

17.6.2020

Työn suorittaja:
Pasi Häkli
Maanmittauslaitos / Paikkatietokeskus
pasi.hakli@nls.fi

Tilaaja:
Jyrki Mononen
Traficom

Yksinkertaistettu muunnos ITRF2014→EUREF-FIN

1. Tausta

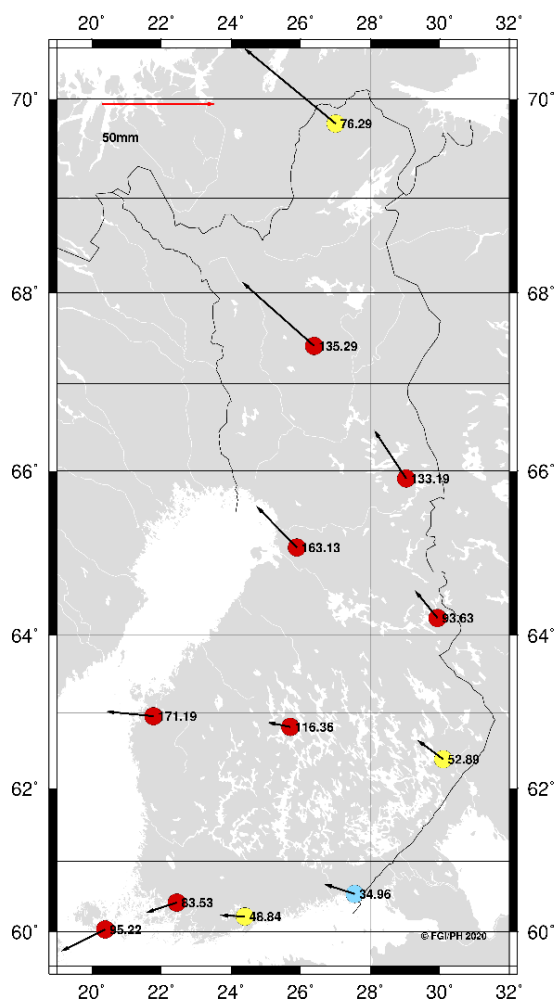
Työn tavoitteena on määrittää yksinkertaistetut muunnosparametrit globaalista ITRF2014-datumista kansalliseen EUREF-FIN-datumiin Suomen talousalueella merenkulun tarpeisiin. Yksinkertaistettu tarkoittaa tässä tapauksessa 7-parametrin Helmert-muunnosta.

ITRF2014 (kuten myös WGS84) on dynaaminen (aikariippuva) globaali datumi kun taas EUREF-FIN on staattinen datumi, jossa koordinaatit eivät muutu ajan funktiona. Tästä seuraa että muunnos pitää suorittaa aikariippuvan ja ei-aikariippuvan datumin välillä. Käytettävissä on erilaisia muunnosvaihtoehtoja, jotka huomioivat eri asioita. Virallinen EUREF:n suosittelema muunnos (Altamimi, 2018) on kaksivaiheinen: muunnos $ITRF_{yy}(t) \rightarrow ITRF_{xx}(t)$ ja $ITRF_{xx}(t) \rightarrow ETRF_{xx}(t)$, missä yy ja xx viittaavat eri ITRS- ja ETRS89-realisaatioihin (datumeihin) ja t on koordinaattien ajanhetki (epookki). Kuten edeltä nähdään, ei virallinen suositus korjaa koordinaattien epookkia vaan se säilyy havaintohetkessä (on kuitenkin huomattava että viralliset kaavat tuovat koordinaatit ETRS89-määritelmän mukaisesti Euraasian mannerlaatan *jäykän liikkeen osalta* epookkiin 1989.0 joka on ETRS89:n referenssiepookki). Tästä seuraa, että *mannerlaatan sisäisiä liikkeitä*, kuten esimerkiksi Pohjoismaissa tapahtuvaa maannousun vaikutusta, ei huomioida. Tämän vuoksi muunnos ei ole Suomessa cm-tarkka, ks. Kuva 1.

