



InSAR vertikaalliikumised Tallinnas ajavahemikus 2020-2025

(Ver. 2026-01-28)

Koostas: T. Oja

Tallinn 2026

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
2.2.1	Vertikaallahenduste detailvaated	11
2.2.2	Suuremate liikumistega piirkonnad	12
2.2.3	Aastaste vertikaalpindade võrdlus kesklinnas	20
3	Kokkuvõte	22
	Viited	23
	Lisad	24
L.1	Kaasnevate failide nimekiri	24
L.2	InSAR lahenduste lingid Sille.Space rakendustes	25

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 **2020-2025**.

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 mikrolainepilte, mille põhjal arvutatakse objektidelt tagasihajuva elektromagnetlaine muutunud faasist objektide liikumised maapinnal (Oja ja Gruno, 2023; 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.

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

Orbiidi rel.nr	Suund	Ajavahemik	Piltide arv	Tõusunurk θ (°)	Suunanurk φ (°)
DESC-153	Tõusev	2020.06.04-2025.11.23	214	33.5473	-168.1121
		2022.10.10-2025.11.23	112	-"-	-"-
		2024.10.11-2025.11.23	52	33.3072	-168.0524
DESC-153	Langev	2020.06.04-2025.11.29	213	38.8188	-10.6483
		2022.10.10-2025.11.29	113	38.8225	-10.6452
		2024.10.11-2025.11.29	55	38.8120	-10.6665

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).

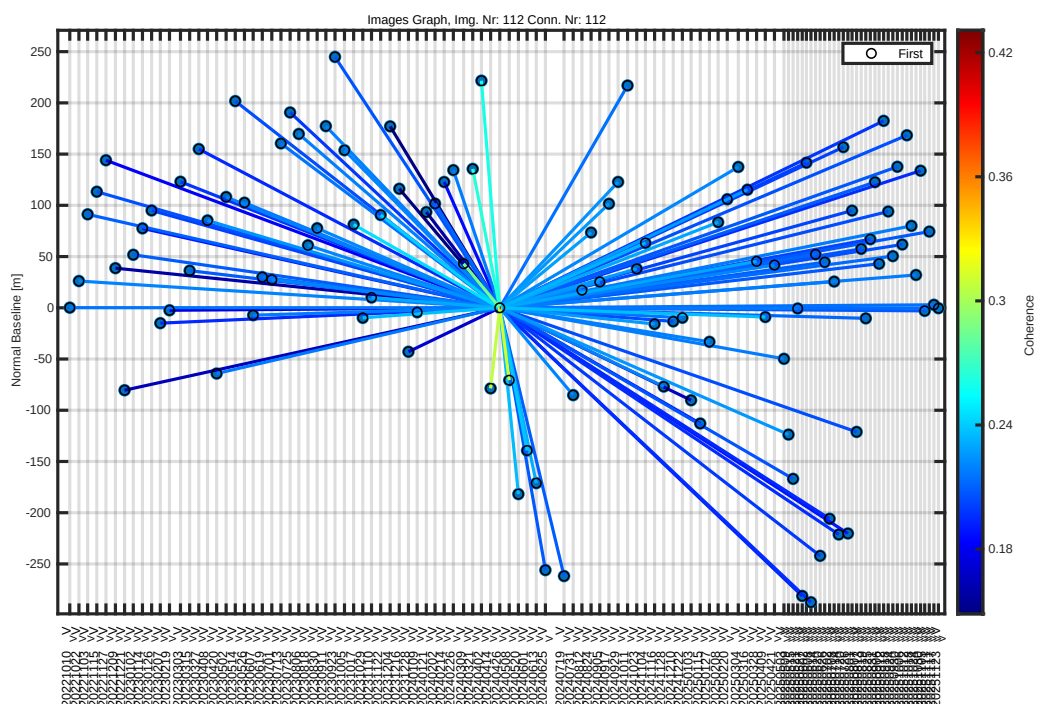
Analüüsi kaasati kõik PS punktid, kus amplituudi stabiilsusindeksi (ASI) ja ruumilise ko-herentsuse summa vastas tingimusele ≥ 1.1 . Ruumilist koherentsust hinnati pildipaari-dest moodustatud MST-graafide abiga (joon. 3), mis omakorda võimaldas rakendada MTA (Multi-Temporal Adaptive) filtreerimist ja 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.

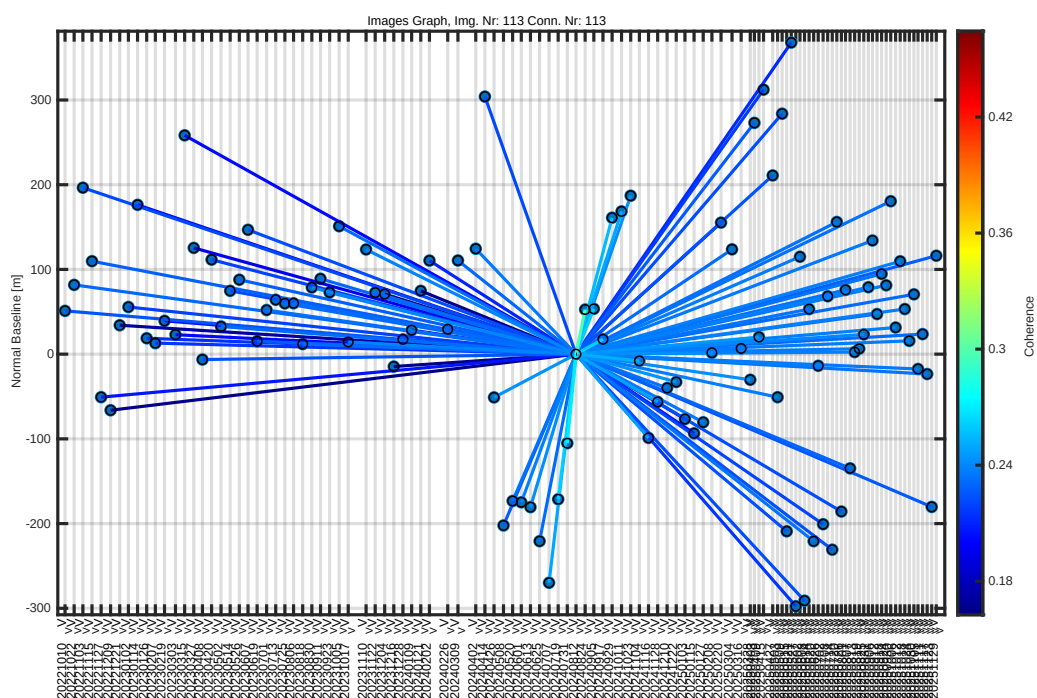
1.3 Vertikaalliikumiste arvutus

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, 2025).

Vertikaalsed ehk *H*-suunas liikumised arvutati vastassuunalistelt ASC ja DESC orbiitidelt (vastavalt LOS1 ja LOS2). Arvutuste käigus võrgustati (2D-splainipindade abiga) LOS väärtused regulaarse sammuga võrguks ehk rasterpinnaks, kus piksli suuruseks võeti 20 m * 20 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.



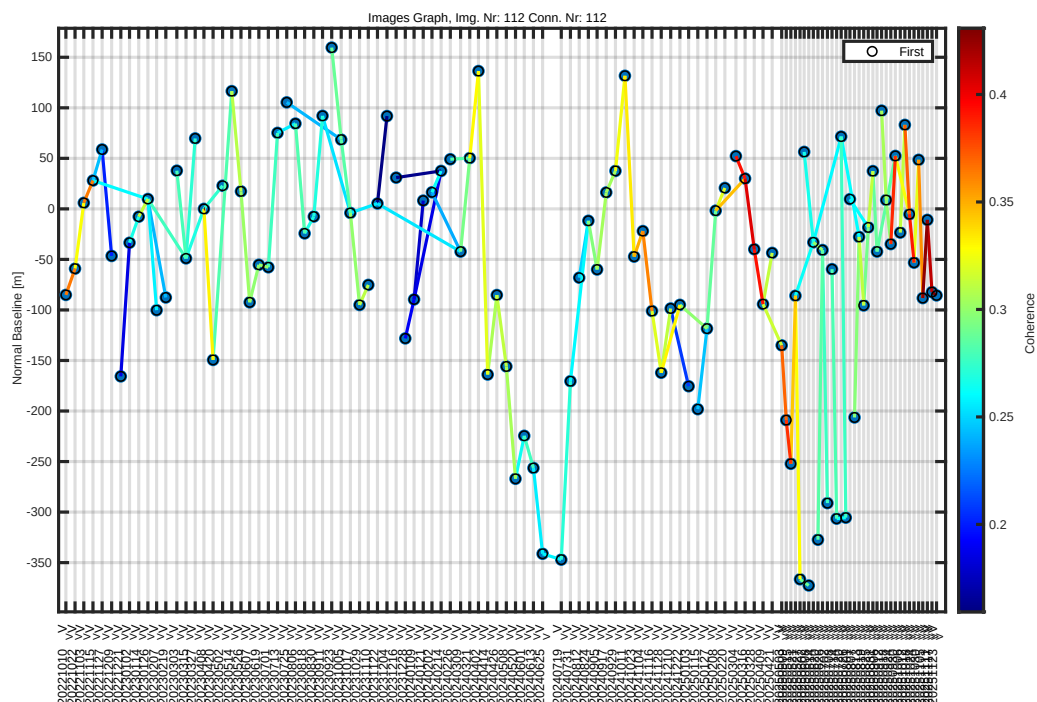
(a) Orbiit ASC-160



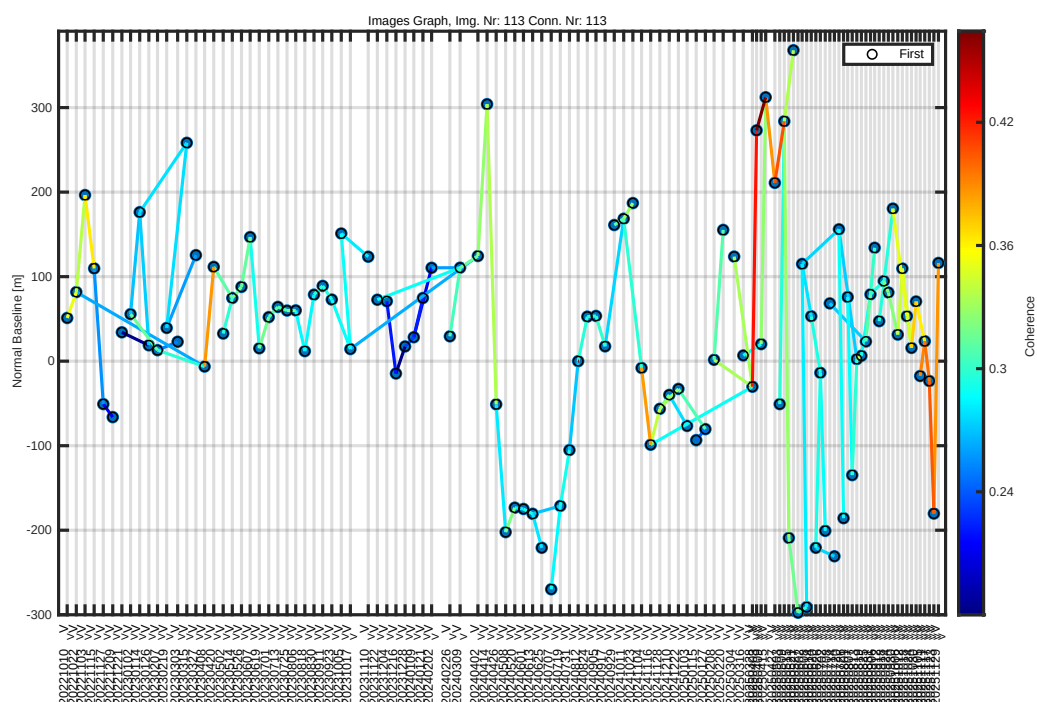
(b) Orbiit DESC-153

Joonis 2: PSI analüüsiks moodustatud tähe-graafid ehk interferogrammide paarid peapildi suhtes ajaperioodil 2022-2025. 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 asukoha suhtes) pildistamise hetkel. Pilte ühendava joone värvigamma kirjeldab pildipaari keskmistatud ajalist koherentsust.

