

# GNSS Processing Groningen – Fase 1

Hans van der Marel, Technische Universiteit Delft, Geoscience and Remote Sensing

30 April 2015

Versie 1.0 (30 April 2015)

## Inleiding

In dit rapport wordt verslag gedaan van de eerste fase van de “GNSS Processing Groningen”<sup>1</sup> uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft (TU Delft) in opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM).

Fase 1 van de werkzaamheden betreft een analyse van de GNSS tijdreeksen van Groningen zoals berekend door 06-GPS. Aspecten die daarbij aan de orde kunnen komen zijn: evaluatie van de door 06-GPS gevolgde verwerkingsmethodiek, kwantificering van de hoogteprecisie van de tijdreeksen, effect van de stabiliteit en invloed van de gekozen referentiestations op de tijdreeksen, effecten van atmosferische en andere invloeden en op de hoogtetijdseries, en correlaties tussen verschillende stations.

Voor de uitvoering van de werkzaamheden is gebruik gemaakt van een GPS dataset berekend door het bedrijf 06-GPS in opdracht van de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM). Deze dataset, met tijdreeksen in Latitude, Longitude en Hoogte voor 13 stations in Groningen t/m 28-02-2015, is op 25 Maart 2015 door SodM aan de TU Delft ter beschikking gesteld.

Voor de uitvoering van de werkzaamheden heeft de TU Delft ook toegang gekregen tot experts van 06-GPS. Daartoe heeft op woensdag 8 April 2015 (9:00 – 11:00) overleg plaatsgevonden in Delft tussen Jean-Paul Henry (06-GPS) en Hans van der Marel (TU Delft). Naar aanleiding van dit overleg is door Frank Dentz van 06-GPS aanvullende informatie ter beschikking gesteld over de beschikbaarheid van referentiestations en twee performance metrics van de software. De resultaten hiervan zijn verwerkt in dit rapport.

De GPS data van 06-GPS is geanalyseerd m.b.v. een aantal Matlab™ scripts voor de analyse van GNSS tijdsreeksen die door de auteur in de loop der jaren zijn ontwikkeld. De scripts zijn daarbij aangepast aan de specifieke eigenschappen van de 06-GPS data en voor de eisen van dit project. De resultaten worden besproken in dit rapport.

Het eindresultaat van deze fase is dit rapport met de bevindingen en een gevalideerde tijdserie met kwaliteitsinformatie. Daarnaast zijn een groot aantal plots beschikbaar in een zip file.

---

<sup>1</sup> Werkzaamheden uitgevoerd volgens fase 1 van de offerte “GNSS Processing Groningen” van 27 februari en 17 Maart 2015 en opdracht bevestiging d.d. 19 Maart 2015 met kenmerk 15039202 en inkoopordernummer 139924.

## GNSS dataset

De GPS tijdsreeksen zijn door SodM beschikbaar gesteld in de vorm van twee Microsoft Excel files:

- "GPS data Groningen stations\_deel12.xlsx"
- "GPS data Groningen stations\_deel11.xlsx"

De Excel files bevatten de volgende kolommen

A	number
B	doy
C	sessid (a-x)
D	number of days since 2013-01-01 00:00 (real)
E	date
F,G,H	Latitude in deg min sec
I,J,K	Longitude in deg min sec
L	Height in m

met tab bladen voor de stations **0647, dzyl, eems, froo, over, sted** (deel11) en **tenp, tjuc, usqu, veen, zand, zdv, zeer** (deel12).

De Matlab™ functie `sodmimportdata.m` (calls `sodmimportstation.m`) zet de Excel data om in een Matlab mat-files voor ieder station: `zeer.mat` `zdv.mat` `zand.mat` `veen.mat` `usqu.mat` `tjuc.mat` `tenp.mat` `sted.mat` `over.mat` `froo.mat` `eems.mat` `dzyl.mat` `0647.mat`.

Iedere mat-file bevat een Matlab structure met de volgende velden

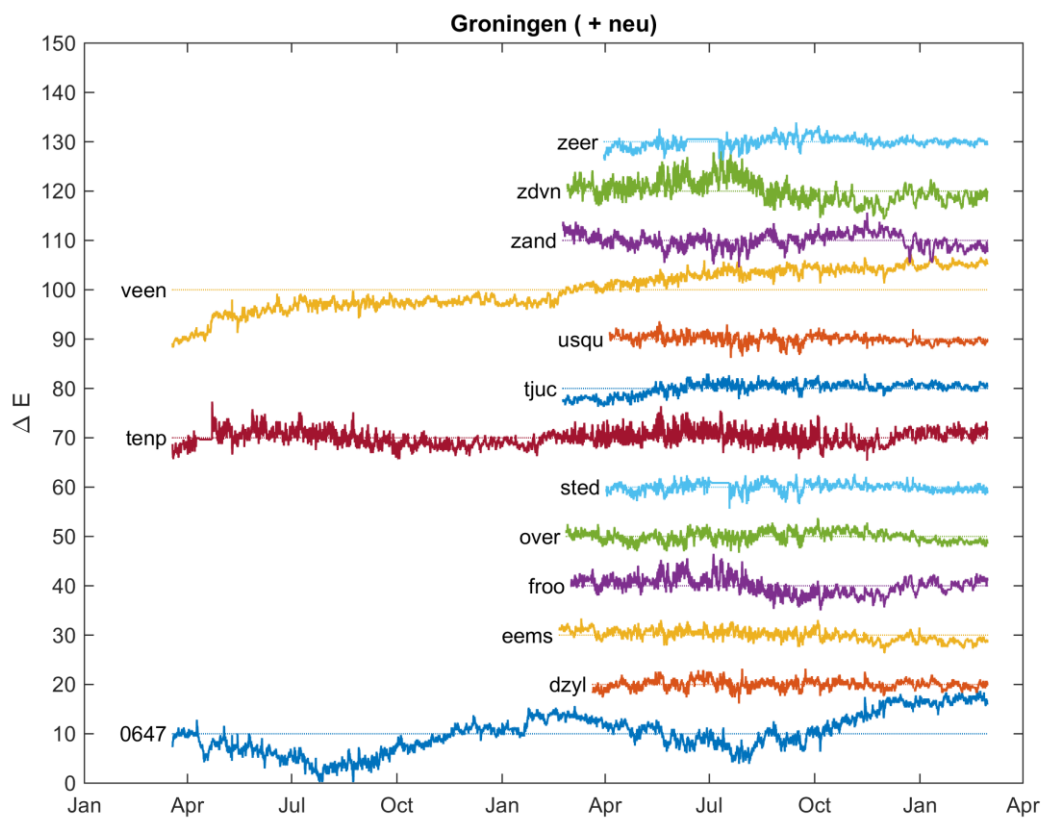
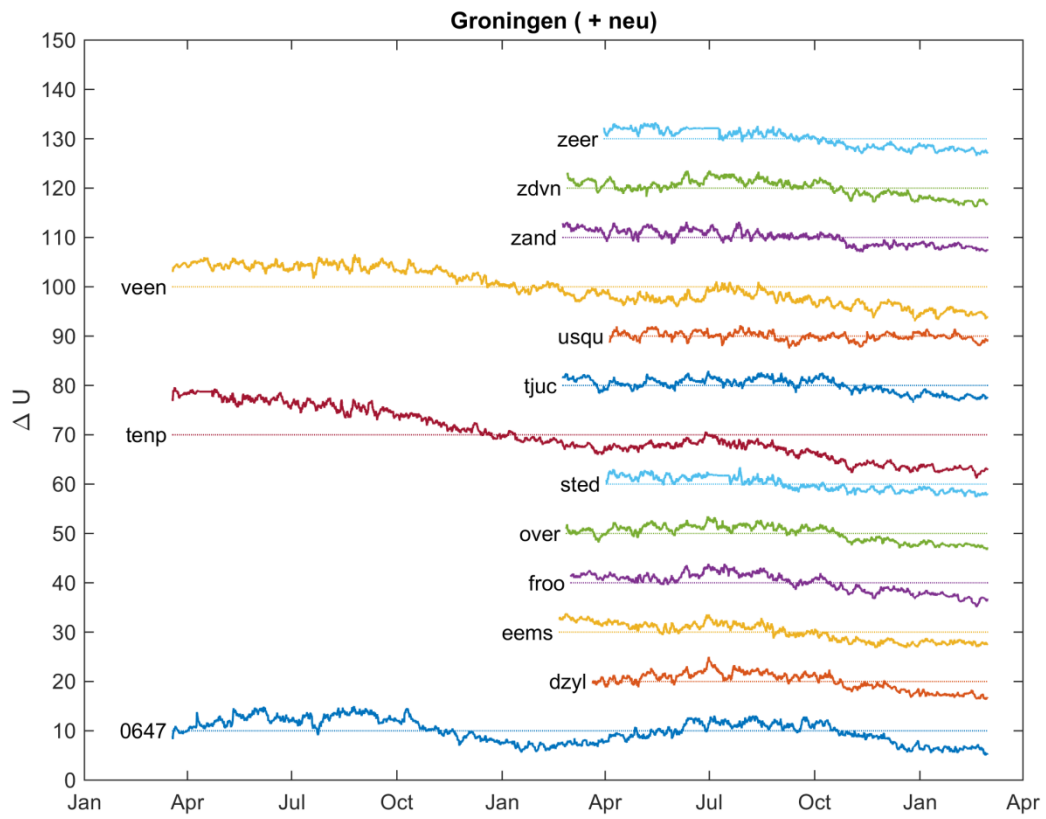
```
station: 'froo'
  plh0: [53.1877 6.7816 47.0817]    <- degrees and meters
  epoch: [8736x1 double]           <- Matlab datenumber
  doy: [8736x1 double]
  hour: [8736x1 double]
  plh: [8736x3 double]             <- degrees and meters
  neu: [8736x3 double]             <- North,East,Up ([m] wrt plh0)
```

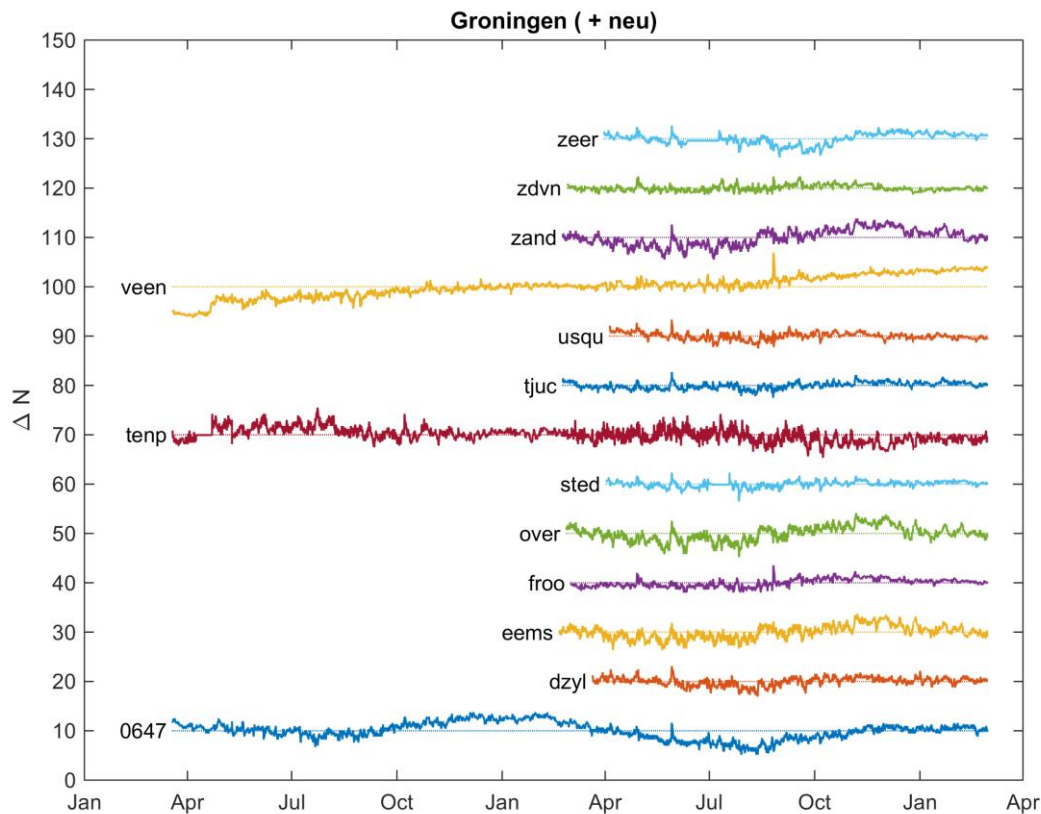
Het veld `plh0` bevat de gemiddelde latitude, longitude en hoogte, het veld `neu` bevat verschillen ten opzichte van deze positie in North, East en Up richting (in meters), en is berekend uit de gegeven latitude, longitude en hoogte gegevens. Een schatting is ieder uur beschikbaar.

De `neu` tijdreeksen zijn voor een eerste inspectie geplot m.b.v. de functie `sodmplotseries.m`

```
h=sodmplotseries('neu',10)
set(gca(h(1)), 'YTick', [0:10:150])
set(gca(h(2)), 'YTick', [0:10:150])
set(gca(h(3)), 'YTick', [0:10:150])
print(h(1), '-dpng', '-r300', 'SodM-North.png')
print(h(2), '-dpng', '-r300', 'SodM-East.png')
print(h(3), '-dpng', '-r300', 'SodM-Up.png')
```

Het resultaat is gegeven in de onderstaande figuren.





Opvallend is dat de Up component veel gladder is dan zowel de North als East component, en dat van de twee laatste, de North component gladder is dan de East component. Dit is consistent met een zogenaamde *ambiguity float* oplossing, waarbij de fase ambiguïteiten niet op hun integer waarden worden gefixed. Waarschijnlijker is dat de SSRPOST software van Geo++, die door 06-GPS wordt gebruikt, wel ambiguity fixing doet, maar dat andere parameters in de state vector verantwoordelijk zijn voor dit gedrag.

Verder valt op dat sommige stations meer hoog frequente fluctuaties voortonen (ruis) dan andere stations, en dat vaak een duidelijk annual signaal zichtbaar is. Dit is zeker niet ongebruikelijk voor GPS, en we komen hier later uitgebreid op terug. Al dit soort signalen zullen we apart gaan schatten.

Een beetje verscholen, maar toch duidelijk zichtbaar, is dat sommige stations, bv **zeer**, korte periodes hebben waarbij de data schijnbaar niet veranderd. Navraag bij 06-GPS leerde dat voor deze periodes waarschijnlijk geen GPS data beschikbaar is en waardoor de positie state niet wordt geupdate. Deze data staat weliswaar in de data files, maar het is absoluut noodzakelijk deze te verwijderen in verband met de verdere analyses.

Voor het verwijderen van deze data is een Matlab functie `sodmndata.m` geschreven. Deze moet worden aangeroepen iedere keer dat een van de mat-files wordt ingelezen (de resultaten worden in een andere mat file weggeschreven bij de verdere analyse van de data). `sodmndata.m` detecteert periodes dat de `neu` componenten schijnbaar niet veranderen en maakt een vector aan met de te verwijderen data; het is een vrij ingewikkeld script omdat er vaak valse alarm is. Uiteindelijk worden alleen periodes verwijderd die langer dan 18 uur duren. In alle volgende grafieken is deze data verwijderd.

In de dataset ontbreekt informatie over de kwaliteit van de individuele metingen. Het is gebruikelijk om voor ieder data punt een standaard afwijking afkomstig uit eerdere GPS analyse te geven. De waarden uit SSRPOST zijn echter veel te optimistisch en 06-GPS heeft besloten deze niet te verstrekken om geen valse verwachtingen te wekken. Bovendien zijn deze waarden, volgens 06-GPS, zeer uniform.

Dit laatste komt ook door de gevolgde verwerking procedure door 06-GPS. De tijdseries worden maandelijks geupdate, door een periode van twee weken voorafgaand aan de maand (inslinger periode), en de maand zelf te werken. De resultaten van de laatste maand worden aan de resultaten van de voorafgaande berekeningen geplakt. 06-GPS doet controles op de continuïteit, en ook in de TU Delft analyse zijn geen verdachte sprongen op de maand overgangen gevonden.

## GNSS data fitting procedure

GNSS tijdseries worden door drie verschillende effecten beïnvloed:

1. Beweging van het station zelf (in een welbepaald referentiefraam).
2. Beweging van het monument onder invloed van de omgeving, aardgetijden, atmosferic en ocean loading, grondwater effecten, etc., Deze bewegingen worden deels gecorrigeerd in de GNSS data analyse, waaronder met name de getijde en loading effecten door hetzij het toepassen van expliciete correcties, of anderzijds door het vasthouden van referentiestations (netwerk processing). De impliciete aanname in de netwerk processing is dat de effecten voor alle stations gelijk zijn; dit is echter slechts deels waar. Bv voor Groningen, ocean loading is niet hetzelfde voor alle stations en het is niet duidelijk of de SSRPOST software voor dit effect corrigeert. Het gevolg is vaak dat periodieke effecten in de GNSS tijdseries zichtbaar zijn, als direct effect, of door aliasing met een gekozen data interval.
3. Schijnbare effecten t.g.v. bijvoorbeeld niet gemodelleerde antenne effecten (calibraties), site multipath, niet gemodelleerde atmosfeer, etc. Correcties in de GNSS processing zijn vaak elevatie (en azimuth) afhankelijk en deze kunnen doorwerken in de tijdseries onder invloed van de zich herhalende satelliet constellatie.

