

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia- ja Maateaduste Instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö

**Maapinna ja majade vertikaalliikumise mõõtmine Tartu
linnas PSInSAR meetodil**

Villem Voormansik

Juhendajad: MSc Kaupo Voormansik

PhD Raivo Aunap

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2013

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Vahemaade mõõtmine radarkaugseire abil	5
1.1 Tehisavaradari tööpõhimõte	5
1.2 Tehisavaradari instrumendiga satelliidid.....	6
1.3 SAR interferomeetria.....	7
1.4 Diferentsiaalne interferomeetria ja püsivad peegeldajad.....	9
1.5 Rakendused ja varasemaid tulemusi	11
1.6 Veallikad ja tulemuste täpsus	13
2. Tartu vertikaalliikumiste mõõtmise meetodika.....	17
2.1 Andmed	17
2.2 Andmetöötlus.....	18
3. Tulemused ja arutelu	21
3.1 Vertikaalliikumiste kiirus	21
3.1.1 Kogu uuritava ala võrdlus Tartu linnaga.....	21
3.1.2 Tartu linn.....	25
3.2 Täpsushinnang	29
Kokkuvõte	32
Summary	34
Tänuavaldused.....	35
Kasutatud kirjandus.....	36
Lisad	38

Sissejuhatus

Kaugseire praktiliste rakenduste arv on üha kasvav. Üheks selliseks on maapinna liikumise mõõtmine. Radarkaugseirega maapinna deformatsiooni mõõtmine omab võrreldes maapealsete töödega sarnaseid eeliseid nagu enamik teisi kaugseire rakendusi: võimalik on koguda andmeid palju suuremalt maa-alalt, hoides seejuures kulud madalal; andmed kogutakse lühikese aja jooksul, mistõttu on keskkonnatingimused sarnased kogu ala kohta; andmete kvaliteet on ruumiliselt ja ajaliselt ühetaoline; tänu andmete arhiivile saab uurida ka minevikus toimunud protsesse; töötlemine on osaliselt automatiseeritav.

Käesolev töö keskendub PSInSAR (i k *Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*) meetodil maapinna vajumise mõõtmise tutvustamisele ja rakendamisele Tartu näitel. PSInSAR meetod töötati välja 1999. aastal Milano tehnikaülikoolis (TRE Europa, 2013). See võimaldab väga täpselt arvutada satelliidipiltide aegreast maapinna liikumise kiiruse. Maapealsete kontrollmõõtmiste tulemusena on saadud keskmiseks vertikaalse liikumise tuvastamise täpsuseks 0,75 mm (Ferretti, *et al.*, 2007). Meetodi sobib peamiselt linnalisele keskkonnale, kuna vajumisi saab arvutada vaid stabiilsete tagasihajumisomadustega objektidel nagu majade katused, sillad, sidemastid ja muud enamasti inimtekkelised objektid. Vajumis- ja kerkimiskiirused saadakse selliste objektide, nn püsivate peegeldajate kohta punktiviisiliselt.

PSInSAR meetodi rakenduste spekter on lai – näiteks nafta- ja gaasiväljade, maalihete, maavärinate, vulkaanide, veepaisude, teede, sildade, hoonete, kaevanduste või linnade stabiilsuse ja vajumise uurimine (TRE Europa, 2013).

Autorile teadaolevalt on Eestis varasemalt PSInSAR meetodit kasutatud vaid ühes uurimistöös maapinnaliikumiste mõõtmiseks Pärnus, kuid sel juhul telliti andmete töötlus Hispaania firmalt Altamira Information (All & Karimov, 2008). Käesolev töö märgib esimest korda, kui radarkaugseirel põhineva PSInSAR meetodi kogu töötlusprotsess tehakse Eestis.

Viimased maapinna vajumise andmed Tartus pärinevad aastast 1993, mil regulaarsed nivelleerimistööd lõpetati (Lokotar, 2005). Kahekümne aasta pikkusesse lünka andmete lisamist võib pidada tähtsaks argumendiks töö olulisuses. Tuleb siiski rõhutada, et radarkaugseire abil saadud vajumisandmed ei asenda täielikult maapealset nivelleerimist.

Töö peamiseks eesmärgiks on PSInSAR meetodi rakendamine ja testimine Tartu linna maapinnaliikumiste tuvastamiseks. Teiseks eesmärgiks oli vajumis- ja kerkimisandmete saamine Tartu kohta pärast regulaarse nivelleerimise lõppemist 1993. aastal. Peale selle tegeleti ka tulemuste kirjeldamise ja vertikaalliikumise põhjuste selgitamisega.

Töö on jaotatud kolme osasse. Esimeses, teoreetilises osas tutvustatakse tehisavaradari tööpõhimõtet ning PSInSAR meetodit. Teises peatükis antakse ülevaade Tartu ala uurimiseks kasutatud andmetest ning töötlusprotsessist. Kolmas peatükk sisaldab olulisemate tulemuste tutvustust.

1. Vahemaade mõõtmine radarkaugseire abil

1.1 Tehisavaradari tööpõhimõte

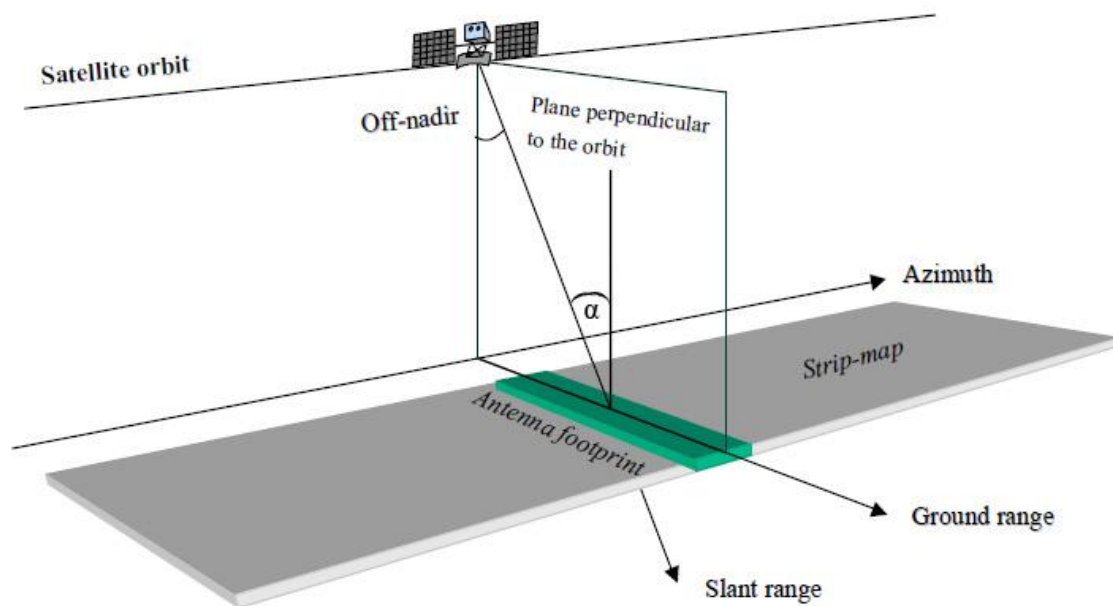
Igasuguse radari ruumiline lahutusvõime on proportsionaalne antenni suurusega. Tehisavaradari eripäraks on antenni ja uuritava piirkonna vahelise suhtelise liikumise kasutamine. Sel viisil tekitab lühikeste vaheaegade järel signaale välja saatev liikuv antenn efekti suuremast antennist – tekib nn virtuaalne antenn ehk tehisava (Euroopa Kosmoseagentuur, 2012b). Võrreldes statsionaarsete radaritega, võimaldab see saavutada kõrgema ruumilise lahutuse, kuna järjestikku välja saadetud signaale töödeldakse koos, luues seeläbi efekti suuremast antennist.

Mõiste tehisavaradar asemel kasutatakse ka samatähenduslikku ingliskeelset lühendit SAR – *Synthetic Aperture Radar*.

Tavaliselt on tehisavaradar lahendatud nii, et elektromagnetlaineid kiirgav antenn on kinnitatud liikuvale alusele, näiteks lennukile või satelliidile. Antenn kiirgab mikrolainete piirkonnas pulseerivalt ning registreerib piki liikumisteedkonda ajaliselt järjestikku tagasihajunud (maapinnalt „peegeldunud“) signaale.

Tehisavaradar on aktiivne kaugseireinstrument, mis mõõdab iseenda välja saadetud signaali kaja. Seetõttu saab andmeid koguda nii päeval kui öösel. Samuti ei takista tehisavaradari toimimist pilved, kuna kasutatud mikrolained neelduvad atmosfääris ilmast olenemata vähe.

Tehisavaradari abil saadakse rasterpilt, millel eristatakse asimuudi (i k *azimuth*) ja ulatuse (i k *range*) suunda. Asimuudi suund on paralleelne satelliidi lennusuunaga (joonis 1) ning ulatuse suund (joonisel *slant range*) asetseb sellega risti (Ferretti, *et al.*, 2000). Radaripilt moodustatakse piki asimuudi suunda elektromagnetlainete kiirtevihuga skaneerides (joonisel *antenna footprint*).



Joonis 1. Satelliidipõhise SAR süsteemi skeem (Ferretti, *et al.*, 2000)

Ulatuse suunas saavutatakse lahutus signaali tagasijõudmise järjekorra eristamise alusel: eeldatakse, et esmalt jõuab tagasi signaal maapinna ala esindavalt piksilt, mis on satelliidi nadiirsuunale maapinnal kõige lähemal, seejärel sellest kauguselt järgmiselt jne. Nurka maapinna normaali ja radarilt langeva kiire vahel nimetatakse langemisnurgaks (i k *incidence angle*, joonisel tähis α), mis ligikaudu vastab satelliidi vaatesuunale. Kõikide SAR instrumentide kiirgusvihk on suunatud lennusuunast kõrvale, tavaline langemisnurk on 20°-50° (Ferretti, *et al.*, 2000). Otse alla suunatud kiirte korral leiduks alati radarist paarikaupa sama kaugel asuvad punktid, mis oleks eristamatud, kuna signaal neilt saabuks tagasi täpselt samal ajal.

Asimuudi suunal aitab lahutust parandada Doppleri efekt. Arvestatakse, et satelliidile lähenevalt ehk lennusuunas eespool paiknevalt alalt saabuva signaali sagedus on väljasaadetud signaalist kõrgem, lennusuunaga risti muutumatu ja tagapool madalam.

1.2 Tehisavaradari instrumendiga satelliidid

Tänapäeval on kättesaadav peaaegu kogu Maad kirjeldav SAR piltide arhiiv. Enamiku Maa piirkondade kohta leidub iga 35 päeva järel tehtud piltide seeria alates 1991. aastast kuni tänapäevani. Satelliitide orbiiditasandi tõttu on erandiks polaaralad, mille kaetus on kehvem.

Tänu väga pikale tööajale on üheks paremaks SAR andmete allikaks satelliitide ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite 1*), ERS-2 ja Envisat (*Environmental Satellite*) arhiivid. Nende peamised andmed on toodud tabelis 1, võrdluseks on lisatud üks uuem SAR instrumendiga satelliit TerraSAR-X.

Tabel 1. Tehisavaradariga varustatud satelliitide ERS-1, ERS-2, Envisat ja TerraSAR-X peamised andmed (Euroopa Kosmoseagentuur, 2012a)

	ERS-1 ja ERS-2	Envisat	TerraSAR-X
Omanikriik või -organisatsioon	Euroopa Kosmoseagentuur	Euroopa Kosmoseagentuur	Saksamaa
Töösoleku aeg	1991-2001	2002-2012	2007-...
Vaateala laius	100 km	100-400 km	10-100 km
Ruumiline lahutus	30 m	30-150 m	1-16 m
Sagedusala	5,3 GHz	5,3 GHz	9,65 GHz
Lainepikkus	5,6 cm	5,6 cm	3,1 cm

ERS-1 ja 2 ning Envisat liiguvad umbes 800 km kõrgusel orbiidil kiirusega 7,5 km/s, tehes tiiru ümber Maa 100 minutiga. ERS-1 ja 2 saadavad välja radariimpulsi maa-alale, mille mõõtmed on 5 km asimuudi suunas ja 100 km ulatuse suunas (Euroopa Kosmoseagentuur, 2012a). Arvestades satelliidi liikumise kiirust, saadakse iga minuti jooksul andmeid umbes 450 km pikkuselt ja 100 km laiuselt maapinna ribalt.

Kuigi tabelis kirjeldatud instrumentide ruumiline lahutus ei ole horisontaalsuunas väga suur, siis vertikaalsuunas on PSInSAR meetodiga võimalik mõõta millimeetri suurusjärgus muutusi (Tamburini, *et al.*, 2010; Colesanti, *et al.*, 2005).

