



InSAR kosmoseseire vertikaalliikumiste võrdlusanalüüs Tallinna kõrgusvõrgul aastatel 2016-2021

(Ver. 2021-12-17)

Koostasid: T. Oja, A. Gruno
Kinnitas: O. Stimmer

Tallinn 2021



Sisukord

1	InSAR analüüs uuringualas	1
1.1	Satelliitandmed	1
1.2	Uuringuala	1
1.3	InSAR vertikaalkiiruste arvutus	2
1.3.1	LOS suunalised kiirused	3
1.3.2	LOS kiiruste mudelpinnad	3
1.3.3	<i>EH</i> liikumispindade arvutus	5
1.3.4	Suuremad liikumised Tallinnas	7
1.4	Lühiajalised vertikaalkiiruste mudelpinnad	7
2	Nivelleeritud ja InSAR vertikaalkiiruste võrdlus	9
2.1	Kiiruste erinevuste statistiline analüüs	9
2.2	Võrdluste kokkuvõte	11
3	Kokkuvõte	14
	Viited	15
	Lisad	16
L.1	Nivelleeritud ja InSAR vertikaalkiirused reeperitel	16
L.2	LOS ja 3D kiiruste geomeetrilised seosed	19
L.3	Kaasnevate failide nimekiri	20
L.4	CSV väljundfaili formaat	21
L.5	LOS kiiruste jaotushistogrammid	22
L.6	LOS kiiruste võrdlus mudelpindadega PS punktides	24
L.7	Vertikaalkiiruste jaotushistogrammid reeperitel	26
L.8	Statistiliselt olulised erinevused reeperitel	27

Enimkasutatavad lühendid:

- APS** – parand (ingl *Atmospheric Phase Screen*), mis arvutatakse deformatsiooni mudelile atmosfääri mõju kompenseerimiseks;
- ASC** – tõusva orbiidi suund (ingl *Ascending*), SAR pilt on tehtud satelliidi liikumisel lõunast põhja;
- ASI** – statistiline väärtus (ingl *Amplitude Stability Index*), mida kasutatakse PSI analüüsi piirväärtusena, et filtreerida välja analüüsiks sobivad pikslid;
- DEM, DTM** – maapinna digitaalne kõrgusmudel (ingl *Digital Elevation Model, Digital Terrain Model*);
- DESC** – langev orbiidi suund (ingl *Descending*), SAR pilt on tehtud satelliidi liikumisel põhjast lõunasse;
- E** – koordinaattelg, mille positiivne suund on ida suunas (ingl *East*), ühik m, tähistatakse ka *Y*;
- GPA** – geodeetiliste punktide andmekogu, gpa.maaamet.ee;
- GNSS** – globaalne asukohamääramise/satelliitnavigatsiooni süsteem (ingl *Global Navigation Satellite System*);
- H** – koordinaattelg, mille positiivne suund on mööda ellipsoidi normaali (ingl *Height*);
- InSAR** – interferomeetiline tehisavaradar (ingl *Interferometric Synthetic Aperture Radar*);
- IW** – SAR pildi mood (ingl *Interferometric Wide swath*);
- Lat** – geodeetiline laius ellipsoidil, ühik kraadides (ingl *Geodetic Latitude*);
- Long** – geodeetiline pikkus ellipsoidil, ühik kraadides (ingl *Geodetic Longitude*);
- LOS** – vaatesuund satelliidi sensorist peegeldava objektini maapinnal (ingl *Line-of-sight*);
- N** – koordinaattelg, mille positiivne suund on põhja suunas (ingl *North*), ühik m, tähistatakse ka *X*.
- PS** – püsiv peegeldi/hajuti (ingl *Persistent/Permanent Scatterer*);
- PSI** – SAR interferomeetria meetod, mis arvutab deformatsioonid ajas interferogrammide aegridade analüüsist (ingl *Persistent Scatterer Interferometry*);
- RP** – LOS arvutuse referentspunkt;
- SAR** – tehisavaradar (ingl *Synthetic Aperture Radar*);
- SARPROZ[©]** – tarkvara SAR andmetöötluks, sh PSI analüüsiks (www.sarproz.com);
- SD** – standardhälve (ingl *Standard Deviation*);
- SLC** – SAR pildi tüüp (ingl *Single Look Complex*), mille iga piksli kompleksarvuline väärtus esitab tagasipeegeldunud mikrolaine amplituudi ja faasi.

Sissejuhatus

Käesoleva aruande koostamisel lähtuti Tallinna Linnaplaneerimise Ameti os-
tuhanke „InSAR andmetele tuginev analüüs Tallinna testalas perioodidel
2020-2021 ja 2016-2021“ tingimustest.

Uurimistöö eesmärk on arvutada vertikaalsuunalised liikumiskiirused ja lii-
kumiste mudelpinnad etteantud testalas Tallinna haldusterritooriumil, võttes
aluseks Sentinel-1 satelliitmissiooni kaugseire andmete InSAR analüüsi tule-
mused ajavahemikele juuni 2016 – november 2021. Uurimustöö läbiviimisel,
võrdlusandmete koostamisel ja töö vormistamisel juhindutakse varasemast
aruandest Oja jt (2020).

Aruandes antakse ülevaade satelliitandmetest, uuringualast ning esitatak-
se InSAR liikumiskiiruste mudelpinnad. Järgneb vertikaalkiiruste võrdlev
analüüs Tallinna kõrgusvõrgu reeperitel. Töö lõpeb kokkuvõtte ja ettepa-
nekutega järgnevateks sammudeks.

Töö tulemused esitatakse aruandena digitaalselt, millele lisatakse andmetabel
failiformaadis *.xlsx, ning LOS ja vertikaaldeformatsioonide võrgustatud
mudelpinnad failiformaadis *.tif. LOS analüüsid tehakse kättesaadavaks
SILLE rakenduses. Aruandega kaasnevate failide lühikirjeldused on toodud
lisas L.3.

1 InSAR analüüs uuringualas

InSAR analüüs viidi läbi PSI meetodil, mida on põhjalikumalt tutvustatud varasemates uurimistöös aruannetes (Gruno, 2020; Oja jt, 2020).

Järgnevalt tutvustatakse InSAR analüüsi sisend- ja väljundandmeid, antakse ülevaade uuringualast ning objektidest ja esitatakse olulisemad tulemused nii kaardipiltide kui statistiliste hinnangute kaudu.

1.1 Satelliitandmed

Käesolevas InSAR analüüsis kasutati Sentinel-1 SAR IW SLC pilte, mis on vabalt saadaval SCIHUB andmelaos scihub.copernicus.eu. Sentinel-1 satelliit kasutab mõõtmiseks mikrolaineala sagedusega 5.405 GHz (C-riba, ingl *C-band*), millele vastab lainepikkus 5.546 cm. Tagasipeegelduv signaal jagatakse ca 5x20 m piksliteks, kus 5 m on vaatesuunas ja 20 m satelliidi liikumise suunas. Sentinel-1 missioon koosneb kahest 1A ja 1B satelliidist, mis tiirlevad samal sünkroonsel orbiidil. Ühe satelliidi mõõtmiste tsükkel on 12 päeva. Samas on Sentinel 1A ja 1B satelliitide mõõtmistsüklid omavahel sünkroniseeritud ajalise nihkega, mis tagab 6-päevase mõõtmistsükli¹.

Tabel 1: Sentinel-1A satelliitandmete parameetrid. Asimuut α (põhjasuunast päripäeva) arvutatakse suunanurgast φ (lõunasuunast vastupäeva) valemiga: $\alpha = 180 - \varphi$.

Orbiidi number	Suund	Ajavahemik	Piltide arv	Tõusunurk (°)	Suunanurk (°)	Asimuut (°)
160	Tõusev (ASC)	2016.07.01-2021.11.08	250	33.5513	-168.1109	348.1109
		2020.11.07-2021.11.08	49	33.5513	-168.1109	348.1109
80	Langev (DESC)	2016.07.08-2021.11.09	237	43.4441	-9.3921	189.3921
		2020.11.08-2021.11.09	46	43.5046	-9.3587	189.3587

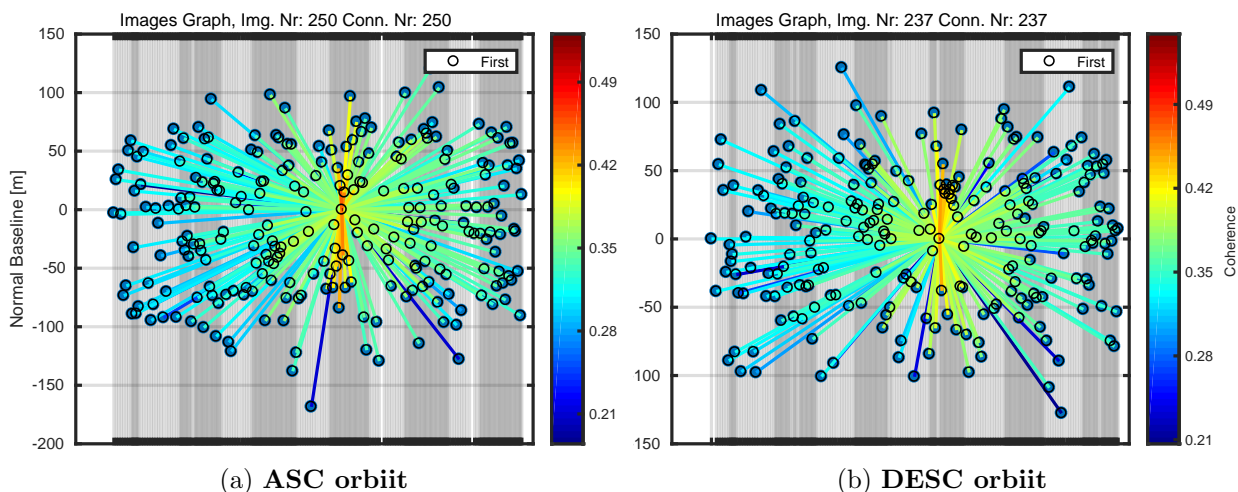
Tabelis 1 nimetatud SAR pildid kaasregistreeriti orbiitide ja ajavahemike kaupa ASC ja DESC projektidesse. PSI analüüsid viidi läbi aastatel 2016-2021 ja 2020-2021, eraldiseisvate projektidena. InSAR analüüs sisaldas interferogrammide paaride moodustamist peapildi suhtes (joonised 1 ja 2). Arvutustes rakendati kõrgusmudelina 10 m eraldusvõimega DTMi, mis on koostatud aerolaserskaneerimine meetodil LiDAR-mõõdistuste tulemusena ja alla laetud Maa-ameti geoportaalist 2019. a (geoportaal.maaamet.ee).

Deformatsioonid arvutati PSI meetodi abil punktidele, kus amplituudi stabiilsusindeksi (ASI) ja ruumilise koherentsuse summa (ASI+SpC) oli väärtusega ≥ 1.4 . Huvialale arvutatud APS parandite jaoks kasutati sisendparameetri ASI+SpC väärtusi ≥ 1.4 . Analüüside väljundandmetest filtreeriti välja arvutuspunktid, kus ajaline koherentsus < 0.7 . Ruumilist koherentsust hinnati eraldi MST graafi kaudu, koos “MT Adaptive” filtriga, nende kohta detailsema info leiab SARPROZ tarkvara manuaalist (sarproz.com/manual).

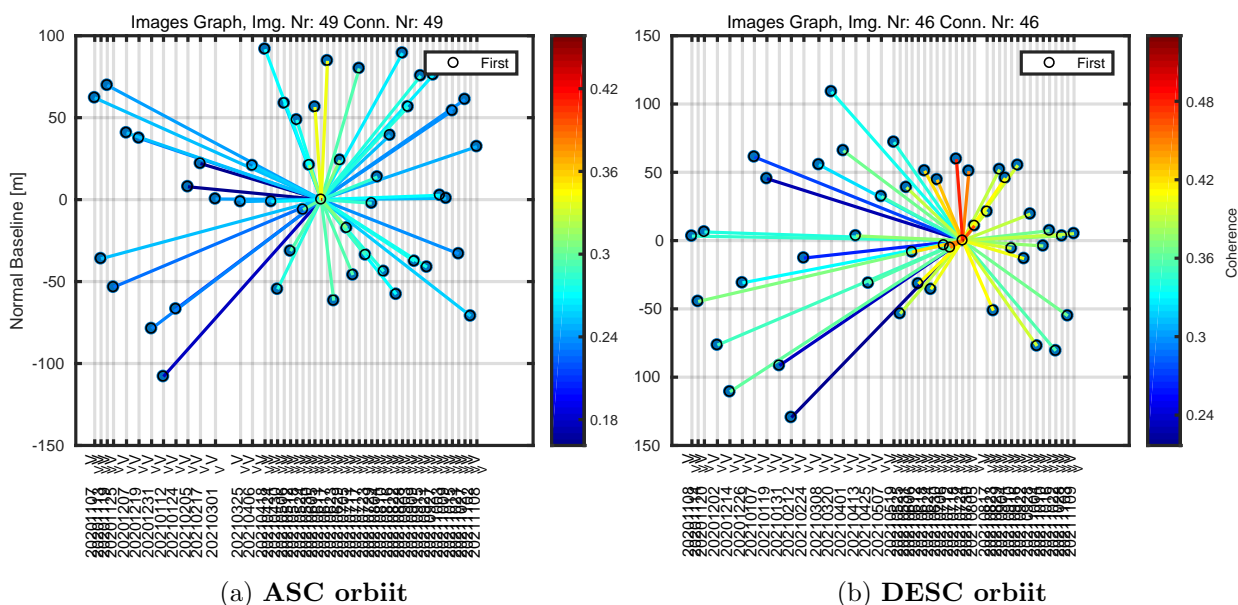
1.2 Uuringuala

Uuringuala Tallinna haldusterritooriumil ehk täpsemalt kõrgusvõrgu testala suurus on määratud uurimise all olevate 116 reeperite asukohtadega (joon. 3), mis põhiosas jäävad kesklinna

¹Põhjapoolkera talvisel perioodil üks satelliitidest lülitatakse jääseire vaatlusrežiimi, mistõttu sel ajal jääb mõõtmistsükliks 12 päeva.



Joonis 1: Analüüsiks moodustatud interferogrammide paarid peapildi suhtes ajaperioodil 2016.07-2021.11.