De twee laatst genoemde effecten werken verstorend voor de analyse van bodembeweging in Groningen. Ze zullen proberen deze uit te data te schatten en vervolgens de tijdseries hiervoor corrigeren, voordat we een analyse van de bodembeweging kunnen uitvoeren.

### *Stations model*

Iedere component  $\Delta N, \Delta E, \Delta U$  (North, East, Up) van de positie tijdseries wordt beschreven door het volgende model

$$\Delta = s(t) + \Delta_{AtmLd}(P - P_0) + \Delta_{TempI}(T - T_0) + \sum(a_{si}\sin 2\pi f_i t + a_{ci}\cos 2\pi f_i t) + \epsilon$$

met  $s(t)$  de *trend*,  $\Delta_{AtmLd}$  een coëfficiënt voor *atmospheric loading* en  $\Delta_{TempI}$  een coëfficiënt voor het *temperatureffect*,  $a_{si}$  en  $a_{ci}$  coëfficiënten voor de *harmonische* termen en  $\epsilon$  de residuele *noise*,  $t$  de tijd in decimal years en  $f_i$  de frequentie in cycles/year. Het model heeft voorts nog mogelijkheden voor het schatten van jumps, maar deze is in dit project niet nodig gebleken.

Normaliter wordt een jump gemodelleerd wanneer er veranderingen in de (antenne) hardware plaatsvinden, of anderszins bij sprongen in de data.

Het trend model  $s(t)$  kan een simpele lineaire trend zijn, maar ook hogere orde polynomen en (cubic) splines zijn mogelijk. Omdat de meeste tijdseries slecht een jaar lang zijn wordt begonnen met een lineair model  $s(t) = x(t_0) + v * (t - t_0)$ . Alleen voor **temp** wordt in een later stadium een cubic spline model gebruikt.

In het standaard model wordt een correctie geschat voor atmospheric loading en stations deformaties onder invloed van temperatuur. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de luchtdruk  $P$  en temperatuur  $T$  van naburige meteo stations, in dit geval het KNMI weerstation in Eelde. Vanwege de beperkte omvang van het gebied zal het atmospheric loading effect zal heel erg klein zijn, maar wordt desalnietemin meegeschat. De geschatte coëfficiënten zijn ook daadwerkelijk klein en we hadden de schatting van dit effect ook achterwege mogen laten, maar het meenemen van deze term schaad ook niet.

De harmonische termen die worden geschat zijn periodes van 1 cycle/jaar en 2.08 cycle/jaar: een annual en semi-annual periode. De semi-annual periode is 175 dagen, de helft van de GPS draconitic jaar van 351 dagen en de helft van de periode van 350 dagen dat de satelliet constellatie zich herhaalt. De GPS draconitic jaar periode zelf wordt niet meegeschat aangezien deze te dicht bij de annual periode zit. Deze twee periodes zijn zeer gebruikelijk in de analyse van GPS tijdseries. Het is mogelijk dat ook hogere harmonischen van de GPS draconitic periode voorkomen, maar uit de verdere data analyse zal blijken dat het niet nodig is deze er bij te doen.

De temperatuur vertoond ook een duidelijke jaarlijkse oscillatie. Toch is het mogelijk het temperatuur effect en de annual terms gezamenlijk te schatten zonder dat de individuele schattingen slecht worden. Dit komt doordat de temperatuur veranderingen van jaar tot jaar verschillen en de temperatuur veranderingen geen puur sinusvormig patroon volgen.

### *Gecorrigeerde tijdserie*

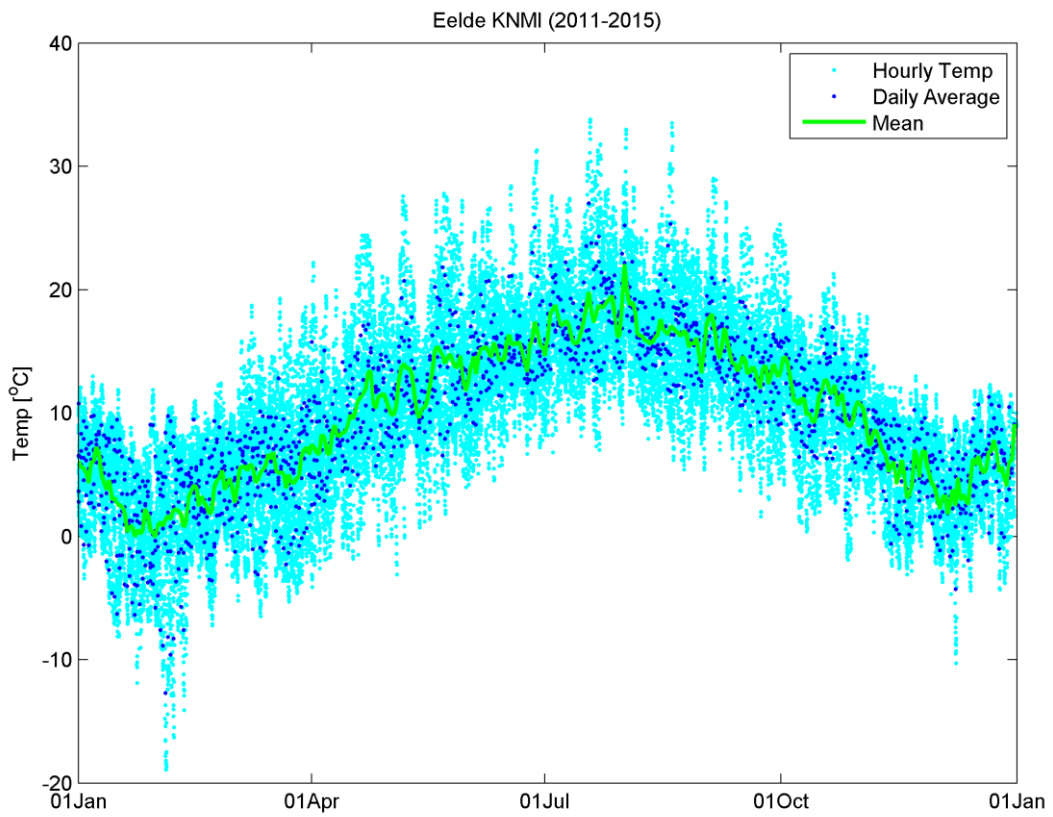
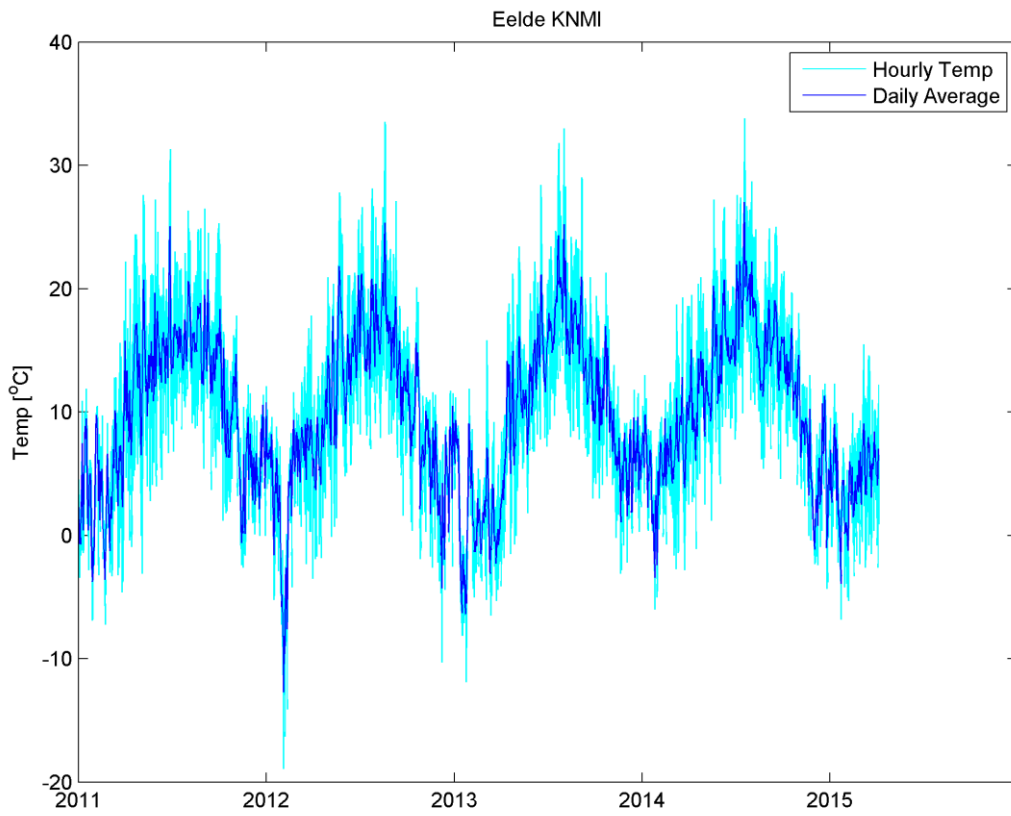
De verschillende parameters worden geschat met behulp van de kleinste kwadraten methode. Nadat de parameters zijn geschat worden de kleinste kwadraten residuen  $\hat{\epsilon}$  berekend. De gecorrigeerde tijdserie, zonder periodieke of versturende effecten, is

$$\hat{\Delta} = \hat{s}(t) + \hat{\epsilon}$$

met  $\hat{s}(t)$  de geschatte trend.

### *Meteo data KNMI station Eelde (280)*

Het Matlab script `gmeteo.m` leest uurlijkse meteo data van het KNMI weerstation Eelde. Het script berekend ook het dagelijkse gemiddelde van de luchtdruk en temperatuur, en plot deze. De resultaten voor de temperatuur staan in de onderstaande figuren. Deze plots, samen met die voor de luchtdruk (niet afgedrukt), zijn ook beschikbaar in een zip file (Eelde\_Yearly\_Temp.eps, Eelde\_Yearly\_Temp.png, Eelde\_Yearly\_Pressure.eps, Eelde\_Yearly\_Pressure.png, Eelde\_Temp.png, Eelde\_Temp.eps, Eelde\_Pressure.png, Eelde\_Pressure.eps). De data wordt opgeslagen in een mat file `z1meteo.mat` die door `sodmtseriesplotexp.m` wordt gelezen.



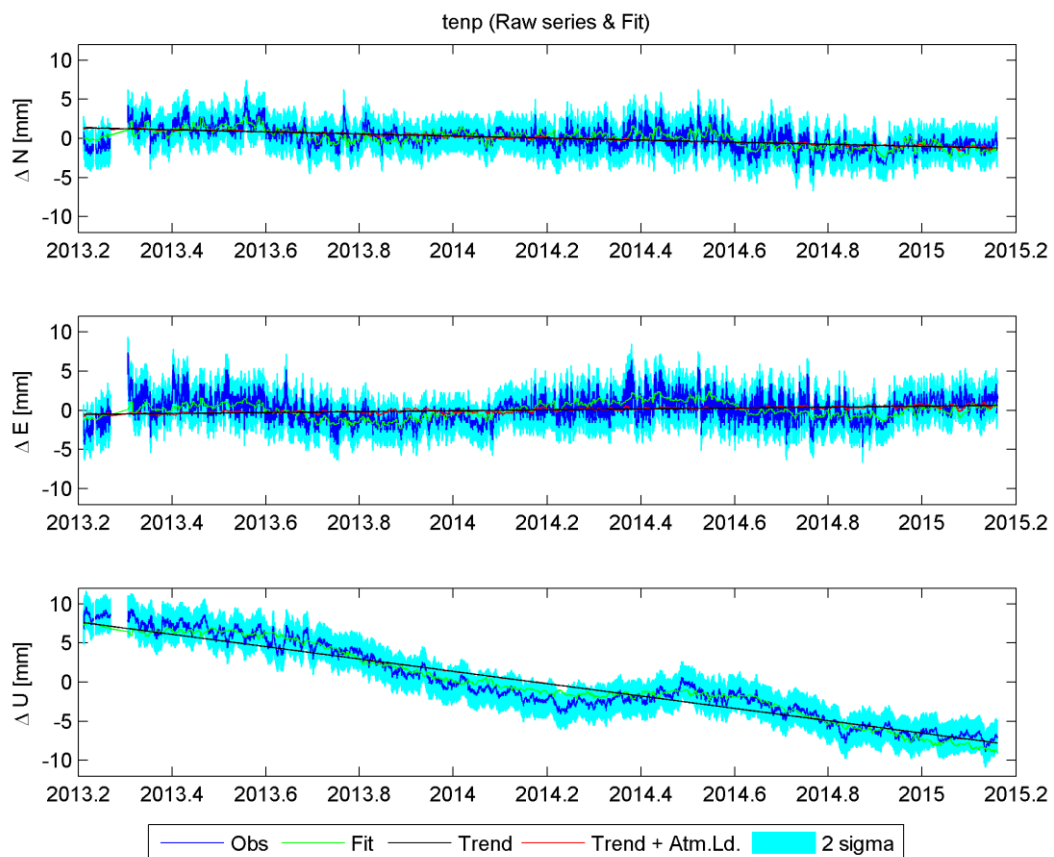
Voor het schatten van de temperatuur invloed wordt gebruik gemaakt van een interpolatie op basis van de dagelijkse gemiddelden (de uurlijkse meteo is niet geschikt ivm de grote dag/nacht variaties).

## GNSS data fitting resultaten – Eerste iteratie

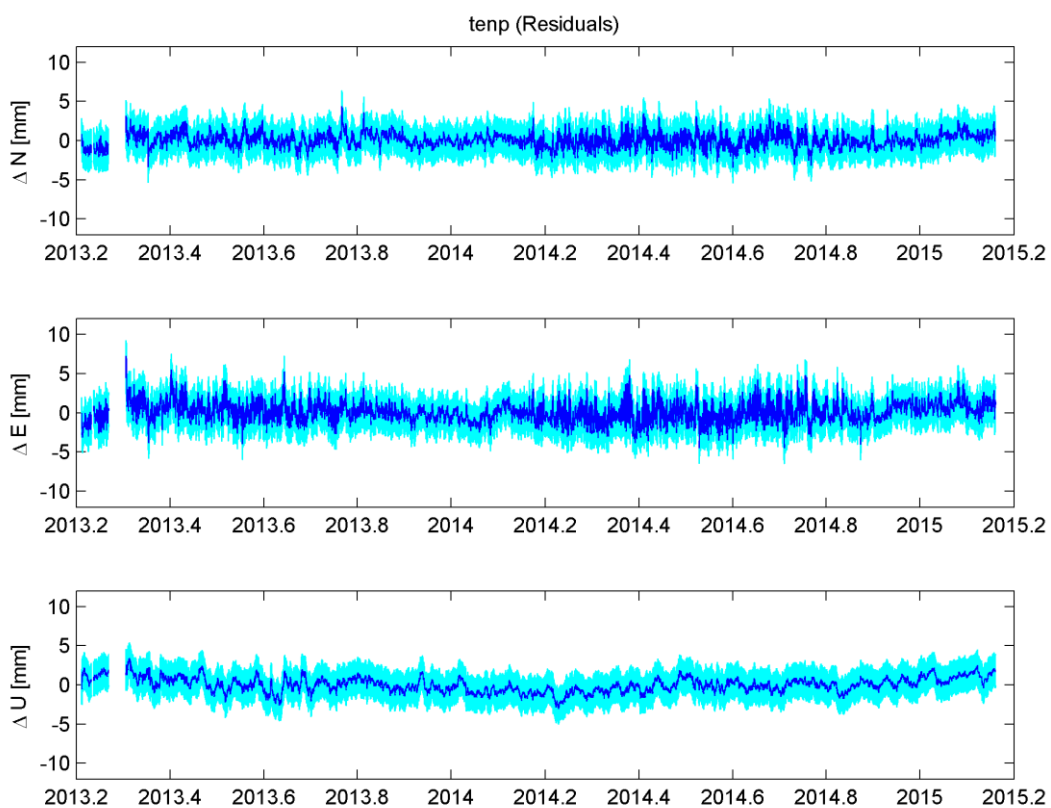
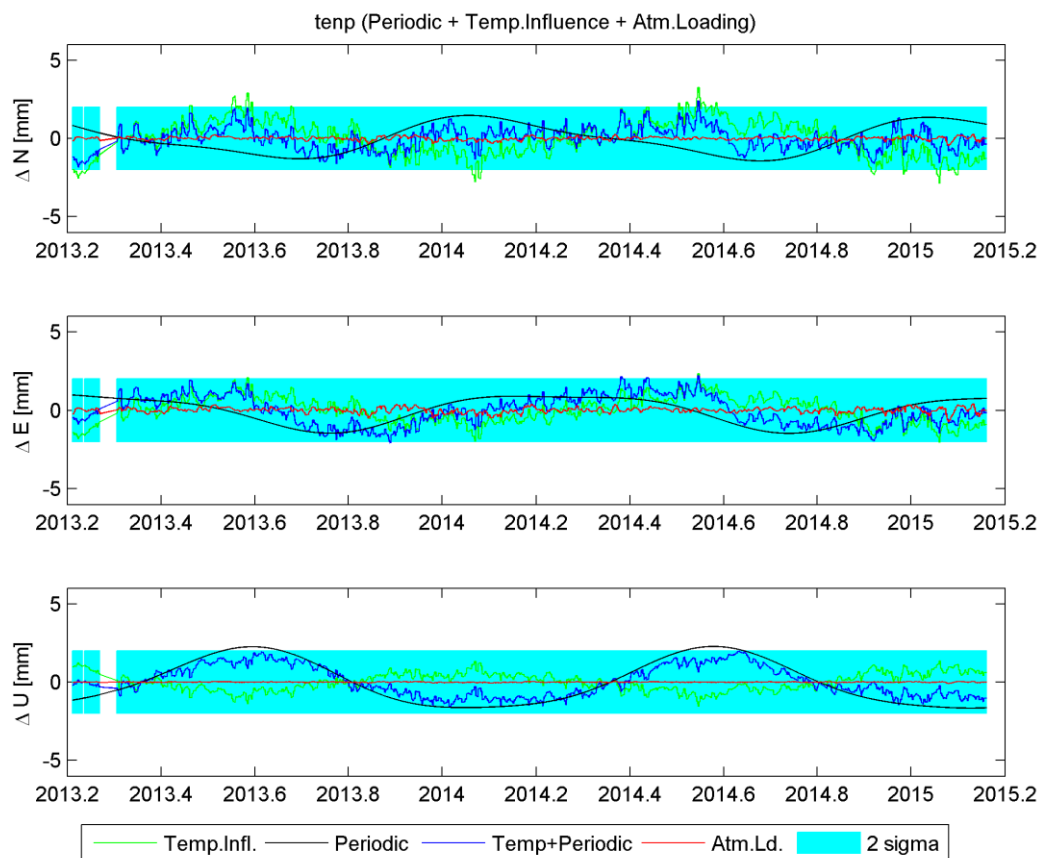
De hierboven beschreven GNSS data fitting procedure is geïmplementeerd in de Matlab functie `tseriesanalysis.m`. Deze functie wordt aangeroepen vanuit de functie `sodmtseriesplot.m`. De functie `sodmtseriesplot.m` voert de volgende taken uit:

- leest de mat files met stations data,
- detecteerd m.b.v. `sodmndata.m` intervallen met ongeldige metingen,
- leest de meteo data uit de mat file `z1meteo.mat`,
- berekend decimal year,
- voert de timeseries analysis uit door een aanroep van `tseriesanalysis.m`,
- schrijft de resultaten van de timeseries analysis weg naar een mat-file met de naam `ssss_fit.mat`, waarbij `ssss` de stations naam is,
- plot de resultaten.

