

Uurimistöö

InSAR kaugseire andmete tuginevate
deformatsioonide võrdlusanalüüs Tallinna
kõrgusvõrgu testalas

Koostanud: T. Oja, A. Gruno, M. Palmas

Kinnitas: E. Kasenõmm

Tallinn 2020

Sisukord

Lühendid	- 3 -
Sissejuhatus	- 4 -
1 InSAR mõõtmised	- 5 -
1.1 InSAR interferomeetriline analüüs	- 5 -
1.2 Deformatsiooni arvutamine PSI meetodil	- 7 -
1.2.1 PSI punktide valik	- 8 -
1.2.2 Ruumiline koherentsus.....	- 8 -
1.2.3 Ajaline koherentsus.....	- 8 -
1.2.4 Atmosfääri kompensatsiooniparandi arvutamine.....	- 9 -
1.2.5 PSI analüüs.....	- 9 -
1.2.6 Vertikaal- ja horisontaalliikumiste arvutamine	- 9 -
1.2.7 H kiiruspinnad.....	- 10 -
1.3 Satelliitandmed.....	- 11 -
1.4 Uuringuala	- 13 -
2 Vertikaalkiiruste arvutamine PSI andmetest.....	- 14 -
3 EH kiiruspinnad.....	- 15 -
4 Deformatsioonide järelanalüüs vahemikule 2016-2020	- 17 -
4.1 Nivelleeritud kiirused	- 17 -
4.2 Kiiruste võrdlus niveleerimise ja 2016-2020. a vahel.....	- 17 -
4.3 Kiiruste võrdlus niveleerimise ja 2019-2020. a vahel.....	- 19 -
4.4 Kiiruste võrdlus 2016-2019 ja 2016-2020 vahel.....	- 20 -
4.5 Kiiruste võrdlus 2019-2020 ja 2016-2020 vahel.....	- 21 -
4.6 Võrdluste kokkuvõte	- 22 -
5 Deformatsioonide järelanalüüs aastate kaupa vahemikus 2016-2020.....	- 25 -
Kokkuvõte.....	- 28 -
Viited	- 29 -
LISAD.....	- 30 -

Lühendid

APS (*ingl Atmospheric Phase Screen*) – parand, mis arvutatakse deformatsiooni mudelile atmosfääri mõju kompenseerimiseks.

ASC(*ingl Ascending*) – tõusva orbiidi suund, SAR pilt on tehtud satelliidi liikumisel lõunast põhja.

ASI (*ingl Amplitude Stability Index*) – statistiline väärtus, mida kasutatakse PSI analüüsi piirväärtusena, et filtreerida välja analüüsiks sobivad pikslid.

DEM (*ingl Digital Elevation Model*) – maapinna digitaalne kõrgusmudel.

DESC (*ingl Descending*) – langev orbiidi suund SAR pilt on tehtud satelliidi liikumisel põhjast lõunasse.

E (*ingl East*) – koordinaattelg, mille positiivne suund on ida suunas.

GPA – geodeetiliste punktide andmekogu, <https://gpa.maaamet.ee>

H (*ingl Height*) – koordinaattelg, mille positiivne suund on mööda ellipsoidi normaali. Käesolevas uurimistöös võrdsustatakse see vertikaalse deformatsiooni suurusega.

InSAR (*ingl Interferometric SAR*) – interferomeetriline tehisavaradar, üldistatud nimetus sidumaks interferomeetrilisi SAR meetodeid.

LIDAR (*ingl Light Detection And Ranging*) – kaugseire meetod kõrgusandmete kogumiseks.

LOS (*ingl Line Of Sight*) – vaatesuund satelliidi sensorist peegeldava objektini maapinnal.

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

PSI (*ingl Persistent/Permanent Scatterer Interferometry*), ka PSInSAR® (*ingl. Persistent/Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*) – SAR interferomeetria meetod, mis uurib deformatsioone ajas interferogrammide aegridade analüüsist.

SAR (*ingl Synthetic Aperture Radar*) – tehisavaradar.

SLC (*ingl Single Look Complex*) – SAR faasipildi tüüp, mida kasutatakse interferomeetrias.

Sissejuhatus

Käesoleva aruande koostamisel lähtuti Tallinna LV ostuhanke „InSAR andmete tugineva kaugseire andmete võrdlusanalüüs Tallinna kõrgusvõrgu testalas“ tingimustest.

Uurimustöö eesmärgiks oli InSAR ja kõrgtäpse nivelleerimise teel kogutud kõrgusandmete võrdluse teel saada informatsiooni reeperite kõrguslikust seisukorrast aasta pärast nivelleerimistööde lõppu. Kordusnivelleerimise töid antud perioodil toimunud ei ole. InSAR analüüsiks kasutati Copernicus programmi raames tasuta kättesaadavaid Sentinel-1 missiooni SAR andmeid Tallinna kesklinna alas perioodil 06.2016 kuni 11.2020.

Töös esitletakse kasutatud PSI meetodit, satelliitandmeid ja uuringuala. Kirjeldatakse kahe ajavahemiku nivelleerimistulemustest arvutatud reeperite kõrgusväärtuste muutusi ja antud muutuste täpsushinnanguid, võttes need analüüsi referentsandmeteks. Järgnevalt näidatakse, kuidas PSI meetodil mõõdetud deformatsioone saab viia referentsandmetega võrreldavale kujule. Teostatakse reeperite põhine võrdlus ja analüüsitakse saadud tulemusi. Töö lõpus tuuakse kokkuvõtte ja ettepanekud järgnevateks sammudeks.

Töö tulemused esitatakse aruandena digitaalselt, millele lisatakse andmetabel *.xlsx kujul, H deformatsioonide mudelid *.tif formaadis ning LOS analüüsid *.csv ja *.shp failide kaupa. LOS analüüsid tehakse ka kättesaadavaks [SILLE](#) rakenduses. Aruandega kaasnevate failide iseloomustus ning lühikirjeldus on toodud lisades (Lisa 2).

1 InSAR mõõtmised

SAR on aktiivne kaugseire meetod, mida kasutatakse liikuval sõidukil (lennuk, satelliit). SARi erinevus tavalisest radarist on mõõtmistel suhtelise liikumise kasutamine. See võimaldab vähendada vastuvõtuantenni mõõtmeid kaotamata ruumilist lahutatavust. SAR kasutab radari põhimõtet, kus saadetakse välja impulss ja mõõdetakse aega impulsi lähetamisest kuni vastuvõtmiseni. Kasutatav mikrolaine sagedusala võimaldab teostada mõõtmisi ka sõltumata pilvkatte tihedusest. See annab SAR meetodile eelise optiliste piltide ees, mille kasutamist piirab tugevasti pilvkatte esinemine uuritaval objektil.

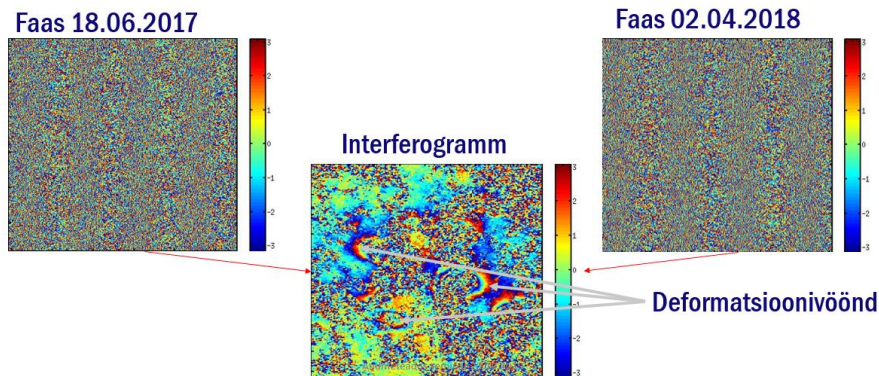
SAR mõõtmise tulemuseks on kaks pilti. Esimene sisaldab amplituudi ja teine faasi väärtusi. Amplituud kajastab tagasipeegeldunud signaali tugevust satelliidi vaatesuunas. Faasi pilti salvestatakse tagasipeegelduste viimaste lainete pikkused. Tagasipeegelduva faasi väärtus saab muutuda vahemikus 0-1 lainepikkust ehk ka vahemikus $\pm \pi$ rad. Kui tegelik kaugus satelliidi ja objekti vahel on teada ligikaudu, siis viimase lainepikkus salvestatakse väga täpselt. Just faasiväärtus ja selle muutus võimaldab teostada millimeeter (mm) suurusjärgus mõõtmisi. Samas on siiski tegemist suhtelise mõõtmisega, mis kajastab kuni lainepikkuse suurusi tulemusi kahe mõõtmise vahel.

Kuna SAR kasutab mõõtmiseks erinevaid lainepikkusi, siis ei saa kasutada interferomeetriliseks analüüsiks erinevate satelliidi andmeid koos, vaid need peavad olema kogutud ühe ja sama lainepikkusega satelliidi poolt. Näiteks ei saa teostada interferomeetrilist analüüsi ühe X sagedusala ja ühe C sagedusala piltide vahel. Samas on võimalik teha analüüs Sentinel-1A ja Sentinel-1B faasi piltide vahel, sest lainepikkused on samad ja nad tiirlevad samal orbiidil. Lisaks peavad pildid olema tehtud võimalikult samast kohast ja sama vaatesuunaga. Seega saab ühte interferomeetrilist analüüsi teha vaid samalt orbiidilt tehtud SAR piltidega.

1.1 InSAR interferomeetriline analüüs

Kui kaks faasipilti asetada üksteisega väga täpselt kohakuti, siis tekib nende vahel interferents. Sellel kajastub pikslite faaside erinevus. Tekkinud pilti nimetatakse interferogrammiks. Faasi muutused kajastuvad deformatsiooni interferogrammil lainepikkuse muutustena vahemikus $\pm \pi$. Seda suurust nimetatakse interferomeetriliseks faasiks (f). Deformatsioon avaldub vöönditena, mille suurus on kuni pool lainepikkust. InSAR mõõtmised on alati relatiivsed. Üks punkt loetakse interferogrammil teiste suhtes muutumatuks ehk referentspunktiks.¹ Loendades vööndite arvu teiste pikslite ja referentspunkti vahel saadakse deformatsiooni väärtus arvutatavale pikslile referentspunkti suhtes.

¹ InSAR ei ole absoluutne, vaid relatiivne mõõtmine. Seega referentspunkti suur liikumine põhjustaks olulise ja nähtava süstemaatilise nihke kogu kiirusvälja mudelis. Samas saame eeldada, et suurem osa hooneid Tallinnas liigub vähe või üldse mitte, selle põhjal saab järeldada, et referentspunkt on vähe liikuv. Siinkohal tuleb mainida, et vastupidine oletus, kiirusvälja süstemaatilise nihke põhjustab referentspunkt, ei ole nii range, sest põhjuseid võib olla rohkem. Näiteks senini teadmata/uurimata pikalaineline deformatsiooni signaal. Käesolevas töös kasutati ühe orbiidi analüüsidel sama referentspunkti, mis sai valitud kõige 2016-2020 analüüsi põhjal. See on mõistlik, sest siis on lühikesed analüüsid pikemaga seotud referentspunkti kaudu. Referentspunkt valitakse SAR piltide põhjal koostatud statistikute abil ASI, sp.coherence ja eeldatakse et see on muutumatu.



Joonis 1. Kui kaks faasipilti kohakuti asetada ja liita, tekib interferentsipilt, mida nimetatakse interferogrammiks ja tekkivat faasi interferomeetriliseks faasiks (f). Suure müraga alad on interferogrammil kujutatud säbrulise mustriaga, kus deformatsioonivöönde näha ei ole.

Interferomeetriline faas f koosneb mitmest komponendist: satelliidi asukohast tingitud nihe, topograafiast, deformatsioonist, atmosfääri komponendist (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001).

$$f = f_{orb} + f_{topo} + f_{def} + f_{atm} + f_{müra}, \quad (1)$$

kus f_{orb} – orbiidi ebatäpsus,
 f_{topo} – topograafia mõju,
 f_{def} – deformatsioon,
 f_{atm} – atmosfääri mõju,
 $f_{müra}$ – müra.

f_{orb} tekib sellest, et interferomeetrilisel analüüsil kasutatavad faasipildid ei ole tehtud samast kohast, vaid iga pildi tegemisel on satelliit natuke teises kohas. Kuid kuna satelliidi asukohad on täpselt teada, siis on see komponent arvutatav ja kompenseeritav. f_{topo} on topograafiast tekkiv komponent, mida saab vajadusel kasutada madala eraldusvõimega digitaalsete kõrgusmodelite (DEM) arvutamiseks. Deformatsiooni analüüsil tuleb f_{topo} eemaldada kasutades näiteks saadaolevat DEM mudelit, mille kõrgused arvutatakse ümber signaali komponendiks ja kompenseeritakse. f_{def} on deformatsiooni komponent, mis on antud analüüsis leitav suurus. f_{atm} on atmosfääri komponent, kuna Maa atmosfäär ei ole homogeenne ning muutub ajas. Iseäranis niiskuse hulk troposfääris põhjustab SAR lainekiiruse muutusi. Kuid atmosfääri mõju on võimalik hinnata ja see on kompenseeritav. $f_{müra}$ on muud häired ja veaallikad, mis võivad põhjustada faasi kõikumisi.

Valemist (1) saab nüüd tuletada deformatsiooni:

$$f_{def} = f - f_{orb} - f_{topo} - f_{atm} - f_{müra}, \quad (2)$$

kus f_{orb} – on määratav ja eemaldatav,
 f_{topo} – kasutatakse välist DEM mudelit,
 f_{atm} – hinnatakse analüüsi käigus ja eemaldatakse,

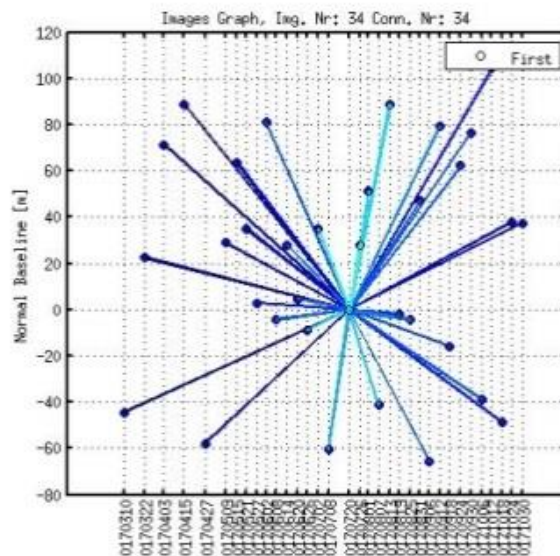
$f_{müra}$ – saab hinnata.

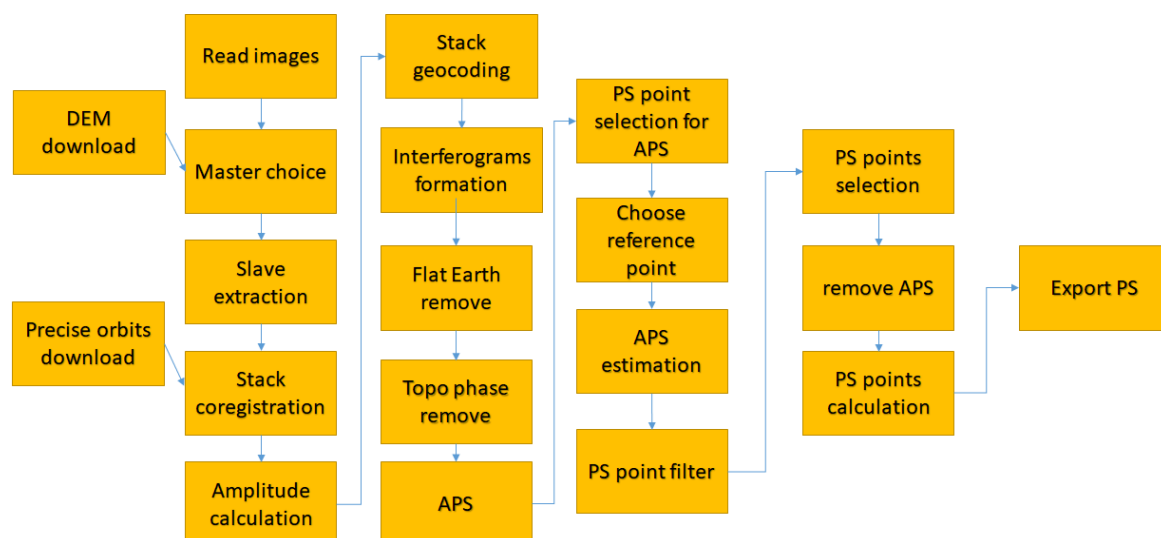
Joonisel 1 on kujutatud deformatsiooni interferogramm, kust on eemaldatud orbiidi ja topograafiline komponent. Lisaks selgetele deformatsioonivöönditele, on näha ka säbrulisi alasid. Need on analüüsi teostamiseks liiga mürarikkad.