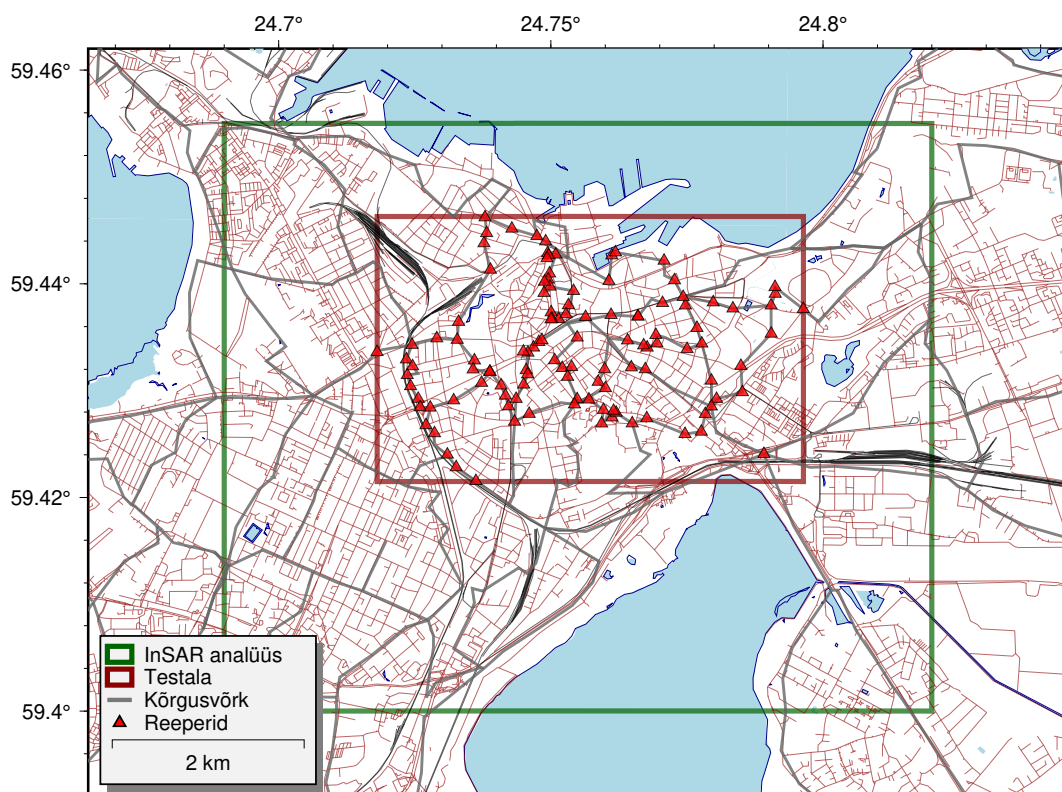


Joonis 2: Analüüsiks moodustatud interferogrammide paarid peapildi suhtes ajaperioodil 2020.11-2021.11.

alasse. InSAR analüüsi ala valikul lähtuti varasemast tööaruandest. Käesolevas töös analüüsi ala veidi laiendati, võttes arvesse PSI meetodiga arvatud andmepunktide ruumilist jaotust (vt ptk 1.3.1).

1.3 InSAR vertikaalkiiruste arvutus

Sisendandmeteks võeti InSAR andmeanalüüsi järgselt eksporditud LOS andmed (*.csv fail, vt Lisa L.4), kus lisaks koordinaatidele ja muule infole esitati analüüsitud PS punktide/pikslite LOS-suunalised kiirusväärtused (veerg „VEL“) analüüsi referentspunkti (RP) suhtes. Samuti kaasati kiiruste standardhälbed (veerg „SIGMA VEL“), et hinnata edasiste arvutustulemuste määramatusi ja kaasata neid kaaludena ka mudelpindade võrgustamisse.



Joonis 3: Ülevaatekaart Tallinna haldusterritooriumist, kõrgusvõrgu käikudest ja käesoleva töö uuringualadest. Siin ja edaspidi aluskaart: Maa-amet 2020.

1.3.1 LOS suunalised kiirused

Arvutusse kaasati kahelt vastassuunaliselt orbiidilt mõõdetud LOS andmed (joon. 4, 5), nimetades need LOS_1 (vastab ASC ehk tõusvale orbiidile) ja LOS_2 (DESC ehk langev orbiit). LOS andmed arvutati pikale 2016.06–2021.11 ajaperioodile (pikkusega 5.4 aastat), ning lühemale 2020.11–2021.11 perioodile (1 aasta). Siin ja edaspidi on kasutatud ajahetke formaati aaa.kk.

PSI punktide LOS kiiruste jaotushistogrammid analüüsi alas koos statistikaga on esitatud lisa L.5.

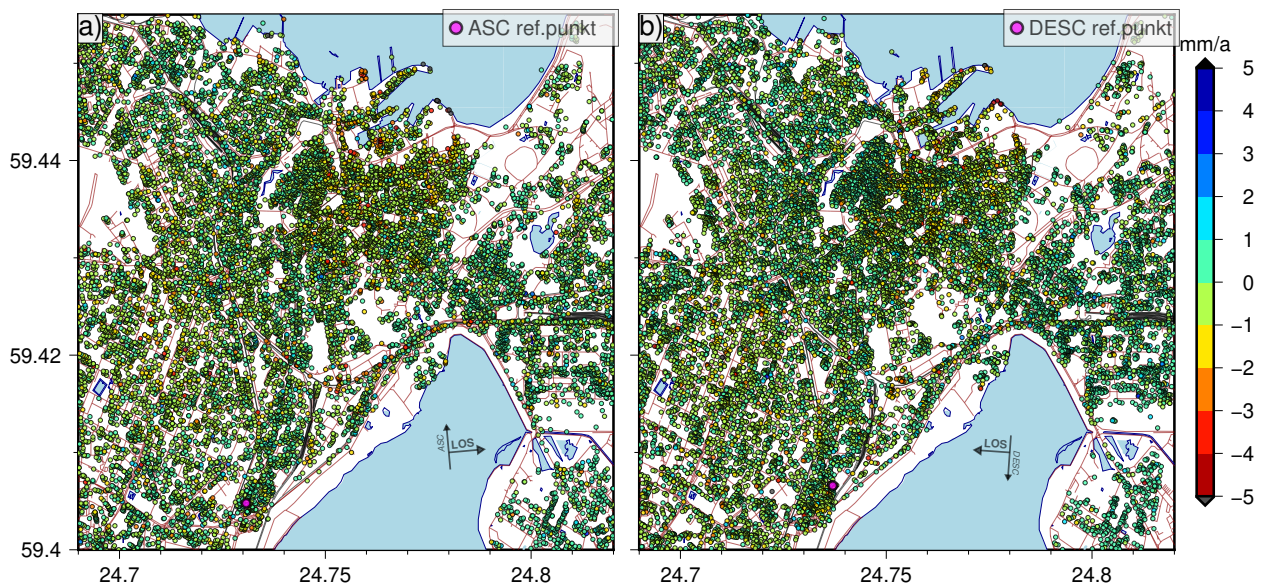
Ilmneb, et LOS kiirused on nii tõusva kui langeva orbiidi puhul jäävad pika analüüsi korral enamasti ± 5 mm/a piiresse, lühikese analüüsi puhul ± 10 mm/a.

1.3.2 LOS kiiruste mudelpinnad

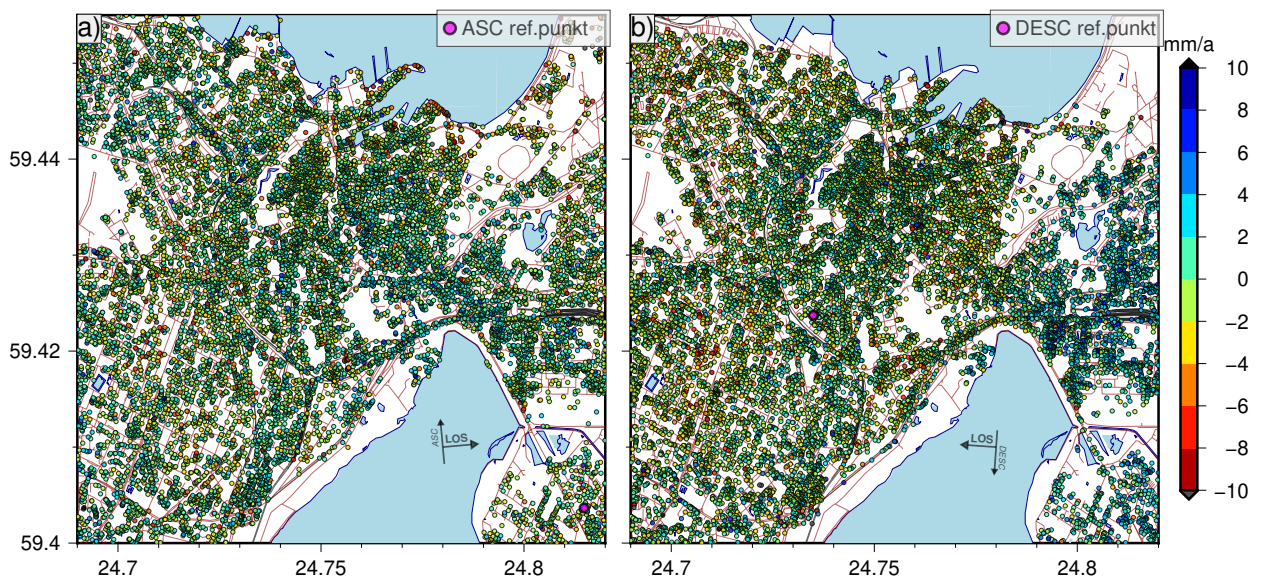
Mudelpindade moodustamiseks võrgustati LOS_1 , LOS_2 punktandmed (kiirused), rakendades 2D splinepinda (tarkvara GMT6² moodul `gmt surface`). Enne võrgustamist keskmistati (`gmt blockmean`) LOS andmed üle võrgu sammuga $dLon/dLat = 1.44''/0.72''$ (L-EST97 tasapinnal vastavalt $\approx 23/22$ m)³, kusjuures keskmistamisel kaasati kaaludena kiiruste standardhälbed. Antud võrgustamise meetodi juures on oluline fikseerida veel splinepinna jäikust

²GMT – vabatarkvara geoandmete töötlemiseks ja analüüsiks, vt generic-mapping-tools.org.

³Erinevad sammude väärtused laius/pikkuse suundades võtavad arvesse meridiaanide koonduvust ellipsoidi pooluste suunas.



Joonis 4: PS punktide LOS_1 (ASC), LOS_2 (DESC) suunalised kiirused InSAR analüüsist ajaperioodile 2016.06–2021.11. Siin ja edaspidi on näidatud nii analüüsi referentspunktide asukohad kui orbiitide suunad (vektor) koos nende suhtes paremale jäävate vaatesuundadega.

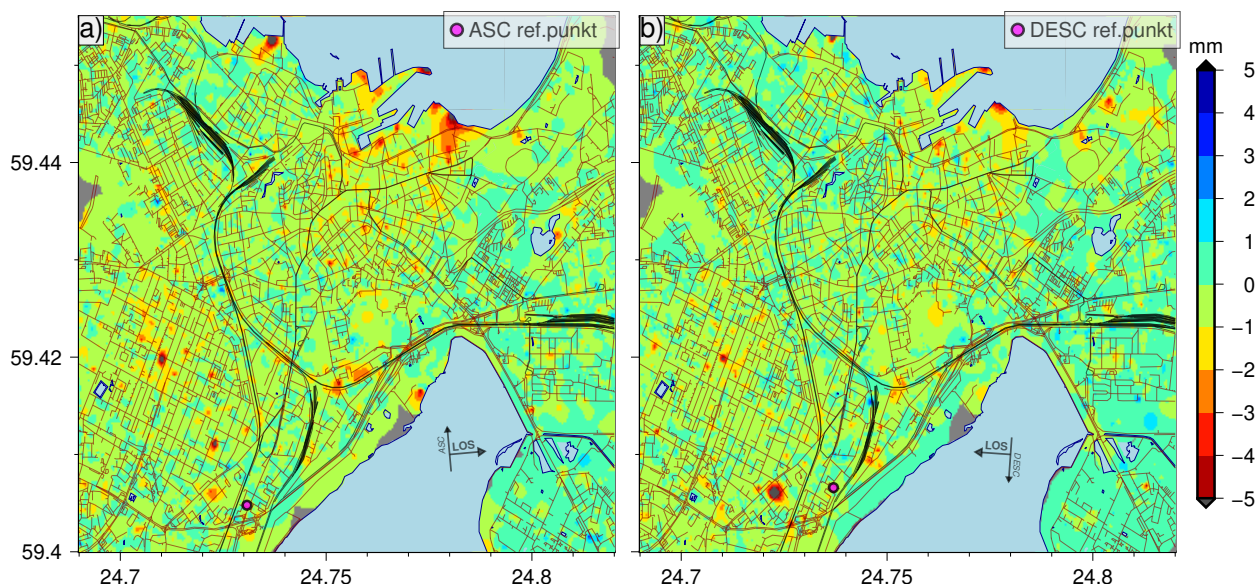


Joonis 5: PS punktide LOS_1 (ASC), LOS_2 (DESC) suunalised kiirused InSAR analüüsist ajaperioodile 2020.11–2021.11.

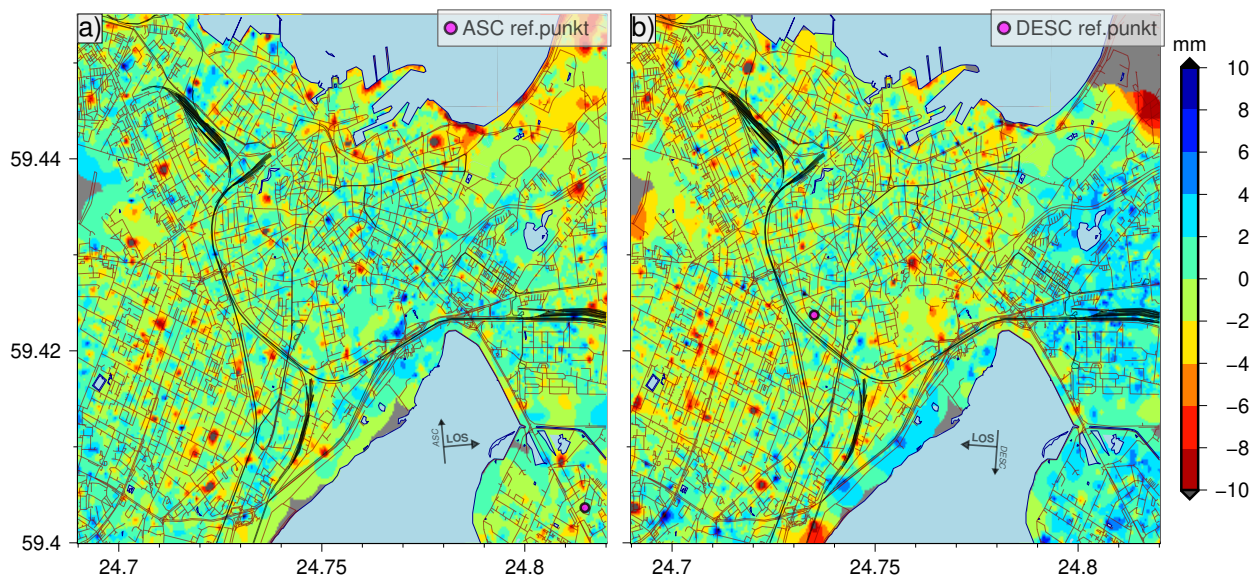
kirjeldatavat parameetrit T (reaalarv vahemikus 0...1), mis käesolevas arvutuses fikseeriti $T = 0.3$. Samade parameetritega võrgustati ka LOS kiiruste standardhälvete väärtused.

Kiiruste mudelpindade moodustamisel filtreeriti välja võrgustiku punktid, mis mõõtmispunktidest jäävad rohkem kui 300 m kaugusele, et mitte näidata kiiruspindasid aladele, kus interpoleerimise/ekstrapoleerimise vead on suured.

LOS kiiruste võrgustatud mudelpindade sisemist täpsust (andmete võrdlus mudelpinnaga) kirjeldab lisa L.6 esitatud jääkhälvete kaardipildid ja histogrammid. Histogrammide põhjal on mudelpindade sobivus sisendandmetega ± 0.3 mm/a pika (2016-2021) lahenduse korral, ja ± 1.2 mm/a lühikese (2020-2021) lahenduse korral.



Joonis 6: InSAR mõõtmistest arvatud LOS_1 (ASC), LOS_2 (DESC) suunised kiiruste mudelpinnad (2016.06–2021.11).



Joonis 7: InSAR mõõtmistest arvatud LOS_1 (ASC), LOS_2 (DESC) suunised kiiruste mudelpinnad (2020.11–2021.11).

1.3.3 *EH* liikumispindade arvutus

Asjaolu, et mõõtmise LOS suunal on ühemõõtmeline (1D), ei võimalda selle teisendamist kolmemõõtmeliseks (3D) liikumiseks (N , E , H suundadel). Kuna Sentinel-1 satelliidi tiirlemisorbiit on peaaegu polaarne⁴, siis jääb paratamatult madalaks põhja-lõunasuunalise komponendi (N) määramise täpsus. Seetõttu N komponenti käesolevas InSAR analüüsis ei arvutatud, nii nagu ka varasemates analüüsid.

