

# GNSS Processing Groningen

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

29 Oktober 2015

Versie 1.1 (29 Oktober 2015; herzien 8 November 2015)

## 1 Inleiding

In dit rapport wordt verslag gedaan van een studie “GNSS Processing Groningen” uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft (TU Delft) in opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM).

Fase 1 van de studie betrof een analyse van de GPS tijdreeksen van Groningen berekend door 06-GPS voor de periode tot en met Maart 2015. De resultaten van fase 1 zijn 30 April 2015 gerapporteerd [1]. Tijdens fase 2 van het project zijn de GPS tijdreeksen van 06-GPS voor de periode tot en met September 2015 geanalyseerd en heeft een onafhankelijke analyse van de ruwe GPS metingen plaatsgevonden voor de periode tot en met Augustus 2015. In dit rapport wordt verslag gedaan van beide activiteiten, met verwijzing naar de resultaten uit fase 1 [1]<sup>1</sup>.

Voor de uitvoering van de werkzaamheden is gebruik gemaakt van een drietal verschillende datasets:

1. Een dataset met tijdreeksen in Latitude, Longitude en Hoogte voor 13 GPS stations in Groningen, berekend door het bedrijf 06-GPS, in opdracht van de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM). Deze dataset, met metingen t/m 3 Oktober 2015, is op 26 Oktober 2015 door SodM aan de TU Delft ter beschikking gesteld. Deze dataset is geanalyseerd m.b.v. een aantal Matlab™ scripts volgens dezelfde methodiek als in fase 1.
2. Een dataset met de ruwe GPS metingen in RINEX format voor 13 GPS stations in Groningen, almede een aantal andere GPS stations. Deze dataset, met metingen t/m 30 Augustus 2015, is door 06-GPS op 5 Oktober aan de TU Delft ter beschikking gesteld. Deze dataset is verwerkt m.b.v. Gipsy/Oasis software van het Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA. De berekende GPS tijdseries zijn vervolgens op dezelfde manier als de 06-GPS tijdseries geanalyseerd en worden vervolgens vergeleken. Om de vergelijking eerlijk te houden is alleen gebruik gemaakt van data t/m 30 Augustus 2015. Bij deze analyse m.b.v. Gipsy/Oasis is gebruikt gemaakt van een aantal additionele datasets (JPL banen/klokken, antenne calibratie files, ocean-loading tabellen, etc.) die in de desbetreffende sectie nader worden beschreven.
3. Meteo data KNMI station Eelde. Deze data wordt gebruikt in de analyse van de GPS tijdreeksen. In bijlage A wordt een korte beschrijving van deze data gegeven.

---

<sup>1</sup> Helaas is in fase 1 een fout gemaakt in de conversie van de longitude component. Als gevolg hiervan zijn in [1] alle resultaten m.b.t. Easting een factor -1.65 te groot: met andere woorden, het teken in de East component is verkeerd en de component is overschat. Voor een juist resultaat, dient in [1] de East component met een factor -0.67 vermenigvuldigd te worden. De resultaten in de Up en North component zijn correct.

Het eindresultaat van deze studie is dit rapport met de bevindingen en een gevalideerde tijdserie met kwaliteitsinformatie.

## 2 GNSS data decompositie procedure

GNSS tijdseries worden in het algemeen door 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 SRRPOST 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.
4. Common mode signalen. Hieronder verstaan we effecten die alle stations op precies dezelfde manier beïnvloeden. Dit kunnen bijvoorbeeld effecten zijn ten gevolge van verstoringen van het gebruikte referentie frame, autonome beweging van een referentie station (indien gebruikt), gemeenschappelijk atmosfeer effecten of effecten van de gebruikte satelliet banen en klokken. De aanwezigheid van common mode signalen is sterk afhankelijk van de gekozen verwerkingsmethode.
5. Meetruis.

De effecten genoemd onder 2, 3 en werken verstorend voor de analyse van bodembeweging in Groningen. Voordat we een analyse van de bodembeweging kunnen uitvoeren moeten deze effecten uit de data geschat worden en vervolgens uit de tijdseries worden verwijderd. Enige voorzichtigheid is geboden aangezien deze componenten ook een deel van het gezochte deformatie signaal kunnen bevatten. Beter is het om te spreken van een decompositie van de GPS tijdseries in verschillende componenten.

Voor deze compositie wordt van het volgende stations model gebruik gemaakt.

### *Stations model*

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

$$\Delta = s(t) + \Delta_{AtmLd}(P - P_0) + \Delta_{TempI}(T - T_0) + \sum(a_{si}\sin 2\pi f_i t + a_{ci}\cos 2\pi f_i t) + \Delta_{CM}'' + \epsilon$$

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,  $\Delta_{CM}''$  een common

mode signaal dat gelijk is voor alle stations, 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 splines zijn mogelijk. Omdat de meeste tijdseries slechts iets meer dan een jaar lang zijn wordt begonnen met een lineair model  $s(t) = x(t_0) + v * (t - t_0)$ . Alleen voor **tenp** wordt vanwege de niet lineaire beweging naast een lineair model ook een spline model gebruikt. Het spline model dat voor **tenp** wordt gebruikt is een *piecewise polynomial* van de derde orde met continuïteit in de eerste afgeleide (snelheid) in de *breakpoints*. De lengte een piecewise polynomial is ongeveer 1 jaar. Dit houdt in dat **tenp** met drie piecewise polynomial is gemodelleerd.

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 (zie bijlage A). Vanwege de beperkte omvang van het gebied zal het atmospheric loading effect heel erg klein zijn, maar wordt desalnietemin meegeschat. Dit is terug te vinden in de geschatte coëfficiënten, die ook daadwerkelijk klein zijn. We hadden de schatting van dit effect in de 06-GPS dataset ook achterwege mogen laten, maar het meenemen van deze term schaad ook niet, en zoals we later zullen zien, is het wel nodig deze term in de Gipsy/Oasis processing mee te nemen.

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 perioden 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 vertoont 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 niet met twee harmonische zijn te beschrijven.

#### *Decompositie van tijdseries*

De verschillende parameters worden geschat met behulp van de kleinste kwadraten methode. In de eerste iteratie wordt aangenomen dat er geen common mode signaal  $\Delta_{CM}''$  is, i.e.  $\hat{\Delta}_{CM}''=0$ . Nadat de parameters zijn geschat worden de kleinste kwadraten residuen  $\hat{\epsilon}$  berekend.

De positie tijdserie kan nu in een drietal componenten gesplitst worden,

$$\Delta = \hat{\Delta}' + \hat{\Delta}'' + \hat{\Delta}_{CM}''$$

$\hat{\Delta}'$  is de “gecorrigeerde” tijdserie, zonder periodieke of versturende effecten,

$$\hat{\Delta}' = \hat{s}(t) + \hat{\epsilon}$$

met  $\hat{s}(t)$  de geschatte trend en  $\hat{\epsilon}$  de geschatte kleinste kwadraten residuen. Dit is de beste schatting van het lange termijn trend signaal. Het is essentieel dat een van de componenten in  $\hat{\Delta}'$  de kleinste kwadraten residuen zijn: deze kunnen immers nog ongemodelleerde signalen bevatten.

$\hat{\Delta}''$  is de beste schatting van de periodieke en andere versturende elementen in de tijdseries,

$$\hat{\Delta}'' = \hat{\Delta}_{AtmLd}(P - P_0) + \hat{\Delta}_{TempI}(T - T_0) + \sum(\hat{a}_{si}\sin 2\pi f_i t + \hat{a}_{ci}\cos 2\pi f_i t)$$

met  $\hat{\Delta}_{AtmLd}$  de geschatte coëfficiënt voor *atmospheric loading*,  $\hat{\Delta}_{TempI}$  de geschatte coëfficiënt voor het *temperatureffect*,  $\hat{a}_{si}$  en  $\hat{a}_{ci}$  de geschatte coëfficiënten voor de *harmonische* termen. Desgewenst kan  $\hat{\Delta}''$  verder in zijn afzonderlijke componenten worden gesplitst.

$\hat{\Delta}_{CM}''$  is het geschatte *common mode* signaal dat gelijk is voor alle stations. Deze wordt in een aparte procedure geschat uit data van *alle* stations, en pas na de hierboven beschreven station decompositie. In de eerste iteratie wordt aangenomen dat er geen common mode signaal  $\Delta_{CM}''$  is, i.e.  $\hat{\Delta}_{CM}''=0$  in de eerste iteratie, en worden de resultaten uit de stations decompositie gebruikt om  $\hat{\Delta}_{CM}''$  te bepalen. Deze schatting wordt in een tweede iteratie van de stations decompositie gebruikt om het common mode signaal te verwijderen. Deze iteratie is optioneel en afhankelijk van de gebruikte verwerking methode voor het processing van de GPS signalen.

#### *Common mode signaal (residual stacking)*

De hiervoor beschreven procedure maakt gebruik van data van een enkel station. Hierdoor is het in deze fase nog niet mogelijk onderscheid te maken tussen invloeden van individuele stations en effecten die alle stations op dezelfde manier beïnvloeden: de *common mode*.

Voorbeelden van common mode effecten zijn bijvoorbeeld invloeden van het gebruikte referentie frame, zoals de autonome beweging van een referentie station in een netwerk aanpak (06-GPS/SSRPOST) of de gebruikte satelliet banen en klokken in geval van *precise point positioning* (Gipsy/Oasis). Andere mogelijke common mode effecten voor stations die dicht bij elkaar liggen zijn gemeenschappelijk atmosfeer invloeden en/of loading effecten. De aanwezigheid van common mode signalen is sterk afhankelijk van de gekozen verwerkingsmethode voor de ruwe GPS signalen. De schatting van deze common mode effecten is daarom ook optioneel.

De common mode bestaat uit twee afzonderlijke componenten.

De eerste component bestaat uit de gemiddelde atmospheric loading, temperature influence en harmonische termen.

$$\hat{\Delta}_{CM1}'' = \hat{\Delta}_{AtmLd;CM}(\bar{P} - P_0) + \hat{\Delta}_{TempI;CM}(\bar{T} - T_0) + \sum(\hat{a}_{si;CM}\sin 2\pi f_i t + \hat{a}_{ci;CM}\cos 2\pi f_i t)$$

met  $\hat{\Delta}_{AtmLd;CM}$  de geschatte common mode coëfficiënt voor *atmospheric loading*,  $\hat{\Delta}_{TempI;CM}$  de geschatte common mode coëfficiënt voor het *temperatureffect*,  $\hat{a}_{si;CM}$  en  $\hat{a}_{ci;CM}$  de geschatte common mode coëfficiënten voor de *harmonische* termen. Deze parameters worden berekend in een afzonderlijke kleinste kwadraten vereffening uit de geschatte parameters voor de individuele stations met volledige variantie-covariantie matrix (er vanuit gaande dat temperatuur en luchtdruk hetzelfde zijn voor alle stations, wat het geval is in Groningen).