1.2 Deformatsiooni arvutamine PSI meetodil

InSAR analüüs, mis põhineb kahel faasipildil, on kasulik meetod näiteks maavärinate poolt põhjustatud deformatsioonide arvutamiseks. Samas kui soovitakse analüüsida objekte pikema ajavahemiku jooksul, siis on vajalik analüüsida deformatsioone mitme interferogrammi abil. Seda nimetatakse ajaliseks InSARiks (*ingl Multi-temporal InSAR*). Meetodeid, kuidas interferogramme omavahel siduda, on mitmeid (Crosetto, Monserrat, Cuevas-González, Devanthery, & Crippa, 2016). Antud töös kasutatakse PSI meetodit, mis on kirjeldatud artiklis (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001).

PSI meetodi puhul tekitatakse interferogrammide võrk ühe referentspildi suhtes. Graafiliselt on antud sidumine tähe kujuline (Joonis 2). Antud sidumismeetod võimaldab siduda interferogrammid ka ajaliselt, kuna kõik interferogrammid kajastavad muutust ühe referentsaja (referentspildi mõõdistusaeg) suhtes.





Joonis 3. PSI meetodi tööprotsess

1.2.1 PSI punktide valik

Mitte kogu huvialale ei ole võimalik teha usaldusväärset analüüsi. Usaldusväärsete alade (pildi pikslite) väljaselgitamiseks on otstarbekas läbi viia eelnev usaldusväärsete alade leidmine statistikute abil. PSI meetodi puhul on enim kasutatav amplituudi dispersiooni kasutamine, mis arvutatakse valemiga:

$$D_a = S_a / m_a, \quad (3)$$

kus S_a – piksli amplituudi standardhälve,

m_a – piksli keskmine hälve.

Mida madalam on D_a , seda kõrgema stabiilsusega on piksli amplituud ajas. Lihtsamaks mõistmiseks kasutatakse ka normaliseeritud amplituudi stabiilsusindeksit (ASI).

$$ASI = 1 - D_a. \quad (4)$$

Mida kõrgem on ASI väärtus, seda stabiilsem on punkt (piksel).

1.2.2 Ruumiline koherentsus

Kui ASI on sõltuv pinna reflektiivsusest, siis võivad jääda vähe peegelduvad, kuid samas stabiilsed pinnad sisendvalikust välja. Selle vältimiseks võib sisendparameetriks kasutada ka ruumilist koherentsust, kus arvutatakse piksli korrelatsioon sama interferogrammi naaberpikslite suhtes. Ruumiline koherentsus omab väärtust 0 kuni 1. Mida kõrgem koherentsuse väärtus, seda stabiilsem on piksel. Kõikidest arvutatud interferogrammide koherentsuspiltidest võetakse keskmine väärtus, mis annab ülevaate eeldatavalt ajas stabiilsetest pikslitest.

1.2.3 Ajaline koherentsus

Ajaline koherentsus näitab aegreas faasi väärtuste sobivust valitud deformatsioonimudeli suhtes. Kiiruse arvutamisel valitakse deformatsiooni mudeliks sirge ehk lineaarne mudel. Peale analüüsi arvutatakse igale andmepunktile ajalise koherentsuse koefitsient, mis on omab väärtust vahemikus 0 kuni 1. mida suurem on väärtus, seda parem on sobivus faasiväärtuste ja valitud mudeli vahel. Ajalist koherentsust kasutatakse piirväärtusena, et filtreerida arvutatud analüüsi punktidest välja usaldusväärsemad punktid.

1.2.4 Atmosfääri kompensatsiooniparandi arvutamine

Atmosfääri kompensatsiooniparand (APS) arvutuse puhul hinnatakse atmosfääri heterogeensusest tingitud mõju faasi väärtusele. APS tuleb arvutada huvialadele, mille suurus on üle 2 km². Väiksemate alade puhul võib atmosfääri lugeda homogeenseks ning APS määrata ei ole vaja. APS hindamisel eeldatakse, et atmosfäär põhjustab madalasagedusliku signaali. Seega saab seda hinnata filtreerides välja madala sagedusliku komponendi interferogrammidele. Täpsemaks määramiseks kasutatakse ainult kõrge kvaliteedihinnanguga pikslid. Valitud pikslitest moodustatakse ruumiline võrk. Võrgustikule teostatakse PSI analüüs, kus määratakse kõikidele pikslitele deformatsioon ajas referentspunkti suhtes. APS määratakse igale interferogrammidele, milleks on võrgustatud deformatsiooni määrangust jäänud jääkväärtuste madalasageduslik osa.

1.2.5 PSI analüüs

Peale APS määrangut saab arvutada igale sisendparameetrit ületavale pikslile deformatsiooni referentspunkti suhtes. See toimub periodogrammi abil, kus sisendiks on eeldatav deformatsiooni kiirus. Kiirus ajas on lineaarne ja hilisema väljundfiltri abil on võimalik valida vaid pikslid (punktis), mis vastavad valitud mudelile kõige paremini.

1.2.6 Vertikaal- ja horisontaalliikumiste arvutamine

InSAR deformatsiooni väärtused, sõltumata kasutatavast meetodist, on alati satelliidi vaatesuunas ehk LOS suunas. LOS on ühemõõtmeline väärtus, mis iseloomustab deformatsiooni suurust piksli alal. Piksli asukoht kolmemõõtmelises ruumis sõltub satelliidi geomeetriast, kasutatavatest DEM mudeli täpsusest ning ka objekti kõrgusest maapinnast. Seega võib piksli asukoht plaaniliselt olla tunduvalt väiksema täpsusega kui LOS väärtus.

Asjaolu, et LOS väärtus on ühemõõtmeline, ei võimalda selle otsest transformatsiooni kolmemõõtmelisse ruumi (*ENH*). Samas kui objekti jälgitakse kahelt vastassuunaliselt orbiidilt (ingl *ascending* – ASC ja *descending* – DESC) on võimalik arvutada *E* ja *H* komponendid. Kuna satelliidi tiirlemisorbiit on peaaegu polaarne, siis *N* komponendi määramise täpsus on madal. Seetõttu *N* komponenti käesolevas töös ei arvutatud. *E* ja *H* komponendid arvutatakse vastavalt valemile (6) (isiklik suhtlus D. Perissin 2016). Arvutusse kaasatakse ka LOS mõõtmiste orientatsiooninurka φ ja tõusunurka θ . Transformeerimise seosed on toodud Joonisel 4. Juhul kui on kasutada ainult üks orbiit, saab ligikaudse *H* deformatsiooni arvutada ka ühelt orbiidilt. Selleks eeldatakse, et kogu LOS liikumine on vertikaalne ning horisontaalset liikumist ei ole toimunud. See tingimus teeb arvutuse ligikaudseks.

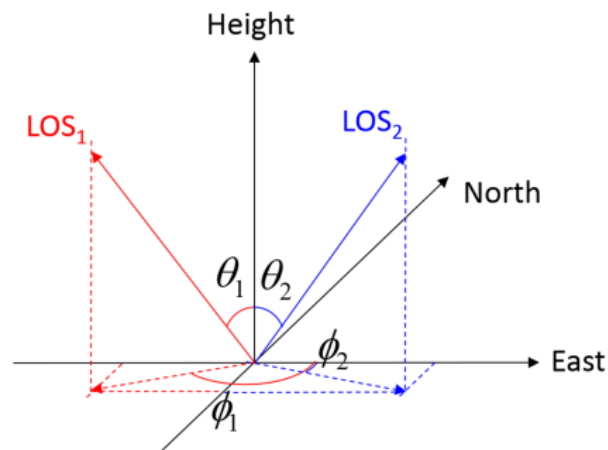
Valemi (6) arvutus kehtib rangelt ainult siis, kui on täidetud tingimus, et mõlemad suunad jälgivad ühte ja sama objekti. Samas kasutades looduslike peegeldusi, ei saa antud tingimusega arvestada, kuna satelliitide vaatesuunad on ca 180 kraadi erinevad. Seetõttu on mõistlik valemit (6) kasutada võrgustatud pindadega. LOS väärtused võrgustatakse eelnevalt regulaarse sammuga võrguks ja *EH* analüüs teostatakse võrgupunktidele.

$$\begin{bmatrix} dH_{LOS1} \\ dH_{LOS2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \cos \varphi_1 & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 \cos \varphi_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix}, \quad (5)$$

seega

$$\begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} dH_{LOS1} \\ dH_{LOS2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

kus dH_{LOS1} – LOS deformatsioon esimene orbiit (mm),
 dH_{LOS2} – LOS deformatsioon teine orbiit (mm),
 θ_1 – tõusunurk esimene orbiit (rad),
 φ_1 – esimese orbiidi suunanurk (rad),
 θ_2 – tõusunurk teine orbiit (rad),
 φ_2 – teise orbiidi suunanurk (rad),
 E – idasuunaline komponent (mm),
 H – vertikaalkomponent (mm),
 M – transformatsioonimaatriks.



Joonis 4. Kahe vastasuunalise LOS väärtuse arvutamine E ja H komponendiks.

Käesoleva töös kasutati võrdluseks ainult vertikaalkomponenti³, sest referentsandmeteks olid nivelleerimistulemused, kus mõõdetakse ainult H komponenti.

1.2.7 H kiiruspinnad

Deformatsioon dH ja kiirus v on omavahel seotud ajalise mõõtmekaudu:

$$dH_{LOS} = v_{LOS} * dT, \quad (7)$$

kus dH_{LOS} on vaatesuunaline kogudeformatsioon valitud ajavahemikus (mm),
 v_{LOS} on deformatsiooni keskmine kiirus üle ajavahemiku (mm/aasta),
 dT on ajavahemiku pikkus (näiteks aasta).

Ei ole vahet, kas kasutatakse deformatsioone või kiirusi, arvutamaks H ja E suunalisi komponente valemis (6).

³ E komponent arvutatakse ikka, kuid hilisemas analüüsis seda ei kasutata.

Võrgustatud LOS1 ja LOS2 kiiruspindadest (v_{LOS1} , v_{LOS2}) arvutati ida-lääne suunalised (v_E) ja vertikaalsuunalised (v_H) kiiruspinnad vastavalt valemile

$$[v_E \ v_H]^T = M^{-1} [v_{\text{LOS1}} \ v_{\text{LOS2}}]^T, \quad (8)$$

kus M^{-1} on transformatsioonimaatriksi M pöördmaatriks, vt ka valem (6). Viimane arvutati orbiitide tõusu- ja suunanurkadest (Tabel 1). Valemiga (7) teisendati LOS-kiiruste võrgustikfailid otse E , H kiiruspindade võrgustikfailideks programmiga GMT grdmath. Analoogselt arvutati ka kiiruste standardhälvete võrgustikud, valem maatrikskujul on

$$[D(v_E) \ D(v_H)]^T = M^{-1} [D(v_{\text{LOS1}}) \ D(v_{\text{LOS2}})]^T (M^{-1})^T, \quad (9)$$

kus $D(\dots) = u(\dots)^2$ kirjeldab vastava suuruse dispersiooni (*ingl variance*), mis arvutatakse (standard)-määramatusest (*standard uncertainty*), mida antud juhul esindab LOS-kiiruse standardhälve (veerg „SIGMA VEL“).

1.3 Satelliitandmed

Järgnevas analüüsis on kasutatud Sentinel-1 SAR IW SLC pilte, mis on vabalt saadaval andmelaos aadressil <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Sentinel-1 satelliit kasutab mõõtmiseks mikrolaineala sagedusega 5.405 GHz, mis vastab lainepikkusele 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 mõõtmistsükliks omavahel sünkroniseeritud ajalise nihkega, mis tagab maksimaalse mõõtmistsükli 6 päeva.

Tabel 1. Kasutatud Sentinel 1 satelliitandmete parameetrid analüüsi ajalise pikkuse järgi.

Relatiivse orbiidi number	Suund	Ajavahemik	Piltide arv	Tõusunurk (°)	Asimuut ⁴ (°)	Suunanurk (°)
80	Langev (DESC)	14.06.2016-08.11.2020	193	43.5179	189.3537	-9.3669
80	Langev (DESC)	14.06.2016-06.11.2017	58	43.5179	189.3537	-9.3669
80	Langev (DESC)	06.11.2017-01.11.2018	46	43.5179	189.3537	-9.3669
80	Langev (DESC)	01.11.2018-02.11.2019	45	43.5179	189.3537	-9.3669
80	Langev (DESC)	02.11.2019-08.11.2020	47	43.5179	189.3537	-9.3669
160	Tõusev (ASC)	07.06.2016-07.11.2020	203	33.5389	347.9874	-168.1268
160	Tõusev (ASC)	07.06.2016-05.11.2017	60	33.5389	347.9874	-168.1268
160	Tõusev (ASC)	05.11.2017-06.11.2018	50	33.5389	347.9874	-168.1268
160	Tõusev (ASC)	06.11.2018-01.11.2019	48	33.5389	347.9874	-168.1268
160	Tõusev (ASC)	01.11.2019-07.11.2020	48	33.5389	347.9874	-168.1268

Tabelis (Tabel 1) toodud ajavahemike SAR pildid kaasregistreeriti orbiitide kaupa ASC ja DESC projektidesse. Esmane PSI analüüs viidi läbi vahemikus 2016-2020. Erinevate aastate analüüsid teostati sama projekti kopeerides, kuid lühendades aegrida soovitud pikkuseni. Seega on iga arvutatud aegrida

⁴ Asimuudi nurk α arvutatakse põhjasuunas päripäeva. Enne valemi (6) rakendamist tuleb α taandada suunanurgaks $\varphi = 180 - \alpha$ asetades selle õigesse veerandisse.

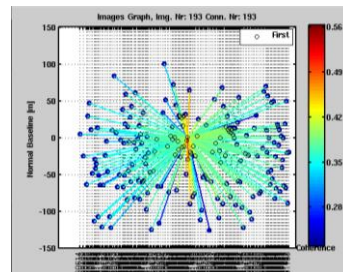
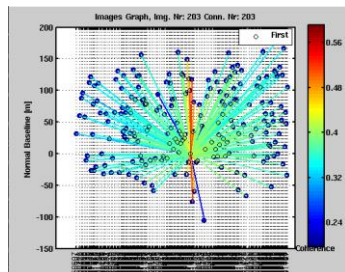
omaette projekt. Lühikesed analüüsid on omavahel seotud sama referentspunkti kaudu. Referentspunkt lühikestel analüüsidel on sama, mis pikal analüüsil. See tagas, et eripikkusega aegread on võrreldavad ning referentspunkti mõju tulemustele ei ole vaja arvestada. PSI analüüs sisaldas interferogrammide paaride moodustamist peapildi suhtes (Joonis 5).

Analüüsi ajavahemik

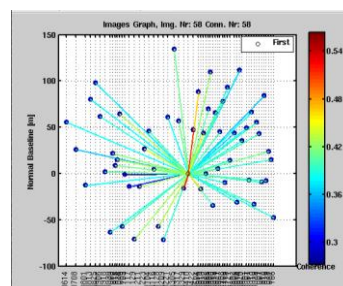
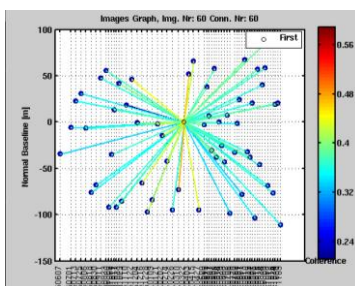
Sidumise graafik ASC orbiidilt

Sidumise graafik DESC orbiidilt

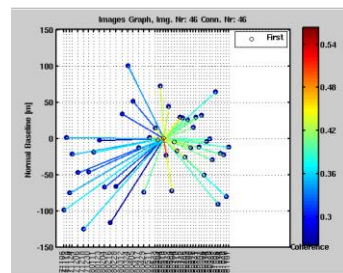
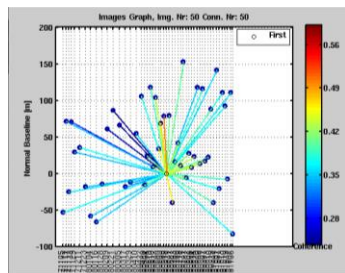
Juuni 2016 – Nov. 2020:
ASC peapilt 25.10.2018,
DESC peapilt 20.09.2018.



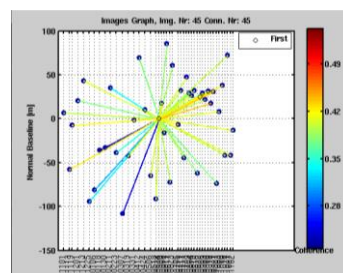
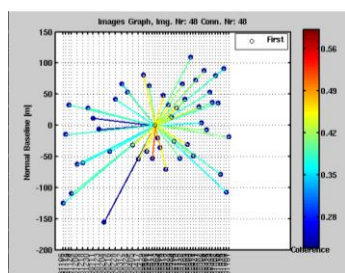
Juuni 2016 – Nov. 2017:
ASC peapilt 22.03.2017,
DESC peapilt 10.04.2017.



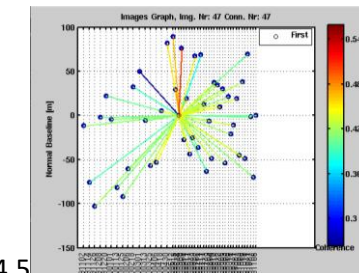
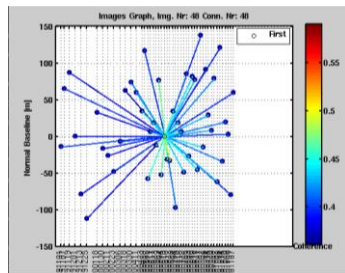
Nov. 2017 – Nov. 2018:
ASC peapilt 15.06.2018,
DESC peapilt 10.06.2018.



