



InSAR vertikaalliikumised Tallinnas ajavahemikus 2016-2024

(Ver. 2025-01-21)

Koostas: T. Oja

Tallinn 2024

Sisukord

1	InSAR analüüs uuringualas	2
1.1	Uuringuala	2
1.2	Satelliitandmete InSAR analüüs	2
1.3	Vertikaalliikumiste arvutus	3
2	Tulemused	6
2.1	LOS liikumised PS punktides	6
2.2	Vertikaalliikumiste rasterpinnad	6
2.3	Aastaste vertikaalpindade võrdlus kesklinnas	9
2.4	Vertikaallahenduste detailvaated	9
3	Kokkuvõte	12
	Viited	13
	Lisad	14
L.1	Kaasnevate failide nimekiri	14

Enimkasutatavad lühendid:

- APS** (ingl *Atmospheric Phase Screen*) – atmosfääri faasi parand, mis arvutatakse atmosfääri mõju kompenseerimiseks InSAR analüüsis;
- ASC** (ingl *Ascending*) – tõusev orbiit, mille korral SAR pilt on tehtud satelliidi liikumisel lõunast põhja ja vaatega idasuunas;
- ASI** (ingl *Amplitude Stability Index*) – amplituudi stabiilsusindeks on statistiline suurus, mille põhjal filtreeritakse välja InSAR analüüsiks sobivad PS punktid;
- DEM, DTM** (ingl *Digital Elevation Model, Digital Terrain Model*) – Maa digitaalne kõrgusmudel, pinnareljeefi mudel;
- DESC** (ingl *Descending*) – langev orbiit, mille korral SAR pilt on tehtud satelliidi liikumisel põhjast lõunasse, vaatega läänesuunas;
- E** (ingl *East*) – ida-lääne suunaline koordinaattelg, mille positiivne suund on ida suunas;
- GPA** – geodeetiliste punktide andmekogu, gpa.maaamet.ee;
- GNSS** (ingl *Global Navigation Satellite System*) – globaalne asukohamääramise / satelliitnavigatsiooni süsteem;
- H** (ingl *Height*) – vertikaalsuunaline koordinaattelg, mille positiivne suund on suunatud Maa keskpunktist eemale (mööda Maa referentsellipsoidi normaali);
- InSAR** (ingl *Interferometric Synthetic Aperture Radar*) – interferomeetriline tehisavaradar;
- IW** – SAR pildi mood (ingl *Interferometric Wide swath*);
- Lat** (ingl *Geodetic Latitude*) – geodeetiline laius ellipsoidil, ühik kraadides (°);
- Long** (ingl *Geodetic Longitude*) – geodeetiline pikkus ellipsoidil, ühik kraadides (°);
- LOS** (ingl *Line-of-sight*) – vaatesuund satelliidi sensorist peegeldava/hajutava objektini maapinnal;
- MST-graaf** (ingl *Minimum Spanning Tree graph*) – graafi tüüp, mille puhul moodustatakse ajaliselt lähestikku+ pildipaarid ehk interferogrammid nii, et nende koherentsus oleks suurim;
- MTA** (ingl *Multi-temporal Adaptive*) – PS punktide filtreerimismeetod, võttes aluseks MST-graafiga arvutatud ruumilise koherentsuse;
- N** (ingl *North*) – põhja-lõuna suunaline koordinaattelg, mille positiivne suund on põhja suunas.
- PS** (ingl *Persistent/Permanent Scatterer*) – püsiv peegeldi/hajuti maapinnal;
- PSI** (ingl *Persistent Scatterer Interferometry*) – SAR interferomeetria meetod, mis arvutab PS punktide liikumised ajas interferogrammide aegridade analüüsist;
- RP** (ingl *Reference point*) – LOS arvutuse referentspunkt;
- SAR** (ingl *Synthetic Aperture Radar*) – tehisavaradar;
- SLC** (ingl *Single Look Complex*) – SAR pildi andmefaili formaat, kus igat pikslit kirjeldav kompleksarvuline väärtus esitab tagasipeegeldunud mikrolaine amplituudi ja faasi;
- Tähe-graaf** (ingl *Star graph*) – graafi tüüp, mille puhul moodustatakse pildipaarid ehk interferogrammid valitud peapildi suhtes.

Sissejuhatus

Töö eesmärk on kaugseire andmete (Euroopa Kosmoseagentuuri Sentinel-1 tehisavadar satelliitide SAR piltide) ja InSAR meetodi abil tuvastada infrastruktuuri, hoonete ja muude maapealsete objektide liikumisi **Tallinna linna** uuringualas erinevatel ajaperioodidel, mis jäävad ajavahemikku **juuli 2016 – november 2024**.

Satelliitandmete InSAR analüüsi meetodid on viimase paarikümne aasta jooksul kiiresti arenenud ning leidnud üha laiemat kasutust maapinna ja sellel paiknevate objektide liikumiste jälgimiseks kuni 1 mm täpsusega (Hanssen, 2001; Ferretti jt, 2001; Ho Tong Minh jt, 2020). InSAR analüüsi abil on efektiivselt jälgitud infrastruktuuri ja hoonete liikumisi maailma suurlinnades (Bischoff jt, 2020; Hu jt, 2016).

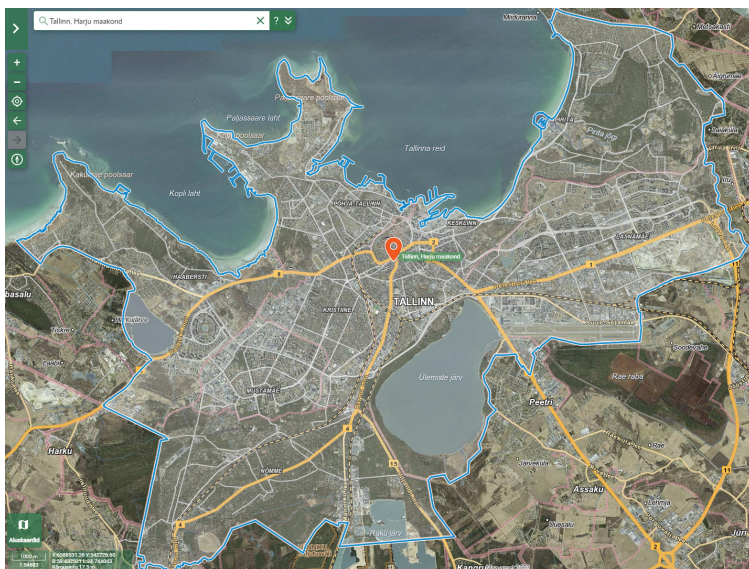
InSAR meetod rakendab edukalt korduvajalisi (ingl *multi-temporal*) kosmoseseire mikro-lainepilte, mille põhjal arvutatakse objektidelt tagasihajuva elektromagnetlaine muutunud faasist objektide liikumised maapinnal (Kiik ja Gruno, 2019). AS Datel on välja arendanud InSAR põhise e-teenuse **Sille.Space** (www.sille.space), mille abil on paljude klientide tellimustena arvutatud liikumisi ja deformatsioone maailma eri paigus. Tellitud analüüside arv ulatub tuhandetesse.

1 InSAR analüüs uuringualas

InSAR analüüs viidi läbi PSI meetodil, mida on põhjalikumalt tutvustatud artiklis Oja ja Gruno (2023). Järgnevalt antakse lühiülevaade InSAR analüüsi uuringualast, sisend- ja väljundandmetest ning esitatakse olulisemad tulemused nii kaardipiltide kui aegride graafikute kaudu.

