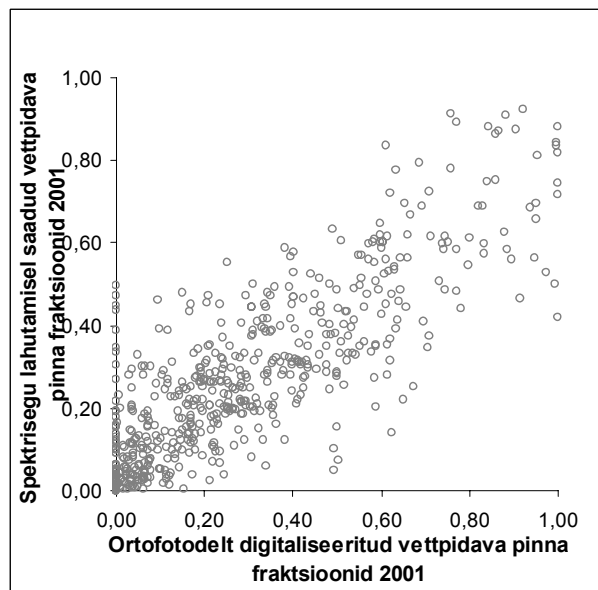
Joonis 21. (Algus eelmisel lehel). Spektrisegu linearsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide vahepildid enne (vasakus veerus) ja peale parandamist (paremas veerus) kontrollalade kaupa.

Joonisel 21 on toodud võrdlevalt 1995. ja 2001. aasta vettpidava pinna fraktsioonipiltide vahepildid enne (joonis 21 vasak veerg) ja peale regressiooniseose kasutamist (joonis 21 parem veerg) kontrollalade kaupa. Nagu üldiselt piltidelt näha pole regressiooniseose kasutamine silmnähtavalt muutnud muutuste piltide sisu, küll on aga suurenenud maksimaalsed fraktsioonide erinevuste väärtused. Välja arvatud Ränilinna kontrollalal nende alade osas, kus 1995. aastal olid suuremad vettpidava pinna fraktsioonid kui 2001. aastal.

Samas pole märgata regressiooniseose erilist mõju muutumatuna püsinud aladele. Kui vaadata tegelike ja leitud fraktsioonide hajuvusgraafikuid pärast regressiooniseosega „parandamist” (joonis 22), siis hakkab silma, et 2001. aastal on mõned 0.00-lähedased fraktsioonid tänu regressiooniseosega „parandamisele” saanud tublisti suurema fraktsiooniväärtuse (vrdl joonis 17). Tulemuste lähem uurimine näitas, et tegu on Ränilinna kontrollalal 2001. aastal tuvastatud põllumajandusliku alaga, mis eksikombel on klassifitseerunud vettpidavaks pinnaks (vt joonis 15c).



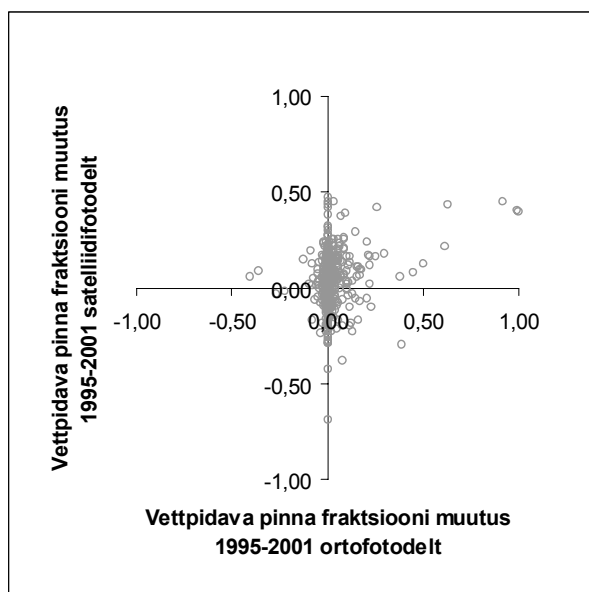
1995



2001

Joonis 22. Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide võrdlus peale vettpidava pinna fraktsioonipiltide „parandamist” regressiooniseosega kõigi kolme kontrollala puhvrites.

Joonisel 23 on toodud ortofotodelt ja spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonide muutuse võrdlus pärast vettpidava pinna fraktsioonipiltide „parandamist” regressiooniseosega hajuvusgraafikuna. Kui võrrelda seda joonisel 19 toodud hajuvusgraafikuga on näha, et regressiooniseosega „parandamise” toel on mõningal määral paranenud suurte muutuste detekteerimine. Samas on märgata, et regressiooniseosega fraktsioonipiltide „parandamine” on vähendanud ortofotolt muutumatutena tuvastatud puhvrite vettpidava pinna fraktsiooniväärtuste hajuvust ja need on kontsentreeritumalt x- ja y-telje ristumiskohas.



Joonis 23. Ortofotolt digitaliseeritud (x-telg) ja spektrisegu lahutamisel leitud (y-telg) vettpidava pinna fraktsioonide vahede erinevuse võrdlus peale vettpidava pinna fraktsioonipiltide „parandamist” regressiooniseosega kõigi kolme kontrollala puhvrites. Positiivsed väärtused näitavad vettpidava pinna fraktsiooni suurenemist ja negatiivsed väärtused vähenemist puhvris ajavahemikul 1995-2001.

Joonisel 19 olid näha üksikud puhvrid, kus vettpidava pinna osakaal oli ajavahemikus 1995-2001 kasvanud ortofoto järgi 0.00-lt 1.00-ni, kuid spektrisegu lineaarsel lahutamisel sama suurt muutust ei olnud märgata. Vettpidava pinna fraktsioonipiltide „parandamine” regressiooniseosega on mõningal määral seda muutust suurendanud, kuid mitte siiski samaväärseks ortofotolt leitudga. Antud juhul on tegu puhvritega, mis on sattunud Riia mnt ringi ääres asuva kaubanduskeskuse parkimisplatsi alale, mis 2001. aasta maikuuks ei olnud ilmselt veel täielikult asfalteeritud, kuid ortofoto tegemise ajaks seda juba oli (kaubanduskeskus ise avati sama aasta augusti lõpus).

4. Arutelu

Vettpidav pind on maakattetuüp, mille alla koondatakse erinevad materjalid, mis ei lase sademeveel selle allasadamise kohas maapinda imbuda. Kuna vettpidava pinna võib lugeda suurel määral omaseks just ehitatud keskkonnale, siis on muutused vettpidava pinna pindalas tihedalt seotud linnade kasvu protsessidega, eeslinnastumisega – selle käigus kaetakse ulatuslikke looduslikke pindasid vett mitteläbilaskva pinnaga. See aga tähendab *a priori* maakasutuse muutumist. See võib ühelt poolt viia looduslikud, isefunktsioneeruvad tagasiside süsteemid tasakaalust välja. Selle näitena võib nimetada näiteks Lääne-Euroopa üleujutused, mille on põhjustanud just sademevee kiire ärajuhtimine selle allasadamiskohast. Teisalt tähendab spetsiifilise maakasutuse muutumine ka sotsiaalse keskkonna muutumist ja majanduslike olude muutumist, mis võivad sütitada sotsiaalseid probleeme ning poliitilisi konflikte. Seetõttu võib vettpidava pinna kaardistamise lugeda oluliseks uurimisülesandeks inimgeograafia kontekstis, sest selle baasilt on võimalik edasi tegeleda oluliste linnastumist puudutavate küsimustega.

Käesoleva töö eesmärgiks oli kontrollida spektrisegu lineaarse lahutamise meetodiga vettpidava pinna suhtelise paiknemise kaardistamise täpsust satelliidi Landsat vahendatud keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidelt. Selleks kaardistati vettpidava pinna suhteline paiknemine Tartu linnas ja selle lähiümbruses satelliidi Landsat vahendatud keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidelt 1995. ja 2001. aastal. Järgnevalt anti sobivushinnang leitud vettpidava pinna kaartidele nii mõlemal uuritud aastal eraldi kui ka leitud muutusekaardile ortofotodelt digitaliseeritud vettpidava pinna kaartide abil kasutades selleks üldistatud pindalalist veamaatriksit.

Järgnevalt on esmalt välja toodud peamised arutelulised küsimused, millele seoses töö praktilise osaga peaks vastama, enne kui teha järeldusi spektrisegu lineaarse lahutamise meetodi kasutatavusest linnade ja nende lähiümbruses toimuvate maakattemuutuse uurimisel. Arutelu lõpus võetakse töö tulemused kokku ja asetatakse need üldisesse linnade uurimise konteksti inimgeograafia võtmes.

4.1 Satelliidipiltide ettevalmistus ja spektrisegu lahutamine

Enne spektrisegu lahutamist satelliidipildid normeeriti (valemid 4) ja 5)), mis varasemate sama temaatikat käsitlevaid töid [Wu 2004, Zhang et al. 2005] arvestades vähendab samakujuliste spektraalsete signatuuridega materjalide heleduste varieeruvust. Pärast veepindade edasisest andmetötlusest väljajätmist (maskimist) võis segu lahutamisel algliikmetena kasutada vettpidavat pinda, taimkattega pinda ja taimkatteta mullapinda.

