Tallinna linna InSAR analüüsid ajavahemikus 2016-2023

(Ver. 2023-12-30)

Koostas: T. Oja

Tallinn 2023

AS Datel, Endla 4, Tallinn 10142, Estonia +372 626 3000 datel@datel.ee www.datel.ee Reg nr 10324057

Sisukord

1 InSAR analüüs uuringualas **2**
1.1 Uuringuala 2
1.2 Satelliitandmete InSAR analüüs 2
1.3 Horisontaal- ja vertikaalliikumiste arvutus 3
1.4 Referentspunkti valik 5

2 Tulemused **6**
2.1 LOS kiirused ja nende mudelpinnad 6
2.2 Horisontaal-, vertikaalkiirused 6
2.3 Vertikaalkiiruste võrdlus varasemate tulemustega 11
2.4 Vertikaalkiiruste detailvaated 12

3 Kokkuvõte **15**

Viited **16**

Lisad **17**
L.1 Kaasnevate failide nimekiri 17
L.2 Vertikaalkiiruste detailvaated 19

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/satelliitnavigatsioonisüsteem;

H (ingl *Height*) – vertikaalsuunaline koordinaattelg, mille positiivne suund on suunatud Maa keskpunktist eemale (mööda Maa referentsellipsoidi normaali);

InSAR (ingl *Interferometic 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;

N (ingl *North*) – põhja-lõuna suunaline koordinaattelg, mille positiivne suund on põhja suunas.

PS (ingl *Presistent/Permament 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.

Sissejuhatus

Töö eesmärk on kaugseire andmete (Euroopa Kosmoseagentuuri Sentinel-1 tehisavaradar 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 – nov. 2023**.

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).

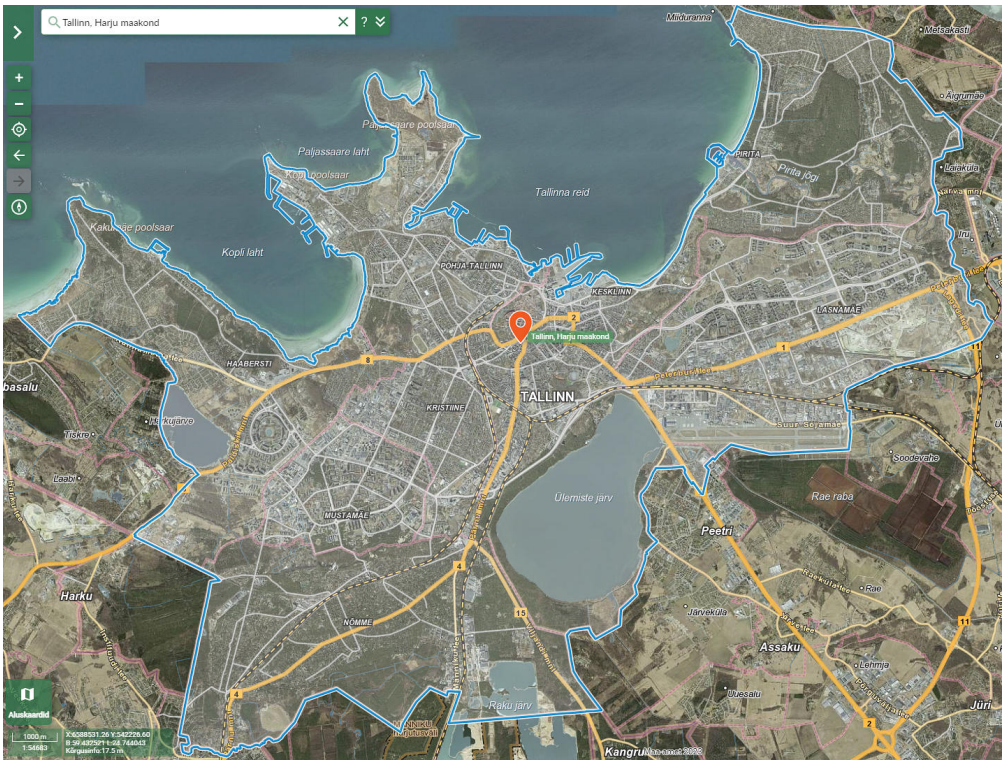
InSAR meetod rakendab edukalt korduvajalisi (ingl *multi-temporal*) kosmoseseire mikrolainepilte, mille põhjal arvutatakse objektidelt tagasihajuva elektromagnetlaine muutunud faasist objektide liikumised maapinnal (Kiik ja Gruno, 2019). AS Datel on välja arendanud InSAR põhise e-teenuse **Sille.Space** (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 aegridade graafikute kaudu.

1.1 Uuringuala

InSAR analüüs koostati Tallinna linna halduspiire (va Aegna saar) katvale ristküliku kujulisele alale, pindalaga u 413 km^2 (Joon. 1). Töö eesmärgiks on InSAR meetodi abil jälgida linna infrastruktuuri, hoonete ja muude maapealsete objektide liikumisi ja stabiilsust ajaperioodidel 2016-2023, 2020-2023 ja 2022-2023.



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 m^2 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 mõõtmiste tsükkel ehk pildi tegemise kordus on 12 päeva. Samas olid Sentinel 1A ja 1B satelliitide mõõtmistsüklid 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 mõõtmistsükkel.

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 kokkuvõte 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)	2016.07.01-2022.11.03	309	33.5513	-168.11
		2020.10.02-2023.10.29	115	-"-	-"-
		2022.10.10-2023.10.29	33	-"-	-168.1112
80	Langev (DESC)	2016.07.08-2022.10.24	296	43.4386	-9.3664
		2020.10.03-2023.10.24	111	-"-	-"-
		2022.10.05-2023.10.24	32	-"-	-"-
51	Langev (DESC)	2016.07.06-2023.10.22	292	33.2528	-12.016
		2020.10.01-2023.10.22	109	-"-	-12.0176
		2022.10.03-2023.10.22	33	-"-	-"-

SAR pildid kaasregistreeriti orbiitide kaupa projektidesse. Joonisel 2 on toodud PSI analüüside interferogrammide paarid peapildi suhtes. Arvutustes rakendati kõrgusmudelina DTMi (10 m ruumilise lahutusega), mis on koostatud aerolaserskaneerimine meetodil LiDAR-mõõdistuste tulemusena ja alla laetud Maa-ameti geoportaalist 2023. a novembris (geoportaal.maaamet.ee). DTM mudeli koordinaadid ja kõrgused teisendati WGS-84 koordinaadistikku ning kõrgusteks ellipsoidil, rakendades EST-GEOID2017 teisendusmudelit (gpa.maaamet.ee/geoid2017).

Analüüsi kaasati kõik PS punktid, kus amplituudi stabiilsusindeksi (ASI) ja ruumilise koherentsuse summa vastas tingimusele ≥ 1.2. Ruumilist koherentsust hinnati eraldi MST graafi kaudu, koos "Multi-Temporal Adaptive (MTA)" filtriga. Detailsema info leiab SARPROZ© tarkvara manuaalist (sarproz.com/manual).

Piisavalt usaldusväärseks tulemuseks loeti kui piksli analüüsi ajaline koherentsus 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.

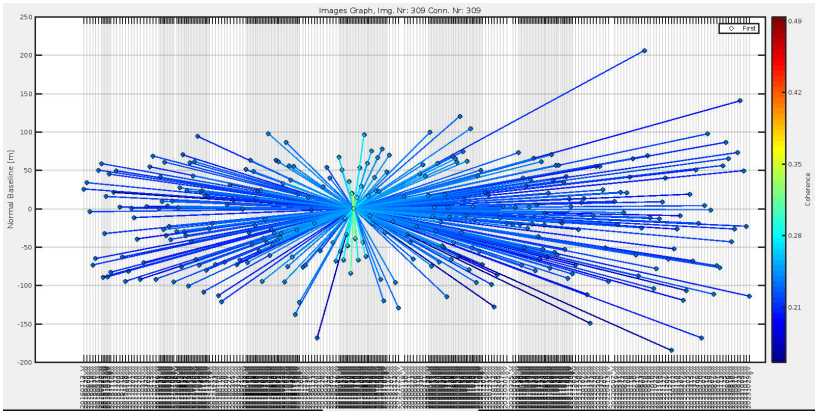
1.3 Horisontaal- ja vertikaalliikumiste arvutus

InSAR meetodiga mõõdetud liikumised, sõltumata kasutatavast meetodist, on alati suunatud satelliidi vaatesuunas ehk LOS suunas. LOS on ühemõõtmeline väärtus, mis iseloomustab nihke/liikumise (ingl *displacement/velocity*) ulatust PS punktis. Punkti asukoha täpsus kolmemõõtmelises ruumis sõltub satelliidi geomeetriast, kasutatavast DEM mudeli täpsusest ning ka objekti kõrgusest maapinna suhtes. Seega võib punkti asukoht plaaniliselt olla tunduvalt väiksema täpsusega kui LOS nihke väärtus.

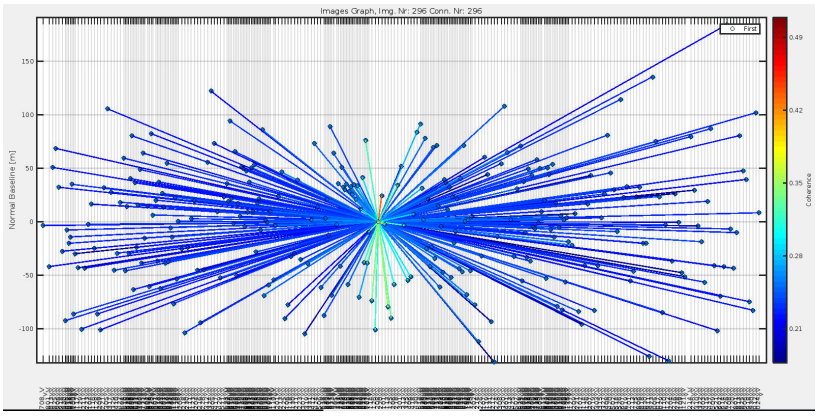
InSAR on kaugseire meetod, seega tuleb rõhutada, et tuvastatav liikumine on summa erinevatest mõjudest. Näiteks võivad summeeruda LOS väärtuses tektoonilised, geoloogilised, geotehnilised, termilised jne liikumised. LOS nihete jagamine komponentideks vajab alati lisainfot ja kinnitust.