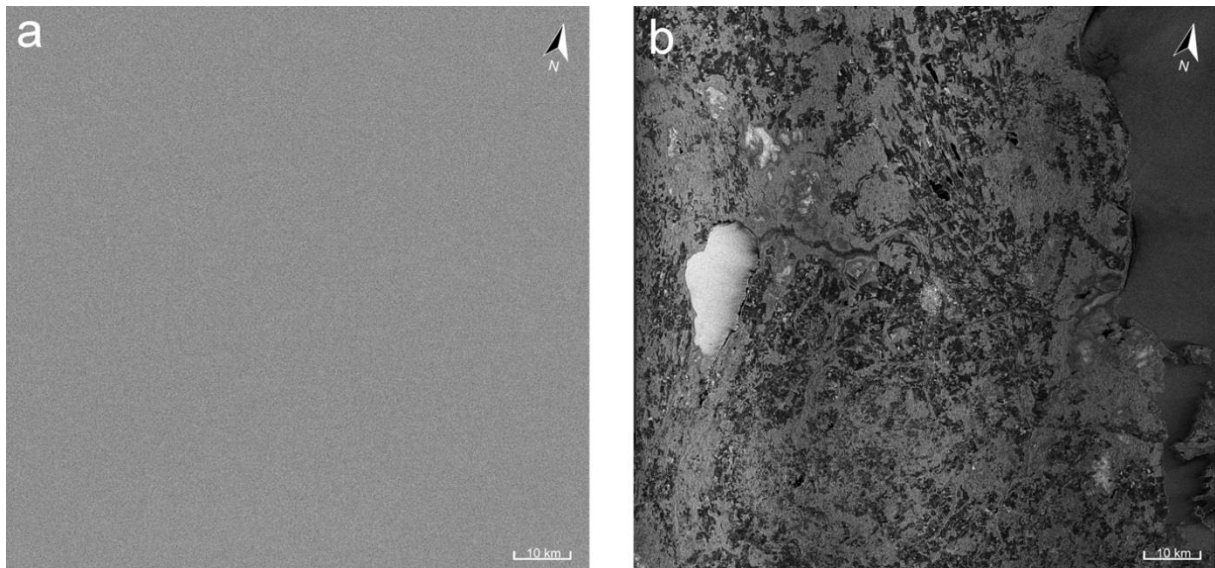
1.3 SAR interferomeetria

Digitaalse SAR kujutise iga piksel kannab kaht väärtust: tagasihajunud signaali tugevust ja faasi. Kujutis on seega vaadeldav kompleksarvude maatriksina, kus tagasihajunud signaali tugevus on reaalosa ning faas on imaginaarosa. Tehisavaradari interferomeetrias (InSAR) rakendatakse neid mõlemaid.

Signaali tugevus ehk amplituud sõltub rohkem pinna karedusest ja ebatasasusest ning vähem keemilisest koostisest. Ebatasastele aladele, sealhulgas linnadele on iseloomulik tugev signaal, kuid tasastele lamedatele pindadele, näiteks rahulikele veekogudele vastab nõrk signaal, kuna kiirgus peegeldub neilt peamiselt radarist eemale (Ferretti, *et al.*, 2000).

Tavaliselt kujutatakse SAR signaali tugevuse pilti mustvalgelt, kus heledad alad märgivad tugevat tagasihajumist ning tumedad alad nõrka tagasihajumist (joonis 2.b).

Sensori poolt fikseeritud tagasihajunud signaali faas sõltub mitmest tegurist (vt peatükk 1.4), kuid eelkõige on oluline faasi otsene seos radari ja uuritava ala vahelise kaugusega. Kuna radarist väljuva ja tagasi jõudnud signaali faas on täpselt teada, siis saab neid omavahel võrrelda. Signaali teekond radarilt maapinnani ja tagasi vastuvõtjani koosneb mingist täisarvust lainepikkustest ja ühest lainepikkuse murdosast. Tervete lainepikkuste arvu ei ole võimalik mõõta, kuid täiendav murdosa on väga täpselt mõõdetav. SAR signaalis registreeritakse selle viimase lainepikkuse murdosa faas (Ferretti, *et al.*, 2000). Tänu sellele on võimalik saavutada lainepikkusest parem täpsus kauguste mõõtmisel.



Joonis 2. Envisat ASAR instrumendi faasipilt (a) ning signaali tugevus (b) 1. juulil 2006. Kaadri keskmes on Tartumaa. Algandmed: Euroopa Kosmoseagentuur

Iga piksli faasi väärtus on summa selles pikslis asuvate objektide mõjust. Reaalsuses on piksli külge maapinnal mitme meetri pikkune, kuid radarikiire lainepikkus on vaid mõni sentimeeter (ERSi ja Envisati puhul 5,6 cm). Selle mitmekordse suurusevahe tõttu on kõrvutiasetsevate pikslite faasierinevused järsud ning üksik tehisavaradari faasipilt näib sisaldavat vaid juhuslikku infot (joonis 2.a). Seetõttu ei saa üksikust faasipildist infot reljeefi ega deformatsiooni kohta (Ferretti, *et al.*, 2000).

Tegelikult on salvestatud faas konkreetsele alale siiski iseloomulik. Faasipildi näiva juhuslikkuse kõrvaldamiseks ja uuritava ala kohta teabe saamiseks leitakse faasierinevus kahe samast alast tehtud pildi vahel. Sellist pildipaari nimetatakse interferomeetriliseks paariks.

Kui pildid interferomeetrilises paaris on tehtud samast asukohast orbiidil, kuid mingi ajalise vahega, näiteks satelliidi korduval ülelennul samast alast, sisaldub faasivahe info vahepealsel ajal toimunud maapinna liikumisest. Pisut erineva nurga alt tehtud piltidel esineb analoogne efekt stereoskoopiaga, mistõttu kannab faasivahe infot pinnamoest, tänu millele saab faasivahest arvutada reljeefi.

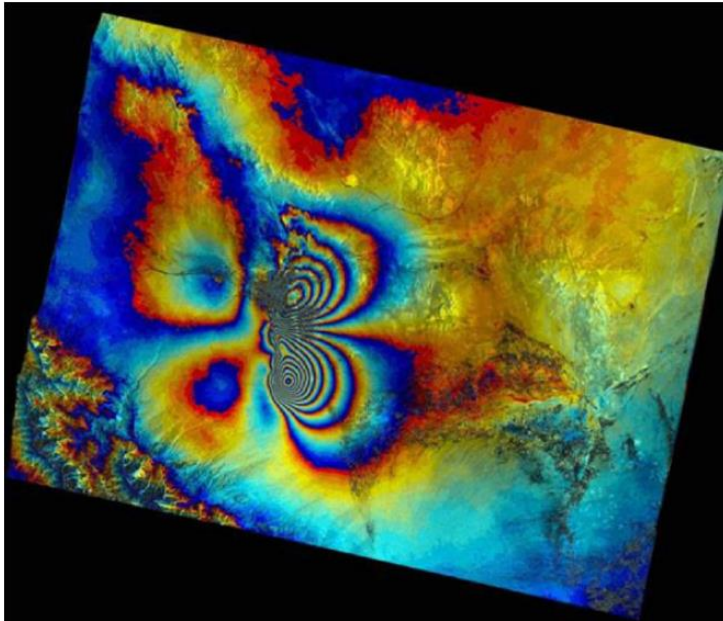
Tegelike andmete puhul on kõige tavalisem, et piltide faasivahe kannab infot nii maapinna liikumisest kui reljeefist. Sel juhul kui uuritakse neist ainult üht, tuleb teise mõju eemaldada.

1.4 Diferentsiaalne interferomeetria ja püsivad peegeldajad

Kui pildid interferomeetrilises paaris on tehtud satelliidi korduval ülelennul täpselt samast kohast orbiidil, siis põhjustab faasierinevust peamiselt maapinna liikumine. Selle alusel on võimalik mõõta kahe pildi tegemise vahelisel ajal toimunud pinnase deformatsiooni, mis on põhiline diferentsiaalse interferomeetria rakendus. Kui pildid interferomeetrilises paaris on tehtud pisut erinevatel orbiitidel, siis on faasierinevuses nii maapinna liikumise kui reljeefi mõju. Sel juhul tuleb maapinna deformatsiooni mõõtmiseks reljeefi mõju reljeefimudeli abil eemaldada. Selleks võib kasutada olemasolevat mudelit või tuletada see SAR andmetest (Ferretti, *et al.*, 2000).

Faasi mõjutavad veel mitmed tegurid, näiteks heterogeenne atmosfäär ja kiiresti asendit muutvad objektid (Ferretti, *et al.*, 2000). Lisaks muutub SAR signaali faas ka tagasihajumisprotsessi käigus (Rocca, *et al.*, 2010). See nn faasihüpe on igal pikslil erinev, sõltudes pikslisse jäävate objektide omadustest, kuid selle väärtus pole teada.

Siiski leiduvad sellised objektid, mis hoolimata faasi mõjutavatest teguritest peegeldavad alati üsna stabiilselt. Neid nimetatakse püsivateks peegeldajateks (i k *permanent scatterer*). Tavaliselt on sellised objektid inimtekkelised, näiteks hooned, sillad, sidemastid või muud konstruktsioonid. Kui püsiva peegeldaja mõõtmed on pikslist väiksemad, on võimalik arvutada meetrist parema täpsusega digitaalseid reljeefimudeleid ja mõõta millimeetri suurusjärgus pinnase deformatsioone (Ferretti, *et al.*, 2000).

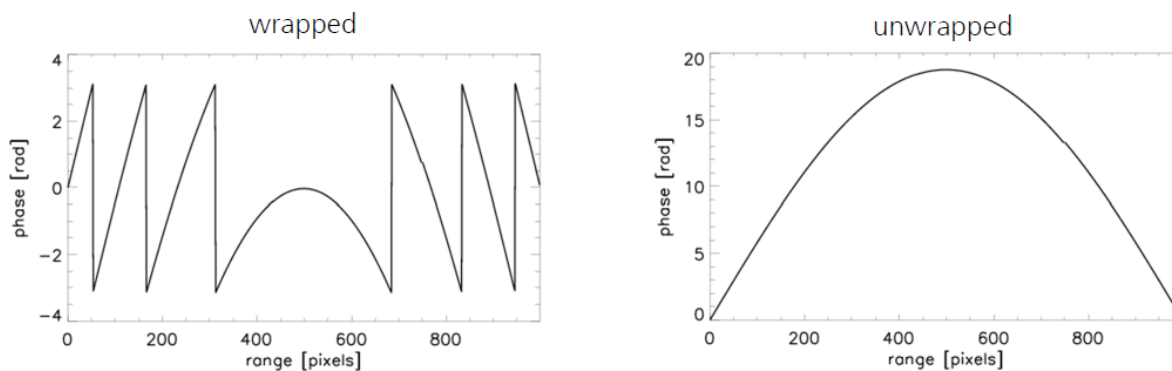


Joonis 3. Kahe Envisat ASAR pildi interferogramm 26. detsembril 2003 toimunud Bami maavärina põhjustatud maapinna deformatsioonist Iraanis. Üks värvitsükkel vastab umbes 2,8 sentimeetri suurusele maapinna liikumisele. (Prati, *et al.*, 2010)

Kahe pildi faasierinevust kujutatavat pilti nimetatakse interferogrammiks (Euroopa Kosmoseagentuur, 2012b). Faasi tsüklilisuse tõttu kordub faasierinevus 2π järel ning seda kujutatakse tavaliselt vikerkaarevärvides (joonis 3), kus igale faasi väärtusele vahemikus $0-2\pi$ vastab kindel spektrivärv ühtlasel gradiendil punasest violetseni.

Ühele faasierinevuse täistsüklile interferogrammil vastab poole lainepikkuse suurune maapinna deformatsioon, kuna edasi-tagasi läbitav teepikkus objekti ja radari vahel muutus terve lainepikkuse võrra. Faasimuutused (ning seetõttu ka pinnase deformatsioon) on tõlgendatavad ainult teiste interferogrammi punktide kaudu, kuna nad on suhtelised. Absoluutne pinnase liikumine on tuletatav interferogrammi sellise punkti põhjal, mille absoluutne deformatsioon on teada.

Selleks, et teisendada perioodiliselt korduv faas maapinna kõrguseks või vertikaalse liikumise ulatuseks, tuleb iga punkti faasile interferogrammil liita õige arv korda 2π radiaani (joonis 4). Iga 2π järel korduvat faasi nimetatakse pakitud faasiks, eemaldatud kordustega faasi nimetatakse lahti pakitud faasiks ning teisendust faasi lahtipakkimiseks.



Joonis 4. Faasi lahtipakkimine skemaatiliselt. Vasakul pakitud ning paremal lahtipakitud faas. (De Zan, 2012)

Praktikas pole interferogrammi faasipilt peaaegu kunagi müravaba. Kõige rohkem rikub kaugusest sõltuva faasiinfo kvaliteeti ajaline dekorrelatsioon. Lehtede, puuokste jt looduslike objektide asend ning fenoloogiline seisund muutub aja jooksul ning iga piksli sisene faasihüpe muutub teistest sõltumatult. Mida suurem on interferogrammi moodustamiseks kasutatud pildipaari ajavahe, seda erinevamad nende faasipildid on ja saadud interferogramm on mürasem.

Interferomeetrilise paari korreleeruvuse ja interferogrammi kvaliteedi mõõt on koherentsus. Koherentsuse väärtus 0 tähendab, et interferogramm ei kannu mingit infot ning väärtus 1 märgib täiesti müravaba interferogrammi, kus pildipaari vastavate pikslite faasivahe on alati konstantne (Euroopa Kosmoseagentuur, 2012b). Reaalsuses esinevad väärtused 0 ja 1 vahel. Püsivaid peegeldajaid sisaldavate pikslite koherentsus on tavaliselt kõrge, sest need objektid on paigal ja neilt jõuab tagasi tugev signaal. Taimkattega alade koherentsus on madal, kuna neilt pärinev signaal on nõrk ning tuule mõjul kiiresti asendit muutvate lehtede tõttu on faas muutlik.