LOS lahenduste referentsid ehk RPD on InSAR analüüside referentspunktid, tähistusega “Ref. InSAR”. H liikumispindade lahenduste 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).



(a) Orbiit ASC-160



(b) Orbiit DESC-153

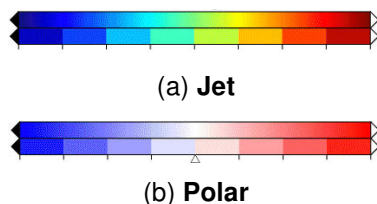
Joonis 3: Täiendatud PSI analüüsi jaoks koos ruumilise koherentsuse ja MTA filtriga moodustati pildipaaridest MST-graafid ajaperioodile 2022-2025. Telgede ja graafiku detailsema kirjelduse leiab joon. 2 kirjeldusest.

Erinevate referentside valikukriteeriumid ja põhjalikumad kirjeldused leiab aruandest Oja (2023b).

2 Tulemused

InSAR analüüside väljundfailide (*.csv formaadis) põhjal visualiseeriti LOS liikumiste kaardipildid Sille.Space rakenduses. Tulemfailide kirjeldused ja Sille.Space lingid on esitatud lisades L.1, L.2. Sille.Space rakendusse üles laetud LOS liikumiste kvaliteeti PS punktides kontrolliti visuaalselt Sille.Space kaardirakenduses. Jälgiti, et ei esineks märgatavaid pika-lainelisi signaali (ebatäpne atmosfääri parand) ega järske “trepiaastet” meetavaid üleminekuid (ebatäpne koregistreerimine). LOS kaartide kontrollile järgnes vertikaalliikumiste arvutus Sille.Space HV-mooduliga, lähtudes eespool nimetatud metoodikast (vt ptk 1.3). Vertikaalkomponendi rasterpinnad visualiseeriti läbi Sille.Space Pro rakenduse.

Järgnevate kaardipiltide koguliikumiste ja kiiruste värvid põhinevad värvipalettidele “jet” (LOS kaardid) ja “polar” (vertikaalliikumiste kaardid). Tegemist on levinud paletitüüpidega, mis peaks sama nime all valikus leiduma GIS tarkvarades. Detailsemat infot värvipalettide kohta võib leida näiteks GMT manuaalist. Erinevas formaadis erineva tarkvara jaoks palette leiab ka cpt-city kodulehelt.



Joonis 4: Kaardipiltidel rakendatud värvipaletid (GMT põhised).

2.1 LOS liikumised PS punktides

Kogu Tallinna linna arvutusse kaasati orbiitidelt ASC-160, DESC-153 arvutatud LOS andmed kolmele ajaperioodile:

1. 2020.06–2025.11 (5.5 a),
2. 2022.10–2025.11 (3 a),
3. 2024.10–2025.11 (1 a).

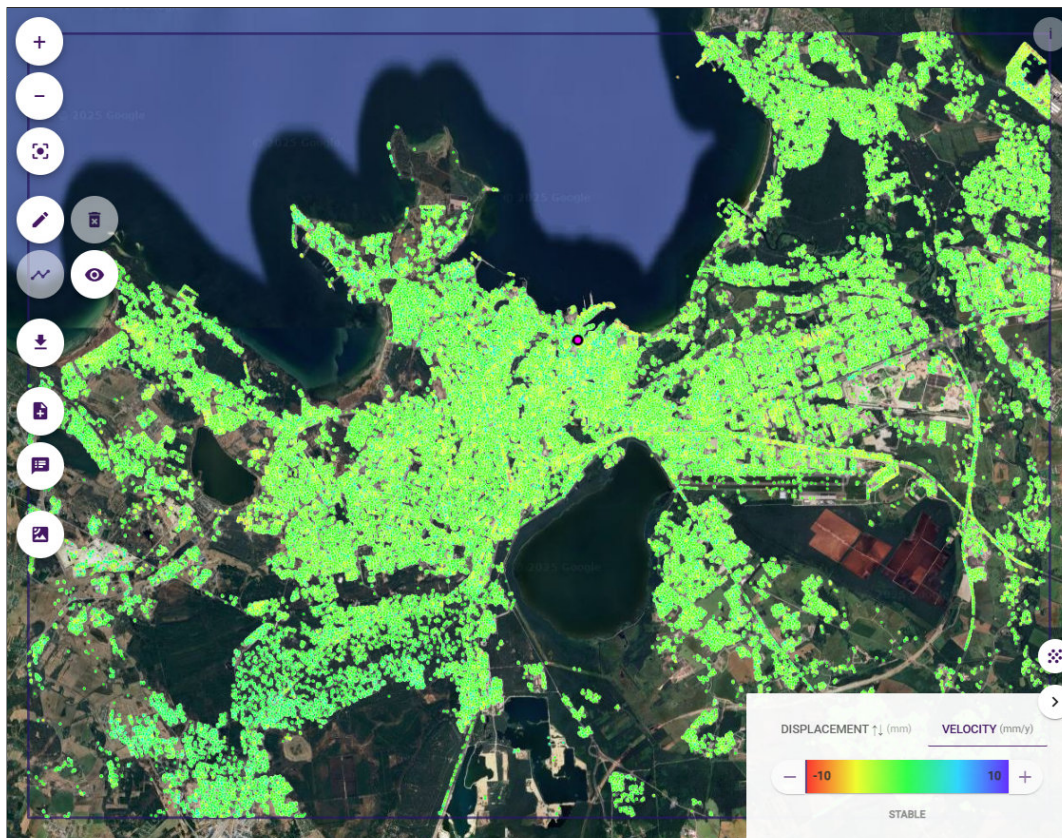
Siin ja edaspidi kasutatakse ajaformaati aaaa.kk, kus aaaa tähistavad aasta ja kk kuu numbreid.

Erinevatele ajaperioodile arvutatud tulemused on esitatud joonistel (joon. 5,6,7). Kõigi ajaperioodide LOS lahendused on jälgitavad Sille.Space kaardirakenduses.

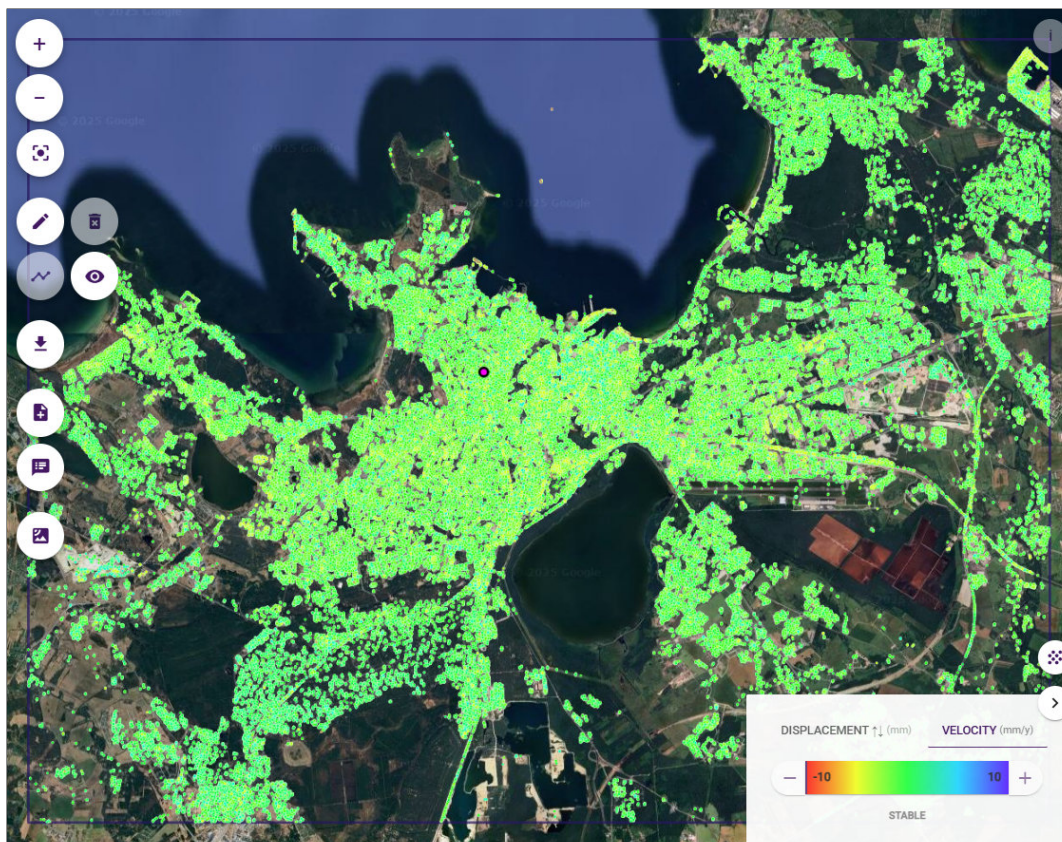
LOS kiirused jäävad nii tõusva kui langeva orbiidi puhul pikemates analüüsides enamasti ± 5 mm/a, aastastes analüüsides ± 10 mm/a vahemikku.

2.2 Vertikaalliikumiste rasterpinnad

InSAR analüüsi tulemusena arvutatud LOS pindadest tuletati vertikaalliikumiste H rasterpindade kaardipildid, mis erinevatel ajaperioodidel on esitatud joonistel 8. Kõigi ajaperioodide H -pindade lahendused on detailselt jälgitavad nii järgnevatel kaardipiltidel kui Sille.Space Pro rakenduses.