LOS suunalise liikumisvektori V_{LOS} seos liikumistega kolmemõõtmelises ruumis (ENH koordinaadistikus) on vastavalt joonisele 3 kirjeldatud valemiga

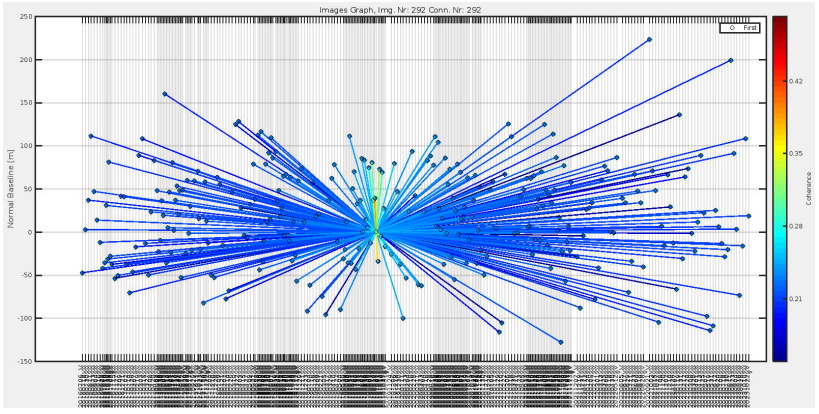
$$V_{\mathrm{LOS}} = v_E \sin\theta \cos\varphi + v_N \sin\theta \sin\varphi + v_H \cos\theta, \quad (1)$$



(a) **Orbiit ASC-160**



(b) **Orbiit DESC-80**



(c) **Orbiit DESC-51**

Joonis 2: **PSI analüüsiks moodustatud interferogrammide paarid peapildi suhtes. Värvigamma kirjeldab keskmist ajalist koherentsust piltide vahel.**

kus θ on satelliidi vaatenurk vertikaali suhtes (ingl *incidence angle*) ja φ on vaatenurk horisontaaltasapinnal idasuunast vastupäeva (ingl *heading angle*). Nurkade väärtused leiab tabelist 1.

Kuna LOS väärtus on ühemõõtmeline, pole võimalik seda otse projitseerida kolmemõõtmelisse ruumi (ENH koordinaadistikku). Samas kui objekti jälgitakse kahelt vastassuunaliselt orbiidilt (vastavalt Sentinel-1 ASC ja DESC orbiitidele LOS1 ja LOS2 komponendid), tekib võimalus arvutada E ja H komponendid. Kuna Sentinel-1 satelliidi tiirlemisorbiit on peaaegu polaarne (põhja-lõuna suunaline), jääb LOS suund N suunaga praktiliselt risti ning N komponendi määramise täpsus osutub väga madalaks. Seetõttu N komponenti InSAR analüüsis üldiselt ja ka käesolevas töös ei arvutata. Sellisel juhul E ja H suunalised

kiiruskomponendid v_E ja v_H (ühikuga mm/a) arvutatakse vastavalt valemile (1) lineaarsest võrrandsüsteemist

$$\begin{bmatrix} v_E \\ v_H \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} V_{\mathrm{LOS1}} \\ V_{\mathrm{LOS2}} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

kus M^{-1} on 2x2 transformatsioonimaatriksi

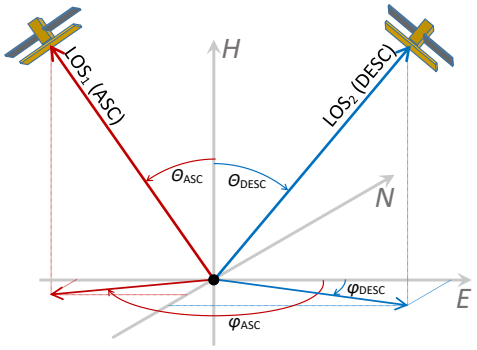
$$M = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 \cos\varphi_1 & \cos\theta_1 \\ \sin\theta_2 \cos\varphi_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

pöördmaatriks.

Valemi (2) arvutus kehtib rangelt ainult siis, kui on täidetud tingimus, et mõlemad suunad jälgivad ühte ja sama objekti. Samas kasutades maapealseid nn looduslikke peegeldusi, ei saa antud tingimusega arvestada. Satelliitide vaatesuunad on ca 180 kraadi erinevad. Seetõttu on mõistlik valemit (2) kasutada võrgustatud pindadega (rasterpindadega), kus LOS väärtused võrgustatakse eelnevalt regulaarse sammuga võrguks (piksliteks) ja EH analüüs teostatakse võrgu punktidele (pikslitele).

Käesolevas analüüsis kasutati LOS kiirusväärtuste võrgustamiseks 2D-splainipinda sammuga Long/Lat = 20 m/20 m (GRS-80 ellipsoidil vastavalt ≈ 0.0004/0.0002 kraadi).

Arvutatud LOS kiiruspinnad (rastrid) maskiti (ehk pikslite väärtused määrati NaN-iks) lähimatest PS punktidest kuni 300 m kaugusele ja Tallinna halduspiirist kuni 500 m kaugusele.



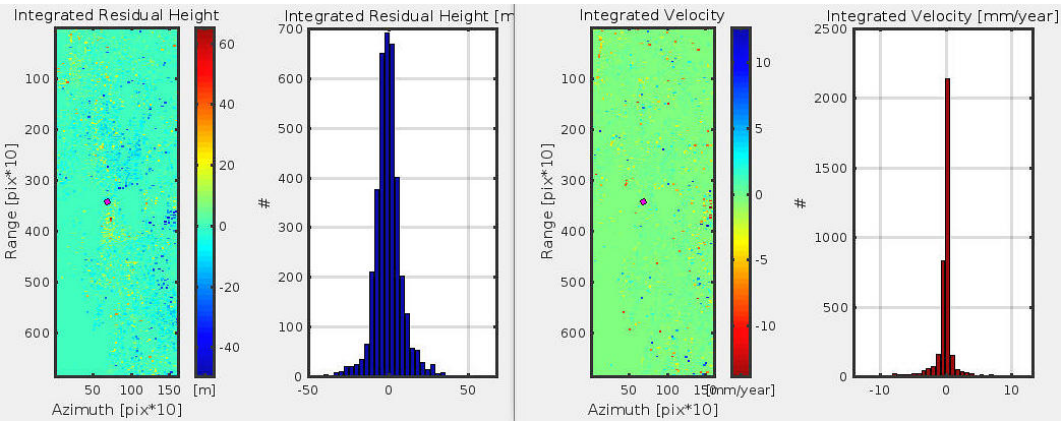
Joonis 3: **Kahe vastasuunalise LOS vektori (ASC, DESC suundadel) tõusunurgad θ ja suunanurgad φ kolmemõõtmelises ENH koordinaadistikus.**

1.4 Referentspunkti valik

LOS kiiruste arvutamisel InSAR analüüsis fikseeritakse kindel PS punkt ehk referentspunkt (RP), mille suhtes määratakse ülejäänud PS punktide liikumised ja kiirused. RP valikukriteeriume selgitab joonis 4. Filtreerimise käigus valitakse statistiliselt parimad PS punktid (nt ASI väärtuste põhjal). Nende seast otsitakse omakorda selline punkt, mille puhul mõõtmismudeliga sobitatud jääkkõrguste ja kiiruste keskväärtused ≈ 0. Selline RP valik (nn InSAR RP) tagab negatiivsete ja positiivsete väärtuste enamvähem ühtlase jaotuse nullväärtuse ümber. InSAR RP põhistest LOS kiirustest tuletatud horisontaal- ja vertikaalkiirused jälgivad üldjoontes sama jaotust nulli suhtes.

Varasemates Tallinna analüüsides on RP valikul lähtutud nii InSAR RP (Gruno, 2020; Oja jt, 2020) kui geodeetilisest RP (MUS2 GNSS püsijaam) (Oja ja Gruno, 2021; Oja, 2023). Valitud referents täpsustatakse edaspidi kaardipiltide all tähistusega “Ref. InSAR”

või “Ref. MUS2”. MUS2 GNSS püsijaama geodeetiliste koordinaatidena kasutatakse samu väärtusi mis varasemates aruannetes: *lat* = 59.42115°, *long* = 24.69803° (GPA, 2022).



Joonis 4: **DESC-80 (2016-2023) analüüsi jääkkõrguste (ingl *residual heights*, $H_{\mathrm{obs}} - H_{\mathrm{DTM}}$) ja kiiruste histogrammid referentspunkti fikseerimisel (APS modeleerimise protsessis).**

2 Tulemused

InSAR analüüsi tulemusena moodustati `*.csv` tulemfailid, mis laeti Sille.Space rakendusse. Tulemfailide kirjeldused ja Sille.Space lingid on esitatud lisas L.1.

Edasiste kaardipiltide värvipaleti valikul jälgiti loogikat, kus GMT paletti “jet” kasutati LOS kiiruspindade esituses, samuti varasemate analoogsete uuringute tulemustega võrdlemisel (mis põhinesid samal paletil). Uued horisontaal- ja vertikaalkiiruste kaardid rakendavad paletti “polar”, mis peaks paremini esile tooma suuremad liikumised.

2.1 LOS kiirused ja nende mudelpinnad

Kogu Tallinna linna arvutusse kaasati orbiitidelt ASC-160, DESC-80 arvutatud LOS andmed kolmele ajaperioodile 2016.06–2023.11, 2020.10–2023.10 ja 2022.10–2023.10 (joon. 5). Siin ja edaspidi kasutatakse ajaformaati aaaa.kk, kus aaaa tähistavad aasta ja kk kuu numbreid. LOS kiirused jäävad nii tõusva kui langeva orbiidi puhul pikemates analüüsides enamasti ± 5 mm/a, aastases analüüsis ± 10 mm/a vahemikku.

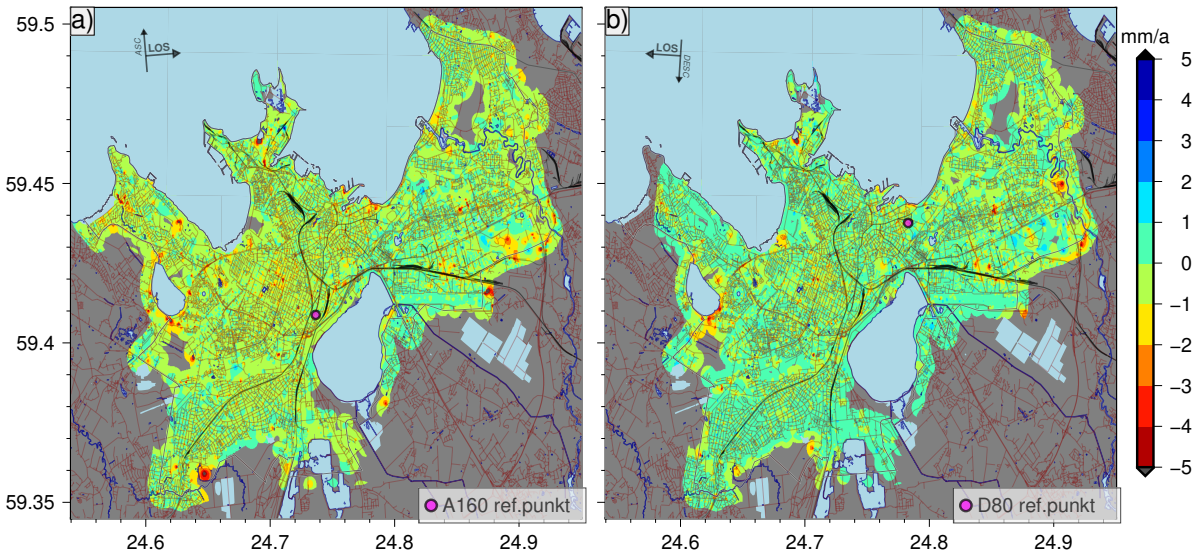
Eraldi LOS kiiruspinnad arvutati Kakumäe lahe rannikuala jaoks Haabersti linnaosas võttes aluseks orbiitidelt ASC-160, DESC-51 arvutatud LOS kiirused (joon. 6).