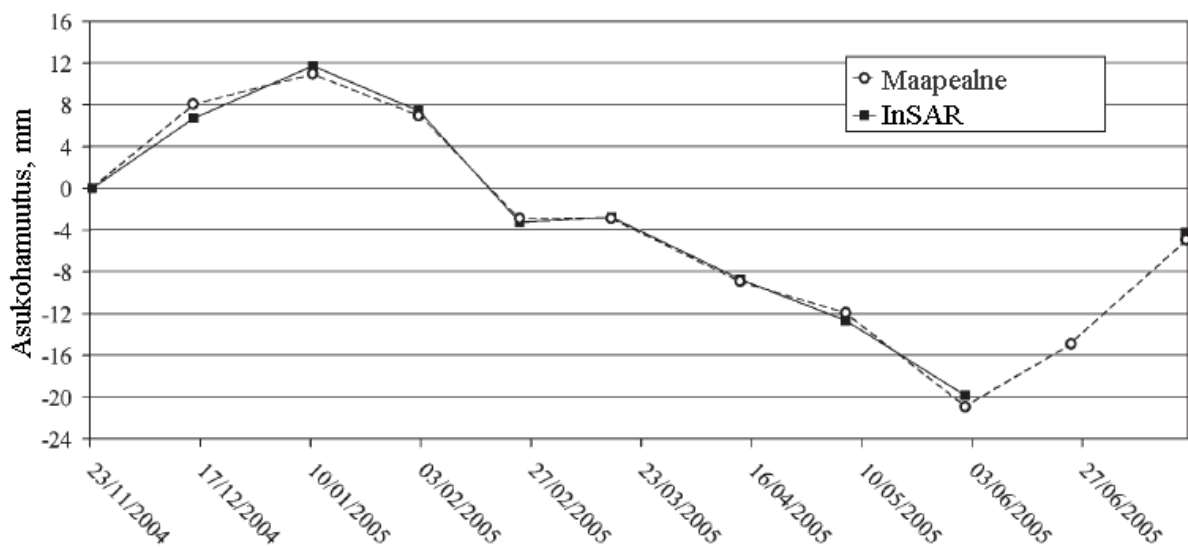
1.5 Rakendused ja varasemaid tulemusi

SAR interferomeetria ning selle keerukamad variandid diferentsiaalset interferomeetria ja püsivate peegeldajate interferomeetria on suurt potentsiaali tõestanud digitaalsete reljeefimudelite genereerimisel ning eriti pinnase deformatsiooni mõõtmisel (Colesanti, *et al.*, 2003c). Viimase alla kuuluvad näiteks maalihete, vulkanismi, maavärinate või allmaakaevandamisega kaasneva maapinna deformeerumise seire.

Suurem osa Google Earthi reljeefimudelist põhineb *Shuttle Radar Topography Missioni* (SRTM) käigus kogutud InSAR andmetel. Andmed koguti kosmosesüstikule kinnitatud SAR

instrumendiga, mis koosnes kahest samaaegselt kasutatavast antennist, millest üks oli kinnitatud süstiku kerele ja teine 60 meetri pikkuse poomi otsa (Farr, *et al.*, 2007). Seda reljefimudelit saab kasutada maapinna liikumiste mõõtmistel reljefi mõju eemaldamiseks. Ka käesolevas töös on selleks kasutatud SRTMi reljefimudelit.

Püsivate peegeldajate meetodi sobivust linnade vajumise uurimiseks demonstreerib näiteks selle rakendamine New Orleansis (Dixon, *et al.*, 2006). Uuringus kasutati 33 Radarsati SAR pilti ajavahemikust 2002-2005. Keskmise vajumiskiiruse ja standardhälbe väärtuseks saadi $5,6 \pm 2,5$ mm/a. Kõige suuremaks vajumiskiiruseks mõõdeti 29 mm/a. Leiti, et arvutatud keskmised vajumiskiirused on väga sarnased maapealsete mõõtmiste tulemustega. Võrdluses ortofotodega toodi välja, et tänu erakordsele ruumilisele lahutusele on võimalik uurida üksikute hoonete vajumiskiirusi, kuna püsivate peegeldajatena identifitseeritud punktid olid enamasti seotud ehitistega ning väga vähesed asusid taimkattega aladel.



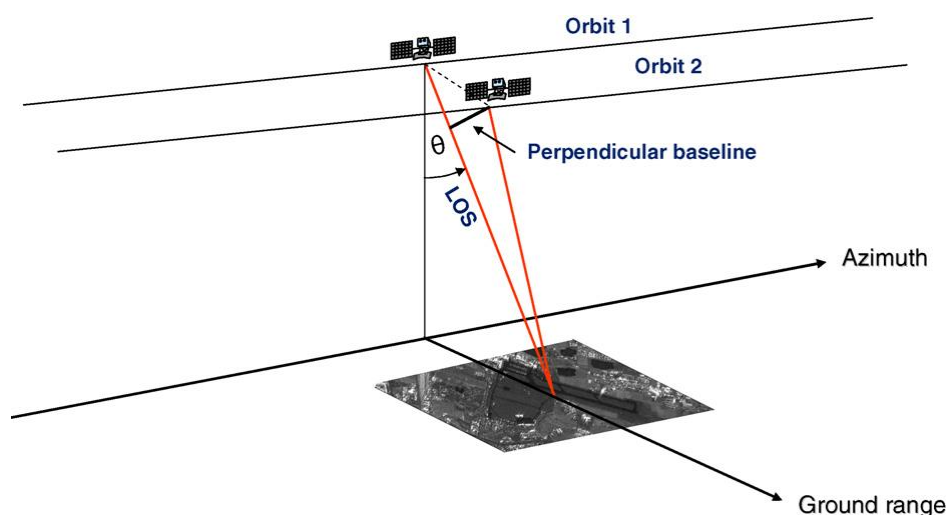
Joonis 5. InSAR andmete ja maapealsete mõõtmiste vertikaallikumiste võrdlus. Vertikaalteljel on vertikaalsuunalised asukohamuutused millimeetrites. (Ferretti, *et al.*, 2007, tõlgitud)

Tehisavaradari andmete ja töötluse tulemuste täpsusele keskenduvast uurimusest (Ferretti, *et al.*, 2007) saadi vertikaalsuunalise vea hinnanguks 0,75 mm. Kasutati satelliitide Envisat ja Radarsat-1 andmeid. Täpsuse kontrollimiseks valmistati kaks paari spetsiaalseid radarisignaali peegeldajaid. Ühe paari kõrgust muudeti radaripiltide tegemise vahel mõne millimeetri ulatuses ning seda võrreldi radarilt mõõdetud andmetega (joonis 5).

1.6 Veaallikad ja tulemuste täpsus

Mõõdetud deformatsiooni täpsus sõltub kasutatud SAR piltide arvust ning püsivate peegeldajate faasi koherentsusest (Colesanti, *et al.*, 2001). Madalama koherentsusega aladelt arvatud deformatsioon on ebatäpsem kui kõrge koherentsusega aladelt. Mida rohkem on pilte, seda täpsemad ja usaldusväärsemad on tulemused. Üldjuhul soovitatakse kasutada vähemalt 20 satelliidipilti (Hanssen & Ferretti, 2002), mõnedel allikatel piisab 15 pildist ja linnas isegi veel vähemast (TRE Europa, 2013).

Faasi koherentsust mõjutavaid tegureid on mitu. Neist kõige tähtsamad on signaali peegeldava pinna omadused. Lähemalt on pinna omaduste mõju kirjeldatud peatükis 1.4.



Joonis 6. Efektiivse vahekauguse skeem (Prati, *et al.*, 2010)

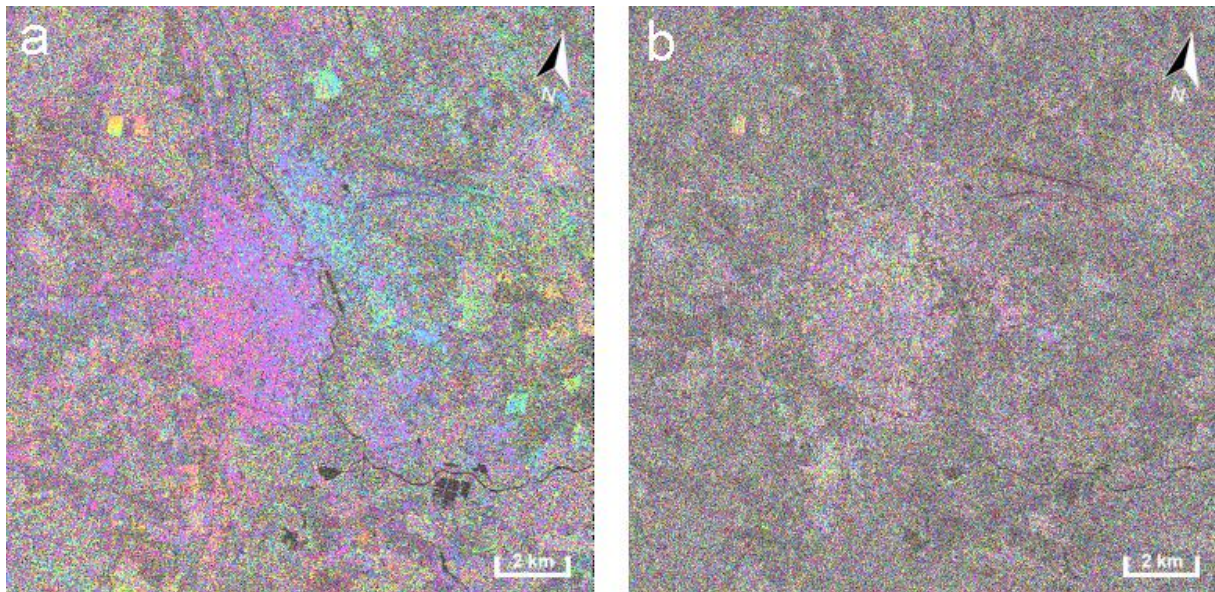
Piltide omavaheline kaugus orbiidil risti radari vaatesuunaga ehk efektiivne vahekaugus (i k *perpendicular baseline*, joonis 6) mõjutab koherentsust kahel põhjusel. Esiteks tekitab nullist erinev kaugus vigu objektide asukohtades, kuna erinevate nurkade alt paistavad vahemaad erinevad. Selle efekti korrigeerimiseks kasutatakse reljeefimudelit. Seega sõltub tulemuste täpsus ka reljeefimudeli täpsusest ning reljeefimudeli ja radaripiltide paikaajamise täpsusest. Teiseks asjaoluks on müra kasv interferogrammi faasiinfos koos piltide efektiivse vahekauguse kasvuga (Hanssen & Ferretti, 2002). Efektiivse vahekauguse suurenemisega suureneb ka langemisnurkade erinevus. Kuna tagasihajumisprotsess ja seega ka mõõdetud signaali väärtus sõltuvad otseselt langemisnurgast, siis suurem piltide langemisnurkade erinevus põhjustab rohkem müra. Järelikult pildipaari orbiitide suure vahekauguse korral on

koherentsus madalam ja deformatsiooniinfo kvaliteet langeb. Ideaaljuhul võiks deformatsiooni mõõtmisel piltide kaugus olla null. Reaalsuses on selliste omadustega andmeid saada väga harva.

Igale sensorile on iseloomulik kriitiline vahekaugus (i k *critical baseline*). See on efektiivse vahekauguse väärtus, millest suurema orbiidiasukohtade vahekauguse korral on koherentsus null ja deformatsiooniinfo täiesti juhuslik (Ferretti, *et al.*, 2000). ERS SAR ja Envisat ASAR sensorite kriitiline vahekaugus on umbes 1100 m (Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2008). Järelikult saab kasutada ainult selliseid interferomeetrilisi paare, mis on võetud orbiidilt asukohtadest, mille efektiivne vahekaugus on alla 1100 m.

Sarnane, geomeetriaga seotud mõju nagu reljeefimudeli täpsusel, on ka orbiidiparameetritel – neist sõltub arvutuslike langemisnurkade vastavus tegelikkusele. Suure täpsuse saavutamiseks deformatsiooni mõõtmisel on vaja satelliidi asukohta orbiidil teada 10-15 cm täpsusega (Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2013).

Piltide tegemise ajalise vahe kasvuga suureneb proportsionaalselt ka müra (Hanssen & Ferretti, 2002). Samas peab ajaline vahe olema piisavalt pikk, et tuvastada maapinna liikumist. Interferogrammil paistavad mürased piirkonnad peene tekstuuriga säbruna ning koherentsemad, ühtlasema faasiüleminekuga alad sujuvamad (joonis 7). Ajalise vahe kasvuga eristuvad interferogrammil vaid need objektid, mille signaal muutub aja jooksul kõige vähem, joonisel 7.b näiteks Tartu linn ja Raadi lennuväli.



Joonis 7. 35-päevase (a) ja 280-päevase (b) ajalise vahega interferomeetristest paaridest arvatud interferogrammid Tartu linnast ja lähiümbrusest. Ühtlasemad värvilised alad esindavad koherentsemat signaali ning säbrulised alad peamiselt juhuslikku signaali.

Atmosfääri heterogeensuse tõttu on raadiolainete levik ruumiliselt ebaühtlane. Vihm, konvektsioonipilved ning frondid on peamised signaali mõjutavad atmosfääritegurid (Hanssen & Ferretti, 2002). Atmosfääri mõju on märkimisväärselt suure alade korral, kuna kompaktsel alal on atmosfääritingimused sarnasemad ning sel juhul on mõju kogu alale suhteliselt ühtlane.

Atmosfääri mõju tasakaalustub pikkade aegide korral ühtlaselt üle ruumi. Seetõttu on atmosfääri mõju arvestamine oluline ainult selle pildi korral, mis valitakse juhtpildiks, kuna juhtpildi suhtes arvutatakse kõikide ülejäänud piltide interferogrammid.

Atmosfääri, orbiidi ning reljeefimudeliga seotud vigasid on võimalik hinnata punktide kaudu, mille deformatsioonikiirus on teada (Colesanti, *et al.*, 2003a) või võrrelda teiste piltide keskmistega ning seejärel tulemusi vastavalt korrigeerida (Hooper, *et al.*, 2010).