De tweede component bestaat uit de residuen gemiddeld over alle stations (residual stack)

$$\hat{\Delta}_{CM2;k}'' = \sum_i \hat{\epsilon}_{ik} \quad k = 0,1, \dots N$$

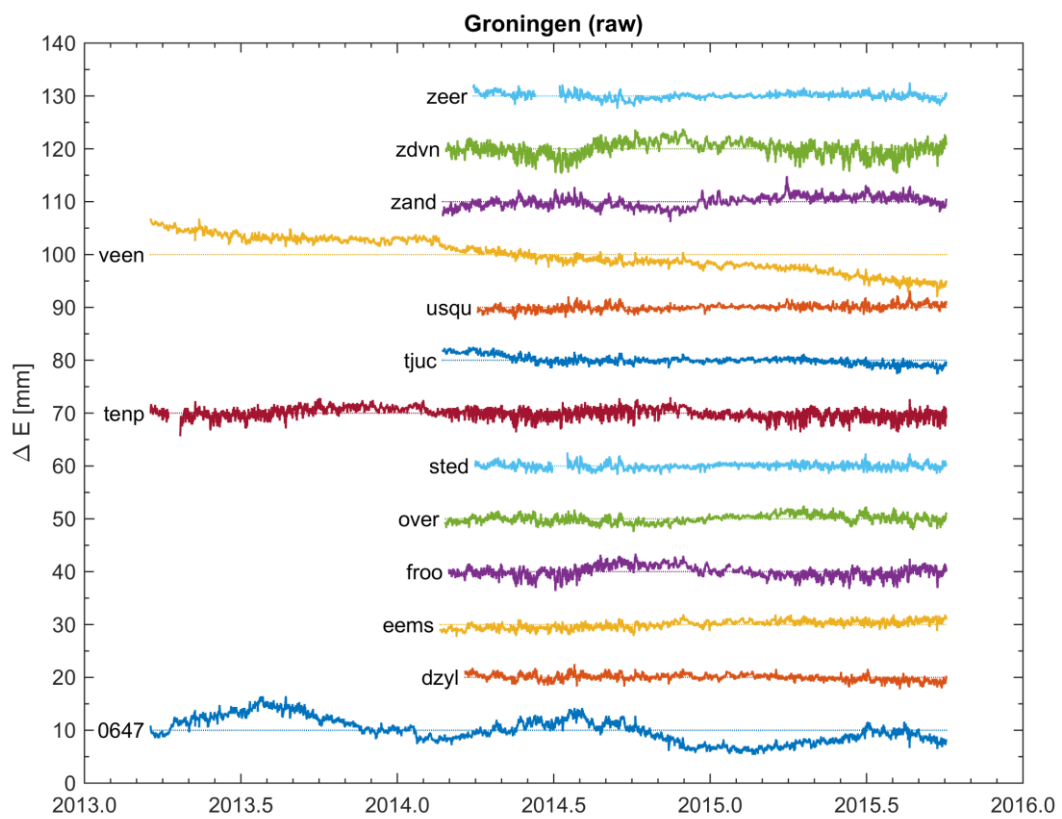
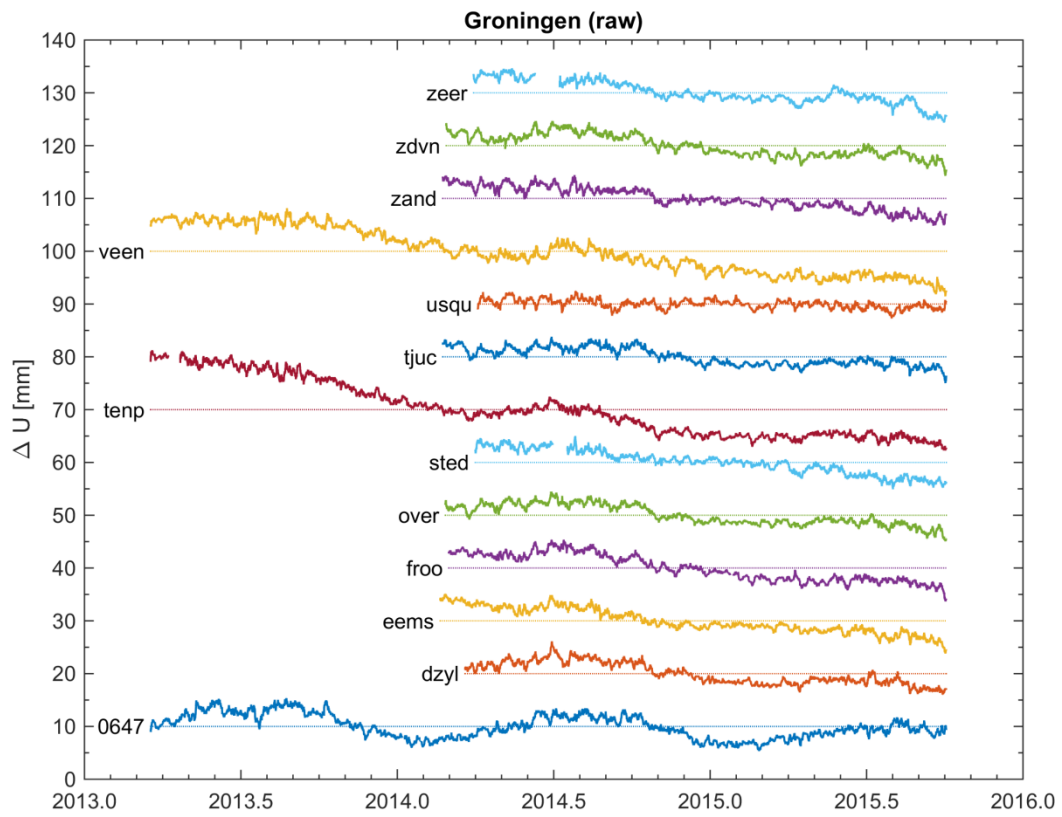
Behalve het gemiddelde, wordt in de residual stack ook de standaard afwijking van de residuen over alle stations berekend. Het gemiddelde en de standaardafwijking kan naar keuze berekend worden over het interval van een uur of een dag.

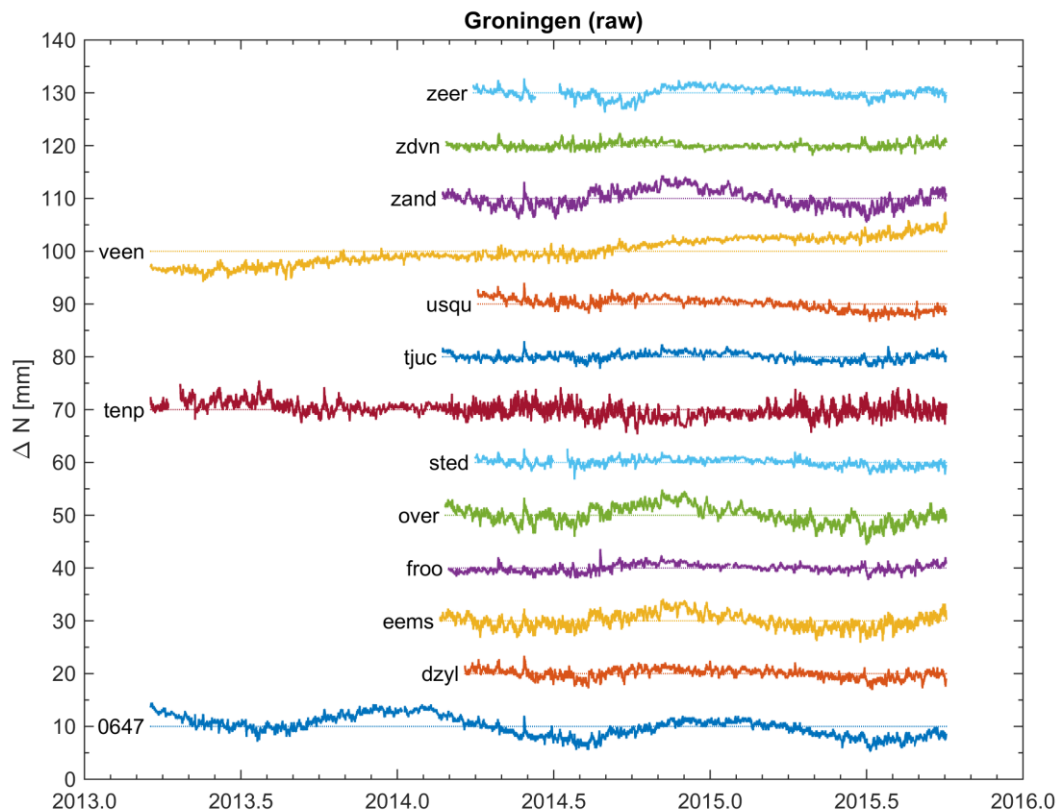
Beide componenten zijn tegelijkertijd, of ieder afzonderlijk, te schatten (of beide niet). Tevens is het mogelijk bepaalde stations in de berekening uit te sluiten, of een subset van stations te nemen.

### 3 06-GPS dataset

De GPS tijdsreeksen zoals berekend door 06-GPS zijn door SodM beschikbaar gesteld in de vorm van een aantal Microsoft Excel files met voor ieder van de stations **0647, dzyl, eems, froo, over, sted, tenp, tjuc, usqu, veen, zand, zdvN** en **zeer** een apart tabblad. Per stations is de volgende informatie beschikbaar: *doy* (day of year), *sessid* (a-x), aantal dagen sinds 2013-01-01 00:00 (*real*), datum, Latitude in deg min sec, Longitude in deg min sec, en hoogte in m. De Excel data wordt gelezen in een Matlab™ script en omgezet naar een Matlab mat-file per station.

Iedere mat-file bevat een Matlab structure met: de stationsnaam, de gemiddelde latitude, longitude en hoogte (*p1h0*) in graden en meters, en matrices met Matlab datenumber (*epoch*), day of year (*doy*), decimal year (*year*), latitude, longitude en hoogte (*p1h*), en de North, East en Up componenten (*neu*). Het veld *neu* bevat verschillen in North, East en Up richting (in meters) ten opzichte van de gemiddelde positie *p1h0*, en is berekend uit de gegeven latitude, longitude en hoogte gegevens. Een schatting is ieder uur beschikbaar. De Up, East en Noord componenten zijn geplotted in de onderstaande figuren.





Wat direct opvalt is dat de Up component, afgezien van periodieke effecten, gladder lijkt dan zowel de North als East component. Dit betreft vooral de hoogfrequente component, welke gerelateerd is aan de meetruis. Dit lijkt verrassend, maar 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.

Sommige stations, zoals bv **veen**, maar ook andere, laten ook een duidelijk deformatie signaal in de horizontale component zien. Dit betekent dat we de horizontale componenten niet mogen negeren aangezien die belangrijke informatie kunnen bevatten ten aanzien van de bodembeweging en/of lokale stations effecten.