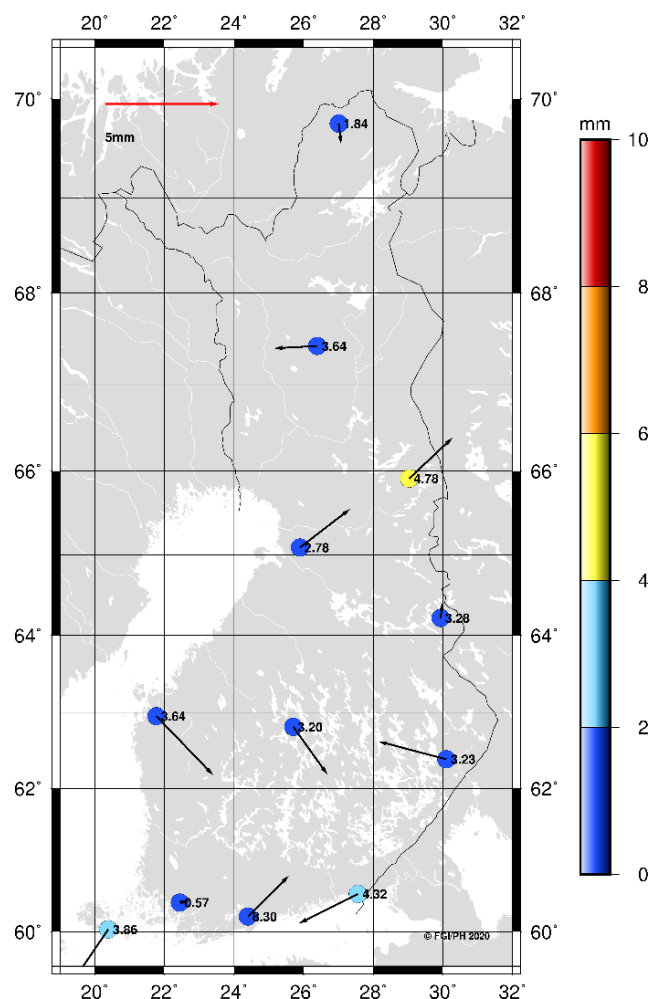
Virallinen EUREF:n suositus antaa mahdollisuuden kolmanteen vaiheeseen muunnoksessa, jossa voidaan korjata myös mannerlaatan sisäisiä liikkeitä mutta tätä ei ole tarkemmin ohjeistettu eikä se sisälly viralliseen muunnokseen. Koska EUREF:n suositus ei riitä esimerkiksi koordinaattijärjestelmien ylläpitoon Pohjoismaissa, on Pohjoismainen Geodeettinen Komissio (NKG) kehittänyt tarkemman ns. NKG-muunnoksen (Häkli et al., 2016) joka huomioi myös maannousun vaikutuksen, ks. Kuva 2 (huomaa eri mittakaava kuin Kuvassa 1). Muunnos sisältää kuitenkin useita vaiheita sekä koordinaattikorjausten interpoloinnin maannousumallista ja siten se ei ole suoraan toteutettavissa kaikkiin sovelluksiin. Muunnoksen käytön helpottamiseksi se on toteutettu PROJ-kirjastoon/ohjelmaan (PROJ contributors, 2020), joka on vapaasti saatavilla verkosta ja on jo toteutettu useisiin paikkatieto-ohjelmistoihin ja on myös sisällytettävissä käyttäjän omiin järjestelmiin.

Vuonna 2017 Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus (FGI) määritti silloiselle Liikennevirastolle merenkulun tarpeisiin yksinkertaistetun muunnoksen, joka perustuu 7-parametriseen Helmert-muunnokseen (Häkli, 2017). Syynä tähän oli se, että tuolloin PROJ-toteutusta eikä tukea monimutkaisille muunnoksille ei ollut vielä saatavilla. Kyseisellä menetelmällä päästään tarvittavaan muunnostarkkuuteen kun muunnosparametrit määritetään tietyllä ajanhetkellä ja niitä päivitetään tarpeeksi usein. Muunnoksen tarkkuus heikkenee kun siirrytään ajallisesti kauemmaksi muunnosparametrien epookista tai sijainnillisesti muunnosalueen ulkopuolelle.

17.6.2020



Kuva 1. EUREF-muunnoksen tarkkuus
ITRF2014(2021.5) → ETRF96(2021.5) vs. EUREF-FIN.



Kuva 2. NKG-muunnoksen tarkkuus
ITRF2014(2021.5) → ETRF96(2021.5) vs. EUREF-FIN.

2. Menetelmät

Koska tilaajan järjestelmät eivät vielä tue PROJ-toteutusta sovittiin tämän tilaustyön menetelmäksi tilaajan kanssa sama yksinkertaistettu muunnosmenetelmä jolla määritettiin muunnosparametrit vuonna 2017. Tässä raportissa käydään menetelmää läpi vain pääosin, tarkemmat tiedot löytyvät raportista Häkli (2017). Tässä työssä määritellään muunnosparametrit kahdelle eri epookille: 2006.75 ja 2021.5. Epookin 2006.75 parametreja tarvitaan tuolloin mitatun aineiston muuntamiseen WGS84:stä EUREF-FIN:iin. Tässä työssä ITRF2014 vastaa WGS84:ää. Epookki 2021.5 valittiin tilaajan kanssa nykyhetken mittauksia varten.

2.1. Data

Tässä työssä lähtöaineistona käytetään NKG:n GNSS-laskentakeskuksen (NKG AC; Lahtinen et al. 2018) laskemaa koko GNSS-datahistorian sisältämää GNSS-ratkaisua NKG Repro1 (Lahtinen et al.

17.6.2020

2019). Koordinaatti- ja nopeusratkaisu sekä niiden epävarmuudet perustuvat pitkiin aikasarjoihin ja myös epävarmuudet on määritetty siten että ne kuvastavat mahdollisimman realistisesti todellisuutta. Ratkaisuun kuuluu noin 250 pysyvää GNSS-asemaa Pohjois- ja Baltian maista sekä mm. Saksasta, Alankomaista, Puolasta ja Venäjältä. Suomesta mukana on kaikki saatavilla olleet FinnRef-asemat eli 13 kpl 90- tai 2000-luvulla ja 20 kpl 2012-13 perustettua asemaa, jotka ovat myös Suomen ETRS89-datumin, EUREF-FIN:n perustana.