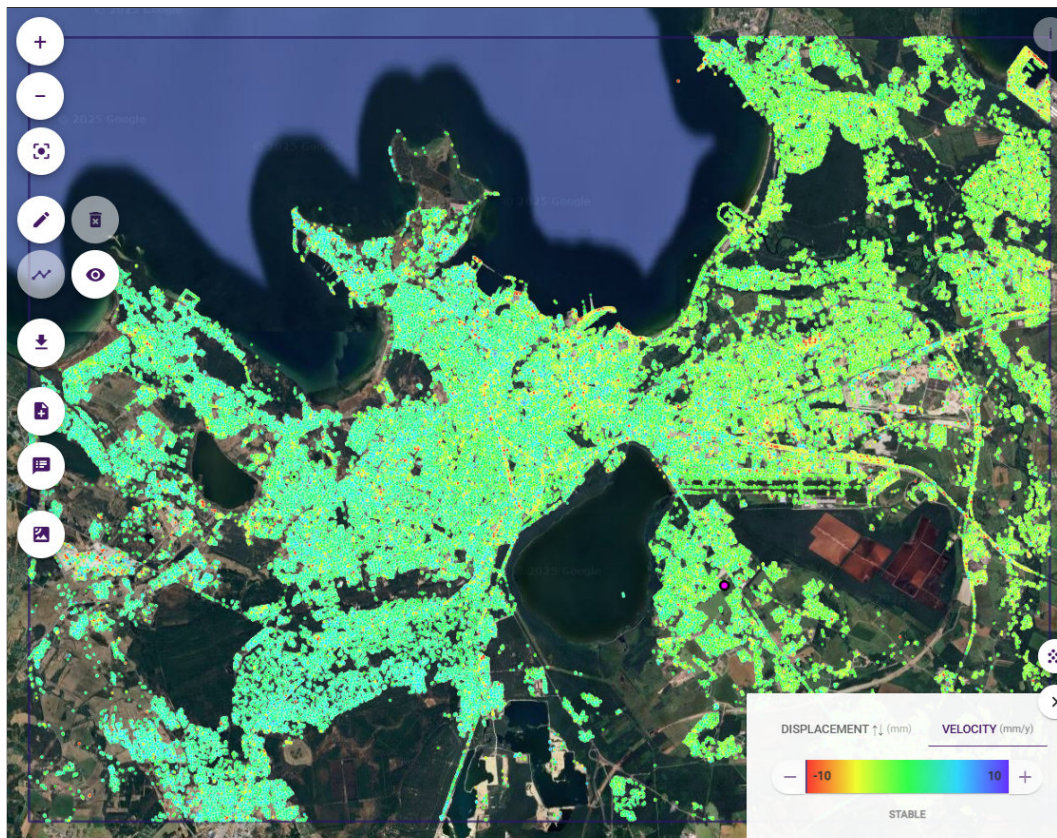


(a) Orbiit ASC-160

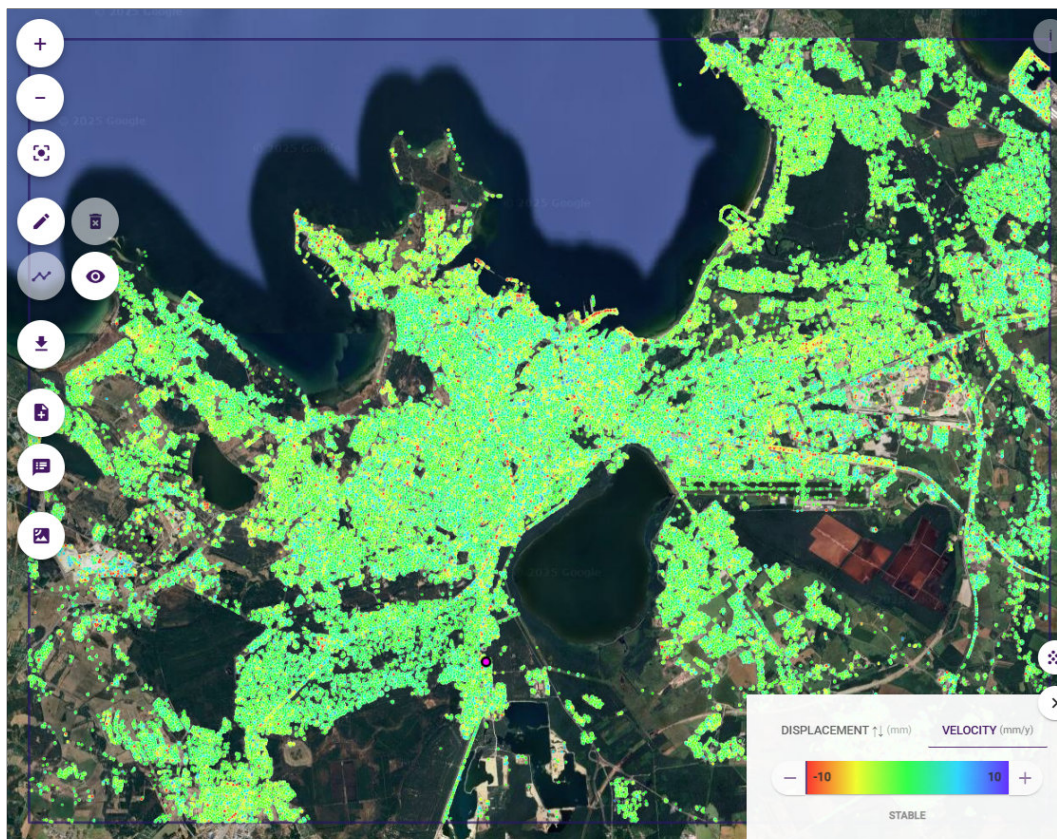


(b) Orbiit DESC-153

Joonis 5: LOS liikumiskiirused PS punktides ajaperioodil 2020.06–2025.11 (5.5 a) Sille.Space kaardi-rakenduses (Ref. InSAR).

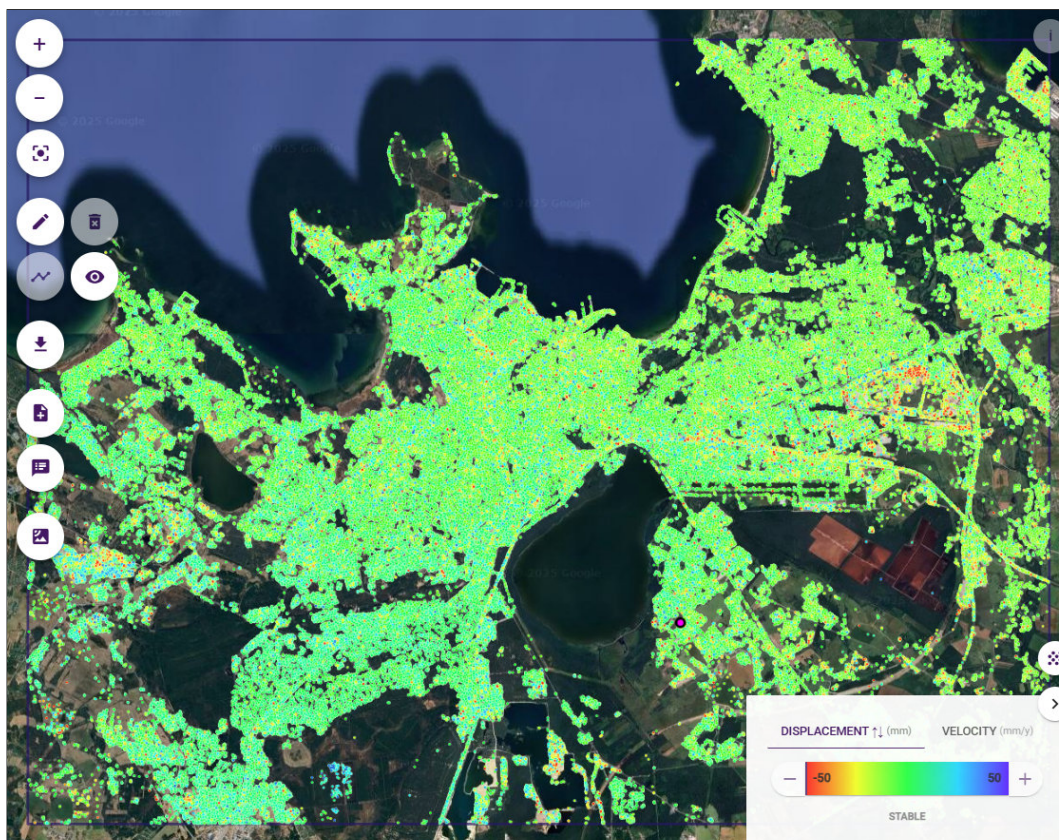


(a) Orbiit ASC-160

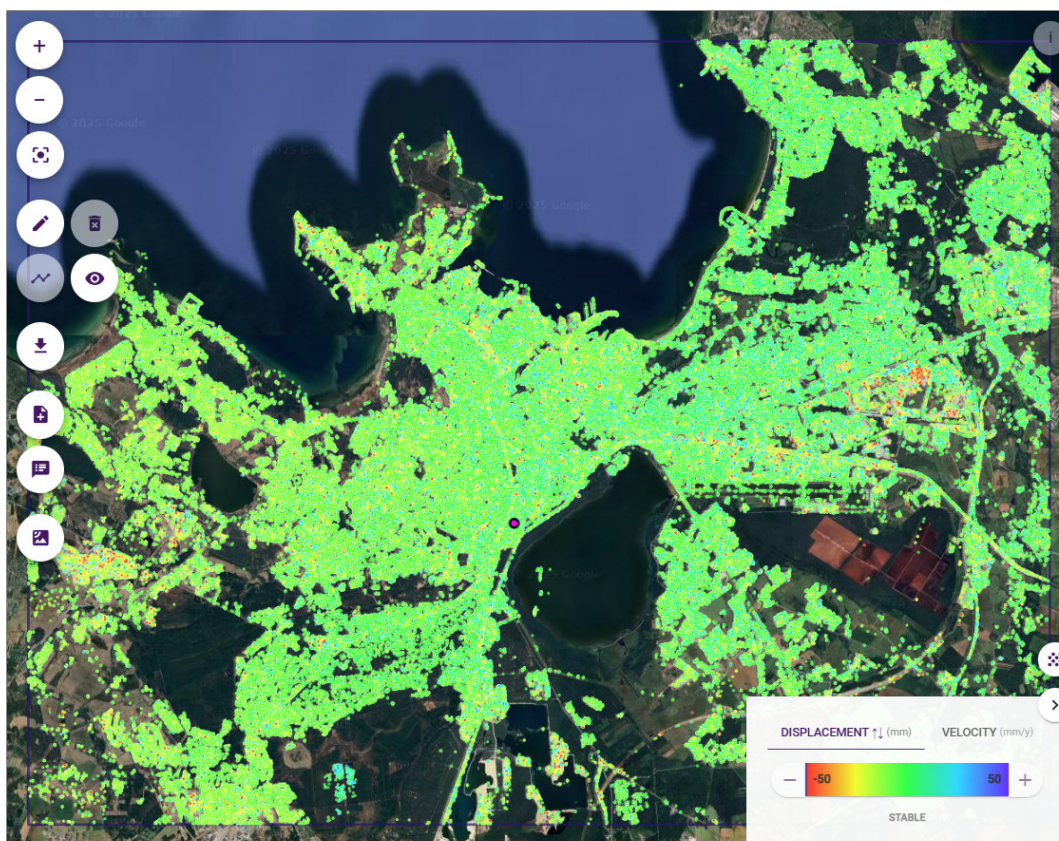


(b) Orbiit DESC-153

Joonis 6: LOS liikumiskiirused PS punktides ajaperioodil 2022.10–2025.11 (3 a) Sille.Space kaardira-kenduses (Ref. InSAR).