Voor ieder station worden drie plots geproduceerd: `ssss_series.png` met de raw data series en fit, `ssss_components.png` met de geschatte componenten en `ssss_residuals.png` met de residuals. Voorbeelden van de plots voor station **tenp** worden hieronder gegeven.







De plots voor de overige stations zijn beschikbaar in de zip file met plots.

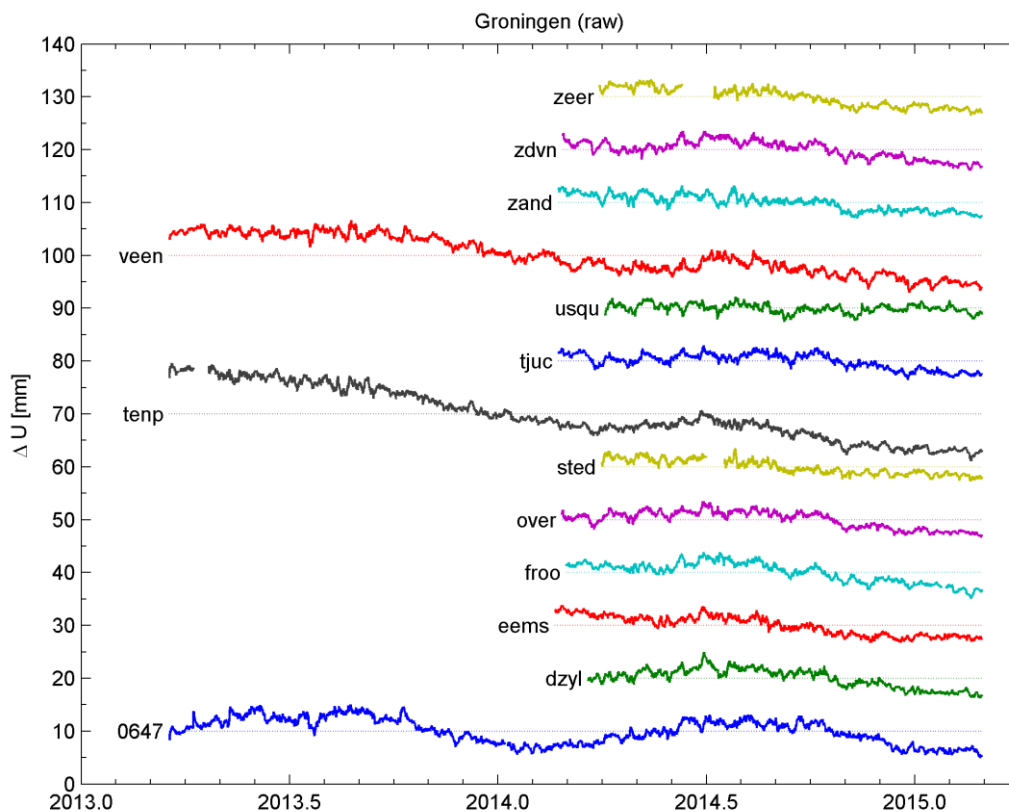
De cyaan achtergrond is het interval  $[-2\sigma_i, 2\sigma_i]$ , met  $\sigma_i$  de standaard afwijking van de individuele waarnemingen in de tijdreeks. Gebruikelijk is deze standaard afwijking afkomstig is uit de eerdere GPS analyse, echter aangezien deze ontbreekt in de dataset is een waarde van 1 mm aangenomen. De waarden uit SSRPOST zijn te optimistisch en 06-GPS heeft besloten deze niet te verstrekken om geen valse verwachtingen te wekken. Wel zijn deze waarden, volgens 06-GPS, zeer uniform. Dit is een belangrijk gegeven aangezien de absolute grootte van  $\sigma_i$  niet van belang is voor de schattingen (alleen voor de kwaliteitsbeschrijving). Ook wordt tijdens de processing een schalingsfactor (OMT) geschat.

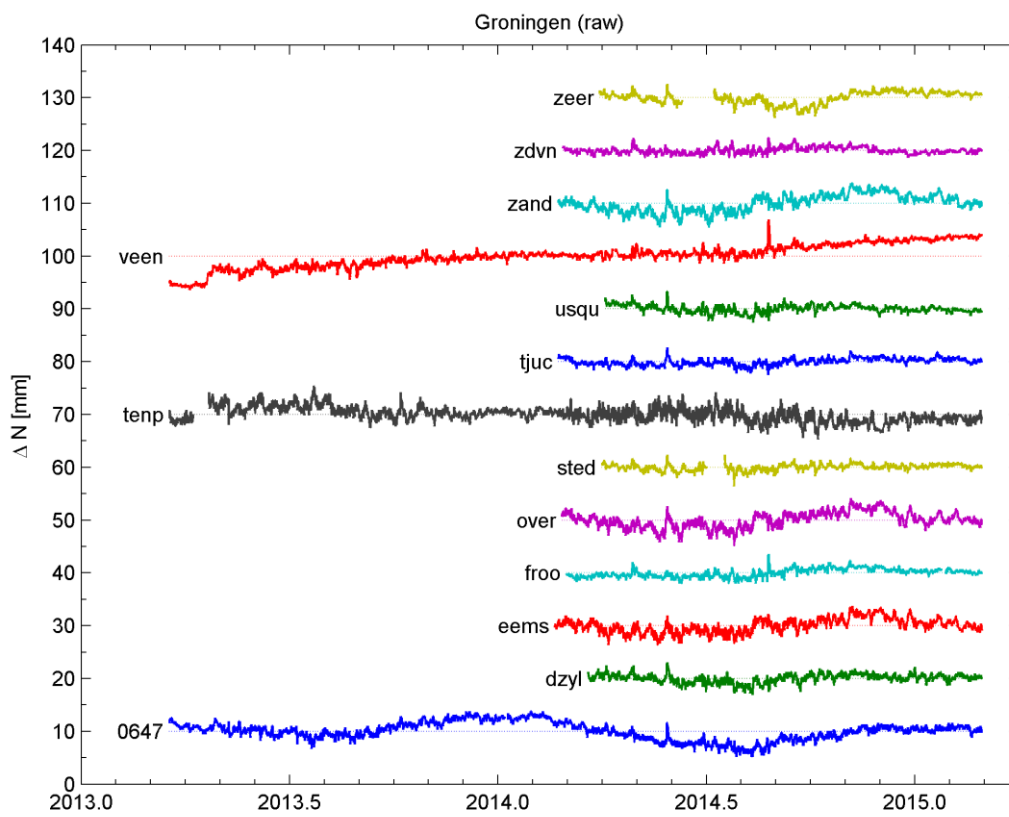
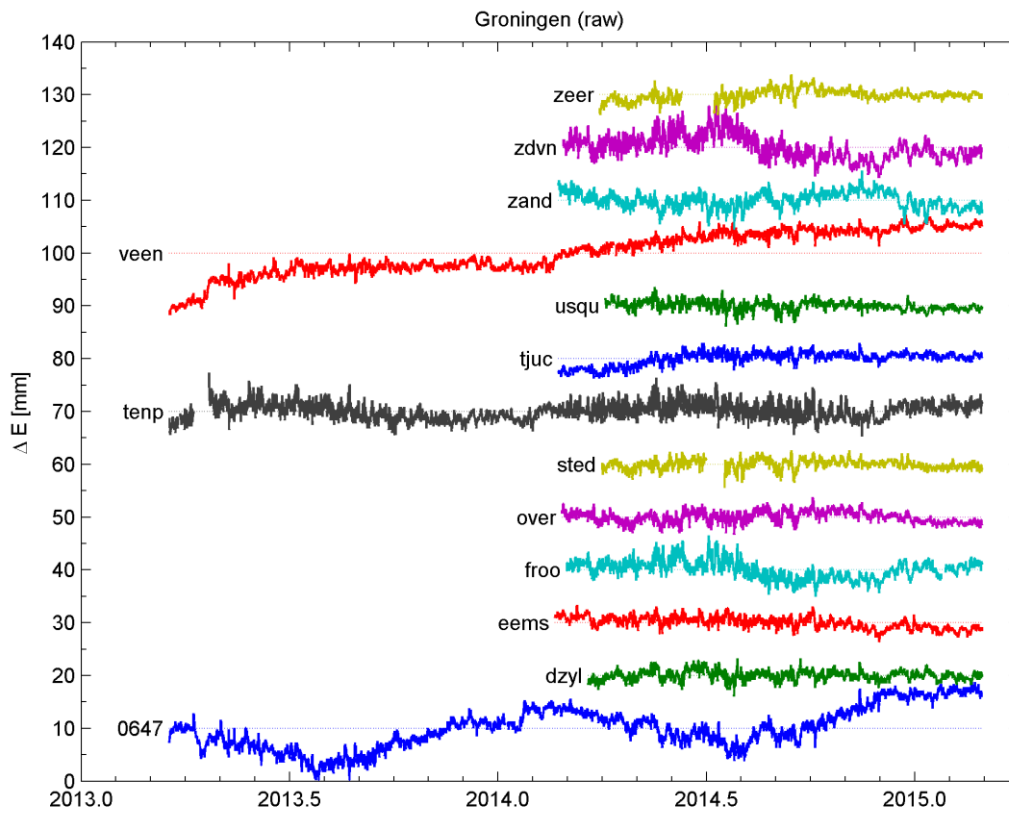
Om de interpretatie te vergemakkelijken zijn de resultaten ook voor alle stations tegelijk geplott, vergelijkbaar met de figuur op pagina 3 en 4. Hiervoor is gebruik gemaakt van de functie `sodmplotseries.m` en het script `sodmplotsum.m`.

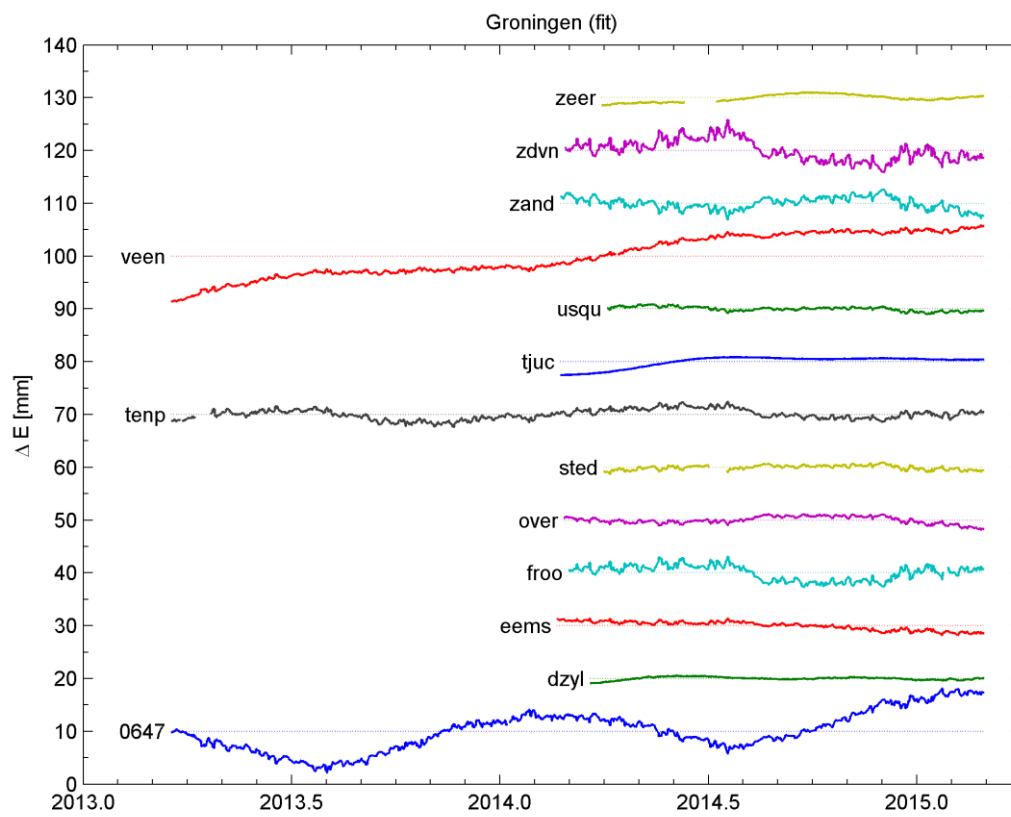
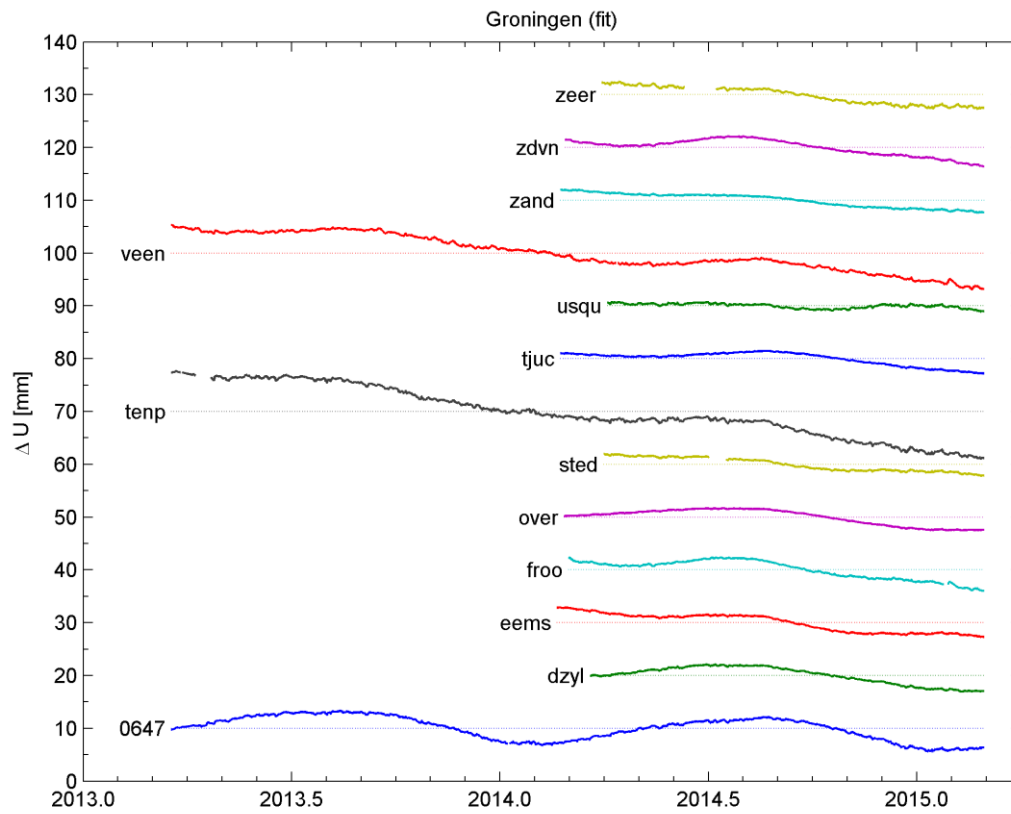
De resultaten voor de verschillende componenten worden hieronder gegeven:

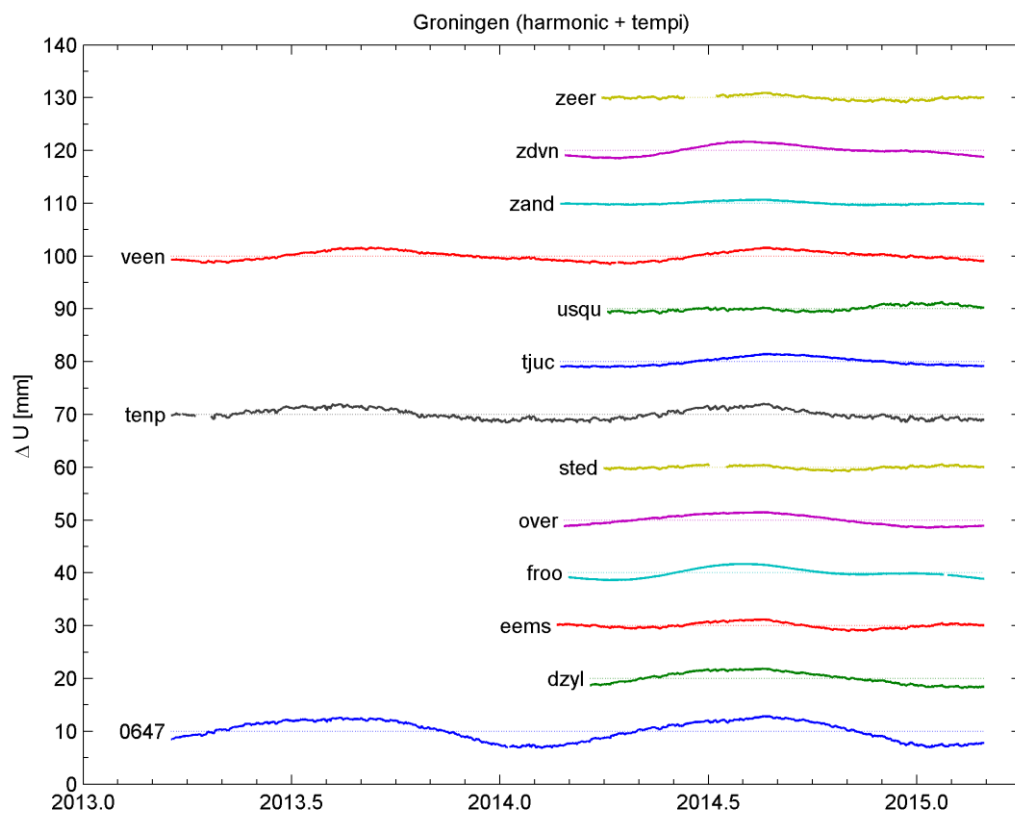
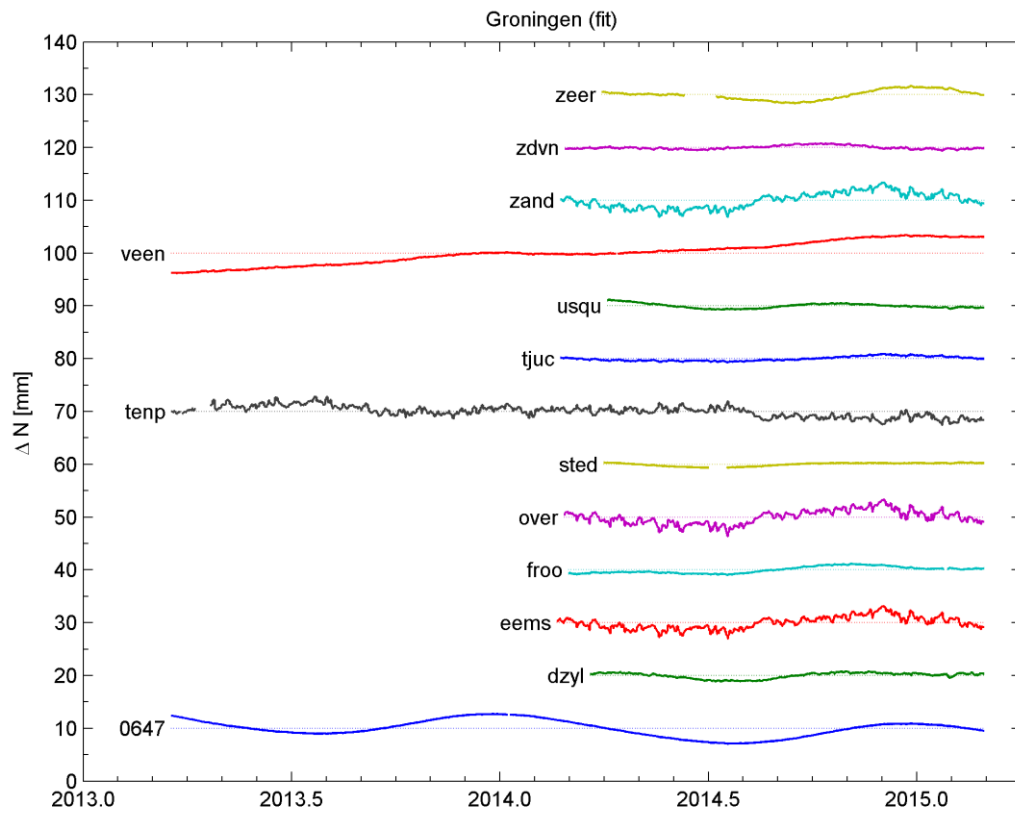
- de originele GNSS data met ongeldige data verwijderd (raw)
- de model fit (fit)
- de som van de harmonische termen en de temperatuur invloed (harmonic + tempi)
- de residuen na de fit

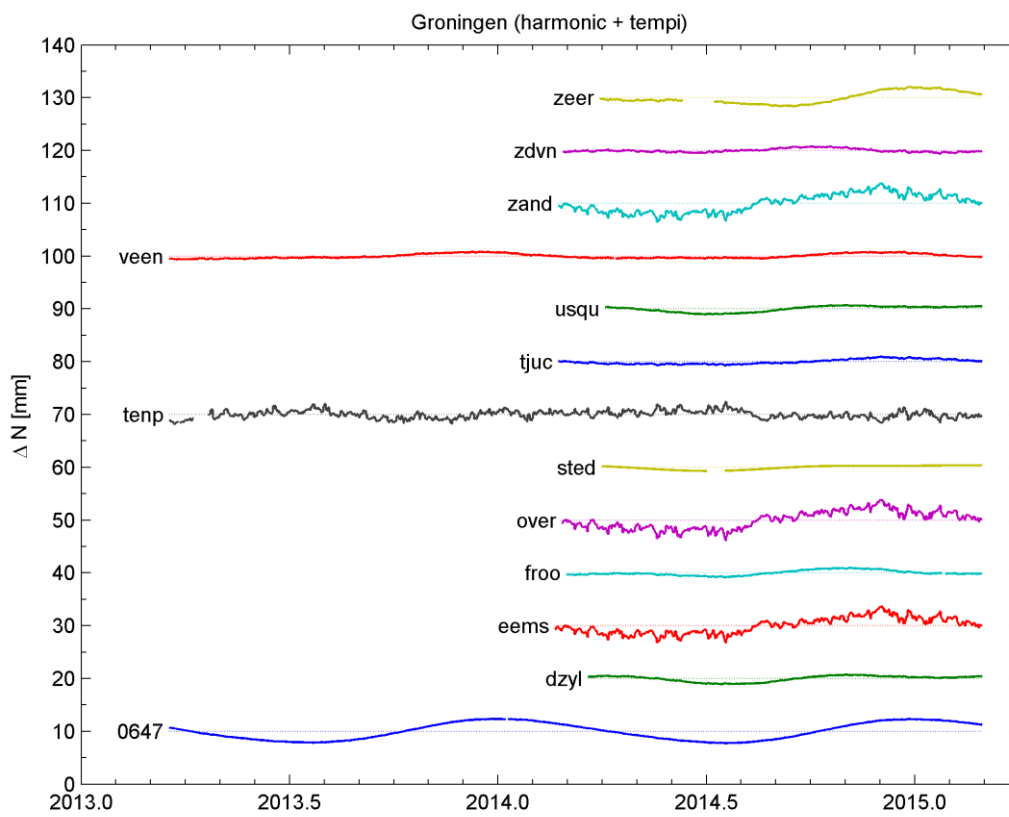
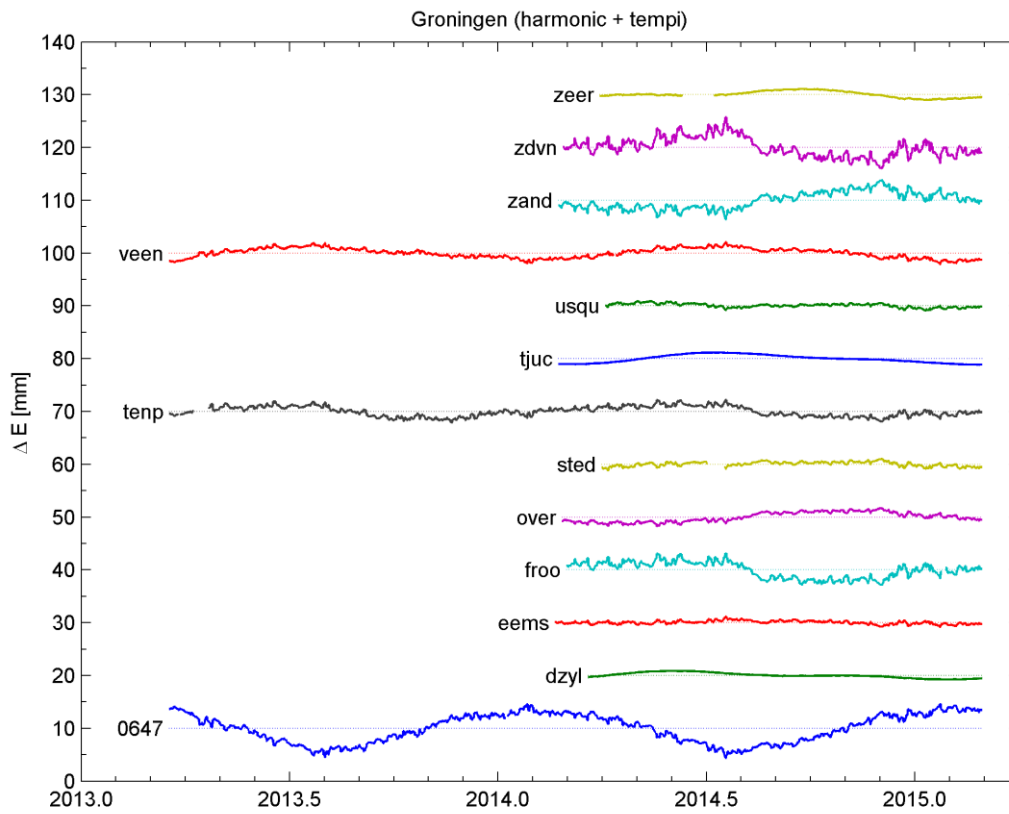
Deze plots en een aantal anderen zitten ook in de zip file met plots onder de naam `all_*.png`.

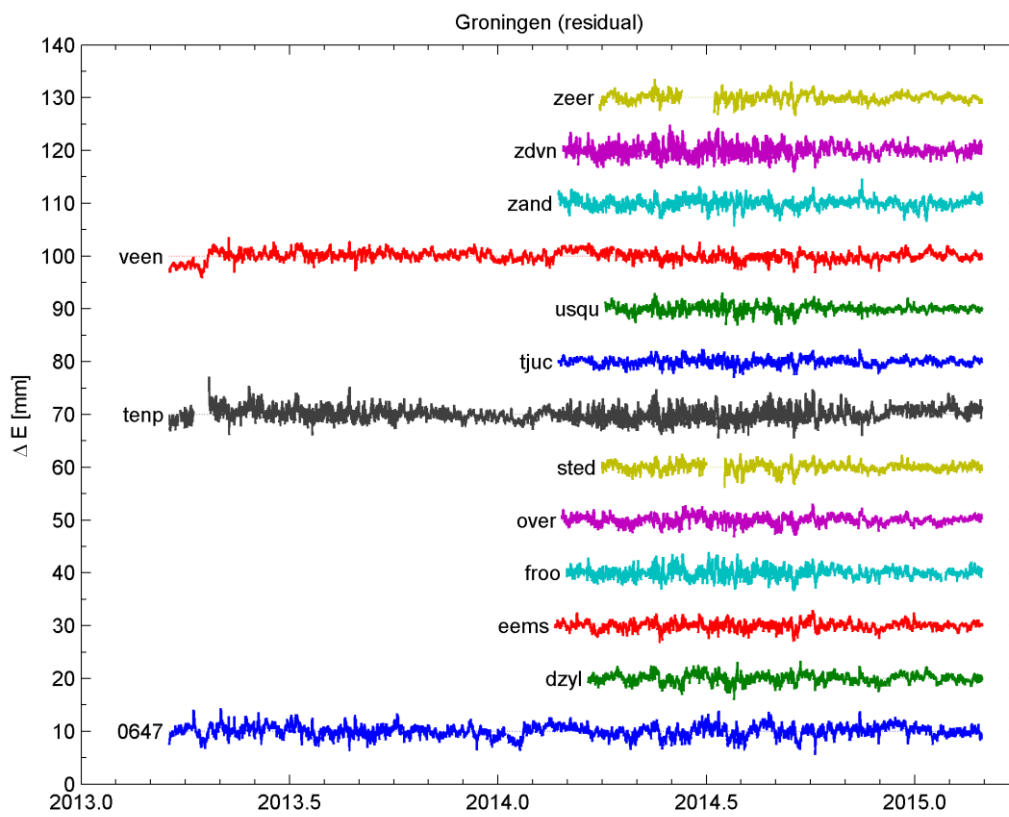
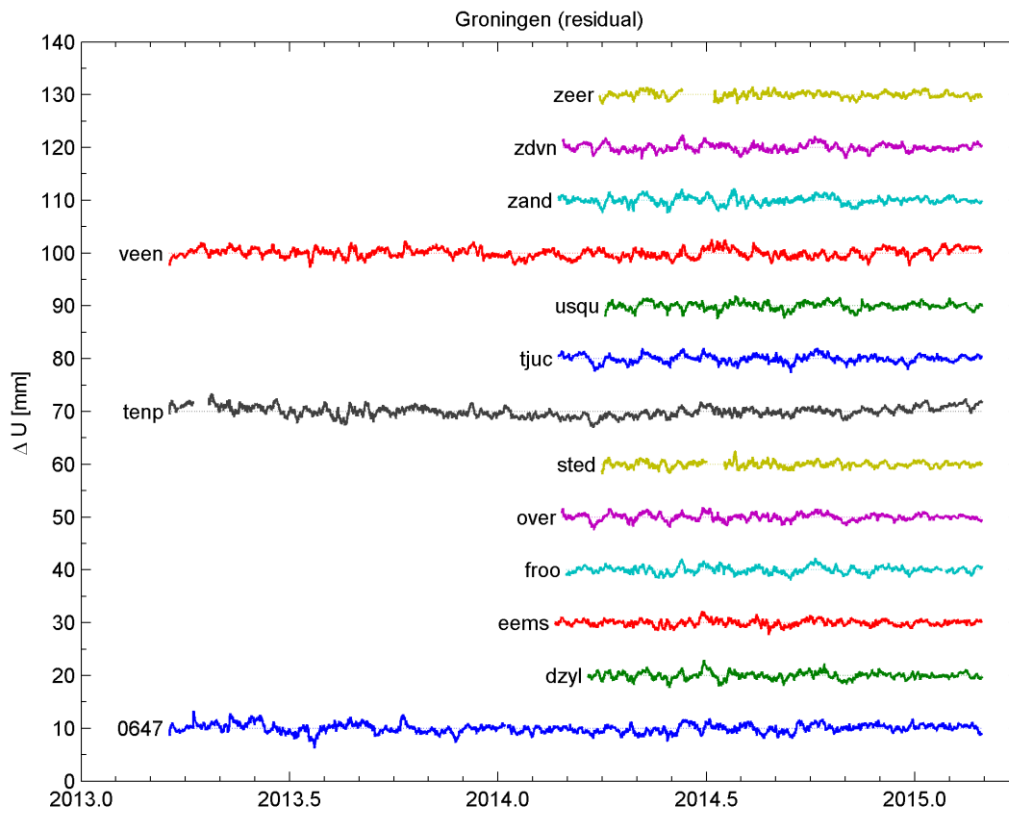


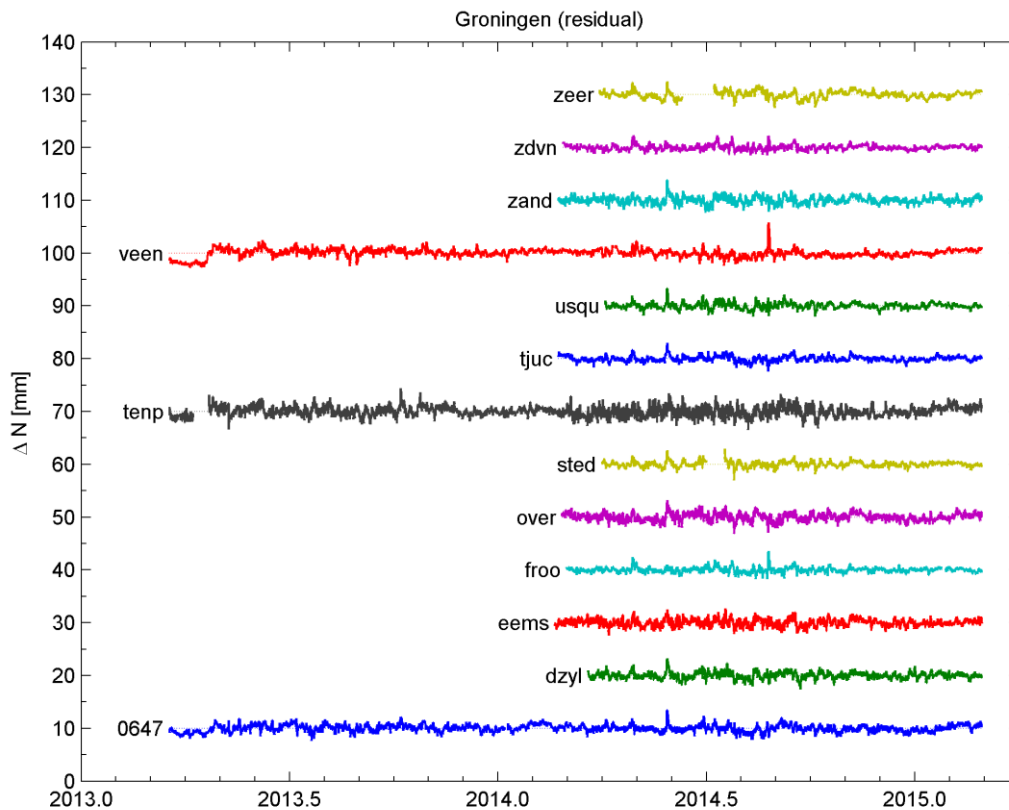












De plots laten belangrijke verschillen zien tussen de individuele stations, maar ook een aantal overeenkomsten.