2.2. Muunnospisteiden valinta

Muunnospisteiksi valittiin pisteitä siten, että ne kattavat mahdollisimman hyvin Suomen talousalueen merialueet sekä sisävesialueet. Lisäksi muunnosta voidaan käyttää laajemminkin Itämerellä tarkkuusvaatimusten niin salliessa, mutta ei kuitenkaan Itämeren ulkopuolella. Muunnospisteet otettiin NKG Repro1-ratkaisusta painottaen Suomea ja lähialueita erityisesti Itämeren rannikkoalueilla. Muutaman iteraatiokierroksen jälkeen päädyttiin muunnospisteistöön, joka on nähtävissä jäännösvirhekuvista 3 ja 5.

2.3. Koordinaattien laskenta

NKG Repro1-ratkaisun ITRF2014-koordinaatit siirrettiin valittuihin epookkeihin asemanopeuksien avulla. Tuloksena saatiin ITRF2014(2006.75)- ja ITRF2014(2021.5)-koordinaatit, joita käytetään muunnosparametrien määrittämisessä lähtökoordinaatteina (josta ollaan muuntamassa).

Vastaavalla tavalla ITRF2014-koordinaatit siirrettiin EUREF-FIN:n referenssiepookkiin 1997.0 ja muunnettiin sieltä EUREF-muunnoksella ETRF96(1997.0)-koordinaateiksi. Näitä koordinaatteja käytetään muunnosparametrien määrittämisessä tuloskoordinaatteina (johon ollaan muuntamassa). Tuloskoordinaatteina ei voida käyttää virallisia GNSS-asemien EUREF-FIN-koordinaatteja, koska EUREF-FIN:iä ei ole määritelty Suomen ulkopuolelle.

3. Tulokset

Tulokset esitetään molemmille epookeille erikseen. Ensin kuvataan muunnosparametrien määrittämis- tarkkuus muunnospisteiden jäännösvirheiden avulla ja sen jälkeen arvioidaan muunnostarkkuutta kaikilla NKG Repro1-ratkaisun asemilla niiden virallisiin ETRS89-koordinaatteihin nähden. Tässä on huomattava, että vain Suomen alueella muunnoksen tuottamien koordinaattien ja kansallisten koordinaattien koordinaattijärjestelmät ovat täysin samat. Muunnos tuottaa ETRF96(1997.0)-koordinaatteja kun Suomea lukuun ottamatta eri maissa on käytössä omat ETRS89-realisaatiot, mm. Ruotsissa SWE-REF99 = ETRF97(1999.5) ja niin edelleen. Tähän ratkaisuun päädyttiin, jotta voidaan realistisesti verrata muunnoksen tarkkuutta kansallisiin koordinaatteihin, jos muunnosta käytettäisiin muualla kuin Suomessa.

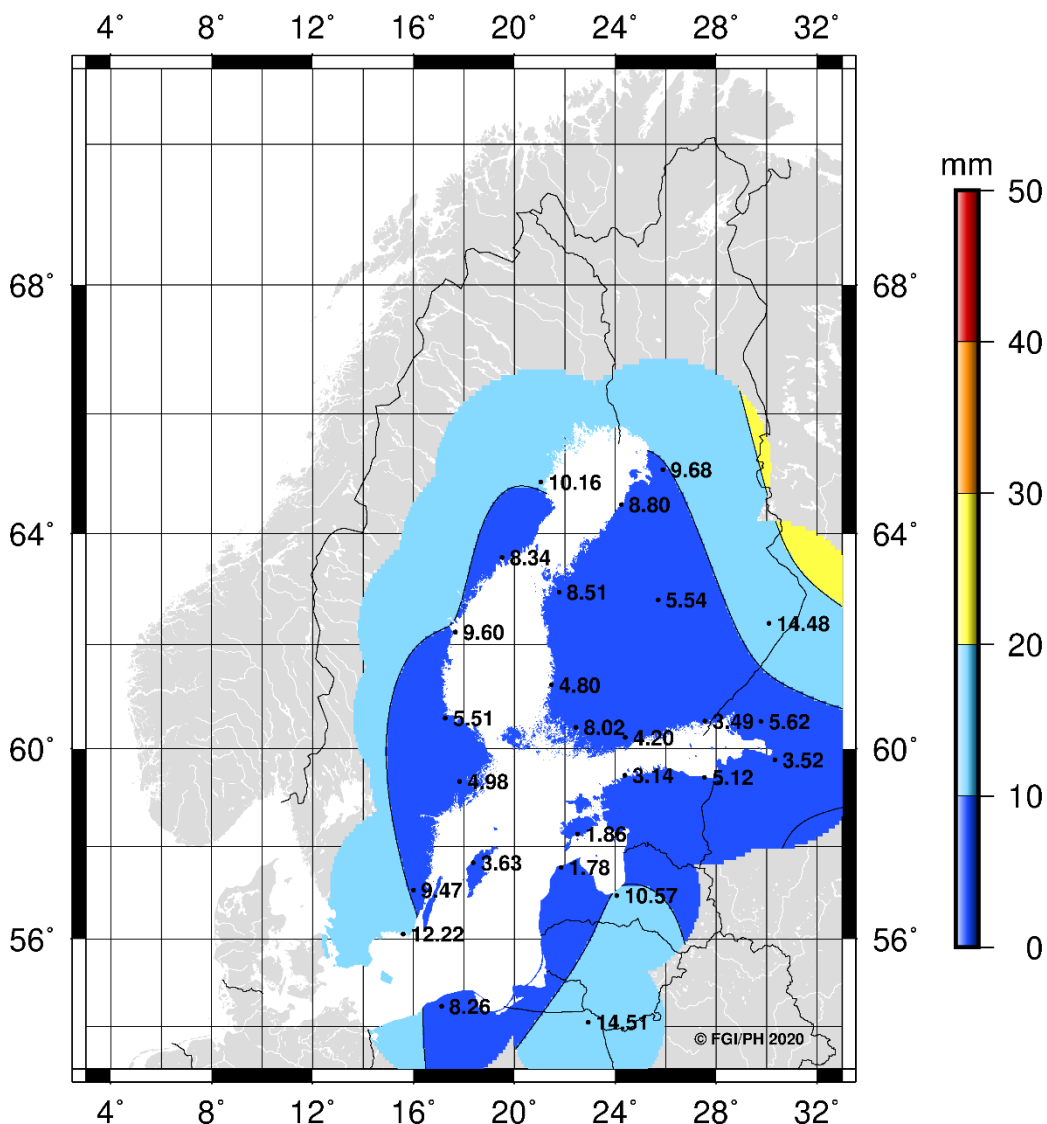
Valittujen muunnosepookkien lisäksi sama vertailu tehtiin eri ajanhetkille muunnostarkkuuden ajallisen muutoksen kuvaamiseksi. Muunnostarkkuus on esitetty ajanhetkille +1, +2 ja +5 vuotta muunnosparametrien epookista (vastaavat tarkkuudet saadaan myös ajanhetkille -1, -2 ja -5 vuotta).