Nov. 2018 – Nov. 2019:
ASC peapilt 23.05.2019,
DESC peapilt 24.05.2019.



Nov. 2019 – Nov. 2020:
ASC peapilt 10.06.2020,
DESC peapilt 24.05.2020.



4.5

Joonis 5. Analüüsiks moodustatud interferogrammide paarid peapildi suhtes.

Deformatsioonid arvutati PSI meetodi abil, kasutades PSI valiku sisendparameetrit, amplituudi stabiilsusindeksit (ASI) ja ruumilise koherentsuse summat väärtusega >1.4 . Huvialale arvutatud APS parandite jaoks kasutati sisendparameetri väärtusi $(ASI + \text{ruumiline koherentsus}) > 1.6$. Analüüside väljundiks loeti deformatsiooni punktid, kus ajaline koherentsus oli suurem kui 0.7.

1.4 Uuringuala

Uuringuala suurus valiti lähtuvalt reeperite asukohtadest (Joonis 6). See katab suurema osa Tallinna sadama ja kesklinna territooriumist.

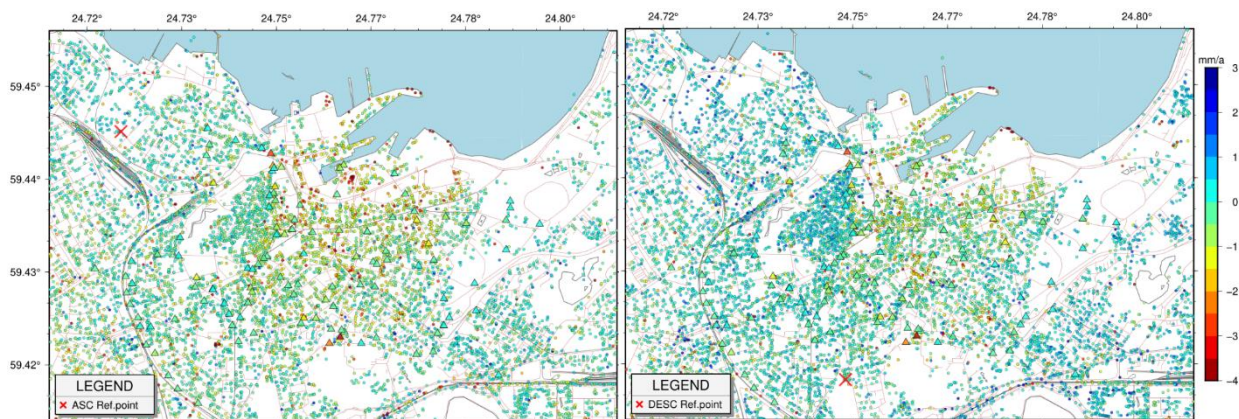


Joonis 6. Uuringuala

2 Vertikaalkiiruste arvutamine PSI andmetest

Sisendandmeteks võeti SARPROZ andmeanalüüsist eksporditud LOS andmed (*.csv fail, vt Lisa 2), kus lisaks koordinaatidele ja muule infole esitati analüüsitud PSI punktide/pikslite LOS-suunalised deformatsiooni (väli „CUMUL.DISP.“, tähistus dH) ning kiiruse („VEL“, v) väärtused koos standardhälbega („SIGMA VEL“, $u(v)$) PSI analüüsi referentspunkti suhtes. Siinkohal tuleb rõhutada, et SARPROZ analüüsis arvutati PSI andmetest esmalt optimaalsed (statistiliselt parimad) kiiruse väärtused, millest omakorda tuletati deformatsiooni väärtused kogu ajaperioodile (korrutades kiirused läbi ajaperioodi pikkusega dT , mis antud juhul $dT = 4.42$ a), vt ka valem (7).

Arvutusse kaasati kahelt vastassuunaliselt orbiitidelt mõõdetud LOS andmed (Joonis 7), nimetades need LOS1 (vastab ASC ehk tõusvale orbiidile) ja LOS2 (DESC ehk langev orbiit). LOS andmed arvutati lühiajalistele, aastapikkustele perioodidele: 2016.06–2017.11 ($dT = 1.5$ a), 2017.11–2018.11, 2018.11–2019.11, 2019.11–2020.11, samuti kogu ajaperioodile 2016.06–2020.11. Siin ja edaspidi on kasutatud ajahetke formaati aaaa.kk.



Joonis 7. LOS1 ASC (vasakul) ja LOS2 DESC (paremal) kiirused PSI andmetest (2016.06–2020.11) koos referentspunkti asukohaga.

Esitatud LOS 2016–2020 a. punktide kiirused on küll sarnased ja näitavad suuremaid ning samasuunalisi liikumiskiirusi kesklinna piirkonnas, kuid olulisi erinevusi esineb kiirusväärtustes (Joonis 7). Nagu ka eespool selgitatud, kombineeruvad LOS kiirusväärtustes (ühesuunalised, nõ satelliidi vaatesuunal) horisontaalsuunalised liikumised (vastavalt ida-lääne ja põhja-lõuna suunalised E , N komponendid) vertikaalsuunalise (H komponent) liikumisega. Reeperite vertikaalkiiruste ja maapinna liikumiste uurimiseks osutub vajalikuks nimetatud komponendid LOS andmetest eristada.

3 EH kiiruspinnad

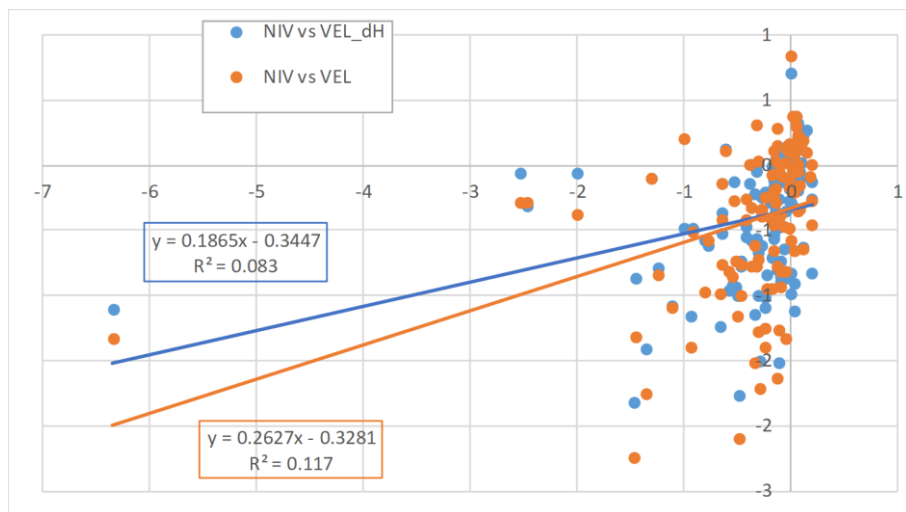
Antud uuringus eristati ainult E ja H suunalised liikumised (2 otsitavat suurust, $n = 2$) kui domineerivad komponendid Sentinel-1 polaarorbiidi tõttu. Kuna kasutada oli kaks LOS andmestikku (2 sisendsuurust, $m = 2$), siis otsitavate arv valemis (6) on piiratud tingimusega $n \leq m$.

E , H eristamiseks võrgustati LOS kiiruspinnad ning seejärel arvutati satelliitide orbiite kirjeldavate nurkade (Tabel 1) kaudu E ja H kiiruspinnad, võttes aluseks valemid (8-9). Võrgustamisel lähtuti esmalt 2019. a andmeanalüüsi metoodikast (Gruno, 2019), rakendades deformatsioonide võrgustamiseks 2D splainipinda (tarkvara *GMT⁵ surface*) ja vähimruutude meetodit hälvete minimeerimiseks sammuga 0.0001° ($0.36''$). Enne võrgustamist keskmistati (*GMT blockmean*) LOS andmeid võrgule sammuga $3''$. Antud võrgustamismeetodi juures on oluline fikseerida veel splainipinna pinge- ehk jäikusparameeter T (reaalarv vahemikus $0...1$), mis käesolevas arvutuses fikseeriti $T = 0.3$.

Käesoleva analüüsis modifitseeriti võrgustamismetoodikat, võttes alusandmestikuks kiiruste väärtused v ning arvestades võrgustamisel meridiaanide koonduvusega ellipsoidi pooluste suunas. Teisisõnu, keskmistamise ja võrgustamise võrgu sammudeks (pikslite suuruseks) Lon/Lat suundadel valiti vastavalt $3''/1.5''$ ja $0.72''/0.36''$ (L-EST97 tasapinnal vastavalt $\approx 50 \times 47$ m ja $\approx 12 \times 11$ m). Uuriti ka keskmistamise ning jäikusparameetri T mõju võrgustamistulemustele (Lisa 3), kuid statistiliselt märgatavalt paremaid tulemusi see ei andnud. Näiteks küllalt erinevate parameetritega (keskmistamine sammuga $1''$ ja võrgustamine parameetriga $T = 1.0$ ajavahemikule 2016-2020) arvutatud kiiruste erinevused antud uuringus esitatud kiirusväärtustest võib lugeda mitteoluliseks (keskv. 0.00 ± 0.21 mm/a, min. -0.63 mm/a, maks. 0.64 mm/a), võttes arvesse PSI kiiruste keskmise määramatuse ≈ 0.5 mm/a (Lisa 1).

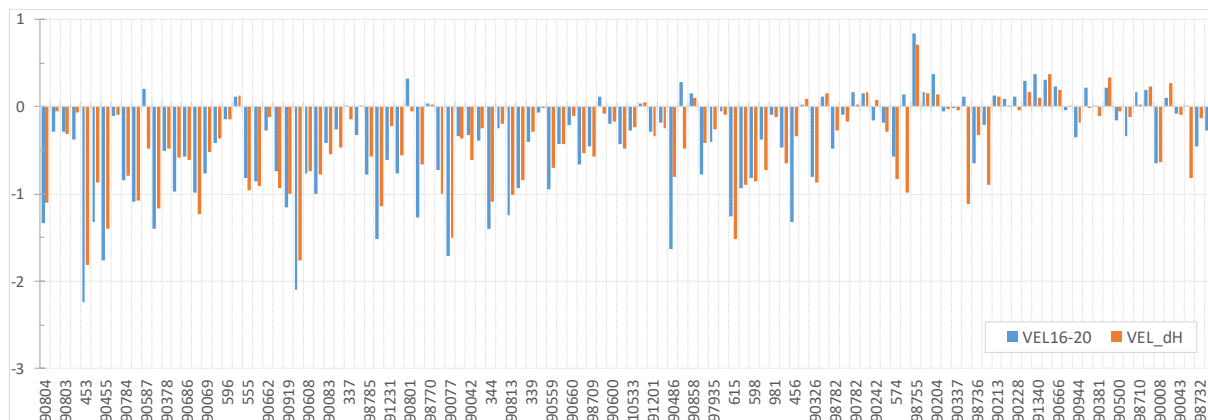
2019. a võrgustati deformatsiooniväärtused (dH , ühik mm). Nagu eespool rõhutatud, sobivad kõrgusvõrgu reeperite ja PSI liikumiste ühiseks analüüsiks paremini kiirusväärtused (v , ühik mm/a), mille puhul vaadeldakse ning võrreldakse liikumisi mingi kindla ajaperioodi kohta, nt aasta jooksul ($dT = 1$ a). Sel juhul muutuvad erinevatele ajaperioodidele arvutatud liikumised võrreldavaks. Nagu eelnevalt selgitatud, kehtib LOS väljundandmestiku puhul seos $dH = v dT$ ($dT = 4.42$ a). See seos ei kehti rangelt enam pärast LOS-pindade võrgustamist, kuna EH pindade arvutusel ning võrgustamisega kaasnevad paratamatult väiksemad ebatäpsused (nt interpoleerimise vead). Olukorda ilmestavad PSI LOS dH ja v väärtustest arvutatud vertikaalkiiruste seosed nivelleeritud kiirustega (Joonis 8) ja kiiruste jaotus kõrgusvõrgu reeperitel (Joonis 9).

⁵ *Generic Mapping Tools* – vaba, avatud koodiga tarkvara geoinfo analüüsiks ja esitamiseks, <https://www.generic-mapping-tools.org/>



Joonis 8. 2016-2020. a mõõdetud LOS suuruste dH ja v kaudu arvutatud vertikaalkiiruste (vastavalt tähistatud kui VEL_dH ja VEL , mööda vertikaaltelge) seos reeperite nivelleeritud kiirustega (NIV , horisontaalteljel). Veidi tugevama seose (suurema R^2 väärtuse) NIV kiirustega annab VEL lahendus.

Samas võib $LOS\ dH$ ja v väärtustest arvutatud kiiruste jaotuse reeperitel lugeda küllalt sarnaseks, kuna keskmine erinevus on $0.01 \pm 0.31\text{ mm/a}$ (Joonis 9).



Joonis 9. 2016-2020. a mõõdetud LOS suuruste dH ja v kaudu arvutatud vertikaalkiiruste (vastavalt tähistatud kui VEL_dH ja $VEL16-20$) võrdlus reeperitel, keskmise erinevusega $0.01 \pm 0.31\text{ mm/a}$ (min. -1.23 mm/a , maks. 0.98 mm/a).

4 Deformatsioonide järelanalüüs vahemikule 2016-2020

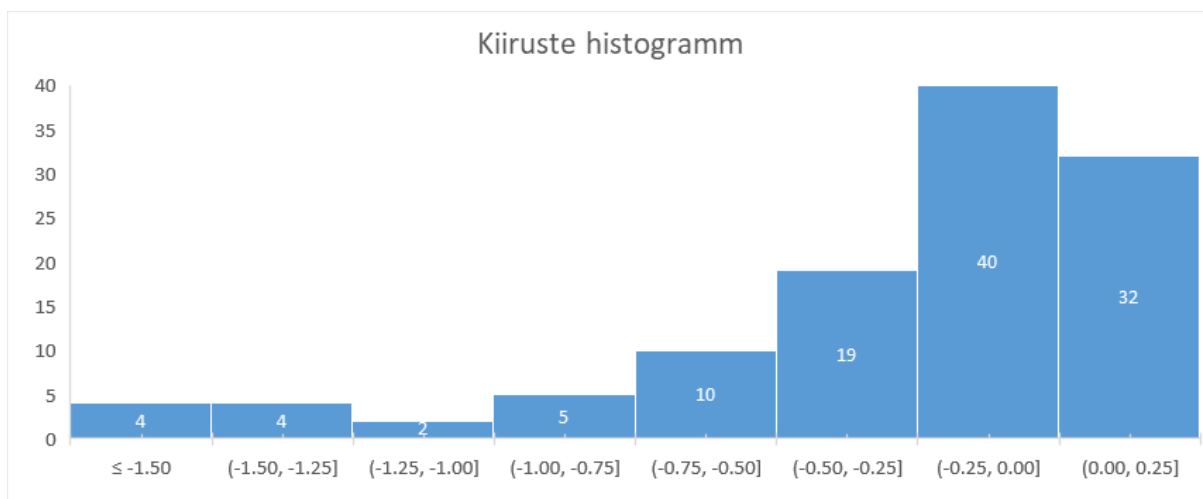
Antud töös kasutatakse erineva pikkusega, nii lühi- kui pikaajalisi deformatsioonide aegridu. Liikumiste järelanalüüs jaguneb neljaks etapiks:

- 1) võrreldakse 2016-2020. a vertikaalliikumiste kiirusi (H kiirusi) reeperite kiirustega;
- 2) võrreldakse 2016-2019. a H kiirusi 2016-2020. a kiirustega;
- 3) võrreldakse 2016-2020. a H kiirusi 2019-2020. a kiirustega;
- 4) analüüsitakse aastate kaupa H kiirusi vahemikus 2016-2020.

Põhjalikumalt uuritakse aegride kaudu ajavahemikku 2019-2020. Järelanalüüsis tuuakse välja peamised statistikud ja kommenteeritakse tulemusi. Koondandmestiku tabelid esitatakse lisades (Lisa 1) ja digitaalsena *.xlsx failis.

4.1 Nivelleeritud kiirused

Vertikaalkiiruste analüüsimisel lähtuti PSI kiiruspindade, samuti nivelleeritud ja interpoleeritud PSI kiiruste võrdlustest Tallinna linna kõrgusvõrgu 116 reeperil. Lähte- ehk referentskiirusteks valiti 2007/08 ja 2019. a ($dT = 12$ a) kordusnivelleerimise andmetest arvatud kõrgusvõrgu reeperite vertikaalkiirused v_{Niv} (Gruno, 2019). Kiiruste jaotushistogrammilt (Joonis 10) selgub, et 78.4 % nivelleeritud kiirustest jäävad vahemikku $-0.5...+0.25$ mm/a (mis annab 12 a peale deformatsioonivahemiku $-6...3$ mm). Edasises analüüsis loetakse reeperi 63-843-90804 nivelleeritud kiirus -6.33 mm/a väljahüppavaks suuruseks (erim), mis on märgatavalt erinev naaberreeperite nivelleeritud kiirustest ning samuti PSI kiirustest.