Segunemisruumi lähemal uurimisel selgus, et normeerimine ei ole siiski täielikult eemaldanud taimkatte heleduse varieeruvust, mistõttu võtsin kasutusele ka neljanda algliikme (tume taimkate), mille hiljem segu lahutamisel saadud taimkatte algliikme fraktsiooniga liitsin, viimaks leitud fraktsioonipilte VIS mudeli raamistikku. Tumeda taimkatte ja taimkatte algliikmete kokkuliitmise võib lugeda õigustatuks, kuna sellele viitas nii tumeda taimkatte fraktsioonipildi lähem uurimine kui ka tumeda taimkatte algliikme paiknemine segunemisruumis veekogusid (laiemas mõttes spektraalselt normeeritud tumedad objektid) ja taimkatet ühendaval sirgel.

Siinpuhul tuleks kindlasti selgitada, miks normeerimine ei kõrvaldanud heleduse erinevust tumeda ja heleda taimkatte vahel. Peamiseks põhjuseks on siin ilmselt see, et tumedama taimkatte (nt metsaalad) spektraalne signatuur on erinev heledama taimkatte (nt rohumaa) omast. Seda seetõttu, et aluspind, millelt peegeldunud kiirgust sensor mõõdab, on kummalgi juhul erinev. Tume taimkate on iseenesest juba taimkatte ja varju spektrite segu. Komponent-spektrid ise ei ole keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidelt (nagu seda on Landsati vahendatud satelliidipildid) vahetult mõõdetavad. Metsaalade puhul peaks eelpool nimetatutele lisanduma klorofüllita taimeosade algliige. Selle jaoks kasutasid näiteks Adams et al. [1995] spektrisegu lahutamisel lisaks taimkatte algliikmele algliiget nimega mittefotosünteesiv taimkate, millena nad pidasid silmas puutüvesid, oksi jms taimeosaid. Kui praeguses töös tumedaks taimkatteks nimetatud algliikme fraktsioonipilte lähemalt uurida, on näha, et selle suuremad väärtused on seotud puudega kaetud aladega – parkide, kalmistute ja metsadega.

Töös kasutatud algliikmete heleduste väärtused valisin kummagi pildi jaoks teisest pildist sõltumatult, et tagada algliikmete paiknemine segunemisruumi piksliparve nurkades. Kummaltki pildilt kasutasin algliikmete spektraalsete signatuuride leidmiseks seejuures kahekümne erineva piksli väärtuseid. Algliikmete defineerimiseks kasutatud pikslite hulk võiks olla küll suurem, kuid hilisem pikslite väärtuste uurimine näitas, et piltidelt leitud

kahekümne piksli spektraalsed kõverad ei erinenud üksteisest oluliselt. Lisaks tähendaks suurema arvu pikslite väärtuste kasutamine ka käsitsi tehtava töö hulga suurenemist. Seega juhul kui kasutada suuremat hulka (nt >2000 pikslit [Small 2001]) tuleks ilmselt rakendada mingisugust automatiseeritud eeskirja algliikmete heleduste väärtuste leidmiseks. Teiseks võimaluseks oleks referentsalgiikmete kasutamine. Linnas esineda võivate pindade spektraalsete omaduste arhiveerimistööd on teinud Herold et al. [2004]. Samas tuleks siin meeles pidada, et ka referentsalgiikmete kasutamisel on omad puudused [Song 2005] ning vastamata jääks ka küsimus nende kasutatavusest Eesti linnade oludes.

Algliikmete signatuurifailide moodustamisel torkas silma 2001. aasta signatuuride mõningane erinevus 1995. aasta signatuuridest (vt joonis 9). Seda eriti vettpidava pinna (suuremad erinevused nähtava kiirguse kanalites TM1, TM2 ja TM3), varju (suurimad erinevused nähtava kiirguse kanalites TM1-TM3 ja lähisinfra punases kanalisis TM4) ning taimkatteta mullapinna osas (suurimad erinevused nähtava kiirguse kanalites TM2 ja TM3 ja keskmise infra punase kanalisis TM5). Taimkatte 2001. aasta signatuur on põhimõtteliselt sarnane 1995. aasta omaga, kuigi väike kõrvalekalle on ka siin nähtava kiirguse kanalites TM1-TM3 ning mõningane erinevus esineb lähisinfra punases kanalisis TM4, mis on ilmselt seotud pildil avalduvate taimefenoloogiliste erinevustega (2001. aasta pilt on maikuu algusest, 1995. aasta oma augusti lõpust). Kõigi nelja algliikme 2001. aasta signatuuride puhul on aga märgata, et need on sinises kanalisis TM1 vähemal või suuremal määral väiksemad kui aastal 1995. Rohelises kanalisis TM2 ja punases kanalisis TM3 aga suuremad. Lähisinfra punases kanalisis TM4 on väärtused üldiselt väiksemad (suurimad ligi 50 DN erinevused taimkattel ja varjus taimkattel – algliikmetel, mis on seotud taimkattega). Eelneva peamiseks põhjuseks on ilmselt see, et 2001. aasta kaader on Landsat 7 ETM+ pilt, 1995.a. pilt on Landsat 5 TM pilt. Sellegipoolest ei tohiks see mõjutada töö tulemust, sest 2001. aasta signatuure kasutati ainult segu lahutamiseks 2001. aasta kaadrit.

Uurides lähemalt spektrisegu lahutamisel modelleerimata jäänud jääkide alusel leitud mudelite ruutkeskmiste vigade pilte, võib valitud algliikmeid pidada hästi valituteks, sest kõikidel kaadritel on keskmiselt jäänud modelleerimata iga kanali kohta ~2 DN, s.t vähem kui 5% algsest andmestikust. Suurimad modelleerimata jäänud jäägid seonduvad Emajõe kaldapealsete aladega. See on ilmselt tingitud veepindade väljamaskimise ja segunemisruumis varju algliikme asukoha määramise täpsuse koosmõjust. Joonisel 8 oli näha, et vaatamata veepindade väljamaskimisele ja suhteliselt kindla kujuga „sarve” väljajoonistumisele

segunemisruumis, jääb siiski osa piksleid väljapoole nelja algliikme poolt moodustuvat kujundit, mis nagu väidab Small [2002], määrab pildi piksli modelleeritavuse segumudelis.

4.2 Sobivushinnang ja tulemuste interpretatsioon

Spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltidele andsin sobivushinnangu 1995. ja 2001. ning 2002. aasta ortofotodele tuginedes Eesti Põhikaardist ümberdigitaliseeritud vettpidava pinna kaartidega. Veahinnangu andmiseks kasutasin kokku 3 kontrollala, mis olid erinevates linnaosades (Uus-Ihaste, Ränilinn ja Kesklinn), et tagada erinevate asumitüüpide ühtlasem esindatus veahinnangus. Igasse kontrollalasse tekitasin 200 juhupunkti. Igale juhupunktile omakorda tekitasin MapInfos kahe Landsat TM piksli (60meetrise) raadiusega puhvrid. Seejärel arvutasin vettpidava pinna pindala nii ortofotodelt digitaliseeritud kaartidelt kui ka spektrisegu lahutamisel saadud fraktsioonipiltidelt.

Eelnevas samateemalises töös [Kärdi 2007] viidi sobivushinnang läbi Eesti Põhikaardi kaardilehtedele toetudes. Põhikaardi põhialad klassifitseeriti eelnevalt ümber VIS mudeli osisteks ning meetodiliselt viidi veahinnang läbi sarnaselt käesolevale tööle. Sellise lähenemise suurimaks probleemiks osutus asjaolu, et Eesti Põhikaardi põhialad on klassifitseeritud maakasutuse, mitte maakatte järgi. Seetõttu võib küsitav olla põhialade VIS klassideks jagamine. Selles osas on käesolevas töös kasutatud sobivushinnangu andmise meetod parem, kuna see aitab selgemalt kaardistada tegelikku vettpidava pinna paiknemist mingil ajahetkel. Samas sõltub ka siinpuhul mõningal määral tegeliku vettpidava pinna kaardistustulemus digitaliseerijast.

Leitud veahinnangu järgi on mõlemal töös kasutatud aastal kontrollaladel vettpidavat pinda ortofotodelt digitaliseeritud kaartide järgi rohkem kui spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud fraktsioonipiltidel. Sellele viitavad veamaatriksid E_{1995} ja E_{2001} (vt tabelid 2 ja 3). Erinevus võib osaliselt olla tingitud sellest, et ortofotodelt võib olla digitaliseeritud vettpidavaks pinnaks ka alasid, mis seda tegelikult ei ole, nt jäätmaa-alad Ränilinna kontrollalal, mis tegelikult peaks klassifitseeruks pigem taimkatteta mullapinna klassi.

Vettpidavaks pinnaks on spektrisegu lineaarsel lahutamisel klassifitseerunud ka looduslikke alasid. Näiteks Uus-Ihaste kontrollala puhul mainitud ortofotodelt tuvastatav võsastuv rohumaa 2001. aasta vettpidava pinna kaardil. Sama oli täheldatav ka Ränilinna kontrollalal osas, mis ortofotolt oli selgelt tuvastatav põllumajanduslikus kasutuses oleva maana (põllu piir suhteliselt selgelt väljajoonistunud). Lisaks, vaadates tervet uuritavat kaadrit, on näha, et vettpidava pinna kaardistamise mõttes problemaatiliseks on osutunud ka kevadine Emajõe üleujutusala kasutatava satelliidipildi väljalõike kaguosas.