1.1 Uuringuala

InSAR analüüs koostati Tallinna linna halduspiire (va Aegna saar) katvale risküliku kujulisele alale, pindalaga u 413 km² (Joon. 1). Töö eesmärgiks on InSAR meetodi abil jälgida linna infrastruktuuri, hoonete ja muude maapealsete objektide liikumisi ja stabiilsust ajaperioodidel 2016-2024, 2021-2024 ja 2023-2024.



Joonis 1: Uuringuala, mis hõlmab Tallinna linna halduspiire, va Aegna saart (XGIS2, Maa-amet 2023).

1.2 Satelliitandmete InSAR analüüs

InSAR analüüsis kasutati Sentinel-1 mikrolaineradar satelliitide S1A ja S1B SAR IW SLC pilte (tabel 1), mille ruumiline lahutus on u 5x20 m² pikslit (5 m vaatesuunas ja 20 m satelliidi liikumise suunas). Sentinel-1 missioon koosnes kahest 1A ja 1B satelliidist, mis tiirlesid samal sünkroonsel orbiidil. Ühe satelliidi möötmiste tsükkel ehk pildi tegemise kordus on 12 päeva. Samas olid Sentinel 1A ja 1B satelliitide möötmistsükklid omavahel sünkroniseeritud nii, et SAR pilte saadi iga 6 päeva tagant. Alates 2021. a detsembrist on töös ainult satelliit 1A, mistõttu sellest ajast alates kehtib taas 12-päevane möötmistsükkel.

Langevalt orbiidilt kaasati lisaks DESC-80 pilte ka DESC-51 orbiidilt, kuna orbiit 80 pildid ei katnud kogu uurimisala, täpsemalt selle lääneosa Kakumäe lahe rannikualal. Tabelis 1 on toodud kokkuvõtte analüüsi kaasatud orbiitide ja piltide kohta.

Tabel 1: InSAR analüüsis kasutatud Sentinel-1 radarpiltide arv ja orbiitide parameetrid.

Orbiidi rel.nr	Suund	Ajavahemik	Piltide arv	Tõusunurk θ (°)	Suunanurk φ (°)
160	Tõusev (ASC)	2016.06.07-2024.11.16	342	33.5501	-168.1105
		2021.10.03-2024.10.23	96	-"-	-"-
		2023.10.05-2024.10.23	32	-"-	-"-
80	Langev (DESC)	2016.06.02-2024.11.23	331	43.4446	-9.3655
		2021.10.04-2024.10.18	96	-"-	-9.3654
		2023.10.12-2024.10.18	32	-"-	-"-
51	Langev (DESC)	2016.06.12-2024.11.21	326	33.2576	-12.0187
		2021.10.02-2024.10.28	95	33.3565	-12.0369
		2023.10.10-2023.10.28	33	33.3586	-12.0368

SAR pildid kaasregistreeriti orbiitide kaupa projektidesse. PSI analüüside interferogrammi-de paarid peapildi suhtes moodustati *STAR- ehk tähe-graafidena* (joon. 2).

Arvutustes rakendati kõrgusmodelina DTMi (ruumilise lahutusega 10 m * 10 m), mis on koostatud aerolaserskaneerimine meetodil LiDAR-möödistuste tulemusena ja alla laetud Maa-ameti geoportaalist 2024. a oktoobris (geoportaal.maaamet.ee). DTM mudeli koor-dinaadid ja kõrgused teisendati WGS-84 koordinaadistikku ning kõrgusteks ellipsoidil, ra-kendades EST-GEOID2017 teisendusmudelit (gpa.maaamet.ee/geoid2017).

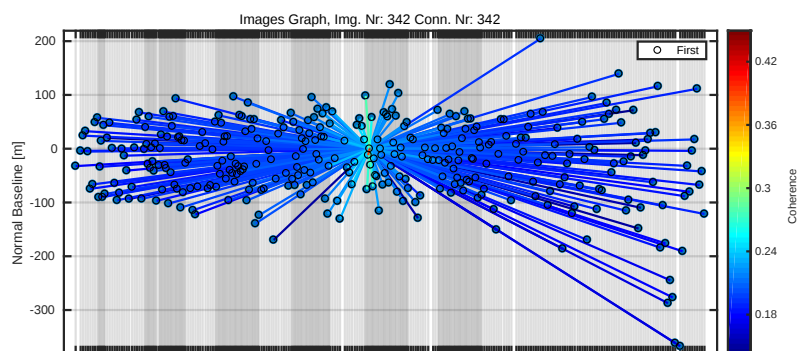
Analüüsi kaasati kõik PS punktid, kus amplituudi stabiilsusindeksi (ASI) ja ruumilise ko-herentsuse summa vastas tingimusele ≥ 1.1 . Ruumilist koherentsust hinnati pildipaari-dest moodustatud MST-graafide abiga (joon. 3), mis omakorda võimaldas rakendada MTA (Multi-Temporal Adaptive) filtreerimist ja märgatavalt suuremat PS punktide arvu võrrel-des tavapärase PSI meetodiga. MST-graafid võimaldavad head ülevaadet koherentsuse muutumisest seoses aasta-ajaliste muutustega (lumikate, taimestik), muutlike ilmaolude-ga (vihmaperioodid) jne. Detailsemalt on mõisted kirjeldatud SARPROZ[®] tarkvara manuaalis (sarproz.com/manual).

Piisavalt usaldusväärseks tulemuseks loeti PS punkt, mille piksli analüüsi ajaline kohe-rentsus vastas tingimusele ≥ 0.6 (maks. väärtus 1). Analüüs on läbi viidud relatiivses süsteemis, kus uurimisala liikumised on arvutatud kindla referentspunkti (RP) suhtes. RP kogu ajaperioodi vältel loetakse liikumatuks ehk stabiilseks.

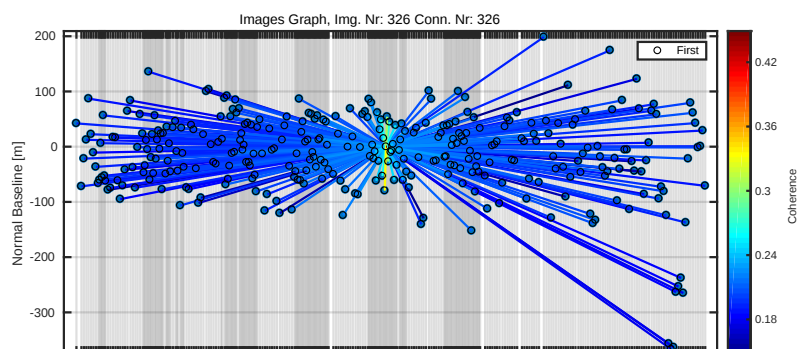
1.3 Vertikaalliikumiste arvutus

InSAR meetodiga mõõdetud liikumised, sõltumata kasutatavast meetodist, on alati suuna-tud satelliidi vaatesuunas ehk LOS suunas. LOS on ühemõõtmeline väärtus, mis iseloo-mustab koguliikumise (kogunihke) ja kiiruse (ingl *displacement*, *velocity*) ulatust PS punk-tis. LOS liikumiste teisendust kolmemõõtmelisse ruumi (*ENH* koordinaadistikku) koos jooniste ja valemitega on põhjalikumalt kirjeldatud varasemates tööaruannetes (Oja ja Gruno, 2021; Oja, 2023a,b).