Voor de validatie van de model fit is een nadere inspectie van de residuen belangrijk. Een aantal zaken valt daarbij op

- de belangrijkste periodieke effecten zijn verdwenen, maar de residuen zijn duidelijk gecorreleerd in de tijd en bevatten mogelijk nog hogere harmonischen of andere effecten
- alle residual series lijken op het eerste gezicht gemiddeld om de nul waarde te schommelen (zero mean), met uitzondering van de hoogte van **tenp** dat alle schijn heeft dat het lineaire model niet goed fit, en met uitzondering van een korte periode aan het begin in 2013 waarbij het lijkt of een sprong zit,
- de residuen in de East component het grootst zijn,
- dat er correlatie is tussen stations onderling.

Later zullen we een meer gedetailleerde analyse van de residuen uitvoeren.

De geschatte parameters worden in de onderstaande tabel gegeven:

		Vel mm/y	AtmLd mm/kPa	TempI mm/daK	365d mm	175d mm	StdF mm	StdR mm	OMT
0647	Lat	-1.76	-0.00	-0.09	2.16	0.19	1.00	0.65	0.42
0647	Lon	3.95	0.03	-1.82	2.44	0.39	1.00	1.08	1.16
0647	Rad	-1.40	0.04	-0.58	3.03	0.37	1.00	0.82	0.66
dzyl	Lat	-0.10	0.15	0.18	0.76	0.47	1.00	0.63	0.39
dzyl	Lon	1.33	-0.07	-0.08	0.63	0.34	1.00	0.85	0.73
dzyl	Rad	-2.71	-0.03	-0.39	1.96	0.12	1.00	0.66	0.44



eems	Lat	-1.72	-0.02	-2.15	1.62	0.12	1.00	0.67	0.45
eems	Lon	-2.22	-0.04	0.85	0.34	0.09	1.00	0.75	0.56
eems	Rad	-5.33	-0.00	-0.37	0.74	0.64	1.00	0.55	0.30
froo	Lat	0.76	-0.04	-0.23	0.51	0.40	1.00	0.47	0.22
froo	Lon	0.88	-0.04	2.37	2.35	0.74	1.00	0.97	0.94
froo	Rad	-5.76	-0.14	-0.06	1.16	0.69	1.00	0.64	0.41
over	Lat	-2.07	0.06	-2.35	1.80	0.28	1.00	0.72	0.52
over	Lon	-2.35	-0.00	-0.99	1.33	0.07	1.00	0.80	0.65
over	Rad	-2.66	0.01	-0.18	1.52	0.10	1.00	0.63	0.39
sted	Lat	-0.32	0.03	0.00	0.50	0.19	1.00	0.52	0.27
sted	Lon	0.10	0.01	-1.01	1.06	0.21	1.00	0.77	0.59
sted	Rad	-4.76	-0.01	-0.43	0.42	0.36	1.00	0.53	0.28
tenp	Lat	-1.32	0.12	1.98	1.25	0.37	1.00	0.91	0.83
tenp	Lon	0.58	0.18	1.41	1.15	0.31	1.00	1.24	1.55
tenp	Rad	-7.88	0.02	-0.94	1.94	0.34	1.00	0.92	0.85
tjuc	Lat	-0.19	0.02	-0.32	0.44	0.14	1.00	0.50	0.25
tjuc	Lon	3.05	0.01	-0.06	1.01	0.32	1.00	0.67	0.46
tjuc	Rad	-3.82	0.02	-0.26	1.24	0.25	1.00	0.71	0.50
usqu	Lat	-1.76	0.06	0.17	0.78	0.36	1.00	0.55	0.31
usqu	Lon	-0.24	-0.02	-0.72	0.72	0.40	1.00	0.74	0.55
usqu	Rad	-2.65	-0.01	-0.56	0.15	0.48	1.00	0.67	0.45
veen	Lat	3.33	0.01	0.22	0.65	0.22	1.00	0.75	0.56
veen	Lon	7.14	0.09	0.97	0.48	0.27	1.00	0.93	0.86
veen	Rad	-5.96	-0.20	-0.36	1.35	0.36	1.00	0.84	0.70
zand	Lat	-1.26	-0.06	-2.01	1.92	0.05	1.00	0.67	0.44
zand	Lon	-4.41	-0.08	-2.42	1.91	0.32	1.00	0.96	0.92
zand	Rad	-4.18	0.07	-0.13	0.44	0.26	1.00	0.70	0.49
zdvN	Lat	0.04	-0.05	0.36	0.36	0.30	1.00	0.47	0.22
zdvN	Lon	-0.83	0.09	3.52	1.89	1.20	1.00	1.19	1.41
zdvN	Rad	-4.68	-0.08	0.16	1.14	0.57	1.00	0.69	0.47
zeer	Lat	-1.53	-0.05	-0.32	1.13	0.71	1.00	0.66	0.44
zeer	Lon	2.20	0.03	-0.22	0.83	0.47	1.00	0.77	0.59
zeer	Rad	-5.28	0.11	-0.52	0.82	0.31	1.00	0.56	0.31

Voor de harmonische termen is alleen de amplitude afgedrukt. De precisie van de geschatte parameters beter dan 0.1 mm.

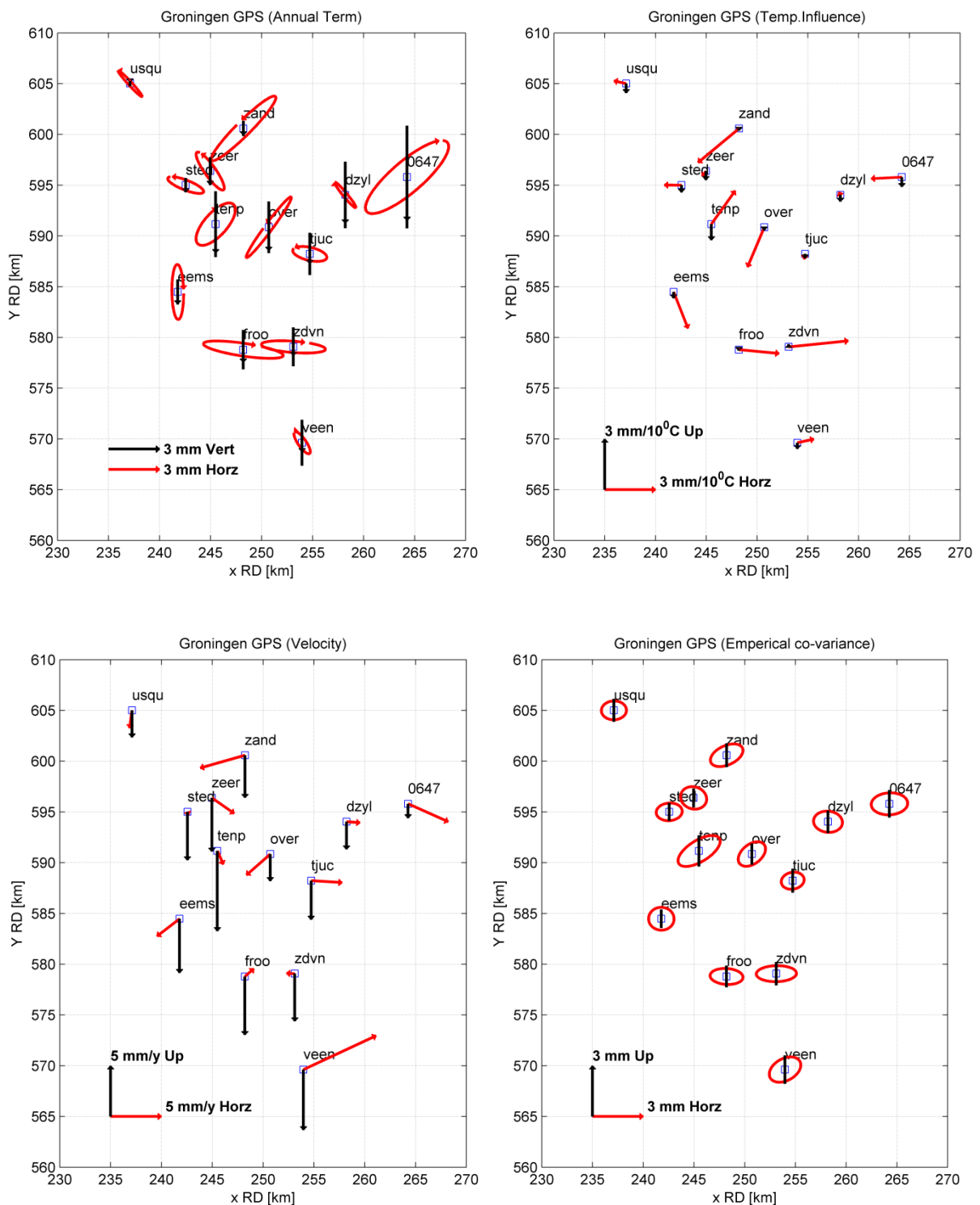
StdF is het gemiddelde van de standard afwijking die gegeven is voor de waarnemingen (in ons geval de gekozen waarde van 1 mm). StdR is de empirische standaard afwijking van de residuen en OMT zijn de resultaten van de Overall Model Toets

$$OMT = \frac{1}{m-n} \sum e_i^2 / \sigma_i^2$$

Aangezien de standaard afwijking  $\sigma_i$  voor alle waarnemingen gelijk is ( 1 mm) is de  $\sqrt{OMT}$  vrijwel gelijk aan de empirische standaard afwijking van de residuen (het enige verschil is de noemer in de deling).

Er zijn grote verschillen zichtbaar tussen de stations voor de harmonische componenten en de geschatte temperatuur invloed. Echter er zijn ook overeenkomsten tussen sommige stations. Daarom zijn de belangrijkste parameters ook geplot in kaart vorm m.b.v. de functie `sodmplotmap.m`. De oorzaken en verbanden tussen de harmonischen en de temperatuur invloed zijn niet verder

onderzocht. Oorzaken zijn mogelijke verschillen in constructie van de stations (andere gebouwen), maar er kan ook gekeken worden naar residuele effecten van ocean loading. De atmospheric loading term is zoals verwacht verwaarloosbaar klein voor alle stations en is niet apart geplot.

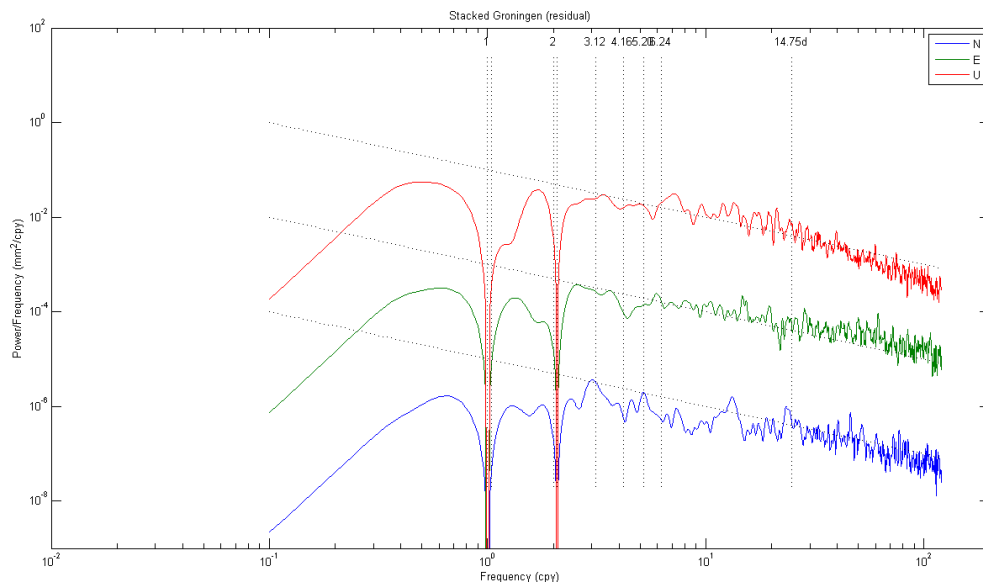
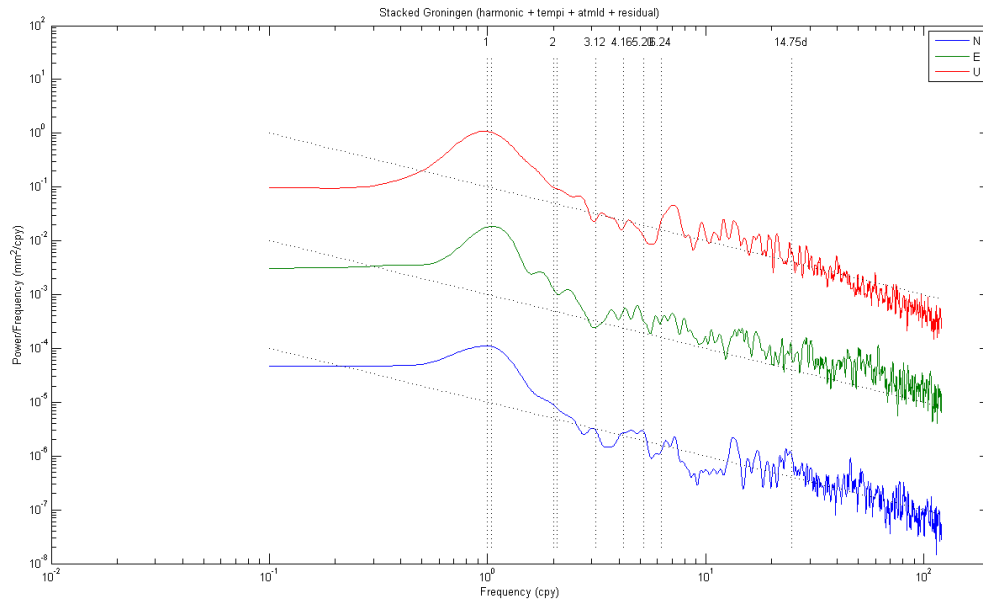


De plot rechtsonder toont de empirische co-variantie zoals berekend uit de residuen. Ook hier valt op dat de empirische covariantie van **tenp** groter is dan de overige stations wat op een slechte model fit duidt.

## GNSS Spectra

Met behulp van de Matlab functie `sodmspectra.m` wordt de Lomb-Scargle periodogram berekend voor verschillende grootheden. Dit kan voor individuele stations, maar het is tevens mogelijk de periodogrammen van alle stations te stapelen (stacken) voor een betere resolutie.

In de onderstaande figuren wordt het stacked periodogram gegeven van het detrended signaal (alleen lineaire trend) en het stacked periodogram van de residuen (dus na verwijdering van een lineaire trend, temperatuur invloed, annual en semi-annual termen).



De North, East en Up componenten zijn voor de leesbaarheid ten opzichte van elkaar verschoven: de gestippelde schuine lijnen geven het referentie niveau van  $0.1 f^{-1} [mm^2/cpy]$  (flicker noise). De verticale gestippelde lijnen vertegenwoordigen harmonische perioden typisch voor GPS: de annual periode van 1 cpy en semi-annual van 0.5 cpy, de GPS draconitic periode van 1.04 cpy en de hogere harmonischen daarvan, 2.08, 3.12, 4.16, 5.20 en 6.24 cpy, en een periode van 14.75 dagen.