Viimane nimetatud probleemidest on seotud veealade väljamaskimisega (vt joonised 7 ja 8). Veega kaetud alasid kasutatav spektrisegu lineaarse lahutamise mudel sisuliselt eirab. Seetõttu kõik veega alad, mida mask ei eemaldanud (nt Emajõe üleujutusala uuritava ala kaguosas) klassifitseeruvad kas vettpidavaks pinnaks või tumedaks taimkatteks, seda sõltuvalt nende pikslite asukohast joonisel 8 toodud hajuvusgraafikutel.

Sama kehtib ka ilmselt eelpool nimetatud looduslike ja põllumajanduslike alade kohta. Sisuliselt ei klassifitseerita spektrisegu lahutamisega mitte kindlaid maakatteid (nt antud juhul siis taimkatet, vettpidavat pinda ja taimkatteta mullapinda), vaid maakatteid, mis on spektraalsetelt omadustelt sarnased eelnevalt defineeritud algliikmetega: taimkate, vettpidav pind ja taimkatteta mullapind. Seega kui mingisugune looduslik ala klassifitseerub osaliselt vettpidavaks pinnaks, siis saab sellest järeldada, et antud alal on osaliselt algliikmena defineeritud vettpidava pinna spektraalsed omadused. See tõstatab küsimuse leitud algliikmete sobivuse osas, kuid arvestades spektrisegu lahutamise mudeli jääkstandardhälvet (valem 3)) ja sobivushinnangu tulemusi (tabel 9), siis võib öelda, et valitud algliikmed sobivad kirjeldama uuritavat ala.

Kui vaadata veahinnanguid kontrollalade kaupa, siis kõige parem sobivushinnang oli Uus-Ihaste kontrollalal, kus nii 1995. kui ka 2001. aastal jäi üldine vettpidava pinna klassi fraktsiooni viga alla 5%. Ränilinna kontrollalal jäi viga mõlemal aastal väiksemaks kui 20%. Kesklinna kontrollalal oli viga 1995. aastal 22%, kuid 2001. aastal oli viga juba üle 35%. Kuna Uus-Ihaste kontrollalal olid vettpidava pinna fraktsioonid kasutatud puhvrites suhteliselt madalamad kui Ränilinna ja Kesklinna kontrollalal, siis võib siit teha järelduse, et spektrisegu lineaarse lahutamise on täpsemalt võimalik vettpidava pinna suhtelist paiknemist kindlaks teha keskmisest väiksemate fraktsioonide juures.

Väga suurte vettpidava pinna fraktsioonide juures võib kohati esineda päris suuri kõrvalekaldeid. Suuremad kõrvalekalded olid seejuures kevadisel 2001. aasta vettpidava pinna fraktsioonipildil. Hilissuvisel 1995. aasta fraktsioonipildil olid need kõrvalekalded väiksemad.

Mõeldes suuremate vettpidava pinna fraktsioonide suuremale üldisele veale leidsin regresioonseose spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonide ja ortofotodelt tuvastatud vettpidava pinna vahel. Selleks kuvasin kogu töös kasutatud kaardialale 100 juhupunkti. Igale juhupunktile tekitasin taaskord kahe Landsat TM piksli suuruse (60m) raadiusega puhvrid. Digitaliseerisin neis puhvrites vettpidava pinna nii 1995. kui ka 2001. aastal, kasutades alusandmestikuna Eesti Põhikaarti ning 1995., 2001. ja 2002.

aasta ortofotosid. Arvutasin vettpidava pinna pindala osakaalud puhvrite kogupindalast 1995. ja 2001. aastal nii ortofotodelt digitaliseeritud kaartidelt kui ka spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltidelt. Leitud fraktsiooniväärtuste alusel tegin ka regressioonanalüüsi MS Exceli tööriistaga *Regression*. Leitud regressiooniparameetreid kasutasin regressioonivõrrandi koostamiseks, mille alusel „parandasin” ka spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna 1995. ja 2001. aasta fraktsioonipildid.

Leitud regressioonimudelid osutusid mõlemad olulisuse nivool 0.05 statistiliselt oluliseks. Korrelatsioonikordaja 1995. aasta mudeli jaoks oli 0.86 ja 2001. aasta mudeli jaoks 0.83.

Regressioonseose abil parandatud piltidel paranes oluliselt suurte vettpidava pinna fraktsioonide sobivushinnang. Näiteks Kesklinna kontrollalal langes viga nii, et nii 1995. kui ka 2001. aastal jäi vettpidava pinna pindala proportsiooni veaks vähem kui 15%. Viga vähenes ka Ränlinna kontrollalal oluliselt, jäädes mõlemal aastal väiksemaks kui 6%. Negatiivselt on mõjunud regressioonseosega piltide „parandamine” ainult Uus-Ihaste kontrollalal, kus nii 1995. kui ka 2001. aasta vettpidava pinna fraktsioonipiltide viga on kasvanud umbes 3% mõlemal aastal. Seega on regressioonseosega vettpidava pinna fraktsioonipiltide parandamine positiivselt mõjunud pigem suurematele vettpidava pinna fraktsiooniväärtustele. Madalamate fraktsioonide puhul on viga pigem suurenenud.

Üldiselt, võttes kõik kontrollalad korraka, on regressiooniseose kasutamine siiski mõjunud positiivselt vettpidava pinna fraktsioonipiltide täpsusele, võrreldes ortofotodelt digitaliseeritud vettpidava pinnaga. Üldine viga kõigi kolme kontrollala peale kokku oli kummalgi aastal väiksem kui 20%, samas pärast regressioonseose kasutamist on üldine viga vähenenud 1995. aastal 5% ja 2001. aastal 3%-le (vt tabel 9).

Kokkuvõtlikult võib öelda, et vettpidava pinnaga seonduv viga on võrreldav eelnevate samateemaliste tööde üldiste veahinnangutega.

Toimunud muutuste lähem analüüs spektrisegu lahutamisel saadud fraktsioonipiltide vahepiltide abil aitas tuvastada üksikud põllumajanduslikus kasutuses olevad alad, mis olid kas 1995. või 2001. aastal klassifitseerunud vettpidavaks pinnaks. Need olid suuremad homogeenised alad, kus vettpidava pinna fraktsioonid jäid väiksemaks kui 0.25 (nt vt joonis 14c või joonised 15c ja 15d). Taimkatteta mullapinna ja vettpidava pinna raskemale eristamisele on viidatud juba eelnevates töödes, mis on tegelenud vettpidava pinna suhtelise pindala määramisega spektrisegu lineaarse lahutamise. Nagu oli näha jooniselt 21 ei

suutnud ka regressiooniseose loomine eriti seda viga vähendada. Seetõttu oleks vaja vettpidavas pinnas toimunud muutuste kaardistamisel ilmselt kindlasti kasutada mingisugust lävendit, millest alates lugeda fraktsiooni muutus reaalseks muutuseks vettpidava pinna pindalas. Või siis teistpidi leida võimalus põllumajanduslike ning looduslike alade väljamaskimiseks.

4.3 Märkused spektrisegu lineaarse lahutamise tulemuste kasutamise osas

Arvestades üldistatud pindalalise veamaatriksiga saadud veahinnangut, on väikseim viga nii 1995. kui ka 2001. aastal Uus-Ihaste kontrollalal, kus vettpidava pinna fraktsioonid on üldiselt kogu uuritava ala keskmisest väiksemad. Nii Kesklinna kui ka Ränilinna kontrollaladel olid vead suurusjärgu võrra suuremad. Ränilinna suurema vea tingisid ilmselt põllumajanduslikud alad, mis klassifitseerusid vettpidavaks pinnaks (Uus-Ihaste kontrollalal ei olnud põllumaa osakaal nii suur). Kesklinna puhul mängis rolli ilmselt uuritava ala keskmisest suuremad tegelikud vettpidava pinna fraktsioonid. Viimast probleemi aitas osaliselt leevendada spektrisegu lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide “parandamine” regressioonseosega, mida näitab veahinnang. Samas omas regressioonseose loomine negatiivset mõju Uus-Ihaste kontrollala tulemustele, mistõttu tuleks järeltada, et kui uurimuse eesmärgiks on madaltihedate asumite vettpidava pinna kaardistamine, ei tohiks regressioonseost kasutada.

Ühe suurima üldise probleemina tuleb välja tuua asjaolu, et paljud looduslikud või põllumajanduslikus kasutuses olevad alad klassifitseeruvad teatud määral vettpidavaks pinnaks tänu oma spektraalsetele omadustele, mis on vettpidava pinna sarnased. Kuna tegu ei ole aga reaalselt vettpidava pinnaga, siis võib saadud tulemuse selles osas lugeda ekslikuks. Seega tuleks otsida võimalust mingisuguse lisaandmestiku abil täpsustada, millised pikslid saavad reaalselt olla seotud vettpidava pinnaga ja millised mitte.

Teiseks siin töös veel puudutamata probleemiks on aastaegadest tingitud mõju leitud VIS mudeli osiste fraktsioonidele, seega küsimus kuivõrd mõjutavad fenoloogilised muutused kaardistatava vettpidava pinna fraktsioone. Taimkatte fenoloogiliste muutuste tõttu võib tekkida olukord, kus kevadeti on vettpidava pinna fraktsioonid suuremad, suve saabudes need osaliselt vähenevad (kuna taimkatte osakaal piksli pinnas kasvab) ja sügiseti need jälle kasvavad. Sellele on tähelepanu juhtinud ka Small & Lu [2006]. Soovitatav oleks siinpuhul ilmselt kasutada samast fenoloogilisest ajast pärinevaid satelliidipilte.