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

Een beetje verscholen, maar toch duidelijk zichtbaar, is dat sommige stations, bv **zeer**, korte periodes hebben waarvoor geen GPS data beschikbaar is. Dit is een belangrijk verschil met de dataset die gebruikt tijdens fase 1 van deze studie is gebruikt: deze bevatte voor deze perioden ten onrechte data die tijdens fase 1 apart verwijderd moest worden [1]. Desondanks zijn er nog een aantal periodes die door het import script automatisch verwijderd worden (voor de methode zie [1]):

```

Importing 0647 ...
removed 07-Jan-2014 11:00:00 - 09-Jan-2014 13:00:00 (51 epochs)
removed 02-Jun-2015 15:00:00 - 03-Jun-2015 13:00:00 (23 epochs)
Importing froo ...
removed 24-Jan-2015 17:00:00 - 28-Jan-2015 07:00:00 (87 epochs)
removed 10-Feb-2015 06:00:00 - 11-Feb-2015 02:00:00 (21 epochs)
Importing over ...
removed 27-Dec-2014 02:00:00 - 27-Dec-2014 20:00:00 (19 epochs)
Importing veen ...
removed 12-Apr-2014 14:00:00 - 14-Apr-2014 08:00:00 (43 epochs)
removed 02-May-2015 10:00:00 - 04-May-2015 06:00:00 (45 epochs)

```

Een ander verschil met de dataset die voor fase 1 is gebruikt is dat de data uit de eerste maanden van 2013 waarschijnlijk opnieuw verwerkt is; tijdens fase 1 zat hier nog een sprong in.

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 is een belangrijk gegeven aangezien de absolute grootte niet van belang is voor de schattingen (alleen voor de kwaliteitsbeschrijving). Om deze reden is in de verdere processing een waarde van 1 mm aangenomen voor de standaard afwijking van de metingen. Ook wordt tijdens de processing een schalingsfactor (OMT) geschat die gebruikt kan worden om de aangenomen waarde van 1 mm te corrigeren.

De uniforme standaard afwijkingen van de metingen komt ook door de gevolgde verwerking procedure door 06-GPS. De tijdseries worden maandelijks bijgewerkt, 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.

## 4 Decompositie van 06-GPS tijdreeksen

De GPS tijdreeksen van 06-GPS zijn met behulp van de in hoofdstuk 2 beschreven procedure verwerkt. Hierbij is gebruik gemaakt van twee iteraties. Na de 1<sup>e</sup> iteratie is een common mode signaal geschat op basis van alleen de residual stack, en vervolgens is deze in de 2<sup>e</sup> iteratie toegepast.

### 4.1 Deformatie signaal

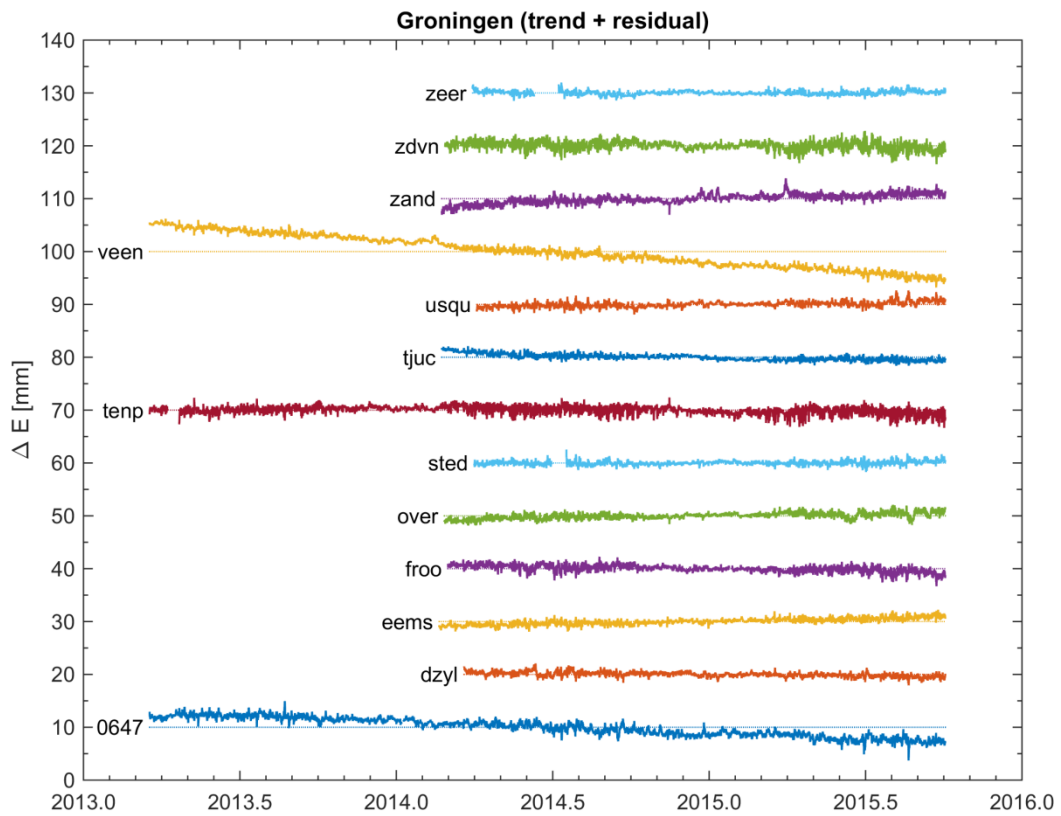
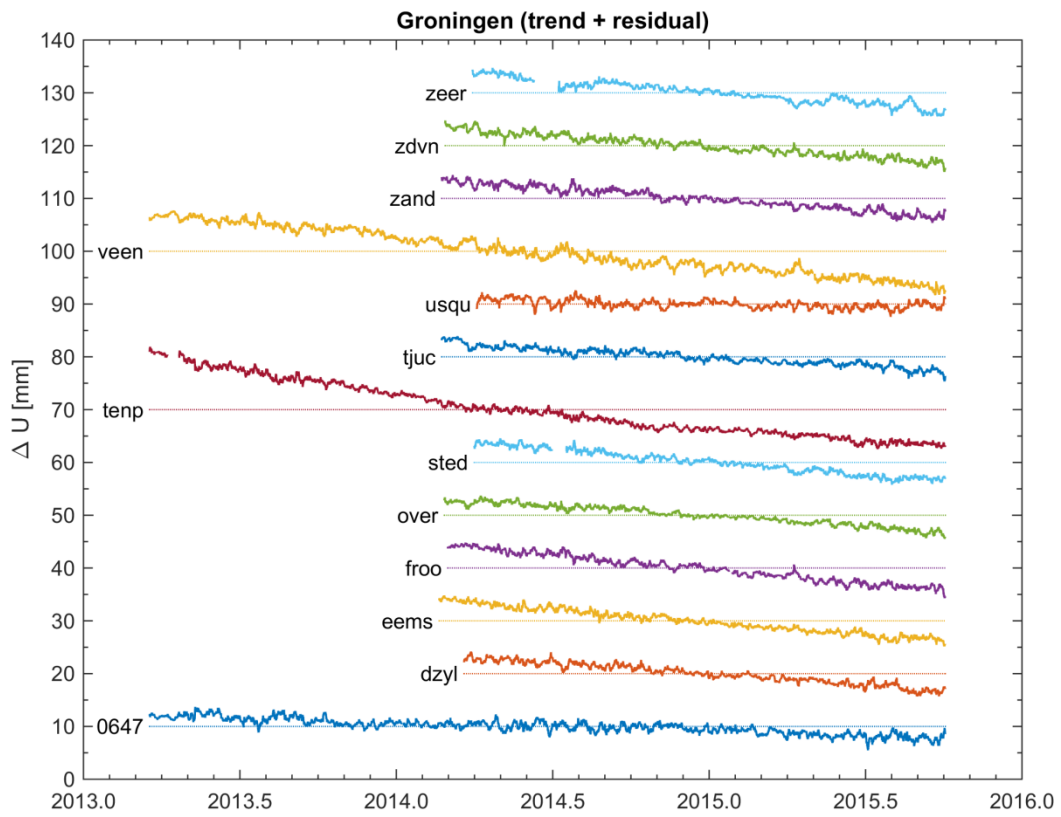
De resulterende “gecorrigeerde” tijdreeksen  $\hat{\Delta}'$ , zonder periodieke of versturende effecten,

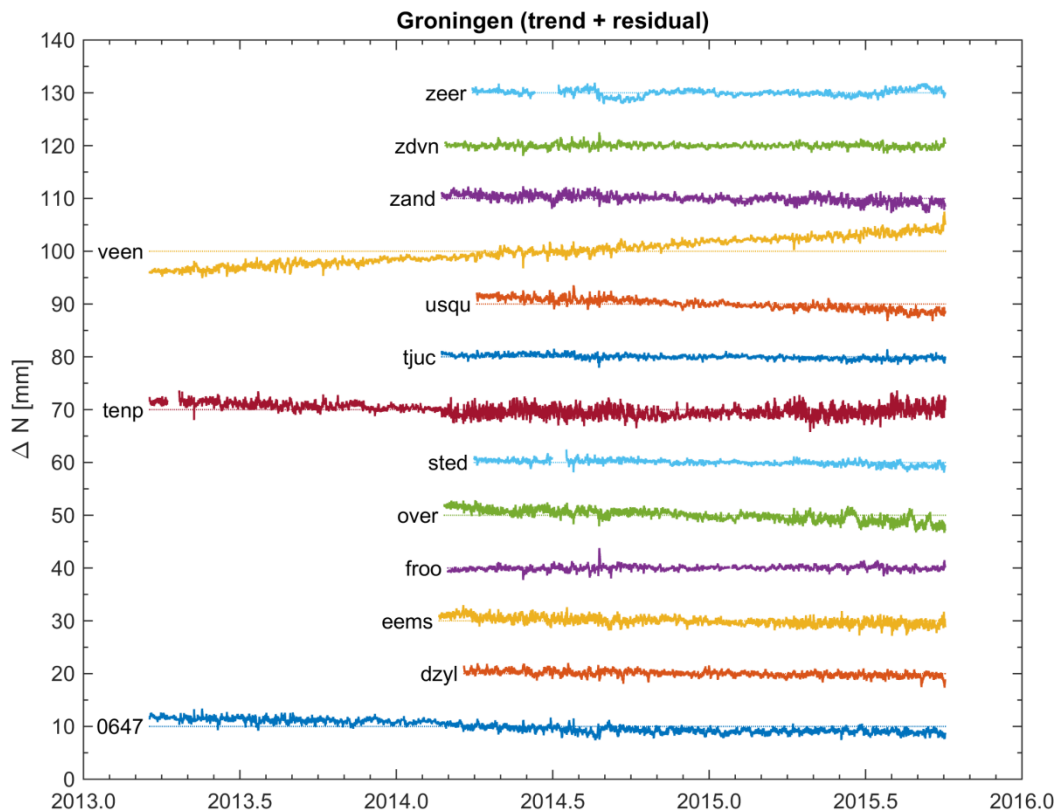
$$\hat{\Delta}' = \hat{s}(t) + \hat{\epsilon}$$

met  $\hat{s}(t)$  de geschatte trend en  $\hat{\epsilon}$  de geschatte kleinste kwadraten residuen, zijn hieronder, en in bijlage B, geplot voor alle stations.