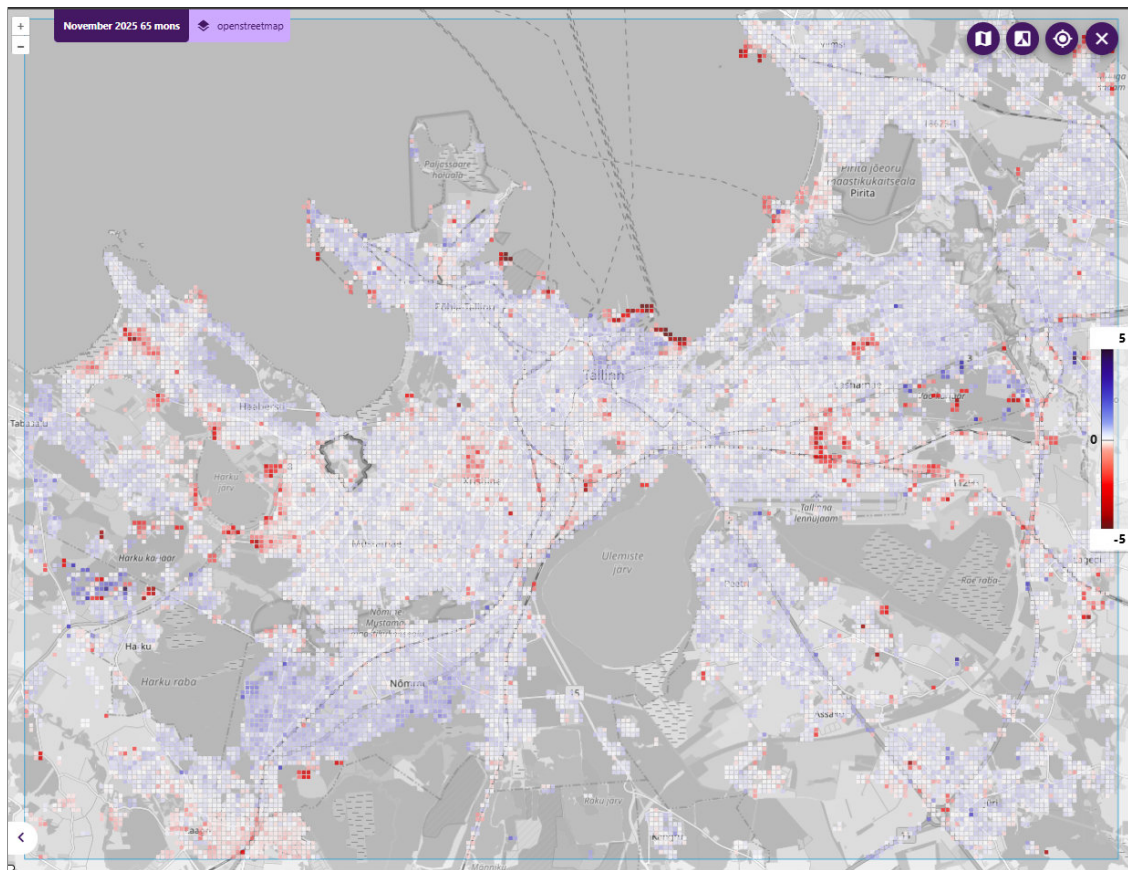


(a) Orbiit ASC-160

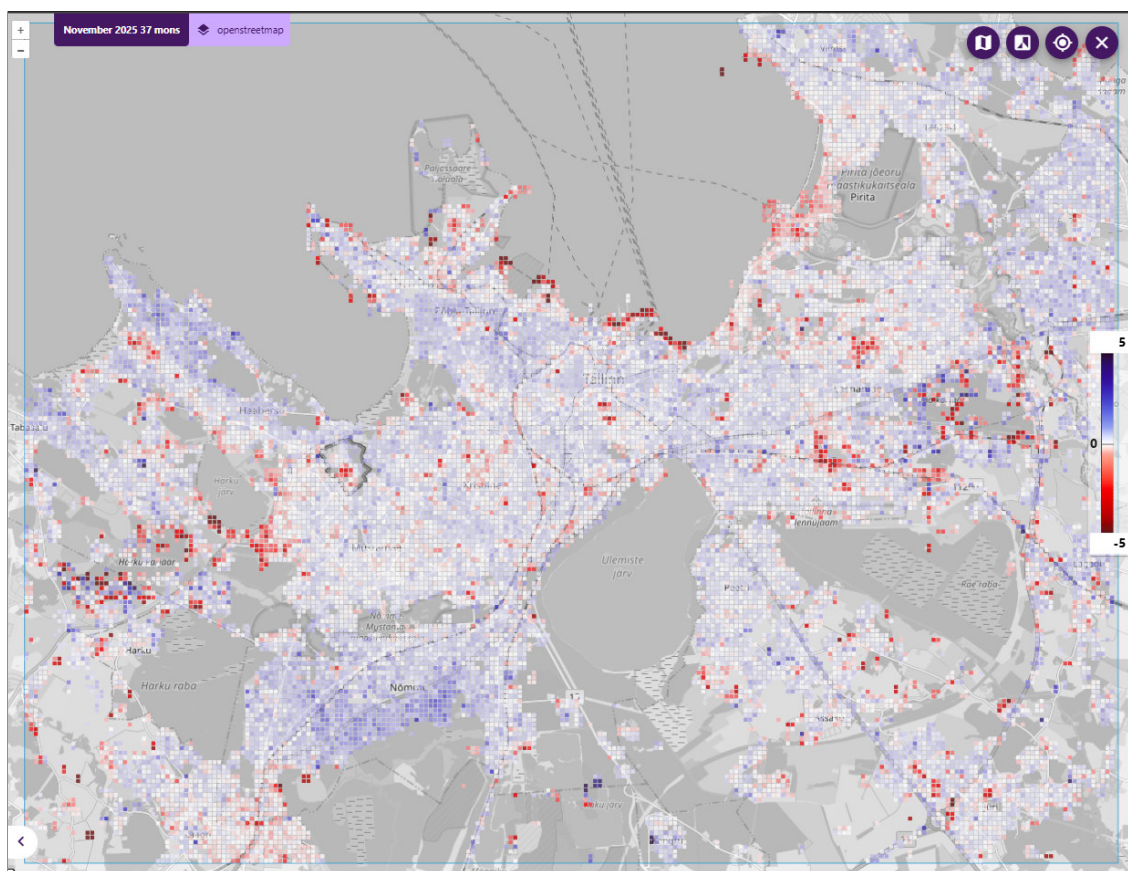


(b) Orbiit DESC-153

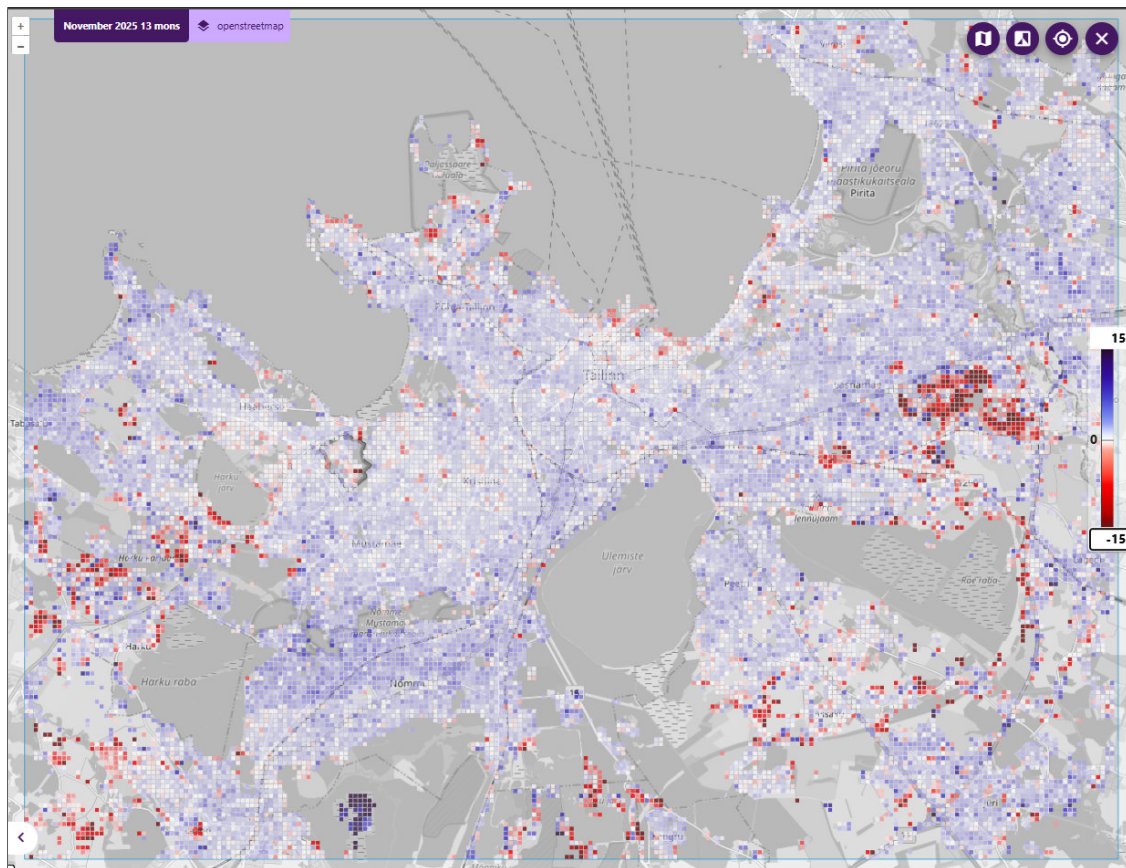
Joonis 7: LOS liikumiskiirused PS punktides ajaperioodil 2024.10–2025.11 (1 a) Sille.Space kaardira-kenduses (Ref. InSAR).



(a) *H*-pind ajaperioodile 2020.06–2025.11 (5.5 a)



(b) *H*-pind ajaperioodile 2022.10–2025.11 (3 a)



(c) H -pind ajaperioodile 2024.10–2025.11 (1 a)

Joonis 8: Vertikaalliikumiste H võrgustatud rasterpinnad erinevatel ajaperioodidel Sille.Space Pro rakenduses (Ref. InSAR). Piksli suurus 100 m.

2.2.1 Vertikaallahenduste detailvaated

Suurematest liikumistest detailsema ülevaate saamiseks esitatakse erinevate ajaperioodide vertikaalkiiruste kaardipildid järgmistele piirkondadele:

- Tabasalu–Haabersti–Põhja-Tallinn–Kristiine (joon. 9);
- Mustamäe–Nõmme–Laagri (joon. 10);
- Lasnamäe–Pirita–Merivälja (joon. 12);
- Kesklinn–Kadrioru (joon. 11).

InSAR analüüsi ajaperioodile 2022-2025 võiks lugeda optimaalseks ajavahemikuks suuremate ja uuemate liikumiste ja deformatsioonide monitooringuks. Pika-ajalise lahendi puhul perioodile 2020-2025 võivad uuemad suured liikumised jääda varasemate stabiilsete perioodide või ka vastupidise märgiga liikumiste tõttu märkamata, kuna meetodika tõttu (andmete lähendamine 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 $\pm 2.4 \dots 2.5$ mm/a. Mitmeaastaste lahenduste puhul jääb sama näitaja vahemikku $\pm 0.43 \dots 0.78$ mm/a ehk 3-6 korda väiksemaks võrreldes aastaste lahendustega.

2.2.2 Suuremate liikumistega piirkonnad

Sarnaselt eelmise etapi analüüsile (Oja, 2025), võib pikema perioodiga analüüsides täheldada suuremaid liikumisi Harku järve ümbruses, samuti Astangu ja Tiskre-Kakumäe piirkondades (vajumine kuni 5 mm/a, vt joon. 9). Pikim periood näitab vajumisala ka Kristiines, samas lühemate perioodide lahendused näitavad seal stabiliseerumist.

Kõigil pikemate lahenduste joonistel võib jälgida suuremaid vajumisi mööda raudtee trasse, märgatavate vajumistega (5-6 mm/a) Kitsekülas (Tondi ülesõit, Veerenni-Viadukti tn ristmik) ja Ülemistes. Märgatav vajumisala (5-7 mm/a) joonistub välja Smuuli tee viaduktil ja selle ümbruses, vt joon. 12.