17.6.2020

3.1. ITRF2014(2006.75)→EUREF-FIN

3.1.1. Muunnosparametrit

Muunnosparametrit laskettiin samalla tavalla kuin raportissa Häkli (2017). Jäännösvirheet kuvastavat odotettavissa olevaa muunnostarkkuutta muunnosparametrien epookissa. 26 muunnospisteen jäännösvirheiden rms on 3.7/3.1/6.4 mm (N/E/U) suurimpien arvojen ollessa noin 7 mm tasokoordinaateille ja noin 14 mm korkeudelle. Muunnospisteiden jäännösvirheet on esitetty Kuvassa 3. Muunnosparametrit löytyvät liitteen 1 Taulukosta 1.

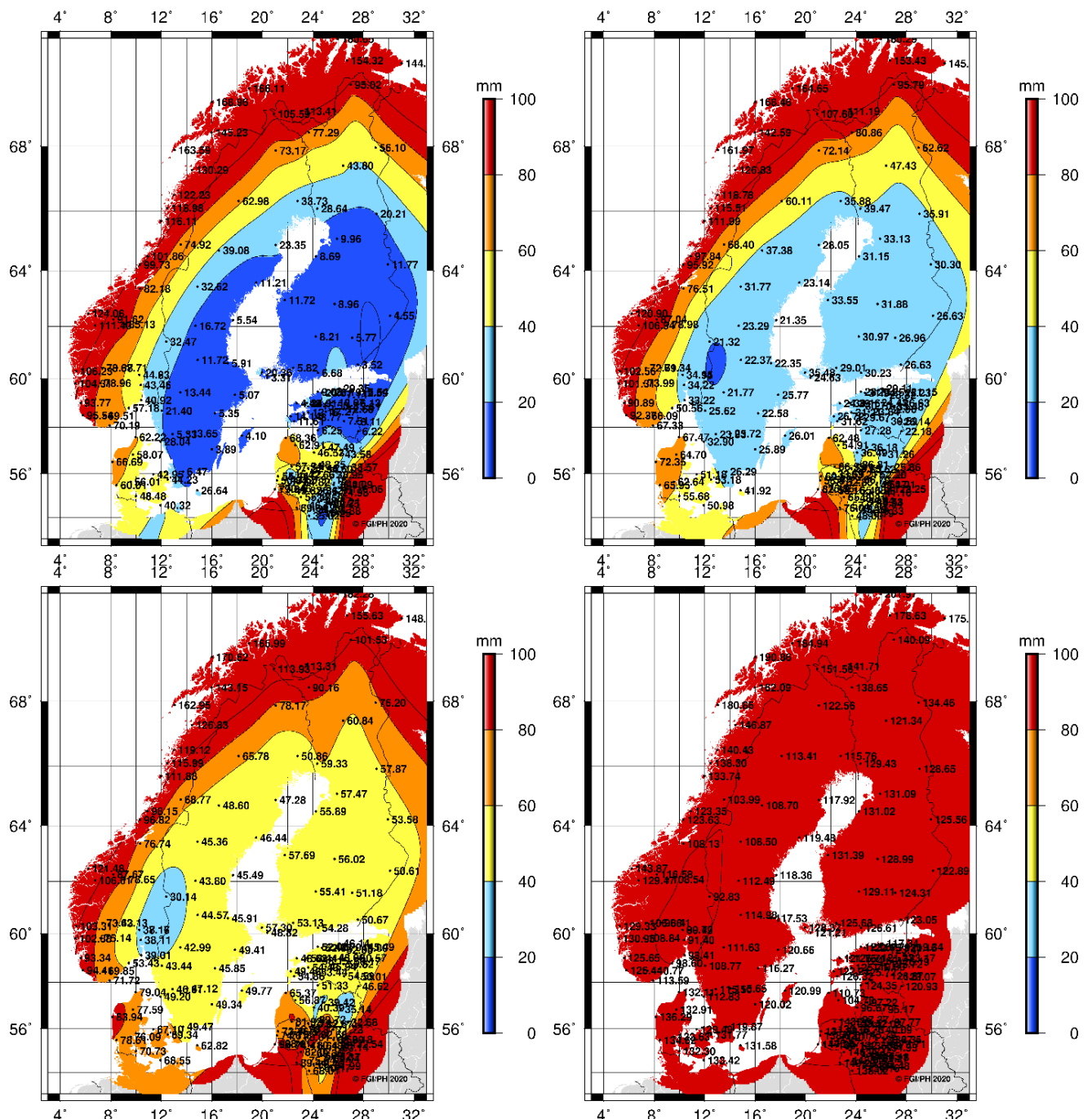


Kuva 3. ITRF2014(2006.75)→EUREF-FIN –muunnoksen jäännösvirheet (3D).