Ida-lääne (E) ja vertikaalsuunalise (H) kiiruse (v) arvutamiseks LOS kiirustest kahelt vastassuunaliselt ASC e $LOS_1 = L_1$ (kiirus v_{L_1}) ja DESC e $LOS_2 = L_2$ (kiirus v_{L_2}) orbiidilt

⁴Sentinel-1 orbiidi elemendid/parameetrid: inklinatsioon 98.18° , periood 98.6 m ja apogeess kõrgus 693 km.

rakendati valemit

$$\begin{bmatrix} v_E \\ v_H \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} v_{L1} \\ v_{L2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kus M^{-1} on 2x2 transformatsioonimaatriksi M (transformeerimaks $E, H \rightarrow \text{LOS}$)

$$M = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \cos \varphi_1 & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 \cos \varphi_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

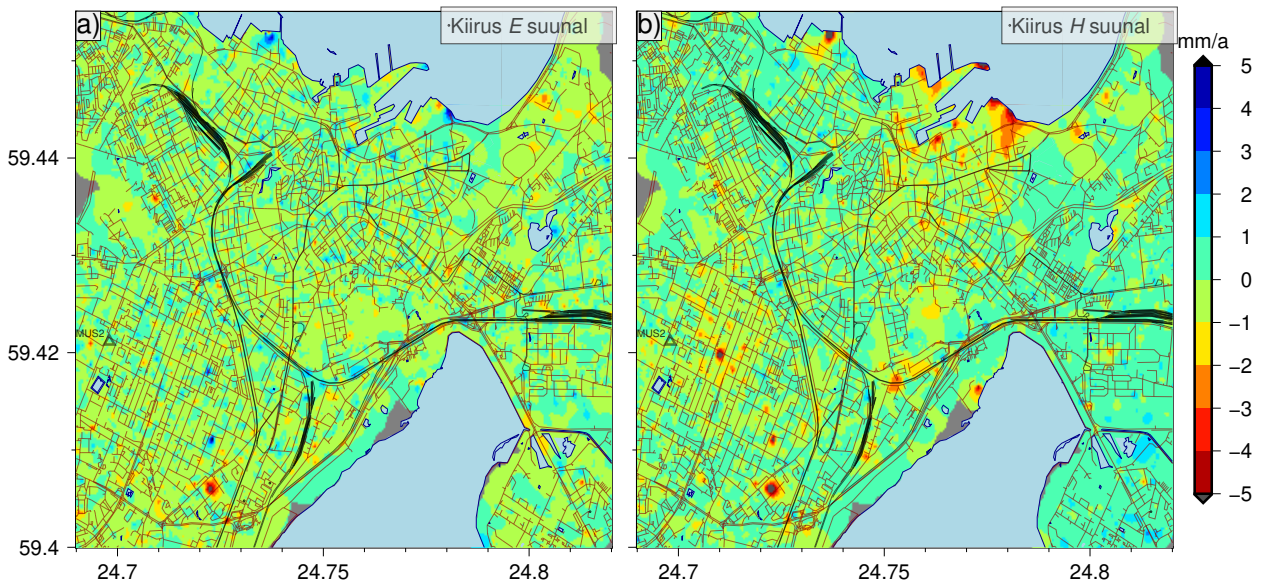
pöördmaatriks. Satelliitide orbiitide parameetrid maatriksi M moodustamiseks on toodud tabelis 1. Valemitega kirjeldatud geomeetrilisi seoseid ilmestavad skemaatilised joonised lillas L.2.

Kiiruspindade referentspunktiks (kus kiirused $v = 0$ mm/a) valiti geodeetiline GNSS püsijaam **MUS2** Maa-ameti peahoone katusel, mille geodeetilised koordinaadid ja kõrgus on vastavalt: Lat = 59.42115°, Long = 24.69803°, $h = 44.538$ m (gpa.maaamet.ee/?refnr_id=227321). Selline RP valik võimaldab vajadusel siinesitatud kiiruspinnad lihtsalt teisendada kiirusteks riiklikus (EUREF-EST97) või globaalses referentsraamistikus (ITRF, IGS). Näiteks on MUS2 3D kiirused⁵ Euraasia laama suhtes ajavahemikus apr. 2012 – dets. 2021 (9.6 a) lehel geodesy.unr.edu globaalses referentsraamistikus IGS14 on $v_E = -0.17 \pm 0.19$ mm/a ja $v_H = 3.14 \pm 0.79$ mm/a.

InSAR põhised kiiruspinnad saab nüüd teisendada IGS14 raamistikku, liites kiiruspinna võrgustiku iga punkti väärtusele MUS2 vastava komponendi kiirusväärtuse. Teisisõnu, kiiruspinna nihutatakse konstandi võrra vajalikus suunas.

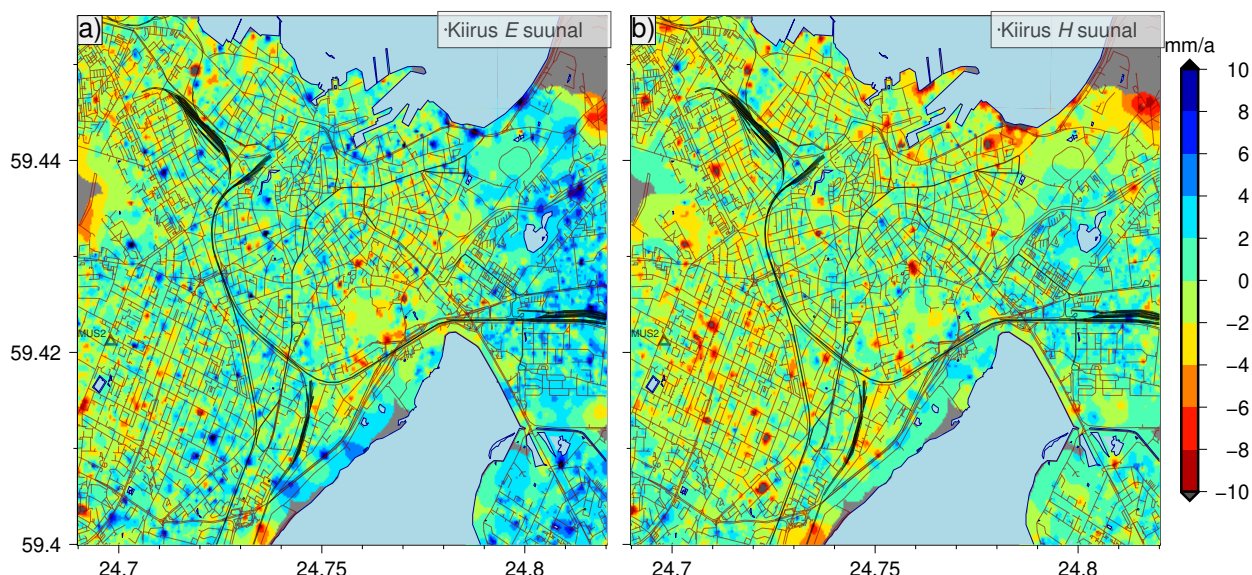
Valemiga (1) arvatud E, H kiiruspindade kaardipildid on esitatud joonistel 8, 9. Vertikaal- ehk H kiiruspinna kõrval võiks huvi pakkuda ka horisontaal- ehk E -kiiruspind, mis näiteks võrdlusanalüüsis plaanilise võrgu lahendustega ja linna planeerimises üldisemalt võivad samuti kasulikuks osutada.

Edaspidi tulevad vaatluse alla ainult vertikaalkiiruste lahendused.



Joonis 8: InSAR mõõtmistest arvatud E, H suunalised kiiruste mudelpinnad (2016.06–2021.11).

⁵Koordinaatide aegread arvutati PPP meetodil GipsyX tarkvaraga ja kiiruste arvutus MIDAS meetodiga, vt täpsem info geodesy.unr.edu.



Joonis 9: InSAR mõõtmistest arvatatud E , H suunalised kiiruste mudelpinnad (2020.11–2021.11).

E , H kiiruste standardmääramatused hinnati valemiga

$$\begin{bmatrix} D(v_E) \\ D(v_H) \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} D(v_{L1}) \\ D(v_{L2}) \end{bmatrix} (M^{-1})^T, \quad (3)$$

kus sisendiks on LOS kiiruste dispersioonid (standardhälbed ruudus) $D(v_{L1}) = u^2(v_{L1})$, $D(v_{L2}) = u^2(v_{L2})$ ja väljundiks E , H kiiruste määramatused $u(v_E) = \sqrt{D(v_E)}$, $u(v_H) = \sqrt{D(v_H)}$. Valem tuletati vastavalt liitmääramatuse hindamise meetodikale (vt www.bipm.org, en.wikipedia.org/wiki/Propagation_of_uncertainty). E , H kiiruste standardmääramatuste pinnad on arväärtuste poolest üsna homogeensed, mistõttu kaardipiltidena neid ei esitata.

1.3.4 Suuremad liikumised Tallinnas

InSAR kiiruse pika-ajalise lahenduse põhjal (joon. 8) võib Tallinnas välja tuua mitmed piirkonnad, kus esineb suuremaid 4-5 mm/a või üle selle liikumisi:

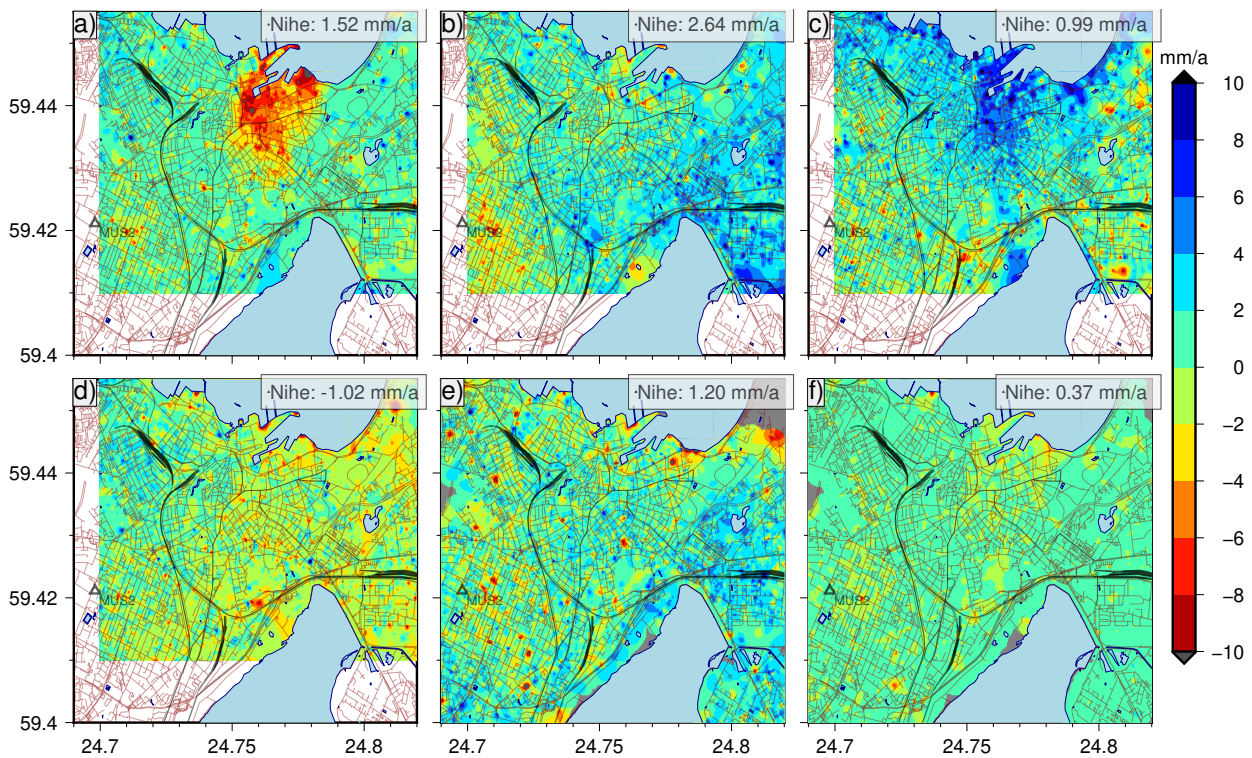
- Lennusadam
- Reisisadama piirkond
- Nautica keskus
- Reidi tee, Pikksilma, Tuukri tänavad
- Kristiines Tedre tn 61, 63, 65
- Veerenni 40a, 53a
- Tondi tn 53 (Tondi kasarmud, Tondi mägi)

1.4 Lühiajalised vertikaalkiiruste mudelpinnad

Lisaks uutele vertikaalkiiruste pindadele esitame uuesti ka varasemalt arvatatud lühikeste analüüside kiiruspinnad, mis võimaldab moodustada ühtse lahenduste aegrea (joon. 10).

Kuna MUS2 püsijaam jääb varasemates (2016-2020. a) lahendustes napilt võrgustamisalalt välja, siis kiiruste ühtlustamisel lähtuti püsijaamale lähimast võrgustiku sõlmpunktist (u 117 m idasuunas). Võrgustatud mudelpindadele lisati konstantne nihe selliselt, et lähim võrgustiku punkt kui RP sai kiirusväärtuse $v_H = 0$ mm/a. Selline referentspunkti valik nihutas veidi ka uute kiiruspindade lahendusi. Vastavad nihked on esitatud joonisel 10.

Lahendustest eristuvad selgelt ajavahemikud 2016-2017 (a) ja 2018-2019 (c), vajumiskiirusega 10 mm/a ja üle selle kesklinnas ning hilisema tagasiliikumisega. Pika-ajaline lahendus (f) näitab, et kerkimine kesklinnas pole vajumist täielikult kompenseerinud. Vajumised domineerivad ka Kristiine linnaosas.



Joonis 10: InSAR kiiruste lühiajaliste lahenduste aegrida koos pika-ajalise lahendusega (f) Tallinna kesklinnas. Ajavahemikud: a) 2016-2017, b) 2017-2018, c) 2018-2019, d) 2019-2020, e) 2020-2021 ja f) 2016-2021.

2 Nivelleeritud ja InSAR vertikaalkiiruste võrdlus

Võrdleva analüüsi läbiviimiseks reeperitel interpoleeriti reeperite asukohtadesse InSAR vertikaalkiirused, lähtudes võrgustatud mudelpindadest (joon. 8, 9) ja rakendades bikuup interpolatsioonimeetodit (GMT `grdtrack`) koos silumisega (ingl *antialiasing*).

Nivelleerimised Tallinna kõrgusvõrgul 2007/2008 ja 2019. a koos andmetöötluse ja tulemustega on põhjalikult kirjeldatud aruandes Gruno (2020).

Käesolevas aruandes täpsustatakse üle nivelleeritud kiiruste standardmääramatud ehk 1-sigma (1σ) veahinnangud (vastab ligikaudu 68% usaldatavusele). 2007/2008. ja 2019. a nivelleerimistest arvutatud kõrgustväärtuste keskmised standardmääramatud on vastavalt ± 0.23 ja ± 0.31 mm, mis võimaldavad hinnata kiiruste keskmise standardmääramatuse ± 0.03 mm/a. Kiiruste standardmääramatud reeperite kaupa on esitatud lisas L.1.

Edaspidi võetakse analüüsis kasutusse veel ka 2σ (usaldatavusega 95.5%) ja 3σ (usaldatavusega 99.7%) laiendmääramatud.

Oluline on siin ära tuua ka nivelleerimiste lähtereperi asukohta. Vastavalt aruandele Gruno (2020) fikseeriti mõlema kõrgusvõrgu lahenduse puhul lähtekõrgusena Viru reeperite kambris paiknev süvareeper nr 2 (ID 63-843-90002) EH2000 kõrgusväärtusega $H = 3.73537$ m. Seega on tegemist ka nivelleeritud kiiruste referentspunktiga. Täpsustama peaks siinkohal, et GPA ID nr on sellel reeperil siiski 63-843-99004 (gpa.maaamet.ee/?refnr_id=98636).