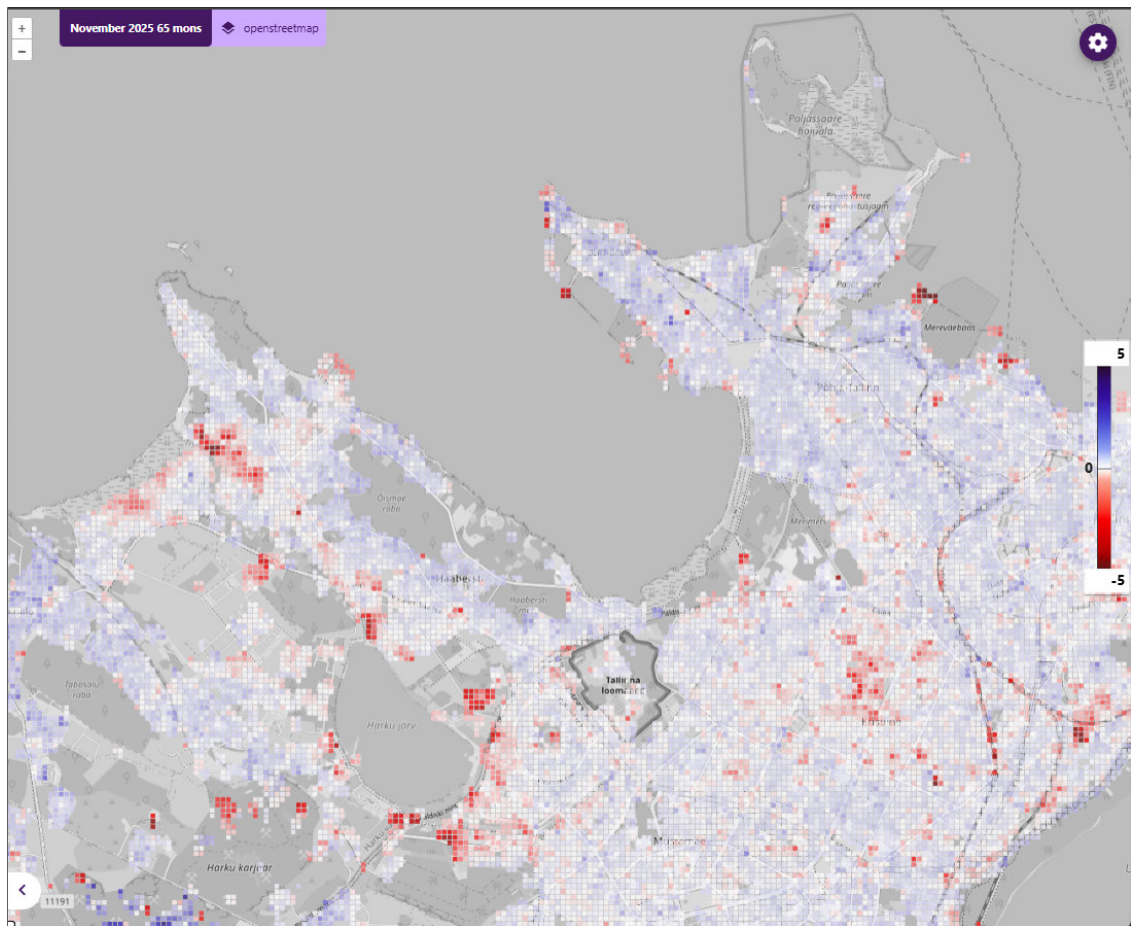
Vajumistega paistavad silma veel sadamarajatised, sh kaid. Suurimad vajumised joonistuvad välja reisisadamas ja Pikksilma promenaadil (7-12 mm/a, joon. 11).

Detailsemad vaated Sille.Space Pro rakenduses võimaldavad märgata suuremaid liikumisi ka suuremastaabilistel ehitusrajatistel ja nende vahetus läheduses. Kesklinnas jääb silma äsja valminud Arteri kvartal (vajumisega kuni 7 mm/a), samuti Estonian Business School (EBS) kõrghoone ehitus (vajumised kuni 11 mm/a), vt joon. 11.

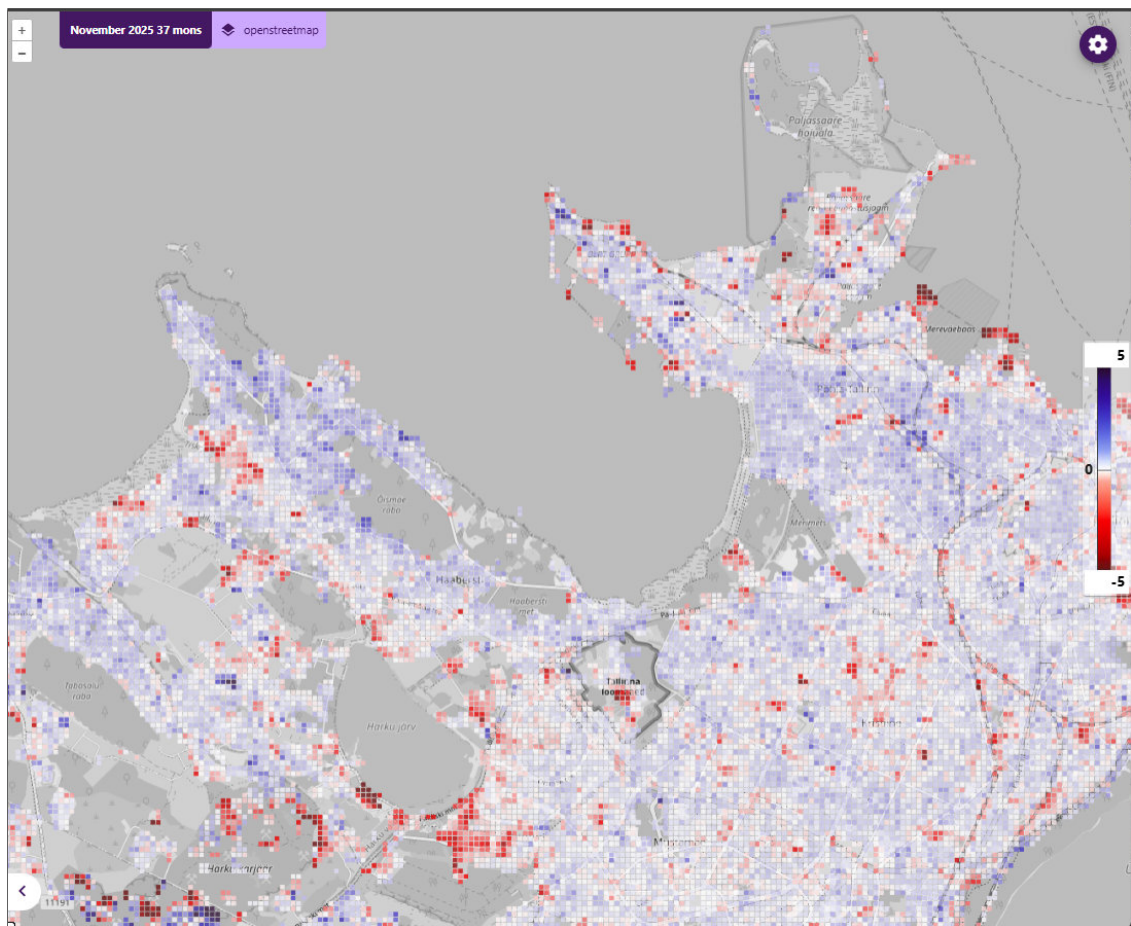
Aastaste lahenduste puhul võib märgata suuri üles-alla liikumisi karjäärade piirkondades (Harku, Vao karjäärid), vt joon. 9, 10. Ilmselt on aastane periood piisav sealsete reaalsete muutuste jälgimiseks, ilma et ajaline koherentsus oluliselt väheneks ja kaoks.

Valik suuremate liikumiste, enamasti vajumistega piirkondadeid:

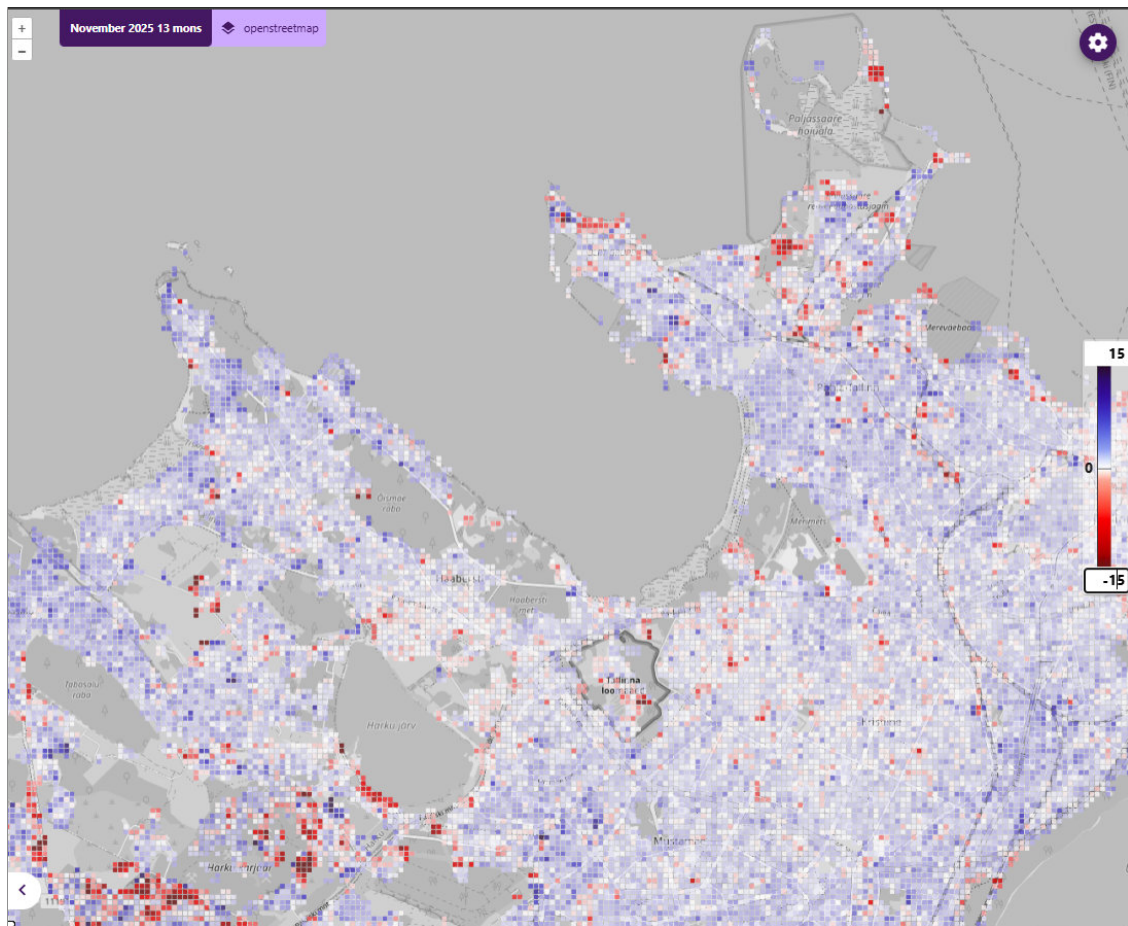
- Tiskre-Kakumäe:
 - Säina, Siia, Ojakääru tänavad
 - Rannaniidu, Tiskrevälja tänavad
- Harku järve ümbrus:
 - Vihu, Hargi, Sagari tänavad
 - Kaaruti tn
 - Astangu tn 19
- Kristiine:
 - Tedre, Mõtuse tänavad
 - Raudtee trassid paralleelselt Tehnika, Kotka tänavatega
 - Viadukti, Leete tänavate ristmik
- Lasnamäe:
 - Smuuli tee viadukt ja selle ümbrus
 - Tähesaju tee – Tondiraba
- Kesklinn:
 - Arteri kvartal, EBS kõrghoone ehitus
 - Reisisadam, Pikksilma promenaad, Pirita promenaadi algus