Lihtsaim tulemuste usaldusväärsuse näitajana kasutatav suurus on standardhälve (Prati, *et al.*, 2010). Tüüpilised püsivate peegeldajate täpsusnäitajad standardhälbe järgi on toodud tabelis Tabel 2. Tulemuste täpsuse hindamine ainult vajumiskiiruse standardhälbe järgi ei ole siiski täielik ja võib olla isegi eksitav, kui maapinna deformatsioon ei ole ühtlase kiirusega. Põhjalikumalt veaanalüüsi võimaldaks faasi erinevate komponentide autokorrelatsiooni funktsiooni uurimine, mis on keerukas protsess (Prati, *et al.*, 2010).

Tabel 2. Tüüpilised püsivate peegeldajate täpsusnäitajad umbes 40 ERS-1 ja ERS-2 radaripildi kasutamise korral (Prati, *et al.*, 2010)

	Täpsus (1σ)
Ida-lääne suund	<5 m
Põhja-lõuna suund	<2 m
Kõrgus	<1 m
Deformatsioonikiirus	<0,5 mm/a
Üks vajumismõõtmine	<5 mm

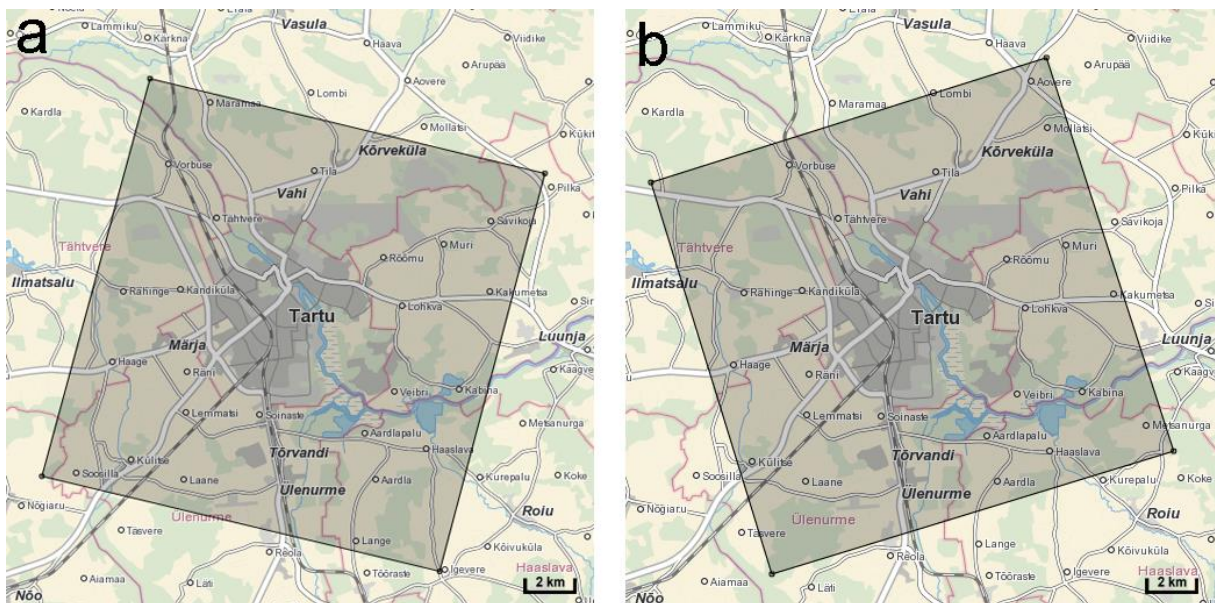
Lai ruumilise ulatusega deformatsioone, näiteks liustiku sulamise järgset maakerget, on tehisavaradariga keerulisem mõõta kui kohalikke liikumisi (Prati, *et al.*, 2010). Regionaalse ulatusega deformatsioon võib mõjutada kogu uuritavat ala ning kuna püsivate peegeldajate deformatsioon arvutatakse suhtena teistesse püsivatesse peegeldajatesse, siis sellist deformatsiooni ei saa tuvastada. Probleemi lahendamiseks võib kasutada näiteks GPS mõõtmispunktide võrku, mille järgi kalibreerida püsivate peegeldajate andmed.

2. Tartu vertikaalliikumiste mõõtmise meetodika

2.1 Andmed

Tartu linna ja selle lähiümbruse deformatsioon arvatati PSInSAR meetodil, kasutades satelliitide ERS-1 ja ERS-2 SAR ning Envisat ASAR andmeid (vt peatükk 1.2). Andmed telliti Euroopa Kosmoseagentuurilt.

Kokku kasutati töötamiseks 34 Tartut katvat radaripilti. Radaripiltidest lõigati välja umbes 15,3-kilomeetrise küljepikkusega ruut, mille keskpunkti koordinaadid on 58.3699° N, 26.7291° E (joonis 8).



Joonis 8. Uuritav ala on märgitud tumeda ruuduga. Ruut on orienteeritud paralleelselt satelliidi lennutrajektooriga ERS-1 ja ERS-2 (a) ning Envisati (b) andmete korral. Aluskaart: Maa-amet

Kogu uuritava ajavahemik oli 12.02.1993 kuni 01.07.2006. Sellest vahemiku 12.02.1993 kuni 15.01.2001 katavad 23 ERS-1 ja ERS-2 pilti, vahemiku 25.10.2003 kuni 01.07.2006 katavad 11 Envisati pilti. Sellise jaotuse tingisid andmete saadavus Tartu kohta ning satelliitide töösoleku ajad.

Envisati korral valiti andmed, mille ruumiline lahutus ja teised olulised parameetrid on ERS-1 ja ERS-2 SAR andmetega samad. Seega on kõikide algandmete ruumiline lahutus horisontaalsuunas 30 m, pildiala laius 100 km ning radari lainepikkus 5,6 cm.

Kuna ERS-1 ja ERS-2 andmed on koos kasutatavad, kuid Envisati andmete kombineerimine ERSiga nõuab täiendavat töötlust (Colesanti, *et al.*, 2003b), siis töödeldi andmed kahes eraldi aegreas.

Esimene aegrida on arvutatud 23 ERS-1 ning ERS-2 radaripildist 12.02.1993 kuni 15.01.2001 (vt lisa 1). Juhtpildiks, mille suhtes on arvutatud ülejäänud piltide interferogrammide, valiti 04.08.1997 tehtud pilt. Juhtpildi valikul lähtuti esmalt efektiivsete vahekauguste minimaliseerimisest orbiidil ülejäänud piltidega ning teiseks prioriteediks oli valida pilt aegrea keskosast, et vähendada erinevusi kummagi aegrea otspunktiga (Hooper, *et al.*, 2010). Maapinna deformatsioon arvatati 2980 punkti (püsiva peegeldaja) kohta.

Teine aegrida on arvutatud 11 Envisati radaripildist 25.10.2003 kuni 01.07.2006 (vt lisa 2). Juhtpildiks valiti 31.07.2004 tehtud pilt. Juhtpildi valikukriteeriumid olid samad nagu esimese aegrea puhul. Maapinna deformatsioon arvatati selles aegreas 9064 punkti kohta. Suurema püsivate peegeldajate arvu tingis peamiselt lühem aegrida, kuna ajalise dekorrelatsiooni tõttu leidub pikema aja jooksul vähem ajas koherentseid pikseleid.

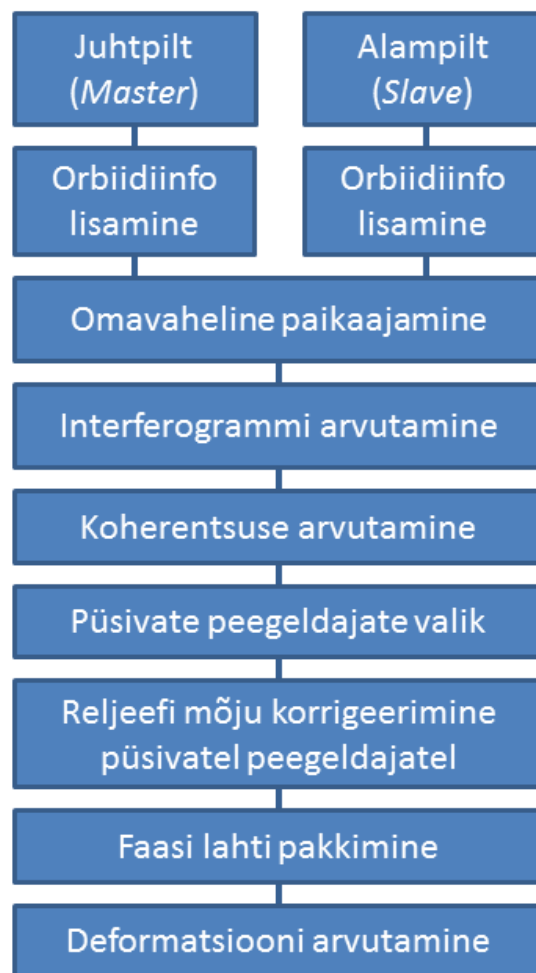
2.2 Andmetöötlus

Püsivate peegeldajate meetodil vajumisandmete arvutamiseks kasutati programmi StaMPS (*Stanford Method for Persistent Scatterers*) versiooni 3.2 (Delft University of Technology, 2010). Selleks vajalike interferogrammide genereerimiseks kasutati StaMPSi osaliselt integreeritud programmi DORIS (*Delft Object-oriented Radar Interferometric Software*) versiooni 4.06 (Kampes, *et al.*, 2003). Mõlemad programmid töötavad Linuxi keskkonnas ning on vabavaralised ja mõeldud kasutamiseks mittekommertslikul eesmärgil.

Interferogrammide faas pakiti lahti vabavaralise programmi SNAPHU (*Statistical-cost Network-flow Algorithm for PHase Unwrapping*) versiooniga 1.4.2 (Stanford Radar Interferometry Research Group, 2003). Lisaks kasutati programmi Matlab osade StaMPSi töötlusprotsesside juures ning graafiliste tulemuste vormistamisel (MathWorks Inc, 2013).

Andmetöötlus nii StaMPSi kui DORISega on üles ehitatud modulaarselt. Protsess on jaotatud etappideks ning üldjuhul on iga etapi sisendiks temale eelneva etapi väljund.

Põhimõttelise ülevaate PSInSAR meetodil maapinna deformatsiooni leidmise töötlusprotsessist esitab joonis 9. Esimeseks sammuks on juhtpildi valik lähteandmeteks olevast radaripiltide seeriast. Kõikide ülejäänud piltide, mida nimetatakse alampiltideks, jaoks on juhtpilt ühine. Igale pildile lisatakse täpne orbiidiinfo, mis loetakse välisest failist orbiidiandmete arhiivist. Kasutatud orbiidiandmed on piisavad, et määrata satelliidi asukoht vertikaalselt 4-5 sentimeetriga ja horisontaalselt 10-15 sentimeetriga (Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2013). Seejärel aetakse alampildid juhtpildi järgi täpselt paika, kuna sama ala maapinnal peab esitama igal interferogrammil täpselt samas asukohas olev piksel.



Joonis 9. Peamised andmetöötluse sammud programmidega DORIS (Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2008) ja StaMPS (Hooper, *et al.*, 2010) PSInSAR meetodil maapinna deformatsiooni arvutamiseks.

Interferogrammi faasipildi arvutamine tähendab juhtpildi faasist alampildi faasi lahutamist. Matemaatiliselt on interferogrammi iga piksel võrdne juhtpildi piksli kompleksväärtuse ja

alampildi piksli kaaskompleksi korrutisega (Ferretti, *et al.*, 2000). Saadud kompleksarvulise korrutise faas on võrdne juhtpildi ja alampildi faasivahega.

Madala müratasemega pikslite leidmiseks arvutatakse interferomeetrilise paari koherentsus (vt peatükk 1.4). Koherentsuse abil leitud madala müra osakaaluga pikslite seast valitakse püsivaid peegeldajaid esindavad pikslid. Püsivate peegeldajate valikukriteeriumitena on kasutatud StaMPSi vaikeväärtusi (Hooper, *et al.*, 2010):

- kaalutavast pikslist ja kõigist teistest valitud pikslitest moodustatud pikslipaaride faasimüra standardhälve võib olla maksimaalselt 1,0;
- kaalutava piksli maksimaalne müra peab olema väiksem ala keskmisest;
- faasimüra silumise ajaline aken naaberpikslite jaoks on 730 päeva.

Pärast püsivate peegeldajate tuvastamist eemaldatakse leitud pikslite faasist reljeefi mõjud. Reljeefist tulenevad moonutused tingib nullist erinev piltide tegemise vahekaugus orbiidil. Nende mõjude eemaldamiseks kasutatakse välist reljeefimudelit. Antud töös kasutati 3 kaaresekundi ehk ligikaudu 90-meetrise täpsusega *Shuttle Radar Topography Missioni* reljeefimudelit (NASA, 2009). Eesti suhteliselt tasase pinnamoe tingimustes ei ole reljeefi mõjude korrigeerimine kriitilise tähtsusega.

Lõpuks pakitakse lahti püsivate peegeldajate faas ning leitakse deformatsioon pikkusühiku ja aja suhtena. Enamasti on sobivaks ühikuks millimeetrit aastas. Saadud väärtused näitavad deformatsiooni piki radari vaatesuunda, mis käesolevas töös kasutatud sensorite 23° langemisnurga korral vastab suhteliselt täpselt vertikaalsuunale. Vertikaalsuunaline deformatsioon moodustab umbes $\cos 23^\circ = 0,92$ ehk 92% leitud vaatesuunalisest deformatsioonist.

3. Tulemused ja arutelu

3.1 Vertikaalliikumiste kiirus

Arvutatud vajumis- ja kerkmiskiirused piki radari vaatesuunda märgivad suhtelist deformatsiooni võrrelduna kogu uuritava ala keskmise deformatsiooniga. Järgnevatel joonistel toodud tulemustes tähendavad negatiivsed väärtused vajumist ning positiivsed kerkimist.