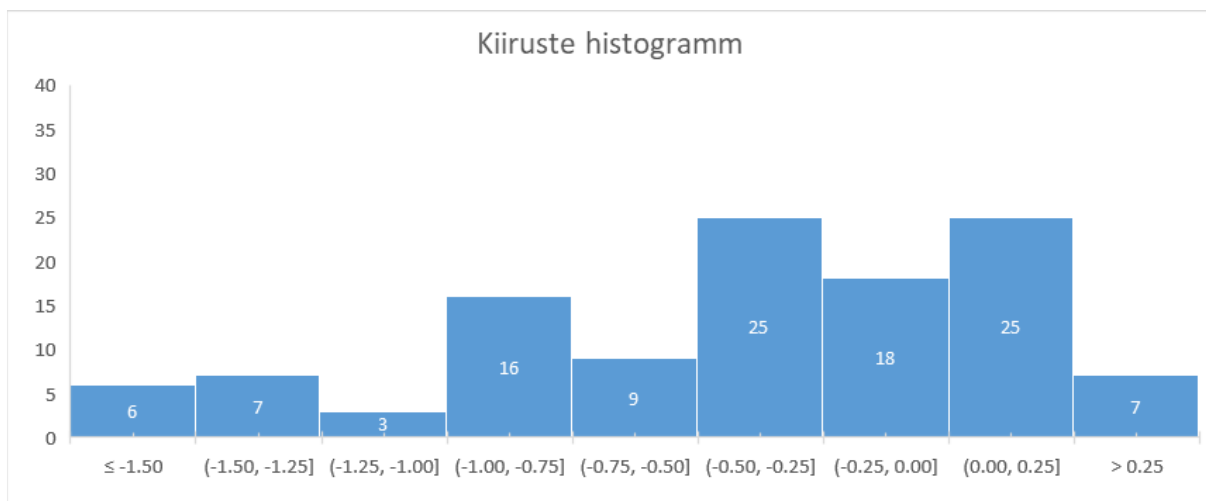


Joonis 10. Tallinna linna kõrgusvõrgu reeperite kiiruste histogramm, arvatud 2007/2008. ja 2019. a kordusnivelleerimise andmetest. 78.4% kiirustest on vahemikus $-0.5...+0.25$ mm/a.

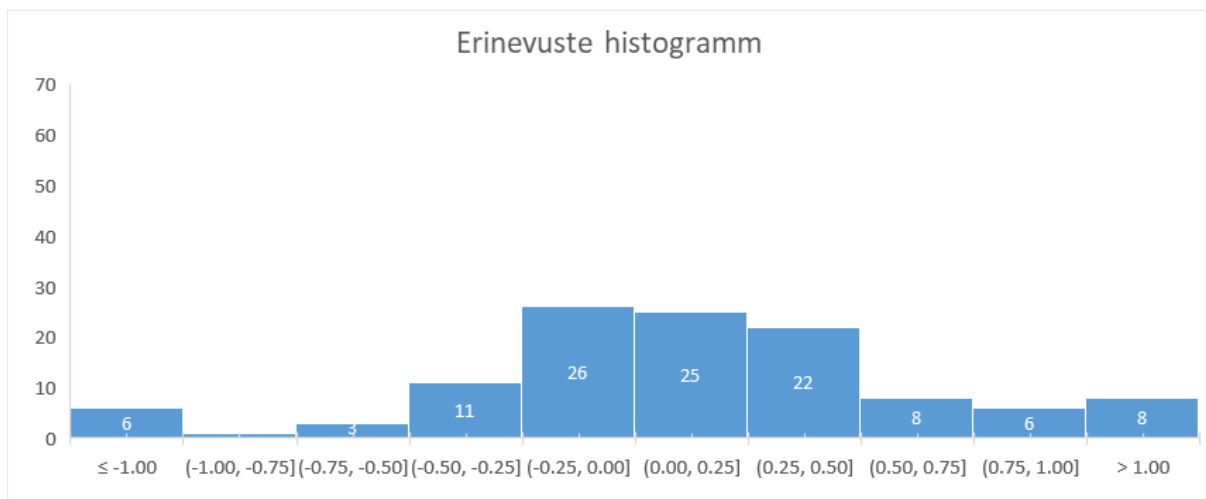
4.2 Kiiruste võrdlus niveleerimise ja 2016-2020. a vahel

Kiiruste võrdlemiseks reeperitel interpoleeriti reeperite asukohtadesse PSI vertikaalkiirused, lähtudes võrgustatud kiiruspinnast (Joonis 13) ja rakendades bikuup interpolatsioonimeetodit (*GMT grdtrack*) koos silumisega (*ingl antialiasing*). PSI 2016-2020. a kiiruste jaotushistogrammilt (Joonis 11) selgub, et

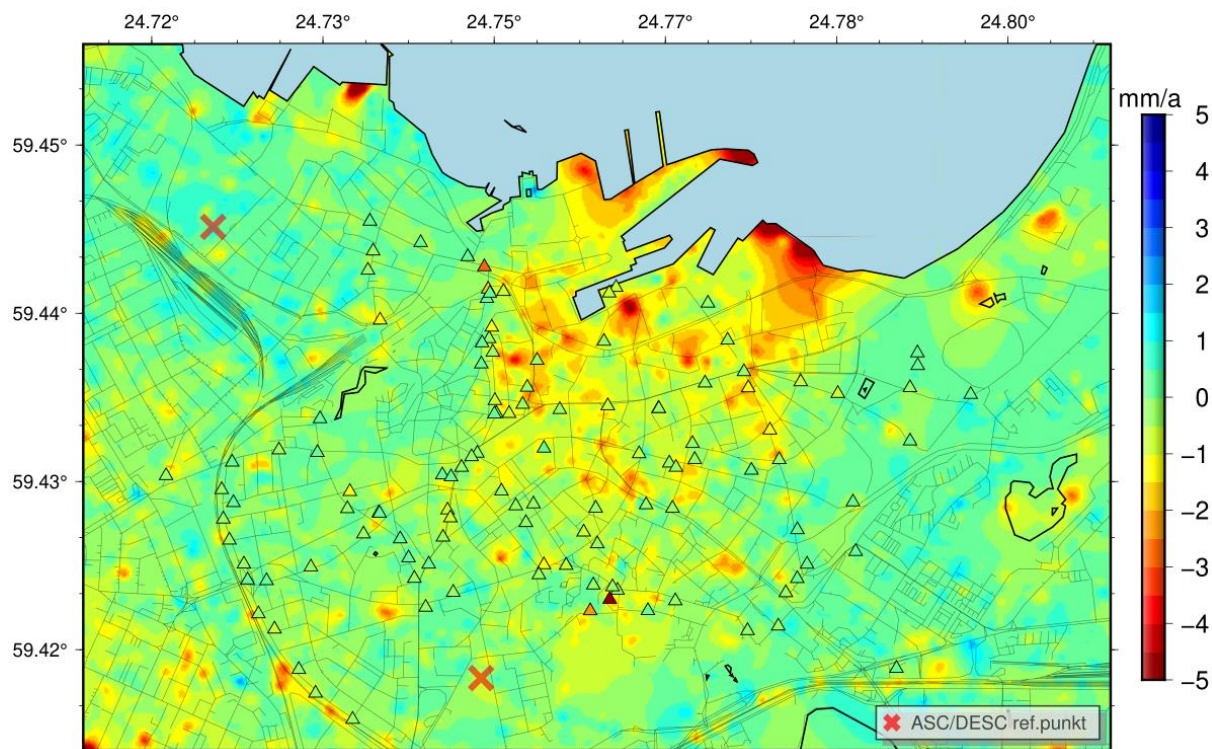
58.6 % PSI kiirustest reeperitel jäävad vahemikku $-0.5...+0.25$ mm/a. Keskmine erinevus kiiruste vahel ($v_{Niv} - v_{16-20}$) on 0.07 ± 0.77 mm/a (Joonis 12).



Joonis 11. Tallinna linna kõrgusvõrgu reeperite kiiruste (v_{16-20}) histogramm, arvatud 2016-2020. a PSI andmetest. 58.6% kiirustest on vahemikus $-0.5...+0.25$ mm/a.



Joonis 12. Nivelleeritud ja 2016-2020. a kiiruste vahede ($v_{Niv} - v_{16-20}$) histogramm, keskmise erinevusega 0.07 ± 0.77 mm/a (min. -5.00 mm/a, maks. 1.62 mm/a).

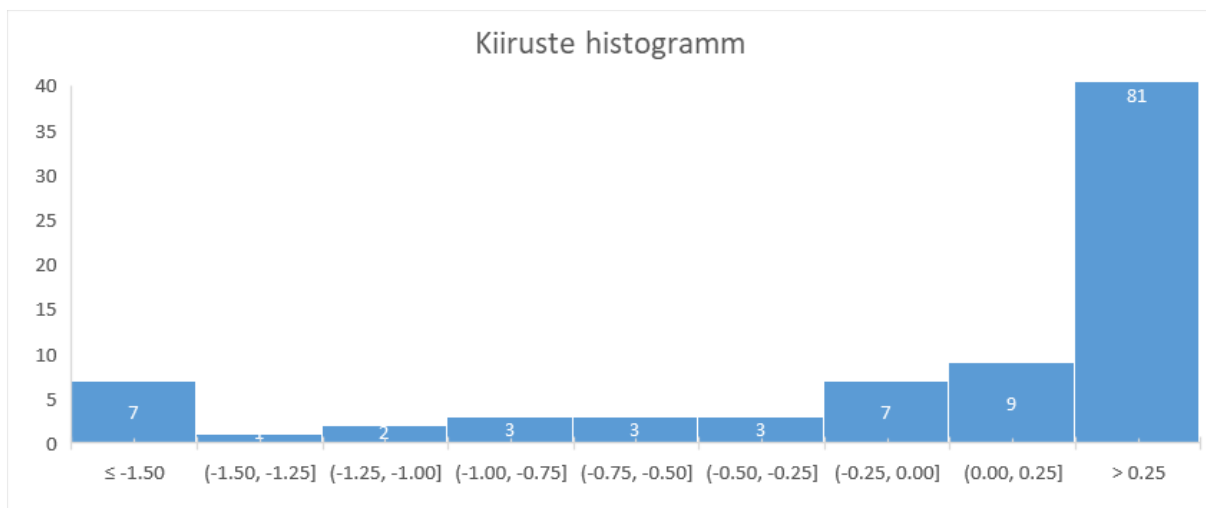


Joonis 13. Reeperite nivelleeritud vertikaalkiirused Tallinnas koos PSI kiiruspinnaga 2016-2020 andmete analüüsist.

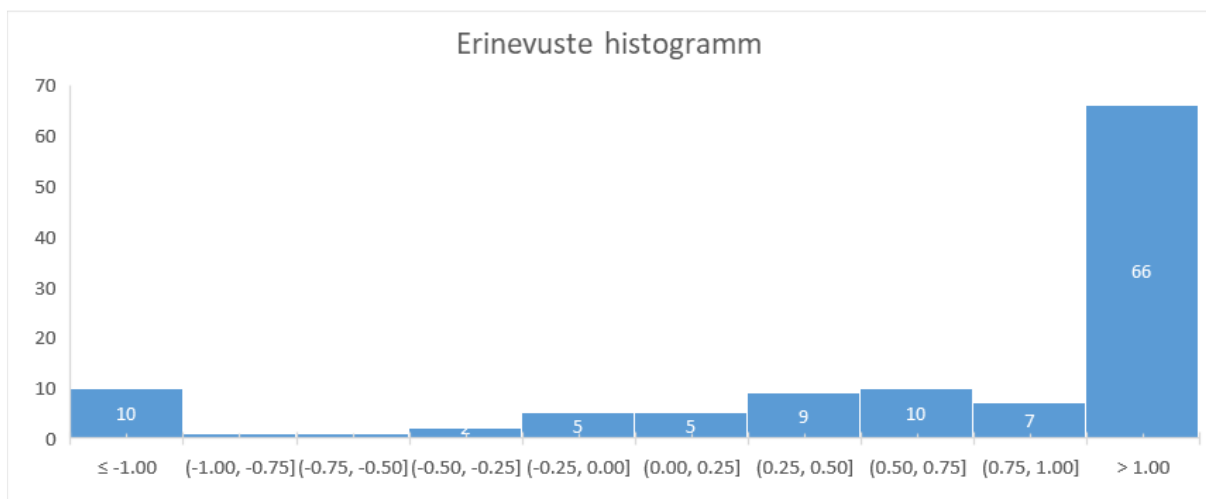
Statistiliselt on nivelleeritud kiirused 31 reeperil (26.7%, 1-sigma) erinevad 2016-2020. a PSI kiirustest, juhul kui aluseks võtta kriteerium: $|dv| \geq u(dv)$, kus $|dv|$ on erinevuse absoluutväärtus ja $u(dv)$ on erinevuste liitmääramatus (keskmiselt ± 0.51 mm/a). 2-sigma korral on erinevus statistiliselt oluline 14 reeperil (12.1%). Teisisõnu, 2-sigma määramatuste korral ei erine 88% reeperitest nivelleeritud ja PSI kiirused statistiliselt üksteisest.

4.3 Kiiruste võrdlus niveleerimise ja 2019-2020. a vahel

PSI 2019-2020. a kiiruste jaotushistogrammilt selgub, et ainult 16.4% PSI kiirustest reeperitel jäävad vahemikku $-0.5...+0.25$ mm/a (Joonis 14). Keskmine erinevus kiiruste vahel ($v_{Niv} - v_{19-20}$) on 1.04 ± 1.39 mm/a (Joonis 15).



Joonis 14. Tallinna linna kõrgusvõrgu reeperite kiiruste (v_{19-20}) histogramm, arvatud 2019-2020. a PSI andmetest. Ainult 16.4% kiirustest on vahemikus $-0.5...+0.25$ mm/a.

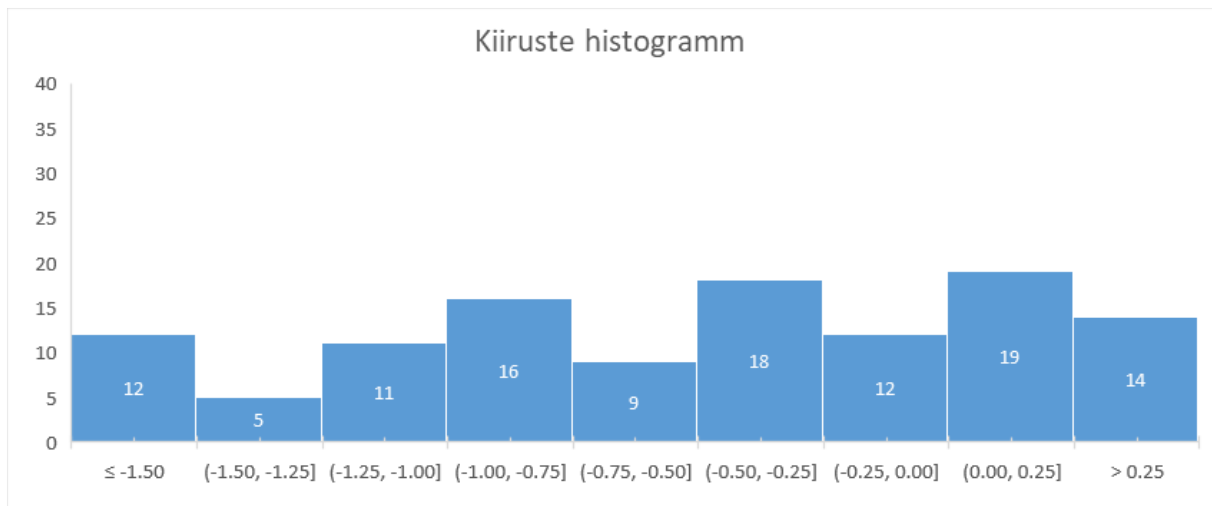


Joonis 15. Nivelleeritud ja 2019-2020. a kiiruste vahede ($v_{Niv} - v_{19-20}$) histogramm, keskmise erinevusega 1.04 ± 1.39 mm/a (min. -3.54 mm/a, maks. 5.77 mm/a).