2.2 Horisontaal-, vertikaalkiirused

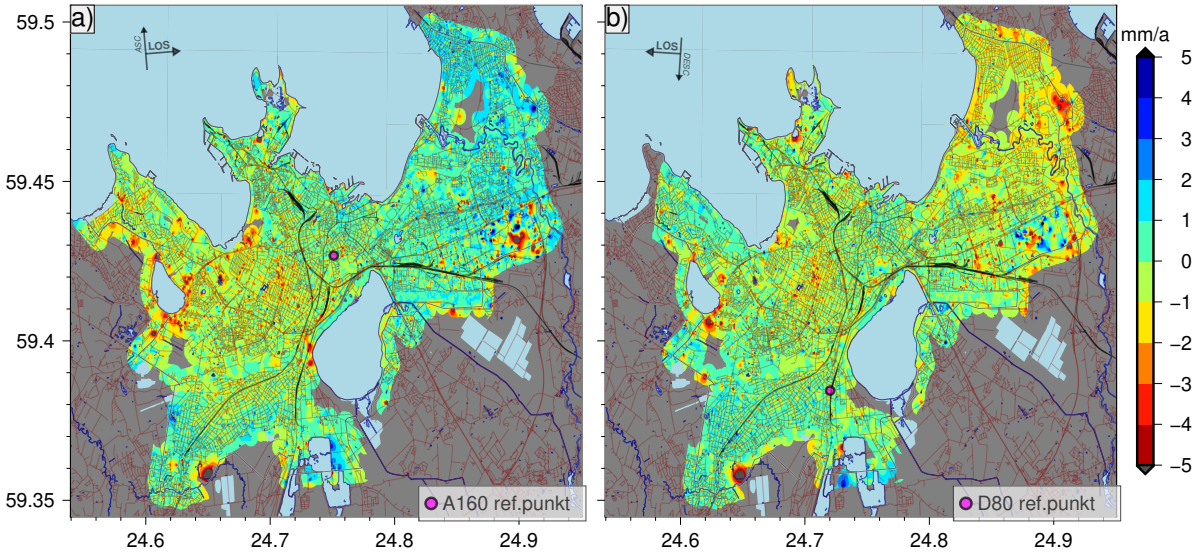
Eelmises peatükis esitatud LOS pindadest valemiga (2) arvutatud horisontaalkiiruste E ja vertikaalkiiruste H kiiruspindade kaardipildid on esitatud joonisel 7.

E, H kiiruslahendused on esitatud InSAR referentsi suhtes. Katse siduda MUS2 GNSS püsijaamaga põhjustas mõnede kiiruslahenduste suur nihkeid, mis omakorda hakkas moonutama kaardivaadet. Näiteks 2020-2023. a vertikaalkiiruse pinna nihkeks hinnati +1.8 mm/a, mis oleks kaardipildil põhjustanud sinise üldfooni (“polar” paletiga).

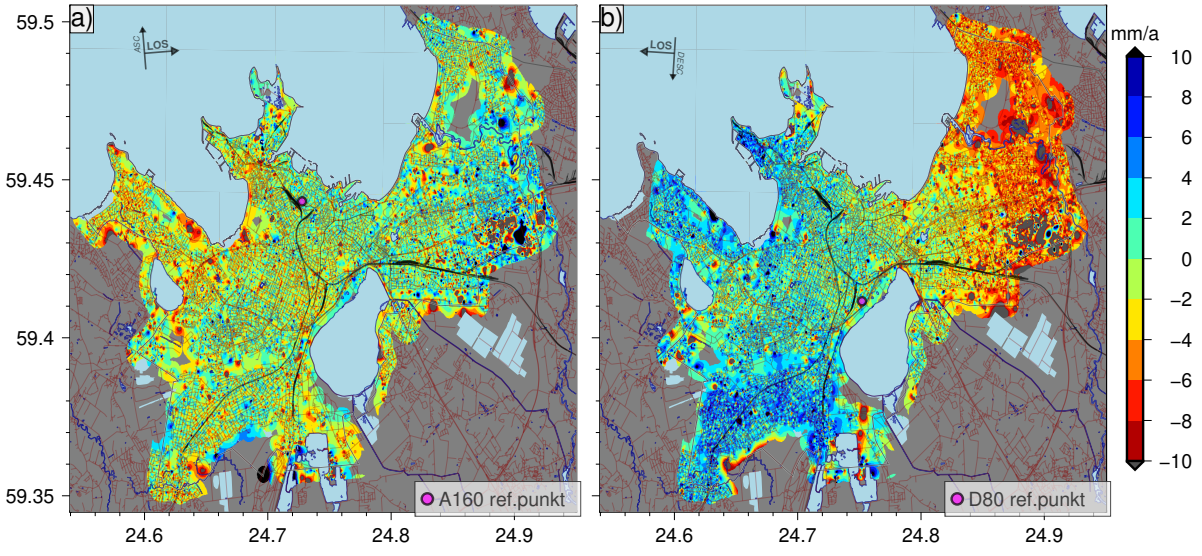
E, H kiiruste võrgustatud mudelpinnad Kakumäe lahe rannikualal, Haabersti linnaosas võttes aluseks orbiitide ASC-160, DESC-51 LOS kiirused on jälgitavad joonisel 8.