(a) *H*-pind ajaperioodile 2020-2025

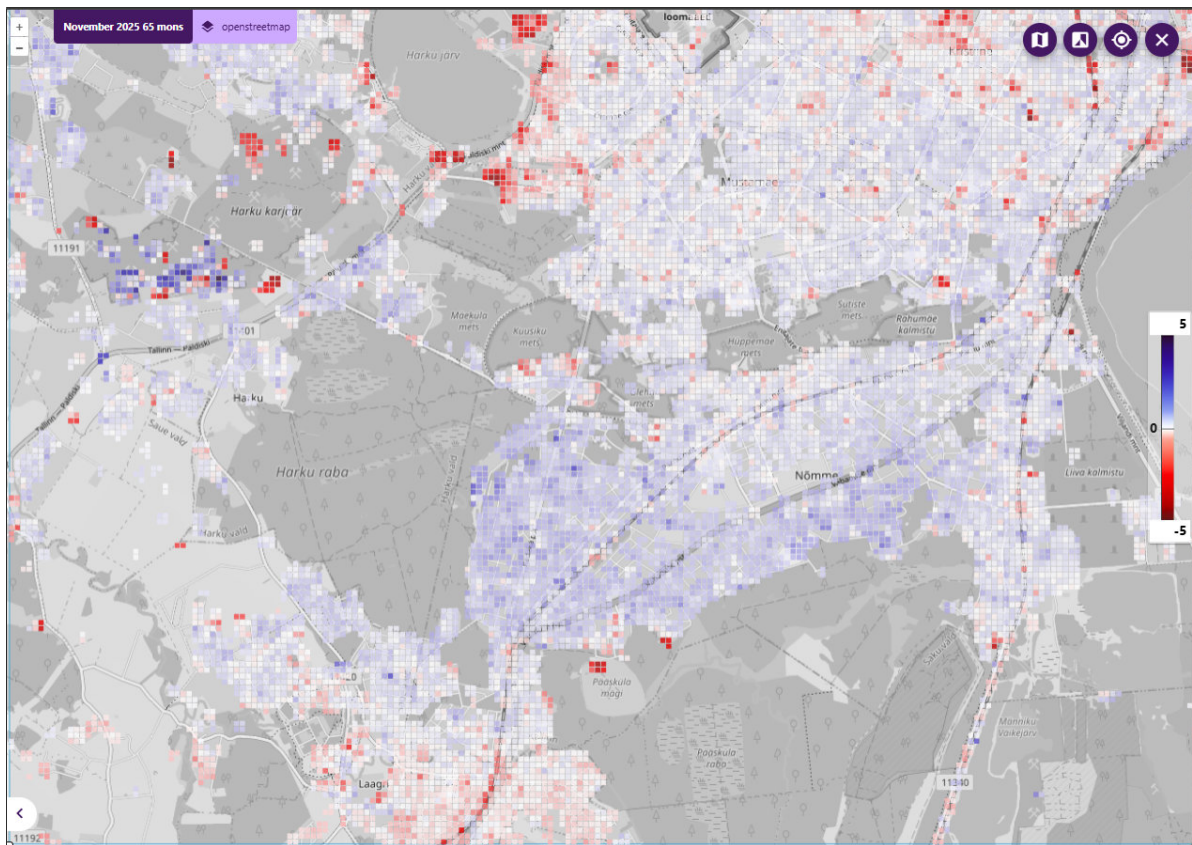


(b) *H*-pind ajaperioodile 2022-2025

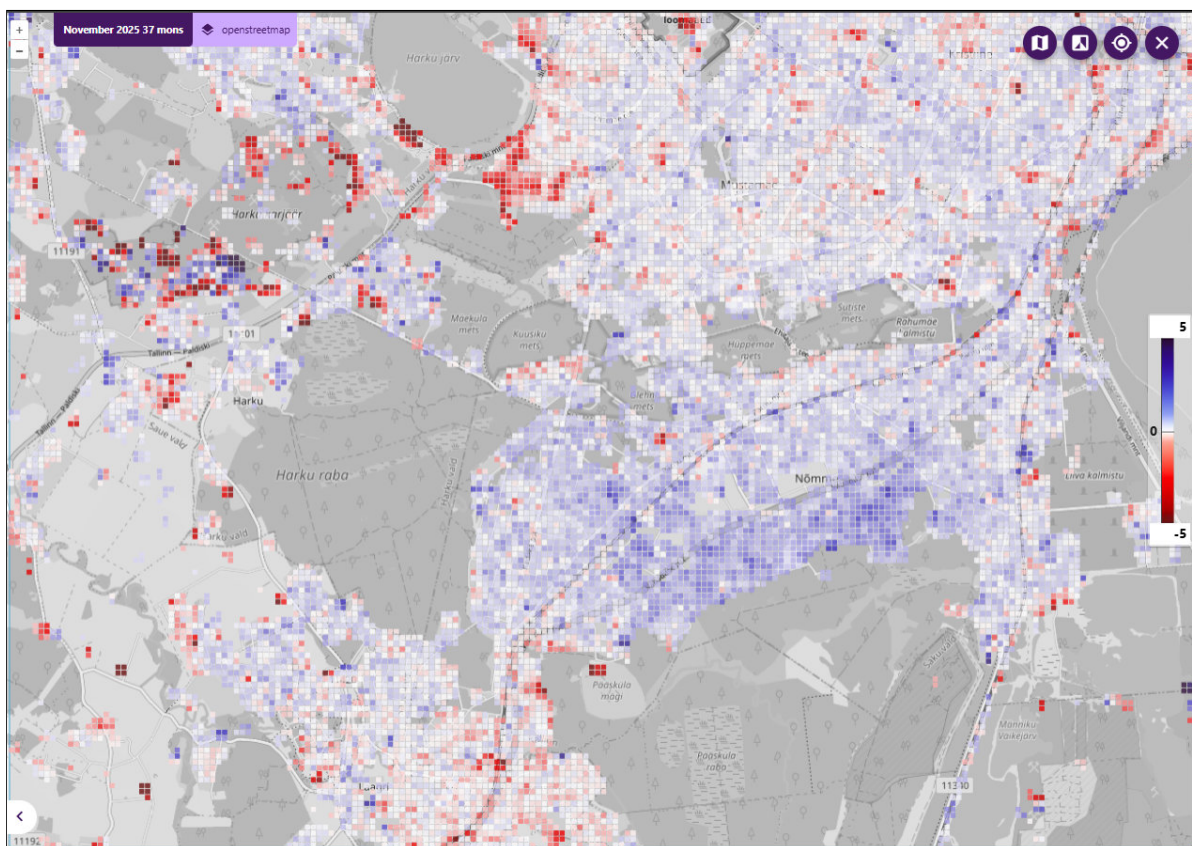


(c) H -pind ajaperioodile 2024-2025

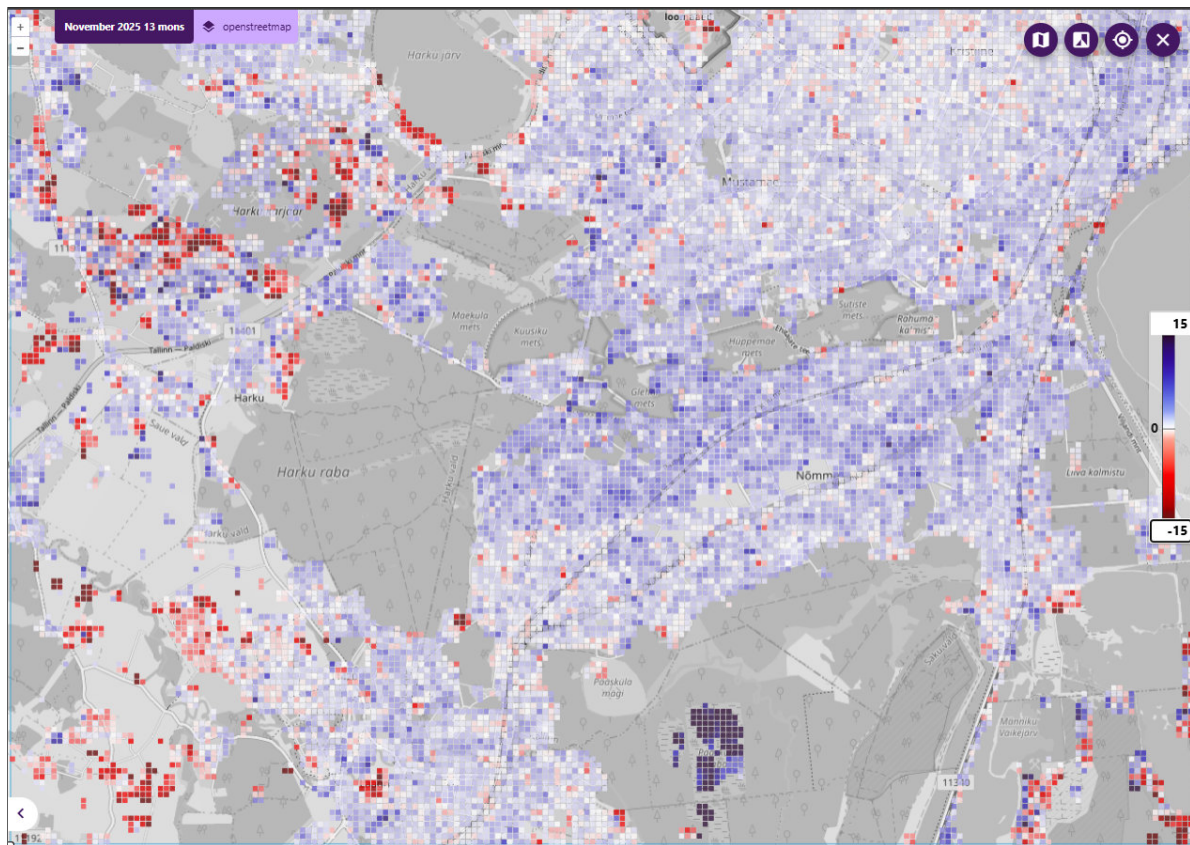
Joonis 9: Vertikaalkiiruste H lahendused Tabasalu–Haabersti–Põhja-Tallinn–Kristiine piirkondades (Ref. MUS2). Piksli suurus 60 m.