17.6.2020

3.1.2. Muunnoksen tarkkuus

Muunnoksen tarkkuus suhteessa kunkin aseman virallisiin ETRS89-koordinaatteihin eri ajanhetkillä on esitetty Kuvassa 4. Muunnoksen tarkkuus heikkenee nopeasti sekä muunnosparametrien määrittämiseen käytettyjen pisteiden (Kuva 3) ulkopuolella että siirryttäessä ajallisesti kauemmaksi muunnosparametrien määrittämisajasta.



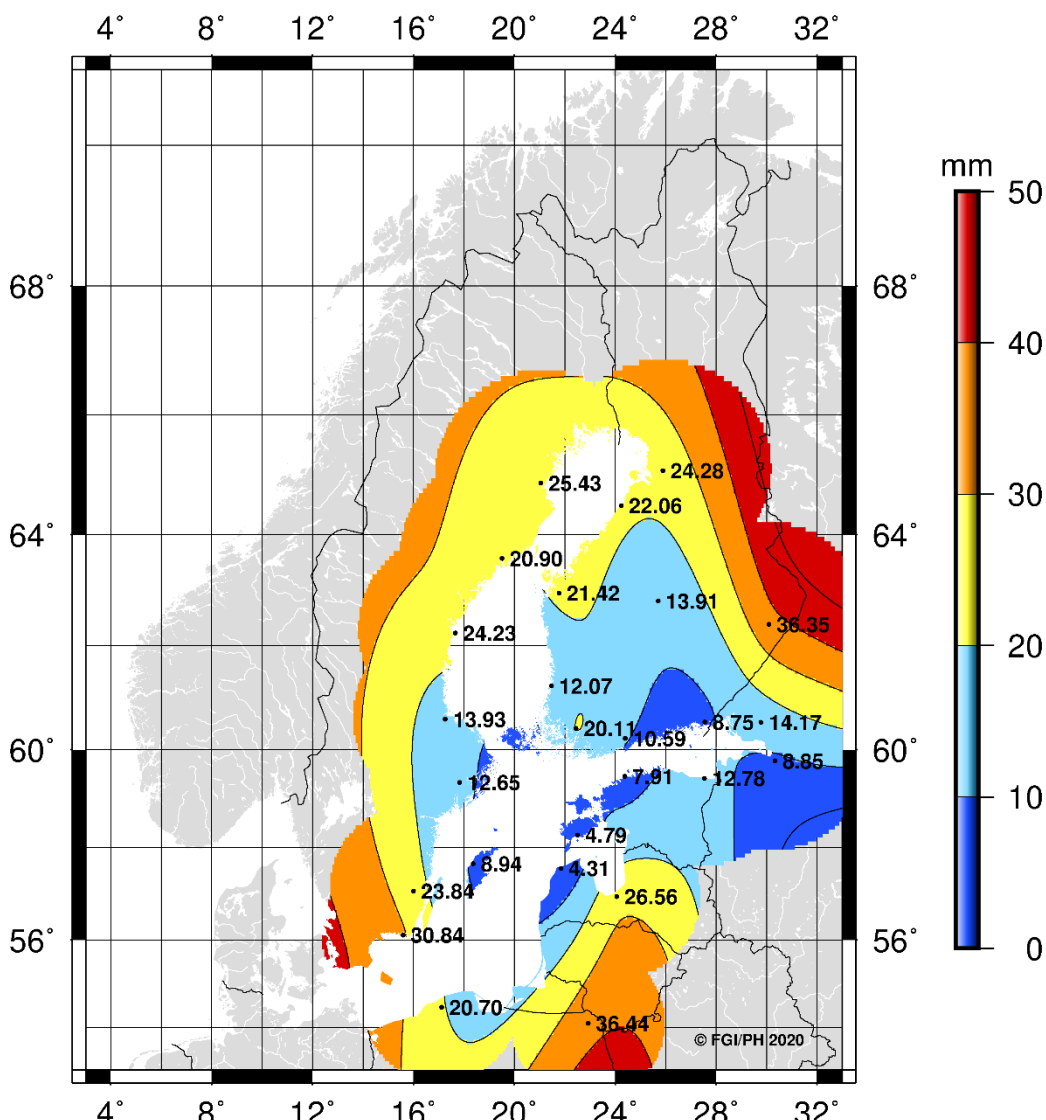
Kuva 4. Muunnoksen tarkkuus (3D) parametrien määrittämisajalla 2006.75 (vasen yläkulma), +1 vuotta (oikea yläkulma), +2 vuotta (vasen alakulma) ja +5 vuotta (oikea alakulma).