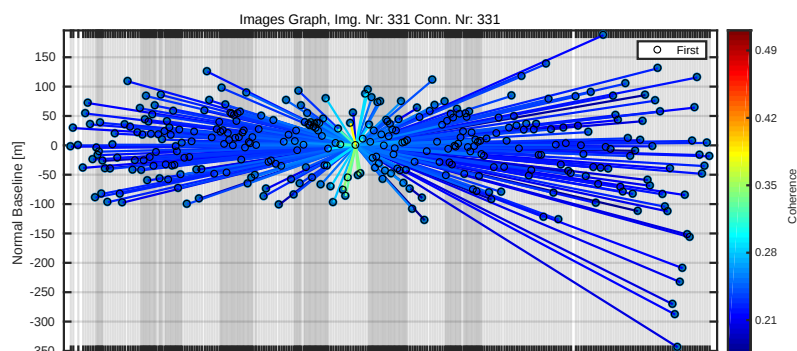
Vertikaalsed ehk *H*-suunas liikumised arvutati vastassuunalistelt ASC ja DESC orbiitidelt (vastavalt LOS1 ja LOS2). Üks *H*-lahendus koostati ASC-160 ja DESC-80, teine ASC-160 ja DESC-51 paarist. Arvutuste käigus võrgustati (2D-splainipindade abiga) LOS väärtu-sed regulaarse sammuga võrguks ehk rasterpinnaks, kus piksli suuruseks võeti 20 m * 20



(a) Orbiit ASC-160



(b) Orbiit DESC-51

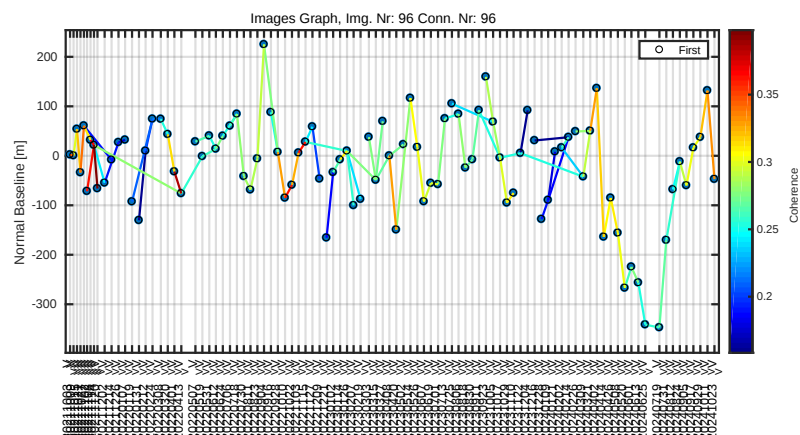


(c) Orbiit DESC-80

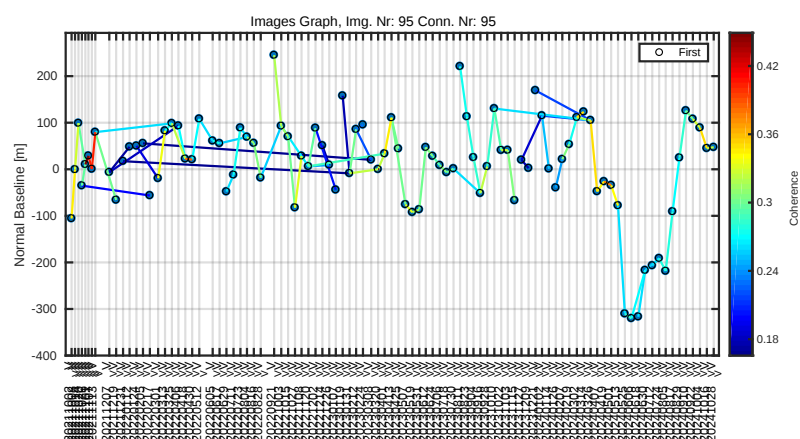
Joonis 2: PSI analüüsiks moodustatud tähe-graafid ehk interferogrammide paarid peapildi suhtes ajaperioodil 2016-2024. Ajatelg kulgeb horisontaalselt ja iga punkt tähistab SAR pilti (iga 12 või 6 päeva tagant). Vertikaaltelg tähistab baasjoont, mis ligikaudselt kirjeldab satelliidi asukohta orbiiditorus (keskmise aukoha suhtes) pildistamise hetkel. Pilte ühendava joone värvigamma kirjeldab pildipaari keskmistatud ajalist koherentsust.

m (GRS-80 ellipsoidil vastavalt Long/Lat $\approx 0.0004/0.0002$ kraadi). Arvutatud LOS kiiruspinnad (rastrid) maskiti (ehk pikslite väärtused määrati NaN-iks) lähimatest PS punktidest kuni 40 m ehk 2 piksli kaugusele.

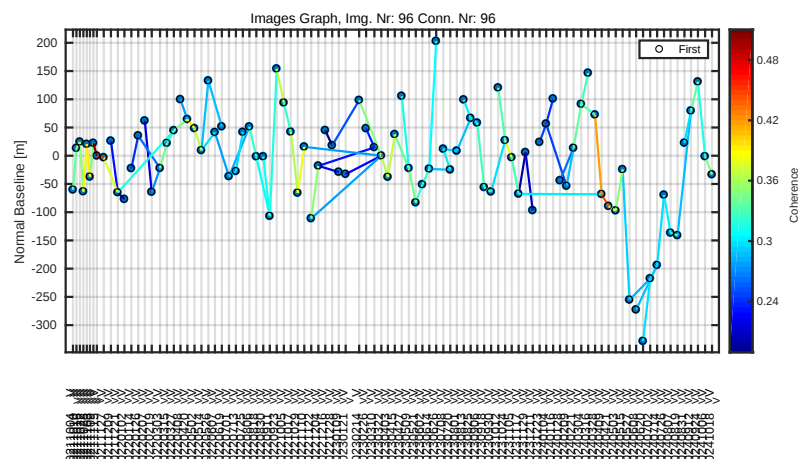
LOS ja H liikumispindade lahenduste referentsid ehk RPD on InSAR analüüside referentspunktid, tähistusega “Ref. InSAR”. Mõne lahenduse puhul on RPDiks valitud MUS2 GNSS püsijaam (tähistatud kui “Ref. MUS2”), mille geodeetiliste koordinaatidena kasutatakse samu väärtusi mis varasemates aruannetes: $lat = 59.42115^\circ$, $long = 24.69803^\circ$ (GPA, 2022). Erinevate referentside valikukriteeriumid ja põhjalikumad kirjeldused leiab aruandest Oja (2023b).



(a) Orbiit ASC-160



(b) Orbiit DESC-51



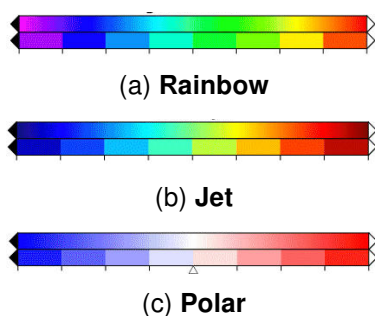
(c) Orbiit DESC-80

Joonis 3: Täiendatud PSI analüüsi jaoks koos ruumilise koherentsuse ja MTA filtriga moodustati pildipaaridest MST-graafid ajaperioodile 2021-2024. Detailsem kirjeldus vt joon. 2.

2 Tulemused

InSAR analüüside tulemusena moodustati *.csv tulemfailid, mis laeti Sille.Space rakendusesse. Tulemfailide kirjeldused ja Sille.Space lingid on esitatud lisas L.1. Sille.Space rakendus üles laetud LOS liikumiste kvaliteeti PS punktides kontrolliti Sille.Space kaardirakenduses, millele järgnes vertikaalliikumiste arvutus Sille.Space HV-mooduliga. Vertikaalkomponendi rasterpindade kuvamiseks rakendati Sille.Space Pro rakendust.