(a) **Ajaperiood 2016.06–2023.11**

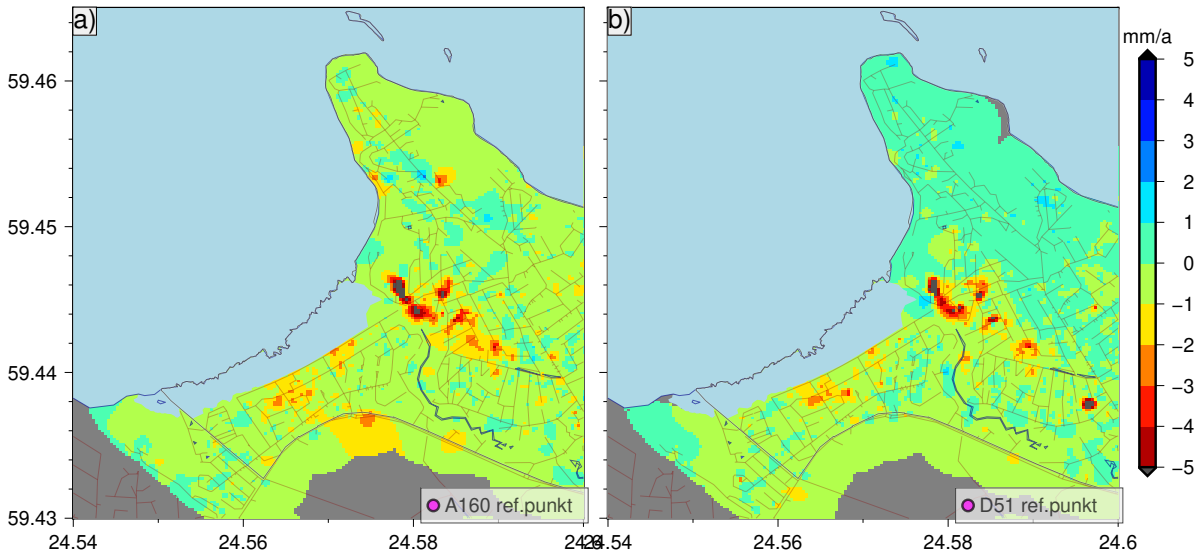


(b) **Ajaperiood 2020.10–2023.10**

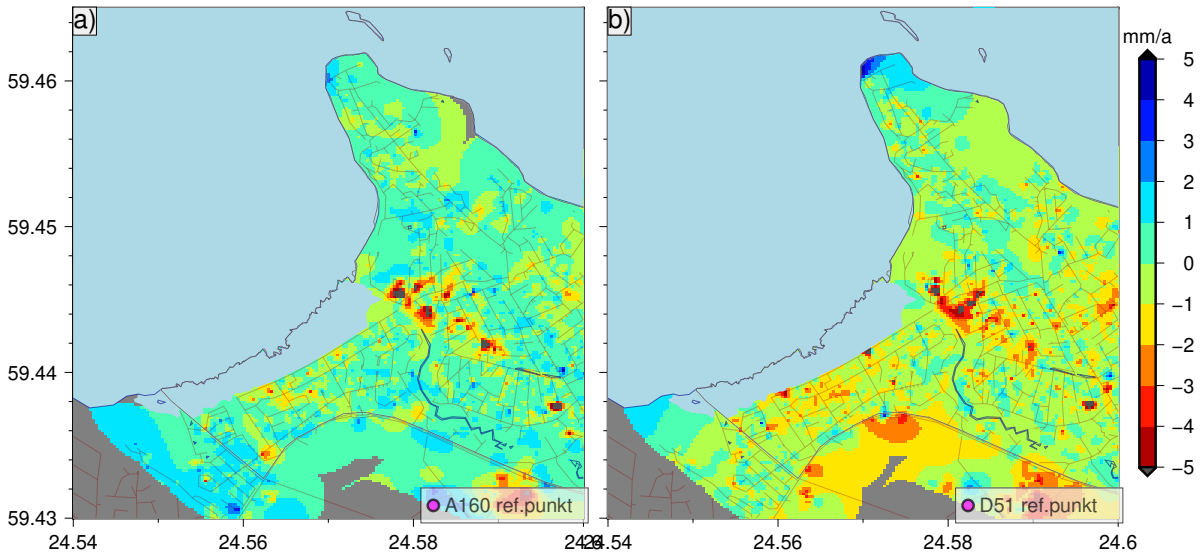


(c) **Ajaperiood 2022.10–2023.10**

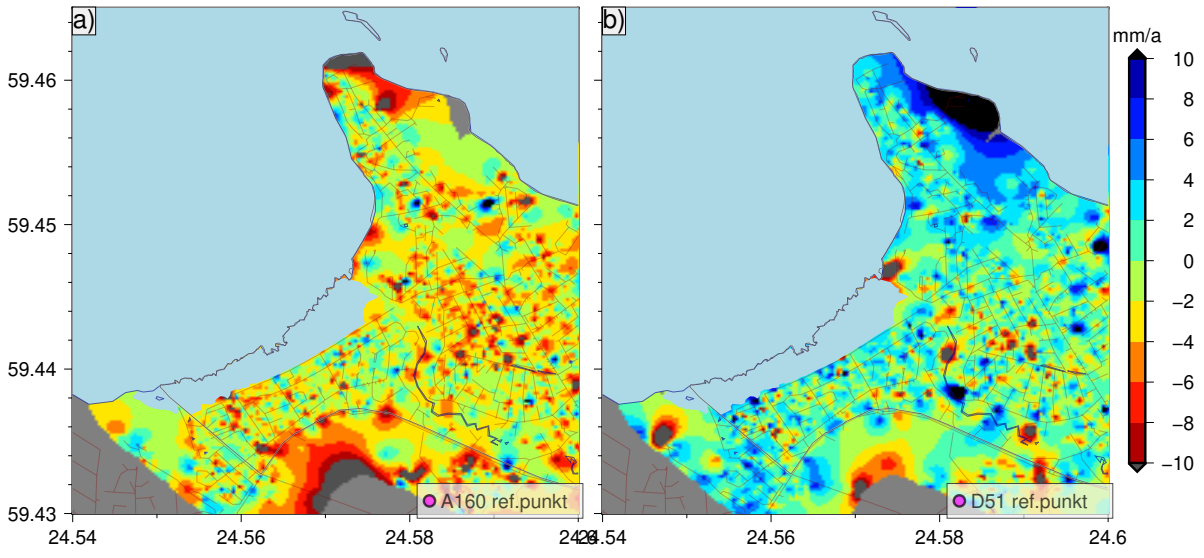
Joonis 5: **Orbiitidelt ASC-160, DESC-80 määratud LOS kiiruste võrgustatud mudelpinnad erinevatel ajaperioodidel (InSAR ref.).**



(a) **Ajaperiood 2016.06–2023.11**

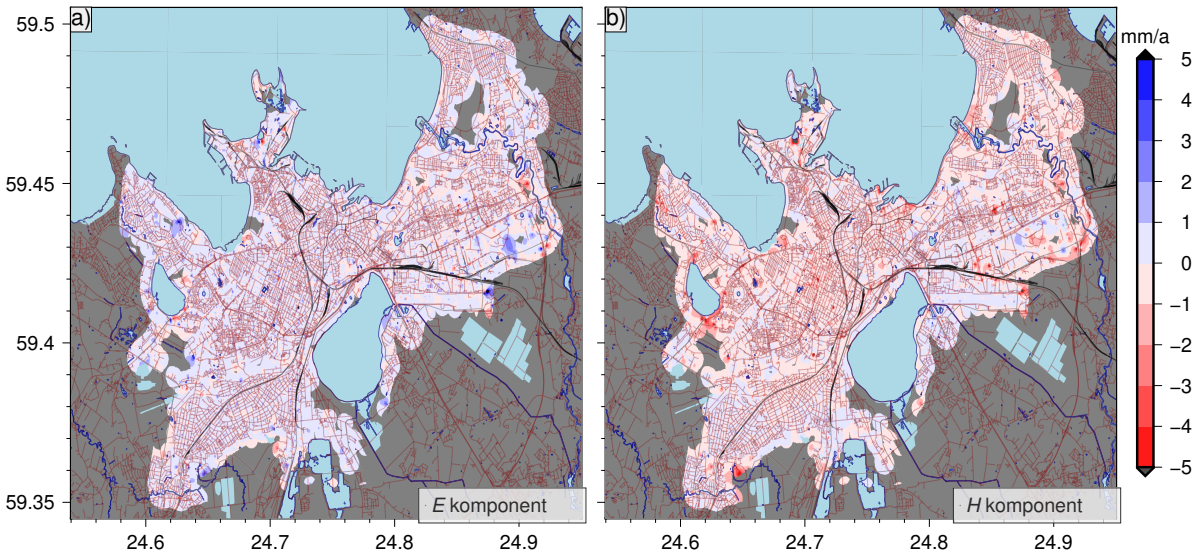


(b) **Ajaperiood 2020.10–2023.10**

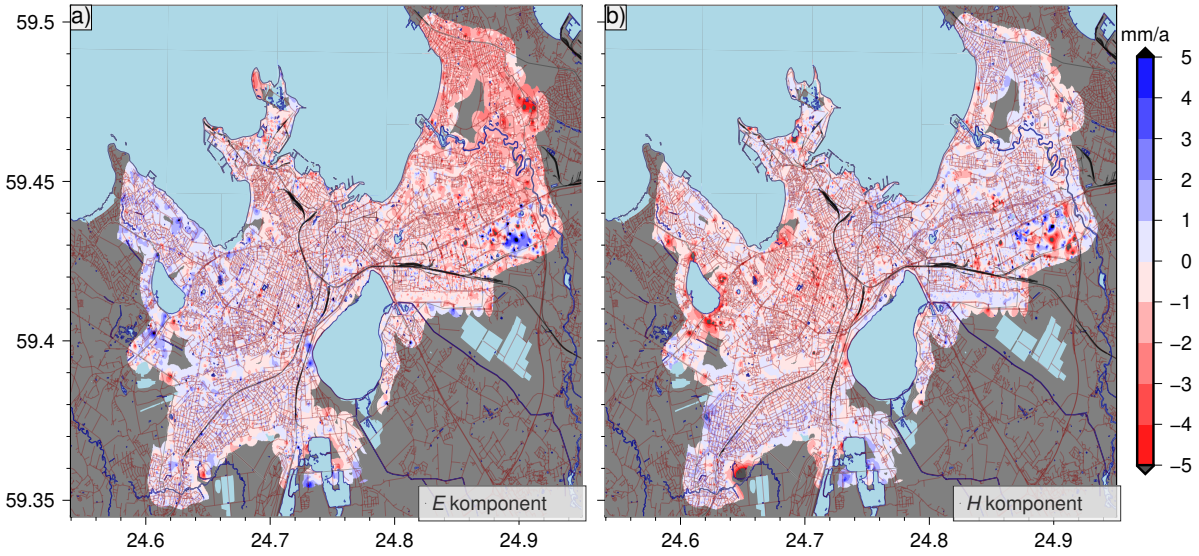


(c) **Ajaperiood 2022.10–2023.10**

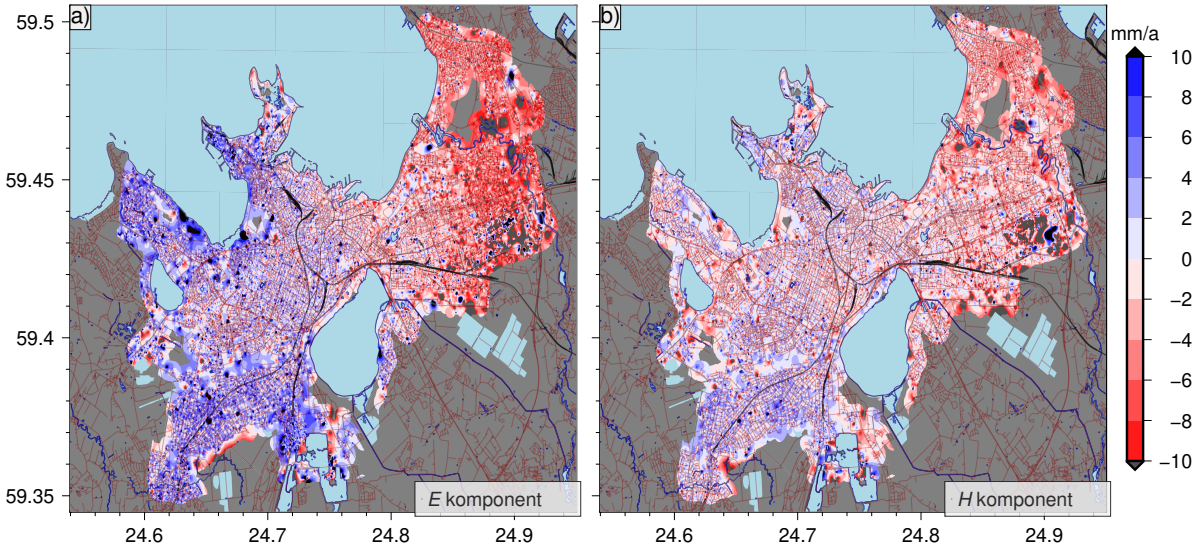
Joonis 6: **Orbiitidelt ASC-160, DESC-51 määratud LOS kiiruste võrgustatud mudelpinnad erinevatel ajaperioodidel Kakumäe lahe rannikualal (InSAR ref.).**