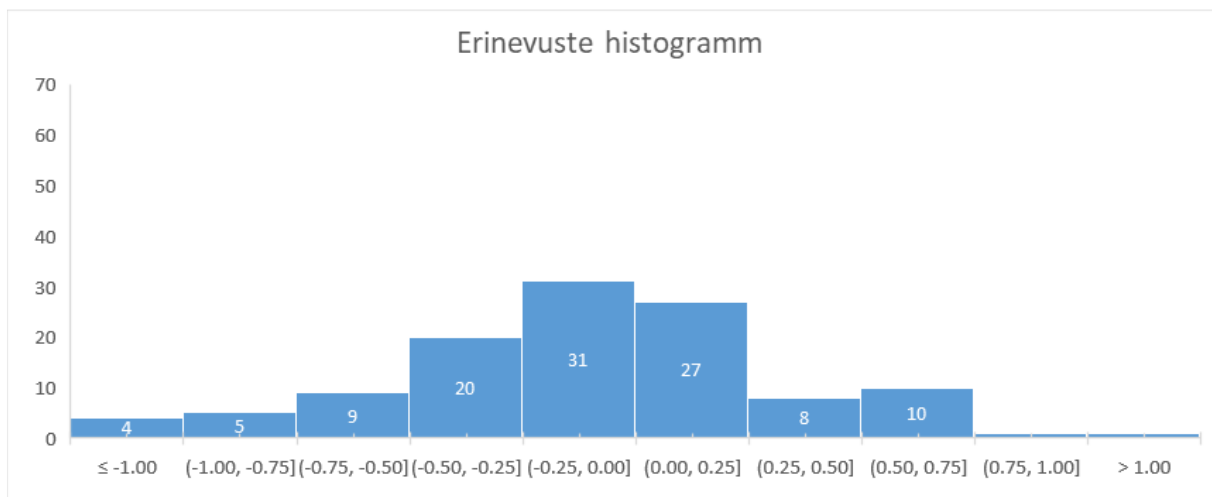
4.4 Kiiruste võrdlus 2016-2019 ja 2016-2020 vahel

PSI 2016-2019. a kiirused võeti 2019. a aruandest (Gruno, 2019) ning nende jaotushistogrammilt selgub, et 42.2% PSI kiirustest reeperitel jäävad vahemikku $-0.5...+0.25$ mm/a (Joonis 16). Keskmise erinevus kiiruste vahel ($v_{Niv} - v_{16-19}$) on 0.11 ± 0.45 mm/a (Joonis 17).

Histogrammide (Joonis 10, Joonis 11 ja Joonis 16) põhjal võib veenduda, et 2016-2020. a PSI analüüsi kiiruste jaotus on paremas kooskõlas nivelleeritud kiirustega kui 2016-2019. a analüüsi tulemused. See viitab mõneti ootuspärasele asjaolule, et kiirused pikemast aegreast stabiliseeruvad ning lähenevad nivelleeritud kiirustele, mis omakorda on arvatud veel pikemale ajavahemikule.



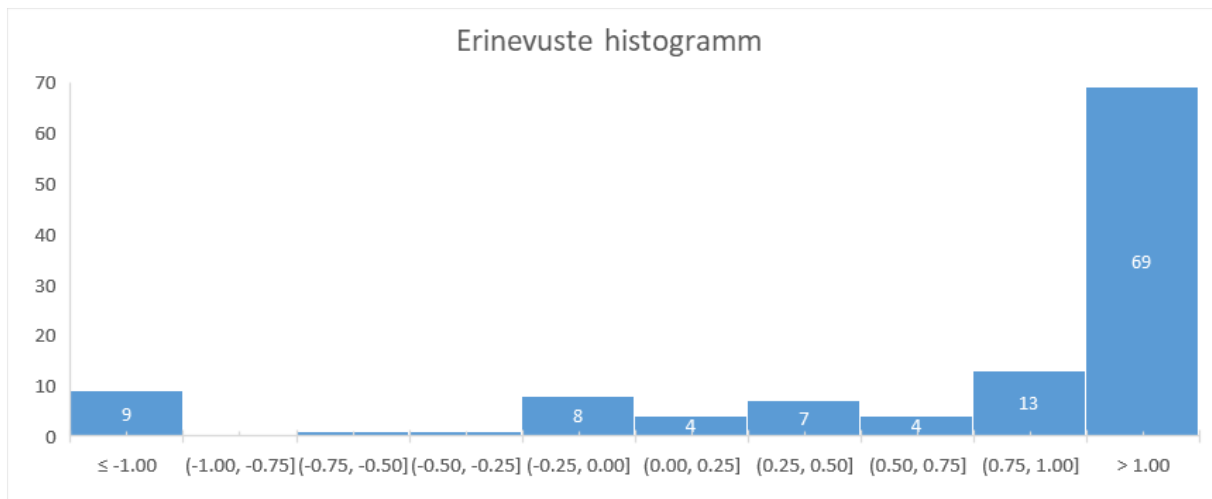
Joonis 16. Tallinna linna kõrgusvõrgu reeperite kiiruste (v_{16-19}) histogramm, arvutatud 2016-2019. a PSI andmetest. 42.2% kiirustest on vahemikus $-0.5...+0.25$ mm/a.



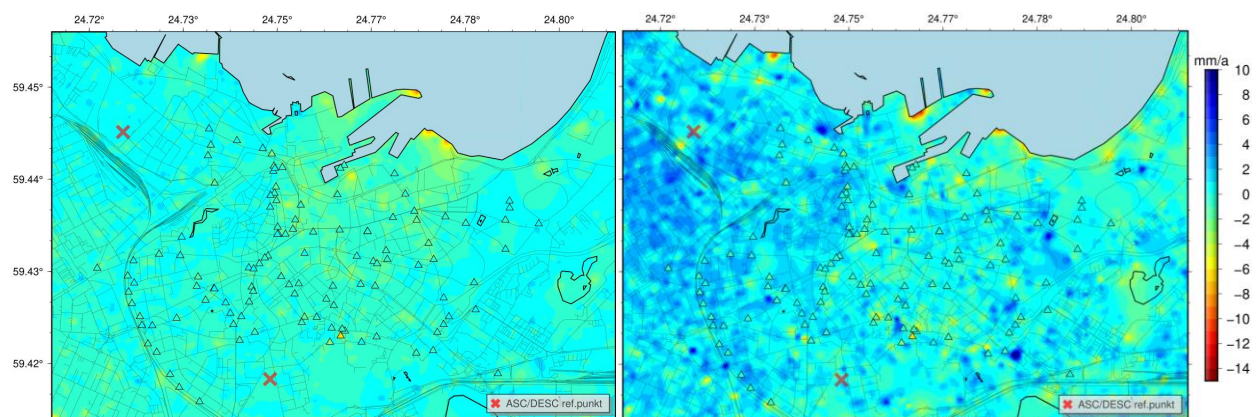
Joonis 17. Nivelleeritud ja 2019-2020. a kiiruste vahede ($v_{16-19} - v_{16-20}$) histogramm, keskmise erinevusega 0.11 ± 0.45 mm/a (min. -1.64 mm/a, maks. 1.00 mm/a).

4.5 Kiiruste võrdlus 2019-2020 ja 2016-2020 vahel

Võrdlus PSI pikaajalise (2016-2020) ja aastase (2019-2020) perioodi vahel annab keskmiseks kiiruste erinevuseks 1.11 ± 1.26 mm/a (Joonis 18). Pikaajaline kiiruspind näitab oluliselt väiksemaid väärtusi võrreldes aastase pinnaga (Joonis 19).



Joonis 18. 2019-2020. ja 2016-2020. a kiiruste vahede ($v_{19-20} - v_{16-20}$) histogramm, keskmise erinevusega 1.11 ± 1.26 mm/a (min, maks: $-3.56, 3.89$ mm/a).

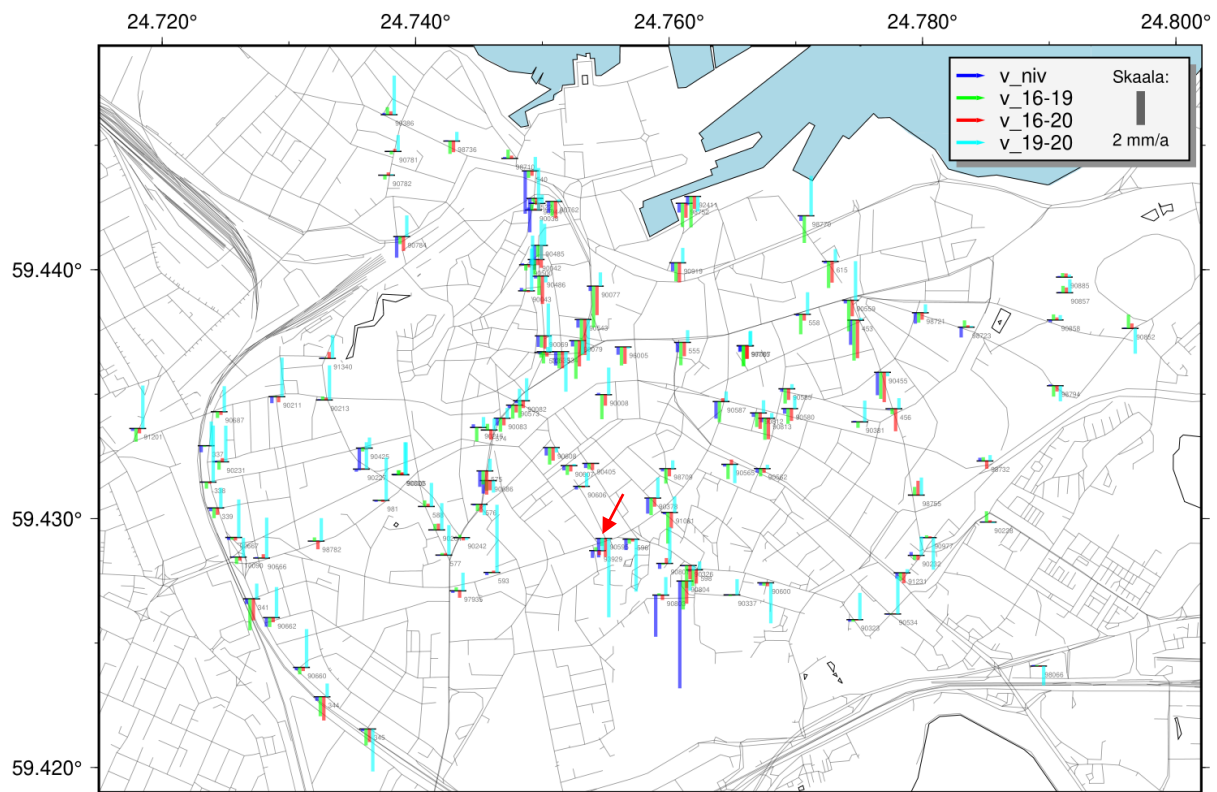


Joonis 19. Vertikaalsuunalised kiiruspinnad Tallinnas 2016-2020. (vasak) ja 2019-2020. a (parem) PSI andmete analüüsist.

4.6 Võrdluste kokkuvõte

Kiiruste jaotushistogrammidelt selgub, et enamikel reeperitel on aastane kiirus selgelt suurem ja vastassuunaline (positiivne) võrreldes kiirustega pikaajalistest aegridadest. Kiiruste jaotus reeperitel näitab, et aastase perioodiga liikumised erinevalt märgatavalt pikemale perioodile arvatud kiirustest nii suunalt kui absoluutväärtuselt (Joonis 20). 2019-2020. a kiirused on suuremad läänesuunas, samuti esineb väljahüppavaid kiirusi, nagu näiteks kiirusväärtus -4.7 mm/a reeperil GPA ID numbriga 63-843-90595 (lüh. 90595).

Ka erineb 2019-2020. a kiiruste jaotushistogramm (Joonis 14) märgatavalt nii 2016-2019, 2016-2020 kui nivelleeritud kiiruste jaotustest.



Joonis 20. Vertikaalsuunaliste liikumiskiiruste jaotus Tallinna kõrgusvõrgu reeperitel, võttes aluseks nivelleerimisandmed (v_{niv}) ja PSI pikaajalised (2016.06-2019.11, 2016.06-2020.11) aegread (v_{16-19} , v_{16-20}) ning aastase (2019.11-2020.11) aegrea (v_{19-20}). Punase nool osutab 2019-2020. a kõige kiiremini deformeerunud reeperile (90595).

Eeltoodud järeltusi kinnitavad kiiruste erinevuste koondstatistika (Tabel 2, Tabel 3).

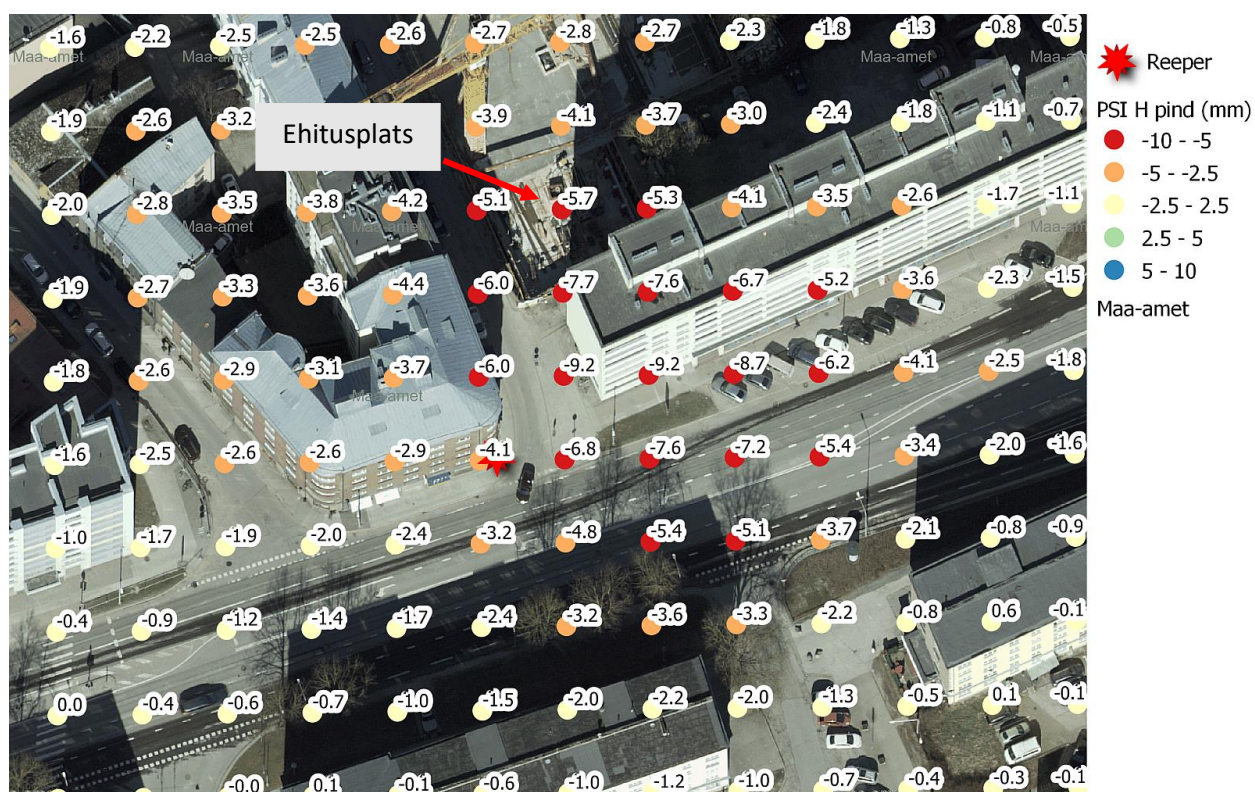
Tabel 2. Erinevate kiirusväärtuste võrdluste statistika reeperite asukohtades. Reeperite nivelleeritud kiiruste v_{Niv} võrdluses on alumise lisarea statistika arvutusest eemaldatud 1 erim (väljahüppav kiirus -6.33 mm/a reeperil 63-843-90804).

	Keskmine	St.hälve	Min.	Maks.
Data	mm/a			
$V_{2016-19} - V_{2016-20}$	-0.11	0.45	-1.64	1.00
$V_{2019-20} - V_{2016-20}$	1.11	1.27	-3.56	3.89
$V_{Niv} - V_{2016-20}$	0.07	0.77	-5.00	1.62
	0.11	0.61	-2.24	1.62
$V_{Niv} - V_{2019-20}$	-1.04	1.39	-5.77	3.54
	-1.00	1.32	-4.16	3.54

Tabel 3. Kiiruste vahelised lineaarsed ehk Pearsoni korrelatsioonikordajad, kirjeldamaks seoste tugevust tunnuste vahel. V_{Niv} veerus on alumise lisarea statistika arvutusest eemaldatud 1 erim (kiirus -6.33 mm/a reeperil 63-843-90804).