Kui samast fenoloogilisest ajast pärinevate satelliidipiltide kasutamine ei ole võimalik, tasuks uurida muutumatuna püsinud alasid, kus VIS mudeli osiste fraktsioonid ei tohiks olla aastate lõikes muutunud. Kuna füüsiliselt pole VIS mudeli osiste fraktsioonid sellistel aladel muutunud, peaks kogu kaardistatud muutus olema seotud eluslooduse fenoloogiaga ja mudeli kaardistusveaga. Mudeli kaardistusviga on võimalik kvantifitseerida mudeli

jääkstandardhälbe leidmisega (vt valemid 1) ja 3)). Seeläbi oleks võimalik kindlaks teha aastaegade suhtelist mõju ning kui pidepunktina kasutatavaid muutumatuna püsivaid alasid on piisavalt, saaks kindlaks määrata ka aastaegade suhtelise mõju tugevuse konkreetsel kaadril kui kasutada on vähemalt kahest erinevast aastast ja erinevatest aastaegadest pärit satelliidipilte.

Selleks et spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipilte kasutada linnastumisprotsesside uurimiseks tuleks kuidagi mööda saada probleemist, kus maa-alad, mis spektraalsete omaduste poolest sarnanevad vettpidava pinnaga, klassifitseeruvad osaliselt vettpidavaks pinnaks.

Arvestades Landsati vahendatud satelliidipiltide piksli suurust maapinnal, ei ole vettpidava pinna pindalas toimuvate muutuste uurimine pildi piksilt-pikslike mõttekas, sest arvestada tuleb ka satelliidipiltide geokorreksioonist tingitud veaga. Kärdi [2007] kasutas uuritavale alale tekitatud kahe Landsat TM piksli laiuseid aknaid ning kirjeldas sellega toimunud muutuseid VIS mudeli osistes. Selle lähenemisega ei lahenda aga siiski eelnevalt mainitud probleemi, kus osa looduslike alasid klassifitseerub osaliselt vettpidavaks pinnaks. Üheks võimaluseks selle probleemi lahendamisel oleks spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide ning neilt tuvastava muutuse analüüs katastriandmete kontekstis.

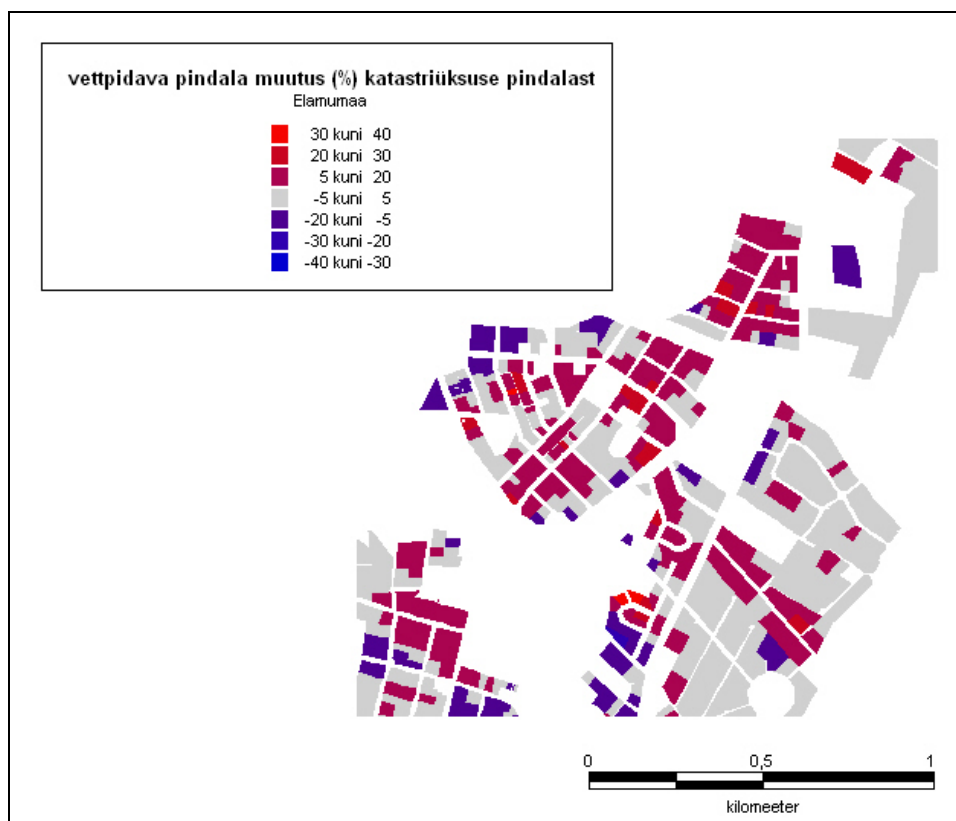
Maakataster on riiklik register, mille vastutavaks töötlejaks on keskkonnaministeerium ning see koosneb maaregistrist koos katastrikaartidega ja katastriarhiivist (Maakatastriseadus §2-3, vt <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=12766588>, viimati külastatud 2. veebruar 2007). Maaregistrisse kantakse muude andmete hulgas ka katastriüksuste geograafilised piiripunktid ja sihtotstarbed. Viimaste alusel on võimalik katastrisse kantud maa jagada esimeses lähenduses elamumaaks, ärimaaks, tootmiskaaks, mäetööstusmaaks, sotsiaalmaaks, veekogude maaks, transpordimaaks, jäätmehooldamaaks, riigikaitsemaaks, kaitsealuseks maaks, maatulundusmaaks ja sihtotstarbeta maaks (Vabariigi Valitsuse määrus Katastriüksuse sihtotstarvete liikide ja nende määramise aluste kinnitamine, vt <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?replstring=33&dyn=12766588&id=23557>, viimati külastatud 2. veebruar 2007). Paljudel neist sihtotstarvete klassidest on omakorda alaliigid (nt elamumaa jaguneb väikeelamumaaks, korruselamumaaks, eluasemekohtade maaks, aiandus- ja suvilakruntide maaks, ühistute maaks ning aiandus- ja suvilaühistute maaks).

Katastriüksustele määratud sihtotstarvete alusel oleks võimalik eraldada nt looduslikud alad, kus vettpidavat pinda ei esine (või kus seda küll võib esineda, kuid linnastumise protsesside

uurimise seisukohast ei oma see tähtsust) muudest katastrisse kantud maadest. Samuti annaks see võimaluse eraldi uurida elamumaana, ärimaana, tootmiskaana jne katastrisse kantud maadel toimunud muutuseid. Lisaks oleks võimalik jälgida ka katastriüksuste endi pindalamuutuseid (nt mingil ajahetkel maatulundusmaana katastrisse kantud põllumaa on jagatud elamumaa kruntideks) ning nende paiknemist linnasüdame ja teiste linna oluliste objektide suhtes.

Kuna andmete registreerimist maaregistrisse alustati Maa-ameti interneti-kodulehe andmeil 1993. aastast (vt http://www.maaamet.ee/index.php?lang_id=1&menu_id=2&page_id=37&lang_id=1, viimati külastatud 2. veebruar 2007), siis on sellist andmeanalüüsi võimalik läbi viia alles üheksakümnendate aastate teisest poolest alates. Samas arvestades, et uus-asumite rajamine hoogustus alles 2000. aasta paiku, siis ei tohiks see ka suuremat probleemi tekitada.

Probleemseks võib pigem osutada uuselamurajoonide suhteliselt väiksed katastriüksused, mis on tüüpiliselt vahemikus 1500-2500 m² (vrldl antud töös kasutatud pildi piksli pindala 900 m²). See muudab äärmiselt tähtsaks geokorreksiooni täpsuse. Seda seetõttu, et väiksematel katastriüksustel võib juba väiksemgi kõrvalekalle satelliidipildi kasutatavas koordinaadistikku sättimisel viia täiesti erinevate lõpptulemusteni maakattemuutuse suunas ja suuruses.



Joonis 24. Uus-Ihaste kontrollalal asuvatel elamumaana registreeritud katastriüksustel ajavahemikul 1995-2001 toimunud muutused vettpidava pinna pindalas.

Joonisel 24 on toodud Uus-Ihaste kontrollalal 2006. aasta augustiks elamumaana katastrisse kantud kruntide vettpidava pinna muutused ajavahemikul 1995-2001. Vettpidava pinna muutuse protsent katastriüksusel näitab pindala muutuse suurust katastriüksuse pindalast. Võrreldes seda joonistel 14 c) ja 14 d) tooduga on toimunud muutused vettpidavas pinnas selgemini välja joonistunud. Samuti on välja jäänud alad, kus spektrisegu lineaarsel lahutamisel on saadud selgelt ekslik tulemus (nt rohumaa kontrollala loodeveerandis, vt joonis 14). Toimunud muutuseid on lihtsam panna arusaadavalt üldisesse konteksti ning uurida näiteks toimunud muutuste mustreid.