(a) H -pind ajaperioodile 2020-2025

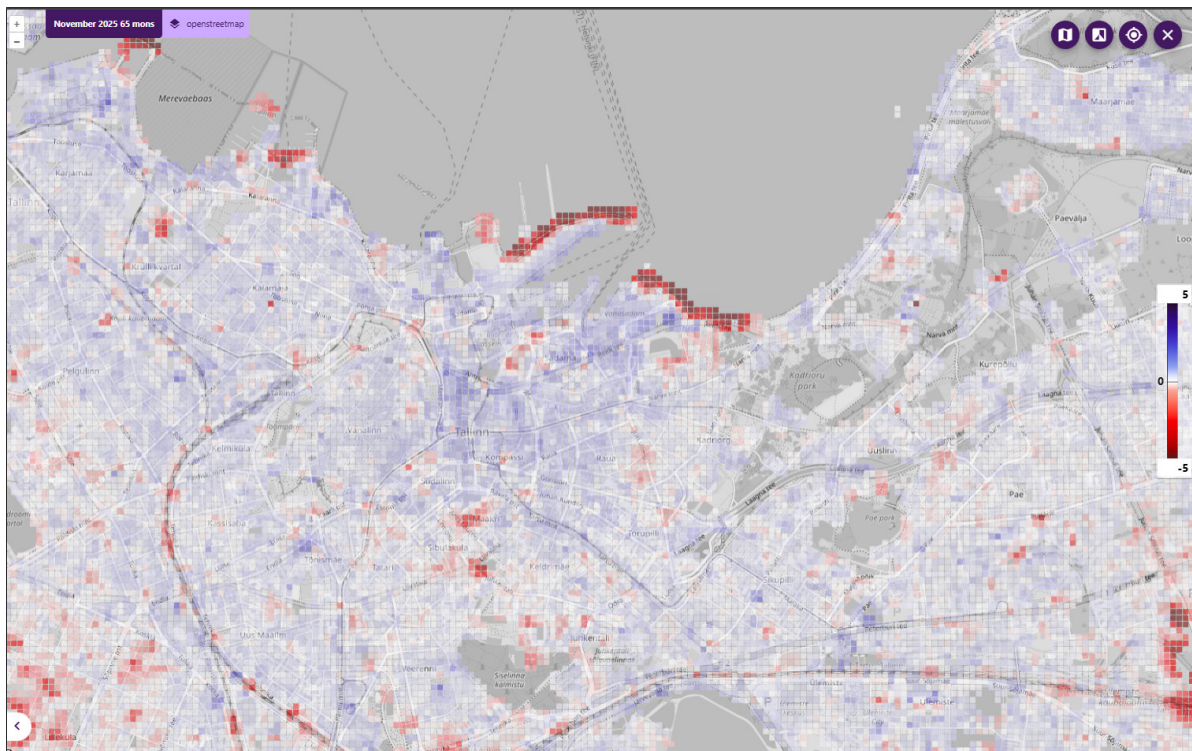


(b) H -pind ajaperioodile 2022-2025

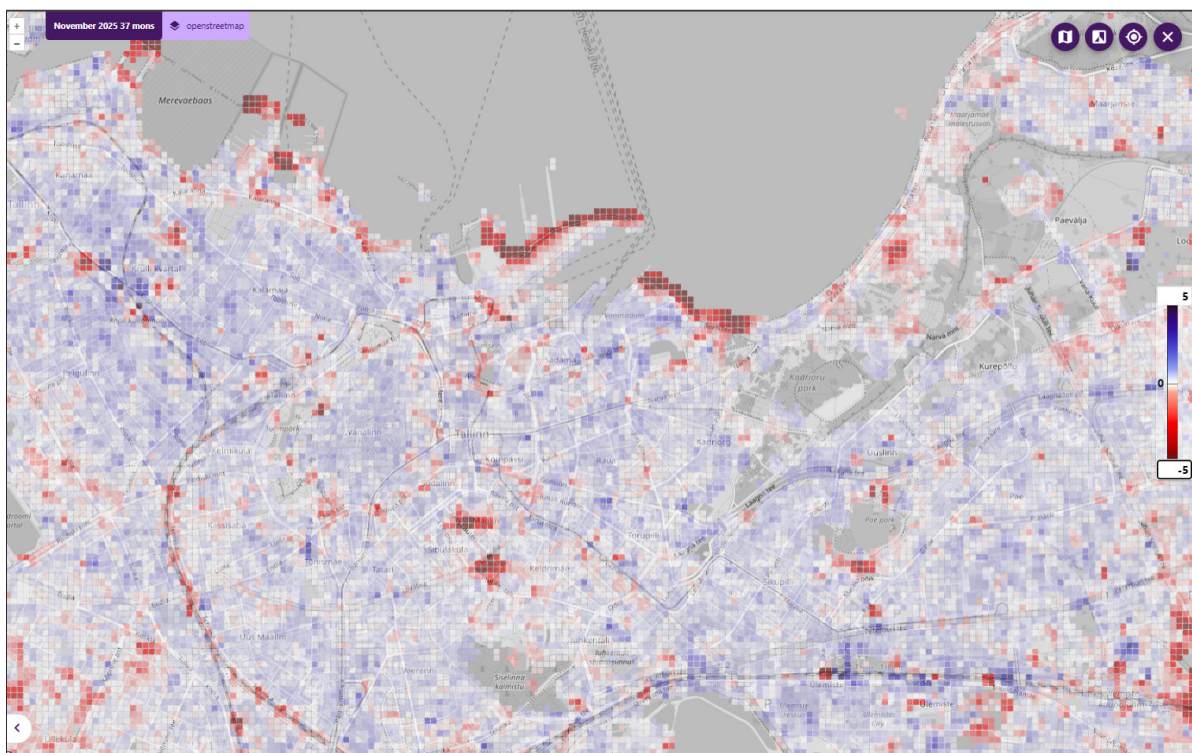


(c) H -pind ajaperioodile 2024-2025

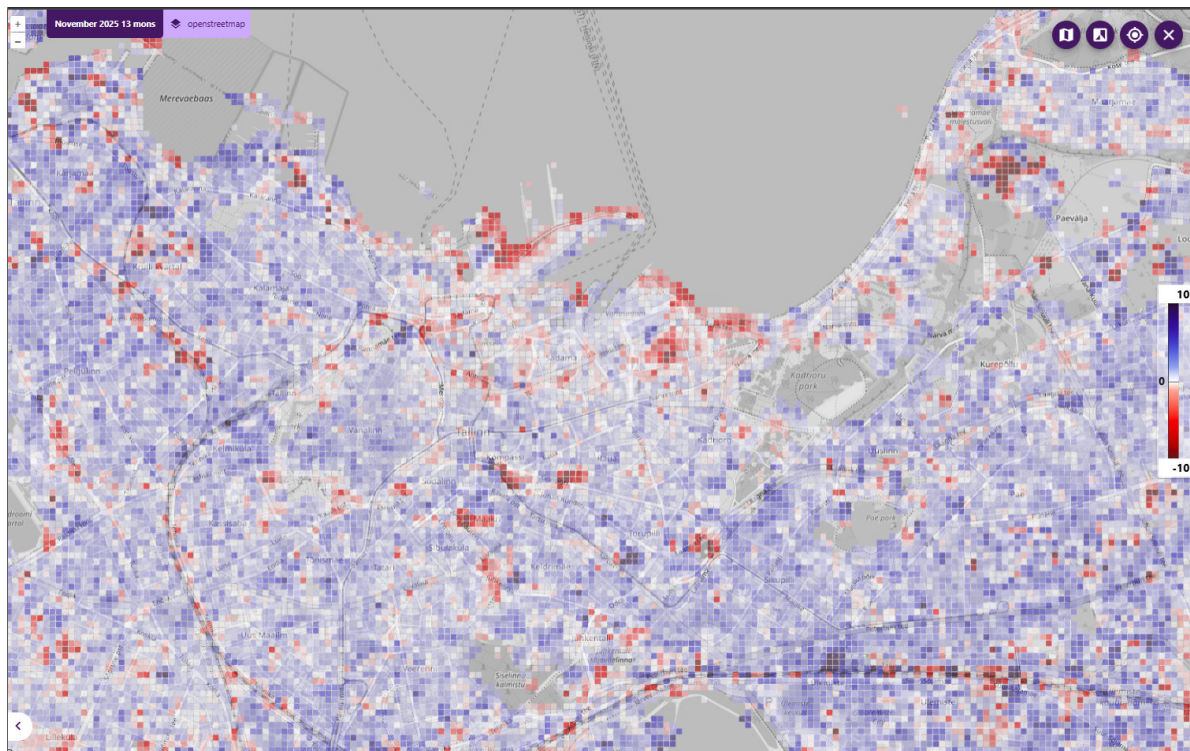
Joonis 10: Vertikaalkiiruste H lahendused Mustamäe–Nõmme–Laagri piirkondades (Ref. MUS2).
Pikslisuurus 60 m.