Edasiste kaardipiltide värvipaleti valikul jälgiti loogikat, kus sarnaseid palette “rainbow” ja “jet” kasutati LOS kiiruspindade esituses, samuti varasemate analoogsete uuringute tulemustega võrdlemisel (joon. 4). Vertikaalkiiruste esitamisel rakendati paletti “polar”, mis peaks paremini esile tooma suuremad liikumised. Tegemist on levinud paletitüüpidega, mis peaks sama nime all valikus olema ka muudes GIS tarkvarades. Detailsemat infot värvipalettide kohta võib leida GMT manuaalist.



Joonis 4: Kaardipiltidel kasutamist leidnud GMT värvipaletid.

2.1 LOS liikumised PS punktides

Kogu Tallinna linna arvutusse kaasati orbiitidelt ASC-160, DESC-80 ja DESC-51 arvutatud LOS andmed kolmele ajaperioodile:

1. 2016.06–2024.11 (8.4 a),
2. 2021.10–2024.10 (3 a),
3. 2023.10–2024.10 (1 a).

Siin ja edaspidi kasutatakse ajaformaati aaaa.kk, kus aaaa tähistavad aasta ja kk kuu numbreid.

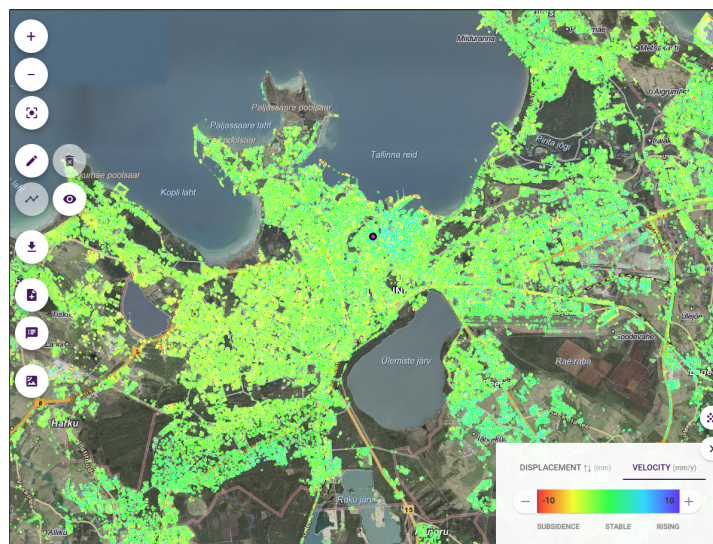
Keskmisele 3-aastasele ajaperioodile arvutatud tulemused on esitatud joonistel (joon. 5). Kõigi ajaperioodide LOS lahendused on jälgitavad Sille.Space kaardirakenduses.

LOS kiirused jäävad nii tõusva kui langeva orbiidi puhul pikemates analüüsides enamasti ± 5 mm/a, aastastes analüüsides ± 10 mm/a vahemikku.

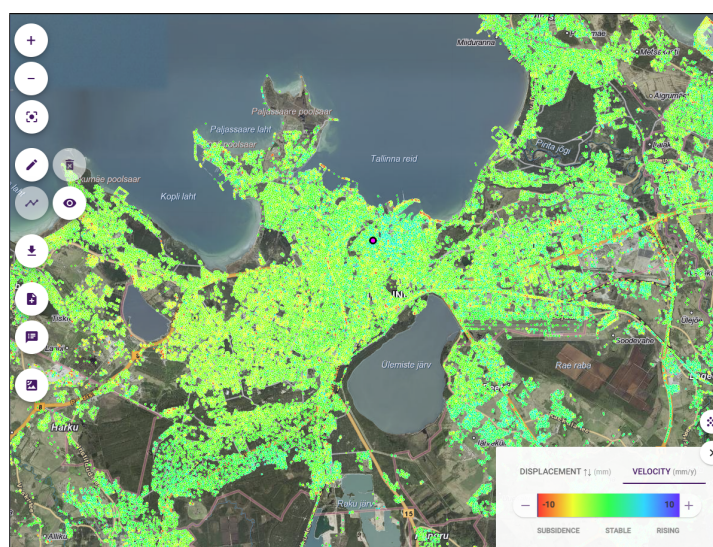
Kuna DESC-80 orbiidi pildid ei kata kogu Tallinna haldusala (katmata jääb Kakumäe lahe rannikuala), siis kaasatakse alternatiivina kogu haldusala kattev DESC-51 orbiit. DESC-80 andmetel põhinevad tulemused kaasatakse käesoleva töö analüüsi, et võimaldada võrdlusi varasemate tulemustega.

2.2 Vertikaalliikumiste rasterpinnad

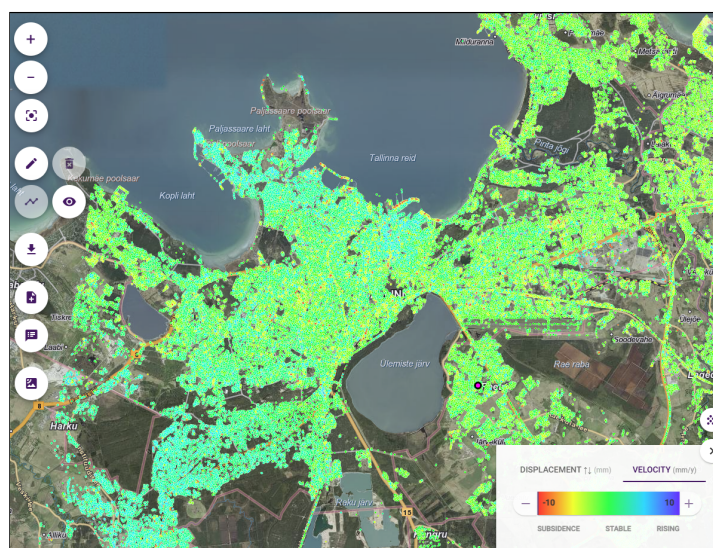
InSAR analüüsi tulemusena arvutatud LOS pindadest tuletati vertikaalliikumiste H rasterpindade kaardipildid, mis ajaperioodile 2021.10–2024.10 on esitatud joonisel 6. Kõigi ajaperioodide H -pindade lahendused on detailselt jälgitavad Sille.Space Pro rakenduses.