(a) **Ajaperiood 2016.06–2023.11**

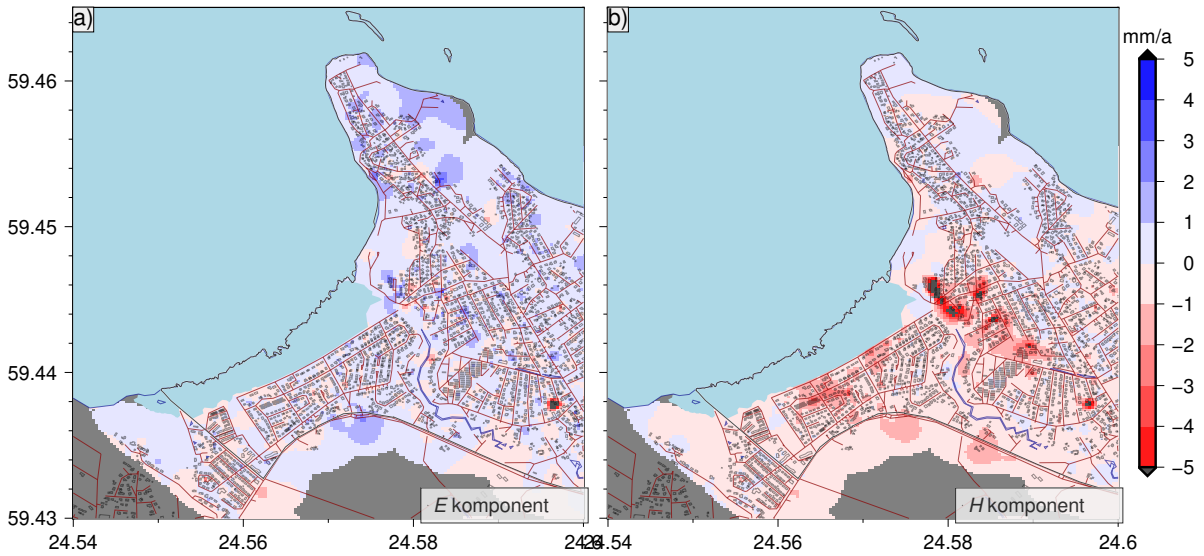


(b) **Ajaperiood 2020.10–2023.10**

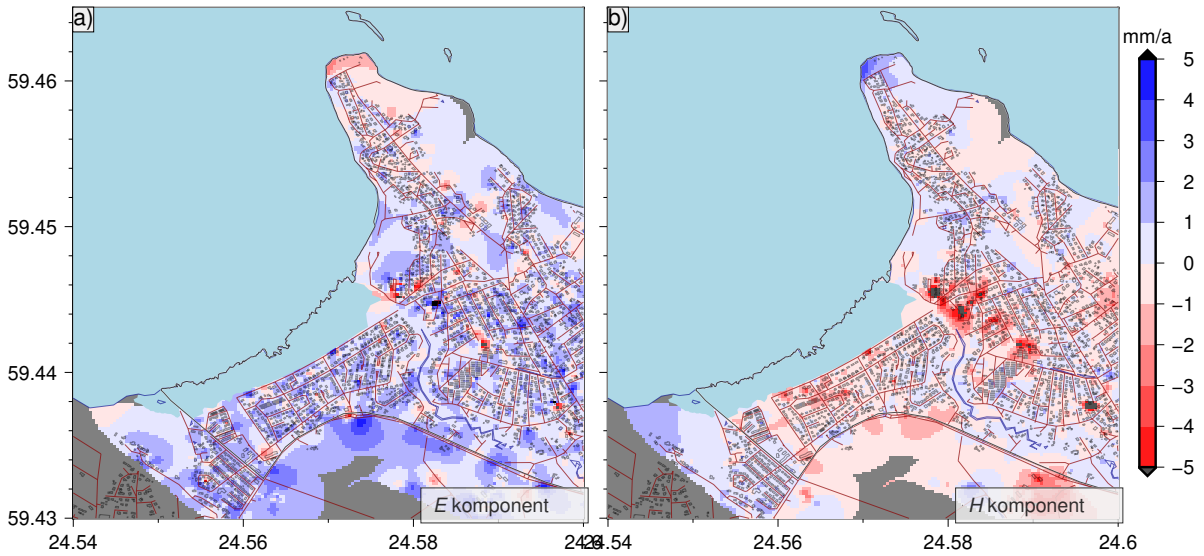


(c) **Ajaperiood 2022.10–2023.10**

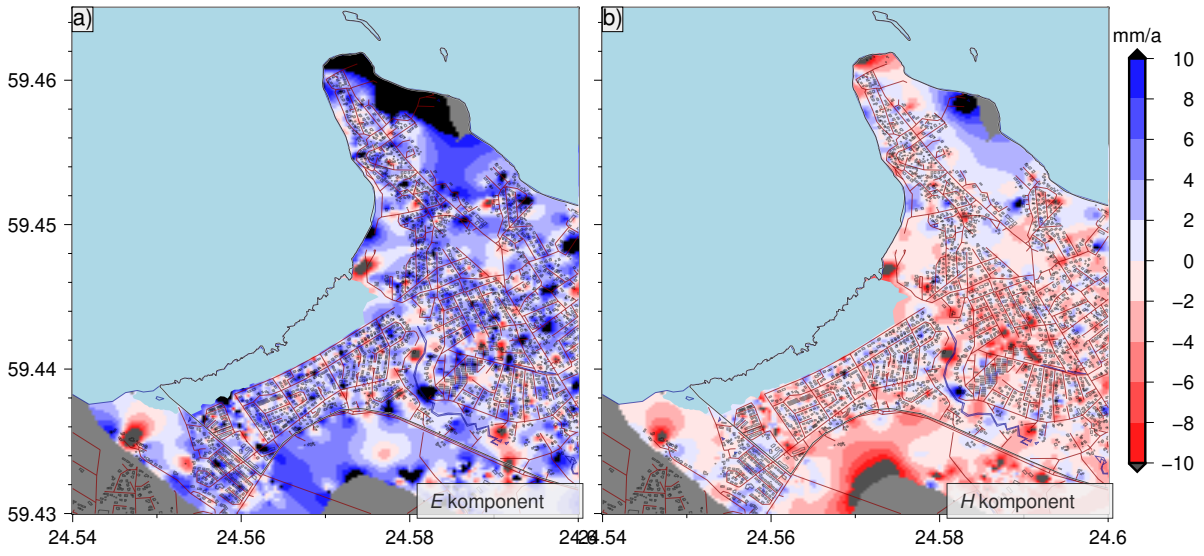
Joonis 7: **Orbiitidelt ASC-160, DESC-80 määratud E, H kiiruste võrgustatud mudelpinnad erinevatel ajaperioodidel (InSAR ref.).**



(a) **Ajaperiood 2016.06–2023.11**



(b) **Ajaperiood 2020.10–2023.10**

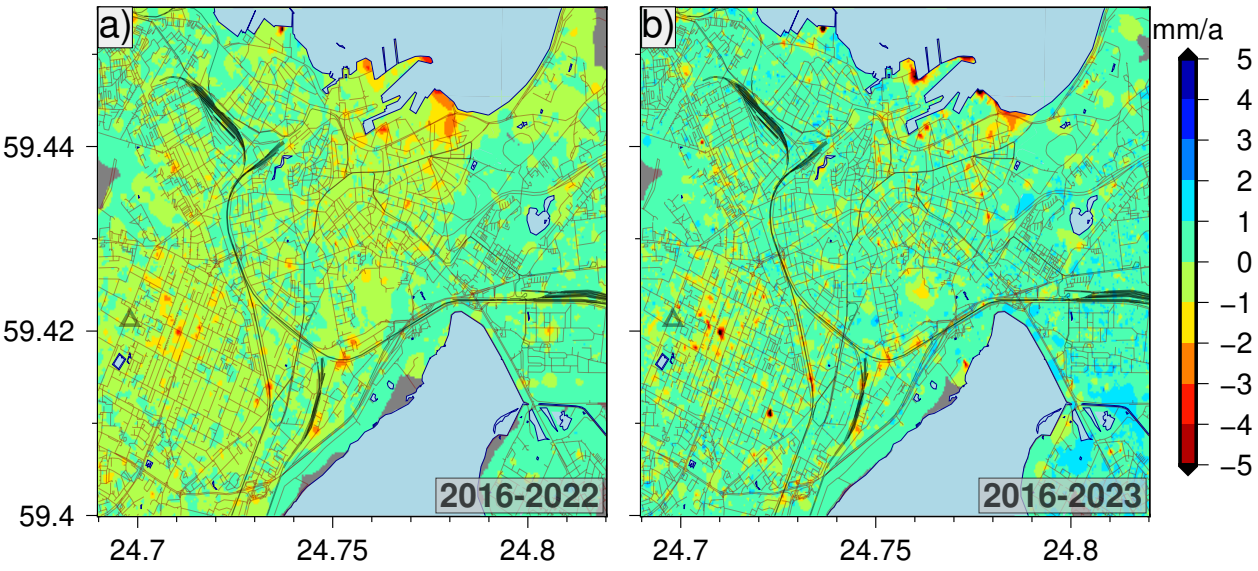


(c) **Ajaperiood 2022.10–2023.10**

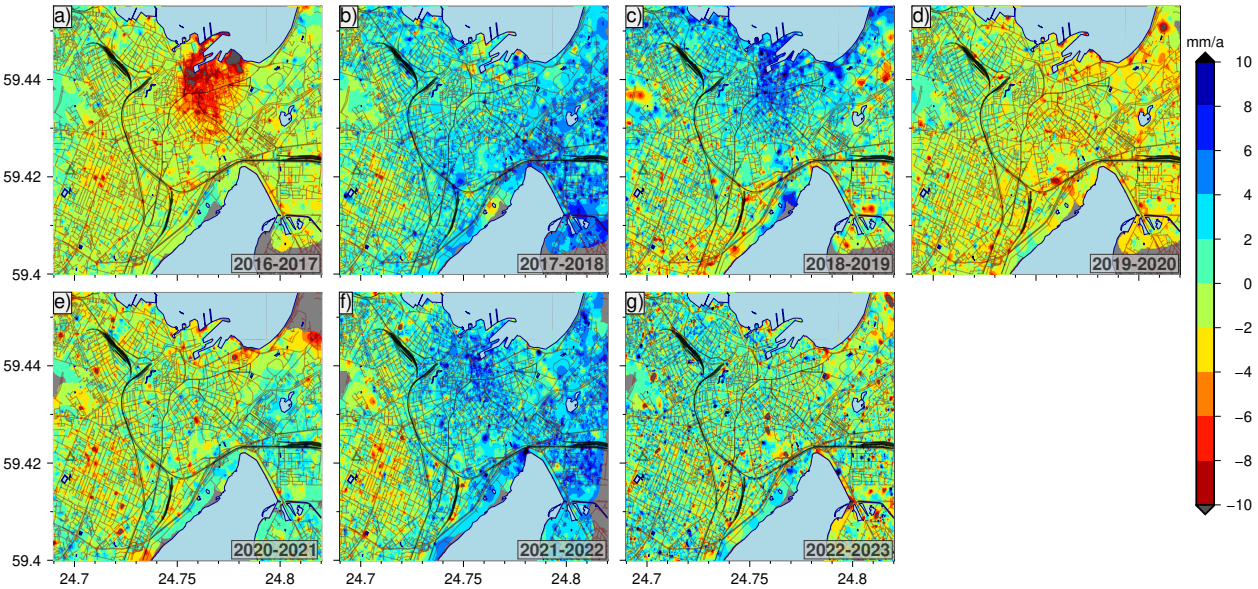
Joonis 8: **Orbiitidelt ASC-160, DESC-51 määratud E, H kiiruste võrgustatud mudelpinnad erinevatel ajaperioodidel Kakumäe lahe alal (InSAR ref.).**

2.3 Vertikaalkiiruste võrdlus varasemate tulemustega

Eelmise etapi InSAR analüüsi tulemused arvutati ainult kesklinna ja seda ümbritsevatele aladele (Oja, 2023). Seetõttu sai tulemusi võrrelda ainult sellel alal. Võrreldi ainult sarnase ajavahemikuga lahendusi, nö pikka lahendust (2016-2022 ja 2016-2023, joon. 9) ja aastaseid lahendusi (joon 10).