Lähtereperi asukohas on mudelpinnast interpoleeritud InSAR vertikaalkiirus väiksem kui selle määramatus ($V_{\text{psi}16-21} = -0.35$ mm/a, $V_{\text{psi}20-21} = 0.17$ mm/a), seetõttu võib mõlemad kiiruslahendused lugeda konsistentseteks. Teisisõnu, nivelleeritud kiirusi võib vahetult (nende väärtusi nihutamata) võrrelda InSAR kiirustega.

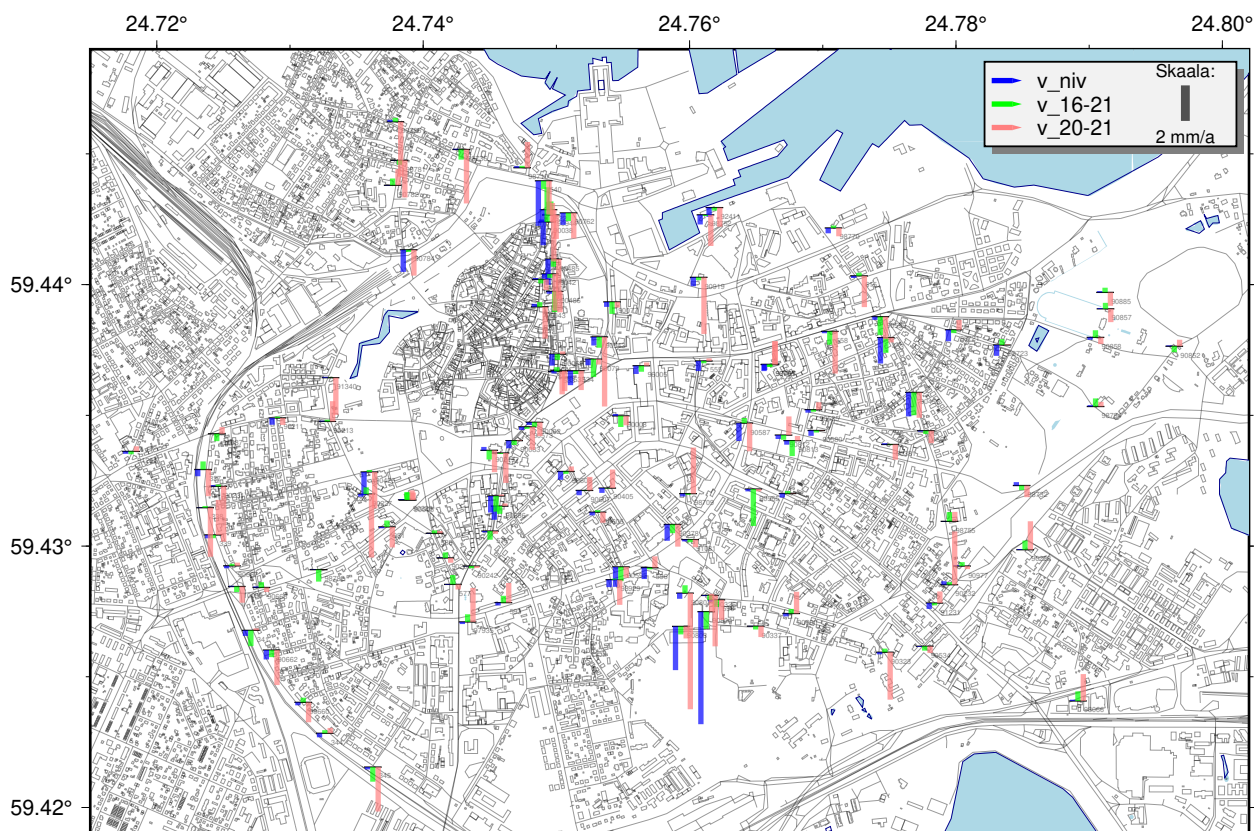
Reeperite koordinaadid, arvutatud deformatsioonide väärtused ning nende erinevused on esitatud lisas L.1.

2.1 Kiiruste erinevuste statistiline analüüs

Järgnevalt analüüsitakse, kas nivelleeritud ja InSAR vertikaalkiiruste erinevused on olulised, ehk suuremad kui nende liitmääramatuste 1σ , 2σ ja 3σ hinnangud. Kiiruste erinevused koos 1σ liitmääramatustega on esitatud lisas L.1 olevas tabelis. 2σ ja 3σ liitmääramatuste arvutamiseks tuleb tabeli 1σ väärtused läbi korrutada vastavalt kas 2 või 3ga.

Selline analüüs võimaldab välja selekteerida reeperid, kus on aset leidnud muutused kiiruste režiimis alates 2016. a. Seda võivad põhjustada reaalsed nähtused, nagu maapinna lokaalsed vajumised ehitustegevuse tõttu lähipiirkonnas, põhjavee taseme muutuste tõttu jne. Kuid põhjuseks võivad olla ka mõõtmis- ja arvutusvead. Mõõtmisvigadena võivad arvesse tulla InSAR analüüsi atmosfääriparandi ebatäpsus, suurem mõõtmismüra lumistel talvedel jne, samuti InSAR lahenduse resolutsiooni mõju (u 5x20 m) mudelpindade võrgustamisel ja interpoleerimisel. Nivelleeritud kiirusi võivad omakorda mõjutada suuremad lokaalsed liikumismustrid (vt joon. 13) nii 2007/2008 kui 2019. a nivelleerimiskampaania ajal. Näiteks osutub siinkohal oluliseks küsimus, kas 2019. a nivelleerimised toimusid enne maapinna tagasikerget 2019. a (joon. 13c), kerke ajal või peale seda. Nii ühel, teisel kui kolmandal juhul on 2016-2017. a vajumise (joon. 13a) mõju arvutatud kiirustele erinev. Eelnevat arvesse võttes on võrdlev analüüs koos määramatustega põhjendatud, uurimaks liikumisi (signaal) koos vigadega (müra).

Võrdlev analüüs aitas välja selgitada, et 1σ liitmääramatuse korral on erinevus (nivelleeritud



Joonis 11: Nivelleeritud v_{niv} ja InSAR vertikaalkiiruste 2021. a lahenduste v_{16-21} , v_{20-21} (vastavalt ajaperioodidele 2016-2021, 2020-2021) võrdlused Tallinna reeperitel.

ja InSAR 2016-2021. a vertikaalkiiruste vahel) oluline 46 reeperil (40%), seega kiirused on kooskõlas 70 reeperil (60%). 2σ ja 3σ korral on erinevus oluline vastavalt 12 (10%) ja 8 (7%) reeperil, kooskõla leidub seega 104 (90%) ja 108 (93%) reeperil. Erinevuste histogramm on esitatud joonisel 14. Kiiruste jaotushistogrammid on esitatud lisas L.7.

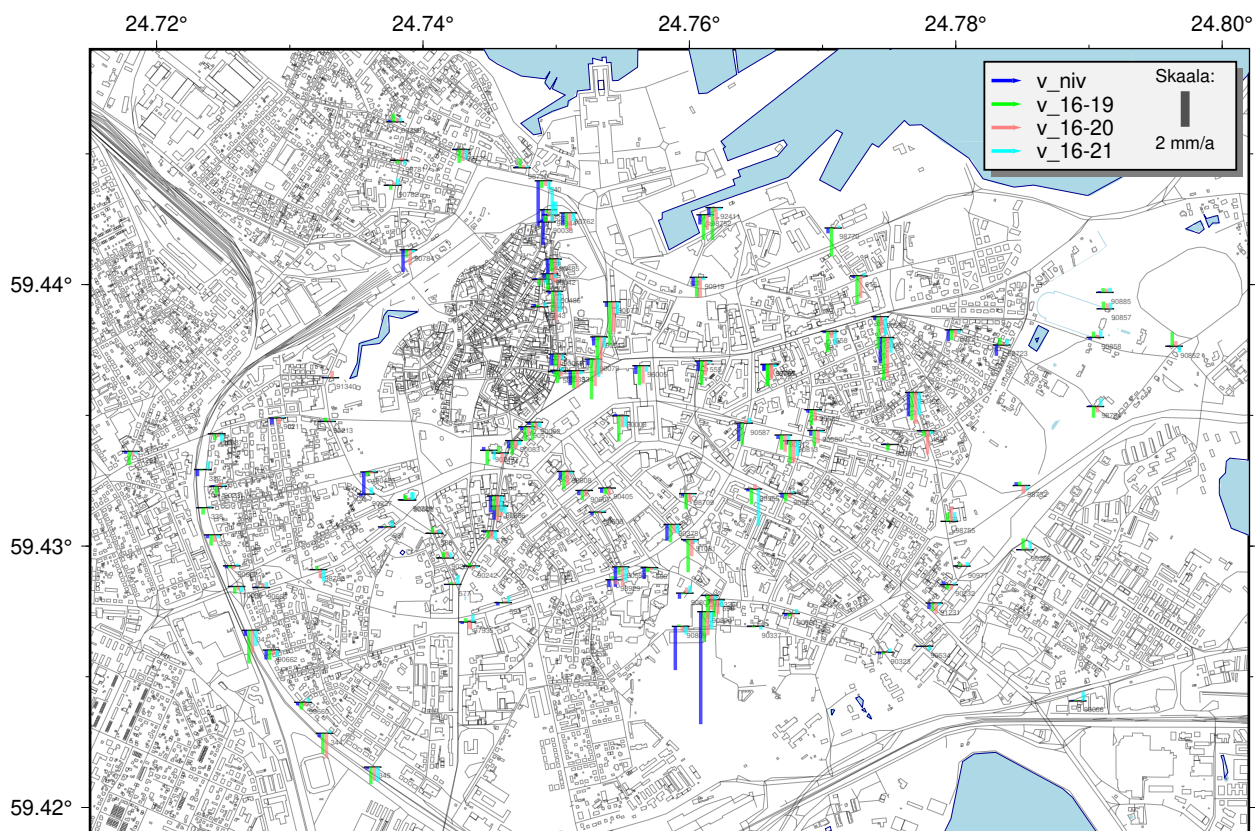
Nimekiri 12 reeperiga, kus erinevused on olulised (2σ määramatuse korral):

- 1) 63-843-90804
- 2) 63-843-540
- 3) 63-843-90803
- 4) 63-843-522
- 5) 63-843-90485
- 6) 63-843-90425
- 7) 63-843-90784
- 8) 63-843-90587
- 9) 63-843-98723
- 10) 63-843-90486
- 11) 63-843-90565
- 12) 63-843-90038

Samasugune 2σ -põhine võrdlus nivelleeritud ja InSAR 2020-2021. a vertikaalkiiruste vahel tõi välja 2 reeperit:

- 1) 63-843-90801
- 2) 63-843-90804

Nimekirjades esitatud reeperid on kaardipildil välja toodud lisas L.8.



Joonis 12: Nivelleeritud ja InSAR vertikaalkiiruste varasemate ja uue pika perioodiga analüüside (2016-2019, 2016-2020, 2016-2021) võrdlused Tallinna reeperitel.

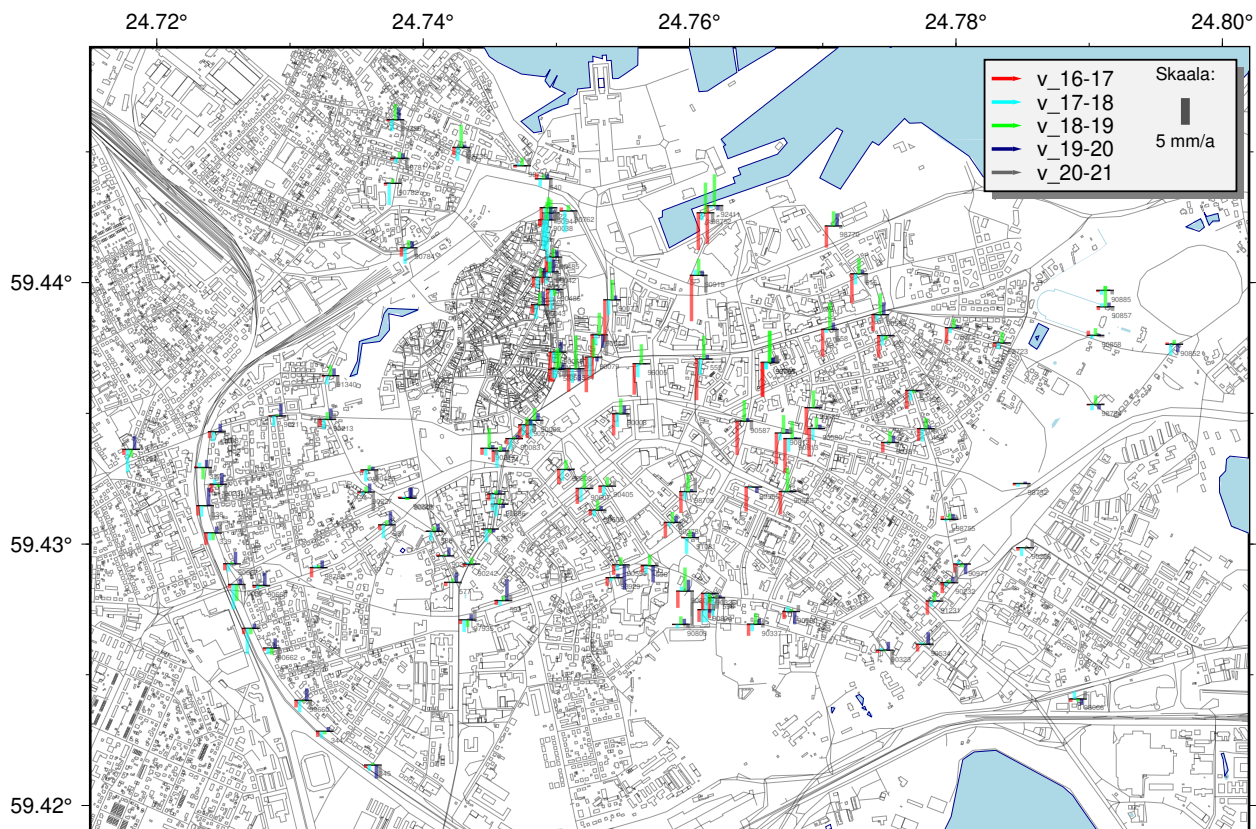
Lisaks toome siin ära reeperid, kus InSAR 2016-2021 kiirused $V_{\text{psi16-21}}$ on suuremad kui 2σ määramatused $u(V)$:

- 1) 63-843-90565
- 2) 63-843-90038
- 3) 63-843-90455
- 4) 63-843-90486
- 5) 63-843-90079
- 6) 63-843-90559
- 7) 63-843-90804
- 8) 63-843-90813
- 9) 63-843-453
- 10) 63-843-341
- 11) 63-843-575