Kuna püsivate peegeldajatena identifitseeritud objektid on enamasti ehitised, siis sisaldub saadud deformatsioonikiiruses nii maapinna kui ehitiste liikumine. Ehitiste vajumine võib olla tingitud näiteks vundamendi ebastabiilsusest.

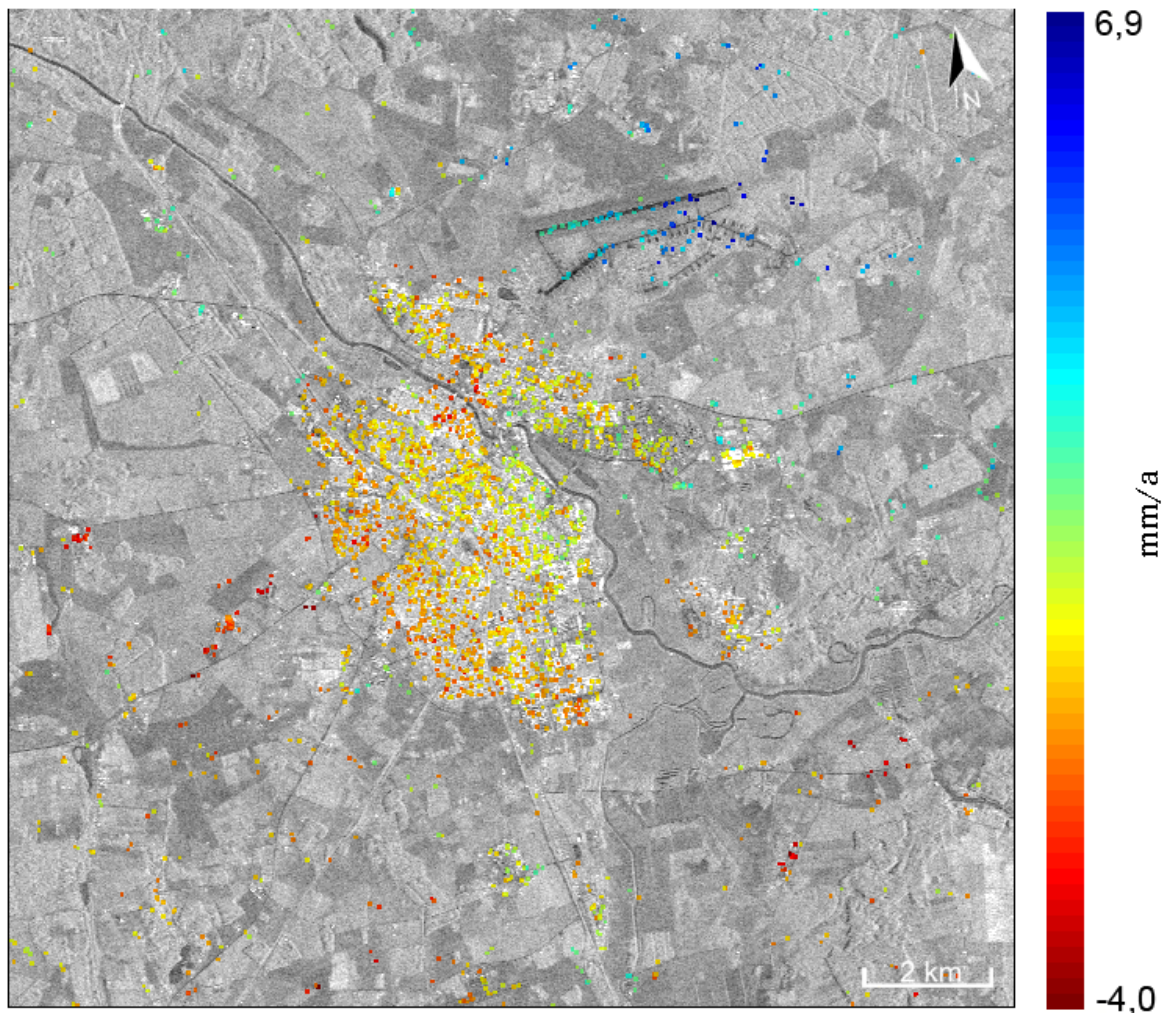
3.1.1 Kogu uuritava ala võrdlus Tartu linnaga

Nii 1993.-2001. aasta aegrea kui 2003.-2006. aasta aegrea korral on oodatult püsivate peegeldajate kontsentratsioon kõige suurem Tartu linnas. Linnapiirkonna esindajaks valiti koordinaatide $58,3450^{\circ}$ - $58,3970^{\circ}$ N ja $26,6800^{\circ}$ - $26,7800^{\circ}$ E poolt määratud ristkülikukujuline ala (joonis 10). Püsivate peegeldajate tihedus piiritletud ristkülikus on vastavalt 60,0 (1993-2001) ja 158,2 (2003-2006) püsivat peegeldajat ruutkilomeetri kohta. Kogu uuritava ala kohta leiti seevastu keskmiselt 12,7 (1993-2001) ja 38,6 (2003-2006) püsivat peegeldajat ruutkilomeetri kohta.



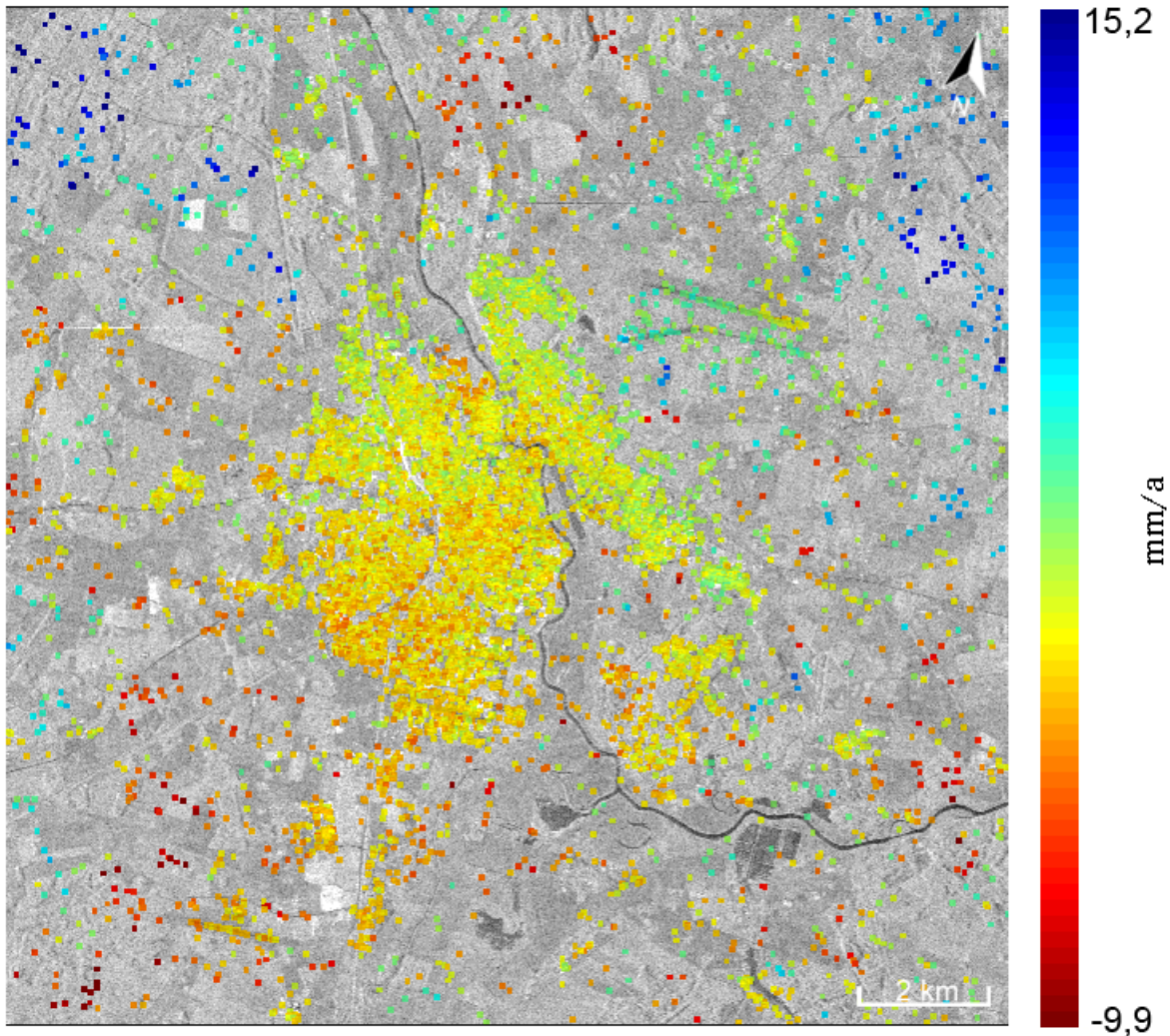
Joonis 10. Tartu linnalise ala piiritletus heleda ristkülikuga. Aluskaart: Maa-amet

Tuvastatud deformatsioonikiiruste suurimad ja vähimad väärtused jäävad linnast välja ning linnas esinevad väärtused varieeruvad ulatuselt küllaltki vähe (joonis 11 ja joonis 12).



Joonis 11. Maapinna ja majade vajumis- ja kerkimiskiirus piki radari vaatesuunda Tartus ja lähikümbruses 1993-2001. Iga punkt esindab üht püsivat peegeldajat ja selle liikumiskiirust. Taustal juhtpildi signaali tugevus.

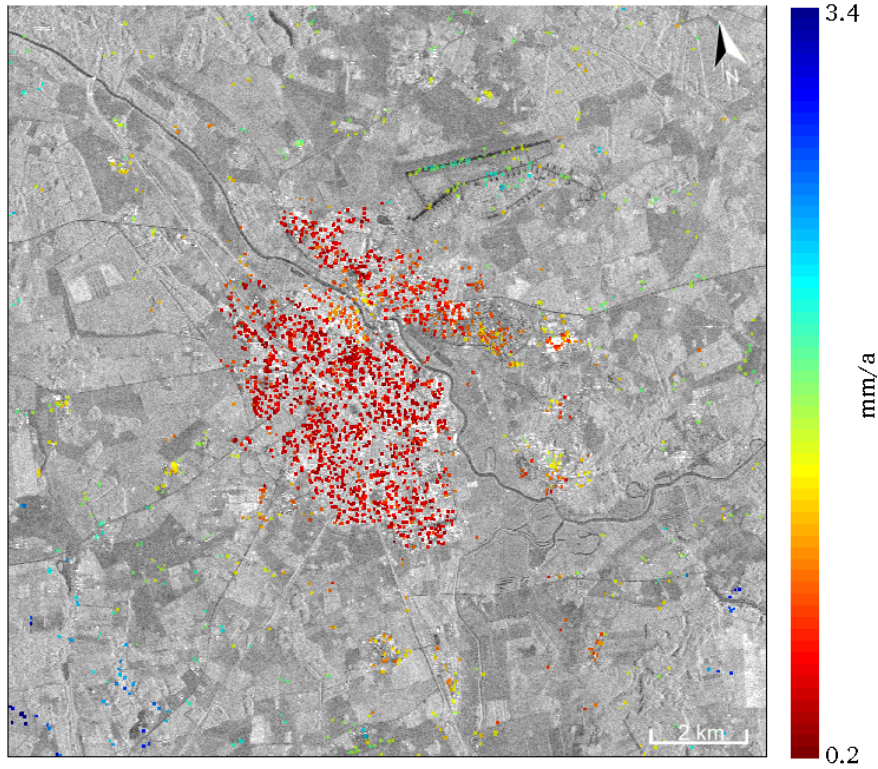
Üldine deformatsioonikiirus Tartus aastatel 1993-2001 jääb 95% punktidest $-1,7..+1,3$ mm/a piiresse. Aastate 2003-2006 kohta arvatud liikumine jääb 95% punktidest $-2,9..+2,3$ mm/a piiresse. Vajuvate punktide osakaal linnapiirkonnas on kahanenud 64%-lt 60%-le.



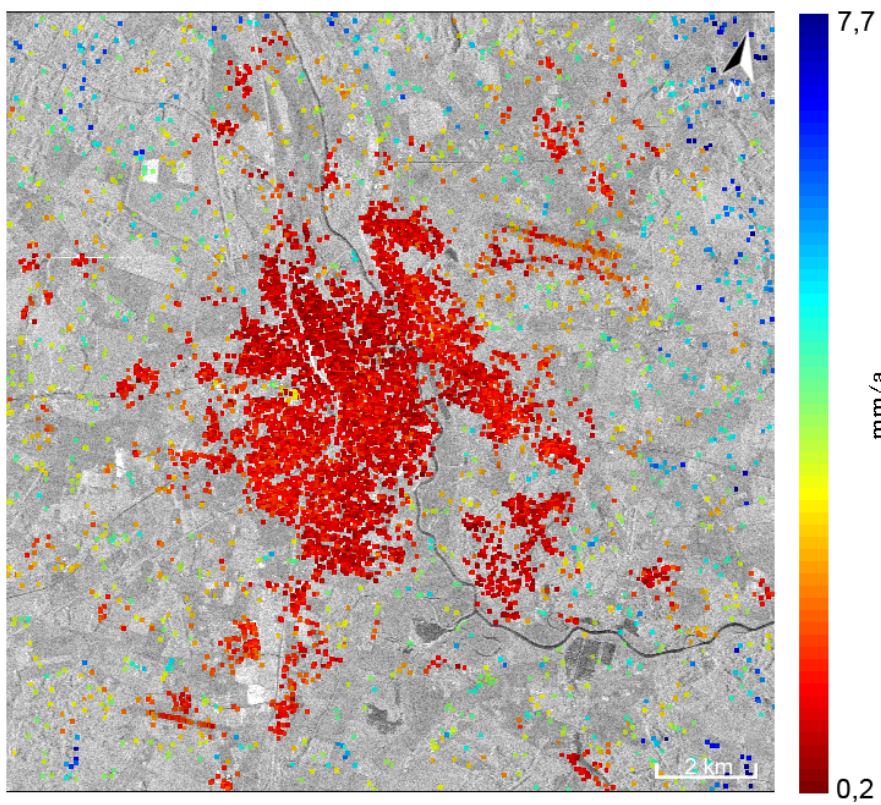
Joonis 12. Maapinna ja majade vajumis- ja kerkimiskiirus piki radari vaatesuunda Tartus ja lähiumbruses 2003-2006. Iga punkt esindab üht püsivat peegeldajat ja selle liikumiskiirust. Taustal juhtpildi signaali tugevus.