(a) Orbiit ASC-160

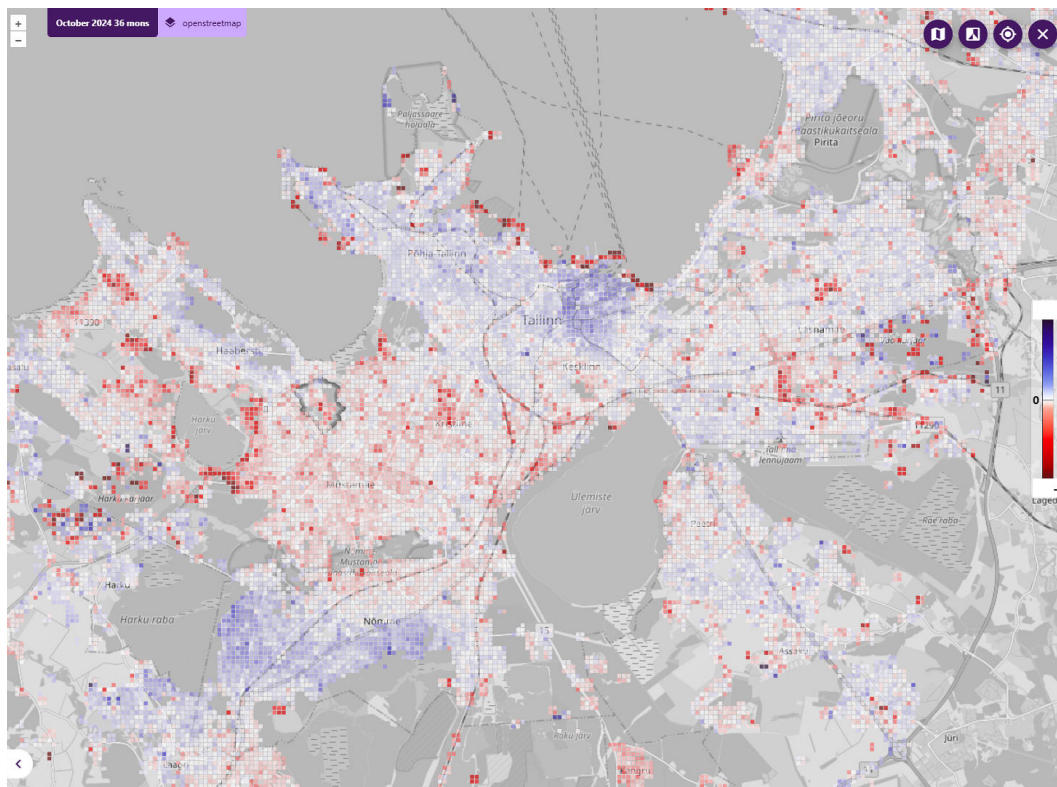


(b) Orbiit DESC-51

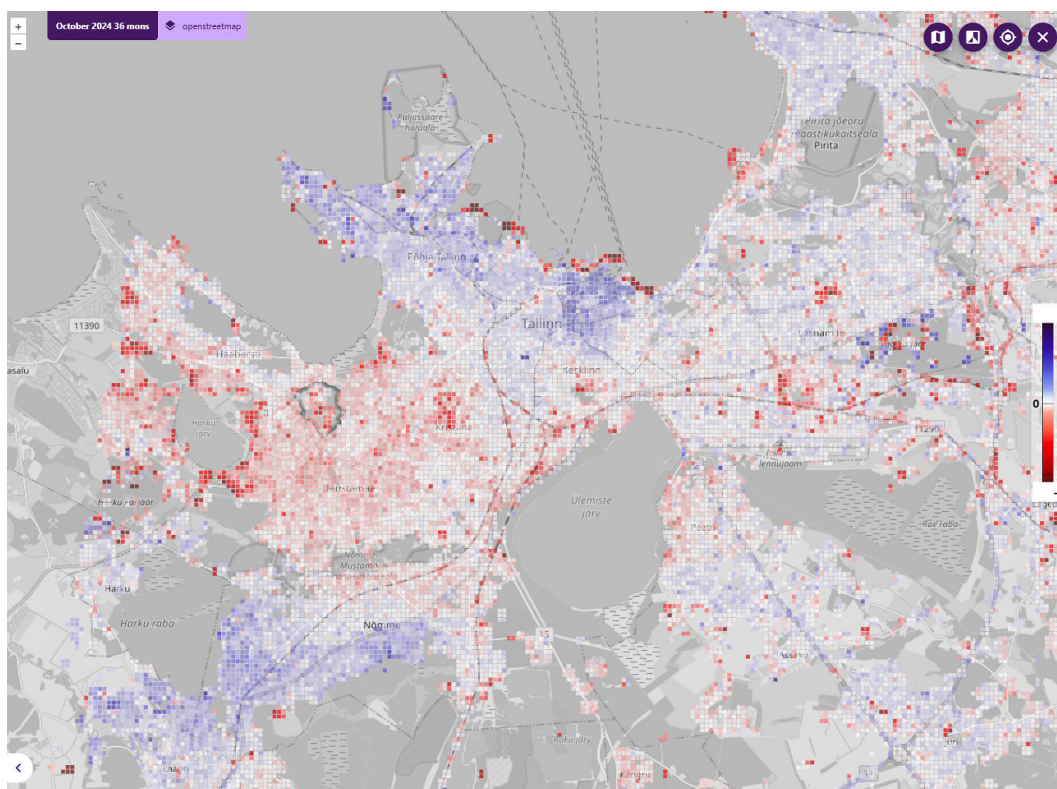


(c) Orbiit DESC-80

Joonis 5: Eri orbiitidelt määratud LOS liikumiskiirused PS punktides ajaperioodil 2021.10–2024.10 Sille.Space kaardirakenduses (InSAR ref.).



(a) H -pind orbiitidelt ASC-160 ja DESC-51 (HV-205)



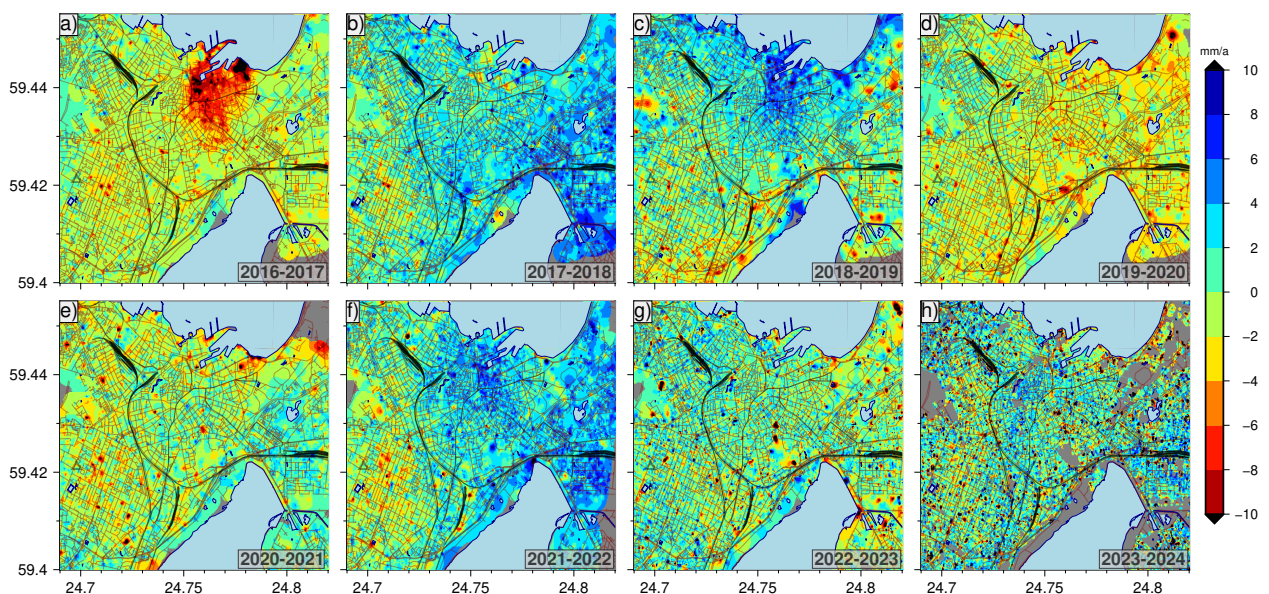
(b) H -pind orbiitidelt ASC-160 ja DESC-80 (HV-200)

Joonis 6: Eri orbiitidelt määratud vertikaalliikumiste H võrgustatud rasterpinnad erinevatel ajaperioodil 2021.10–2024.10 Sille.Space Pro rakenduses (InSAR ref.). Piksli suurus 100 m.

2.3 Aastaste vertikaalpindade võrdlus kesklinnas

Varasemalt (enne 2023. a) koostati InSAR analüüsid ainult kesklinna ja seda ümbritsevatele aladele (Oja, 2023a). Seetõttu võrreldi vertikaalliikumiste lahendusi ainult sellel alal. Nagu varasemalt, moodustati aastastest lahendustest aegrida (joon 7).