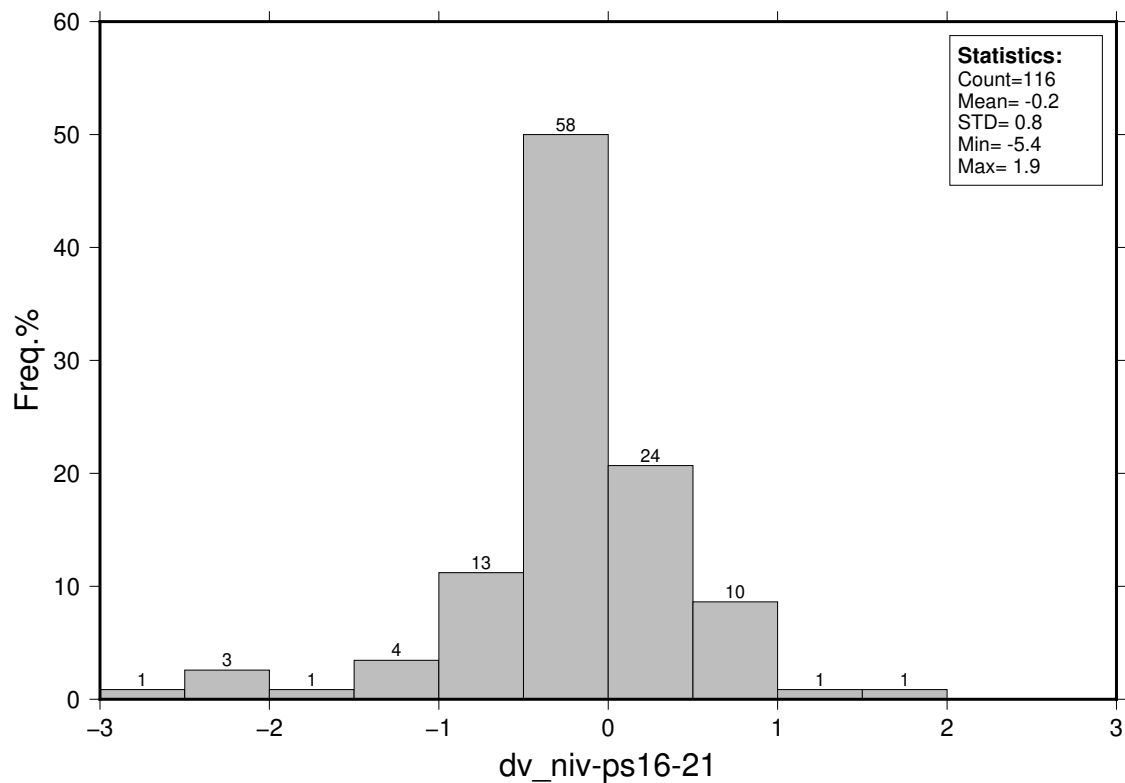
InSAR 2020-2021 kiiruste puhul eristub samasuguses võrdluses ainult 1 reeper: 63-843-90801. Kõigis kolmes esitatud nimekirjas esineb 1 reeper: 63-843-90804. Esimese ja viimase nimekirja peale on ühised reeperid: 63-843-90038, 63-843-90486, 63-843-90565 ja 63-843-90804. Nii nimekirjades kui siin lõigus nimetatud reeperite stabiilsus vajaks eraldi tähelepanu edasistes uuringutes.

2.2 Võrdluste kokkuvõte

Nii kaardipilt (joon. 11) kui erinevuste statistiline analüüs kinnitavad head kooskõla nivelleeritud ja InSAR pika lahenduse (2016-2021) kiiruste vahel, mis 2σ määramatuse korral



Joonis 13: InSAR vertikaalkiiruste lühikeste analüüside (2016-2017, 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020, 2020-2021) võrdlused Tallinna reeperitel.



Joonis 14: Kiiruste erinevused $V_{niv} - V_{psi}$ reeperitel. Ühik horisontaalteljel [mm/a].

leidis kinnitust 90% reeperitel. Võttes uue lahenduse kõrvale varasemad pika-ajalised lahendused (2016-2019, 2016-2020, joon 12), saab järeldada nende lahenduste omavahelist head kooskõla ning stabiilsust. Teisisõnu, varasemad InSAR kiiruslahendused toetavad uut 2021. a lahendust, samuti kehtib vastupidine järeldus.

Lühike InSAR lahendus (2020-2021) näitab suuremaid liikumisi, kuid ka müra suureneb (joon. 11). Sama järelduseni jõuti ka varasemas 2020. a analüüsis.

Kõigi lühikeste InSAR analüüside võrdlus reeperitel (joon. 13) näitab Tallinna kesklinnas selget vajumistrendi 2016-2017. a ja tagasikerget 2018-2019. a. Ajavahemikus 2017-2018 võib suuremaid vajumisi reeperite asukohtades märgata vanalinnas, Tehnika tänaval ning Kristiine linnaosa suunas.

3 Kokkuvõte

Uurimistöö tulemusena arutati InSAR ida-lääne (E) ja vertikaalsuunaliste (H) liikumiskiiruste võrgustatud pinnad Tallinna kesklinna ja sellega piirnevatele aladele. Selleks analüüsiti Sentinel-1 kaugseire andmeid PSI meetodil ajavahemikule juuni 2016 – nov 2021 (perioodi pikkus 5.4 aastat) ja nov 2020 – nov 2021 (1 aasta). Kiiruspindade referentspunktiks valiti riiklik GNSS püsijaam MUS2.

Kiiruspidadest ilmneb, et uuringualas jäävad pika analüüsi (2016-2021) InSAR LOS kiirused vahemikku $-5...5$ mm/a, lühikese analüüsi (2020-2021) korral $-10...10$ mm/a. Üksikutes punktides on märgata ka suuremaid liikumisi. LOS väärtustest tuletatud E , H suunalised kiirused jäävad samasse vahemikku.

InSAR vertikaalkiiruste lühikeste lahenduste aegrida (uus kiiruspind kombineerituna varasemate pindadega) näitab kuni 10-15 mm vajumisi kesklinnas 2016-2017. a ja u 10 mm kerkimist 2018-2019. a. Pika-ajalises lahenduses domineerivad siiski vajumisliikumised, seda nii kesklinna piirkonnas kui Kristiines. Suuremate liikumistega piirkonnad on eraldi välja toodud.

Võrgustatud InSAR kiiruspinnad võimaldasid vertikaalkiiruste interpoleerimist testala reeperite asukohtades ning edasisi võrdlusi nivelleeritud ning InSAR kiiruste vahel. Võrdlevast analüüsist (2σ usaldatavusega) selgus, et 90% reeperite puhul olid nivelleeritud ning InSAR kiirused kooskõlas. Eraldi toodi välja reeperid, kus erinevused osutusid olulisteks, kiirusväärtused suurteks ning mis seega vajaksid eraldi tähelepanu.

On soovitatav jätkata InSAR analüüsiga sagedusega kord aastas või kvartalis, et saada parem ülevaade reeperite stabiilsusest. Nii pika- kui lühiajalised InSAR lahendused võimaldavad jälgida reeperite liikumisi, mis aitavad selgitada, kas vajumised aeglustuvad, toimub üleminek kerkimisele või leiab aset stabiliseerumine. Mõnede reeperite puhul saab järeldada stabiilsust nii lühikeste kui pika analüüsi põhjal. Edaspidi vajaks uurimist, kas suuremad InSAR põhised liikumised reeperitel on seotud mattunud orgude asukohtade, põhjavee taseme kõikumise või mõne muu nähtusega.

InSAR kiiruslahendusi aitaks täpsustada ja fikseerida (globaalses geodeetilises raamistikus) täiendavate kombineeritud püsijaamade (GNSS + SAR transponder) paigaldamine uurin-gualale (Oja, 2021). Jätkata tuleks ka kordusnivelleerimistega, et kontrollida väljatoodud reeperite stabiilsust ning täiendavalt valideerida InSAR tulemusi.

Viited

- Gruno, A. (2020). InSAR andmeteale tugineva kaugseire võimalused Tallinna kõrgusvõrgu monitooringuks. Uurimustöö, AS Datel. 30 lk.
- Oja, T. (2021). Referentspunktide valiku mõju LOS ja EH lahendustele. Uurimistöö, AS Datel. 12 lk.
- Oja, T., Gruno, A., ja Palmas, M. (2020). InSAR kaugseire andmeteale tuginevate deformatsioonide võrdlusanalüüs Tallinna kõrgusvõrgu testalas. Uurimistöö, AS Datel. 39 lk.

Lisad

L.1 Nivelleeritud ja InSAR vertikaalkiirused reeperitel

Tabel Tallinna testala reeperite koordinaatide ja InSAR vertikaalkiiruste ning nende erinevusega nivelleeritud kiirustest. Tabeli veerud:

- 1) Jknr – järjekorranumber
- 2) ID nr – GPA ID number (gpa.maaamet.ee)
- 3) *Lat* – idapikkus (kraadides)
- 4) *Long* – põhjalaius (kraadides)
- 5) $V_1 = V_{\text{psi16-21}}$ – InSAR kiirus ajavahemikule 2016.07 - 2021.11
- 6) $u(V_1)$ – InSAR kiiruse V_1 määramatus (1σ)
- 7) $V_2 = V_{\text{psi20-21}}$ – InSAR kiirus ajavahemikule 2020.11 - 2021.11
- 8) $u(V_2)$ – InSAR kiiruse V_2 määramatus (1σ)
- 9) dV_1 – InSAR (2016-2021) kiiruse erinevus nivelleeritud kiirusest: $dV_1 = V_{\text{niv}} - V_1$
- 10) $u(dV_1)$ – kiiruste erinevuse dV_1 määramatus (1σ): $u(dV_1) = \sqrt{u^2(V_{\text{niv}}) + u^2(V_1)}$
- 11) dV_2 – InSAR (2020-2021) kiiruse erinevus nivelleeritud kiirusest: $dV_2 = V_{\text{niv}} - V_2$, mille määramatus on väärtuselt võrdne $u(V_2)$ väärtusega.

Jknr	Reeperi ID nr	Koordinaadid EUREF-EST97		Kiirused [mm/a]				Kiiruste erinevused [mm/a]		
		<i>Lat</i> (°)	<i>Long</i> (°)	V_1	$u(V_1)$	V_2	$u(V_2)$	dV_1	$u(dV_1)$	dV_2
1	63-843-90804	24.76124	59.42749	-0.97	0.44	1.01	2.09	-5.37	0.45	-7.34
2	63-843-540	24.74904	59.44397	-0.46	0.45	-1.89	2.09	-2.07	0.45	-0.63
3	63-843-90803	24.75934	59.42693	-0.45	0.45	-0.68	2.12	-2.01	0.45	-1.78
4	63-843-522	24.74941	59.44286	0.45	0.42	-2.91	2.09	-2.45	0.42	0.91
5	63-843-453	24.77473	59.43797	-0.86	0.41	-0.27	2.21	-0.60	0.41	-1.19
6	63-843-90485	24.74977	59.44098	-0.43	0.41	-2.26	2.07	-1.02	0.41	0.81
7	63-843-90455	24.77684	59.43588	-1.28	0.41	-1.43	2.07	-0.07	0.41	0.08
8	63-843-90425	24.73595	59.43284	0.11	0.42	-2.05	2.13	-1.42	0.42	0.74
9	63-843-90784	24.73890	59.44133	-0.12	0.41	-1.45	2.08	-1.12	0.41	0.21
10	63-843-90595	24.75484	59.42920	-0.80	0.42	-0.61	2.07	-0.31	0.42	-0.51
11	63-843-90587	24.76411	59.43470	0.29	0.41	-1.59	2.03	-1.29	0.41	0.59
12	63-843-575	24.74546	59.43192	-0.88	0.43	0.08	2.09	-0.05	0.43	-1.02
13	63-843-90378	24.75872	59.43083	-0.49	0.42	-1.25	2.18	-0.43	0.42	0.33
14	63-843-534	24.75145	59.43670	-0.19	0.41	-1.09	2.13	-0.62	0.41	0.28
15	63-843-90686	24.74573	59.43153	-0.44	0.45	0.15	2.08	-0.33	0.45	-0.92
16	63-843-90762	24.75091	59.44274	-0.46	0.42	-1.43	2.02	-0.20	0.42	0.77
17	63-843-90069	24.75007	59.43734	-0.32	0.41	0.16	2.10	-0.33	0.41	-0.81
18	63-843-98721	24.77983	59.43827	-0.19	0.42	0.55	2.21	-0.45	0.42	-1.19
19	63-843-596	24.75700	59.42918	-0.10	0.42	0.64	2.12	-0.55	0.42	-1.28
20	63-843-98723	24.78344	59.43769	0.33	0.41	0.03	2.20	-0.94	0.41	-0.64
21	63-843-555	24.76106	59.43708	-0.13	0.43	0.14	2.08	-0.44	0.43	-0.72
22	63-843-98752	24.76119	59.44267	-0.07	0.40	-1.75	2.06	-0.47	0.40	1.21
23	63-843-90662	24.72862	59.42602	-0.39	0.42	-1.97	2.13	-0.14	0.42	1.44
24	63-843-92411	24.76187	59.44294	-0.17	0.40	-1.07	2.09	-0.35	0.41	0.56
25	63-843-90919	24.76068	59.44028	-0.16	0.43	-3.19	2.22	-0.34	0.43	2.69
26	63-843-90543	24.75322	59.43800	-0.61	0.43	-3.91	2.16	0.13	0.44	3.43
27	63-843-90608	24.75071	59.43286	-0.14	0.40	0.28	2.03	-0.33	0.40	-0.75
28	63-843-96005	24.75638	59.43690	-0.34	0.41	0.19	2.06	-0.12	0.41	-0.65
29	63-843-90083	24.74682	59.43403	-0.25	0.43	0.04	2.06	-0.18	0.43	-0.47
30	63-843-93929	24.75435	59.42872	0.06	0.43	-1.41	2.05	-0.48	0.43	0.99
31	63-843-337	24.72347	59.43293	0.46	0.43	-1.50	2.11	-0.84	0.43	1.12
32	63-843-90211	24.72905	59.43490	0.08	0.41	-0.39	2.09	-0.45	0.41	0.02
33	63-843-98785	24.76599	59.43695	-0.14	0.41	1.31	2.10	-0.23	0.41	-1.68

Jätukub järgmisel lk...

Jätukub eelmisel lk...