Dit is de beste schatting van het (lange termijn) deformatie signaal dat uit de data verkregen kan worden.







Vrijwel alle stations laten een duidelijke zakking zien. Met uitzondering van **tenp**, en mogelijk **eems**, lijkt de snelheid waarmee de stations zakken constant te zijn gedurende de meetperiode. Alleen voor **tenp** is een duidelijke afname in de zakkingsnelheid te zien.

Een aantal stations laat ook een duidelijke horizontale beweging zien. Dit is het meest evident voor **veen** en **0647**. Echter ook **eems**, **over** en **usqu** laten een constante horizontale beweging zien, terwijl er bij **tjuc** en **zand** eerder sprake lijkt te zijn van een soort zetting in de horizontale component aan het begin van de metingen. Bij **tenp** is vooral de hoge ruis op de horizontale component en de niet lineaire beweging in de Noord-Zuid richting opvallend.

Voor een goede beoordeling van de kwaliteit van data en stations is het niet voldoende alleen naar het (lange termijn) deformatie signaal te kijken. Juist de componenten, die uit de ruwe metingen verwijderd zijn, kunnen nuttige informatie over de kwaliteit van de stations, en daarmee indirect ook de kwaliteit het deformatie signaal, bevatten. Daarnaast zijn mogelijke *seizoen variaties* in de deformatie niet te scheiden van de harmonische termen die geschat worden; de harmonische termen kunnen dus nog een component van de (seizoen) deformatie bevatten.

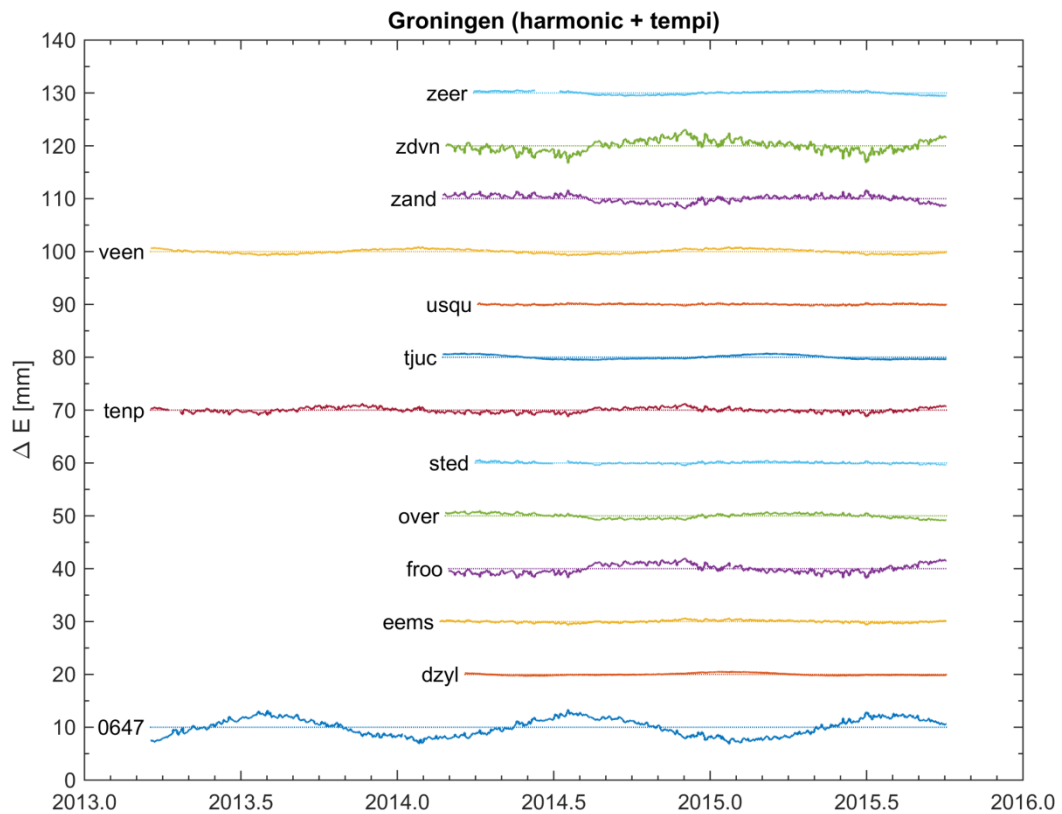
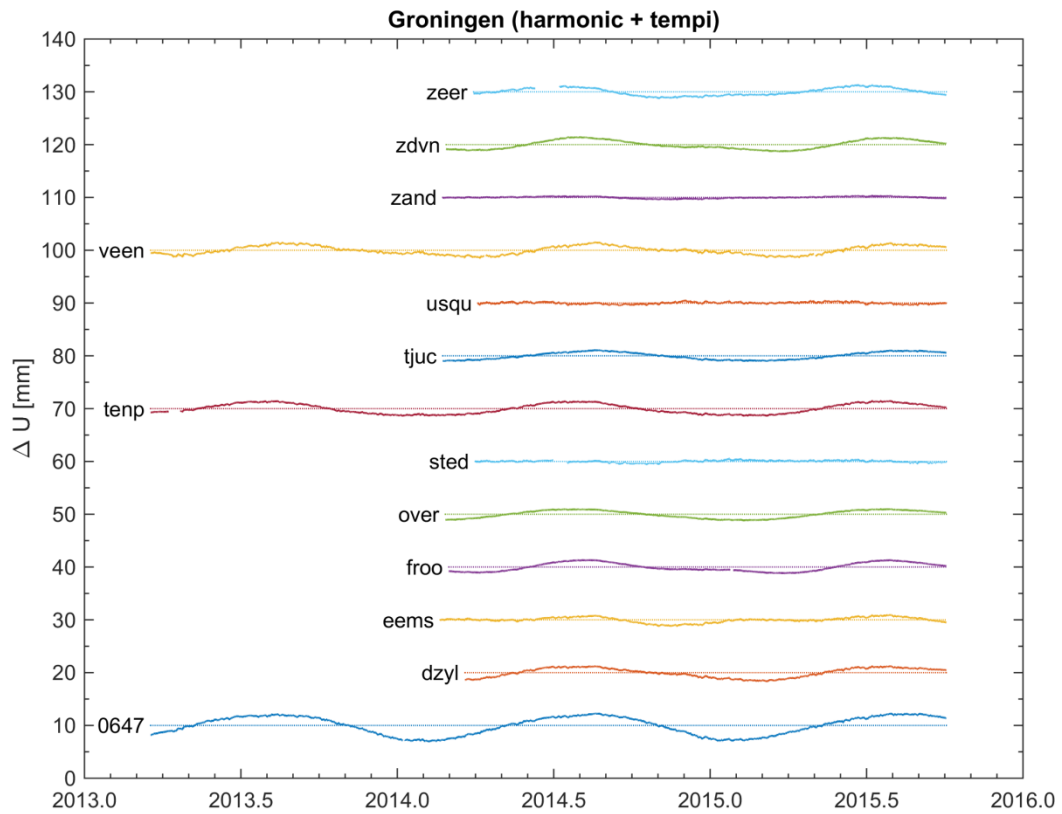
#### 4.2 Harmonische termen en temperatuur invloed

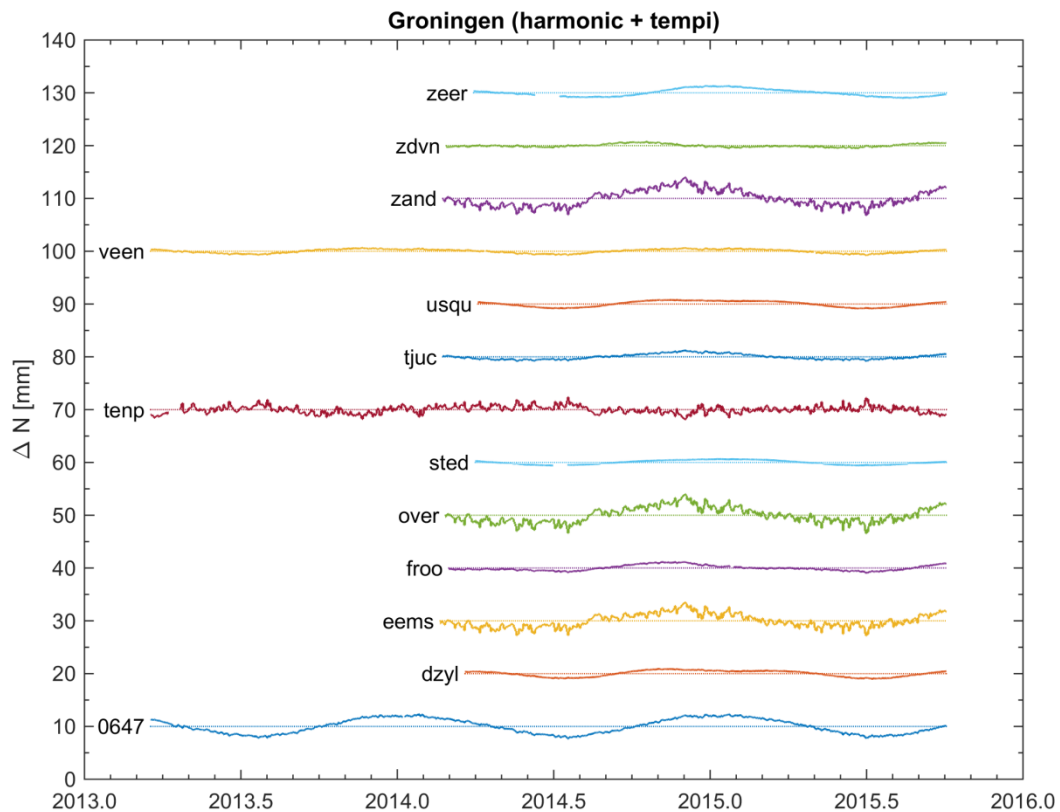
De temperatuur invloed en harmonische termen

$$\hat{\Delta}'' = \hat{\Delta}_{AtmLd}(P - P_0) + \hat{\Delta}_{TempI}(T - T_0) + \sum(\hat{a}_{si}\sin 2\pi f_i t + \hat{a}_{ci}\cos 2\pi f_i t)$$

zijn in de onderstaande figuren geplot. De atmospheric loading is wel geschat, maar de geschatte parameters zijn klein, zoals te verwachten is voor een netwerk oplossing, en het effect is niet apart

geplot. De geschatte parameters voor de harmonische termen en temperatuur invloed worden in sectie 4.4 gegeven.