Aastaste lahenduste võrdlus näitab, et südalinnas varasemalt esinenud vajumisala (oranžipunase värviga) ja kerkimisalasid (sinisega) viimasel kahel ajaperioodil pole märgata ning liikumised on enamvähem stabiliseerunud nulli ümber (rohekad-kollakad toonid). Siin-seal võib märgata suuri lokaalseid deformatsioone, kus liikumised ületavad ± 10 mm piirväärtust (tumepunasest või tumesinisest musta värvuseni). Need võivad viidata nii realselt aset leidvatele lühiajalistele protsessidele kui ka mõõtmisvigadele suurema mürataseme tõttu aastastes lahendustes. Viimase lahenduse puhul raskendab ülevaate saamist pisut lühem maskimisraadius (40 m), mistõttu liikumiste värvipilt on katkestatud andmetest tühjade aladega (tähistatud halliga).



Joonis 7: Vertikaalkiiruste aastaste lahenduste võrdlus Tallinna kesklinna piirkonnas (MUS2 GNSS ref.).

2.4 Vertikaallahenduste detailvaated

Suurematest liikumistest detailsema ülevaate saamiseks esitatakse 3-aastase ajaperioodi kohta vertikaalkiiruste kaardipildid järgmistele piirkondadele:

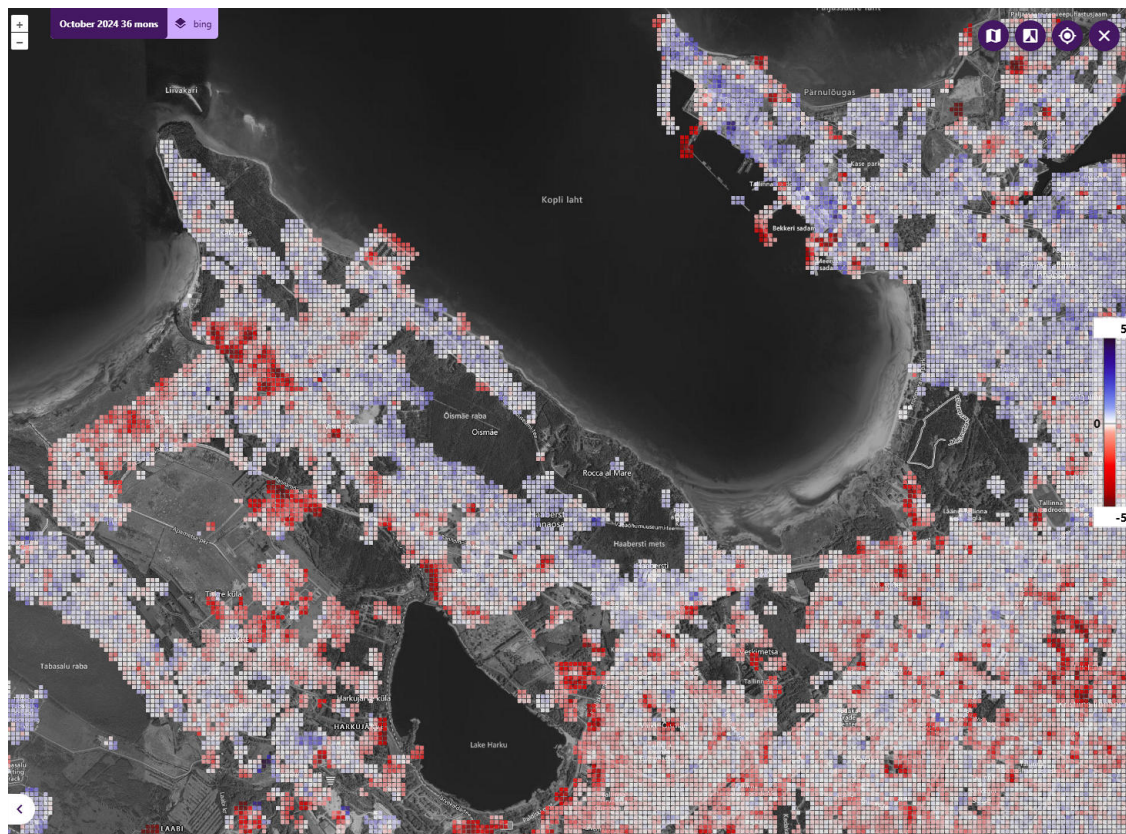
- Tabasalu–Haabersti–Põhja-Tallinn–Kristiine (joon. 8);
- Mustamäe–Nõmme (joon. 9);
- Kesklinn–Lasnamäe–Pirita–Merivälja (joon. 10).

3-aastane analüüsi periood (2021-2024) peaks olema optimaalne ajavahemik suuremate ja uuemate liikumiste ja deformatsioonide monitooringuks. Pika-ajalise (2016-2024) lahendi puhul võivad uuemad suured liikumised jääda varasemate stabiilsete perioodide või ka vastupidise märgiga liikumiste tõttu märkamata, kuna meetodika tõttu (andmete lähendamise lineaarse regressiooniga) toimub nõ silumine ja uuemad liikumistrendid ei pääse mõjule. Nagu eespool juba mainitud, aastaste lahenduste puhul peab jälle arvestama kordades suurema mürafooniga. Näiteks aastaste lahenduste kiiruste keskmine standardhälve on $\pm 2 \dots 2.5$ mm/a. Mitmeaastaste lahenduste puhul jääb sama näitaja vahemikku $\pm 0.4 \dots 0.8$ mm/a ehk 3-4 korda väiksemaks võrreldes aastaste lahendustega.

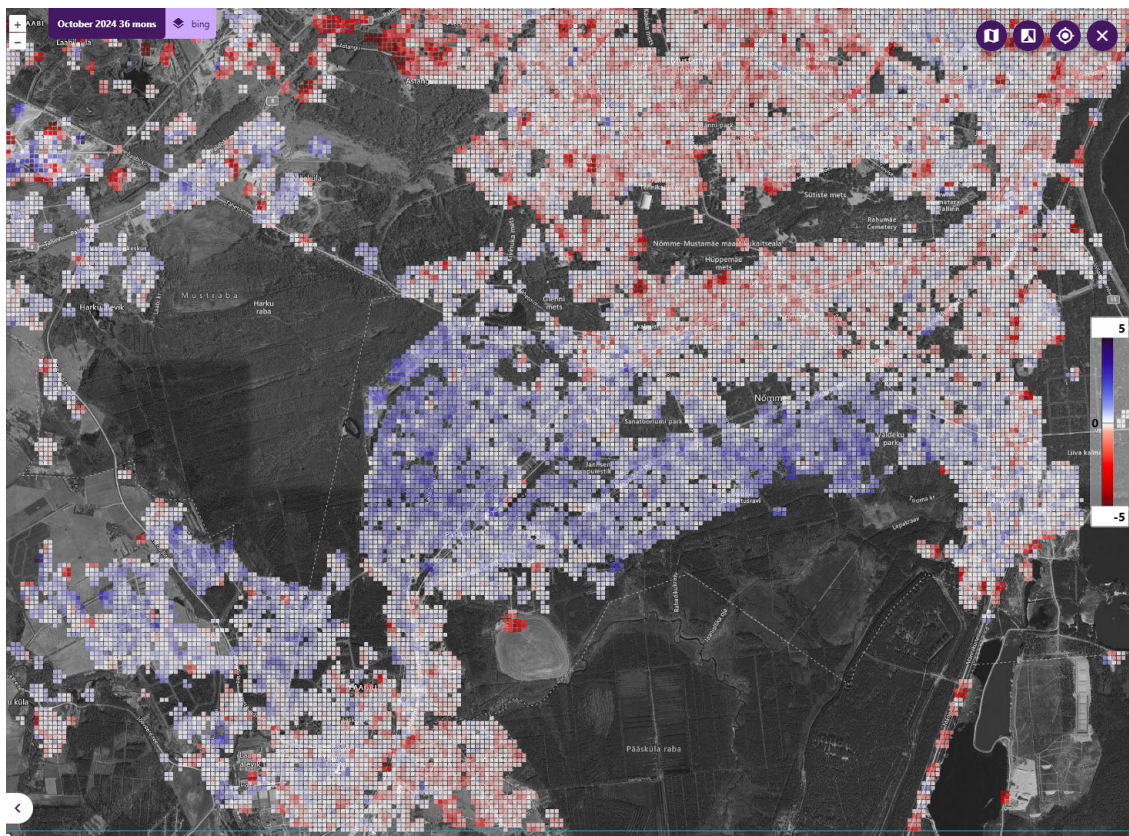
Suuremate liikumistega jäävad silma Tallinna kesklinn (kerkimine 1-2 mm/a), Kristiine (vajumine 1-2 mm/a), Harku järve ümbrus (vajumine 2-3 mm/a). Märgatavate vajumistega (2-6 mm/a) paistavad silma veel sadamarajatised, sh kaid. Detailsemad vaated Sille.Space Pro rakenduses võimaldavad märgata suuremaid liikumisi ka suuremastaabiliste ehitusrajatiste ümbruses, nagu näiteks Arteri kvartali ehitus Liivalaia ja Juhkentali tänavate ristmikul.