Joonis 9: **Vertikaalkiiruste pika-ajaliste lahenduste võrdlus Tallinna kesklinna piirkonnas (MUS2 GNSS ref.).**



Joonis 10: **Vertikaalkiiruste aastaste lahenduste võrdlus Tallinna kesklinna piirkonnas (MUS2 GNSS ref.).**

Pika-ajaliste lahenduste võrdlus näitab, et südalinnas seni domineerinud vajumise foon (kollakasrohelisega) on enamvähem stabiliseerunud nulli ümber (sinakasrohelisega). Tulemust kinnitavad aastased lahendused, kus aastatel 2016-2021 domineerinud vajumine (va 2017-2018) on alates 2021. a näidanud kerkimist või stabiliseerumist. Pika-ajaliste lahenduste põhjal võib järeldada, et suurema vajumiskiirusega alad reisi- ja lennusadama piirkondades, Reidi teel, Kristiines, Pärnu mnt ja Viadukti tn pole kuhugi kadunud ning kohati näitavad isegi kiiruse suurenemist.

2.4 Vertikaalkiiruste detailvaated

Detailsed vertikaalkiiruste kaardivaated Kakumäe lahe ja kesklinna piirkondade kohta on juba esitatud joonistel 8, 9, 10. Parema ülevaate saamiseks esitatakse veel kolm vertikaalkiiruste kaardipilti: Mustamäe–Nõmme, Põhja-Tallinn–Haabersti–Kristiine ja Pirita–Lasnamäe (joonised 11–13). Lisas L.2 esitatakse eraldi veel mitmeaastased vertikaalkiiruste lahendused, mille värviskaala muutub vahemikus ± 5 mm/a, et paremini eristada liikumisi mitmeaastaste lahenduste puhul.

Suuremaid liikumisi näitavad aastased lahendused, kuid nende puhul peab arvestama kordades suurema mürafooni, täpsemalt mõõtemääramatusega, mille keskmine jääb suurusjärku ± 2.4 mm/a. Mitmeaastaste lahenduste puhul jääb keskmine määramatus vahemikku $\pm 0.4 \ldots 0.8$ mm/a.

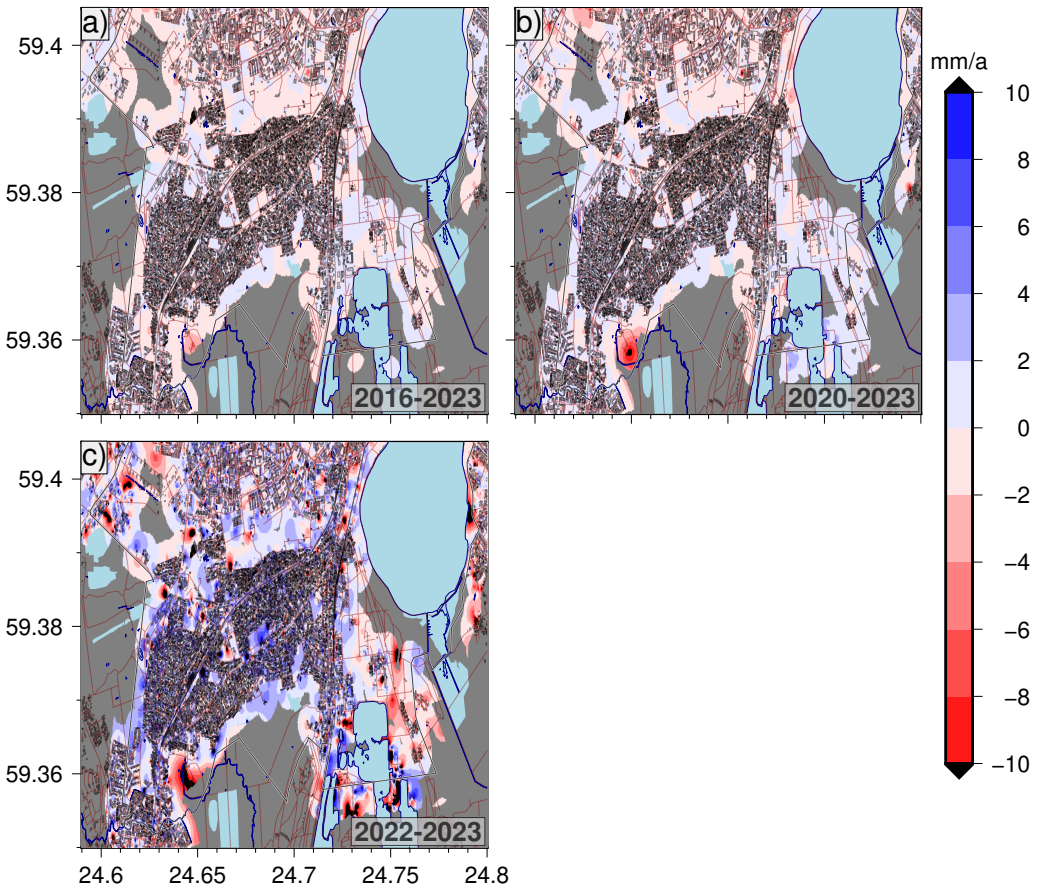
Detailsed vaated võimaldavad visuaalselt paremini eristada suuremate liikumisega alasid Tallinna linnaosades.

Näiteks Kakumäe lahe piirkonnas (joon. 8) jäävad silma järgmised piirkonnad suuremate vajumistega:

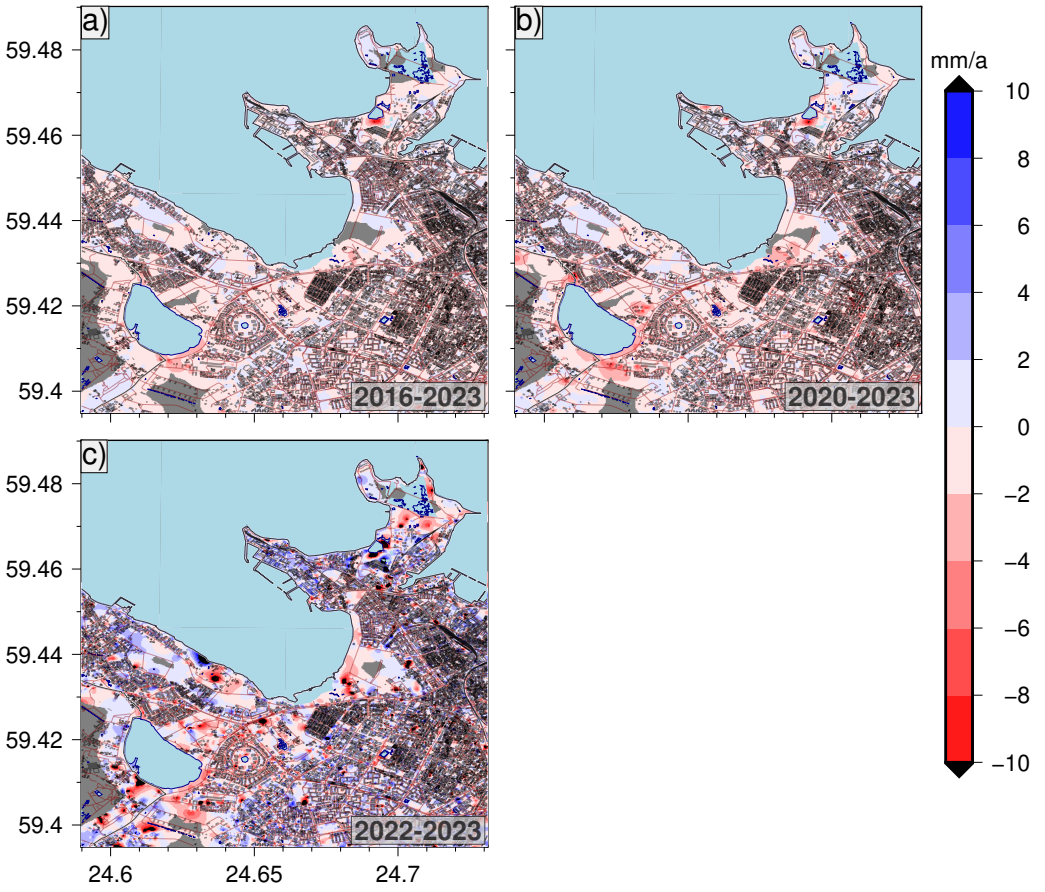
- Säina, Siia, Räime, Ojakääru tn;
- Tõnu tn;
- Rannaniidu, Tiskrevälja tn.

Erineva ajalise pikkusega lahendusi võrreldes võib märgata ka kiiruse muutusi, näiteks juba välja toodud Rannaniidu ja Tiskrevälja tänavate piirkonnas.

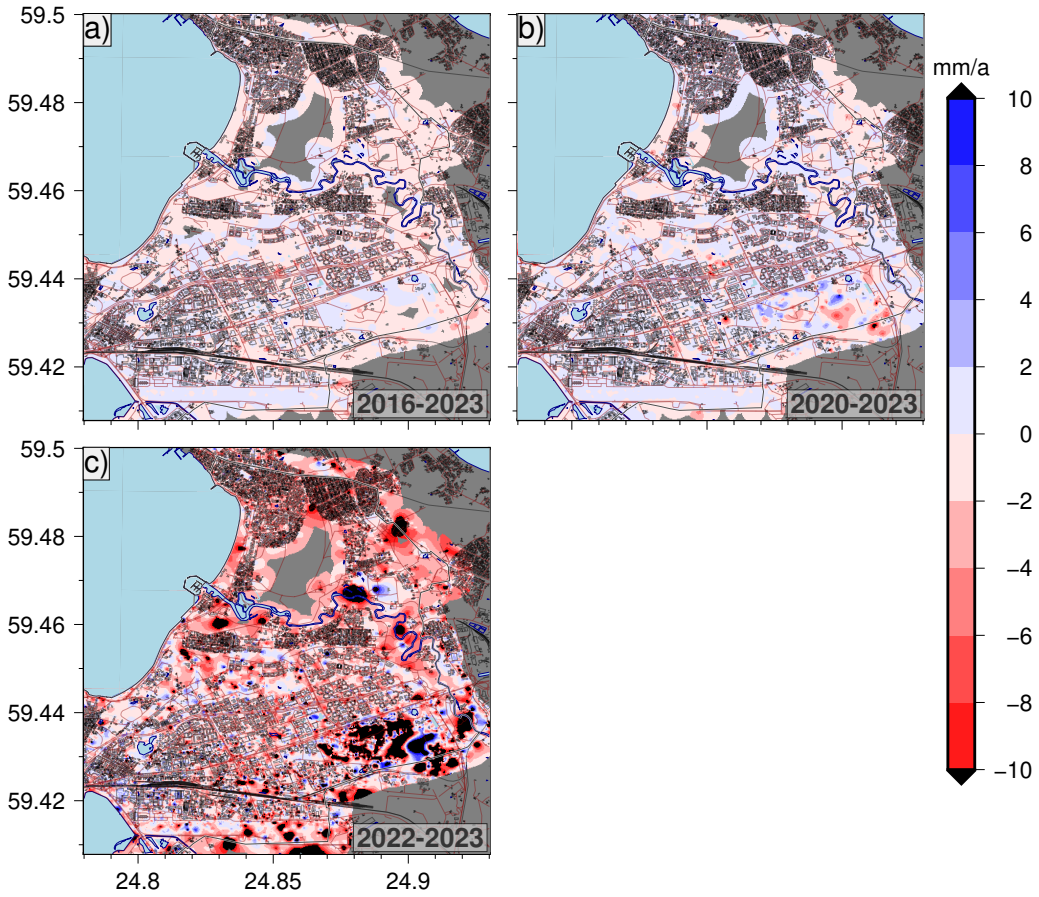
Suuri liikumisi võib märgata veel Harku järve ümbruses, Lasnamäe külje alla jäävas karjääris ja mujalgi. Viimase karjääri näite juures tuleb siiski arvestada ka mõõtmispunktide väikse arvu ja hõreda paigutusega, mis võib omakorda põhjustada interpoleerimisvigu. Punktide asukohti ja tihedust saab saab jälgida Sille.Space rakenduses, mille lingid on toodud lisas L.1.