Väljaspool Tartu linna on deformatsioon absoluutväärtustelt suurem, aga ebäühtlasem. Vajumiste ja kerkimiste stabiilsust iseloomustab vajumiskiiruse standardhälve (joonis 13 ja joonis 14). Suurem standardhälve on seostatav suuremate kõikumistega pinnaseliikumises, kuid ka mõõtmisvigadega. Eelpoolkirjeldatud riskülikuga piiratud linnalises alas on keskmine standardhälve varasema aegrea korral 0,56 mm/a ning hilisemal 1,02 mm/a. Kogu uuritava ala näitajad on vastavalt 0,81 mm/a ja 1,49 mm/a.

1993.-2001. aasta aegreas on võrreldes ülejäänud linnaga kõrgem standardhälve Supilinna piirkonnas. See tähendab ebäühtlasemat vajumiskiirust, mis võib olla seostatav sealsete puitmajade vundamentidega, mis toetuvad turbale rajatud puitparvedele.



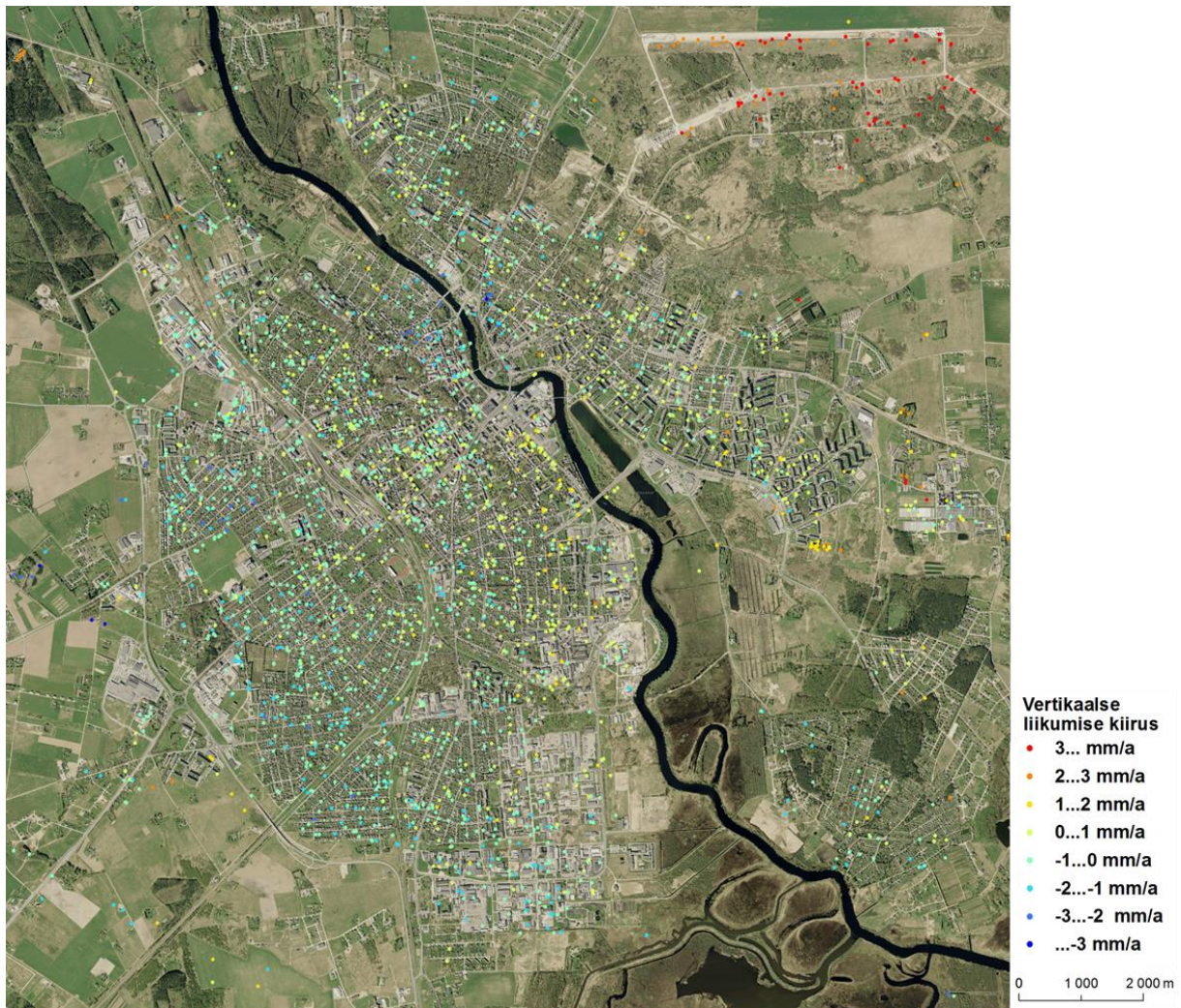
Joonis 13. 1993.-2001. aasta vajumis- ja kerkimiskiiruste standardhälve. Taustal juhtpildi signaali tugevus.



Joonis 14. 2003.-2006. aasta vajumis- ja kerkimiskiiruste standardhälve. Taustal juhtpildi signaali tugevus.

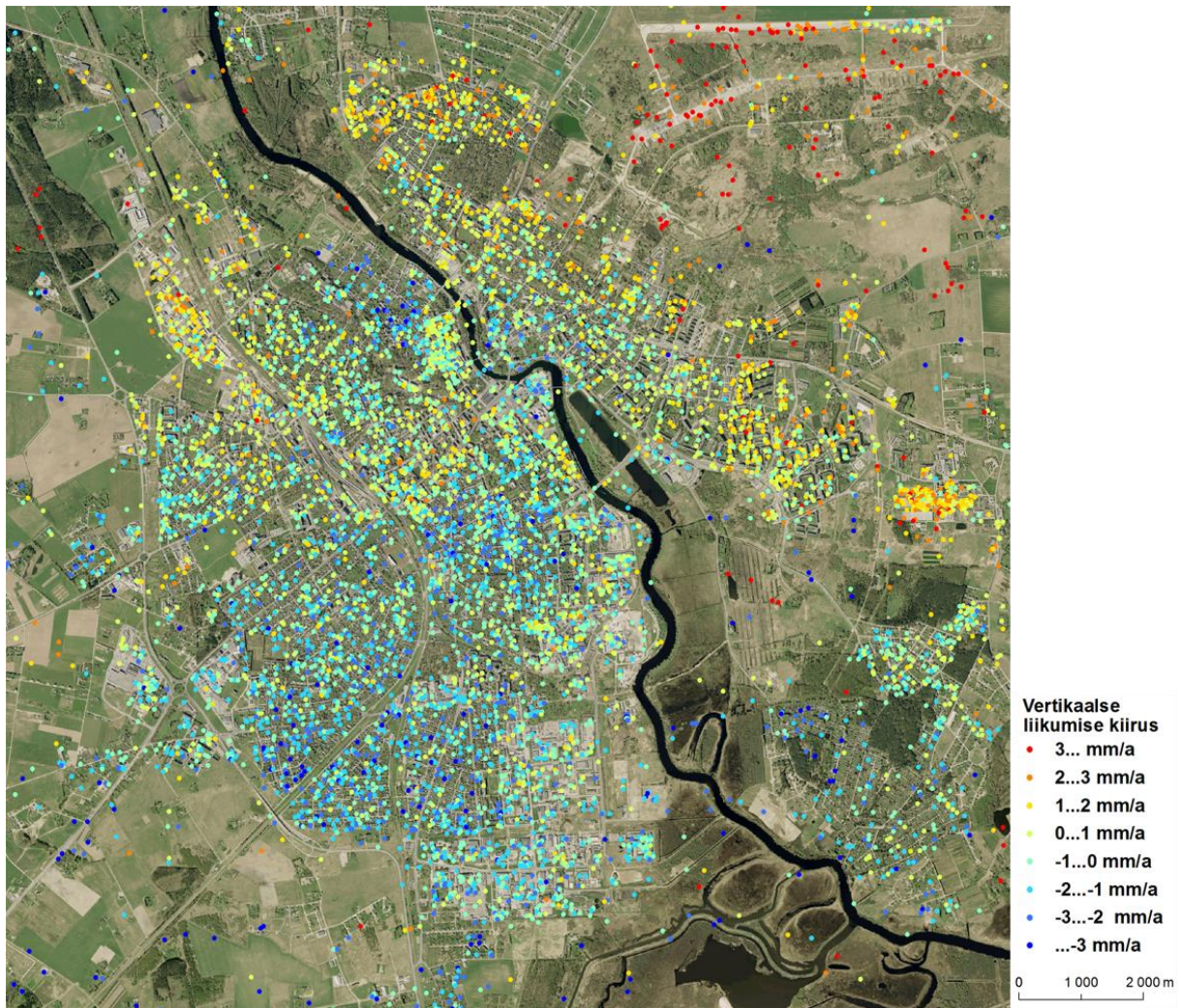
3.1.2 Tartu linn

Valdav osa punktidest Tartus liiguvad 1993.-2001. aasta aegreas kiirusega $-1...1$ mm/a (joonis 15). Kiirema vajumisega on vaid üksikud piirkonnad, näiteks Vabaduse ja Kroonuaia sildade piirkond Emajõe mõlemal kaldal. Kiiresti, üle 3 mm/a, kerkiva alana eristub Raadi lennuväli.



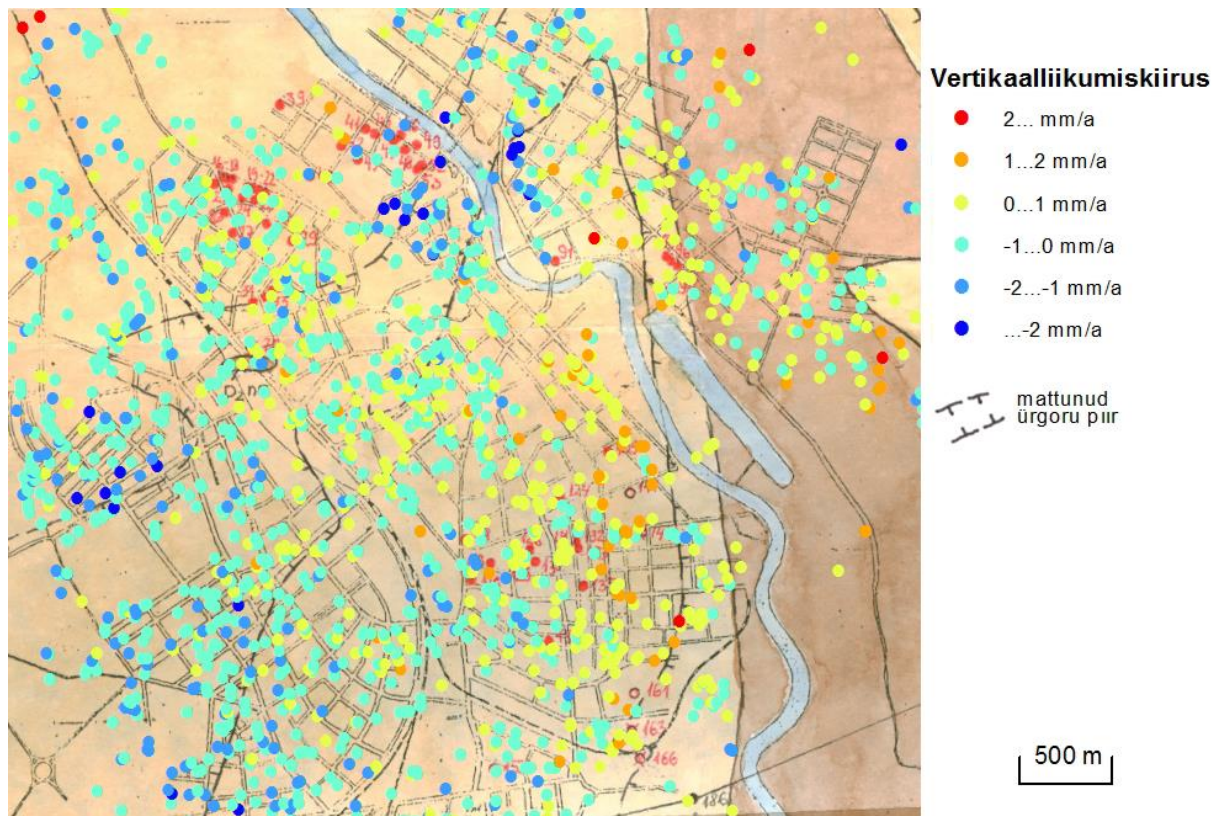
Joonis 15. Maapinna ja majade vajumis- ja kerkimiskiirus piki radari vaatesuunda Tartus 1993-2001. Iga punkt esindab üht püsivat peegeldajat ja selle liikumiskiirust. Aluskaart: Maa-amet

2003.-2006. aasta kohta arvatatud vertikaalliikumises esinevad suuremad erinevused (joonis 16). Vajuvate aladena saab eristada kogu lõunapoolse osa Tartust (Tammelinn, Karlova, Ropka, Variku), Supilinna ning Ülejõe. Valdavalt kerkivad alad on Kruusamäe, Veeriku tööstusrajoon ja Annelinn. Sarnaselt eelmise aegreaga esinevad suurimad kerkimiskiirused taas Raadi lennuväljal.