17.6.2020

3.2. ITRF2014(2021.5)→EUREF-FIN

3.2.1. Muunnosparametrit

Muunnosparametrit epookille 2021.5 laskettiin vastaavalla tavalla. Kuten jäännösvirheistä huomataan (Kuva 5), ei tämän muunnoksen tarkkuus ole yhtä hyvä kuin epookille 2006.75 (vrt. Kuva 3). Tämä johtuu siitä, että epookin 2021.5 parametrit sisältävät lähes 15 vuotta enemmän Euraasian mannerlaatan sisäisiä deformaatioita. 7-parametrinen Helmert-muunnos on yhdenmuotoisuusmuunnos, joka ei pysty huomioimaan näitä deformaatioita kokonaisuudessaan. Niinpä yksinkertaistetun muunnosmenetelmän tarkkuus heikkenee jatkossakin parametrien ja kansallisen referenssiepookin aikaeron kasvaessa. 26 muunnospisteen jäännösvirheiden rms on 9.2/7.8/16.0 mm (N/E/U) suurimpien arvojen ollessa noin 30 mm tasokoordinaateille ja noin 35 mm korkeudelle. Muunnosparametrit löytyvät liitteen 1 Taulukosta 1.

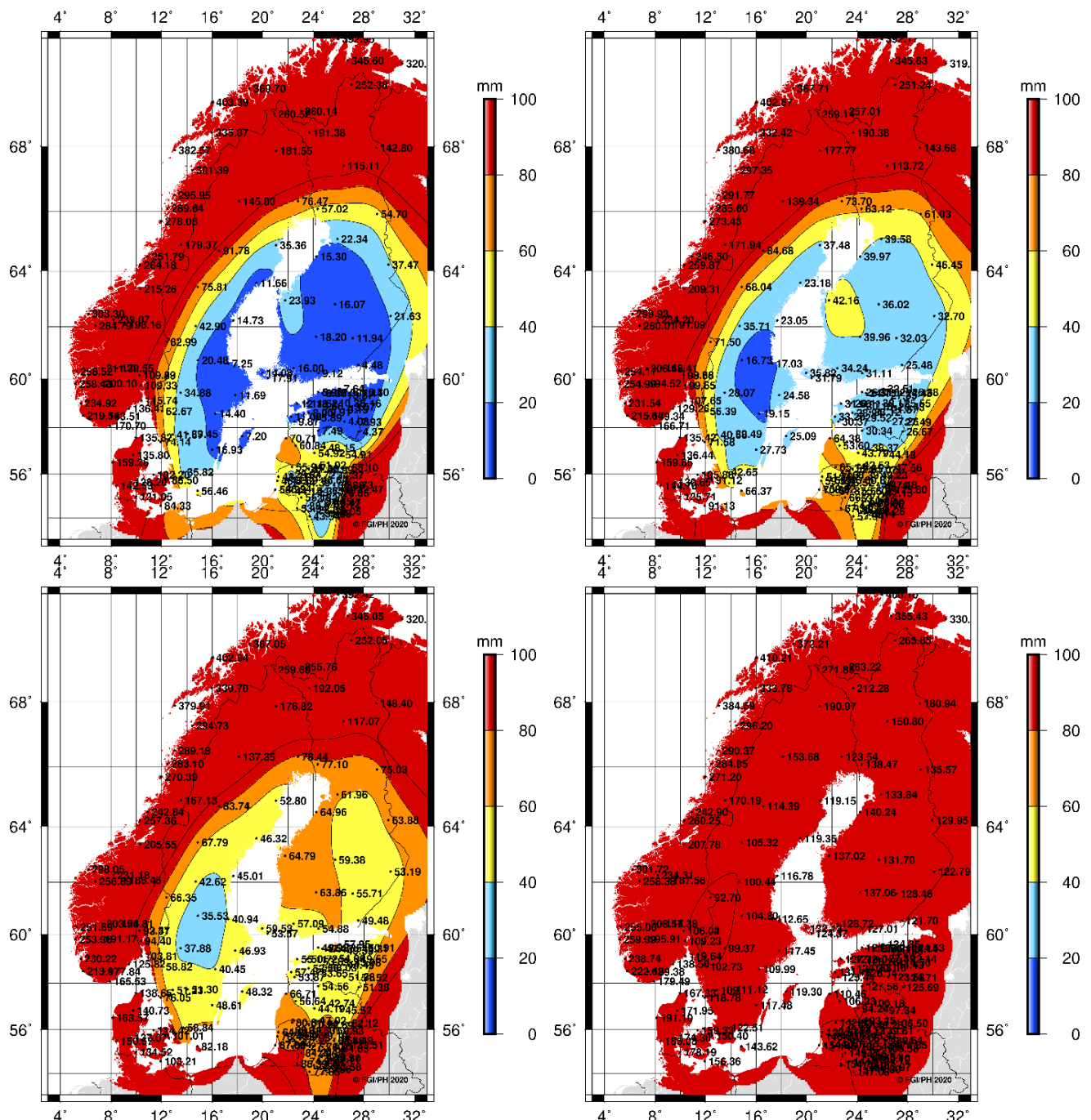


Kuva 5. ITRF2014(2021.5)→EUREF-FIN –muunnoksen jäännösvirheet (3D).