(a) H -pind ajaperioodile 2020-2025

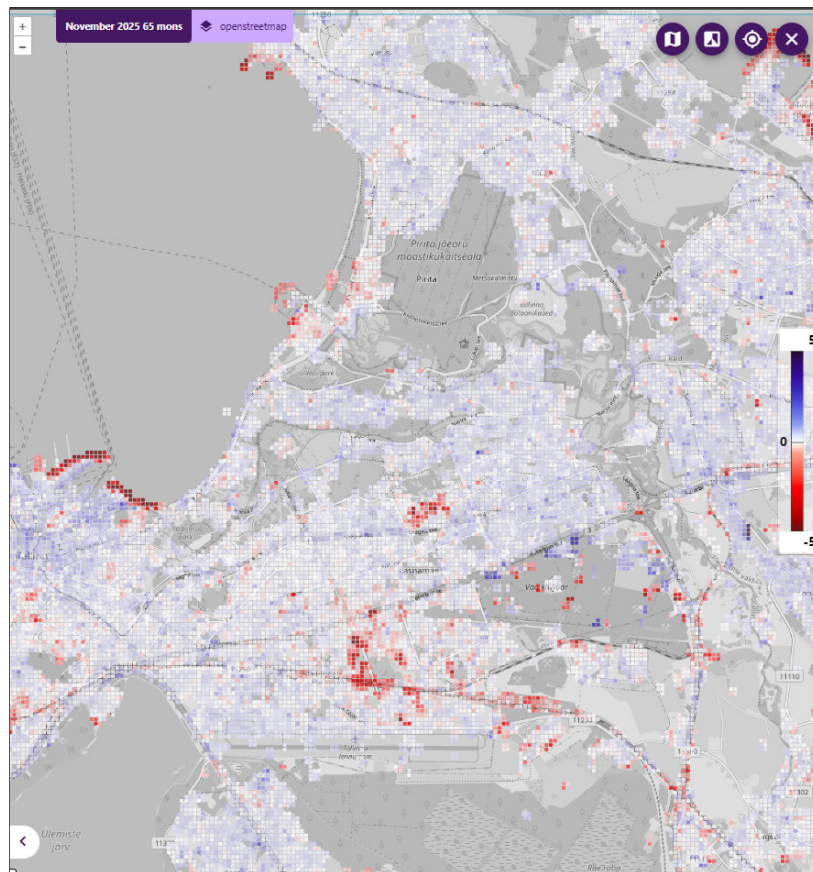


(b) H -pind ajaperioodile 2022-2025

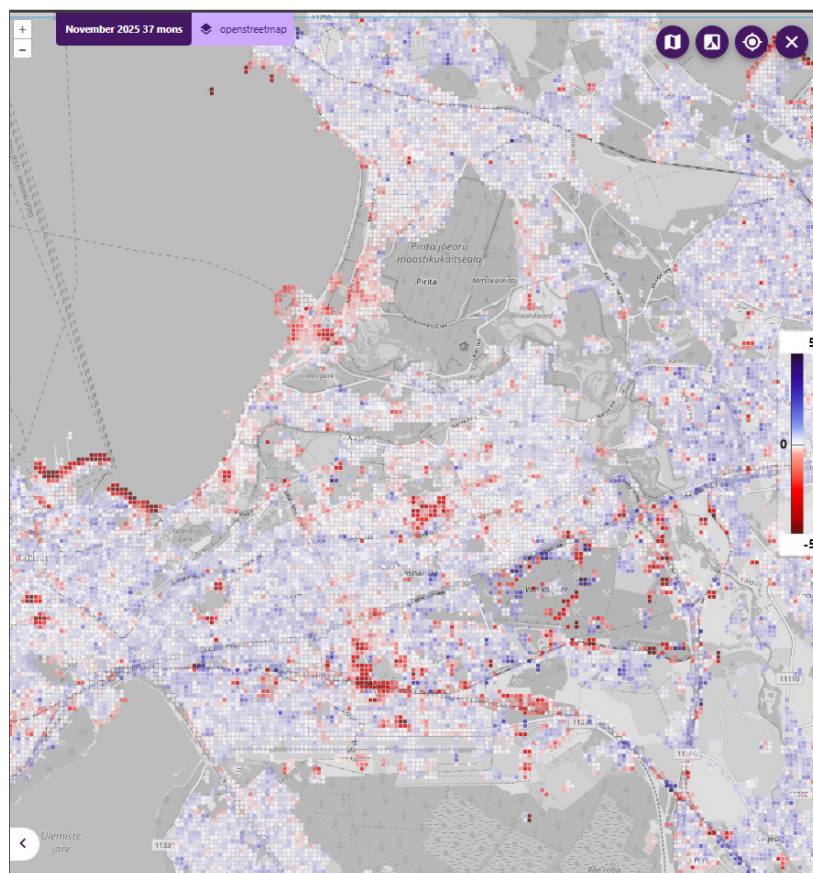


(c) H -pind ajaperioodile 2024-2025

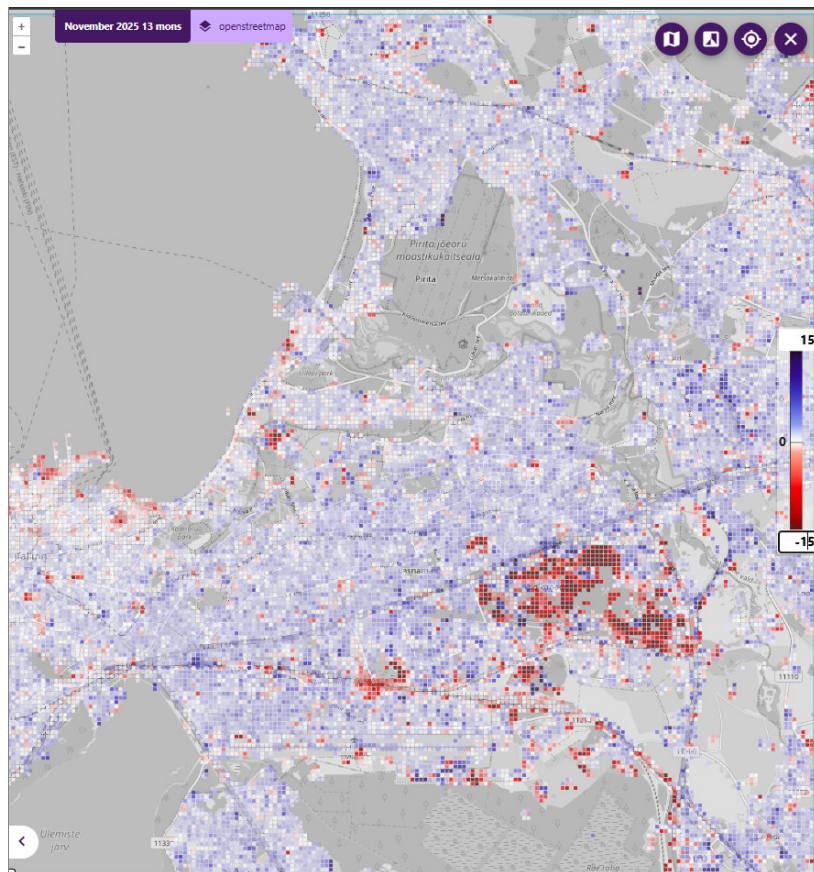
Joonis 11: Vertikaalkiiruste H lahendused Kesklinn–Kadriorg piirkondades (Ref. MUS2). Piksli suurus 40 m.



(a) *H*-pind ajaperioodile 2020-2025



(b) *H*-pind ajaperioodile 2022-2025



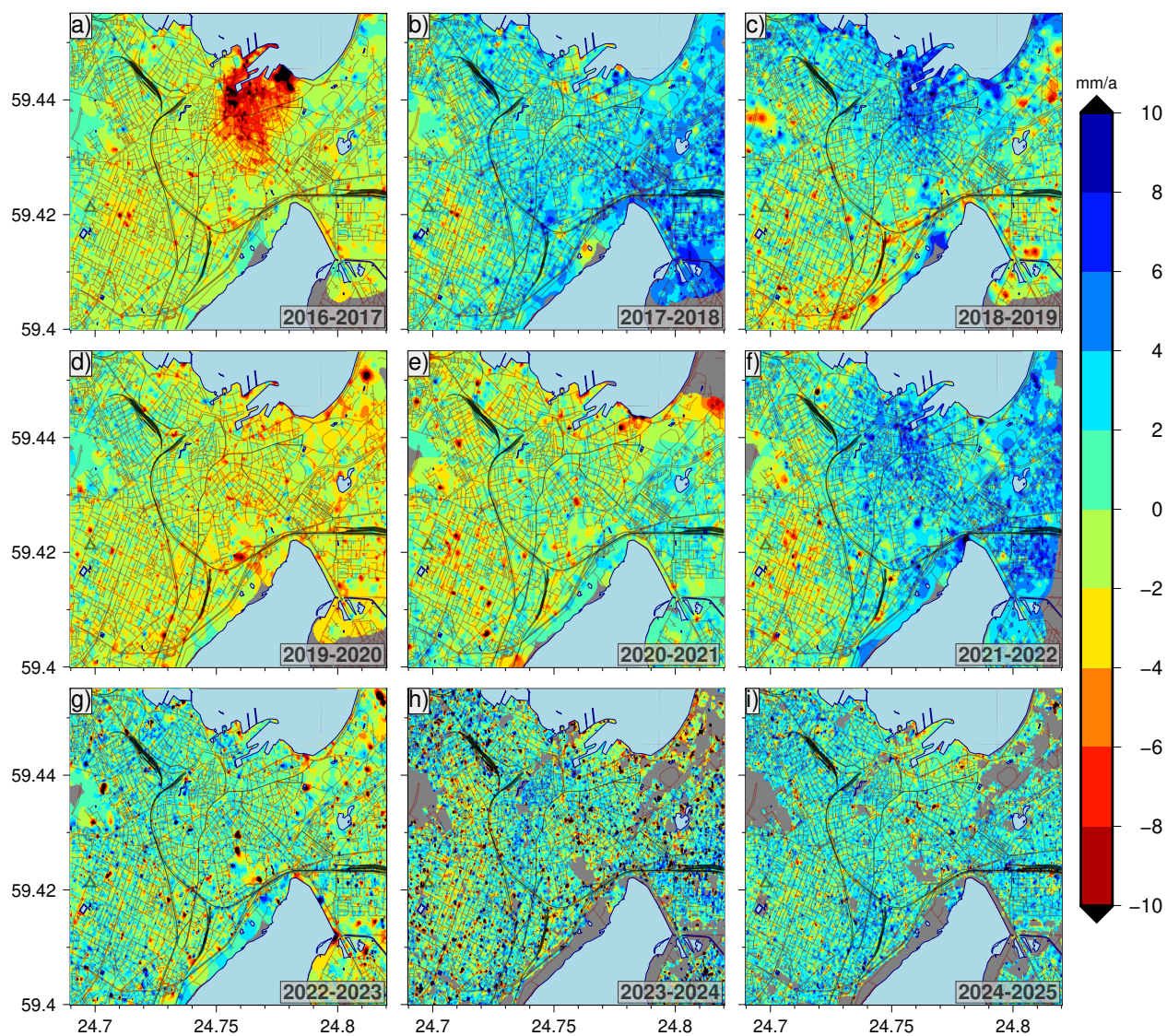
(c) H -pind ajaperioodile 2024-2025

Joonis 12: Vertikaalkiiruste H lahendused Lasnamäe–Pirita–Merivälja piirkondades (Ref. MUS2). Piksli suurus 60 m.

2.2.3 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 13).

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 suurematele mõõtmisvigadele (suurema mürataseme tõttu) aastastes lahendustes. Uuemate lahenduse puhul võib ülevaate saamist raskendada lühem maskimisraadius (40 m), mistõttu liikumiste värvipilt on katkestatud andmetest tühjade aladega (tähistatud halliga).



Joonis 13: Vertikaalkiiruste H aastaste lahenduste võrdlus Tallinna kesklinna piirkonnas ajavahemikus 2016-2025 (Ref. MUS2).

3 Kokkuvõte

Uurimistöö tulemusena arvutati täiendatud PSI-MTA 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 radarpildid ajavahemikust 2020.06–2025.11 (5.5 a) ja InSAR analüüsi perioodideks 2020.06–2025.11 (5.5 a), 2022.10–2025.11 (3 a) ja 2024.10–2025.11 (1 a).

PS punktide LOS väärtustest arvutati ruumilise interpoleerimise meetodil LOS võrgustatud kiiruspinnad (InSAR referentsi suhtes), ruumilise lahutusega 20 m. LOS pindadest tuletati omakorda vertikaalsed kiiruspinnad (GNSS püsijaama MUS2 suhtes).

Vertikaalsed kiiruspinnad näitavad, et liikumiskiirused jäävad mitmeaastaste lahenduste puhul enamasti vahemikku ± 5 mm/a. Aastase lahenduse vertikaalkiirused jäävad vahemikku ± 10 mm/a, kuid mõnedes piirkondades ka üle selle. Samas peab aastase lahenduse puhul silmas pidama suurt mõõtemüra ehk määramatust, mille keskmine väärtus jääb $\pm 2.4 \dots 2.5$ 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 Tiskre-Kakumäe piirkonnas, Harku järve ümbruses ja Astangul, Kristiines, Ülemistes. Märgatav vajumisala (5-7 mm/a) joonistub välja Smuuli tee viaduktil ja selle ümbruses. Suurema liikumisega alad joonistuvad välja ka mööda raudtee trasse.

Tallinna kesklinnas võib viimastel aastatel jätkuvalt järeldada liikumiste stabiliseerumist. Lokaalselt võib märgata suuremaid vajumisi reisisadamas ja Pikksilma-Pirita promenaididel.

Detailsemad vaated näitavad selgeid vajumisi suure mastaabiga ehitustööde aladel, nagu hiljuti valminud Arteri kvartalis ja EBS kõrghoone ehitusplatsil. Need tulemused iseloomustavad InSAR analüüside suurt potentsiaali monitoorida suurema mastaabiga ehituste mõju nii lähi- kui kaugemale ümbruskonnale (eriti kõrvalolevatele hoonetele, infrastruktuurile).

Uuringu tulemused esitatakse tabelfaili (*.shp) ja rasterfaili (geotiff *.tiff) formaatides. Failide detailsemad kirjeldused leiab lisas L.1. Lisast L.2 leiab Sille.Space kaardirakenduse ja Sille.Space Pro rakenduse lingid kõikidele analüüsi tulemustele.

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. (2025). InSAR vertikaalliikumised Tallinnas ajavahemikus 2016-2024. Tehniline uuring (Ver. 2025-01-21), AS Datel. 15 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 (A - ASC, D - DESC) ja ajaperiood.

(a) Tabelfailide nimekiri:

- i. Tallinn_A160_1874_ps4657_2020-2025.xlsx
- ii. Tallinn_A160_1874_ps4655_2022-2025.xlsx
- iii. Tallinn_A160_1874_ps4662_2024-2025.xlsx
- iv. Tallinn_D153_1873_ps4658_2020-2025.xlsx
- v. Tallinn_D153_1873_ps4659_2022-2025.xlsx
- vi. Tallinn_D153_1873_ps4661_2024-2025.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 (InSAR analüüsis)

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

- (a) Tallinn_A160_1874_ps4657_2020-2025.shp.zip
- (b) Tallinn_A160_1874_ps4655_2022-2025.shp.zip
- (c) Tallinn_A160_1874_ps4662_2024-2025.shp.zip
- (d) Tallinn_D153_1873_ps4658_2020-2025.shp.zip
- (e) Tallinn_D153_1873_ps4659_2022-2025.shp.zip
- (f) Tallinn_D153_1873_ps4661_2024-2025.shp.zip

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

- (a) Tallinn_H_2020-2025_V351_4657-4658_20_20_40e.tiff
- (b) Tallinn_H_2022-2025_V353_4655-4659_20_20_40e.tiff
- (c) Tallinn_H_2024-2025_V352_4662-4661_20_20_40e.tiff

L.2 InSAR lahenduste lingid Sille.Space rakendustes

1. LOS analüüside lingid orbiitide ja ajaperioodide põhiselt Sille.Space kaardirakenduses (vajalik eelnev sisselogimine):
 - (a) ASC-160 (2020-2025): sille.space/app/#/map/1265/4657
 - (b) ASC-160 (2022-2025): sille.space/app/#/map/1265/4655
 - (c) ASC-160 (2024-2025): sille.space/app/#/map/1265/4662
 - (d) DESC-153 (2020-2025): sille.space/app/#/map/1265/4658
 - (e) DESC-153 (2022-2025): sille.space/app/#/map/1265/4659
 - (f) DESC-153 (2024-2025): sille.space/app/#/map/1265/4661
2. Vertikaallahenduste lingid Sille.Space Pro rakenduses (vajalik eelnev sisselogimine):
 - (a) A160-D153 (2020-2025): sille.space/app/sille-pro/#/subsidence/area/1265/351
 - (b) A160-D153 (2022-2025): sille.space/app/sille-pro/#/subsidence/area/1265/353
 - (c) A160-D153 (2024-2025): sille.space/app/sille-pro/#/subsidence/area/1265/352