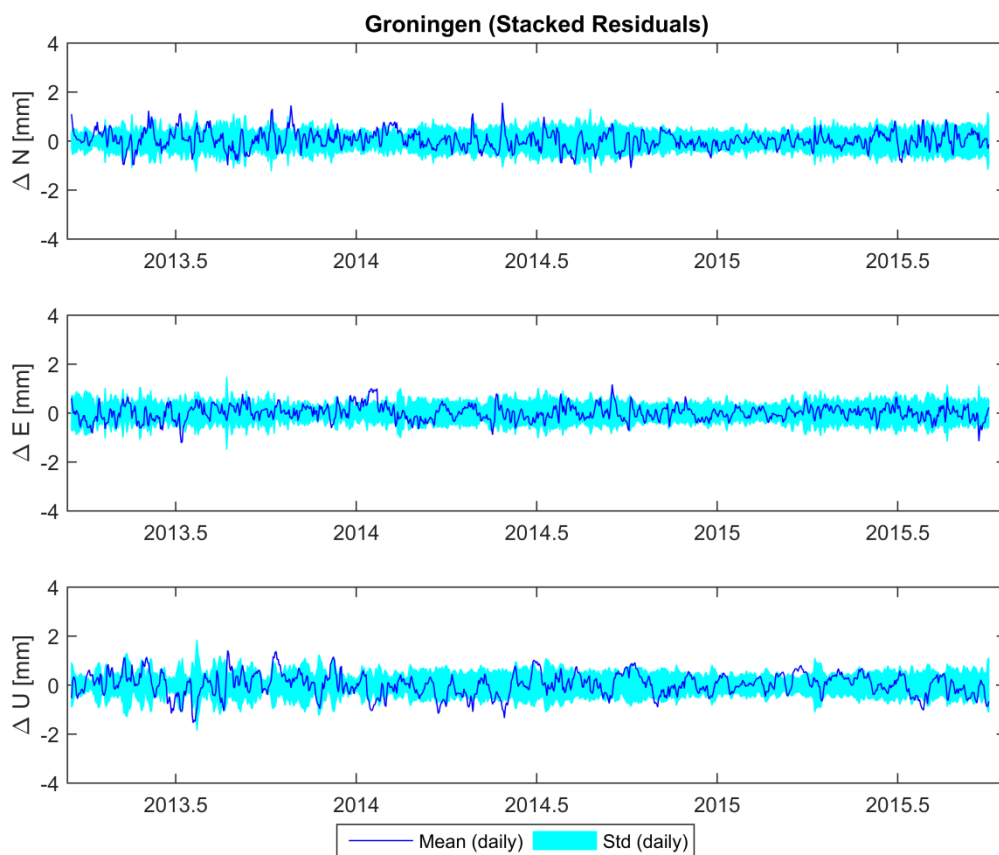
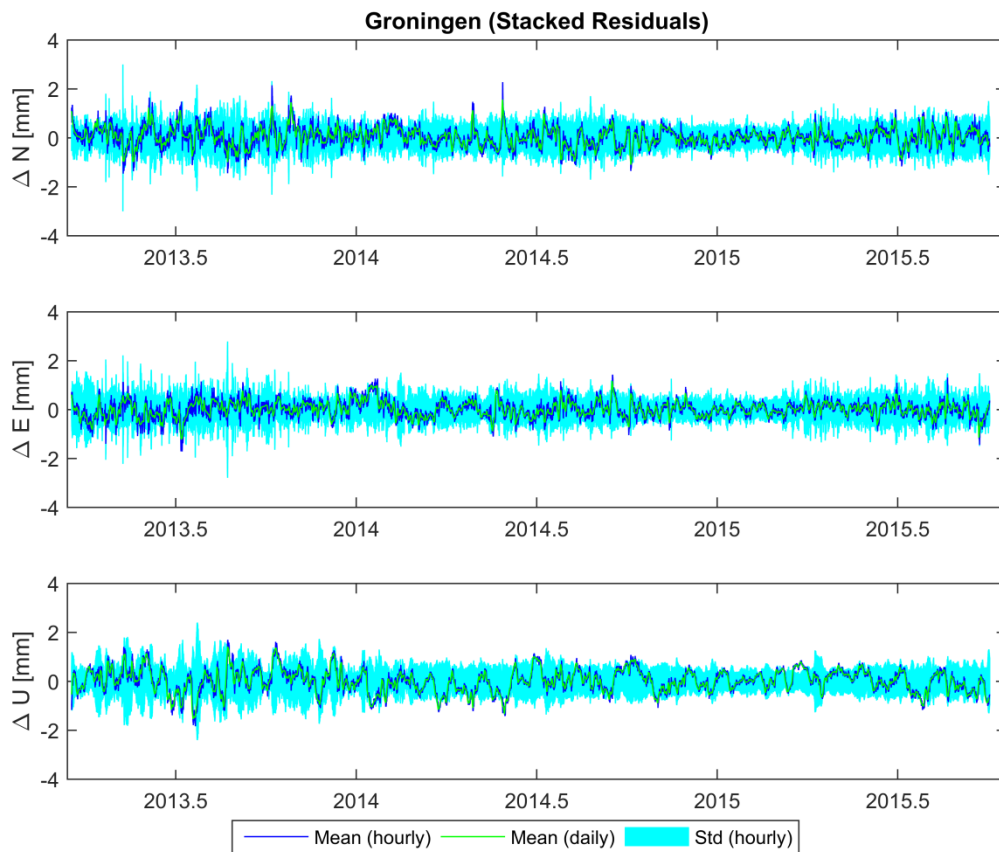
De plots laten belangrijke verschillen zien tussen de individuele stations, maar ook een aantal overeenkomsten.

In de Up component (hoogte) hebben de annual en semi-annual termen de overhand. De temperatuur invloed is hier minder dan in de horizontale componenten. Wat opvalt is dat **zand**, **usqu** en **sted** nauwelijks een seizoen variatie laten zien, maar dat bij de ander stations, met name **0647**, sprake is van een duidelijke seizoensvariatie in de hoogte, die ook nog duidelijk correleerd. Een eenduidige verklaring is lastig, er kunnen verschillende oorzaken zijn voor de seizoen variatie: neveneffecten van de GPS processing, zoals ongemodelleerde ocean loading (0647 en dzyl?), ongemodelleerde antenne effecten (calibraties), site multipath en atmosfeer vertragingen, onder invloed van een zich herhalende satelliet constellatie, die kunnen resulteren in jaarlijkse en half jaarlijkse perioden in de data; of invloeden van de gebruikte referentie stations; of grondwater variaties; of, zeker niet uit te sluiten, seizoens afhankelijke effecten van de gaswinning.

In de horizontale componenten valt op dat **0647** weer de grootste seizoen invloed heeft. Verder is duidelijk te zien dat **eems**, **froo**, **over**, **tenp**, **zand** en **zdvn** in één of beide horizontale componenten een grotere temperatuur invloed hebben dan de overige stations, en de overige stations verder duidelijke harmonische componenten hebben. De correlatie tussen stations in de horizontale component is duidelijk minder dan de correlatie in de hoogte component. Bij de stations met een duidelijke temperatuur invloed ligt als mogelijke oorzaak de constructie van het monument voor de hand, maar dit is voorsnog niet getoetst met de daadwerkelijke situatie.

### 4.3 Common mode signaal

Het common mode signaal zoals berekend uit de residuen van de 1<sup>e</sup> iteratie is hieronder geplott, samen met de berekende rms fout.

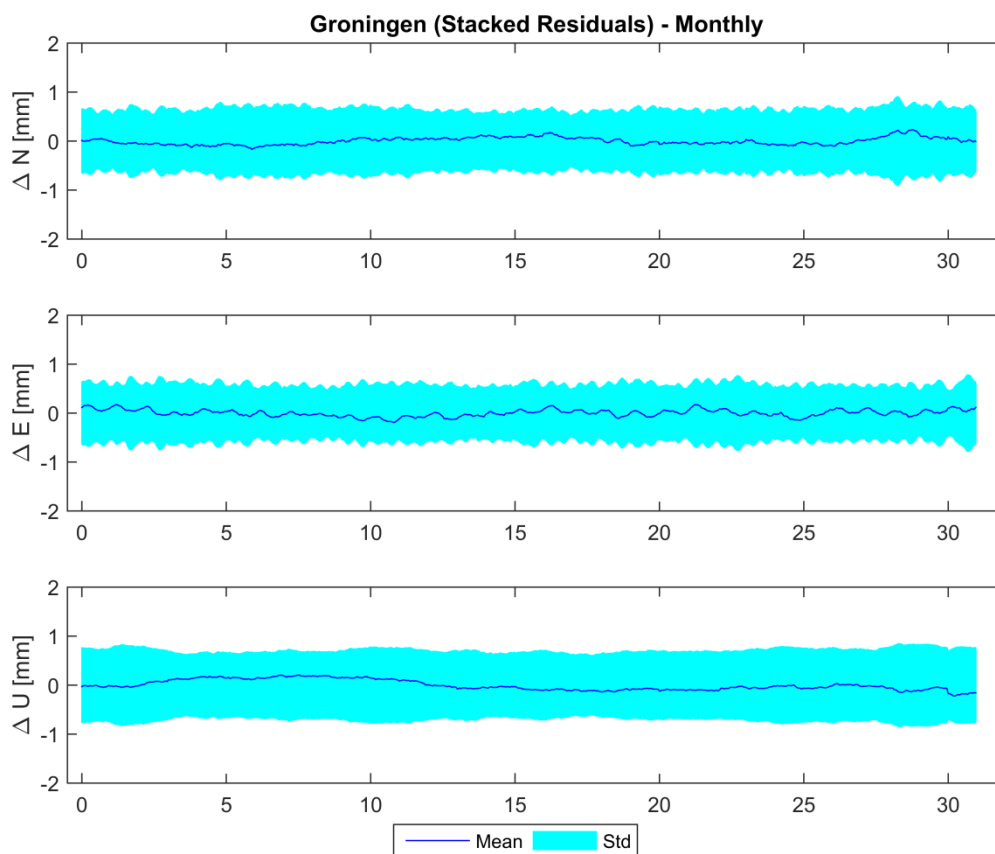


De eerste plot laat het uurlijkse gemiddelde, het dagelijkse gemiddelde en uurlijkse standaard afwijking zien. In een tweede plot zijn het dagelijkse gemiddelde en standaard afwijking geplot. Het