17.6.2020

3.2.2. Muunnoksen tarkkuus

Muunnoksen tarkkuutta arvioitiin vastaavalla tavalla myös kansallisiin koordinaatteihin nähden (Kuva 6). Kuten jäännösvirheidenkin osalta, on muunnoksen tarkkuus huonompi kuin epookin 2006.75 muunnokselle (vrt. Kuva 4). Kuitenkin esimerkiksi Suomenlahden alueella muunnoksen tarkkuus (3D) on vielä noin 3 cm +/- vuosi muunnosparametrien epookista.



Kuva 6. Muunnoksen tarkkuus (3D) parametrien määrittämisajankohdalla 2021.5 (vasen yläkulma), +1 vuotta (oikea yläkulma), +2 vuotta (vasen alakulma) ja +5 vuotta (oikea alakulma).

17.6.2020

4. Johtopäätökset

Tässä työssä määritettiin muunnosparametrit kahdelle eri epookille 2006.75 ja 2021.5 menetelmällä joka on kuvattu raportissa Häkli (2007). Tulokset osoittavat, että menetelmällä voidaan määrittää muunnosparametrit muutamien senttimetrin tarkkuudella, mutta että muunnosparametrien tarkkuus heikkenee jatkossa kun aikaero kasvaa EUREF-FIN:n referenssiepookkiin 1997.0 nähden.

Tuloksista nähdään myös, että muunnosparametrien käyttökelpoisuus on tarkkuusvaatimuksista riippuen noin 1-2 vuotta. Tarkimpiin mittauksiin suositellaan kuitenkin vuosittain määritettäviä parametreja, jotka ovat voimassa +/-0.5 vuotta parametrien määritysepookista. Lisäksi on huomattava, että muunnosparametrit ovat voimassa vain Itämerellä ja ne ovat tarkimmat Suomessa ja lähialueilla.

Edellä mainituista rajoitteista päästään eroon, jos otetaan käyttöön NKG-muunnos joka on cm-tarkka koko Suomen alueella kun käytetään Suomen parametreja (muissa Pohjois- ja Baltian maissa päästään vastaavaan tarkkuuteen kunkin maan omilla parametreilla). Muunnoksen tarkkuus ei myöskään juurikaan heikkene ajan myötä. NKG-muunnos on toteutettu PROJ-kirjastoon, joka on mahdollista toteuttaa käyttäjän omiin järjestelmiin. Niinpä tämän työn suorittaja suosittelee pidemmän tähtäimen tavoitteeksi NKG-muunnoksen käyttöä ja mahdollisuuksien mukaan PROJ-toteutusta.

5. Viittaukset

Altamimi, 2018: EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. <http://etrs89.ensg.ign.fr/> (viitattu 17.6.2020)

Häkli, P., M. Lidberg, L. Jivall, T. Nørbech, O. Tangen, M. Weber, P. Pihlak, I. Aleksejenko and E. Paršeliunas (2016): The NKG2008 GPS campaign – final transformation results and a new common Nordic reference frame. Journal of Geodetic Science. Volume 6, Issue 1, ISSN (Online) 2081-9943, DOI: <https://doi.org/10.1515/jogs-2016-0001>, March 2016.

Häkli, P. (2017): Simplified transformation from ITRF2014 to ETRS89 in Finland for maritime applications.

Lahtinen S., Häkli P., Jivall L., Kempe C., Kollo K., Kosenko K., Pihlak P., Prizginiene D., Tangen O., Weber M., Paršeliunas E., Baniulis R., and Galinauskas K. (2018): First results of the Nordic and Baltic GNSS Analysis Centre, Journal of Geodetic Science, 8:1 (2018), 34-42. <https://doi.org/10.1515/jogs-2018-0005>

Lahtinen S., Jivall L., Häkli P., Kall T., Kollo K., Kosenko K., Galinauskas K., Prizginiene D., Tangen O., Weber M., Nordman M. (2019): ITRF2014 Densification for the Nordic and Baltic Countries. GPS Solutions (2019) 23:95, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0886-3>

PROJ contributors (2020). PROJ coordinate transformation software library. Open Source Geospatial Foundation. URL <https://proj.org/>

17.6.2020

6. Liite 1: Muunnosparametrit

Taulukossa 1 esitetään määritetyt muunnosparametrit ITRF2014-koordinaateista EUREF-FIN:iin kahdessa eri epookissa 2006.75 ja 2021.5. Tarkempi kuvaus parametrien käytöstä ja yksiköistä löytyy raportista Häkli (2017).

Taulukko 1. Muunnosparametrit ITRF2014(t) → EUREF-FIN

Parametri	t=2006.75	t=2021.5
TX [m]	0.426	1.000
TY [m]	0.626	1.501
TZ [m]	-0.384	-0.860
D [ppb]	-7.0	-21.1
RX [mas]	21.076	50.540
RY [mas]	-6.221	-21.684
RZ [mas]	-18.318	-38.164

7. Liite 2: laskuesimerkki ITRFxx(2006.75)-TM21 → ETRS-TM35FIN

Kaavat ja esimerkit JHS197 (<http://www.jhs-suositukset.fi/suomi/jhs197>), liite 2 ja 3.