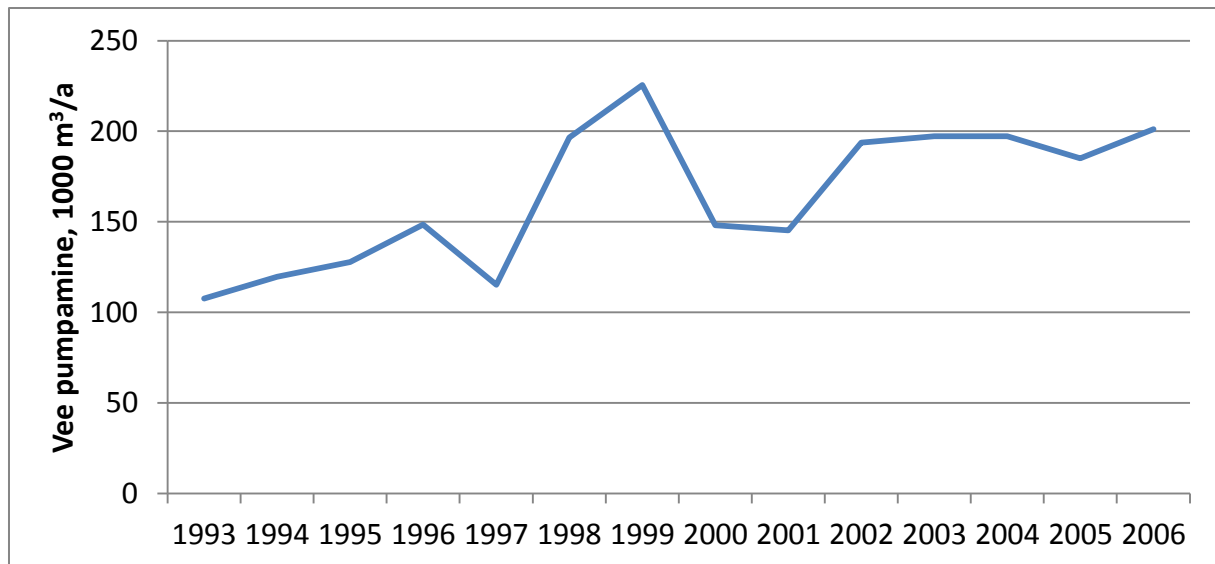
Joonis 16. Maapinna ja majade vajumis- ja kerkimiskiirus piki radari vaatesuunda Tartus 2003-2006. Iga punkt esindab üht püsivat peegeldajat ja selle liikumiskiirust. Aluskaart: Maa-amet

Geoloogilise ehituse taustal on mõlema aegrea korral märgatav kiirem vajumine Raadi-Maarjamõisa mattunud ürgoru läheduses. Emajõe ja Raadi ürgoru lõikealal on varasema aegrea vajumiskiirused üle 2 mm/a (joonis 17).



Joonis 17. Vajumis- ja kerkimiskiirused piki radari vaatesuunda Tartu geoloogilise ehituse taustal. 1993.-2001. aasta andmed. Aluskaart: Pääslane, 1993

Vajumist võib seostada ka samas asuva Meltsiveski veehaardega, millest vee pumpamine uuritava perioodi jooksul on kasvanud (joonis 18). Lokotari (2005) järgi ei esine Tartus umbes 1980. aastatest alates selget korrelatsiooni veekasutuse ja maapinna vajumise vahel seoses veekasutuse vähenemisega. Võrreldes varasema aegreaga ei ole ka 2003.-2006. aasta aegreas märgata selget tendentsi ulatuslikumale vajumisele selles piirkonnas.



Joonis 18. Vee pumpamine Meltsiveski veehaardest 1993-2006. Andmed: AS Tartu Veevärk

Püsivate peegeldajate asukoht on määratud põhja-lõuna sihis 2 m ja ida-lääne sihis 5 m täpsusega (püsivate peegeldajate asukohatäpsus on toodud tabelis 2). Seetõttu on võimalik vajumis- ja kerkimispunktid seostada konkreetsete hoonete ja isegi hooneosadega. Joonisel 19 võib sel viisil eristada üksikute hoonete vertikaalliikumise kiiruseid. Vastavalt teorialle (peatükk 1.4) paiknevad identifitseeritud püsivad peegeldajad enamasti ehitistel. Valdavalt võib neid seostada katuseservade ja –nurkadega.



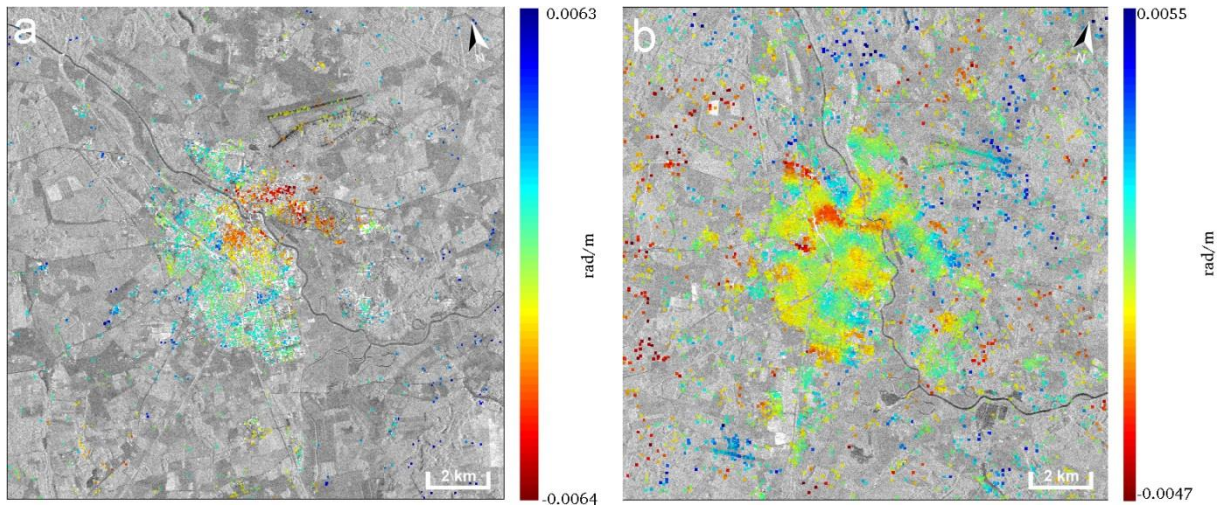
Joonis 19. Maapinna ja majade vajumis- ja kerkimiskiirus piki radari vaatesuunda Tartus vanalinna piirkonnas 2003-2006. Iga punkt esindab üht püsivat peegeldajat ja selle liikumiskiirust. Aluskaart: Maa-amet

Püsivate peegeldajate meetodil konkreetsete hoonete vajumise seire planeerimist takistab punktide valiku ettemääramatus. Valitud radarandmestiku põhjal ei saa kindlalt ette väita, et püsiv peegeldaja identifitseeritakse mingil konkreetsetel objektidel. Uuemate SAR instrumentide omadused on selles osas üldiselt paremad, kuna püsivaid peegeldajaid leitakse nendega parema ruumilise lahutuse tõttu (kuni 1 m TerraSAR-X korral, vt tabel 1) rohkem.

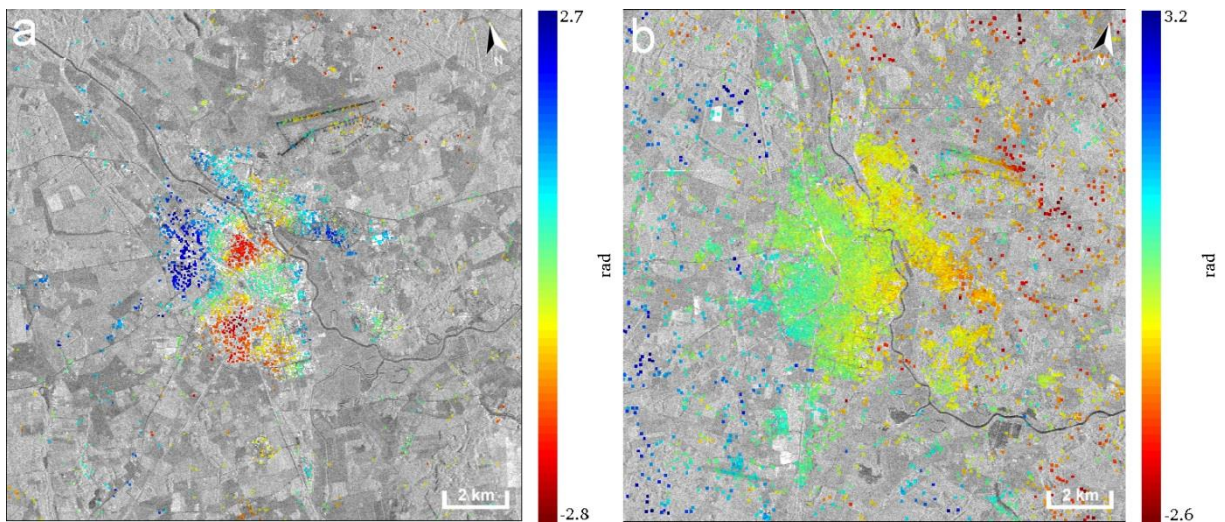
3.2 Täpsushinnang

Tulemuste täpsusele seab esiteks piirid kasutatud tehisavaradari piltide arv. 1993.-2001. aasta kohta arvatud tulemuste jaoks on kasutatud 23 pilti, mida võib lugeda küllaldaseks (vt peatükk 1.4). 2003.-2006. aasta andmeid tuleb pidada vähem usaldusväärseks, kuna on kasutatud vaid 11 pilti. Suurema hulga piltide kasutamist takistas saada olevate lähteandmete arv, mis sobiksid ühes aegreas töötlemiseks.

Täpsuse parandamiseks on lõpptulemustest maha arvatud reljefimudeli (joonis 20) ning atmosfääri ja orbiidiandmete põhjustatud vead (joonis 21).

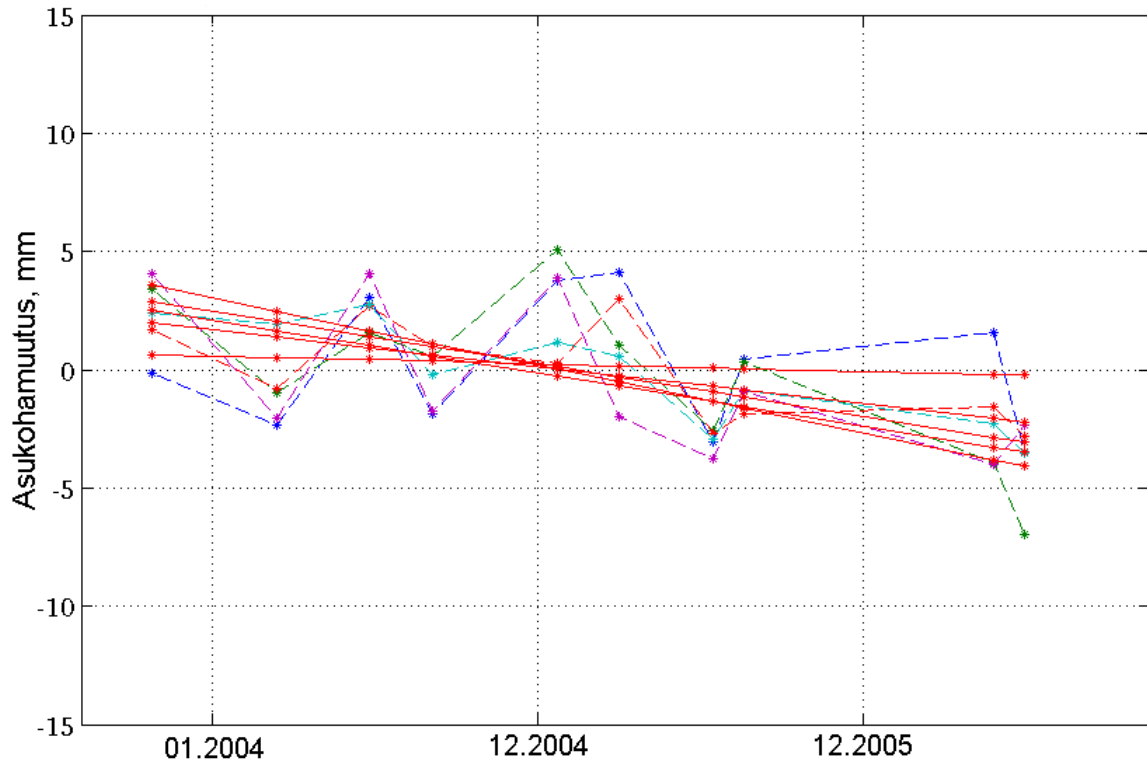


Joonis 20. Reljeefimudeli ja selle radarikoordinaatidesse teisendamise viga 1993.-2001. (a) ja 2003.-2006. (b) aasta aegrea korral. 0,01 rad/m vastab umbes 12 meetri suurune viga reljeefimudelis (Hooper, *et al.*, 2010). Viga on lõpptulemustest maha arvatud.