34	63-843-90079	24.75278	59.43715	-1.01	0.42	-0.31	2.02	0.67	0.42	-0.03
35	63-843-91231	24.77839	59.42782	-0.13	0.43	0.65	2.05	-0.20	0.43	-0.99
36	63-843-97007	24.76603	59.43695	-0.13	0.41	1.31	2.10	-0.19	0.41	-1.62
37	63-843-90801	24.75965	59.42820	0.44	0.46	-6.53	2.17	-0.76	0.46	6.22
38	63-843-341	24.72706	59.42678	-0.89	0.43	0.12	2.09	0.58	0.44	-0.43
39	63-843-98770	24.77081	59.44217	0.14	0.42	-0.47	2.09	-0.44	0.42	0.17
40	63-843-90580	24.76952	59.43442	-0.11	0.42	-0.02	2.10	-0.19	0.42	-0.28
41	63-843-90077	24.75418	59.43934	-0.68	0.43	-0.32	2.09	0.39	0.43	0.04
42	63-843-90607	24.75210	59.43213	0.01	0.40	0.76	2.08	-0.29	0.40	-1.04
43	63-843-90042	24.74951	59.44041	-0.22	0.40	-2.07	2.03	-0.05	0.41	1.81
44	63-843-90405	24.75381	59.43222	-0.02	0.41	1.04	2.13	-0.25	0.41	-1.31
45	63-843-344	24.73261	59.42284	0.17	0.44	0.30	2.10	-0.41	0.45	-0.53
46	63-843-90562	24.76735	59.43201	0.15	0.41	-0.02	2.00	-0.38	0.41	-0.21
47	63-843-90813	24.76770	59.43404	-0.87	0.41	0.27	2.05	0.64	0.42	-0.50
48	63-843-90812	24.76705	59.43425	-0.27	0.42	1.05	2.08	0.04	0.42	-1.28
49	63-843-339	24.72423	59.43043	-0.19	0.43	1.97	2.34	0.00	0.44	-2.16
50	63-843-90606	24.75309	59.43130	0.12	0.41	-0.59	2.12	-0.30	0.41	0.41
51	63-843-90559	24.77431	59.43877	-1.03	0.45	-1.26	2.10	0.85	0.45	1.08
52	63-843-90573	24.74779	59.43456	-0.12	0.40	-1.29	2.02	-0.06	0.41	1.11
53	63-843-90660	24.73099	59.42402	0.26	0.43	-1.12	2.09	-0.43	0.44	0.96
54	63-843-90585	24.76929	59.43522	-0.12	0.40	0.42	2.00	-0.05	0.40	-0.59
55	63-843-98709	24.75988	59.43201	-0.07	0.41	2.59	2.04	-0.09	0.41	-2.75
56	63-843-593	24.74602	59.42784	0.38	0.42	1.10	2.10	-0.54	0.42	-1.26
57	63-843-90600	24.76763	59.42742	0.26	0.42	1.22	2.21	-0.42	0.42	-1.38
58	63-843-90082	24.74836	59.43473	-0.25	0.41	-0.78	2.06	0.10	0.41	0.63
59	63-843-10533	24.75022	59.43671	0.01	0.41	-1.15	2.07	-0.16	0.41	1.00
60	63-843-90227	24.73572	59.43199	0.38	0.41	-3.57	2.14	-0.53	0.41	3.42
61	63-843-91201	24.71807	59.43362	-0.16	0.41	0.29	2.10	0.02	0.42	-0.43
62	63-843-90667	24.72564	59.42925	0.12	0.41	0.18	2.12	-0.26	0.41	-0.32
63	63-843-90486	24.74987	59.43974	-1.17	0.41	-1.17	2.08	1.03	0.41	1.04
64	63-843-90565	24.76479	59.43218	-2.08	0.41	-0.13	2.04	1.95	0.42	0.00
65	63-843-90858	24.79047	59.43798	0.40	0.42	-0.38	2.19	-0.54	0.42	0.24
66	63-843-345	24.73622	59.42155	-0.82	0.45	-2.50	2.11	0.69	0.46	2.37
67	63-843-97935	24.74334	59.42710	0.43	0.41	1.91	2.18	-0.55	0.41	-2.03
68	63-843-90323	24.77466	59.42594	0.21	0.41	-2.67	2.41	-0.32	0.41	2.55
69	63-843-615	24.77272	59.44033	0.17	0.42	-1.76	2.08	-0.29	0.42	1.64
70	63-843-91081	24.76003	59.43025	-0.15	0.47	-0.43	2.02	0.05	0.47	0.33
71	63-843-598	24.76201	59.42794	-0.39	0.42	-1.13	2.09	0.29	0.42	1.03
72	63-843-558	24.77052	59.43821	-0.75	0.44	-2.37	2.14	0.65	0.45	2.27
73	63-843-981	24.73728	59.43073	0.36	0.42	-1.16	2.15	-0.44	0.42	1.08
74	63-843-576	24.74502	59.43057	-0.48	0.42	-0.16	2.06	0.42	0.42	0.09
75	63-843-456	24.77774	59.43441	-0.19	0.41	-0.70	2.17	0.14	0.41	0.65
76	63-843-90534	24.77765	59.42617	-0.24	0.42	-0.38	2.07	0.20	0.42	0.34
77	63-843-90326	24.76152	59.42811	-0.26	0.44	-2.87	2.15	0.22	0.44	2.82
78	63-843-577	24.74223	59.42853	0.53	0.42	-0.29	2.07	-0.56	0.42	0.26
79	63-843-98782	24.73215	59.42910	-0.67	0.44	0.00	2.05	0.65	0.45	-0.01
80	63-843-338	24.72363	59.43147	0.10	0.42	-2.76	2.12	-0.11	0.42	2.74
81	63-843-90782	24.73771	59.44380	0.38	0.40	0.91	2.05	-0.40	0.41	-0.92
82	63-843-90781	24.73822	59.44475	-0.25	0.42	-2.09	2.12	0.24	0.42	2.08
83	63-843-90242	24.74363	59.42924	-0.13	0.42	-0.11	2.08	0.12	0.42	0.10
84	63-843-90687	24.72450	59.43429	-0.42	0.41	0.38	2.00	0.42	0.41	-0.38
85	63-843-574	24.74580	59.43356	-0.05	0.40	-1.68	2.10	0.06	0.41	1.69
86	63-843-90005	24.73885	59.43176	0.43	0.42	0.42	2.18	-0.43	0.42	-0.41
87	63-843-98755	24.77951	59.43094	0.52	0.42	0.53	2.08	-0.51	0.42	-0.52
88	63-843-588	24.74085	59.43049	0.17	0.42	0.13	2.06	-0.15	0.42	-0.12
89	63-843-90204	24.74166	59.42955	0.31	0.41	-0.27	2.09	-0.30	0.41	0.29
90	63-843-533	24.75003	59.43668	0.24	0.41	-1.29	2.07	-0.23	0.41	1.31
91	63-843-90337	24.76496	59.42694	-0.19	0.42	-0.61	2.08	0.21	0.42	0.63
92	63-843-90320	24.73876	59.43177	0.43	0.42	0.53	2.19	-0.39	0.42	-0.50

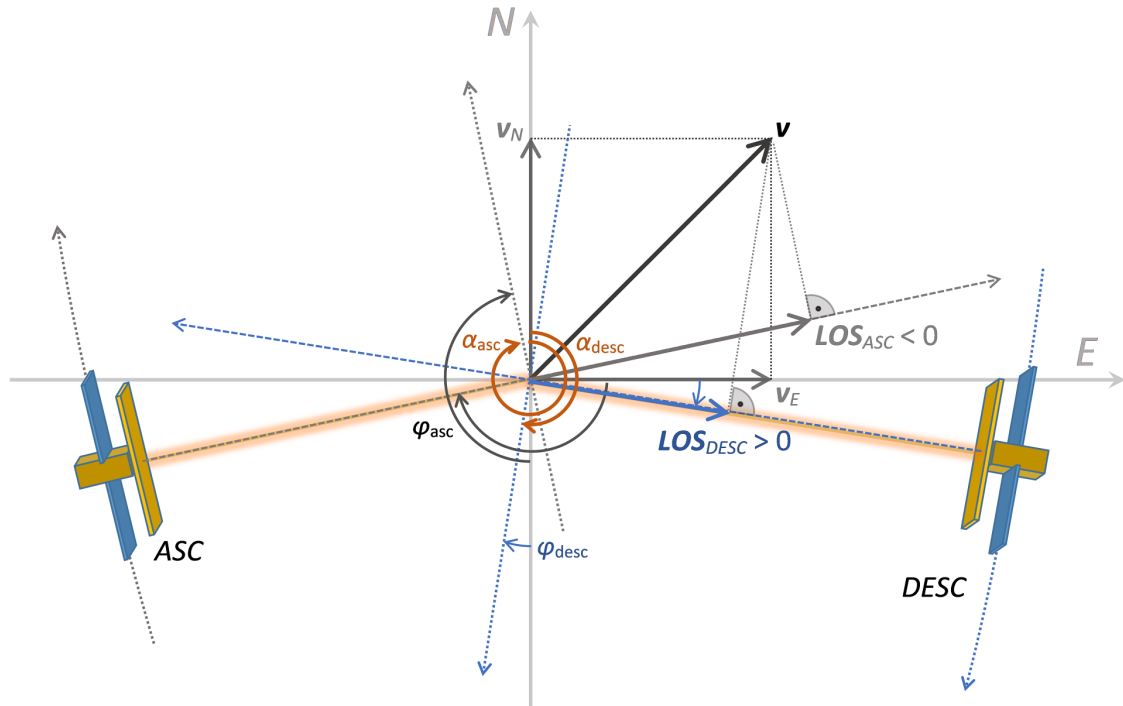
Jätukub järgmisel lk...

Jätküb eelmisel lk...

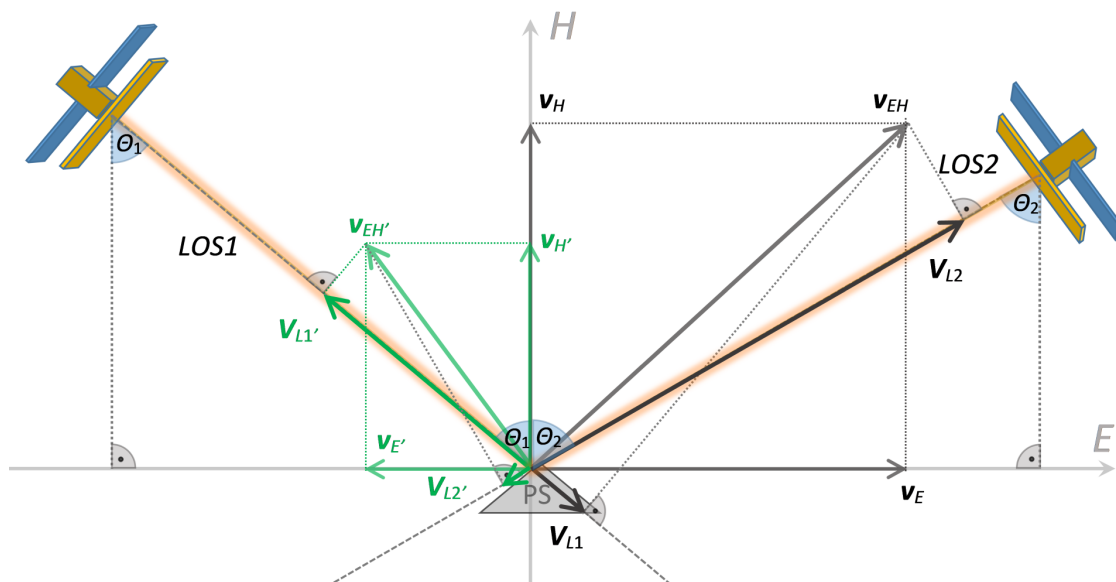
93	63-843-98736	24.74284	59.44517	-0.57	0.41	-3.03	2.18	0.61	0.42	3.08
94	63-843-10090	24.72600	59.42846	-0.31	0.42	-0.91	2.02	0.35	0.42	0.95
95	63-843-90213	24.73280	59.43477	0.09	0.40	1.14	2.02	-0.05	0.41	-1.10
96	63-843-90977	24.78045	59.42924	0.22	0.45	-0.17	2.09	-0.18	0.45	0.22
97	63-843-90228	24.78518	59.42986	0.51	0.41	1.60	2.02	-0.47	0.41	-1.56
98	63-844-90852	24.79638	59.43764	-0.34	0.44	0.36	2.25	0.39	0.44	-0.31
99	63-843-91340	24.73304	59.43644	0.01	0.40	-2.10	2.05	0.04	0.40	2.15
100	63-843-90857	24.79122	59.43908	0.34	0.41	-0.75	2.15	-0.29	0.41	0.80
101	63-843-90666	24.72784	59.42842	0.30	0.40	-0.26	2.01	-0.24	0.40	0.32
102	63-843-98066	24.78915	59.42408	0.54	0.41	1.51	2.14	-0.47	0.41	-1.45
103	63-843-90944	24.74958	59.44266	0.76	0.42	-1.35	2.05	-0.70	0.42	1.41
104	63-843-90231	24.72461	59.43229	0.10	0.41	-3.12	2.06	-0.04	0.41	3.18
105	63-843-90381	24.77504	59.43389	-0.02	0.42	-0.86	2.16	0.08	0.42	0.93
106	63-843-90885	24.79119	59.43970	0.26	0.41	-0.76	2.17	-0.20	0.41	0.82
107	63-843-90500	24.74883	59.44020	-0.23	0.41	-0.60	2.11	0.31	0.41	0.68
108	63-843-98794	24.79048	59.43534	0.46	0.43	0.26	2.09	-0.37	0.43	-0.18
109	63-843-98710	24.74743	59.44447	0.11	0.42	1.45	2.11	-0.02	0.42	-1.36
110	63-941-90386	24.73791	59.44623	0.22	0.41	-3.09	2.05	-0.12	0.41	3.20
111	63-843-90008	24.75484	59.43498	-0.62	0.40	-0.53	2.09	0.73	0.40	0.64
112	63-843-90038	24.74930	59.44240	1.95	0.42	1.06	2.09	-1.81	0.42	-0.92
113	63-843-90043	24.74875	59.43915	0.26	0.42	-1.79	2.08	-0.09	0.42	1.97
114	63-843-90215	24.74495	59.43366	-0.52	0.42	-1.23	2.02	0.71	0.42	1.42
115	63-843-98732	24.78493	59.43232	-0.26	0.46	-0.66	2.11	0.45	0.46	0.85
116	63-843-90232	24.77950	59.42852	0.14	0.45	3.00	2.09	0.06	0.46	-2.80
			KESKV.	-0.11	0.42	-0.59	2.10	-0.24	0.42	0.24
			SD	0.50	0.01	1.44	0.06	0.77	0.01	1.60
			MIN.	-2.08	0.40	-6.53	2.00	-5.37	0.40	-7.34
			MAKS.	1.95	0.47	3.00	2.41	1.95	0.47	6.22

L.2 LOS ja 3D kiiruste geomeetrised seosed

LOS suunaliste liikumiste geomeetrisi seosed horisontaal-, vertikaalliikumistega kirjeldavad allpool esitatud joonised vastavalt valemitele peatükis 1.3.3.



Joonis 15: LOS suunaliste liikumiste seosed horisontaalliikumistega (E, N-telgede suunas) vaadates ülevalt alla (mööda H-telge).



Joonis 16: LOS suunaliste liikumiste seosed horisontaal- ja vertikaalliikumisega (E, H-telgede suunas) vaadates lõunast põhja (mööda N-telge).