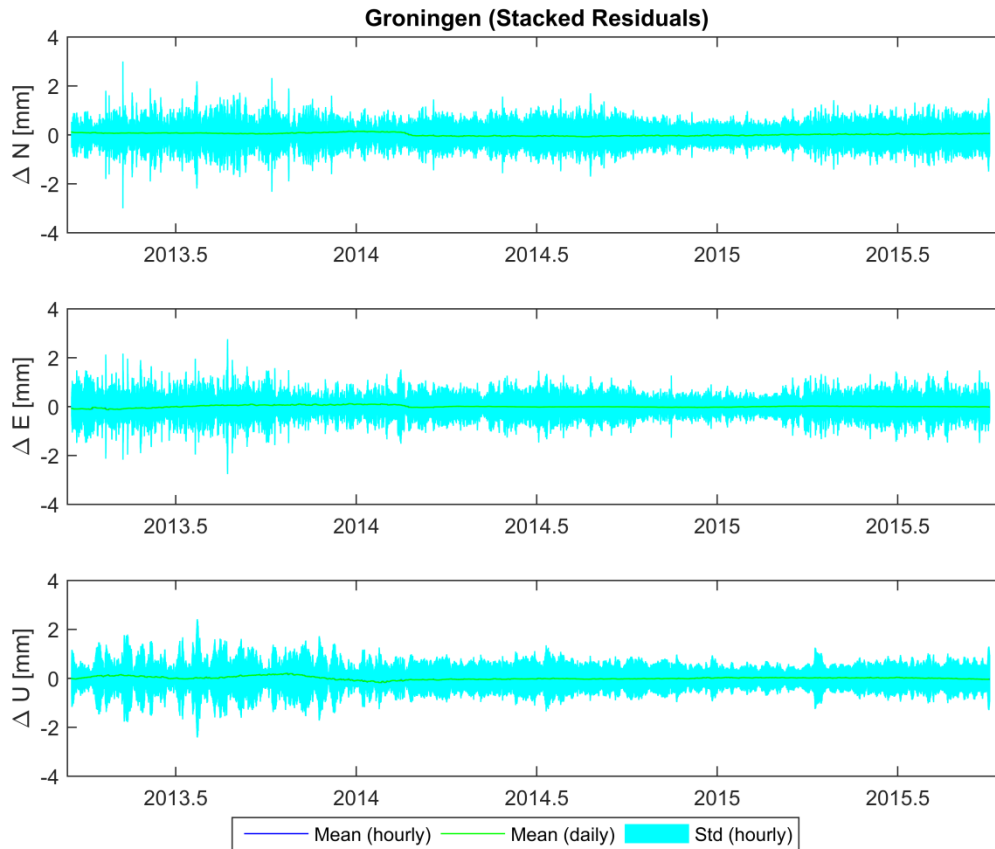
dagelijkse gemiddelde is dezelfde orde grootte, en soms groter, als de dagelijkse standaardafwijking. De plots laten ook zien dat er geen grote uitschieters in de common mode zitten.

Indien de residual stack wordt vergeleken met de residual stack uit de 1<sup>e</sup> fase van de studie [1], dan valt op dat de sprong die eerder begin 2013 in de 1<sup>e</sup> fase is verdwenen.

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.



Ter controle wordt hieronder de residual stack na de 2<sup>e</sup> iteratie weergegeven. Er is sprake van een duidelijke verbetering en verdere iteraties zien niet nodig.



#### 4.4 Geschatte parameters en co-variantie

De geschatte parameters uit de 2<sup>e</sup> iteratie zijn in de onderstaande tabel weer gegeven:

		Vel mm/y	AtmLd mm/kPa	TempI mm/daK	365d mm	175d mm	StdF mm	StdR1 mm	StdR2 mm	OMT
0647	Lat	-1.28	-0.01	-0.50	1.60	0.14	1.00	0.70	0.55	0.30
0647	Lon	-2.18	0.02	1.23	1.39	0.15	1.00	0.66	0.56	0.32
0647	Rad	-1.64	0.11	-0.41	2.71	0.22	1.00	0.80	0.67	0.45
dzyl	Lat	-0.65	0.08	0.16	0.83	0.34	1.00	0.62	0.45	0.21
dzyl	Lon	-0.56	0.01	0.08	0.34	0.13	1.00	0.49	0.40	0.16
dzyl	Rad	-4.20	-0.05	-0.36	1.48	0.24	1.00	0.70	0.50	0.25
eems	Lat	-1.00	0.01	-2.13	1.59	0.06	1.00	0.70	0.59	0.34
eems	Lon	1.05	0.02	-0.45	0.07	0.03	1.00	0.45	0.37	0.14
eems	Rad	-4.87	-0.04	-0.36	0.79	0.46	1.00	0.60	0.45	0.20
froo	Lat	0.14	-0.04	-0.30	0.61	0.30	1.00	0.49	0.41	0.17
froo	Lon	-0.85	-0.02	-1.41	1.35	0.21	1.00	0.68	0.54	0.30
froo	Rad	-5.46	-0.09	-0.13	1.07	0.44	1.00	0.65	0.51	0.26
over	Lat	-1.81	-0.00	-2.38	1.69	0.22	1.00	0.81	0.66	0.43
over	Lon	0.75	0.01	0.61	0.84	0.04	1.00	0.56	0.47	0.22
over	Rad	-3.86	-0.03	-0.14	1.11	0.10	1.00	0.70	0.43	0.19
sted	Lat	-0.69	0.04	0.06	0.61	0.09	1.00	0.52	0.36	0.13
sted	Lon	0.19	-0.01	0.49	0.48	0.04	1.00	0.47	0.37	0.14
sted	Rad	-5.01	-0.09	-0.39	0.24	0.14	1.00	0.62	0.46	0.21
tenp	Lat	0.16	0.18	2.03	1.32	0.16	1.00	0.95	0.82	0.67
tenp	Lon	-0.91	-0.12	-0.94	0.68	0.13	1.00	0.76	0.64	0.41
tenp	Rad	-4.37	-0.01	-0.29	1.48	0.24	1.00	0.69	0.49	0.24
tjuc	Lat	-0.49	-0.01	-0.37	0.60	0.06	1.00	0.51	0.33	0.11

tjuc	Lon	-0.99	-0.02	0.14	0.57	0.16	1.00	0.43	0.37	0.14
tjuc	Rad	-3.28	-0.04	-0.22	1.08	0.10	1.00	0.72	0.53	0.28
usqu	Lat	-2.04	0.05	0.09	0.78	0.26	1.00	0.53	0.46	0.22
usqu	Lon	0.66	0.00	0.33	0.26	0.09	1.00	0.47	0.43	0.18
usqu	Rad	-1.02	-0.03	-0.46	0.27	0.15	1.00	0.68	0.67	0.44
veen	Lat	3.18	0.02	-0.25	0.35	0.13	1.00	0.54	0.49	0.24
veen	Lon	-4.05	-0.03	-0.33	0.34	0.02	1.00	0.51	0.42	0.18
veen	Rad	-5.49	-0.16	-0.53	1.34	0.37	1.00	0.84	0.73	0.53
zand	Lat	-0.94	-0.07	-2.08	1.76	0.13	1.00	0.68	0.58	0.34
zand	Lon	1.47	0.00	1.34	1.11	0.21	1.00	0.63	0.57	0.33
zand	Rad	-4.38	0.03	-0.16	0.31	0.09	1.00	0.73	0.54	0.29
zdvu	Lat	-0.09	-0.01	0.32	0.34	0.24	1.00	0.49	0.41	0.17
zdvu	Lon	-0.50	-0.10	-2.23	1.19	0.34	1.00	0.88	0.77	0.59
zdvu	Rad	-4.18	-0.05	0.18	0.93	0.42	1.00	0.71	0.53	0.28
zeer	Lat	0.12	-0.07	-0.17	0.86	0.22	1.00	0.73	0.61	0.37
zeer	Lon	0.01	-0.02	0.27	0.44	0.13	1.00	0.46	0.37	0.14
zeer	Rad	-4.59	0.04	-0.31	1.14	0.34	1.00	0.75	0.62	0.39

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

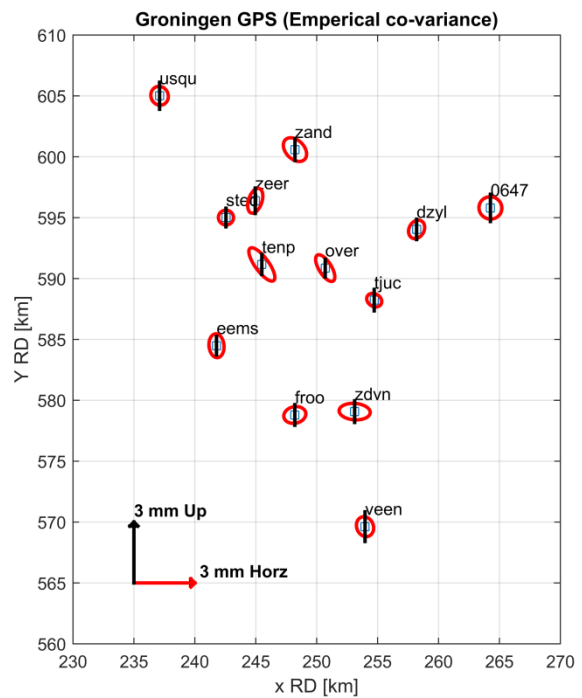
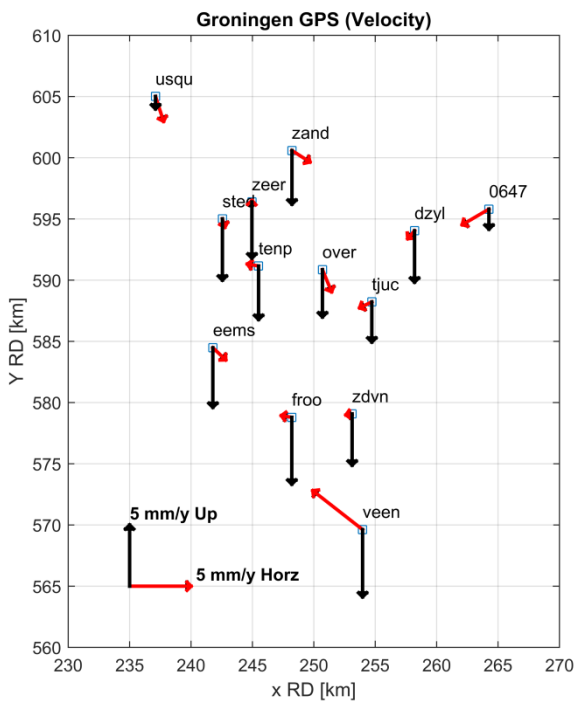
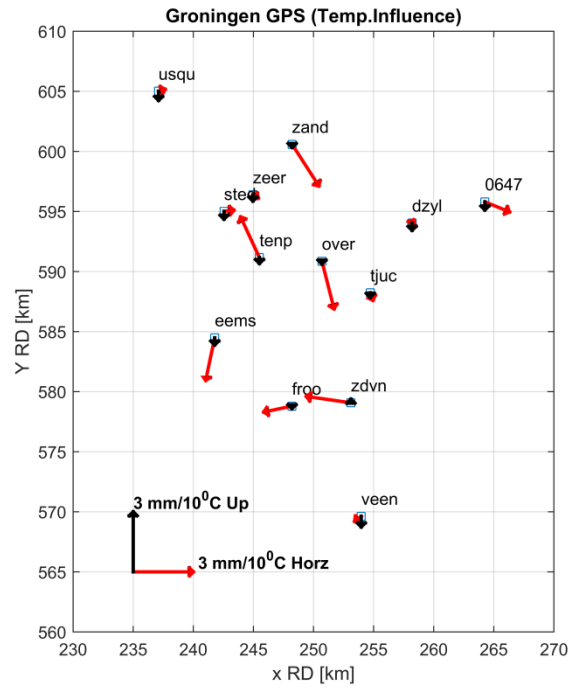
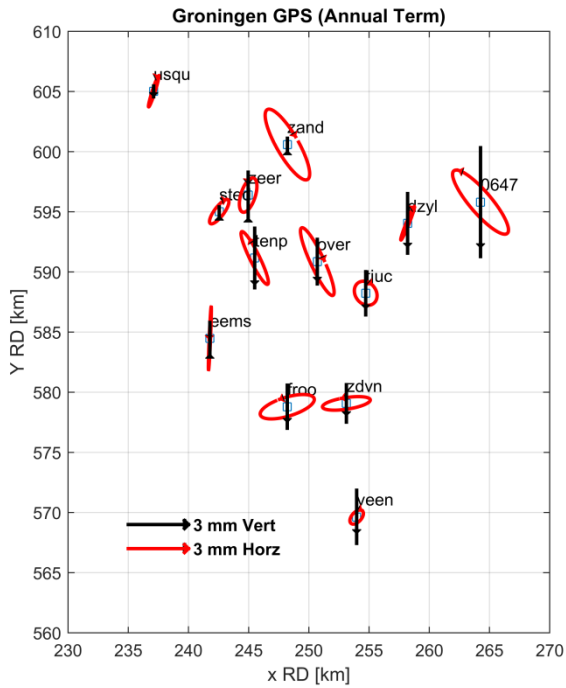
StdF is het gemiddelde van de standard afwijking die gegeven is voor de waarnemingen (in ons geval de gekozen waarde van 1 mm). StdR1 is de empirische standaard afwijking van de residuen uit de eerste iteratie, StdR2 uit de tweede iteratie en OMT zijn de resultaten van de Overall Model Toets (uit iteratie 2)