Joonis 11: **Vertikaalkiiruste lahendused Mustamäe, Nõmme linnaosades (InSAR ref.).**



Joonis 12: **Vertikaalkiiruste lahendused Põhja-Tallinna, Haabersti, Kristiine linnaosades (InSAR ref.).**



Joonis 13: **Vertikaalkiiruste lahendused Pirita, Lasnamäe linnaosades (InSAR ref.).**

3 Kokkuvõte

Uurimistöö tulemusena arvutati PSI meetodil LOS suunalised liikumiste aegread ja kiirused PS mõõtmispunktides, samuti horisontaal- ja vertikaalsuunalise kiiruse (E, H) võrgustatud pinnad Tallinna linna haldusalas (u 413 km^2). Lähteandmeteks olid Sentinel-1 radarpildid ajavahemikust juuli 2016 – nov. 2023 ja InSAR analüüsi perioodideks juuli 2016 – nov. 2023, okt. 2020 – okt.2023 ja okt. 2022 – okt. 2023.

PS punktide LOS väärtustest arvutati ruumilise interpoleerimise meetodil LOS võrgustatud kiiruspinnad, ruumilise lahutusega 20 m. LOS pindadest tuletati omakorda horisontaalsed ja vertikaalsed kiiruspinnad (InSAR referentsi suhtes). Vertikaalsed kiiruspinnad näitavad, et liikumised jäävad mitmeaastaste lahenduste puhul enamasti vahemikku ± 5 mm/a. Aastase lahenduse vertikaalkiirused jäävad vahemikku ± 10 mm/a, kuid on paljudes piikondades ka üle selle. Samas peab aastase lahenduse puhul silmas pidama suurt mõõtemüra ehk määramatust, mille keskmine väärtus on ± 2.4 mm/a. Mitmeaastaste lahenduste puhul jääb keskmine määramatus vahemikku $\pm 0.4 \ldots 0.8$ mm/a ehk kordades väiksemaks.

MUS2 GNSS püsijaama valik referentspunktina põhjustas mõnede kiiruspindade nihkeid kuni 1.8 mm/a, mistõttu eelistati InSAR analüüsi referentspunktidel põhinevaid kiiruslahendusi (vt ptk.1.4). Omaette küsimuseks jääb, kuidas leitud nihked on seotud MUS2 püsijaama stabiilsusega. Siiski arvutati kõik kiiruspinnad ka MUS2 suhtes, et tagada kooskõla varasemate uuringutega.

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

Uuringu tulemused esitatakse tabelfailide (`*.xlsx` ja `*.shp` formaadis) ja rasterfailidena (geotiff `*.tiff` formaadis). Failide detailsemad kirjelused leiab lisas L.1. Kõik kiiruspindade kaardipildid on tööaruandes esitatud vektorformaadis, mistõttu suurendamine võimaldab detailsemat vaadet (ilma kvaliteedi languseta) ning vajadusel ka kaardivaate eksportimist kõrge lahutusega rasterfailidesse, nt `*.jpg, *.png, *.tif` pildiformaati.

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.

Gruno, A. (2020). InSAR andmetele tugineva kaugseire võimalused Tallinna kõrgusvõrgu monitooringuks. Uurimustöö, AS Datel. 30 lk.

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. (2023). InSAR kiiruste arvutus Tallinna kesklinna reeperitele 2016-2022. ja 2021-2022. a. Uurimistöö, AS Datel. 17 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.

Oja, T., Gruno, A., ja Palmas, M. (2020). InSAR kaugseire andmetele tuginevate deformatsioonide võrdlusanalüüs Tallinna kõrgusvõrgu testalas. Uurimistöö, AS Datel. 39 lk.

Lisad

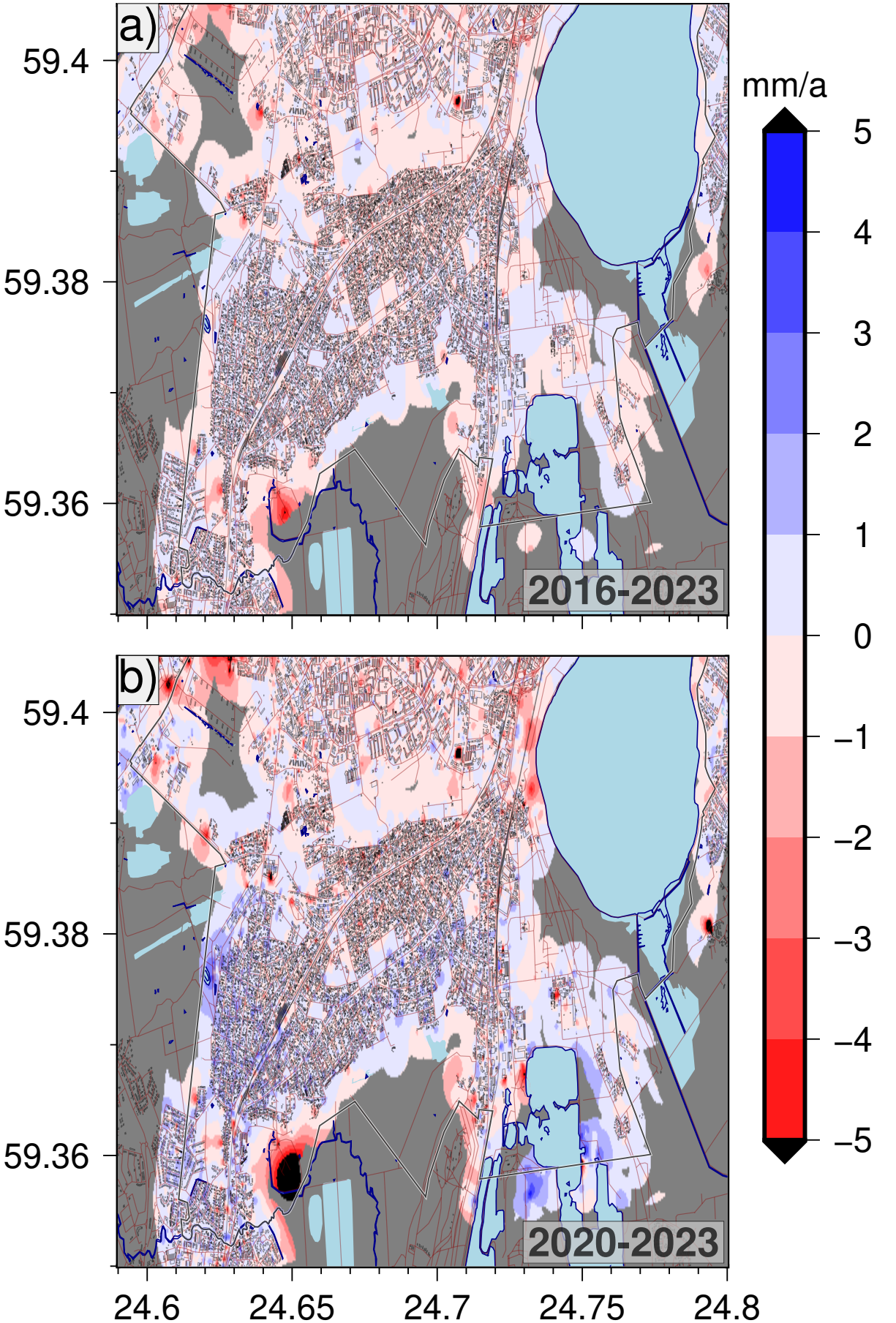
L.1 Kaasnevate failide nimekiri

1. LOS failid xlsx tabelfaili formaadis. Faili nimes on määratud orbiidi nr, vaatesuund ja ajaperiood.
   (a) Tabelfailide nimekiri:
      i. `Tallinn_InSAR_2016-2023_LOS_ASC-160.xlsx`
      ii. `Tallinn_InSAR_2020-2023_LOS_ASC-160.xlsx`
      iii. `Tallinn_InSAR_2022-2023_LOS_ASC-160.xlsx`
      iv. `Tallinn_InSAR_2016-2023_LOS_DESC-80.xlsx`
      v. `Tallinn_InSAR_2020-2023_LOS_DESC-80.xlsx`
      vi. `Tallinn_InSAR_2022-2023_LOS_DESC-80.xlsx`
      vii. `Tallinn_InSAR_2016-2023_LOS_DESC-51.xlsx`
      viii. `Tallinn_InSAR_2020-2023_LOS_DESC-51.xlsx`
      ix. `Tallinn_InSAR_2022-2023_LOS_DESC-51.xlsx`
   (b) Tabelfailide veerud:
      i. LON – punkti geograafiline pikkuskraad [°]
      ii. LAT – punkti geograafiline laiuskraad [°]
      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 $0 \ldots 1$)
      vii. STD – lineaarse kiirusmudeli jääkhälvete standardhälve [mm]
      viii. ID# – punkti ID number
2. LOS failid `shp` formaadis (pakituna `zip` formaati `*.SHP.zip`) sisaldavad sama infot mis tabelfailid:
   (a) `Tallinn_InSAR_ASC-160v2_LOS_2016-2023.shp.zip`
   (b) `Tallinn_InSAR_ASC-160v2_LOS_2020-2023.shp.zip`
   (c) `Tallinn_InSAR_ASC-160v2_LOS_2022-2023.shp.zip`
   (d) `Tallinn_InSAR_DESC-80_LOS_2016-2023.shp.zip`
   (e) `Tallinn_InSAR_DESC-80_LOS_2020-2023.shp.zip`
   (f) `Tallinn_InSAR_DESC-80_LOS_2022-2023.shp.zip`
   (g) `Tallinn_InSAR_DESC-51_LOS_2016-2023.shp.zip`
   (h) `Tallinn_InSAR_DESC-51_LOS_2020-2023.shp.zip`
   (i) `Tallinn_InSAR_DESC-51_LOS_2022-2023.shp.zip`
3. Võrgustatud vertikaalsed (H) ja horisontaalsed (E) kiiruspinnad „geotiff“ rasterformaadis (ühik mm/a), lähtudes ASC-160 ja DESC-80 orbiitide andmetest. Faili nimes kajastub ajavahemik:
   (a) `Tallinn_InSAR_2016-2023_VEL-H-vert.tiff`
   (b) `Tallinn_InSAR_2016-2023_VEL-E-hor.tiff`
   (c) `Tallinn_InSAR_2020-2023_VEL-H-vert.tiff`
   (d) `Tallinn_InSAR_2020-2023_VEL-E-hor.tiff`
   (e) `Tallinn_InSAR_2022-2023_VEL-H-vert.tiff`