	V_{Niv}	$V_{2016-19}$	$V_{2016-20}$	$V_{2019-20}$
V_{Niv}	1.00	0.27 0.24	0.34 0.35	0.19 0.19
$V_{2016-19}$		1.00	0.77	0.18
$V_{2016-20}$			1.00	0.31
$V_{2019-20}$				1.00

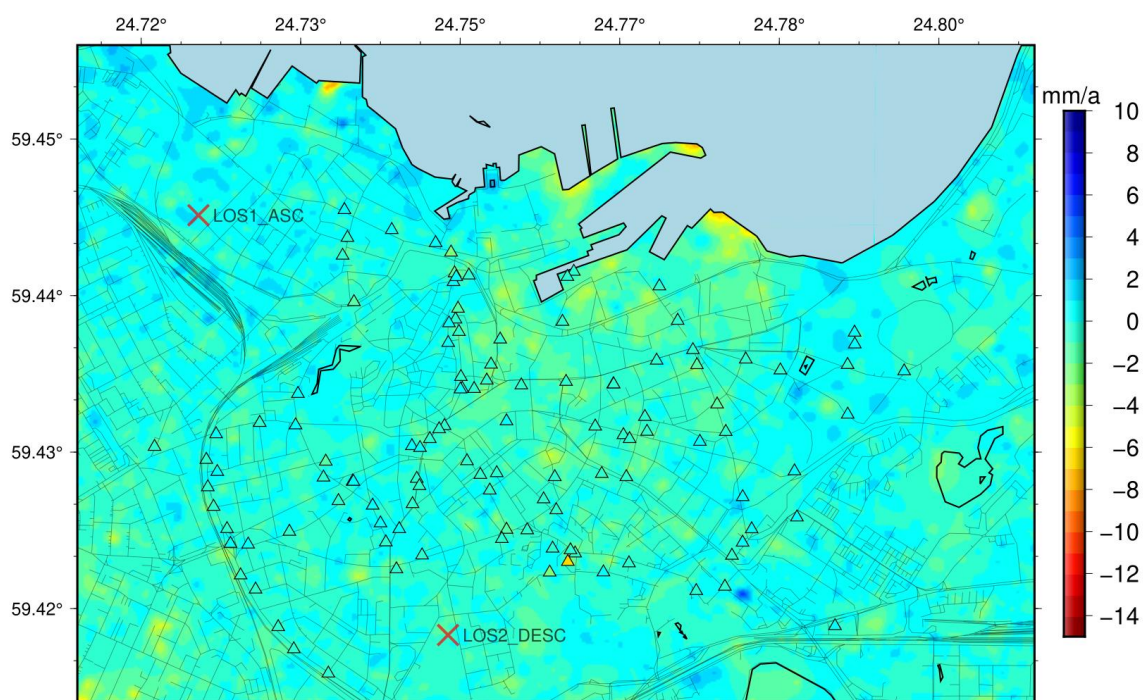
Väljatoodud reeperi 63-843-90595 asukoha visuaalne hinnang Google Earth piltide aegrea abiga aitas tuvastada, et reeperi vajumine võib olla seotud läheduses asuva uue hoone ehitusega. Reeperi asukohas on näha (Joonis 21), et deformatsioonilehtri suurimad väärtused on kuni -9 mm/a. Hoone, mille seinas asub reeper, jääb lehtri serva. Peale hoone ehituse lõppu tuleks kontrollida uuesti, kas reeper vajab täpsustavat nivelleerimist või mitte.



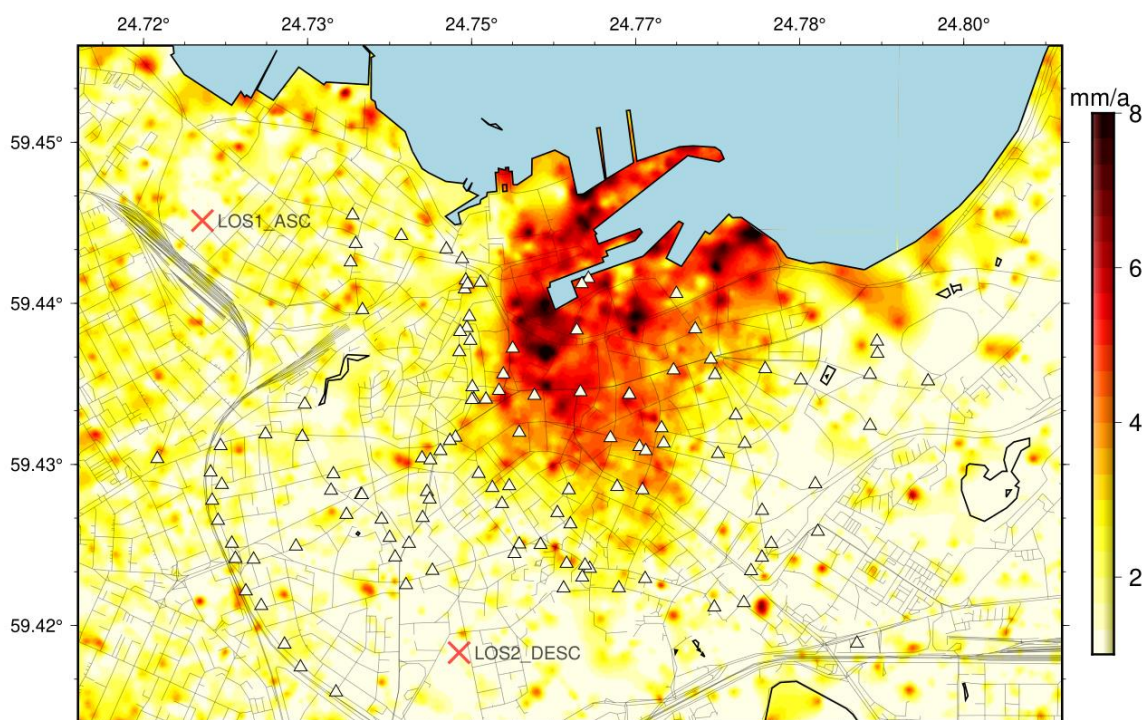
Joonis 21. H suunalise deformatsiooni (vahemik 2019.11-2020.11) kiiruspinnale võrgustiku piksli väärtused reeperi 63-843-90595 läheduses. Jooniselt on näha, et hoone, kus reeper asetseb jääb deformatsiooni lehtri serva alla. Lehtri põhi asub hoonel, mis asetseb otseselt ehitusplatsi kõrval..

5 Deformatsioonide järelanalüüs aastate kaupa vahemikus 2016-2020

Kiiruspinnad arvutati veel aastaste kiirustele PSI analüüsist ajavahemikus 2016-2020 (Joonis 24). Samuti hinnati arvutatud nelja kiiruspinna keskväärtust ning standardhälvet (Joonis 22, Joonis 23).



Joonis 22. Aastaste kiiruspindade (2016-2017, ..., 2019-2020) keskmistatud pind.



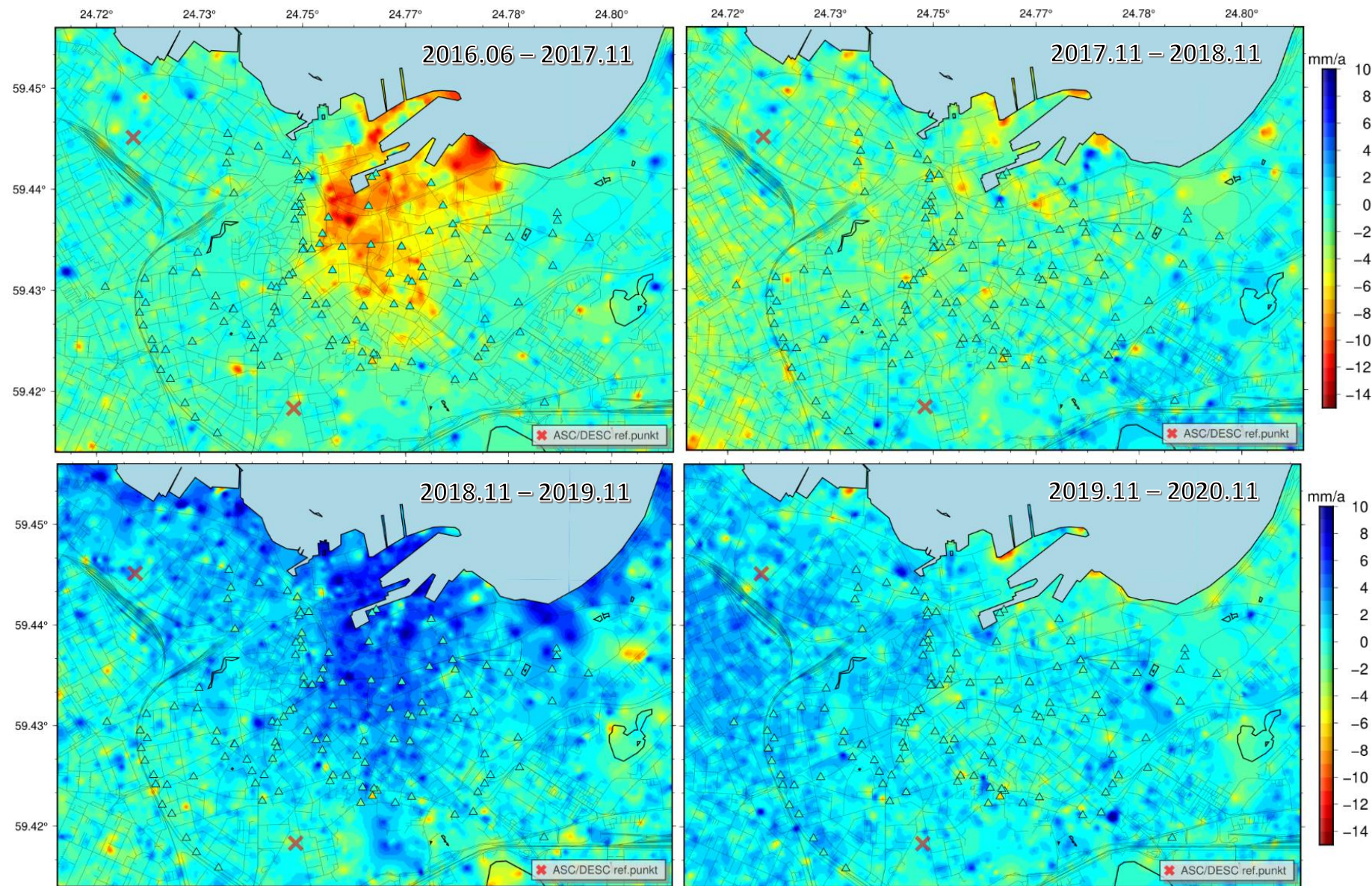
Joonis 23. Aastaste kiiruste (2016-2017, ..., 2019-2020) standardhälve kirjeldamaks liikumiste hajuvust.

Lühiajaliste perioodide kiiruste keskvärtus näitab ootuspäraselt lähedasi väärtusi 2016-2020. a kiiruspinnaga (Joonis 19, vasak pilt), kiiruste hajuvust kirjeldav standardhälve sarnaneb visuaalselt rõhutatud värviskaalal esitatud kiirustega (Joonis 13). Need esitatud tulemused (lühiajalise perioodiga kiiruste keskvärtuse pinna sarnasus 2016-2020. a kiiruspinnaga ning selle väike hajuvus äärealadel, kuhu paigutuvad ka referentspunktid) võimaldavad teha olulise järelduse, et lühemate aegriididega kiiruspinnad ei erine oluliselt nn referentskiirusest (või vastavast pinnast). Iga kiiruspinna referentskiiruse määrab LOS1, LOS2 referentspunktide valik ja asukoht, viimane on kiiruspiltidel ka esitatud. Referentspunktid on PSI analüüsis üle kõigi ajaperioodide valitud samasse kohta, mis peakski vähendama kiiruspindade omavahelisi erinevusi referentskiiruse suhtes. Nagu varem öeldud, seda kinnitab ka kiiruspindade statistika⁶. Samas vajaks referentspunktide valiku mõju lühi- ja pikaajaliste kiiruspindade referentsväärtustele ning viimaste omavaheline seos kindlasti edasist uurimist⁷.

Vahemikus 06.2016-11.2017 on toimunud kesklinna alas vajumine suuremal alal. Kuna reeperite nivelleerimine toimus 2019. aastal, siis mõjutab antud deformatsioon reeperite kõrgusväärtusi. Samas 2018-2019. a on samal alal näha kerkimist, mis kompenseerib eelnevat vajumist. Võib oletada, et tegemist on geoloogilise protsessiga, näiteks põhjavee taseme muutusega mattunud oru piirkonnas (Kall & Torim, 2003).

⁶ Üle eri ajaperioodide arvutatud kiiruspindade referentspinnad/lähtepinnad (ja ka RP-de kiirused) ei erine märgatavalt/oluliselt statistikat silmas pidades.

⁷ Kas ja kuidas saaks PSI kiirusi (üle eri ajavahemike) paremini kooskõlla viia, võiks olla edasine uurimisküsimus, mis käesolevasse ülesandepüstitusse ei kuulunud.



Joonis 24. Vertikaalsuunalised liikumiskiirused Tallinnas lühiajalistest PSI aegridadest vahemikus 2016-2020.

Kokkuvõte

Käesolevas uurimistöös arutati Tallinna kõrgusvõrgu reeperitele kosmose kaugseire InSAR mõõtmismeetodil vertikaalliikumised Tallinna vanalinna, kesklinna ja Vanasadama aladele, võttes aluseks PSI andmed ajavahemikus juuni 2016 – november 2020. Võrgustatud PSI kiiruspinnad võimaldasid kiiruste interpoleerimist reeperite asukohtades ning edasisi võrdlusi nivelleeritud ning PSI kiiruste vahel. Lisaks võrreldi PSI kiiruspindasid omavahel. Võrdluspõhiseks analüüsiks moodustati PSI kiiruspinnad nii pikaajalistest (2016-2020) kui lühiajalistest aegridadest (2016-2017, ..., 2019-2020). Samuti lähtuti esimesel uuringuetapil arvatud 2016-2019. a kiiruspinnast.

Kiiruste võrdlusest selgus, et PSI 2016-2019. ja 2016-2020 a. kiiruste erinevus on statistiliselt mitteoluline ning seega kehtivad ka esimese etapi tulemused ning järeldused 2019. a uuringuaruandest (Gruno, 2019).

Reeperite nivelleeritud kiirused (lähtudes kordusnivelleerimistest 2007/2008. ja 2019. a) näitasid parimat kooskõla 2016-2020. a PSI kiirustega. See on mõneti ootuspärane eeldusel, et pikema ajaperioodi peale kiirused nõ stabiliseeruvad sarnasteks kiirusväärtusteks.

Vertikaalliikumisi on oluline jälgida nii lühikestel perioodidel (2016-2017, ..., 2019-2020) kui pikaajaliselt (2016-2019, 2016-2020). Pikaajaliselt domineerivad negatiivsed kiirused (vajumine), samas kui 2019.11 – 2020.11 domineerivad positiivsed kiirused (kerge). Aastaste kiiruste absoluutväärtused (amplituudid) osutuvad märgatavalt suuremateks üle pikema perioodi määratud kiirustest. Suuremad liikumised on toimunud veel 2016.06 – 2017.11 (vajumine) ja 2018.11 – 2019.11 (kerge). Mõõdukas kerge jätkus ka viimasel aastal. Suuremad liikumised kesklinna ja sadama aladel ajavahemikes 2016-2017 ja 2018-2019 võivad viidata mõnele kompensatsiooniprotsessile, näiteks põhjavee taseme suurematele muutustele mattunud orgudes.

Reeperite kiirusi silmas pidades oleks soovitatav kontrollida kõrgusväärtusi paaril väljahüppava kiirusega reeperil, nagu reeper 63-843-90804 (nivelleeritud kiirusega -6.33 mm/a) ja reeperil 63-843-90595 (PSI kiirus -4.65 mm/a ajavahemikus 2019.11-2020.11). Tähelepanu vääriks veel küsimus, kas ja kuidas PSI andmetest ilmnenu kerge mõjutab 2019. a nivelleerimistulemusi ning nendest tuletatud kiirusväärtusi.

Viited

- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Gruno, A. (2019). *InSAR and metetele tugineva kaugseire võimalused Tallinna kõrgusvõrgu monitooringuks*. Tallinn: AS Datel.
- Kall, T., & Torim, A. (2003). Vertical movements on the territory of Tallinn. *Journal of Geodynamics*, 35(4-5), 511-519.

LISAD

Lisa 1. Reeperite kiiruste tabel

Päise kirjeldus

GPA ID	– Reeperi GPA ID number,
Lon	– Reeperi geograafiline pikkuskraad°,
Lat	– Reeperi geograafiline laiuskraad°,
vel _{niv}	– Nivelleerimise kiirus (mm/a),
σvel _{niv}	– Nivelleerimise kiiruse standardhälve (mm/a),
vel ₁₆₋₂₀	– PSI vahemik 2016-2020 kiirus (mm/a),
σvel ₁₆₋₂₀	– PSI vahemik 2016-2020 kiiruse standardhälve (mm/a),
vel ₁₉₋₂₀	– PSI vahemik 2019-2020 kiirus (mm/a),
σvel ₁₉₋₂₀	– PSI vahemik 2019-2020 kiiruse standardhälve (mm/a),
vel ₁₆₋₁₉	– PSI vahemik 2016-2019 kiirus (mm/a),
vel ₁₆₋₁₇	– PSI vahemik 2016-2017 kiirus (mm/a),
vel ₁₇₋₁₈	– PSI vahemik 2017-2018 kiirus (mm/a),
vel ₁₈₋₁₉	– PSI vahemik 2018-2019 kiirus (mm/a).