Jooniselt 24 on selgelt näha Uus-Ihaste kontrollalal oleva vettpidava pinna pindala suurenemine kontrollala kirde-edelasuunal ning kontrollala keskelt kagusuunal piki uue rajatava asustusala läbiva tee servasid. 2006. aastaks on enamik antud kontrollala kaguveerandisse jäävatest elamumaa kruntidest, mis joonise 14 b) järgi oli 2001. aastal põllumaa, juba täis ehitatud. Samuti tuleb jooniste 14 a), 14 b) ning joonise 24 võrdlusest välja, et alad, kus esines üksikuid hooneid 1995. aastal, on 2001. aastaks tihedamini täis

ehitatud, tuues endaga kaasa vettpidava pinna pindala suurenemise (joonise 24 keskosa ja kirdeveerand).

Kuna kontrollala ise on väike, siis ei oleks mõttekas siinpuhul hakata muutuseid kvantitatiivselt hindama, sest see võiks viia ekslike järeldusteni. Suurema uuritava ala puhul, kuhu oleks kaasatud linna erinevad asumid, oleks seda juba mõttekas teha, võimaldades seeläbi uurida vettpidavas pinnas toimuvaid muutuseid ajas ja ruumis. Saadud tulemusi oleks võimalik analüüsida ka muude andmete (nt rahvastikuandmed, küsitlused, elanikkonna linnaruumis liikumist kirjeldavad andmed jne) kontekstis.

Näiteks võib siinpuhul uurida asustusala laienemise suunda mingist eelnevalt määratud kindelpunktist, et teha kindlaks, kas linnaline ala laieneb mingites kindlates suundades või ühtlaselt igas suunas. Teiseks võib uurida vettpidava pinna pindala muutuse suuruse seost kaugusega mingist eelnevalt määratud asukohast (või asukohtadest), mislābi oleks võimalik kindlaks teha näiteks kuivōrd palju mõjutab kaugus mingist linna tõmbe- või tõukepunktist uus-asumite rajamist. Kui kasutada rohkem kui kahest erinevast aastast pärit satelliidipilte, oleks lisaks võimalik uurida ka eelnevalt mainitud kahte nähtust aegreas, mille alusel oleks võimalik kindlaks teha eelisarendatavad piirkonnad. Koos kõrgusmudeli andmetega oleks võimalik ka vee äravoolu modelleerimine.

4.4 Töö tulemused inimgeograafia kontekstis ja edasine uurimistöö

Uudo Pragi [2002, lk 19] on märkinud, et „inimgeograafia põhiuvi on ühe kindla nähtuse paigutus ruumis” ning „inimgeograafi [häirivad] tavaliselt kaardi ääred, ta tahaks alatihti vaadata ääre taha” ja seetõttu „tarvitaks [inimgeograaf] heameelega ainult maailmakaarte – kui neile saaks ainult peale joonistada kõik külad või kõik vabrikud või kõik teed ja jalgrajad.” Selles võtmes on kaugseirel inimgeograafia andmeallikana palju pakkuda geograafiliste nähtuste uurimisel. Andmeid võib saada alates ühe riigi territooriumist kuni suurte, terveid regioone hõlmavate aladeni. Samuti on võimalik pikemate aegridade koostamine (nt Landsati andmeid on saadaval alates 1972. aastast, Eesti alal on Landsati andmetega võimalik tagasi minna kuni 1980. aastate keskpaigani).

Kuid esmalt tuleks tagasi tulla Riddi [1995] VIS mudeli juurde. Selle järgi saab linnaala maakatet modelleerida kolme komponendi – taimkatte, vettpidava pinna ja taimkatteta mullapinna – kaudu. Kuna komponentide osakaalude summa mingil diskreetsel pindalal (nt üks pildi piksel) summeerub alati kokku üheks (või saajaks protsendiks), siis ühe maakattetüübi muutus viib kokkuvõttes kõigi kolme komponendi osakaalu muutumisele sellel pindalal (nt ühel pildi piksilil). Ridd [1995] on ise tunnistanud, et tegu on reaalse olukorra lihtsustusega, kuid arvestades keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltide pikslite suurust maapinnal võib sellise lihtsustusega leppida.

Nagu teoreetilises osas mainitud, võib linnastumist pidada nii linnastunud maa-ala suhtelise osakaalu kasvuks riigis kui ka linnadega seotud sotsiaalsete tegevuste üldistumist ühiskonnas [Jauhiainen 2005]. Linnastumist suunavad mitmed erinevad ühiskonna arenguga seotud protsessid (demograafilised, sotsiaalsed, majanduslikud, kultuurilised jne). Linnastumise tulemuseks on muuhulgas aga ehitatud keskkond ning spetsiifiline maakasutus. Linnastumisega kaasnevatele sotsiaalsetele probleemidele ja küsimustele poliitilisi lahendusi otsides muudetakse linna kui süsteemi olemust poliitika, seaduste ja planeerigute kaudu, mis omab omakorda tugevat mõju linnastumisele ja seda suunavatele protsessidele.

Uurides linnastumist ei tohiks peatuda ainult maakatte muutustel (linnastumise tulemus) või ühiskondlikel protsessidel (linnastumist suunavad protsessid), vaid tuleks need kaks omavahel siduda ja uurida neid teineteisest sõltuvatena ja kombineeritult. Selles võtmes peaski käesolevas töös esitletud meetodika panustama linnade uurimisse – see pakub võimaluse kaardistada ajas toimunud maakatte muutuseid linnades ja nende lähiümbruses, et need tulemused seejärel siduda ühiskondlike muutustega ja teha järeldusi nende muutuste mõjust

linnade maakattemuutustele. Esitatud meetodi suureks plussiks on see, et see võimaldab võrdlevalt analüüsida linnade ja nende lähiümbruse maakattemuutuseid suurel skaalal, erinevates Maa piirkondades. Erinevates sotsiaalsetes, majanduslikes ja ajaloolis-kultuurilistes kontekstides.

Käesoleva magistritöö praktilise osa baasilt on võimalik teha mõned järeldused spektrisegu lineaarse lahutamise meetodi rakendamise osas linnaliste maakattetüüpide muutuste kaardistamiseks VIS mudeli seatud kontseptuaalses raamistikus. Selle, Tartu linna baasil tehtud töö alusel saab välja tuua lähenemise peamised puudused.

Spektrisegu lineaarse lahutamise meetodi peamiseks puuduseks on tulemuste sobivuse (õigsuse) hindamise raskendatus. Kuna vaja oleks hinnata pikslisiseid väärtusi ei ole võimalik traditsioonilisi veahinnangu meetodeid kasutada. Käesolevas töös lahendati sobivushinnangu probleem algliikmete jagamisega kahte klassi, vettpidavaks pinnaks ja vett läbilaskvaks pinnaks. Kui uurimisülesanne eeldab vettpidava pinna kaardistamist, siis on selline lähenemine loogiliselt õigustatud. Oleks vaja aga keskenduda nt taimkatte või taimkatteta mullapinna fraktsioonide tegelikule kindlakstegemisele, siis ei oleks selline lähenemine enam võimalik. Nende algliikmete fraktsioonide kindlakstegemine on raskendatud ka välitingimustes (vrld vettpidav pind, mida teoreetiliselt on võimalik välitingimustes ka GPSiga mõõdistada). Seega saab teha järeldusi vaid leitud vettpidava pinna fraktsioonide õigsuse kohta, mistõttu rakenduslikus võtmes saaks uurida vaid vettpidava pinna pindalas toimuvaid muutuseid ning seda suunavaid linnastumisega seotud protsesse. Rohealade uurimine samade meetoditega on raskendatud.

Teiseks probleemiks, mis selles töös välja tuli, on asjaolu, osa looduslike alasid klassifitseerub oma spektraalsete omaduste tõttu kohati osaliselt vettpidavaks pinnaks. Näiteks märgalad, liivarannad, kasutusest väljas olevad põllumajanduslikud maad. See võib aga viia rakenduslike uuringute tulemused linnade vettpidava pinna muutuse osas valedele järeldustele. Näiteks tulvariskide hindamise seisukohast oleks see väga halb. Käesolevas töös pakuti võimalusena välja katastripiiride andmestiku kasutamist looduslike alade väljajätmiseks analüüsist, kuid see ei sobiks erinevate maade linnade võrdlevaks analüüsiks. Siinpuhul lihtsat ja käegakatsutavat lahendust ei ole, edaspidise töö käigus tuleks välja töötada meetod, millega oleks võimalik võimalik spektrisegu lineaarse lahutamise meetodi täpsut tõsta selles osas.

Kolmandaks probleemiks on aastaaegade mõju spektrisegu lineaarse lahutamise tulemustele, mis on tingitud eluslooduse fenoloogilistest muutustest. Seda mõju annaks vähendada võimalikult samast fenoloogilisest ajast pärit satelliidipiltide kasutamisega.

Edasisele uurimistööle mõeldes võiks välja tuua kolm peamist suunda inimgeograafilisel suunal.

Esiteks erinevate post-sotsialistlike linnade maakasutuse muutuse võrdlev analüüs. Seda just vettpidava pinna pindalas toimunud muutustele keskendudes. Sotsialistliku ühiskonnakorra asendumine kapitalistlikuga on erinevates post-sotsialistlikes maades toimunud erineval ajal ja ka erineva n.ö strateegiaga (kiire või aeglane üleminek). Seetõttu oleks huvitav siinkohal selgitada välja ühised jooned, mis on seotud ehitatud keskkonna pindala muutumisega. Soovitav oleks siinpuhul võrrelda ilmselt Venemaa, Baltiriikide ja Ida-Euroopa linnu, mis alustasid üleminekut uuele ühiskonnakorrale küll laias laastus samalt stardipositsioonilt, kuid erinevast ajaloolisest kontekstist tingitud erinevate võimalustega. Selline uurimus eeldaks ka vastavate piirkondade sotsiaal-majandusliku olukorra ja ajaloolis-kultuurilise tausta analüüsi. Võimalusena tasuks kaaluda ka rahvastikuandmete kasutamist.