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

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). Duidelijk zichtbaar is de verbetering in StdR t.g.v. de tweede iteratie: het toepassen van de residual stack geeft een duidelijke verbetering.

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 op een kaart. 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. Zie ook de discussie in sectie 4.2. De atmospheric loading term is zoals verwacht verwaarloosbaar klein voor alle stations en is niet apart geplot.



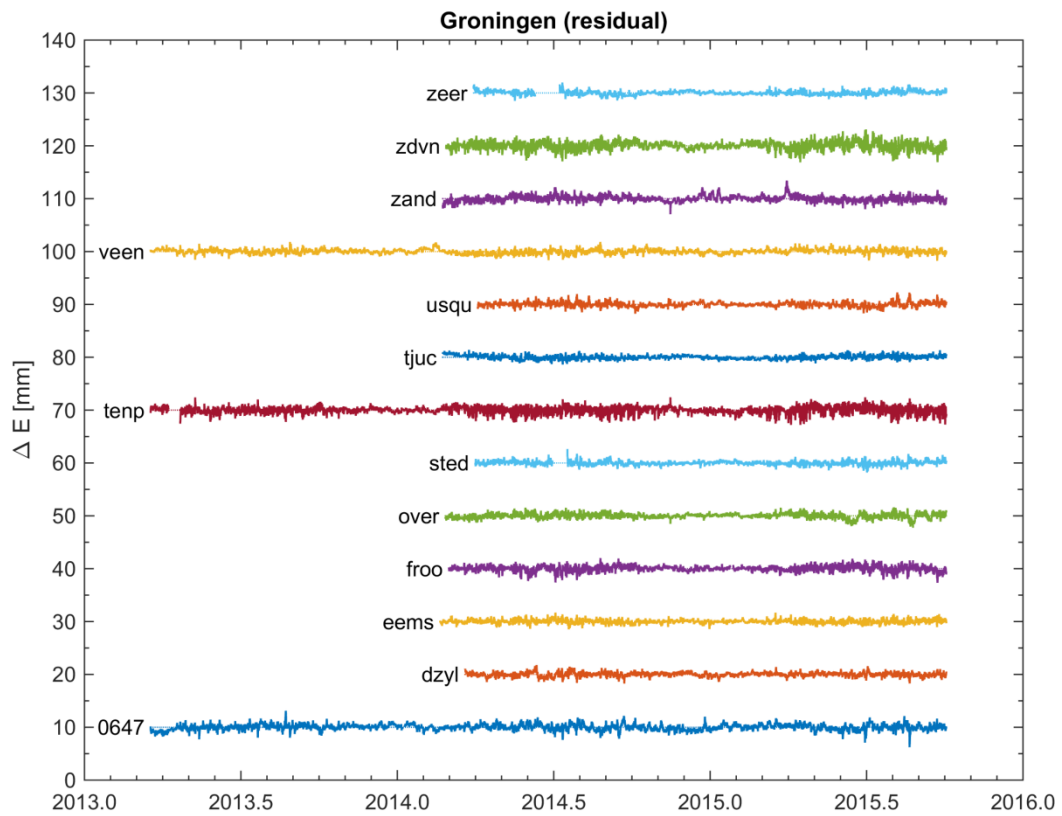
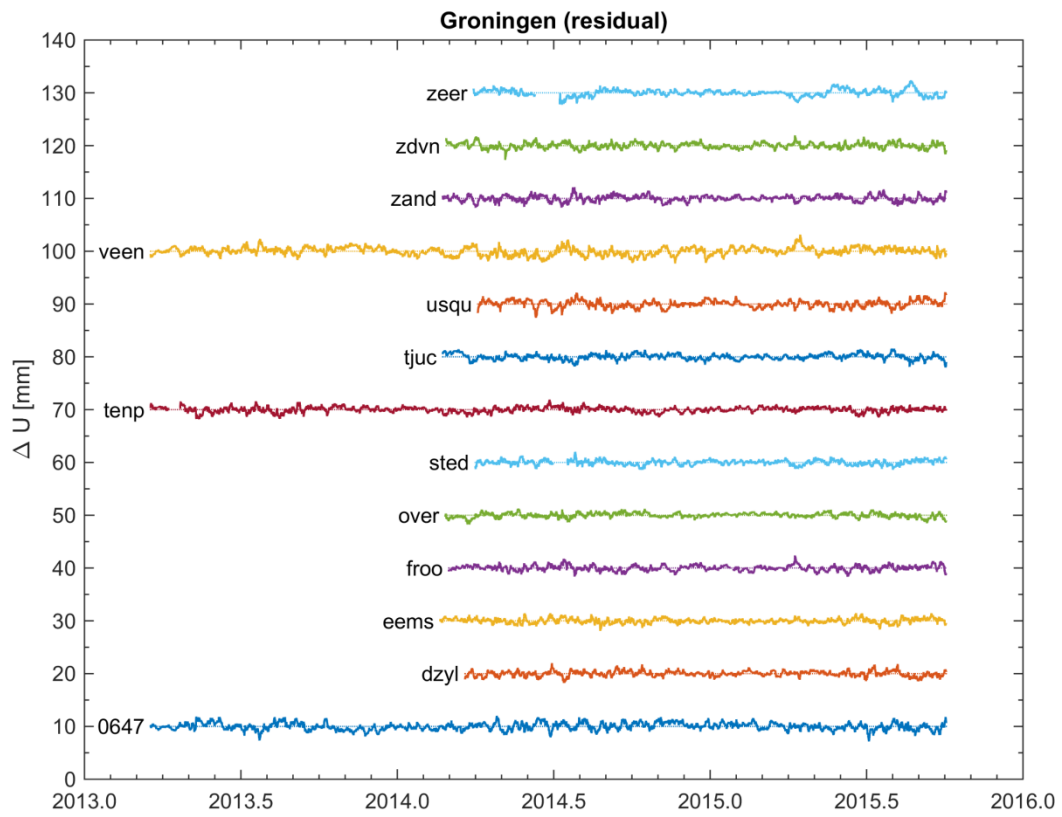


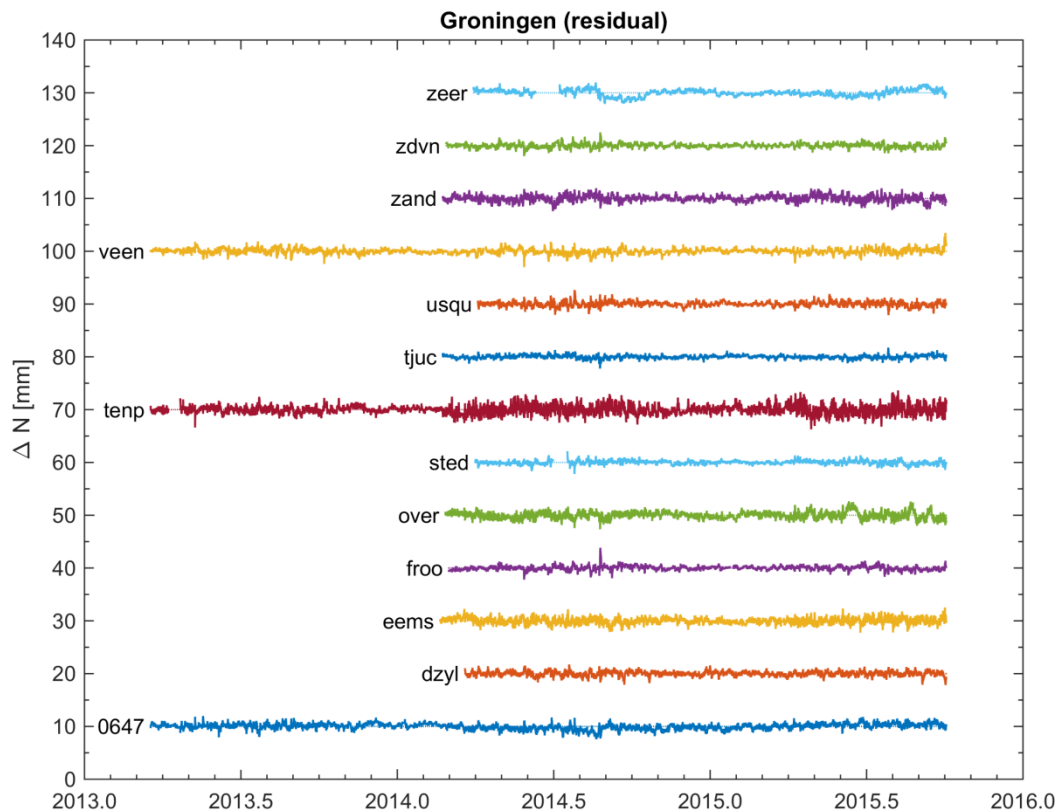
De plot rechtsonder toont de empirische co-variantie zoals berekend uit de residuen.