L.3 Kaasnevate failide nimekiri

1. LOS failid csv formaadis. Faili nimes on määratud orbiidi nr ja vaatesuund (asc, desc), vt ka Lisa L.4.
 - (a) Päise kirjeldus
 - i. Veeru eraldaja „ , “
 - ii. ID – punkti number, mis pannakse automaatselt
 - iii. LAT – punkti geograafiline laiuskraad [°]
 - iv. LON – punkti geograafiline pikkuskraad [°]
 - v. HEIGHT – arvatud kõrgus [m]
 - vi. HEIGHT WRT DEM – arvatud kõrguse hälve DEM mudelist [m]
 - vii. SIGMA HEIGHT – kõrgusmäärangu standardhälve [m]
 - viii. VEL – kiirus lineaarsest mudelist [mm/a]
 - ix. SIGMA VEL – kiiruse standardhälve [mm/a]
 - x. SEASONAL – perioodiline mudel [mm]
 - xi. CUMUL. DISP. – kogudeformatsioon ajavahemiku jooksul [mm]
 - xii. COHERENCE – ajaline koherentsus vahemikus 0...1
 - xiii. SVET, LVET – radarpildi koordinaadid (s, l)
 - xiv. IN, FIN – pildiseeria algus- ja lõpupildi nr
 - xv. STDEV – lineaarse kiirusmudeli jääkhälvete standardhälve [mm]
 - xvi. 20160607_VV, ... – mõõtmise kuupäevalised väärtused (2016-07-01, ...)
 - xvii. ... jätkuvad deformatsioonide aegridade väärtused [mm]
 - (b) CSV failide nimekiri (kokku pakitud failis LOS_Andmed_csv.7z):
 - i. ASC_Pikk_object_498.csv
 - ii. DESC_pikk_object_498.csv
 - iii. ASC_lyhike_object_498.csv
 - iv. DESC_lyhike_object_498.csv
2. LOS failid shp formaadis, tuletatud csv failidest. Kuna faile on mitu, siis on need kokku pakitud.
 - (a) SHP failide nimekiri:
 - i. ASC_2016-2021.shp.zip
 - ii. DESC_2016-2021.shp.zip
 - iii. DESC_2020-2021.shp.zip
 - iv. ASC_2020-2021.shp.zip
3. Võrgustatud H , E suunalised kiiruspinnad „geotiff“ rasterformaadis koos veahinnangutega (laiendiga *_UNC.tiff), ühik mm/a, faili nimes kajastub ajavahemik:
 - (a) Tallinn_InSAR_2016-2021_VEL_H.tiff
 - (b) Tallinn_InSAR_2016-2021_VEL_E.tiff
 - (c) Tallinn_InSAR_2020-2021_VEL_H.tiff
 - (d) Tallinn_InSAR_2020-2021_VEL_E.tiff
 - (e) Tallinn_InSAR_2016-2021_VEL_H_UNC.tiff
 - (f) Tallinn_InSAR_2016-2021_VEL_E_UNC.tiff
 - (g) Tallinn_InSAR_2020-2021_VEL_H_UNC.tiff
 - (h) Tallinn_InSAR_2020-2021_VEL_E_UNC.tiff
4. Sille analüüside lingid (vajalik eelnev sisselogimine):
 - (a) ASC orbiit lühike #160: www.sille.space/app/#/map/498/3166
 - (b) DESC orbiit lühike #80: www.sille.space/app/#/map/498/3167
 - (c) ASC orbiit pikk #160: www.sille.space/app/#/map/498/3169
 - (d) DESC orbiit pikk #80: www.sille.space/app/#/map/498/3168

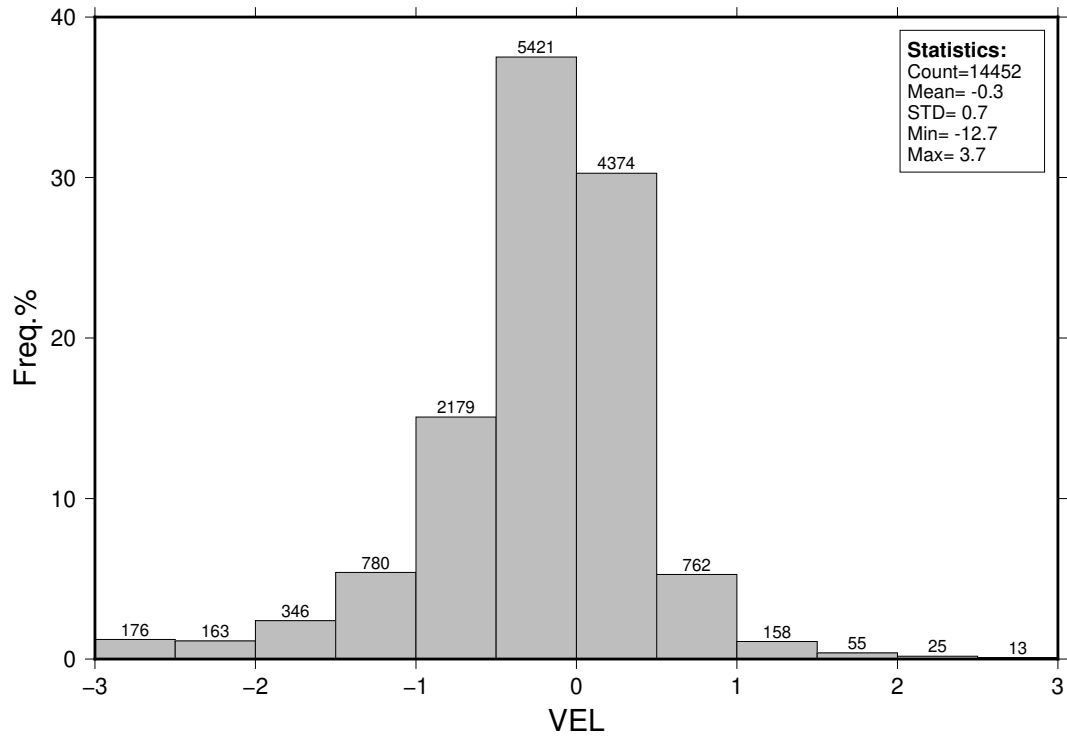
L.4 CSV väljundfaili formaat

Järgnev tabel annab ülevaate InSAR analüüsi (tarkvara SARPROZ) *.csv väljundfaili veergude järjekorrast ja nimetustest (faili ASC_Pikk_object_498.csv näitel).

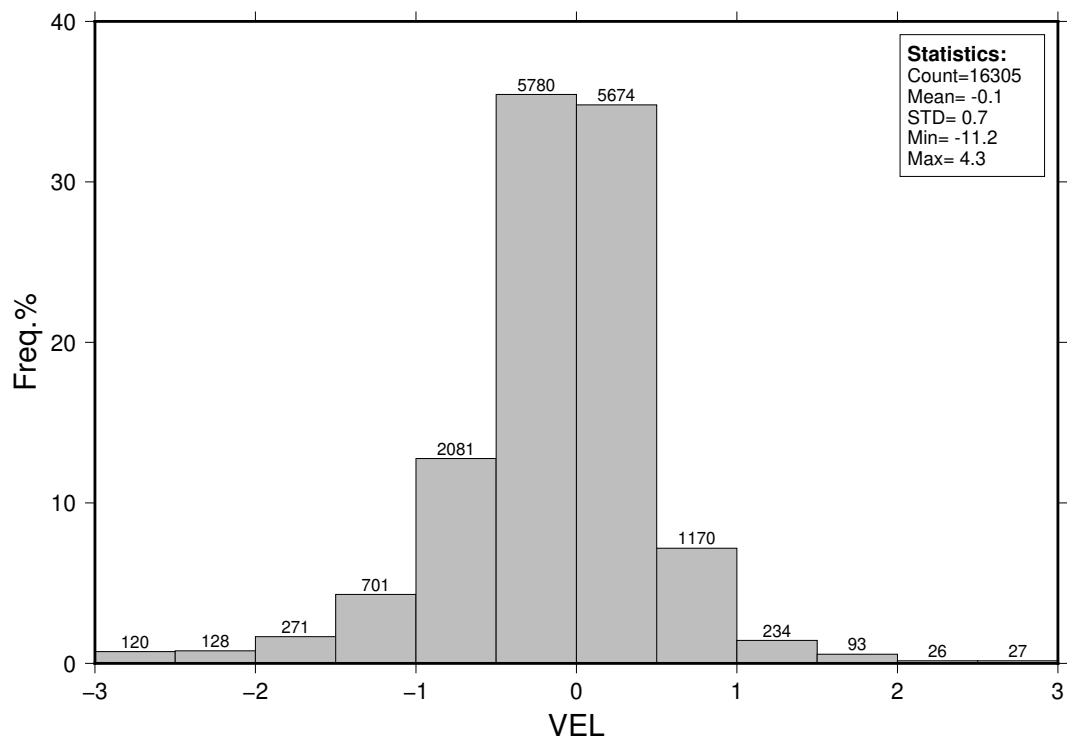
1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
ID	LAT	LON	HEIGHT	HEIGHT WRT DEM	SIGMA HEIGHT	VEL	SIGMA VEL	SEA- SONAL	...
1	59.379817	24.708938	57.16	10.6	5.35	-0.27	0.45	0	...
2	59.388863	24.795612	50.98	8.08	5.69	0.21	0.45	0	...
3	59.388886	24.795826	51.04	8.15	5.75	0.04	0.45	0	...
4	59.389174	24.798603	48.87	5.52	5.55	0.04	0.45	0	...
5	59.390362	24.810031	50.54	9.4	5.66	-0.07	0.45	0	...
...
18294	59.465348	24.701966	13.37	8.72	5.3	-0.33	0.44	0	...
18295	59.465353	24.702014	9.63	4.99	5.25	-0.18	0.44	0	...
18296	59.46536	24.702078	6.51	1.88	5.42	-0.26	0.46	0	...
18297	59.466619	24.714147	7.26	4.42	5.85	-1.28	0.61	0	...
18298	59.466646	24.714406	3.42	0.72	5.67	-0.53	0.45	0	...

...	10	11	12	13	14	15	16	17	18	...
...	CUMUL. DISP.	COHER	SVET	LVET	IN	FIN	STDEV	20160701 _VV	20160713 _VV	...
...	-1.47	0.89	206	2	1	250	2.25	0	-1.85	...
...	1.13	0.9	1428	2	1	250	2.15	0	3.29	...
...	0.23	0.87	1431	2	1	250	2.46	0	2.67	...
...	0.22	0.85	1471	2	1	250	2.86	0	2.55	...
...	-0.37	0.89	1632	2	1	250	2.27	0	0.05	...
...
...	-1.76	0.95	597	679	1	250	1.37	0	-0.79	...
...	-0.98	0.96	599	679	1	250	1.35	0	-0.26	...
...	-1.39	0.89	601	679	1	250	2.36	0	-1.99	...
...	-6.83	0.74	770	679	1	250	3.92	0	-1.42	...
...	-2.85	0.85	775	679	1	250	2.57	0	1.05	...

L.5 LOS kiiruste jaotushistogrammid

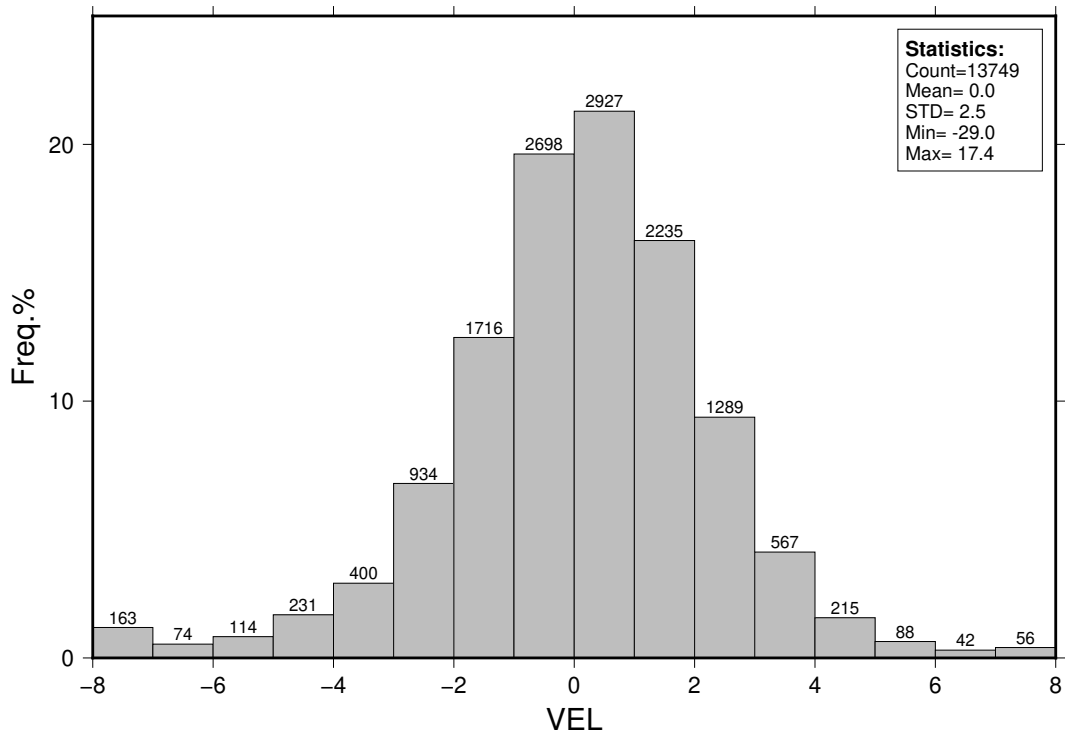


(a) ASC

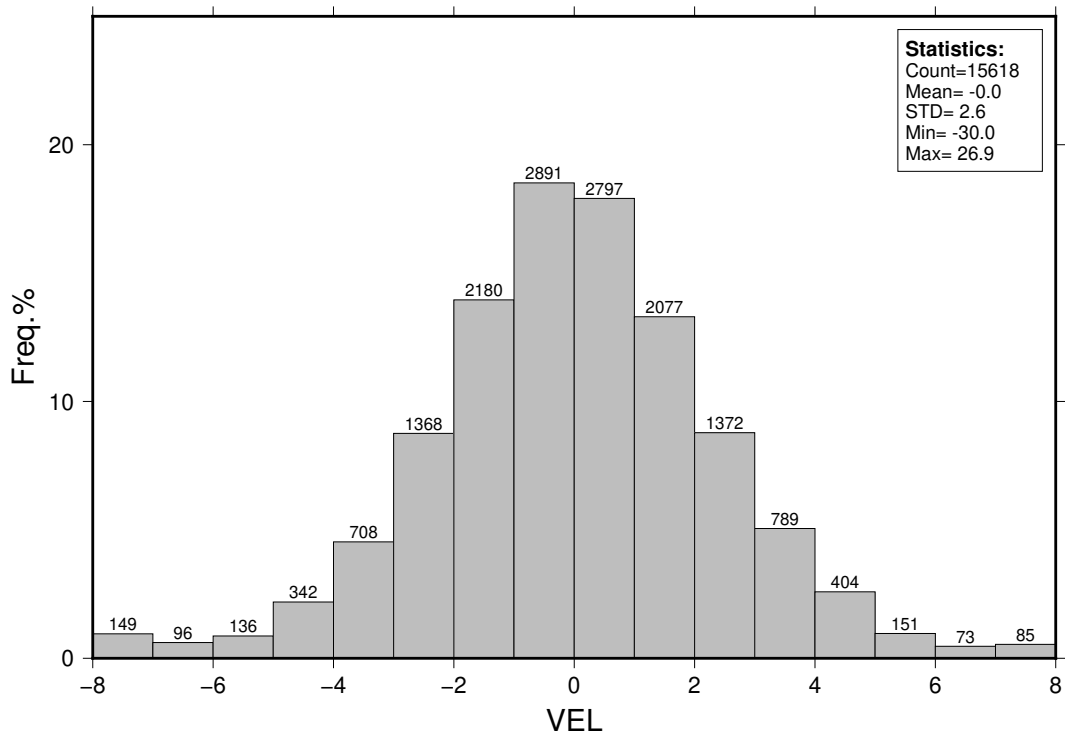


(b) DESC

Joonis 17: LOS kiiruste (2016-2021) jaotushistogrammid Tallinnas InSAR arvutusalas. Ühik horisontaalteljel [mm/a].