Teise edasise uurimissuunana tasuks välja tuua erinevate linnamudelite (nt Hoyt, Burgess, Harris-Ulmann, Kearsley) kontrollimine/arendamine post-sotsialistlike riikide osas. Sotsialistlikes linnades ei olnud maa hind linna arengut reguleeriv tegur, selleks olid pigem poliitilised ja ajaloolised tegurid, seetõttu ei ole need mudelid üks-üheselt ülekantavad post-sotsialistlike linnade konteksti. Lisaks tuleb arvestada sellega, et siin nimetatud kolm mudelit arvestavad pigem maakasutusega kui maakattega, mistõttu tuleb eelnevalt analüüsida mooduseid VIS mudeli teisendamiseks maakasutuse konteksti.

Kolmandaks võimalikuks edasiseks suunaks võiks olla Eesti põllumajandussektoris toimunud muutuste uurimine. Seda just linnalähedaste põllumajandusmaade kasutusest väljajätmise osas, et välja selgitada kui palju tegelikult on linnalähedasi põllumajandusmaid tootmisest välja jäetud ja kas see on tingitud linnadest pealetungivast elamuehitusest (üks on teisest majanduslikult kasulikum) või pigem ühiskondliku korra muutumisest (tootmispõhimõtete radikaalne muutus, põllumajandusettevõtete arvu vähenemine). Kuna enamjagu põllumajandustootjatest taotleb tänapäeval Euroopa Liidu ühtse põllumajanduspoliitika raames makstavaid põllumajandustoetuseid on võimalik saada suhteliselt täpne ettekujutus põllumajanduse seisust hetkel (kui palju maad ja kus kohas on kasutusel ja kuidas seda hooldatakse).

Neljandaks võimaluseks oleks tulvariskide hindamine. Eeslennastumisega seotud ehitatud pindade pindala kasv linnade äärtel on üks põhjus üleujutuste tekkimisel. Vettläbilaskva pinna asendamisel vettpidava pinnaga kiireneb sademevee äravool suurtelt maa-aladelt ja põhjustab vee suubumisaladel üleujutusi. See eeldaks vettpidava pinna pindala määramist ja digitaalse kõrgusmudeli abil vee äravoolu modelleerimist.

Kõigile neile neljale lähenemisele on käesolevas töös esitatud spektrisegu lineaarse lahutamise meetodil pakkuda alusandmeid toimunud maakattemuutuste kohta. Kuid konkreetsem edasine uurimistöö sõltub eelnevalt välja toodud spektrisegu lineaarse lahutamise meetodi kolme probleemi metoodilisest lahendamisest. Samuti peab edasise uurimistöö jaoks selgelt läbi töötama filosoofilise baasi, millelt linnastumist uurida.

6. Kokkuvõte

Linnadele on omane väga heterogeenne ruum, mis põhjustab väga erinevate pindade üheaegset koosinemist keskmise ruumilise lahutusega satelliidi Landsat skanneri Thematic Mapper (TM) sensori hetkvaateväljas. Seetõttu võib kategooriliste klassifitseerimisalgoritmide kasutamine linnaaladest tehtud keskmise ruumilise resolutsiooniga satelliidipildidel osutada piiratuks. Selles suhtes osutub palju paindlikumaks linna-alade klassifitseerimise ja aja jooksul toimunud muutuste mõõtmise vahendiks spektrisegu lineaarne lahutamine.

Antud töö eesmärgiks on kontrollida spektrisegu lineaarse lahutamise meetodiga vettpidava pinna suhtelise paiknemise kaardistamise täpsust satelliidi Landsat vahendatud keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidelt ning avada saadud tulemused inimgeograafia kontekstis. Uurimisülesande raskuskese oli satelliidipiltide töötlusel ja veahinnangul, reaalne maakattemuutuseid põhjustavate linnastumise protsesside uurimine jäi praegusel hetkel selle töö raamistikust välja.

Taimkate – vettpidav pind – taimkatteta mullapind (VIS) mudel pakub hea kontseptuaalse raamistiku linnade kirjeldamiseks keskmise ruumilise lahutusega sensorite piltidelt. VIS mudeli järgi on linna mingisugust ala (näiteks 1 m², 1 pildi piksel vms) võimalik kirjeldada taimkatte, vettpidava pinna ja taimkatteta mullapinna suhtelise katvuse kombinatsioonidena.

VIS mudeli osiste fraktsioonipiltide leidmiseks kasutati spektrisegu lineaarse lahutamise meetodit. Enne spektrisegu lahutamist satelliidipildid normeeriti, et vähendada algliikme heleduse varieerumisest tingitud viga. Spektrisegu lahutamise mudeli RMS viga kummalgi aastal jäi väiksemaks kui 5% (igas spektraalses kanalis jäi nii 1995. kui 2001. aastal modelleerimata ~ 2 DN).

Teiseks ülesandeks oli kvantitatiivselt hinnata nii 1995. kui ka 2001. aasta fraktsioonipiltide kaardistusviga. Kuna taimkatte ja taimkatteta mullapinna fraktsioonipiltidele sobivushinnangu andmine on raskendatud, kasutati käesolevas töös sellist lähenemist, kus arvestati need kaks VIS mudeli osist ühtse klassina (vett läbilaskev pind), sest vettpidava pinna pindala on suure ruumilise lahutusega kaugseire piltidelt võimalik digitaliseerida või välitööde käigus GPSiga kaardistada. Võttes aluseks Eesti Põhikaardi põhialade klasse, mis seonduvad vettpidava pinnaga, digitaliseeriti 2001. ja 2002. aasta ortofotodelt vettpidavad pinnad uuritava ala kolmel kontrollalal (Kesklinn, Ränilinn, Uus-Ihaste) kokku kuuesajas kahe Landsat TM piksli suuruse raadiusega puhveralas (igal kontrollalal kakssada puhvrit). Lisaks kontrolliti samades

punktides üle ka põhikaardi baasilt saadud vettpidava pinna kaart 1995. aastal 1995. aasta ortofotodele toetudes, et kontrollida, et mõlema aasta vettpidava pinna kaardid vastaksid samadele digitaliseerimistingimustele.

Kõige täpsem oli vettpidava pinna kaardistus 1995. aasta satelliidipildilt Uus-Ihaste kontrollalal, kus viga oli väiksem kui 1%. Kõige halvem oli tulemus Kesklinna kontrollalal 2001. aastal, kus viga oli suurem kui 30%. Kolme kontrollala peale kokku oli 1995. aasta Landsat TM kaadrilt vettpidava pinna kaardistusviga 12% ja 2001. aastal Landsat ETM + kaadrilt 19%. Kusjuures mõlemal aastal tuli ortofotodelt leitud vettpidava pinna pindala suurem kui spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna pindala.

Samuti leiti veahinnang muutuse kaardile. Kuna arvestada tuli nii positiivsete kui ka negatiivsete muutustega vettpidava pinna pindalas, siis kasutati 0.00 punktina (ehk puhvris ei ole vettpidava pinna pindala muutunud) fraktsiooniväärtust 0.50. Seetõttu pidi küll üldistatud pindalalise veamaatriksi omapära tõttu veahinnangust välja jätma kuus puhverala, kus vettpidava pinna fraktsiooni muutus jäi väljapoole vahemikku 0.00-1.00. Väiksem viga ajavahemikul 1995-2001 vettpidava pinna pindalas toimunud muutuse kirjeldamisel oli Uus-Ihaste kontrollalal, kus viga oli 2%. Suurim viga vettpidava pinna pindala muutuse kirjeldamisel oli aga Kesklinna kontrollala, kus viga oli 15%. Arvestades kõiki kolme kontrollala koos oli muutuse kirjeldamise viga 6%.

Nagu paljudes eelnevates sama teemat puudutavates töödes on ka siin väga suuri vettpidava pinna fraktsioone hinnatud tegelikust väiksemaks. Seetõttu uuriti käesolevas töös, kas regressioonseose abil on võimalik spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipilte "parandada". Selleks digitaliseeriti vettpidav pind uuritava alal olevale kahesajale juhupunktile tekitatud kahe Landsat TM piksli suuruse raadiusega puhveralas nii 2001/2002. aasta ortofotodelt kui ka 1995. aasta ortofotodelt ning arvutati vettpidava pinna pindala samades puhvrites spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud fraktsioonipiltidelt. Saadud tulemuste alusel koostati regressioonivõrrandid, mille parameetrite alusel "parandati" spektrisegu lineaarsel lahutamisel saadud fraktsioonipildid.

Saadud tulemuste sobivus kvantifitseeriti taaskord üldistatud pindalalise veamaatriksi abil. Selle järgi oli oluliselt paranenud vettpidava pinna kaardistustäpsus Ränlinna ja Kesklinna kontrollalal, kus nii 1995. kui ka 2001. aastal jäi vettpidava pinna kaardistusviga väiksemaks kui 15%. Ainult Uus-Ihaste kontrollala puhul viga suurenes kummalgi aastal ~ 3%. Arvestades kõiki kolme kontrollala koos jäi viga mõlemal aastal väiksemaks kui 5%.