Muunnoksen vaiheet:

- 1) ITRFxx(2006.75)-**TM21 (N,E)** + TM-projektiokaavat (ks. JHS197, liite 2, luku 3) →
- 2) ITRFxx(2006.75)-**lat,lon** + h(ellipsoidinen korkeus)=0 + konversiokaavat (ks. JHS196, luku 5.3.2) →
- 3) **ITRFxx(2006.75)-XYZ** + 7-parametrinen Helmert (ks. kaavat Häkli, 2017) →
- 4) **EUREF-FIN-XYZ** + konversiokaavat (JHS196, luku 5.3.1) →
- 5) EUREF-FIN-**lat,lon** (pudotetaan h pois) + TM-projektiokaavat (JHS197, liite 2, luku 3) →
- 6) ETRS-TM35FIN **(N,E)**

7.1. ITRFxx(2006.75)-TM21 (N,E) --> ITRFxx(2006.75)-lat,lon

(Kaavat JHS197, liite 2, luku 3)

N=6641421.000

E=684899.000

a=6378137

f=0.003352810681182

k₀=0.9996

λ₀=21

E₀=500000

Apusuureet (kaavat 1-3 ja 6):

n=0.001679220395

A₁=6367449.145771

17.6.2020

$e^2=0.006694380023$
 $h_1=0.000837732168164$
 $h_2=0.000000059058696$
 $h_3=0.00000000167349$
 $h_4=0.000000000000217$

Konversioparametrit (kaavat 21-33):

$\xi=1.043444318022588$
 $\eta=0.029049778798552$
 $\xi_1'=0.000729851171645$
 $\xi_2'=-0.000000051039910$
 $\xi_3'=-0.000000000003826$
 $\xi_4'=0.000000000000196$
 $\eta_1'=-0.000024032361019$
 $\eta_2'=-0.000000003528045$
 $\eta_3'=0.000000000029309$
 $\eta_4'=-0.000000000000024$
 $\xi'=1.042714517894482$
 $\eta'=0.029073814658332$
 $\beta=1.041990702774649$
 $l=0.057644373804206$
 $Q=1.306590831216355$
 $Q'=1.312380471490736$
 $Q'_f=1.312390353187827$
 $\varphi_r=1.044909258507451$
 $\lambda_r=0.424163516723015$

 $\varphi=59.868890487$
 $\lambda=24.302779332$

7.2. ITRFxx(2006.75)-lat,lon,h --> ITRFxx(2006.75)-XYZ

(Kaavat JHS196, kpl 5.3.2)

$\varphi=59.868890487$
 $\lambda=24.302779332$
 $h=0.0000$

Apusuureet:

$b=6356752.3141$
 $e=0.081819191043$
 $\varphi_r=1.044909258507451$
 $\lambda_r=0.424163516723015$
 $N=6394166.490142$

X= 2925309.2267
Y= 1320998.5974
Z= 5493159.1344

17.6.2020

7.3. ITRFxx(2006.75)-XYZ --> EUREF-FIN-XYZ

(Kaavat Häkli, 2017 kpl 2.2.3)

X= 2925309.2267
Y= 1320998.5974
Z= 5493159.1344

Parametrit: ITRF2014(2006.750)-->ETRF96(1997.000):

TX= 0.426 [m]
TY= 0.626 [m]
TZ= -0.384 [m]
D= -7.0 [ppb]
RX= 21.076 [mas]
RY= -6.221 [mas]
RZ= -18.318 [mas]

X= 2925309.5838
Y= 1320998.3930
Z= 5493158.9352

7.4. EUREF-FIN-XYZ --> EUREF-FIN-lat,lon,h

(Kaavat JHS196, kpl 5.3.1)

X= 2925309.5838
Y= 1320998.3930
Z= 5493158.9352

Apusuureet:

$e^2=0.006694380023$

lat,lon,h and N:

1-0: $\varphi=1.044909210128738$, $\lambda=0.424163412910274$, $h= -0.0510$, $N=6394166.489238$

1-1: $\varphi=1.044909210128778$, $\lambda=0.424163412910274$, $h= -0.0511$, $N=6394166.489238$

1-2: $\varphi=1.044909210128778$, $\lambda=0.424163412910274$, $h= -0.0511$, $N=6394166.489238$

$\varphi=59.868887715$
 $\lambda=24.302773384$
 $h= -0.0511$

7.5. EUREF-FIN-lat,lon --> ETRS-TM35FIN (N,E)

(Kaavat JHS197, liite 2, luku 3)

$\varphi=59.868887715$

17.6.2020

$\lambda=24.302773384$

 $a=6378137.0$

$f=0.003352810681182$

$k_0=0.9996$

$\lambda_0=27$

$E_0=500000$

Apusuureet (kaavat 1-3 ja 7):

$n=0.001679220395$

$A_1=6367449.145771$

$e^2=0.006694380023$

$h_1'=0.000837731824734$

$h_2'=0.000000760852779$

$h_3'=0.000000001197638$

$h_4'=0.000000000002443$

Konversioparametrit (kaavat 8-20):

$\varphi_r=1.044909210128778$

$\lambda_r=0.424163412910274$

$Q'=1.312390256812210$

$Q''=0.070882169992282$

$Q=1.306590735004082$

$l=-0.047075485128195$

$\beta=1.041990654235318$

$\eta'=-0.023745391157413$

$\xi'=1.042473359869092$

$\xi_1=0.000730244919991$

$\xi_2=-0.000000654553260$

$\xi_3=-0.000000000034288$

$\xi_4=0.000000000002200$

$\eta_1=0.000019573203787$

$\eta_2=0.000000037365750$

$\eta_3=-0.000000000171139$

$\eta_4=0.000000000000218$

$\eta=1.043202950203735$

$\xi=-0.023725780758797$

N=6639884.717

E=348987.727