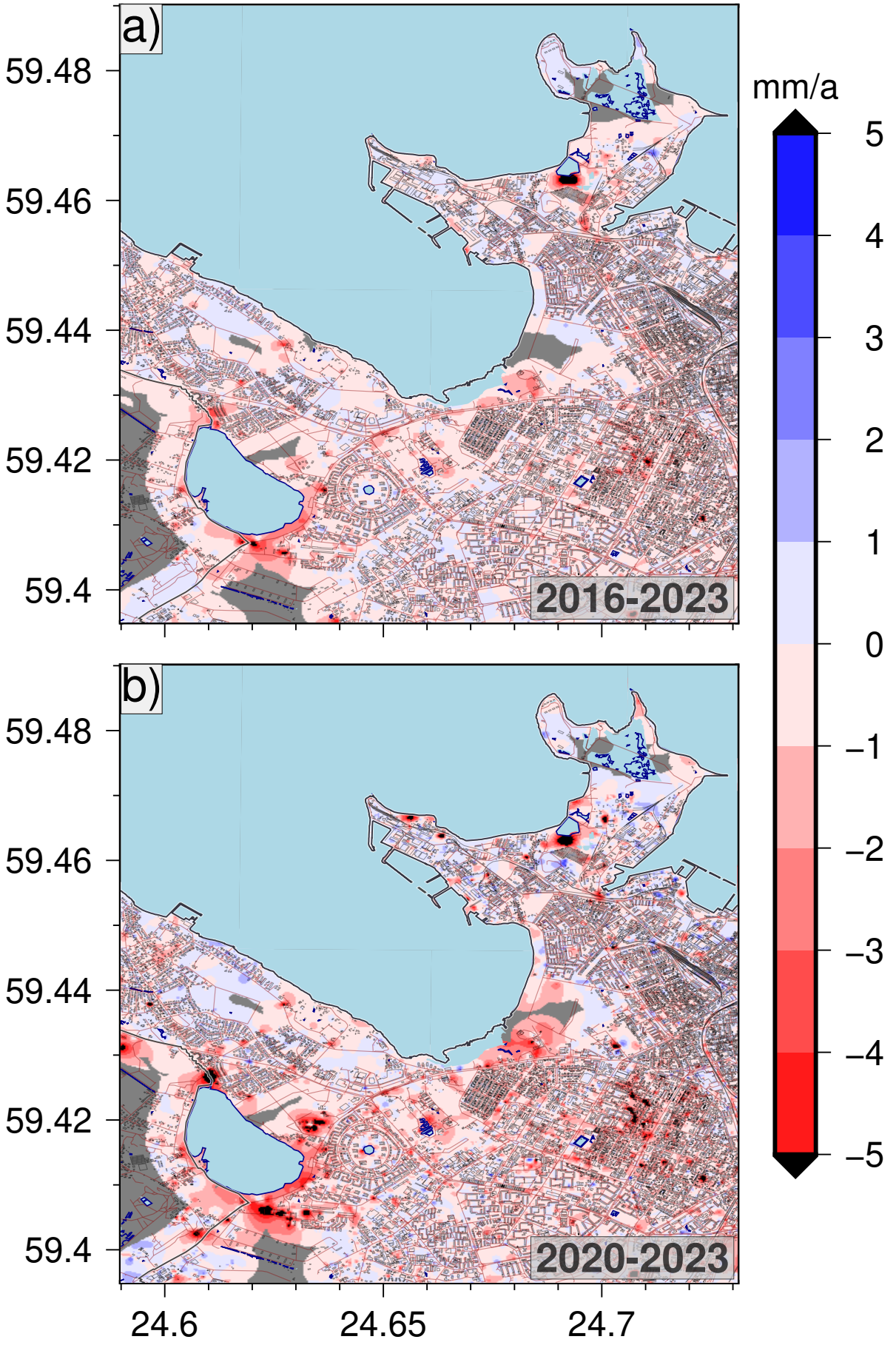
(f) `Tallinn_InSAR_2022-2023_VEL-E-hor.tiff`

4. Eelnimetatud kiiruspinnad on teisendatud ka MUS2 GNSS püsijaama referentspunktile, et tagada kooskõla varasemate analüüsi tulemustega. Nende lahenduste nimekiri kattub eelmise nimekirjaga, kuid faili nimele lisandub "`_ref-MUS2-GNSS`".
5. Võrgustatud H ja E kiiruspinnad Kakumäe lahe piirkonnale, lähtudes ASC-160 ja DESC-51 orbiitidest:
   (a) `Tallinn-Kakumae_InSAR_2016-2023_VEL-H-vert.tiff`
   (b) `Tallinn-Kakumae_InSAR_2016-2023_VEL-E-hor.tiff`
   (c) `Tallinn-Kakumae_InSAR_2020-2023_VEL-H-vert.tiff`
   (d) `Tallinn-Kakumae_InSAR_2020-2023_VEL-E-hor.tiff`
   (e) `Tallinn-Kakumae_InSAR_2022-2023_VEL-H-vert.tiff`
   (f) `Tallinn-Kakumae_InSAR_2022-2023_VEL-E-hor.tiff`
6. Sille.Space analüüside lingid orbiitide ja ajaperioodide põhiselt (vajalik eelnev sisselogimine):
   (a) ASC #160 (2016-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3915
   (b) ASC #160 (2020-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3925
   (c) ASC #160 (2022-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3927
   (d) DESC #80 (2016-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3914
   (e) DESC #80 (2020-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3924
   (f) DESC #80 (2022-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3929
   (g) DESC #51 (2016-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3916
   (h) DESC #51 (2020-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3923
   (i) DESC #51 (2022-2023): www.sille.space/app/#/map/1214/3926

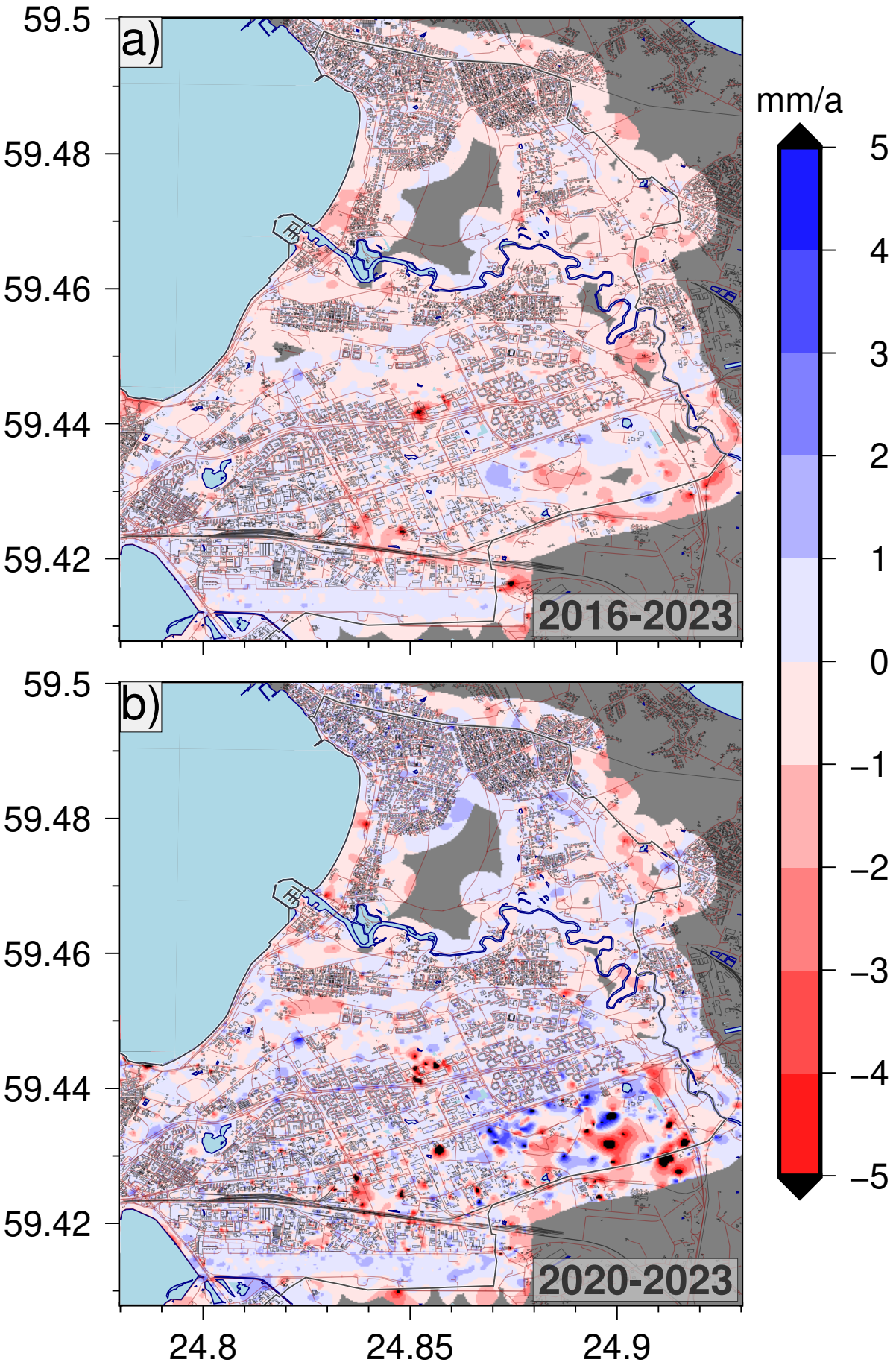
L.2 Vertikaalkiiruste detailvaated



Joonis 14: **Mitmeaastased vertikaalkiiruste lahendused Mustamäe, Nõmme linnaosades (InSAR ref.).**



Joonis 15: **Mitmeaastased vertikaalkiiruste lahendused Põhja-Tallinna, Haabersti, Kristiine linnaosades (InSAR ref.).**



Joonis 16: **Mitmeaastased vertikaalkiiruste lahendused Pirita, Lasnamäe linnaosades (InSAR ref.).**