Valik suuremate liikumiste, enamasti vajumistega piirkondasid:

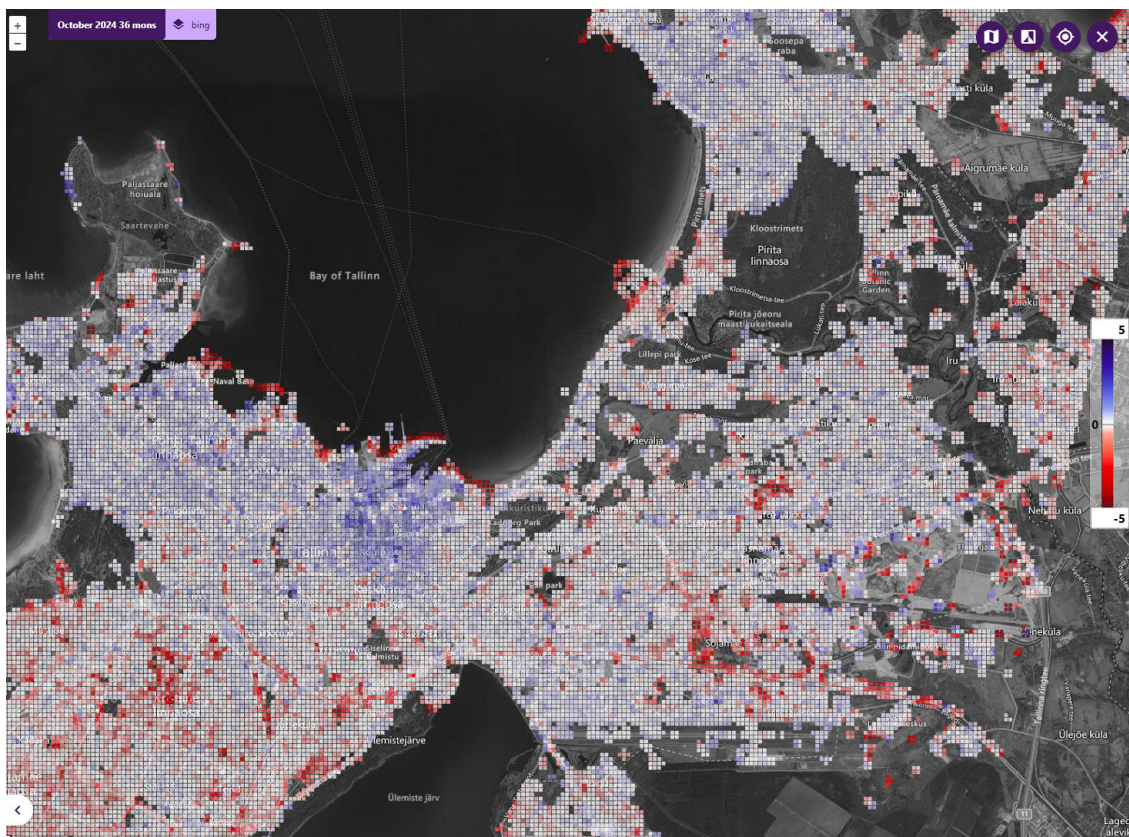
- Tiskre-Kakumäe:
 - Säina, Siia, Ojakäärü tn
 - Rannaniidu, Tiskrevälja tn
- Harku järve ümbrus:
 - Vihu, Hargi, Sagari tn
- Kristiine:
 - Tedre, Mõtuse tn
 - Raudtee trassid paralleelselt Tehnika, Kotka tn
- Lasnamäe:
 - Smuuli tee – Sõjamäe raba
 - Tähesaju tee – Tondiraba
- Kesklinn:
 - Tehnika – Veerenni ristmiku ümbrus
 - Reisisadam – Reidi tee (Pirita poolne lõik)



Joonis 8: Vertikaalkiirused 2021-2024. a Sille.Space Pro rakenduses: Tabasalu–Haabersti–Põhja-Tallinn–Kristiine (InSAR ref.). Lahend HV-205, piksli suurus 40 m.



Joonis 9: Vertikaalkiirused 2021-2024. a Sille.Space Pro rakenduses: Mustamäe–Nõmme (InSAR ref.). Lahend HV-205, piksli suurus 40 m.



Joonis 10: Vertikaalkiirused 2021-2024. a Sille.Space Pro rakenduses: Kesklinn–Lasnamäe–Pirita–Merivälja (InSAR ref.). Lahend HV-205, piksli suurus 60 m.

3 Kokkuvõte

Uurimistöö tulemusena arvutati täiendatud PSI meetodil LOS suunalised liikumiste aegread ja kiirused PS mõõtmispunktides, samuti vertikaalsuunalise liikumise (H) võrgustatud pinnad Tallinna linna haldusalas (u 413 km²). Lähteandmeteks olid Sentinel-1 radar-pildid ajavahemikust juuli 2016 – nov. 2024 ja InSAR analüüsi perioodideks juuli 2016 – nov. 2024, okt. 2021 – okt. 2024 ja okt. 2023 – okt. 2024.

PS punktide LOS väärtustest arvutati ruumilise interpoleerimise meetodil LOS võrgustatud kiiruspinnad, ruumilise lahutusega 20 m. LOS pindadest tuletati omakorda vertikaalsed kiiruspinnad (InSAR referentsi suhtes). Vertikaalsed kiiruspinnad näitavad, et liikumiskiirused jäävad mitmeaastaste lahenduste puhul enamasti vahemikku ± 5 mm/a. Aastase lahenduse vertikaalkiirused jäävad vahemikku ± 10 mm/a, kuid on paljudes piirkondades ka üle selle. Samas peab aastase lahenduse puhul silmas pidama suurt mõõtemüra ehk määramatust, mille keskmine väärtus on $\pm 2 \dots 2.5$ mm/a. Mitmeaastaste lahenduste puhul jääb keskmine määramatus vahemikku $\pm 0.4 \dots 0.8$ mm/a ehk kordades väiksemaks.

Analüüsi tulemusena arvutatud vertikaalliikumised võimaldavad monitoorida suurema vajumise ja kerkimisega piirkondasid Tallinna linnas. Suuremaid liikumisi võib märgata Kakumäe lahe rannikualal, Harku järve ümbruses, Kristiines ja mujalgi. Tallinna südalinnas võib viimastel aastatel märgata liikumiste stabiliseerumist.