Samuti arvutati viga uuesti muutuste kaardile. Arvestades kõiki kolme kontrollala koos on vettpidava pinna pindalas toimunud muutuse kirjeldamise täpsus paranenud kolme protsendi võrra. Kõige suurem paranemine on toimunud Kesklinna kontrollala, kus viga on vähenenud 15% pealt 3% peale. Ränilinna kontrollalal on viga jäänud umbkaudu samaks. Ainult Uus-Ihaste kontrollalal on viga suurenenud 2% pealt 3% peale. Sellest võib järeldada, et leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide parandamine regressiooniseosega on mõttekas ainult juhul kui on vaja kindlaks teha vettpidava pinna fraktsioonide muutuseid kesklinna piirkonnas, kus vettpidava pinna fraktsioonid on keskmisest suuremad. Juhul kui eesmärgiks on madaltihedate asumite uurimine oleks mõttekam regressiooniseosega “parandamist” mitte kasutada.

Kolmandaks analüüsiti spektrisegu lineaarsel lahutamisel leitud vettpidava pinna fraktsioonipiltide kasutatavust edasises uurimises. Suurimate probleemidena siinpuhul tasub mainida aastaegadest tingitud muutuseid, mida ei saa lugeda tegelikuks muutuseks maakattes, ja osade looduslike alade spektraalset sarnasust vettpidavate pindadega, mis on tinginud kohati looduslike alade osalise klassifitseerumise vettpidavaks pinnaks.

Esimesel juhul tuleks otsida võimalusi aastaegade mõju hindamiseks piltidelt (nt erinevatest aastaegadest pärit satelliidipiltide abil) kasutades muutumatuna püsivad alasid indikaatoritena aastaegade mõju suunast ja suuruselt. Probleemi aitaks leevendada ka samast fenoloogilisest ajast pärinevate satelliidipiltide kasutamine. Teisest nimetatud probleemist aitaks üle saada lisaandmestiku kasutamine pärast spektrisegu lineaarset lahutamist. Võimalusena toodi arutelus välja katastriüksuste piiride kasutamine, mis aitaks eraldada linnalise, ehitatud maa põllumajanduslikus kasutuses olevast ja looduslikust maast. Lisaks võimaldaks see eraldi uurida elamumaana kasutuses olevat maad tootmises ja äritegevuseks kasutatavat maad. Kokkuvõtlikult aitaks selliste lisaandmete kasutamine toimunud muutuseid selgepiirilisemalt kaardistada, luua paremini seoseid ajas ja ruumis vettpidava pinna pindalas toimuvate muutuste osas ning uurida tulemusi muude andmete (nt rahvastikuandmed) kontekstis. Samas kui uuritav ala asub Eestist väljas võib sellise andmestiku kasutamine osutada raskendatuks.

Asetades selle magistritöö tulemused inimgeograafia konteksti, tuleb väga oluliseks pidada linnades ja nende lähiümbruses detekteeritavad maakattemuutuste sidumist ühiskondlike protsessidega, mis suunavad linnastumist, ning analüüsida võrdlevalt erinevaid linnu.

Kokkuvõtlikult võib väita, et linnas toimuvate maakatte muutuste jälgimine keskmise ruumilise resolutsiooniga satelliidipiltidelt lineaarse spektrisegu lahutamise meetodiga on võimalik ja VIS mudel pakub selleks sobiva mõttelise raamistiku. Samas tuleks kindlasti

silmas pidada pildi ruumilist resolutsiooni lähteülesande ja eesmärkide püstitamisel. Selleks, et vähendada fenoloogilistest muutustest tingitud fraktsiooniväärtuste muutusi, peaksid kasutatavad satelliidipildid olema võimalikult sarnasest fenoloogilisest ajast. Edasine sellesuunaline uurimistöo peaks keskenduma maakatte muutuste (linnastumise tulemus) ja ühiskondlike protsesside (linnastumist suunavad tegurid) kombineeritud uurimisel. Võimalikud suunad oleksid siinjuures post-sotsialistlike riikide linnade võrdlev analüüs, erinevate linnamudelite kontroll post-sotsialistlikes tingimustes ja nende võimalik arendamine, Eesti põllumajandussektoris toimunud muutuste analüüs keskendudes just linnade äärealadel asuvatele põllumajanduslikust kasutusest välja läinud maadele ja tulvariskide hindamine.

Nendele nimetatud neljale uurimissuunale on spektrisegu lineaarse lahutamise meetodil pakkuda alusandmeid linnades ja nende lähiümbruses toimunud maakattemuutuste kohta. Konkreetsem edasine uurimistöo sõltub mõnede metoodiliste küsimuste (s.o aastaegade mõju, looduslike alade vettpidavaks pinnaks klassifitseerumise välistamine) lahendamisest. Edasise uurimistöo jaoks on vaja ka selgelt läbitöötatud filosoofilist baasi, millelt linnastumist uurida.

7. Summary

Title: Remote Sensing of Urban Areas: Linear Spectral Unmixing of Landsat Thematic Mapper images acquired over Tartu (Estonia).

Urban areas are characterized by very heterogeneous patches of different landcover types co-present in the ground instantaneous field of view of a broadband sensor (such as Landsat Thematic Mapper). Therefore the application of categorical clustering algorithms has limited capabilities compared to the linear spectral unmixing method.

The main aim of this research was to check the accuracy of impervious surface maps generated from medium resolution images with the method of linear spectral unmixing by comparing them to impervious surface maps digitized from digital orthophotos. A case study was performed with Landsat TM/ETM+ images acquired over Tartu, Estonia. Images from two different dates were used, namely 23 August 1995 and 3 May 2001.

The vegetation – impervious surface – soil (VIS) model offers a good conceptual framework for a comparative description of urban landcover. According to the VIS model an area (e.g. 1 m², one image pixel) can be described by relative proportions of vegetation, impervious surface and soil.

The fraction images of vegetation, impervious surface and soil were calculated using the method of linear spectral unmixing. Prior to spectral unmixing the images were normalized to reduce the variance of endmember reflectance. The model RMS error for both years was less than 5% (approximately 2 DN was left unmodeled in every spectral channel for both dates).

In order to check the accuracy of the unmixed images impervious surfaces were digitized from digital 1995 BW orthophotos and 2001/2002 color orthophotos. Soil and vegetation were treated as one class – pervious surface. Impervious/pervious surfaces were digitized in three preselected areas (Kesklinn, Ränilinn, Uus-Ihaste). 200 stratified random points were created into each of those areas. Circular buffer areas were created for those points with a 60 m radius (2 Landsat TM pixels). Impervious surface fractions were calculated in those points from both the unmixed fraction images and digitized maps. The spectral unmixing error was quantified using a generalized area-based confusion matrix.

The results of the accuracy assessment indicate that the mapping of impervious surfaces was most accurate in the Uus-Ihaste (a suburbia on the outskirts of Tartu) area from the 1995 image (error less than 1%). The worst result was from the Kesklinn (town center) area in 2001

(error more than 30%). Taking into account the results from all three areas the impervious surface mapping error in 1995 was 12% and in 2001 19%. The results indicate that in both cases the fractions digitized from orthophotos are higher than the corresponding fractions calculated from Landsat imagery. Also the change map accuracy was assessed. The smallest errors were found in the Uus-Ihaste area (2%), the largest errors in the Kesklinn area (15%). The overall error of change was 6%.

Many researchers have noted that the spectral unmixing method tends to underestimate higher endmember fractions. Therefore this research checked whether a regression relationship can improve the accuracy of the impervious surface maps. A regression relationship was built from the unmixed Landsat data and digitized impervious surface maps. The regression parameters were used in calculating the *corrected* unmixed images. Again the resulting errors were quantified using the same buffer areas and same methodology as described beforehand. According to the generalized area-based confusion matrix, mapping accuracy increased in both Kesklinn and Ränilinn (fraction error less than 15%) areas only in the Uus-Ihaste area the accuracy decreased to approximately 3%. Taking into account all three areas the error was less than 5% in both years. Mapping error was quantified also for the regression-corrected change map. The overall change accuracy increased by 3%. Accuracy in the Uus-Ihaste area decreased 1% but increased significantly in the Kesklinn area where the error has decreased from 15% to 3%.

Therefore a conclusion can be drawn that regression-corrected images are more accurate when the area in question is with higher impervious surface fractions. Suburban areas with lower impervious surface fractions are better modelled without regression-correcting.

Thirdly the option of using the unmixed impervious surface fraction images for studying urbanization processes was discussed. The biggest problems here arise from phenologic changes of vegetation which cause proportional landcover changes throughout a year, and spectral similarity between normalised impervious surfaces and some natural areas which causes these natural areas to be classified partially as impervious surface. Options for accounting for these were discussed.

Looking at the results of this research from the perspective of human geography has to be considered very important to tie together the landcover changes detected by remote sensing technologies with social processes guiding urbanization and analyze different cities comparatively.

All in all it can be concluded that urban landcover change can be monitored from medium resolution satellite images (such as Landsat TM/ETM+) using the method of linear spectral unmixing and the VIS model offers a good conceptual framework for that purpose. At the same time the width of the sensor's ground instantaneous field of view has to be kept in mind in setting up research questions and aims. In order to decrease the impact of phenologic change satellite imagery should be from the same phenologic time.