Behalve de verwijderde 1 cpy en 2.08 cpy perioden zijn er geen overtuigende andere perioden die op dit moment geschat moeten worden. In de Up series zit nog wel een duidelijke piek bij 7.28 cpy (de 7<sup>e</sup> harmonische van de draconitic period) en in de North component bij 13.22 cpy (27.63 days) en 3.13 cpy in het stacked periodogram, maar deze zijn minder goed waarneembaar in de individuele periodogrammen. Het is mogelijk dat deze bij residual stacking (zie volgende sectie) verdwijnen.

De signalen vertonen een typische power law gedrag overeenkomstig *flicker* noise. De up component vertoont zelfs lichte trekjes van een random walk ( $f^{-2}$ ), maar is toch nog steeds overwegend flicker noise.

## Variantie component schatting

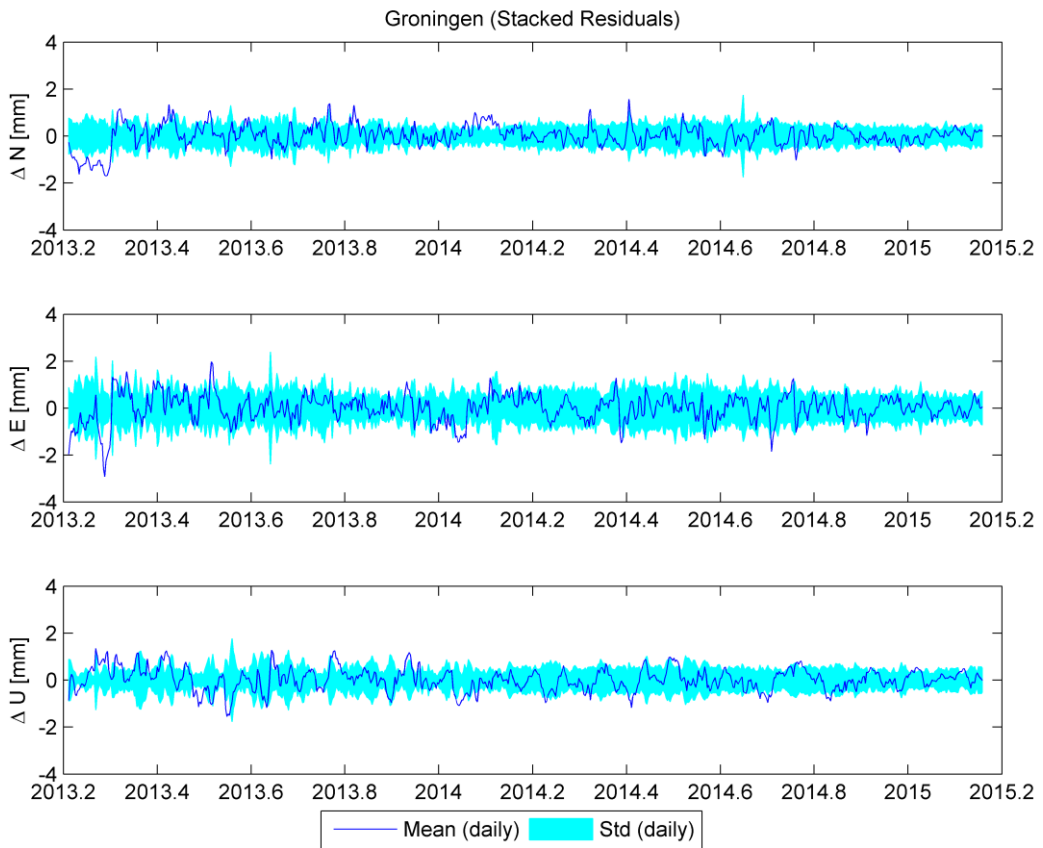
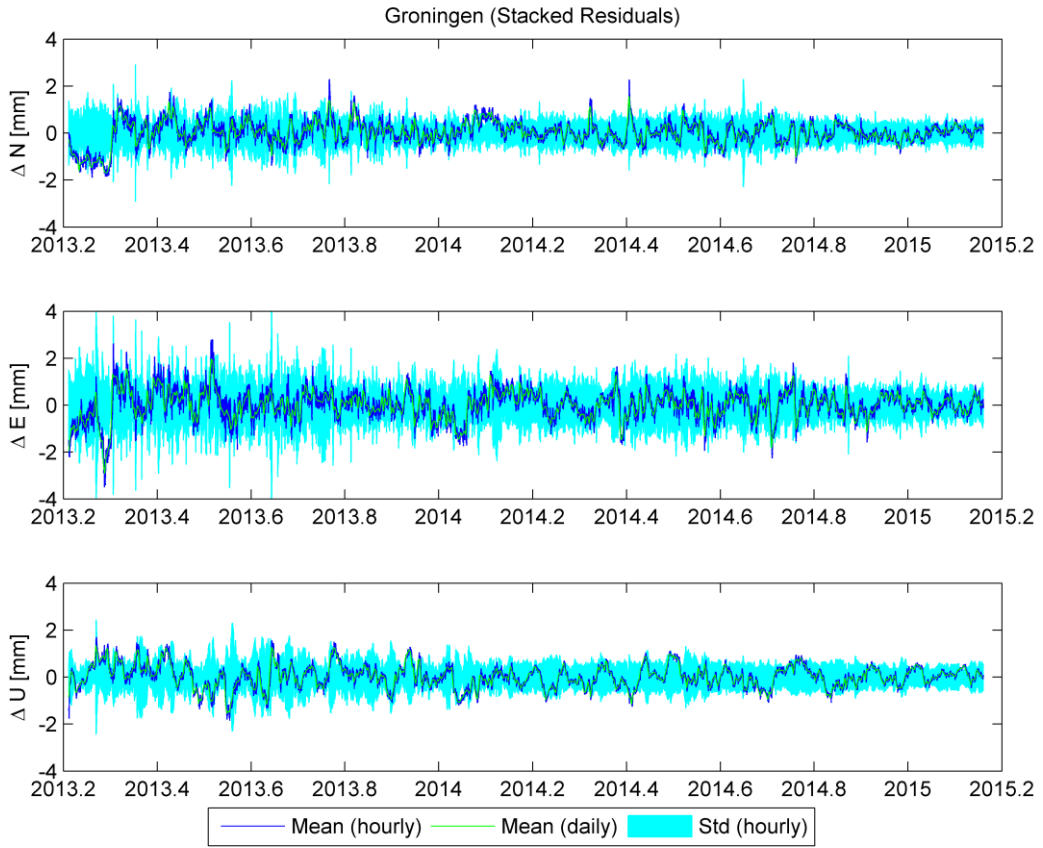
De periodogrammen stellen ons in staat het kansmodel voor de GPS waarnemingen te bepalen. In de plaats van ongecorrleerde white noise met een standaardafwijking van 1 mm, hetgeen resulteert in een diagonale covariantie matrix  $Q_y$  voor de waarnemingen, is het realistischer met een volle covariantie matrix gegenereerd op basis van de aanname van flicker noise te werken. Zonder deze zijn alle schattingen van de varianties te optimistisch. De schalings factoren zijn uit de OMT test te bepalen. Nog een andere oplossing is variantie component schatting toe te passen; m.b.v. variantie component schatting is het mogelijk het aandeel white noise, flicker noise en brownian (random walk) noise te bepalen, of de macht in de power law.

Een verbeterd kansmodel draagt vervolgens weer bij in verbeterde schattingen van de snelheden, temperatuurs effect, harmonische termen, etc., en realistische schattingen van de standaard afwijking van deze parameters. Deze stap is, vanwege de beperkte tijd, in dit rapport nog niet uitgevoerd, maar wordt wel aanbevolen om dit te gaan doen om zodoende realistische schattingen te krijgen van de standaard afwijking van verschillende parameters, waaronder de snelheden.

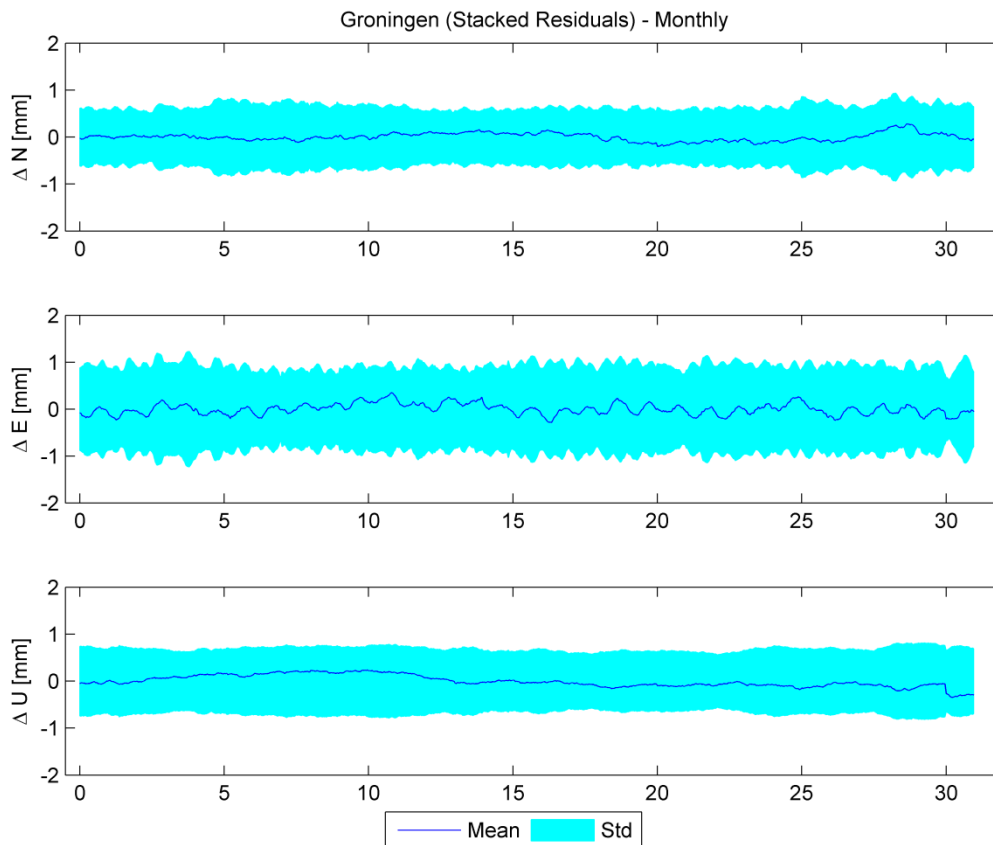
## Common mode – Residual stack

Om mogelijke common mode signalen te onderzoeken zijn de residuals gestapeld (stacked). De Matlab functie `sodmresidualstack.m` berekent het gemiddelde en de standaard afwijking van de residuen over alle stations. Het gemiddelde en de standaardafwijking kan naar keuze berekende worden over het interval van een uur of een dag.

De onderstaande plot laat het uurlijkse gemiddelde, het dagelijkse gemiddelde en uurlijkse standaard afwijking zien. In een tweede plot zijn het dagelijkse gemiddelde en standaard afwijking geplott. Het dagelijkse gemiddelde is dezelfde orde grootte, en soms groter, als de dagelijkse standaardafwijking. De standaard afwijking van het gemiddelde zelf is lager, met een factor 1.7 voor de begin periode met 3 stations, en een factor 3.6 voor de periode na Feb 2014 met 13 stations. De voorzichtige conclusie is dat het gemiddelde niet zo maar ruis is, maar een common mode signaal vertegenwoordigd. Het heeft daarom zin om in een volgende iteratie van de fitting procedure te corrigeren voor het common mode signaal uit residual stacking.



De residuals zijn als test ook per dag van de maand gestacked. Dit heeft te maken met het gegeven dat 06-GPS de processing maandelijks opstart, te beginnen met een inslinger periode van twee weken, en gevolgd door een maand data die vervolgens aan de eerdere tijdserie wordt geplakt. De resultaten zijn hieronder weergegeven en laten zien dat deze procedure werkt en geen nadelige effecten in de tijdserie geeft.

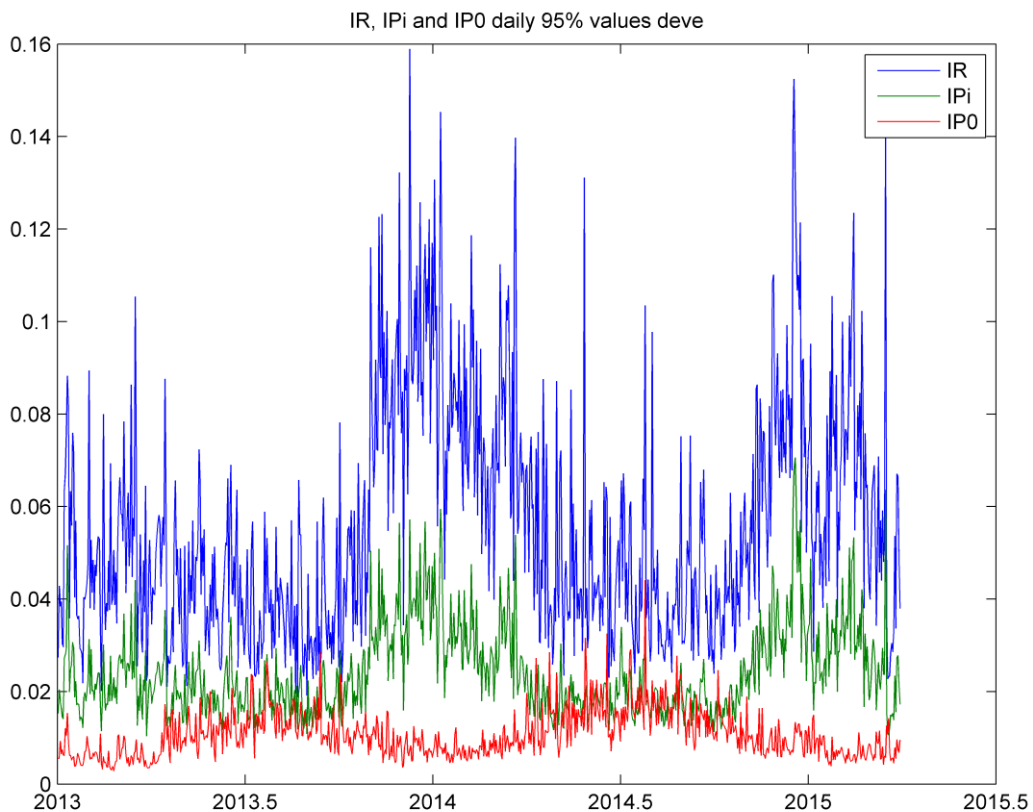


De stacked residuals zijn niet alleen te gebruiken als correcties voor een volgende iteratie, maar het heeft ook zin om te controleren of deze niet correleren met andere (performance) parameters uit de SSRPOST processing en de beschikbaarheid van data van de gebruikte referentiestations.

Om dit mogelijk te maken heeft 06-GPS een aantal performance parameters beschikbaar gesteld die in de volgende secties worden geanalyseerd.

### Irregularity parameters (IR, IPI en IPO) uit de SSRPOST processing

SSRPOST bewaard ionosfeer/troposfeer log-bestanden met de *irregularity* parameters IR, IPI en IPO. De irregularity parameters worden iedere minuut opnieuw berekend. De waarden zijn beschikbaar van zowel de hoofdserver (slic) als van de back-up server (deve) beschikbaar. Er kunnen er soms valse uitschieters in de data zitten. Daarom zijn voor ieder uur en iedere dag de 95% percentilen berekend. Deze dagelijkse waarden zijn geplott in de onderstaande figuur. De uurlijkse waarden zijn beschikbaar in de zip file met plots.



De volgende beschrijving van de parameters is gecopieerd uit de handleiding van SSRPOST:

*“The value IR is computed from the standard deviation of the stochastic 3D Gauss-Markov process for one satellite. The IR number shown here is the maximum standard deviation currently present in the system from all satellites. The IR irregularity is like the I95 also not suited as an indicator of the service quality from a rover user's point of view, but can give the RTK network provider useful information on the maximum ionospheric process standard deviation.*

*The two IP Irregularity values are a measure of the interpolation quality of the state information, i.e. how well the network can predict the distance dependent errors in between the reference stations. They are displayed (in meter) separately for the ionospheric (IP-I) and the geometric (IP-0) part of the error components. They are computed as the standard deviation of a second order FKP representation of the current state space using the standard deviation computed from all stations and satellites with a distance dependent weighting. The IP readings correspond to the remaining third or higher order effects. The numbers are derived from the non-describable residual errors with the assumption of a quadratic FKP model (which must not necessarily exactly correspond to the models used in the actual RTK network).*

*A RTK network user equipment has to expect and must account for these IP residual errors in the field. The ionospheric part IP-I can normally be eliminated by dual frequency receivers, if the rover could solve its ambiguities. The geometric part IP-0 is mainly influenced by tropospheric irregularities (since satellite orbits today normally don't show significant irregularities and have thus in practice no influence on IP-0). Unfortunately no standard data format is available today to tell the rover these IP residuals. It is however possible through the distance of the Pseudo Reference Station PRS (see parameter o in the RTCM\_OUT option -FKP,V,o) to give to the rover an indirect hint, what magnitude of residuals can be possible.*

*The reliable computation IP Irregularity values requires a large redundancy in the network, while the IR Irregularity values already allow an interpretation even for low redundancies. In case of low redundancy, a first order FKP representation (i.e. no quadratic FKP option -q) should be used for the computation of the irregularities. If there is no redundancy at all (e.g. too few stations) then no IP Irregularity values are computed and the fields IP-I and IP-0 remain empty.*

*For a detailed theoretical discussion of the I95 parameters and the Irregularity parameters refer to the Geo++® White Paper: Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Andreas Bagge: GNSMART Irregularity Readings for Distance Dependent Errors Download as PDF - size 203 kB.”*

Op het eerste gezicht lijkt een lichte correlatie te bestaan tussen de standard afwijking van de stacked residuals en de IPO (troposfeer) parameter. Dit soort aspecten zou echter nog verder onderzocht kunnen worden.