Detailsemad vaated näitavad suuremaid liikumisi aktiivsetel suure mastaabiga ehitustööde piirkonnas, iseloomustades InSAR analüüsides suurt potentsiaali monitoorida suuremastaabiliste arenduste ehitustegevuse mõju ümbruskonnale.

Uuringu tulemused esitatakse tabelfaili (*.shp) ja rasterfaili (geotiff *.tiff) formaatides. Failide detailsemad kirjeldused leiab lisas L.1. Lisast leiab ka Sille.Space kaardirakenduse ja Sille.Space Pro rakenduse lingid kõikidele analüüsi tulemustele.

Pika analüüsi perioodi (2016-2024) tulemustest võib järeldada, et uut infot need pakkuda enam ei suuda. Põhjuseks on asjaolu, et uuem liikumisinfo jääb tihti varasemate liikumiste pika ajaloo tõttu märkamata. Eriti mõjutab see vertikaalliikumiste rasterpindasid. Samuti väheneb punktide hulk ajalise koherentsuse kao tõttu, mida põhjustavad eri suunalised liikumised lühematel perioodidel (st need ei allu enam ühtlasele trendiliikumisele), ehitustegevus (pinnase-, ehitus-, lammutustööd) jne. **Seetõttu on edaspidi soovitatav pika analüüsi ajaperioodi lühendada 5-6 aasta peale.** Samuti kinnitavad uurimistöö tulemused DESC-51 orbiidi andmete sobivust InSAR analüüsiks Tallinna linna haldusalas. Kuna DESC-51 tulemused ühtivad DESC-80 orbiidi tulemustega, arvestades kiiruste standardmääramatuste hinnangutega, kaob vajadus DESC-80 andmeid edaspidi InSAR analüüsidesse kaasata.

Viited

- Bischoff, C. A., Ghail, R. C., Mason, P. J., Ferretti, A., ja Davis, J. A. (2020). Revealing millimetre-scale ground movements in London using SqueeSAR™. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 53(1):3–11.
- Ferretti, A., Prati, C., ja Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1):8–20.
- GPA (2022). Geodeetiliste punktide andmekogu, <https://gpa.maaamet.ee>. Maa-amet. Külastatud: 2022-05-11.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands.
- Ho Tong Minh, D., Hanssen, R., ja Rocca, F. (2020). Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, 12(9):1364.
- Hu, J., Ding, X., Li, Z., Zhang, L., Zhu, J., Sun, Q., ja Gao, G. (2016). Vertical and horizontal displacements of Los Angeles from InSAR and GPS time series analysis: Resolving tectonic and anthropogenic motions. *Journal of Geodynamics*, 99:27–38.
- Kiik, A. ja Gruno, A. (2019). Mõõdame millimeetri täpsusega kosmosest – päriselt! *Horisont*, 1/2019.
- Oja, T. (2023a). InSAR kiiruste arvutus Tallinna kesklinna reeperitele 2016-2022. ja 2021-2022. a. Tehniline uuring (Ver. 2023-02-23), AS Datel. 17 lk.
- Oja, T. (2023b). Tallinna linna InSAR analüüsid ajavahemikus 2016-2023. Tehniline uuring (Ver. 2023-12-30), AS Datel. 21 lk.
- Oja, T. ja Gruno, A. (2021). InSAR kosmoseseire vertikaalliikumiste võrdlusanalüüs Tallinna kõrgusvõrgul aastatel 2016-2021. Uurimistöö, AS Datel. 27 lk.
- Oja, T. ja Gruno, A. (2023). Monitoring of millimeter-scale deformations in Tallinn using repeated leveling and PS-InSAR analysis of Sentinel-1 data. *Advances in Geodesy and Geoinformation*, 72(1):1–18.

Lisad

L.1 Kaasnevate failide nimekiri

1. LOS failid `xlsx` tabelfaili formaadis. Faili nimes on määratud orbiidi nr, vaatesuund ja ajaperiood.

(a) Tabelfailide nimekiri:

- i. ASC-160_LOS_2016-2024.xlsx
- ii. ASC-160_LOS_2021-2024.xlsx
- iii. ASC-160_LOS_2023-2024.xlsx
- iv. DESC-80_LOS_2016-2024.xlsx
- v. DESC-80_LOS_2021-2024.xlsx
- vi. DESC-80_LOS_2023-2024.xlsx
- vii. DESC-51_LOS_2016-2024.xlsx
- viii. DESC-51_LOS_2021-2024.xlsx
- ix. DESC-51_LOS_2023-2024.xlsx

(b) Tabelfailide veerud:

- i. LON – punkti geograafiline pikkuskraad WGS-84 [°]
- ii. LAT – punkti geograafiline laiuskraad WGS-84 [°]
- iii. VEL – kiirus lineaarsest mudelist [mm/a]
- iv. S_VEL – kiiruse standardhälve [mm/a]
- v. DISPL – kogudeformatsioon analüüsi ajavahemikus [mm]
- vi. TCOH – ajaline koherentsus (vahemikus 0...1)
- vii. STD – lineaarse kiirusmudeli jääkhälvete standardhälve [mm]
- viii. ID – punkti ID number

2. LOS failid `shp` formaadis (pakituna `zip` formaati) sisaldavad sama infot mis tabelfailid:

- (a) ASC-160_LOS_2016-2024.shp.zip
- (b) ASC-160_LOS_2021-2024.shp.zip
- (c) ASC-160_LOS_2023-2024.shp.zip
- (d) DESC-80_LOS_2016-2024.shp.zip
- (e) DESC-80_LOS_2021-2024.shp.zip
- (f) DESC-80_LOS_2023-2024.shp.zip
- (g) DESC-51_LOS_2016-2024.shp.zip
- (h) DESC-51_LOS_2021-2024.shp.zip
- (i) DESC-51_LOS_2023-2024.shp.zip

3. Võrgustatud vertikaalsed (H) kiiruspinnad „geotiff“ rasterformaadis (ühik mm/a):

- (a) VEL-H_HV197_A160-D80_2016-2024.tiff
- (b) VEL-H_HV198_A160-D51_2016-2024.tiff
- (c) VEL-H_HV200_A160-D80_2021-2024.tiff
- (d) VEL-H_HV205_A160-D51_2021-2024.tiff
- (e) VEL-H_HV202_A160-D80_2023-2024.tiff
- (f) VEL-H_HV201_A160-D51_2023-2024.tiff

4. Sille.Space kaardirakendus analüüside lingid orbiitide ja ajaperioodide põhiselt (vajalik eelnev sisselogimine):
 - (a) ASC #160 (2016-2024): sille.space/app/#/map/1253/4270
 - (b) ASC #160 (2021-2024): sille.space/app/#/map/1253/4249
 - (c) ASC #160 (2023-2024): sille.space/app/#/map/1253/4297
 - (d) DESC #80 (2016-2024): sille.space/app/#/map/1253/4276
 - (e) DESC #80 (2021-2024): sille.space/app/#/map/1253/4248
 - (f) DESC #80 (2023-2024): sille.space/app/#/map/1253/4271
 - (g) DESC #51 (2016-2024): sille.space/app/#/map/1253/4275
 - (h) DESC #51 (2021-2024): sille.space/app/#/map/1253/4305
 - (i) DESC #51 (2023-2024): sille.space/app/#/map/1253/4301
5. Sille.Space Pro rakendus vertikaallahenduste lingid ajaperioodide, orbiitide põhiselt (vajalik eelnev sisselogimine):
 - (a) HV-197 (2016-2024, A160-D80)
 - (b) HV-198 (2016-2024, A160-D51)
 - (c) HV-200 (2021-2024, A160-D80)
 - (d) HV-205 (2021-2024, A160-D51)
 - (e) HV-202 (2023-2024, A160-D80)
 - (f) HV-201 (2023-2024, A160-D51)