GPA ID		Lon	Lat	Nivelleerimine		PSI 2016-2020		PSI 2019-20		PSI 2016-19	PSI 2016-17	PSI 2017-18	PSI 2018-19
				vel _{niv}	σvel _{niv}	vel ₁₆₋₂₀	σvel ₁₆₋₂₀	vel ₁₉₋₂₀	σvel ₁₉₋₂₀	vel ₁₆₋₁₉	vel ₁₆₋₁₇	vel ₁₇₋₁₈	vel ₁₈₋₁₉
				mm/a		mm/a		mm/a		mm/a			
63-843-90804	PR	24.761242	59.427492	-6.33	0.10	-1.33	0.55	-0.56	2.03	-1.67	-2.29	-2.38	0.04
63-843-540	PP	24.749040	59.443969	-2.53	0.10	-0.29	0.54	0.83	2.05	-0.41	1.01	-1.52	0.76
63-843-90803	PR	24.759344	59.426928	-2.46	0.09	-0.29	0.54	1.06	2.05	0.10	0.07	-0.72	1.50
63-843-522	PP	24.749405	59.442862	-2.00	0.10	-0.38	0.51	-0.15	2.12	-0.17	-3.30	-7.70	1.98
63-843-453	SR	24.774729	59.437973	-1.46	0.09	-2.24	0.51	0.14	2.02	-2.39	-4.13	-1.83	-0.85
63-843-90485	SR	24.749770	59.440976	-1.45	0.10	-1.32	0.50	1.28	2.06	-0.68	-3.11	-3.05	1.60
63-843-90455	SR	24.776843	59.435875	-1.35	0.09	-1.76	0.51	-0.23	2.07	-1.57	-3.49	-1.92	-0.49
63-843-90425	SR	24.735952	59.432836	-1.31	0.11	-0.10	0.50	0.63	2.07	-0.19	-0.50	-2.17	0.87
63-843-90784	SR	24.738900	59.441328	-1.24	0.11	-0.84	0.49	1.25	2.02	-0.44	-1.63	-3.00	1.42
63-843-90595	SR	24.754840	59.429204	-1.12	0.08	-1.09	0.52	-4.65	2.10	-0.44	-1.87	-1.06	1.42
63-843-90587	SR	24.764106	59.434704	-1.00	0.08	0.20	0.50	0.60	2.05	-1.22	-6.36	-0.02	3.93
63-843-575	SR	24.745463	59.431918	-0.93	0.09	-1.40	0.51	0.72	2.03	-0.80	-1.23	-3.11	0.68
63-843-90378	SR	24.758715	59.430829	-0.92	0.08	-0.51	0.51	1.21	2.09	-1.01	-2.84	-0.79	1.96
63-843-534	SR	24.751452	59.436703	-0.81	0.06	-0.98	0.51	-2.36	2.12	-0.98	-4.27	-2.65	6.25
63-843-90686	SR	24.745734	59.431529	-0.77	0.09	-0.57	0.50	-0.71	2.03	-0.59	-0.61	-2.29	1.09
63-843-90762	SR	24.750905	59.442742	-0.67	0.10	-0.99	0.53	0.12	2.09	-0.85	0.65	-4.02	1.14
63-843-90069	SR	24.750067	59.437340	-0.65	0.07	-0.76	0.50	1.92	2.04	-0.69	-3.06	-1.78	0.71
63-843-98721	SR	24.779827	59.438271	-0.64	0.10	-0.41	0.50	0.50	2.05	-0.58	-2.94	-1.00	1.72
63-843-596	SR	24.756996	59.429176	-0.64	0.08	-0.14	0.51	-3.10	2.06	-0.26	-1.25	-1.45	2.11
63-843-98723	SR	24.783444	59.437692	-0.61	0.11	0.11	0.50	0.08	2.08	0.40	-0.74	-1.14	2.07
63-843-555	SR	24.761061	59.437081	-0.57	0.08	-0.82	0.50	0.73	2.03	-1.35	-7.74	-2.97	4.38

63-843-98752	SR	24.761193	59.442667	-0.54	0.10	-0.85	0.49	0.05	2.03	-1.40	-6.97	-1.40	5.67
63-843-90662	SR	24.728618	59.426023	-0.53	0.12	-0.27	0.49	1.81	2.09	-0.55	-0.49	-1.16	-1.23
63-843-92411	SR	24.761866	59.442943	-0.52	0.10	-0.74	0.52	-0.89	2.15	-1.82	-7.17	-0.52	5.87
63-843-90919	SR	24.760677	59.440279	-0.50	0.10	-1.16	0.52	0.88	2.17	-1.10	-8.60	1.07	3.09
63-843-90543	SR	24.753218	59.437998	-0.48	0.08	-2.09	0.53	-2.42	2.03	-2.11	-8.12	-1.85	4.15
63-843-90608	SR	24.750708	59.432856	-0.47	0.08	-0.77	0.49	-0.29	2.03	-1.00	-2.75	-2.15	1.80
63-843-96005	PR	24.756381	59.436895	-0.46	0.01	-0.99	0.49	-0.09	2.05	-1.09	-5.80	-2.54	3.65
63-843-90083	SR	24.746824	59.434034	-0.43	0.08	-0.42	0.51	0.61	2.03	-0.80	-1.07	-2.02	0.30
63-843-93929	SR	24.754351	59.428715	-0.42	0.08	-0.26	0.51	0.75	2.08	0.21	-1.54	-0.71	-0.15
63-843-337	PP	24.723473	59.432926	-0.38	0.13	0.00	0.51	1.43	2.06	-0.07	0.28	0.91	-2.19
63-843-90211	SR	24.729050	59.434896	-0.38	0.12	-0.32	0.52	2.31	2.08	0.04	0.10	-1.91	0.27
63-843-98785	SR	24.765988	59.436945	-0.37	0.09	-0.77	0.50	0.84	2.04	-1.20	-6.38	-1.29	5.95
63-843-90079	SR	24.752779	59.437150	-0.34	0.07	-1.52	0.52	-0.79	2.08	-2.26	-6.57	-3.46	3.44
63-843-91231	SR	24.778389	59.427821	-0.33	0.09	-0.61	0.50	0.21	2.08	-0.44	-2.56	-1.06	1.59
63-843-97007	PR	24.766031	59.436945	-0.32	0.09	-0.77	0.50	0.88	2.04	-1.20	-6.39	-1.24	5.92
63-843-90801	PR	24.759654	59.428201	-0.32	0.09	0.32	0.54	2.14	2.13	-0.07	-3.13	0.87	4.44
63-843-341	PP	24.727056	59.426777	-0.31	0.12	-1.27	0.51	0.90	2.07	-1.86	-1.08	-4.88	-1.10
63-843-98770	SR	24.770805	59.442167	-0.30	0.10	0.04	0.56	2.36	2.02	-1.60	-4.05	0.08	2.76
63-843-90580	SR	24.769515	59.434422	-0.30	0.09	-0.72	0.50	0.74	2.10	-0.90	-5.31	-2.22	2.05
63-843-90077	SR	24.754175	59.439338	-0.28	0.08	-1.71	0.52	0.82	2.05	-2.44	-7.87	-2.77	3.78
63-843-90607	SR	24.752103	59.432127	-0.27	0.08	-0.34	0.50	0.10	2.05	-0.55	-2.89	-2.46	2.68
63-843-90042	SR	24.749507	59.440406	-0.27	0.09	-0.33	0.49	2.34	2.09	-0.89	-2.06	-2.21	1.90
63-843-90405	SR	24.753814	59.432220	-0.27	0.08	-0.39	0.49	-0.01	2.03	-0.35	-1.27	-1.78	1.71
63-843-344	PP	24.732613	59.422840	-0.23	0.13	-1.40	0.52	0.79	2.16	-1.14	-1.06	-1.31	-0.58
63-843-90562	SR	24.767351	59.432010	-0.23	0.09	-0.25	0.50	0.23	2.05	-0.46	-4.27	-0.20	4.43
63-843-90813	PR	24.767696	59.434035	-0.23	0.08	-1.24	0.49	0.31	2.05	-1.27	-6.44	-2.43	3.32
63-843-90812	PR	24.767049	59.434245	-0.22	0.08	-0.94	0.49	0.75	2.05	-0.83	-5.86	-1.37	3.37
63-843-339	PP	24.724226	59.430428	-0.19	0.12	-0.40	0.50	1.20	2.09	-0.60	-2.23	-1.41	-1.35
63-843-90606	SR	24.753088	59.431298	-0.18	0.08	-0.07	0.50	0.80	2.07	-0.07	-0.99	-1.19	1.83
63-843-90559	SR	24.774309	59.438774	-0.18	0.09	-0.94	0.50	2.31	2.06	-1.83	-3.10	-1.19	4.02
63-843-90573	SR	24.747794	59.434561	-0.18	0.07	-0.43	0.49	0.97	2.03	-0.80	-2.69	-1.96	1.36
63-843-90660	SR	24.730987	59.424021	-0.17	0.13	-0.21	0.52	2.26	2.06	-0.41	-1.32	-2.24	-0.31
63-843-90585	SR	24.769290	59.435215	-0.17	0.09	-0.66	0.49	0.28	2.03	-0.87	-5.09	-0.03	3.24
63-843-98709	SR	24.759884	59.432008	-0.16	0.08	-0.45	0.50	0.49	2.06	-0.88	-4.02	-1.45	3.22
63-843-593	SR	24.746015	59.427839	-0.16	0.09	0.11	0.51	4.00	2.16	-0.05	-0.81	-0.94	0.90
63-843-90600	SR	24.767628	59.427421	-0.16	0.11	-0.20	0.50	-2.40	2.09	-0.18	-1.41	0.93	0.48
63-843-90082	SR	24.748356	59.434734	-0.15	0.07	-0.43	0.50	1.33	2.03	-1.01	-3.33	-3.08	2.26
63-843-10533	SR	24.750218	59.436705	-0.15	0.07	-0.28	0.50	0.98	2.05	-0.69	-2.47	-1.78	3.89
63-843-90227	SR	24.735715	59.431988	-0.15	0.11	0.03	0.50	1.59	2.11	0.02	-0.32	-0.50	1.04
63-843-91201	FR	24.718065	59.433623	-0.14	0.14	-0.29	0.50	2.54	2.07	-0.78	-1.06	-4.31	-1.41
63-843-90667	SR	24.725637	59.429245	-0.14	0.12	-0.18	0.50	2.25	2.04	-0.14	-1.21	-1.47	0.34
63-843-90486	SR	24.749869	59.439740	-0.13	0.09	-1.64	0.49	-0.36	2.06	-1.11	-3.17	-3.77	-1.18
63-843-90565	SR	24.764786	59.432180	-0.13	0.08	0.28	0.51	-1.11	2.16	-0.87	-4.57	-0.21	0.05

63-843-90858	SR	24.790469	59.437980	-0.13	0.12	0.15	0.51	0.29	2.10	0.33	0.87	-0.63	1.36
63-843-345	PP	24.736219	59.421548	-0.13	0.12	-0.77	0.50	-2.51	2.05	-0.97	-0.55	-1.11	0.42
63-843-97935	SR	24.743336	59.427099	-0.12	0.09	-0.41	0.51	1.07	2.06	0.21	-0.78	-2.28	-1.34
63-843-90323	SR	24.774656	59.425940	-0.12	0.10	-0.05	0.52	1.58	2.12	-0.12	-0.51	0.41	-0.19
63-843-615	SR	24.772721	59.440333	-0.12	0.10	-1.26	0.50	0.72	2.05	-1.57	-5.51	-1.97	2.93
63-843-91081	PR	24.760034	59.430246	-0.10	0.08	-0.94	0.55	0.95	2.03	-1.83	0.15	-3.04	1.36
63-843-598	SR	24.762006	59.427943	-0.10	0.10	-0.81	0.51	0.50	2.21	-0.97	-3.80	-3.36	0.51
63-843-558	SR	24.770522	59.438210	-0.10	0.09	-0.37	0.50	1.30	2.11	-1.18	-5.14	-0.65	5.07
63-843-981	SR	24.737276	59.430733	-0.08	0.11	-0.09	0.50	2.53	2.04	0.04	-0.93	-2.49	0.87
63-843-576	SR	24.745019	59.430573	-0.07	0.09	-0.47	0.49	-0.64	2.05	-0.40	-0.13	-2.46	-0.77
63-843-456	SR	24.777738	59.434414	-0.05	0.09	-1.32	0.49	0.63	2.15	-0.32	-2.31	-2.41	2.01
63-843-90534	SR	24.777651	59.426170	-0.04	0.10	0.02	0.50	2.23	2.05	0.02	-1.37	0.43	0.18
63-843-90326	SR	24.761518	59.428113	-0.04	0.10	-0.81	0.53	-0.29	2.08	-1.33	-3.40	-5.42	-1.84
63-843-577	SR	24.742226	59.428534	-0.03	0.10	0.12	0.49	1.77	2.05	0.13	-0.70	0.09	0.73
63-843-98782	SR	24.732147	59.429098	-0.02	0.11	-0.48	0.51	1.35	2.06	0.22	-1.81	0.39	0.50
63-843-338	PP	24.723625	59.431469	-0.02	0.13	-0.09	0.50	3.34	2.14	-0.38	-1.86	-2.08	-0.13
63-843-90782	SR	24.737707	59.443798	-0.02	0.12	0.17	0.50	0.07	2.02	-0.25	-0.45	-4.05	0.88
63-843-90781	SR	24.738218	59.444750	-0.01	0.12	0.16	0.49	0.96	2.03	-0.17	-0.34	-0.91	1.18
63-843-90242	SR	24.743625	59.429237	-0.01	0.09	-0.16	0.50	-0.13	2.07	0.17	-0.48	0.29	1.21
63-843-90687	SR	24.724495	59.434293	0.00	0.13	-0.18	0.49	1.51	2.16	-0.37	-1.19	-1.80	0.02
63-843-574	SR	24.745800	59.433560	0.01	0.08	-0.57	0.49	0.68	2.02	0.37	-2.05	-3.15	0.90
63-843-90005	FR	24.738846	59.431761	0.01	0.10	0.15	0.50	1.91	2.03	0.27	0.23	0.27	-0.33
63-843-98755	SR	24.779508	59.430944	0.01	0.09	0.84	0.50	1.03	2.02	0.48	0.66	-0.31	1.08
63-843-588	SR	24.740848	59.430488	0.02	0.10	0.17	0.49	1.39	2.04	0.36	-0.06	-1.75	0.92
63-843-90204	SR	24.741663	59.429546	0.02	0.10	0.37	0.50	1.59	2.09	0.36	0.31	-0.12	0.27
63-843-533	SR	24.750027	59.436679	0.02	0.07	-0.05	0.50	0.32	2.05	-0.32	-2.23	-1.56	3.31
63-843-90337	SR	24.764957	59.426937	0.02	0.11	0.00	0.50	0.93	2.03	-0.06	-2.18	-1.30	2.07
63-843-90320	SR	24.738760	59.431770	0.03	0.10	0.11	0.50	1.91	2.04	0.26	0.23	0.18	-0.39
63-843-98736	SR	24.742844	59.445165	0.04	0.11	-0.65	0.50	0.54	2.11	-0.75	-1.45	-2.50	4.24
63-843-10090	PP	24.725999	59.428455	0.04	0.12	-0.21	0.52	1.14	2.02	-0.41	-0.73	-4.67	-3.10
63-843-90213	SR	24.732798	59.434768	0.04	0.11	0.13	0.50	2.05	2.08	0.21	-1.26	-1.84	1.37
63-843-90977	SR	24.780450	59.429235	0.04	0.10	0.09	0.49	-1.90	2.13	0.14	-1.61	0.59	-0.61
63-843-90228	SR	24.785182	59.429862	0.04	0.11	0.11	0.49	-0.06	2.03	0.64	-0.56	-1.55	0.09
63-844-90852	SR	24.796383	59.437644	0.05	0.13	0.29	0.51	-1.49	2.11	0.81	0.35	-2.01	0.82
63-843-91340	SR	24.733040	59.436439	0.05	0.12	0.38	0.49	1.38	2.04	0.02	-0.27	-1.66	1.98
63-843-90857	SR	24.791222	59.439075	0.05	0.12	0.31	0.50	0.80	2.06	0.41	-0.62	0.68	3.89
63-843-90666	SR	24.727843	59.428418	0.06	0.11	0.23	0.50	2.39	2.04	0.02	-0.46	-0.66	-0.30
63-843-98066	SR	24.789154	59.424077	0.07	0.14	-0.04	0.50	-1.14	2.10	0.05	-0.58	1.43	-0.48
63-843-90944	SR	24.749581	59.442661	0.07	0.10	-0.36	0.51	0.51	2.09	0.16	-2.17	-9.06	2.52
63-843-90231	SR	24.724612	59.432285	0.07	0.13	0.22	0.50	2.14	2.04	-0.46	-1.48	0.95	-0.50
63-843-90381	SR	24.775038	59.433887	0.07	0.09	0.01	0.49	1.26	2.05	-0.35	-1.88	-0.25	2.18
63-843-90885	PR	24.791194	59.439703	0.07	0.12	0.22	0.50	0.15	2.10	0.24	-0.34	-0.81	0.84
63-843-90500	SR	24.748830	59.440201	0.08	0.09	-0.16	0.49	1.72	2.04	-0.34	-1.92	-2.10	1.71

63-843-98794	SR	24.790476	59.435337	0.08	0.12	-0.34	0.55	-0.92	2.07	-0.63	-0.16	-1.07	1.73
63-843-98710	SR	24.747430	59.444470	0.09	0.11	0.17	0.49	0.00	2.01	0.52	-0.36	0.43	1.48
63-941-90386	SR	24.737907	59.446227	0.11	0.12	0.20	0.50	2.31	2.09	0.44	-0.29	-2.13	2.92
63-843-90008	PR	24.754835	59.434980	0.11	0.06	-0.65	0.50	1.60	2.05	-1.45	-4.04	-2.46	2.88
63-843-90038	SR	24.749297	59.442399	0.14	0.10	0.10	0.51	2.48	2.06	0.34	-1.24	-5.58	3.39
63-843-90043	SR	24.748748	59.439152	0.17	0.09	-0.08	0.50	2.50	2.03	0.10	-1.68	-2.68	2.28
63-843-90215	SR	24.744952	59.433661	0.19	0.08	0.01	0.50	0.62	2.01	-0.82	-1.21	-1.38	3.77
63-843-98732	SR	24.784925	59.432318	0.19	0.12	-0.46	0.49	0.35	2.07	0.22	-0.37	-0.60	0.09
63-843-90232	SR	24.779497	59.428521	0.20	0.09	-0.27	0.50	1.11	2.02	-0.25	-1.95	-0.58	0.49