### Missing data for the reference stations

De ontbrekende data van de referentiestations is door O6-GPS samengevat in de excel file `missing_epochs_NAM.xlsx`. Deze informatie is echter nog niet geanalyseerd.

### GNSS data fitting resultaten – Tweede iteratie

De tweede tweede iteratie van de data fitting procedure verschilt van de eerste in de volgende aspecten:

- de data is gecorrigeerd voor de common mode signal uit de stacked residuals van de eerste iteratie,
- voor Ten Post (**tenp**) is een cubic spline model bestaande uit twee piecewise polynomial intervallen en continuïteit in de 1<sup>e</sup> afgeleide tussen de piecewise polynomials.

Het kansmodel is nog niet aangepast. Geadviseerd wordt om i.p.v. een white noise model een flicker noise model te gebruiken en variantie component schatting toe te passen. Dit zou een strenge toetsing van de resultaten mogelijk maken en resulteren in realistische schattingen voor de standaard afwijking van de parameters.

De tweede iteratie is geïmplementeerd in de functie `sodmtseriesplotexp.m` en script `sodmtseriesiter.m`. Voor ieder station worden drie plots geproduceerd: `ssss_series2.png` met de raw data series en fit, `ssss_components2.png` met de geschatte componenten en `ssss_residuals2.png` met de residuals.

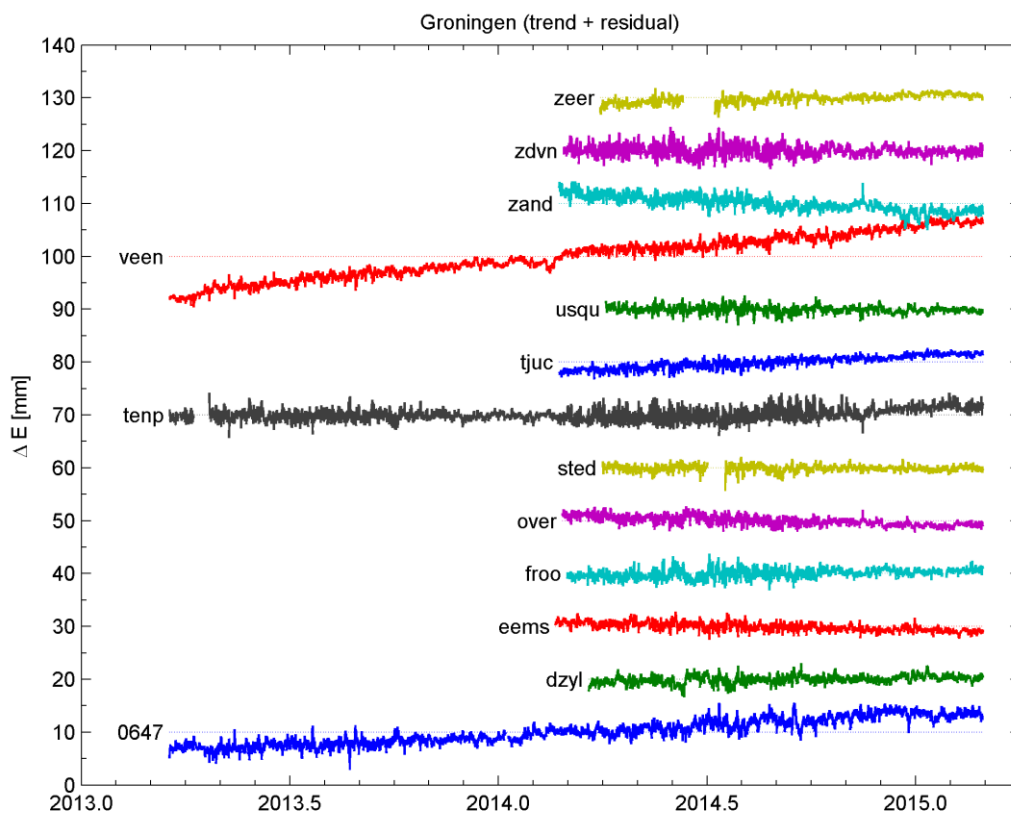
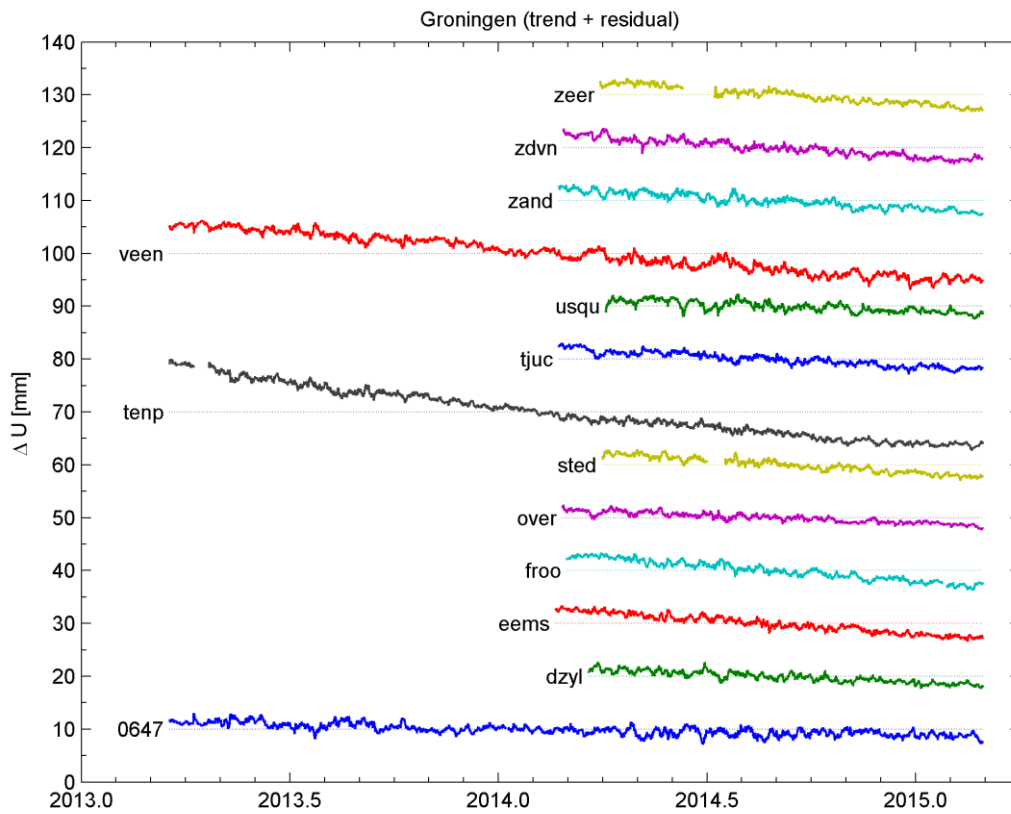
Daarnaast worden een aantal overzichtplots gemaakt van de gecorrigeerde tijdseries en residuen. De gecorrigeerde tijdseries zijn hieronder geploteerd. De annual term, semi-annual term, temperatuur invloed, atmospheric loading en common mode signalen zijn verwijderd. De gecorrigeerde tijdserie is berekend uit de geschatte trend  $\hat{s}(t)$  en residuen  $\hat{\epsilon}$

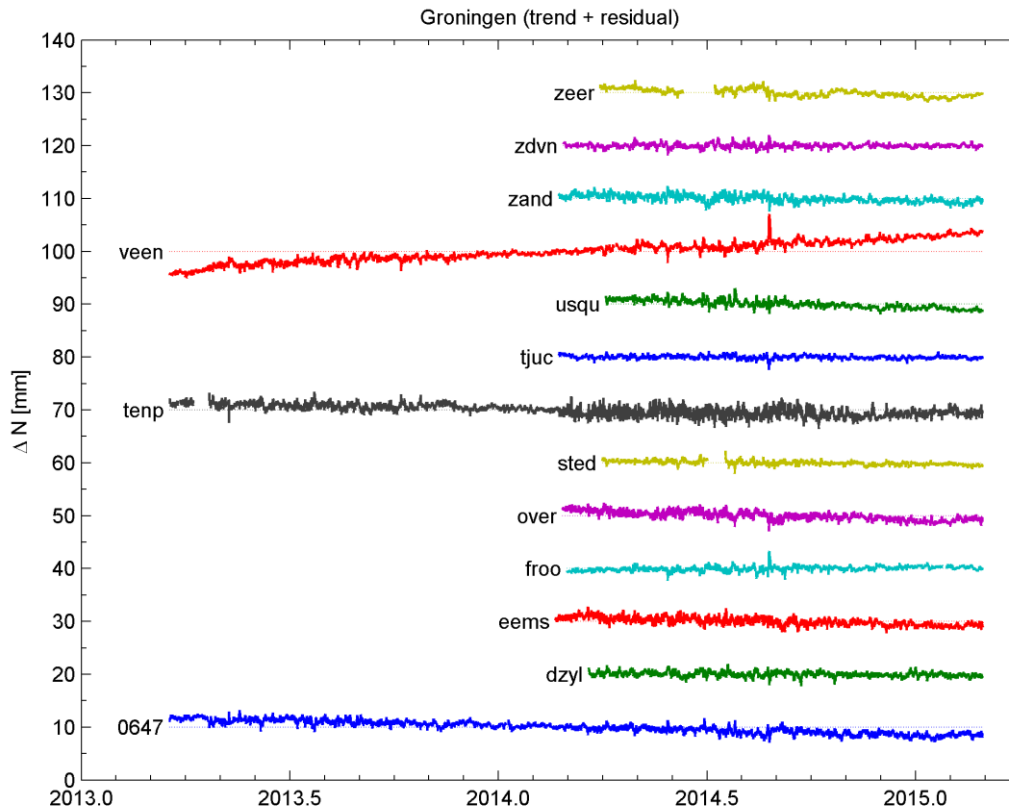
$$\hat{\Delta} = \hat{s}(t) + \hat{\epsilon},$$

waarbij de trend een linear model is voor alle stations met uitzondering van **tenp**.

De overige plots zijn beschikbaar in de zip file met plots.







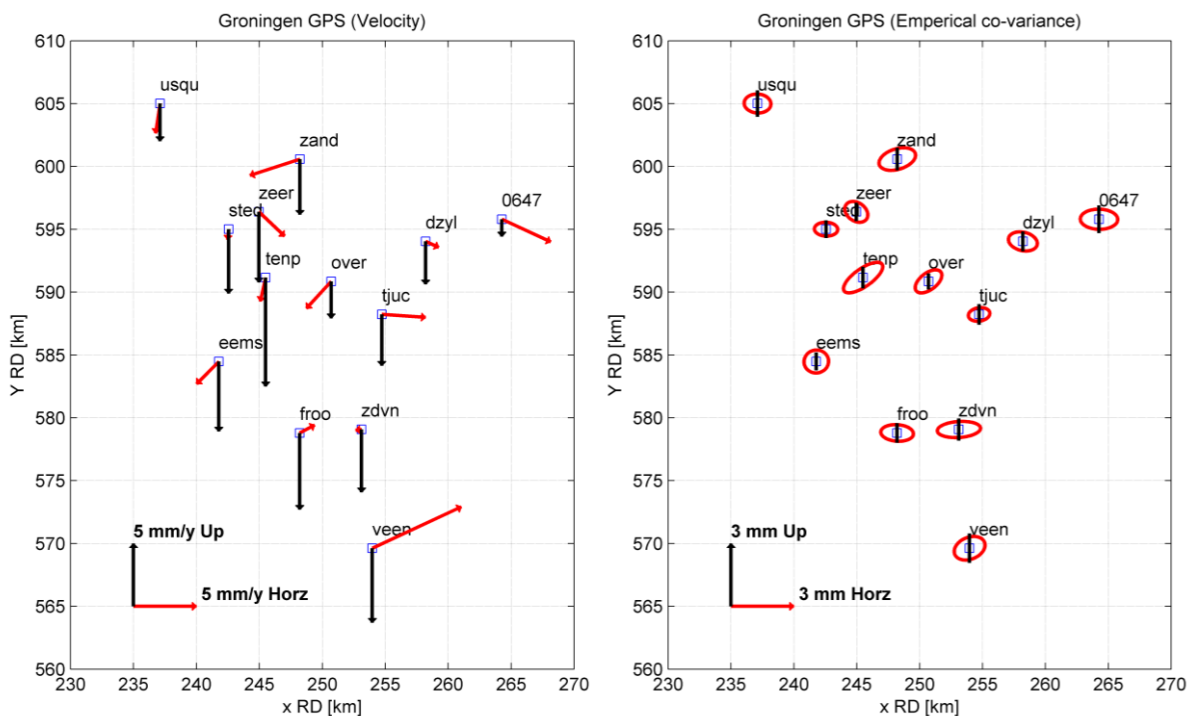
De geschatte parameters zijn in de onderstaande tabel gegeven:

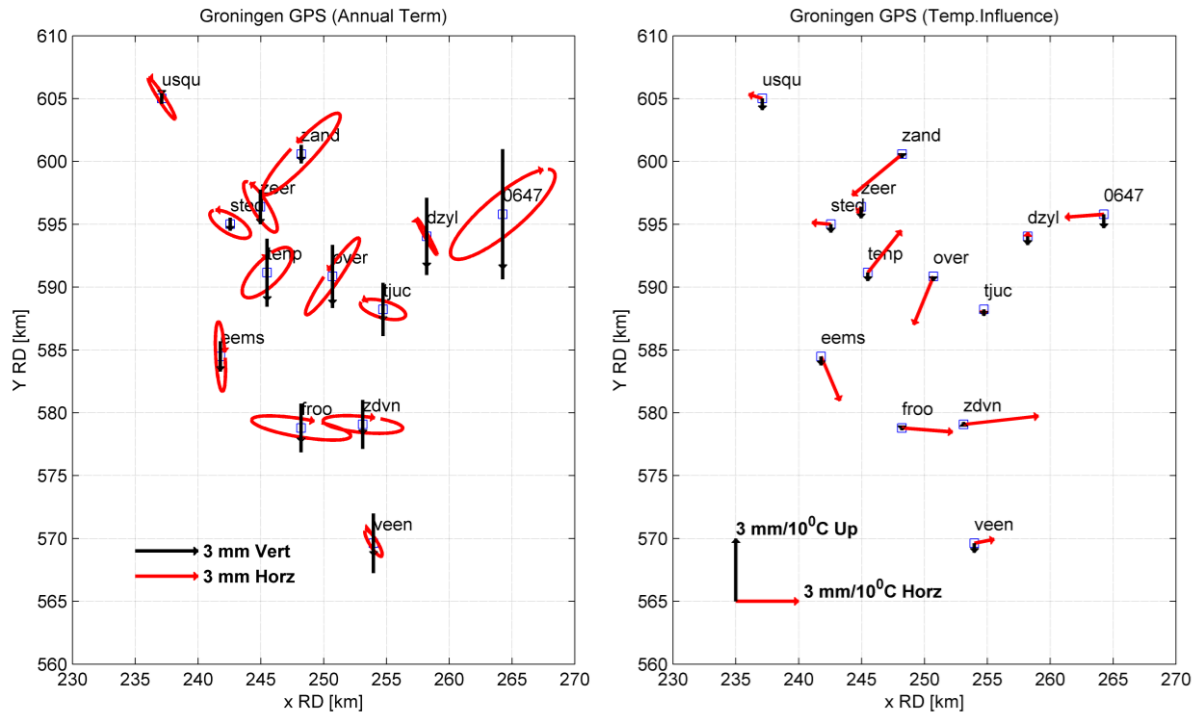
		Vel mm/y	AtmLd mm/kPa	TempI mm/daK	365d mm	175d mm	StdF mm	StdR mm	OMT
0647	Lat	-1.80	0.02	-0.14	2.15	0.13	1.00	0.48	0.23
0647	Lon	3.88	0.02	-1.85	2.50	0.34	1.00	0.89	0.79
0647	Rad	-1.36	0.04	-0.66	3.10	0.23	1.00	0.66	0.43
dzyl	Lat	-0.47	0.13	0.21	0.87	0.41	1.00	0.46	0.21
dzyl	Lon	1.04	-0.04	0.01	0.49	0.30	1.00	0.69	0.47
dzyl	Rad	-3.40	-0.03	-0.41	1.84	0.09	1.00	0.47	0.22
eems	Lat	-1.77	-0.03	-2.12	1.66	0.16	1.00	0.55	0.30
eems	Lon	-1.76	-0.03	0.90	0.24	0.04	1.00	0.58	0.34
eems	Rad	-5.56	-0.00	-0.42	0.72	0.61	1.00	0.42	0.18
froo	Lat	0.62	-0.05	-0.19	0.58	0.38	1.00	0.39	0.16
froo	Lon	1.18	-0.04	2.42	2.37	0.69	1.00	0.78	0.60
froo	Rad	-6.10	-0.14	-0.10	1.16	0.66	1.00	0.47	0.22
over	Lat	-2.14	0.05	-2.31	1.84	0.27	1.00	0.55	0.30
over	Lon	-1.96	0.01	-0.94	1.29	0.15	1.00	0.63	0.40
over	Rad	-2.93	0.01	-0.22	1.50	0.14	1.00	0.38	0.15
sted	Lat	-0.84	0.02	0.08	0.68	0.12	1.00	0.33	0.11
sted	Lon	-0.08	0.03	-0.90	0.97	0.18	1.00	0.55	0.31
sted	Rad	-5.12	-0.01	-0.40	0.31	0.35	1.00	0.42	0.18
tenp	Lat	-1.89	0.11	2.01	1.20	0.32	1.00	0.73	0.53
tenp	Lon	-0.44	0.12	1.59	1.20	0.33	1.00	0.94	0.87
tenp	Rad	-8.65	-0.02	-0.40	1.62	0.41	1.00	0.51	0.26
tjuc	Lat	-0.23	0.01	-0.28	0.49	0.17	1.00	0.32	0.10
tjuc	Lon	3.48	0.02	-0.02	1.09	0.29	1.00	0.51	0.26
tjuc	Rad	-4.07	0.01	-0.31	1.27	0.26	1.00	0.49	0.24