Joonis 21. Atmosfääri ja orbiidiandmete põhjustatud viga juhtpildil 1993.-2001. (a) ja 2003.-2006. (b) aasta aegrea korral. Viga on lõpptulemustest maha arvatud.

Kui lihtsustatult eeldada, et vertikaalsed liikumised on stabiilse kiirusega ja lineaarsed, siis võib üksikute mõõtmiste kõrvalekaldeid vajumise trendijoonest (joonis 22) pidada täielikult vigadest põhjustatuks. Selle eelduse korral saab vertikaalliikumise kiiruse standardhälvet tõlgendada veaindikaatorina. Keskmised standardhälbed on toodud peatükis 3.1.1.



Joonis 22. Viie Tartu avaturult valitud püsiva peegeldaja vertikaalsuunalised asukohamuutused 10.2003-07.2006. Punasega on märgitud trendijooned, katkendjoontega üksikute punktide asukohad.

Võrreldavaid kõrgtäpseid maapealsete mõõtmiste andmeid on napilt. Viimased nivelleerimisandmed Tartus pärinevad vanalinnast (objektid Jaani kirik, Lutsu 16 ja Lai 29) 1993. aastast ja 1980. aastate lõpust ning näitavad seal alates 1980. aastatest ühtlast vajumist kiirusega umbes 2 mm/a (Lokotar, 2005). Sellega sobituvad 1993.-2001. aasta põhjal arvatud vajumiskiiruse punktide andmed lähedalasuvatelt hoonetelt: -2,7 mm/a (Lai 27), -1,6 ja -1,4 mm/a (Rüütli 24). Täpselt samadelt hoonetelt püsivaid peegeldajaid ei leitud.

Arvestades standardhälvet, faasi parandeid, kasutatud piltide arvu ning võrdlust varasemate nivelleerimisandmetega, võib mõõtmiste täpsuseks hinnata 1993.-2001. aasta aegrea korral umbes 1 mm/a ning 2003.-2006. aasta aegrea korral alla 2 mm/a.

Kokkuvõte

Töö eesmärkideks oli PSInSAR meetodi rakendamine ja testimine Tartu linnas maapinnaliikumiste tuvastamiseks, Tartu vajumisandmete täiendamine pärast nivelleerimisandmete rea katkemist 1993. aastal ning tulemuste kirjeldamine.

Vajumis- ja kerkimiskiiruste arvutamiseks Tartus kasutati 23 ERS-1 ja ERS-2 SAR pilti ajavahemikust 12.02.1993-15.01.2001 ning 11 Envisat ASAR pilti ajavahemikust 25.10.2003-01.07.2006. Satelliitide ERS ning Envisat pildid töödeldi eraldi aegridadena. Radarandmestiku töötlemiseks püsivate peegeldajate meetodil kasutati vabavaralisi programme Doris 4.06 ning StaMPS 3.2.

1993.-2001. aasta aegrea korral leiti vertikaalliikumise kiirus 2980 punkti (püsiva peegeldaja) kohta ning 2003.-2006. aasta aegrea korral 9064 punkti kohta. Teooriale vastavalt paiknesid punktid enamasti linnas ning olid seostatavad konkreetsete ehitistega.

Deformatsioonikiirused Tartu linnas on enamasti väikesed, jäädes valdavalt -2...2 mm/a vahemikku. 1993.-2001. aasta kohta arvutatud andmete järgi saab eristada kiiremini vajuvat ala mõlemal pool Emajõe Vabaduse ja Kroonuaia silla kandis. Ala vajumise põhjuseid võib seostada Raadi-Maarjamõisa ürgoru ning Meltsiveski veehaardega.

2003.-2006. aasta andmete järgi vajuvad kiirusega kuni 2 mm/a Tammelinn, Karlova, Ropka, Variku, Supilinn ning Ülejõe. Valdavalt kerkivad alad on Kruusamäe, Veeriku tööstusrajoon ning Annelinn. Mõlema aegrea korral esinesid selgelt suurimad (üle 3 mm/a) kerkimiskiirused Raadi lennuväljal.

Vajumiskiiruse keskmine standardhälve linnapiirkonnas oli 0,56 mm/a 1993.-2001. aasta aegrea korral ning 2003.-2006. aasta korral 1,02 mm/a. Hinnanguliseks vertikaalsete liikumiste kiiruse täpsuseks 1993.-2001. aasta aegrea korral võib pidada 1 mm/a ning 2003.-2006. aasta aegrea korral alla 2 mm/a. Tulemuste täpsusklass on võrreldav või parem nivelleerimisega.

Edaspidistes uurimustes võiks tulemuste parema kontrollitavuse huvides siduda deformatsiooniandmed kindla referentspunktiga. Käesolevas töös takistas seda maapealsete mõõtmiste puudus.

Töö tulemusena võib kinnitada, et kasutatud meetod on sobilik linnalistel aladel majade ning maapinna deformatsiooni mõõtmiseks. Perspektiivikas on võimalus kombineerida näiteks GPS andmeid PSInSAR andmetega, kuna GPS andmete abil saab radariandmed siduda absoluutse deformatsiooniga, samas kui radariandmed võimaldavad GPS mõõtmispunktide võrku märkimisväärselt tihendada.

Summary: Measuring vertical displacement rate of ground and buildings in Tartu with PSInSAR

This paper presents an overview of measuring slow-rate ground deformations using a remote sensing technique called PSInSAR (Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar). The aim of the study was to test the method and to obtain displacement information about Tartu, which is lacking since 1993.

PSInSAR exploits complex-valued synthetic aperture radar (SAR) images for extracting the deformation info from SAR phase data. SAR sensors like ERS-1 and ERS-2 SAR and Envisat ASAR, also used in this work, are active remote sensing instruments using microwaves. Thus, SAR systems can operate in nighttime and penetrate clouds.

In PSInSAR, a stack of multitemporal SAR images is used. Since phase is dependent on distance, it is possible to calculate the movement of the objects relative to each other in time by comparing the phase difference between images. The phase response of natural targets like vegetation or water changes randomly in time thus it is first necessary to identify coherent pixels containing objects that have stable backscattering properties – permanent scatterers. Permanent scatterers are mostly man-made structures like buildings, bridges or masts.

The processing of the data was carried out using DORIS 4.06 and StaMPS 3.2 software packages. A total of 23 ERS-1/-2 SAR images from 12.02.1993-15.01.2001 and 11 Envisat ASAR images from 25.10.2003-01.07.2006 were used. All the images had 30 m spatial resolution, 5,6 cm radar wavelength and 23° incidence angle.

The results show that the displacement of ground and buildings in Tartu is relatively modest, as most of the deformation is between -2...+2 mm/yr. Overall, Tammelinn, Karlova, Ropka, Variku, Supilinn and Ülejõe showed slight subsidence while Kruusamäe, Veeriku and Annelinn indicated uplift or remained stable. Raadi airfield had the fastest uplift rate, over 3 mm/yr.

The standard deviation of the displacement speed in the city area was 0,56 mm/yr for the 1993-2001 time series and 1,02 for the 2003-2006 time series.

Tänuavaldused

Soovin tänada juhendajaid Kaupo Voormansikut ja Raivo Aunapit mitmekülgse abi ja nõuannete ning pühendatud aja eest. Samuti tänan töötlusprotsessi rohkete tehniliste probleemide juures suureks abiks olnud Martin Valgurit. Tulemuste interpreteerimise ja geoloogia-alase konsultatsiooni eest tänan Marko Kohvi.

Kasutatud kirjandus

- All, T. & Karimov, M., 2008. Ground Motion Monitoring of the City of Pärnu (Southwestern Estonia) by PS InSAR. Tallinn: Geological Survey of Estonia.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2001. Comparing GPS, Optical Leveling and Permanent Scatterers. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6(1), 2622-2624.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Locatelli, R., Novali, F., Savio, G., 2003a. Permanent Scatterers: Precision Assessment and Multi-platform Analysis. *Geosciences and Remote Sensing Symposium*, (2), 1193-1195.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Perissin, D., Rocca, F., 2003b. ERS-ENVISAT Permanent Scatterers Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, (2), 1130-1132.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2003c. Multi-Image Satellite SAR Interferometry: State of the Art and Future Trends. *Radar Conference*, 239-244.
- Colesanti, C., Le Mouelic, S., Bennani, M., Raucoules, D., Carnec, C., Ferretti, A., 2005. Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique – a case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 201-207.
- De Zan, F., 2012. ESA Radar Remote Sensing Course 16-20/04/2012 Tartu (Estonia) SAR Interferometry. Tartu.
- Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2008. Delft Object-oriented Radar Interferometric Software User's manual and technical documentation. Delft: Delft University of Technology.
- Delft University of Technology, 2010. Stanford Method for Persistent Scatterers. Delft University of Technology.
- Dixon, T. H., Amelung, F., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F., Dokka, R., Sella, G., Kim, S.-W., Wdowinski, S., Whitman, D., 2006. Subsidence and flooding in New Orleans. *Nature*, 441(1), 587-588.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 1-33.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2000. Measuring subsidence with SAR interferometry: applications of the permanent scatterers technique. *Workshop on Advanced Techniques for the Assessment of Natural Hazards in Mountain Areas*, 81-91.

Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2007. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142-1153.

Hanssen, R. F. & Ferretti, A., 2002. Deformation Monitoring by Satellite Radar Interferometry. *GIM International*, 9, 52-57.

Hooper, A., Spaans, K., Bekaert, D., Cuenca, M. C., Arikian, M., Oyen, A., 2010. *StaMPS/MTI Manual*. Delft: Delft University of Technology.

Kampes, B., Hanssen, R. & Perski, Z., 2003. Radar Interferometry with Public Domain Tools. *Proceedings of FRINGE 2003*, December 1-5, Frascati, Italy, 2003.

Lokotar, A., 2005. Tartu vanalinna hoonete vajumine ja selle geoloogilis-hüdrogeoloogilised põhjused. Ülemastmetöö rakendusgeoloogias. Tartu Ülikool: Geoloogia instituut.

Prati, C., Ferretti, A. & Perissin, D., 2010. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, 49, 161-170.

Pääslane, P., 1993. Tartu linna Tartu veekompleksi iseloomustus, parameetrite ja põhjaveevaru arvustus. Diplomitöö. Tartu: Geoloogia Instituut.

Internetiallikad:

Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2013. ERS and Envisat Precise Orbit Determination. <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/> (13.05.2013).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2012a. Eo Portal Directory. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions> (07.11.2012).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2012b. Radar and SAR Glossary. <http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-2.htm#eph.asar.gloss.radsar> (7.11.2012).

MathWorks Inc, 2013. MathWorks Matlab. <http://www.mathworks.se/products/matlab/> (06.05.2013).

NASA, 2009. Shuttle Radar Topography Mission C-band Data Products. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddataproduts.html> (07 05 2013).

Rocca, F., Prati, C. & Ferretti, A., 2010. An Overview of SAR Interferometry. <http://earth.esa.int/workshops/ers97/program-details/speeches/rocca-et-al/> (07.11.2012).

Stanford Radar Interferometry Research Group, 2003. SNAPHU: Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping. <http://www.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/> (06.05.2013).

TRE Europa, 2013. InSAR evolution. <http://treuropa.com/technique/insar-evolution/> (13.05.2013).

Lisad

Lisa 1. 1993.-2001. aasta aegrea SAR satelliidipiltide andmed

Nr	Kuupäev	Satelliit	Efektiivne vahekaugus juhtpildist meetrites	Ajaline vahe juhtpildiga päevades
1.	12.02.1993	ERS-1	304	-1634
2.	28.05.1993	ERS-1	-449	-1529
3.	6.08.1993	ERS-1	103	-1459
4.	21.05.1995	ERS-1	-199	-806
5.	31.07.1995	ERS-2	248	-735
6.	4.09.1995	ERS-2	-109	-700
7.	9.10.1995	ERS-2	673	-665
8.	28.10.1996	ERS-2	817	-280
9.	2.12.1996	ERS-2	919	-245
10.	17.03.1997	ERS-2	51	-140
11.	21.04.1997	ERS-2	565	-105
12.	26.05.1997	ERS-2	-98	-70
13.	4.08.1997	ERS-2	0	0
14.	8.09.1997	ERS-2	554	35
15.	13.10.1997	ERS-2	151	70
16.	17.11.1997	ERS-2	308	105
17.	26.01.1998	ERS-2	-151	175
18.	22.03.1999	ERS-2	-123	595
19.	26.04.1999	ERS-2	-278	630
20.	5.07.1999	ERS-2	-59	700
21.	22.11.1999	ERS-2	34	840
22.	19.06.2000	ERS-2	-471	1050
23.	15.01.2001	ERS-2	177	1260

Lisa 2. 2003.-2006. aasta aegrea SAR satelliidipiltide andmed

Nr	Kuupäev	Satelliit	Efektivne vahekaugus juhtpildist meetrites	Ajaline vahe juhtpildiga päevades
1.	25.10.2003	Envisat	629	-280
2.	13.03.2004	Envisat	-64	-140
3.	26.06.2004	Envisat	265	-35
4.	31.07.2004	Envisat	0	0
5.	4.09.2004	Envisat	319	35
6.	22.01.2005	Envisat	-572	175
7.	2.04.2005	Envisat	-278	245
8.	16.07.2005	Envisat	-187	350
9.	20.08.2005	Envisat	596	385
10.	27.05.2006	Envisat	160	665
11.	1.07.2006	Envisat	-493	700

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Villem Voormansik (sünnikuupäev: 07.05.1991),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Maapinna ja majade vajumise ja kerkimise mõõtmise Tartu linnas radarkaugseire abil“,

mille juhendajad on Kaupo Voormansik ja Raivo Aunap,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 20.05.2013