Lisa 2. Kaasnevate failide nimekirj

1. LOS failid csv formaadis. Faili nimes on määratud ajavahemik ja vaatesuund (ASC DESC).
 - a. Päise kirjeldus
 - i. Veeru eraldaja „,“
 - ii. Id – eraldus number, mis pannakse automaatselt
 - iii. lat – Punkti geograafiline laius kraad
 - iv. lon – punkti geograafiline pikkus kraad
 - v. height – välise DEM mudeli kõrgus
 - vi. height_wrt – Arvutatud kõrgus maapinnast
 - vii. sigma_height – kõrgusmäärangu standardhälve
 - viii. velocity – Punkti deformatsiooni kiirus (mm/y)
 - ix. sigma_velocity – deformatsiooni kiiruse standardhälve (mm/y)
 - x. cumulative_displacement – punkti kogu deformatsioon ajavahemiku jooksul
 - xi. coherence – ajaline koherentsus vahemik 0 – 1
 - xii. 2019-11-02 – mõõtmise kuupäevalised väärtused
 - xiii. ... (jätkuvad mõõtmiste kuupäevad ja aegrea väärtused)
 - b. Failid
 - i. LOS_ASC_2016-2017.csv
 - ii. LOS_ASC_2016-2020.csv
 - iii. LOS_ASC_2017-2018.csv
 - iv. LOS_ASC_2018-2019.csv
 - v. LOS_ASC_2019-2020.csv
 - vi. LOS_DESC_2016-2017.csv
 - vii. LOS_DESC_2016-2020.csv
 - viii. LOS_DESC_2017-2018.csv
 - ix. LOS_DESC_2018-2019.csv
 - x. LOS_DESC_2019-2020.csv
2. LOS failid shp formaadis. Kuna faile on mitu siis on need kokku pakitud. Tuletatud csv failidest.
 - a. Failid
 - i. LOS_ASC_2016-2017_shp.zip
 - ii. LOS_ASC_2016-2020_shp.zip
 - iii. LOS_ASC_2017-2018_shp.zip
 - iv. LOS_ASC_2018-2019_shp.zip
 - v. LOS_ASC_2019-2020_shp.zip
 - vi. LOS_DESC_2016-2017_shp.zip
 - vii. LOS_DESC_2016-2020_shp.zip
 - viii. LOS_DESC_2017-2018_shp.zip
 - ix. LOS_DESC_2018-2019_shp.zip
 - x. LOS_DESC_2019-2020_shp.zip

Võrgustatud kiirusväljad „tiff“ raster formaadis, ühik mm/a, faili nimes kajastub ajavahemik Näiteks „H_VEL_2016-2017.tiff“ - Kiirusväli ajavahemikus 2016-2017.

Sille analüüside tabel (vajalik eelnev sisselogimine):

ASC	Sille link
2016-2020	https://sille.space/app/#/map/498/2018
2016-2019	https://sille.space/app/#/map/498/1612
2016-2017	https://sille.space/app/#/map/498/2023
2017-2018	https://sille.space/app/#/map/498/2024
2018-2019	https://sille.space/app/#/map/498/2026
2019-2020	https://sille.space/app/#/map/498/2027
DESC	
2016-2020	https://sille.space/app/#/map/498/2014
2016-2019	https://sille.space/app/#/map/498/1613
2016-2017	https://sille.space/app/#/map/498/2022
2017-2018	https://sille.space/app/#/map/498/2029
2018-2019	https://sille.space/app/#/map/498/2028
2019-2020	https://sille.space/app/#/map/498/2025

Lisa 3. Optimaalsete võrgustamisparameetrite testarvutus

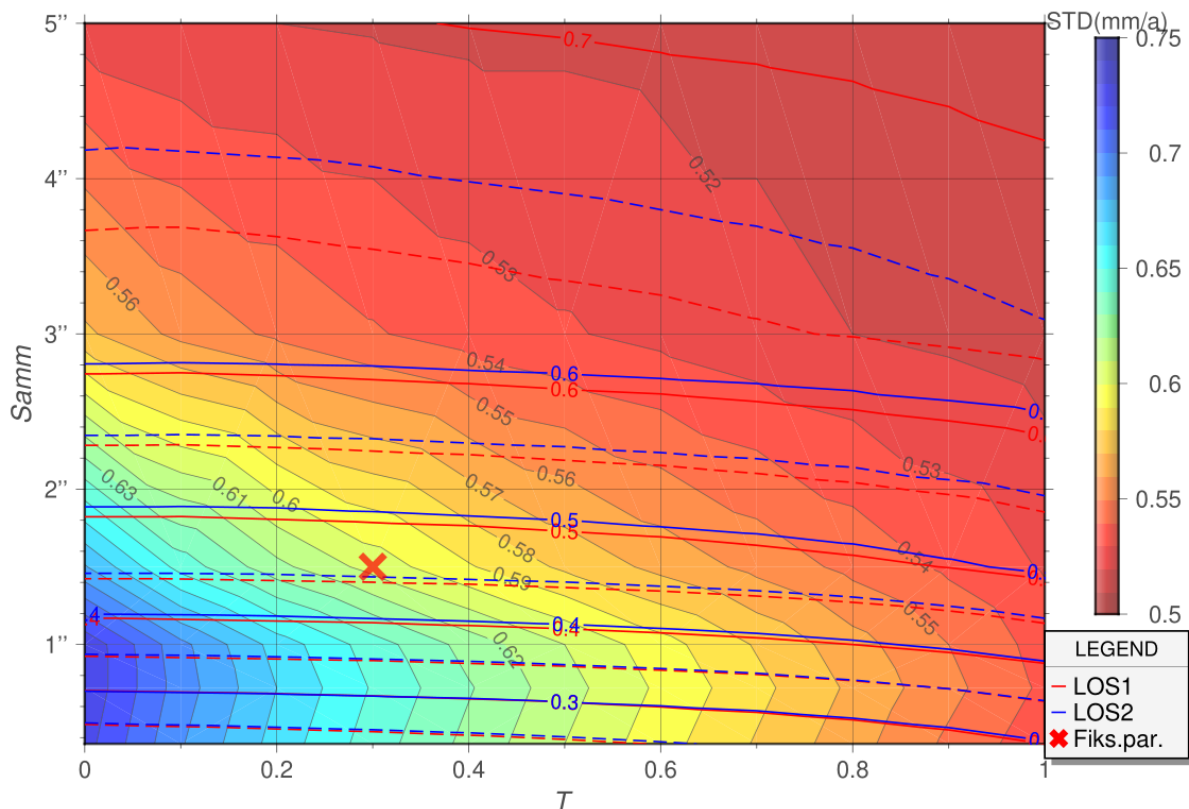
Arvutati LOS1, LOS2 ja vertikaalkiiruste pinnad järgmiste parameetrite vahemikus:

- 1) keskmistatud andmestik sammuga $s = 0.36, 0.72, 1, 1.5, 3, 5$ ($n = 6$);
- 2) Los pindade võrgustamine pingefaktoriga $T = 0, 0.1, \dots, 1$ ($m = 11$).

Kokku $n \cdot m = 3 \cdot 66 = 198$ mudelpinda, mida valideeriti 2 viisil:

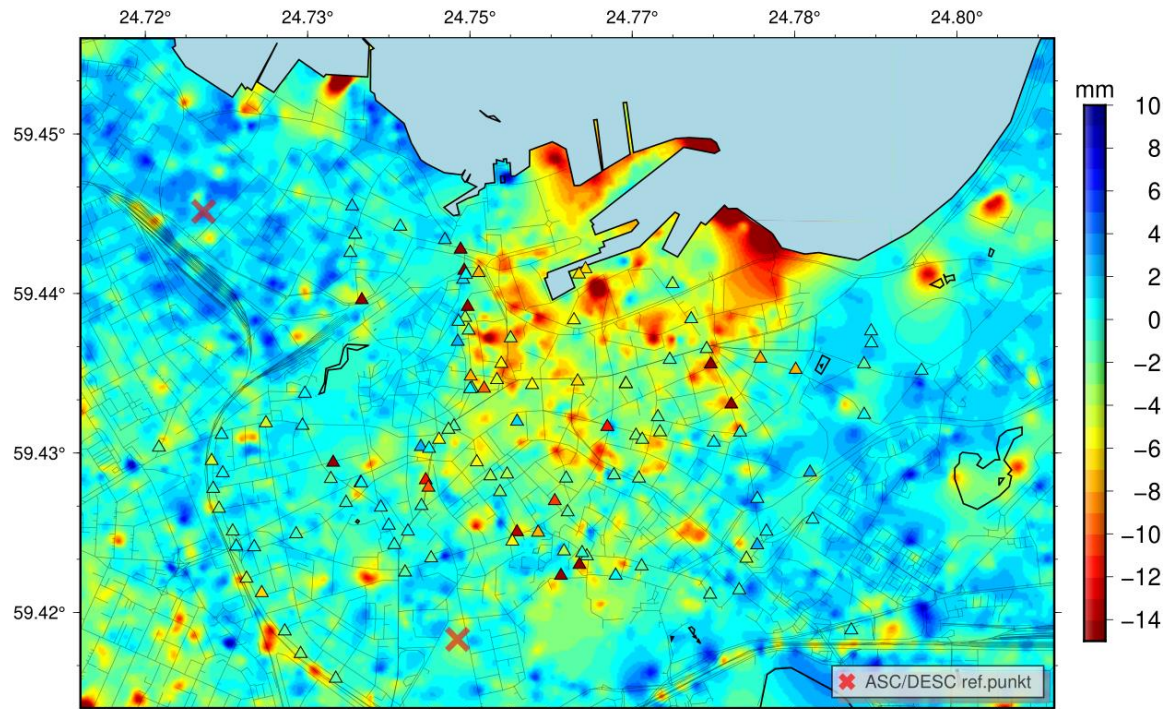
- a) LOS pindade võrdlus LOS punktide väärtustega (nn sisemine täpsus);
- b) kiiruspindade interpoleeritud väärtuste valideerimine reeperitel võrdlusest nivelleeritud kiirustega.

Tulemused esitatakse ühel joonisel, kus värviskaalaga pind esitab standardhälbe (STD) väärtusi võrdluses nivelleeritud kiirustega (b), isobaasidena on esitatud STD pinnad LOS1 ja LOS2 võrdlustest (a). Optimaalne lahendus peaks jääma piirkonda, kus kõik STD väärtused on minimaalsed. Samas näidisarvutus ($s = 1''$, $T = 1.0$) näitab, et parameetrite mõju võrgustamisprotsessile ja kiiruste väärtustele ei ole märgatav, sest erinevuste keskmine on 0.00 ± 0.21 mm/a (min, maks: $-0.63 \dots 0.64$ mm/a).

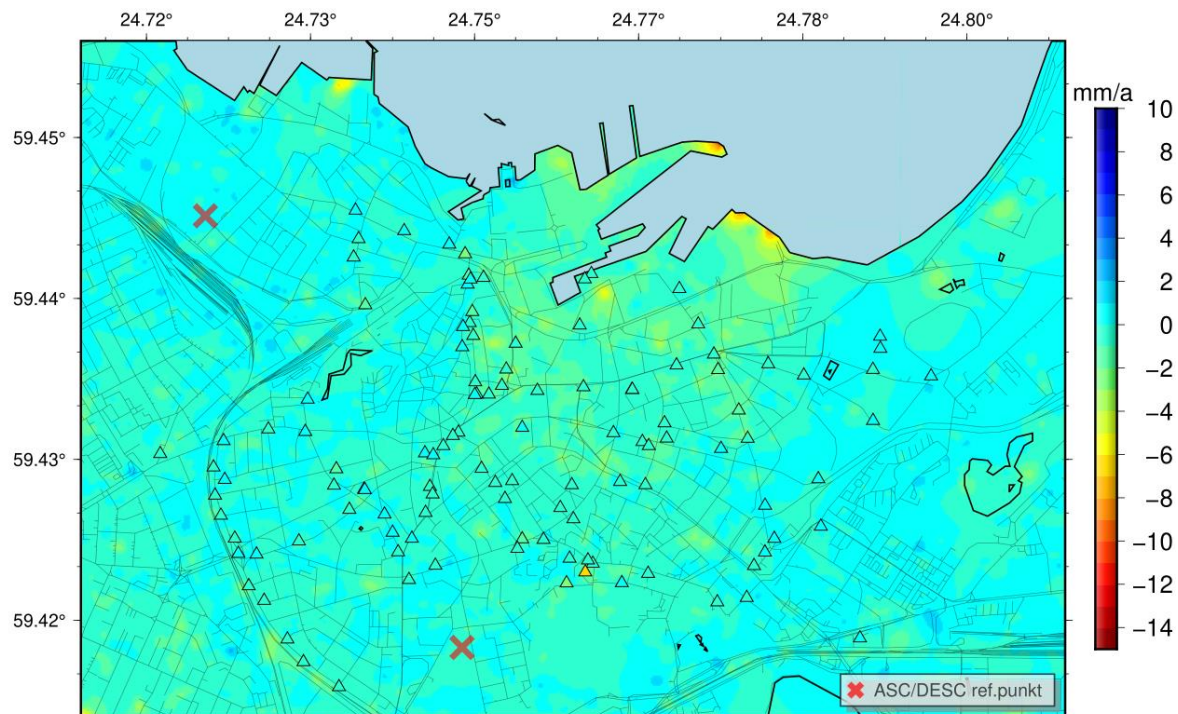


Joonis 25. STD pinnad võrgustamisprotsessi parameetrite valideerimisel.

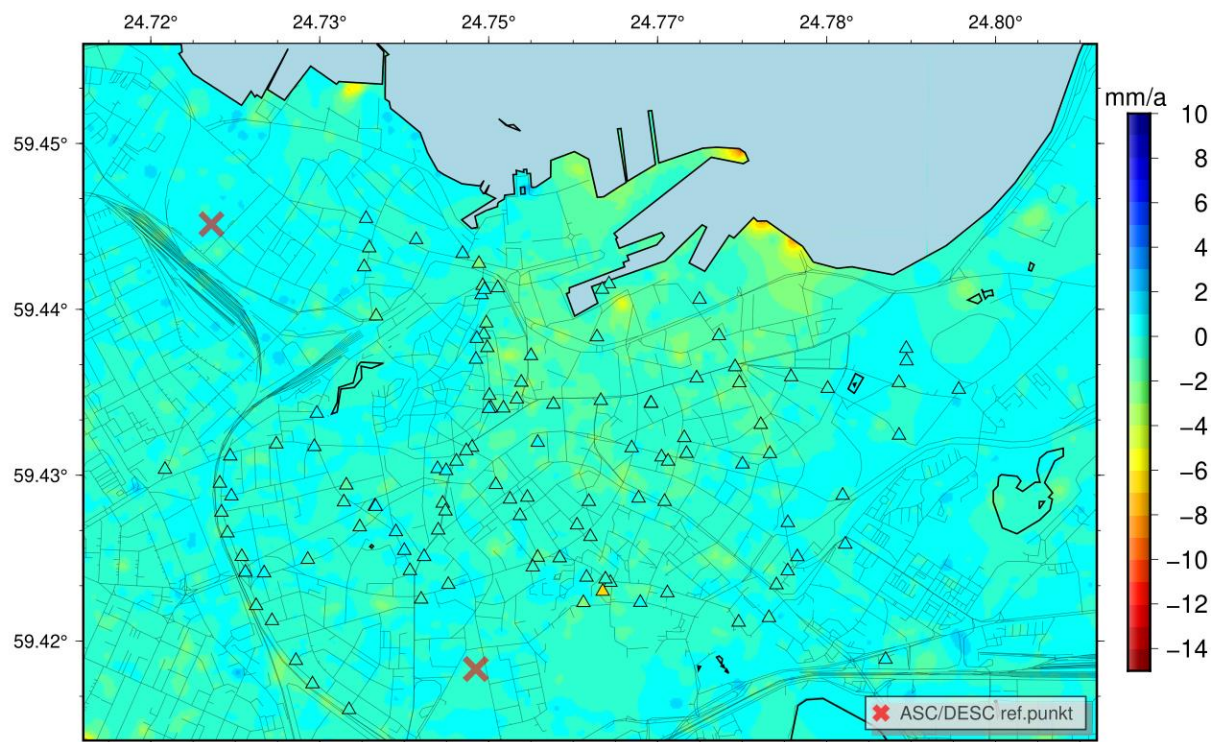
Lisa 4. Täiendavad kiiruste/deformatsioonide kaardipildid



Joonis 26. Kumulatiivne vertikaalsuunaline deformatsioon (cumulative displacement) Tallinnas PSI 2016-2020 andmete analüüsist (dT = 4.42 a).



Joonis 27. Vertikaalsuunaline liikumiskiirus (velocity) Tallinnas PSI 2016-2020 andmete analüüsist.



Joonis 28. Vertikaalsuunaline liikumiskiirus (velocity) Tallinnas PSI 2019-2020 andmete analüüsist.