usqu	Lat	-2.36	0.04	0.20	0.99	0.28	1.00	0.45	0.20
usqu	Lon	-0.36	0.01	-0.65	0.65	0.39	1.00	0.64	0.40
usqu	Rad	-2.99	-0.00	-0.55	0.25	0.45	1.00	0.63	0.39
veen	Lat	3.29	0.03	0.18	0.63	0.15	1.00	0.56	0.32
veen	Lon	7.07	0.08	0.94	0.42	0.22	1.00	0.73	0.54
veen	Rad	-5.92	-0.20	-0.45	1.42	0.46	1.00	0.70	0.49
zand	Lat	-1.30	-0.07	-1.98	1.95	0.08	1.00	0.54	0.29
zand	Lon	-3.97	-0.08	-2.38	1.86	0.41	1.00	0.87	0.76
zand	Rad	-4.43	0.07	-0.18	0.44	0.24	1.00	0.54	0.29
zdv	Lat	-0.05	-0.05	0.40	0.42	0.27	1.00	0.38	0.15
zdv	Lon	-0.47	0.10	3.57	1.90	1.13	1.00	1.03	1.06
zdv	Rad	-4.99	-0.08	0.11	1.17	0.53	1.00	0.52	0.28
zeer	Lat	-1.93	-0.06	-0.31	1.21	0.77	1.00	0.49	0.24
zeer	Lon	2.04	0.06	-0.19	0.81	0.44	1.00	0.55	0.30
zeer	Rad	-5.60	0.11	-0.54	0.82	0.29	1.00	0.43	0.19

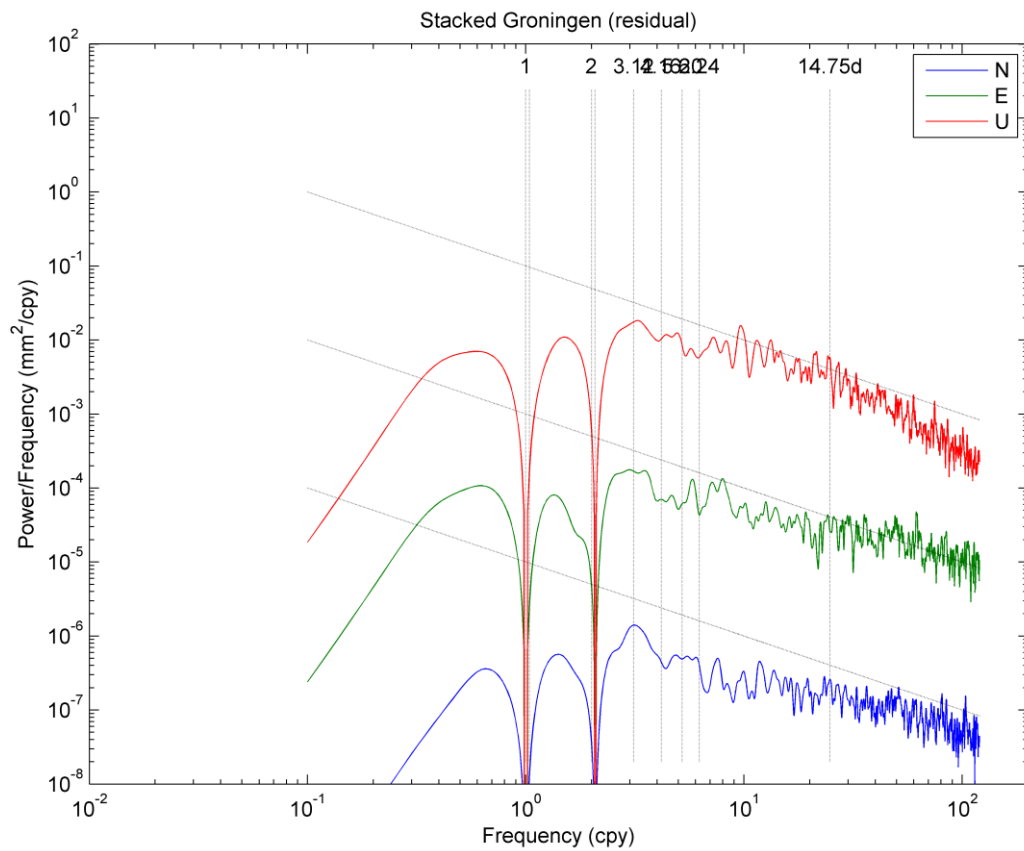
De kwaliteit van de fit is aanzienlijk verbeterd: de empirische standaardafwijking StdE en overall model test OMT zijn aanzienlijk lager dan in de eerste iteratie. De snelheid voor **tenp** in de tabel en plots is de snelheid in het midden van het data interval (snelheid voor **tenp** is niet constant) .

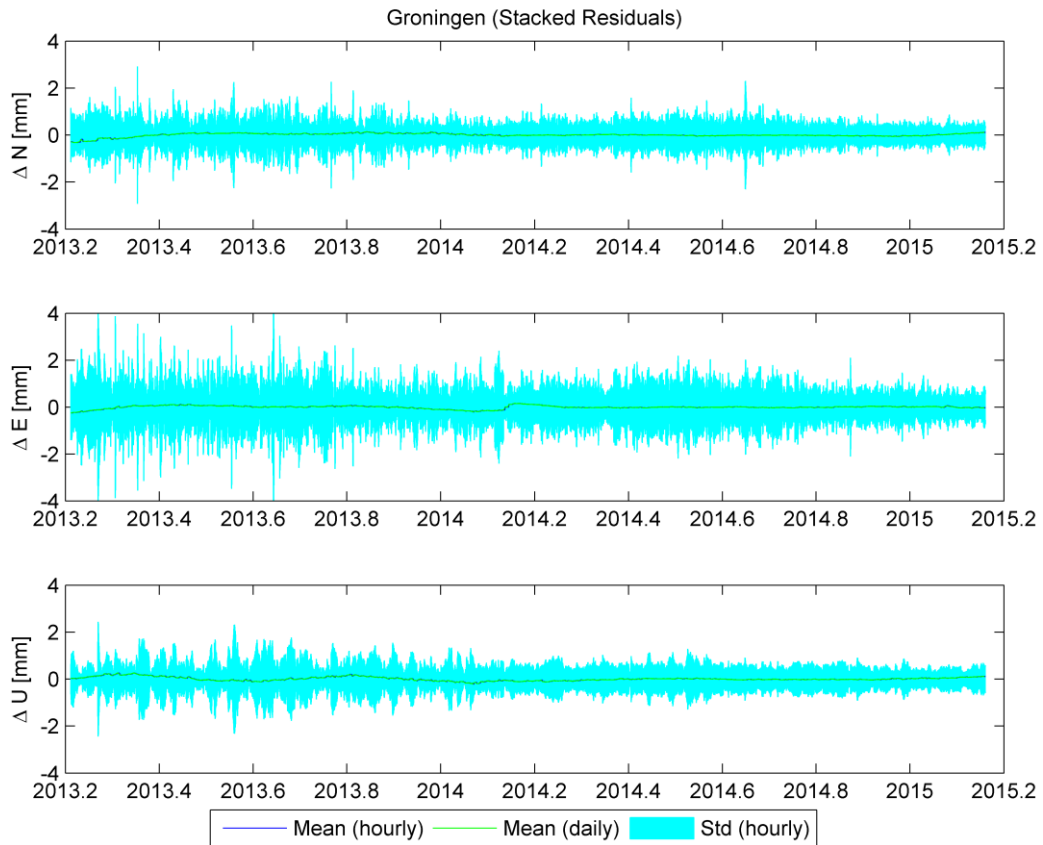
De belangrijkste parameters en de covariantie zijn evenals in de eerste iteratie ook als map weergegeven:





De stacked Lomb-Scargle periodogram van de residuen en de residual stack voor de tweede iteratie zijn hieronder weergegeven.



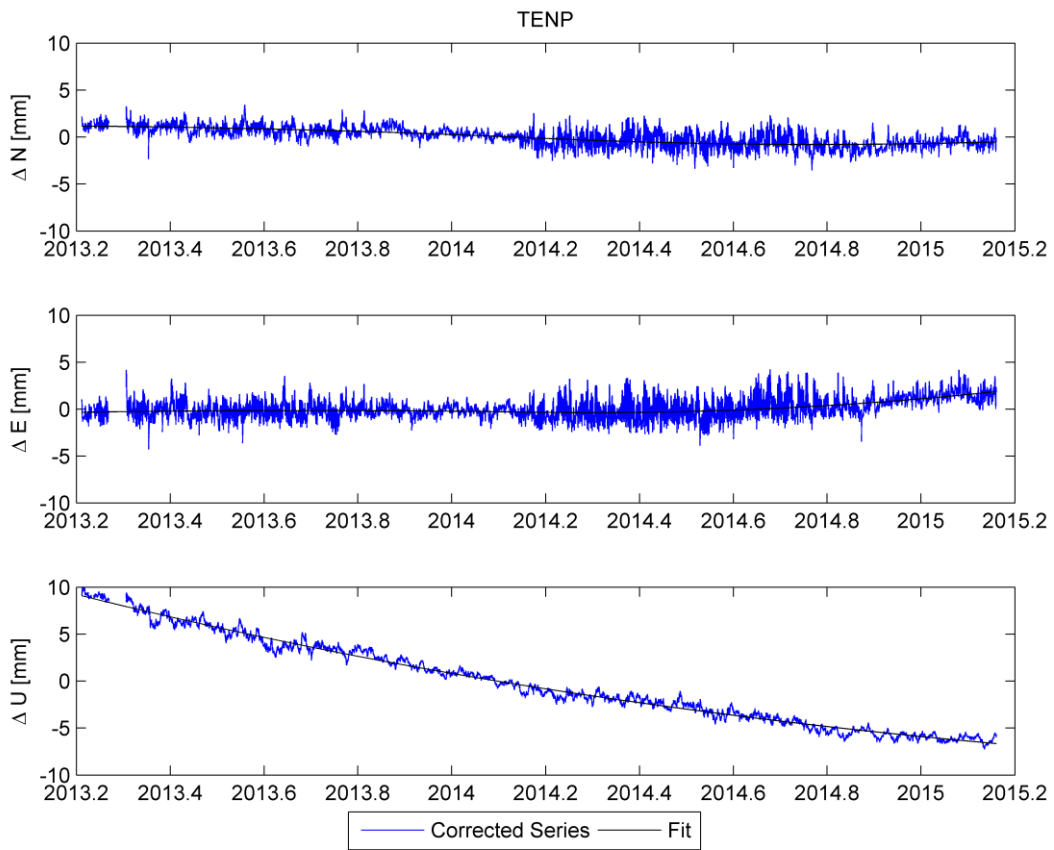


## Ten Post (TENP)

De onderstaande plot laat de uiteindelijke resultaten voor Ten Post (**tenp**) zien. De getoonde tijdseries is de gecorrigeerde tijdserie uit de tweede iteratie, zonder periodieke of versturende effecten, en is berekend uit de cubic spline fit  $\hat{s}(t)$  en residuen  $\hat{\epsilon}$

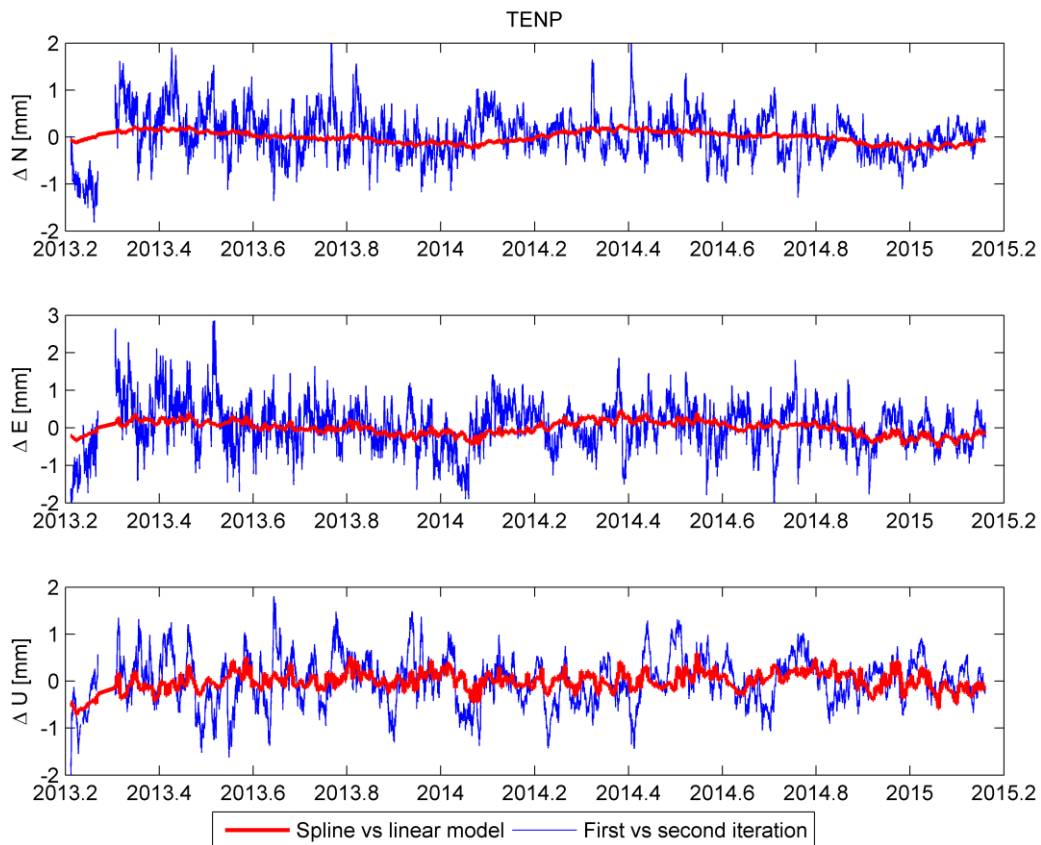
$$\hat{\Delta} = \hat{s}(t) + \hat{\epsilon}$$

De cubic spline bestaat twee piecewise polynomial intervallen en continuïteit in de 1e afgeleide tussen de piecewise polynomials. De spline fit en residuen zijn bepaald uit de met de residual stack gecorrigeerde data.



De daling in Ten Post laat een afnemende trend zien.

De verschillen tussen de eerste en tweede iteratie, en tussen een lineair en spline model zijn hieronder weergegeven.



Wat direct opvalt is dat het onderliggende trend model relatief weinig van invloed is aangezien deze wordt gecorrigeerd met de residuen.

## Conclusie

Het doel van dit onderzoek was de GNSS tijdreeksen van Groningen zoals berekend door O6-GPS nader te analyseren. Hiervoor is een analyse methode opgezet die de tijdreeksen ontleed in verschillende signalen: een lineaire of spline bewegingsmodel, annual en een semi-annual signaal, temperatuur invloed, common mode signaal, en een residueel signaal.

Door de annual, semi-annual, temperatuur invloed en common mode signalen te verwijderen uit de tijdreeksen ontstaat een duidelijker beeld van de eigenlijke bodembeweging: het doel van de metingen. De combinatie van een geschatte trend en geschatte residuen, na correctie voor een common mode signaal, geeft een hoge resolutie bodembewegingsignaal. De resultaten laten ook zien dat dit signaal relatief ongevoelig is voor het onderliggende trend model.

De GNSS metingen op het station in Ten Post laten zien dat de daling gelijkelijk afneemt en goed kan worden beschreven met een spline model.

Gezien de beperkt beschikbare tijd voor dit onderzoek zijn niet alle vragen in evenveel detail onderzocht.

De belangrijkste vraag die nog open staat is het kansmodel van de GNSS metingen. Een eerste aanzet is gegeven in dit onderzoek en het is duidelijk dat de waarnemingen overwegend beïnvloed worden

door flicker noise. Echter, in de berekeningen is nog uitgegaan van een white noise model. Dit is niet alleen van invloed op de geschatte parameters, maar heeft ook tot gevolg dat a) nog geen realistische beschrijving gegeven kan worden van de standaard afwijking van de geschatte parameters (bv de standaard afwijking van de geschatte snelheden of snelheidsveranderingen), en b) verschillende model aannames niet streng getoetst kunnen worden.

[einde van dit document]