(a) ASC

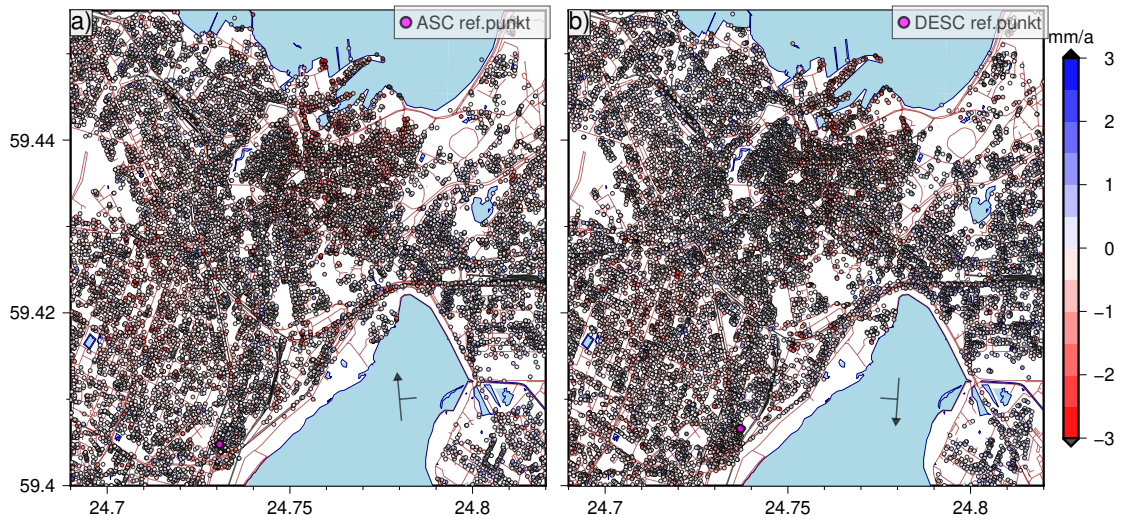


(b) DESC

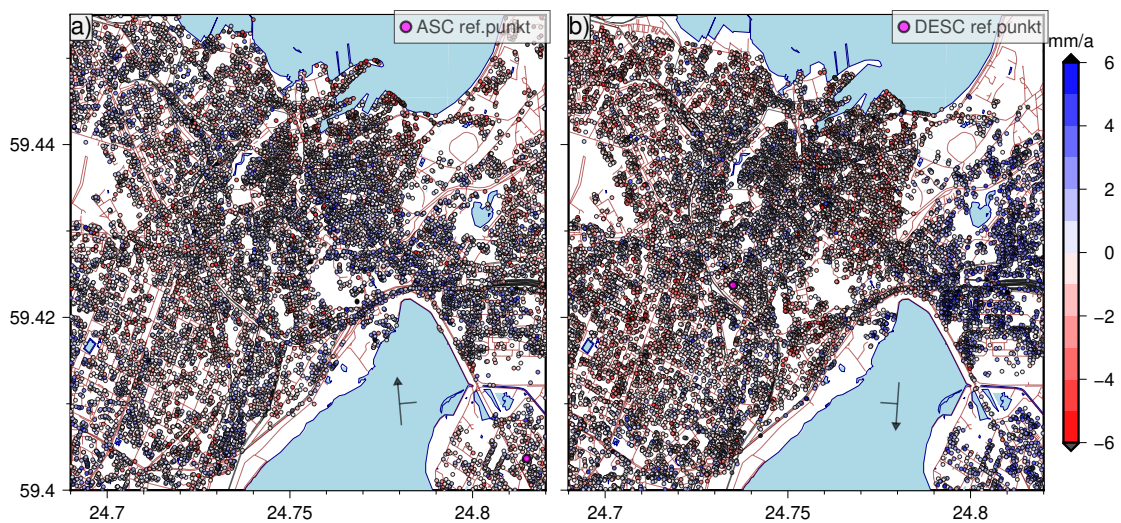
Joonis 18: LOS kiiruste (2020-2021) jaotushistogrammid Tallinnas InSAR arvutusalas. Ühik horisontaalteljel [mm/a].

L.6 LOS kiiruste võrdlus mudelpindadega PS punktides

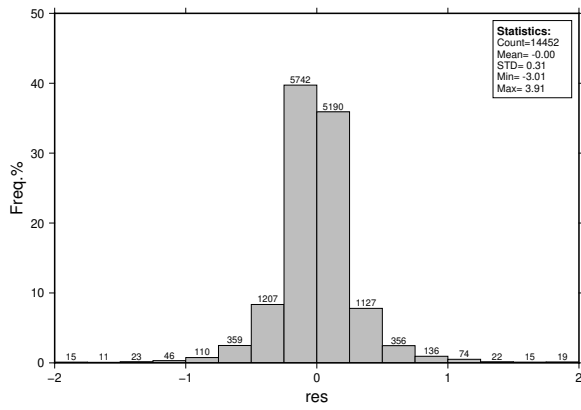
Punktipõhiste LOS kiiruste võrdlus võrgustatud mudelpinnaga ja võrdlustulemuste histogrammid koos statistikaga.



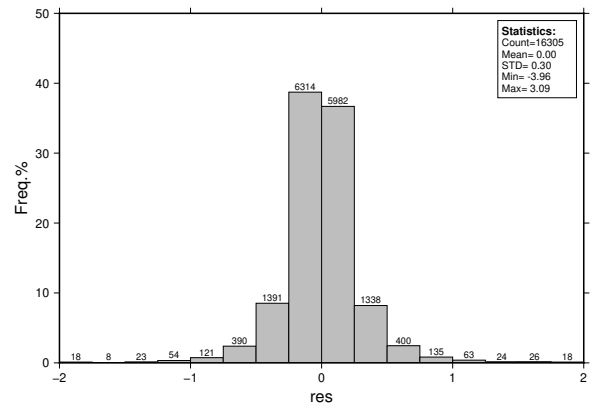
Joonis 19: InSAR punktide kiirusväärtuste erinevused võrgustatud mudelpinnast (jäähälbed $dV = V_{\text{psi16-21}} - V_{\text{mudel}}$) ASC ja DESC suundadel 2016-2021 lahenduse korral.



Joonis 20: InSAR punktide kiirusväärtuste erinevused võrgustatud mudelpinnast (jäähälbed $dV = V_{\text{psi20-21}} - V_{\text{mudel}}$) ASC ja DESC suundadel 2020-2021 lahenduse korral.

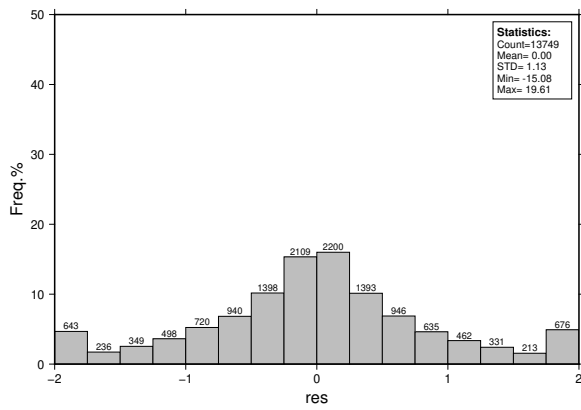


(a) ASC

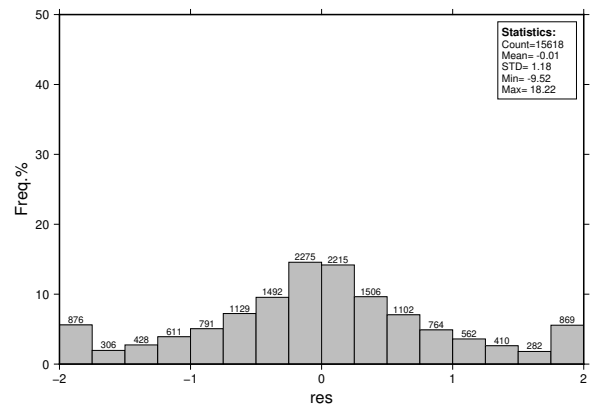


(b) DESC

Joonis 21: Jääkhälvete $dV = V_{\text{psi}16-21} - V_{\text{mudel}}$ histogrammid. Ühik horisontaalteljel [mm/a].



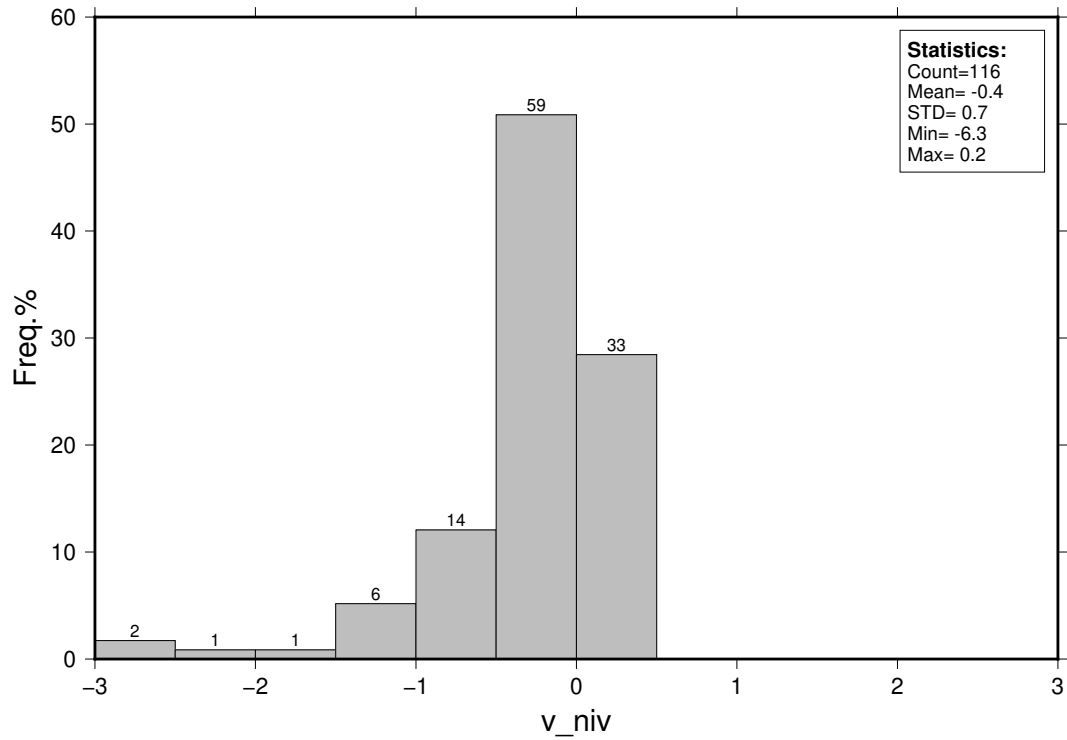
(a) ASC



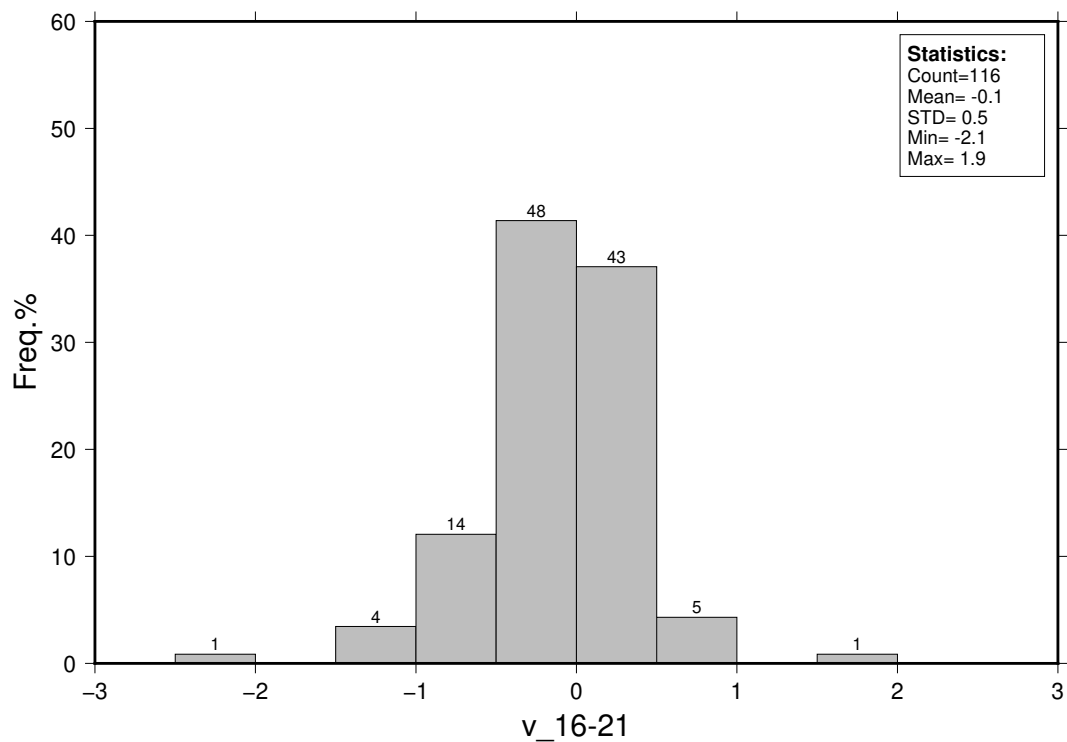
(b) DESC

Joonis 22: Jääkhälvete $dV = V_{\text{psi}20-21} - V_{\text{mudel}}$ histogrammid. Ühik horisontaalteljel [mm/a].

L.7 Vertikaalkiiruste jaotushistogrammid reeperitel



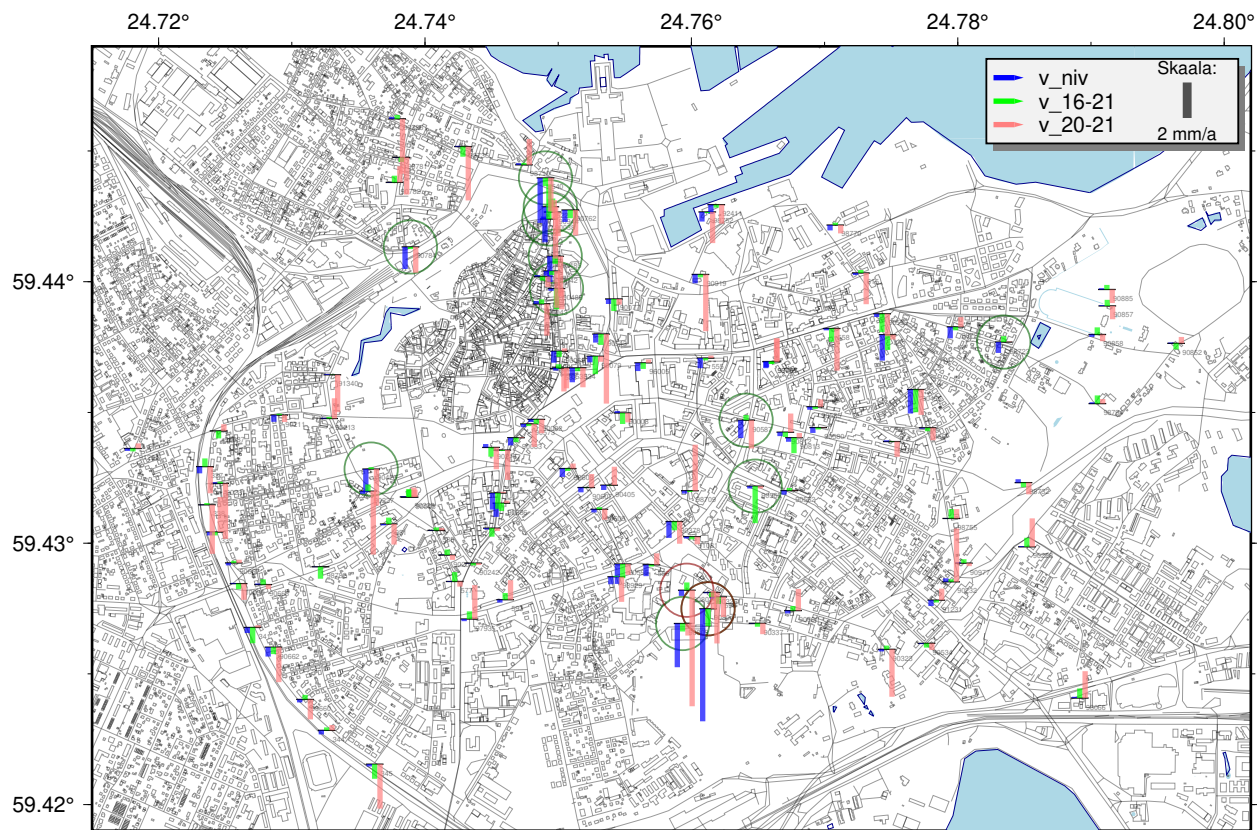
(a) Nivelleeritud



(b) InSAR (2016-2021)

Joonis 23: Kiiruste jaotushistogrammid reeperitel. Ühik horisontaalteljel [mm/a].

L.8 Statistiliselt olulised erinevused reeperitel



Joonis 24: Nivelleeritud ja InSAR vertikaalkiiruste 2021. a lahenduste (2016-2021, 2020-2021) võrdlused Tallinna reeperitel. Eraldi on välja toodud reeperid, kus erinevused on statistiliselt olulised: roheline ja punase sõõriga esitatakse olulisi erinevusi vastavalt pikast ja lühikesest InSAR lahendusest. Vt ka ptk 2.1.