Further research should focus on the combined research of landcover change (the result of urbanization) and social processes (processes guiding urbanization). Some possible themes might include comparative analysis of post-socialist cities, checking the applicability of different urban models (e.g. Hoyt, Burgess, Harris-Ullman, Kearsley) and their possible upgrading for post-socialist settings, analysis of the state of Estonian agricultural sector concentrating especially on abandoned agricultural parcels on the verges of cities, and floodrisk assessment.

The linear spectral unmixing method can offer these research problems valuable information regarding landcover changes in and around urban areas. More concrete further research depends on resolving some problems associated for example with phenologic change of landcover (vegetation primarily) and some natural areas classifying as impervious surface. Further research has to have also a coherent philosophical basis as to how urbanisation is studied.

Kasutatud kirjandus

- Adams, J. B., Sabol, D. E., Kapos, V., Filho, R. A., Roberts., D. A., Smith, M. O., Gillespie, A. R., 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the brazilian amazon. *Remote Sensing of Environment*, 52:137-154.
- Antrop, M., 2000. Background concepts for integrated landscape analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 77:17-28.
- Antrop, M., 2004. Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 67:9-26.
- Antrop, M., 2005. Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and Urban Planning*, 70:21-34.
- Carlson, T. N., Traci Arthur, S., 2000. The impact of land use – land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change*, 25:49-65.
- Claval, P., 2005. Reading the rural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 70:9-19.
- Clapham Jr, W. B., 2003. Continuum-based classification of remotely sensed imagery to describe urban sprawl on a watershed scale. *Remote Sensing of Environment*, 86:322-340.
- Defires, R. S., Hansen, M. C., Townshend, J. R. G., 2000. Global continuous fields of vegetation characteristics: a linear mixture model applied to multi-year 8 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21:1389-1414.
- Eastman, R. J., 2001a. IDRISI 32 Release 2. Guide to GIS and Image Processing: volume 1. *Clark labs*, 161 pp.
- Eastman, R. J., 2001b. IDRISI 32 Release 2. Guide to GIS and Image Processing: volume 2. *Clark Labs*, 144 pp.
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Kihn, E., A., Kroehl, H. W., Davies, E. R., Davies, C. W., 1997. relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. *International Journal of Remote Sensing*, 18:1373-1379.
- Foody, G. M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80:185-201.
- Gillies, R. R., Brim Box, J., Symanzik, J., Rodemaker, E. J., 2003. Effects of urbanization on the aquatic fauna of the Creek watershed, Atlanta – a satellite perspective. *Remote Sensing of Environment*, 86:411-422.
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., Craig, M. D., 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26:65-74.
- Hasse, J. E., Lathrop, R. G., 2003. Land resource impact indicators of urban sprawl. *Applied Geography*, 23:159-175.
- Herold, M., Couclelis, H., Clarke, K. C., 2005. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*. 29:369-399.

- Herold, M., Roberts, D. A., Gardner, M. E., Dennison, P. E., 2004. Spectrometry for urban areas for remote sensing – Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, 91:304-319.
- Jauhiainen, J. S., 2005. *Linnageograafia. Linnad ja linnauurimus modernismist postmodernismini*. Tallinn: Eesti Kunstiakadeemia.
- Kant, E., 1927. Tartu. Linn kui ümbrus ja organism. Teoses: *Tartu. Tartu linna-uurimise toimkonna korraldatud ja toimetatud*. lk 192-397. Tartu: Tartu linnavalitsus.
- Kressler, F. P., Steinnocher, K. T., 1999. Detecting land cover changes from NOAA-AVHRR data by using spectral mixture analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1:21-26.
- Kärdi, T., 2007. Remote sensing of urban areas: linear spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper images acquired over Tartu (Estonia). *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology. Ecology*, 56:19-32.
- Law, R. M., Wolch, J. R., 1993. Social reproduction in the city: Restructuring in time and space. In: Knox, P. L. (Ed) *The Restless Urban Landscape*, pp 165-206. Prentice-Hall, Inc.
- Leetmaa, K., 2004. Eeslinnastumine Tallinna linnaregioonis sotsialismijärgsel perioodil. Magistritöö inimeograafias. Tartu: Tartu Ülikooli geograafia instituut.
- Lewis, H. G., Brown, M., 2001. A generalised confusion matrix for assessing area estimates from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. 22:3223-3235.
- Luck, M., Wu, J., 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 17:327-339.
- Lu, D., Morana, E., Batistella, M., 2003. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. *Remote Sensing of Environment*, 87:456-469.
- Lunetta, R. S., 1998. Applications, project formulation, and analytical approach. In: Lunetta, R. S., Elvidge, C. D. (Eds), *Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications* (pp 1-19). Taylor & Francis
- Marksoo, A., 2005. Linnasiire. Teoses: Pullerits, H., Tõnisson, U., Liim, A., Andresen, A., (toim) *Tartu: ajalugu ja kultuurilugu*, lk 137-157 Tartu: Greif.
- Martinotti, G., 1994. The new social morphology of cities. Saadaval aadressilt <http://www.unesco.org/most/wien/guido.htm> [viimati külastatud: 26. aprill 2004]
- Milesi, C., Elvidge, C. D., Nemani, R. N., Running, S. W., 2003. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States. *Remote Sensing of Environment*, 86:401-410
- Nagendra, H., Munroe, D. K., Southworth, J., 2004. From pattern to process: landscape fragmentation and the analysis of land use/land cover change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101:111-115.
- O'Meara Sheehan, M., 2002. What will it take to halt sprawl? *World Watch Magazine* January/February 2002, 12-23.
- Palamets, H., 2003. *Lugusid toonasest Tartust*. Tartu: Kleio.
- Phinn, S., Stanford, M., Scarth, P., Murray, A. T., Shyy, P. T., 2002. Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation – imperious surface – soil (VIS) model by subpixel analysis techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 23:4131-4153.

- Pragi, U., 2002. Sissejuhatus inimgeograafiasse. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Radeloff, V. C., Mladenoff, D. J., Boyce, M. S., 1999. Detecting Jack Pine budworm defoliation using spectral mixture analysis: separating effects from determinants. *Remote Sensing of Environment*, 69:156-169.
- Ridd, M.K., 1995. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16:2165-2185.
- Roberts, D. A., Batista, G. T., Pereira, J. L. G., Waller, E. K., Nelson, B., 1998a. Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: Applications in eastern Amazonia. In: Lunetta, R. S., Elvidge, C. D. (Eds), *Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications*. pp 137-161 Taylor & Francis
- Roberts, D. A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., Green, R. O., 1998b. Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using multiple endmember spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 65:267-279.
- Robinson, L., Newell, J. P., Marzluff, J. M., 2004. Twenty-five years of sprawl in the Seattle region: growth management responses and implications for conservation. *Landscape and Urban Planning*. 71:51-72.
- Schneider, A., Friedl, M. A., McIver, D. K., Woodcock, C. E., 2003. Mapping urban areas by fusing multiple sources of coarse resolution remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69:1377-1386.
- Sjöberg, Ö., Tammaru, T., 1999a. Economic transition and urbanisation in Estonia, 1989-1996: the vexing issue of internal migration. In: Ainsaar, M. (Ed) *Regional Policy and Migration*, pp 101-113. Tartu: Tartu University Press.
- Sjöberg, Ö., Tammaru, T., 1999b. Transitional Statistics: Internal migration and urban growth in post-soviet Estonia. *Europe-Asia Studies*, 51:821-842.
- Song, C., 2005. Spectral mixture analysis for subpixel vegetation fractions in the urban environment: How to incorporate endmember variability? *Remote Sensing of Environment*, 95:248-263.
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M., P., Macomber, S. A., 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75:230-244.
- Souza Jr., C., Firestone, L., Silva L. M., Roberts, D., 2003. Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 87:494-506.
- Small, C., 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 22:1305-1334.
- Small, C., 2002. Multitemporal analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 81:427-442.
- Small, C., 2003. High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 88:170-186.
- Small, C., 2004. The Landsat ETM+ spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*, 93:1-17.

- Small, C., Lu, J., W., T., 2006. Estimation and vicarious validation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 100:441-456.
- Sutton, P. C., 2003. A scale-adjusted measure of „Urban sprawl” using nighttime imagery. *Remote Sensing of Environment*, 86:353-369.
- Tammaru, T., 2000a. Suburbanisatsioon Eesti linnastumises. Teoses: Jauhiainen, J., Kulu, H. (toim) *Inimesed, ühiskonnad ja ruumid. Inimgeograafia Eestis*, lk 77-88. Publicationes Istituti Geographici Universitatis Tartuensis. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Tammaru, T., 2000b. Differential urbanisation and primate city growth in soviet and post-soviet Estonia. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 91:20-30.
- Tammaru, T. 2001. Suburban growth and suburbanisation under central planning: the case of soviet Estonia. *Urban Studies*, 38:1341-1357.
- Tompkins, S., Mustard, J. F., Pieters, C. M., Forsyth D. W., 1997. Optimization of endmembers for spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 59:472-189.
- Weng, Q., Lu, D., Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89:467-483.
- Wu, C., 2004. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 93:480-492.
- Wu, C., Murray, A. T., 2003. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 84:493-505.
- Zhang, J., Rivard, B., Sánchez-Azofeifa, A., 2005. Spectral unmixing of normalized reflectance data for the deconvolution of lichen and rock mixtures. *Remote Sensing of Environment*. 95:57-66.