De snelheid voor **tenp** in de tabel en figuren is de snelheid in het midden van het data interval aangezien voor Ten Post (**tenp**) als enige een spline model is gebruikt, bestaande uit drie piecewise polynomial intervallen en continuïteit in de 1e afgeleide tussen de piecewise polynomials.

#### 4.5 Residuals

In de onderstaande figuren zijn ter controle de residuals geplot na schatting van het stations model. Deze geven de afwijkingen weer t.o.v. van het aangenomen model.





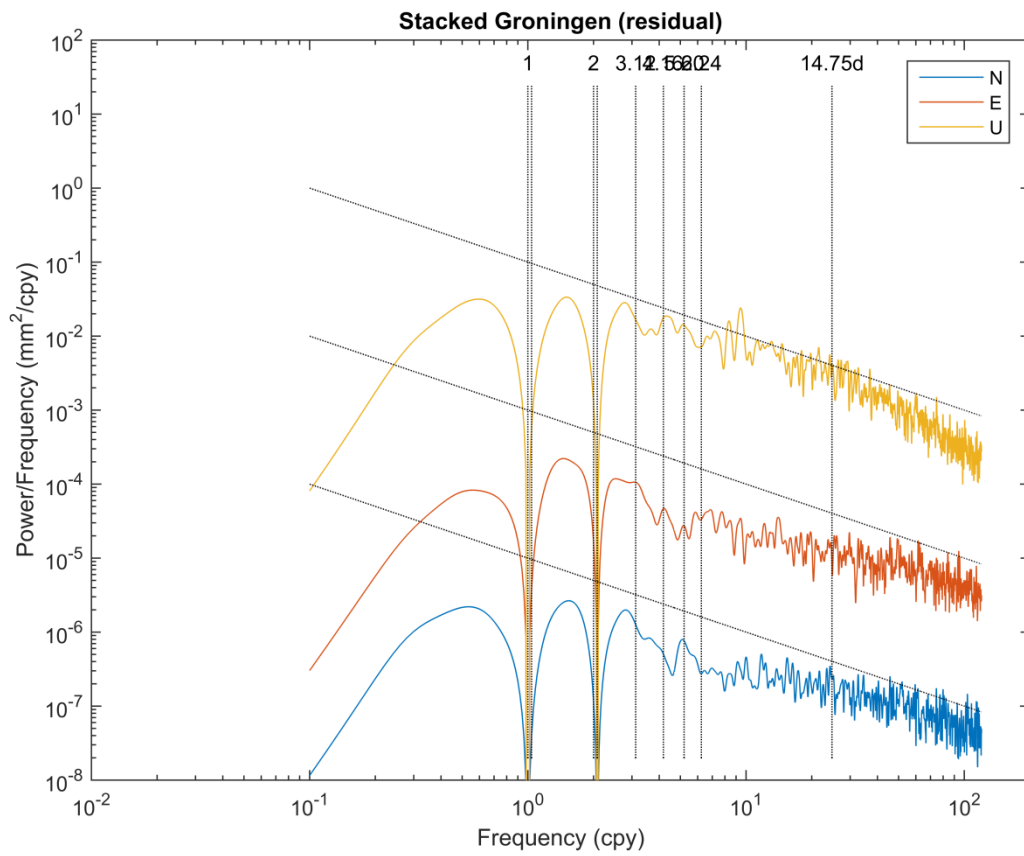
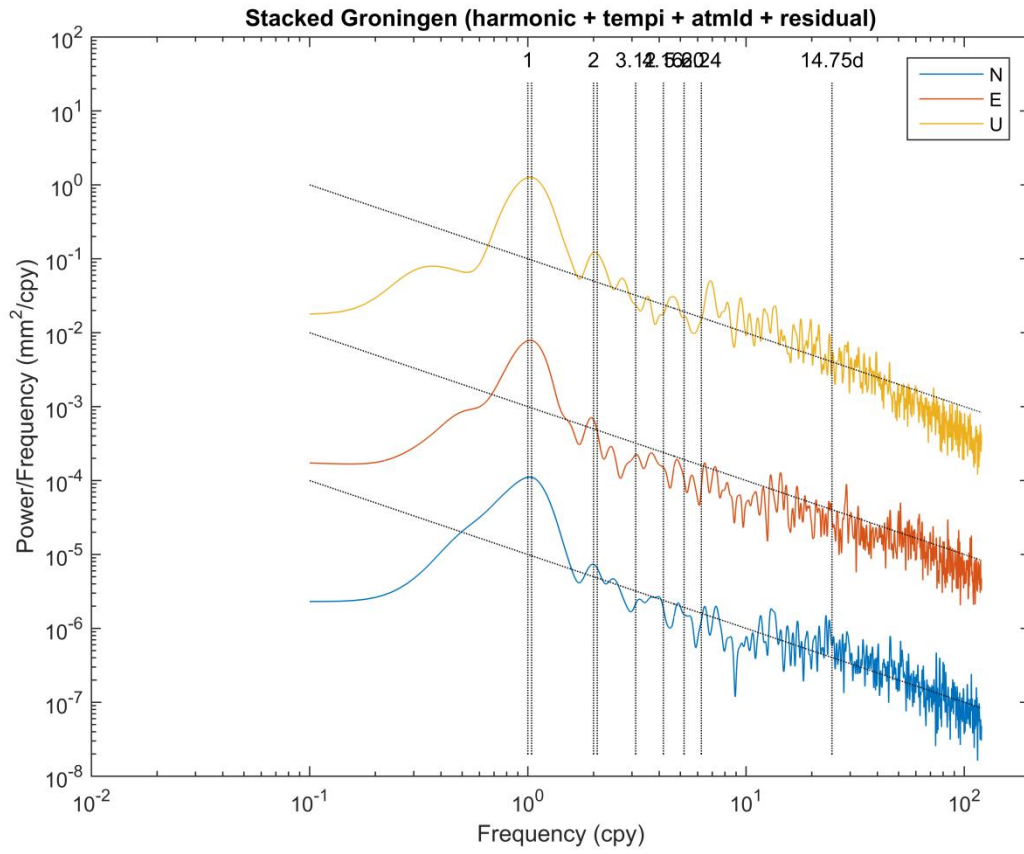
Wat opvalt is dat de residuals in de hoogte een ander gedrag vertonen dan de residuals in de andere twee componenten. Verder valt op dat sommige stations duidelijk kleinere residual hebben dan anderen. Dit is ook waarneembaar in de plot van de empirical covariance in sectie 4.4. Bijvoorbeeld, Ten Post (**tenp**) presteert aanzienlijk slechter in de North richting dan de overige stations.

De residual geven belangrijke informatie over de meetprecisie. Daarom worden deze in de volgende sectie nader geanalyseerd.

#### 4.6 Lomb-Scargle periodogram

Het Lomb-Scargle periodogram geeft belangrijke informatie over de meet- en modellering fouten. Het Lomb-Scargle periodogram kan berekend worden voor individuele stations, maar het is tevens mogelijk de periodogrammen van alle stations te stapelen (stacken) om zo een betere resolutie te bereiken.

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.

De eerste figuur laat duidelijk het effect zien van de harmonische perioden van 1 jaar en een half jaar. Door de 1 cpy en 2.08 cpy termen te schatten zien we een dramatische afname in de power in de 2<sup>e</sup> figuur. Behalve de verwijderde 1 cpy en 2.08 cpy perioden zijn er geen overtuigende andere perioden die op dit moment geschat moeten worden.

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. De horizontale componenten hebben weer een iets groter aandeel witte ruis.

De periodogrammen stellen ons in staat het kansmodel voor de GPS waarnemingen te bepalen. In de plaats van ongecorreleerde 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 in dit rapport nog niet uitgevoerd, maar wordt wel aanbevolen om dit te doen om zodoende realistische schattingen te krijgen van de standaard afwijking van verschillende parameters, waaronder de snelheden.

Geadviseerd wordt om i.p.v. een white noise model een gecombineerd (white/flicker/randomwalk) 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.

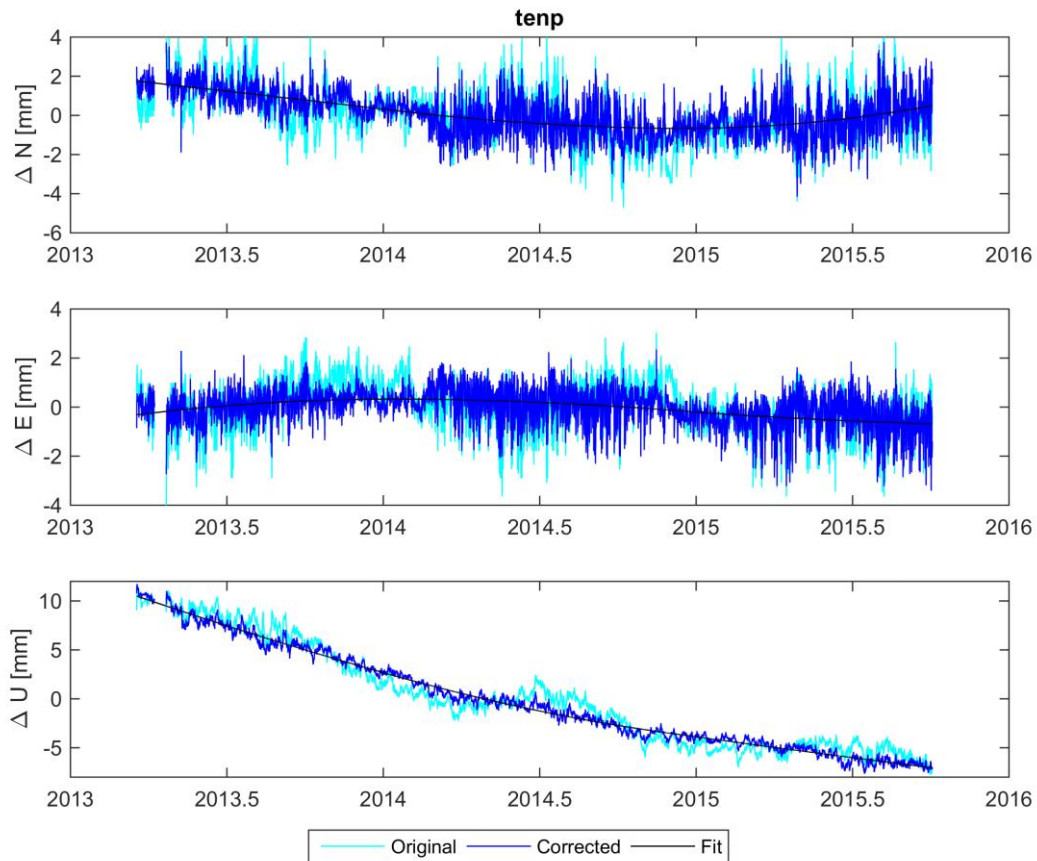
#### 4.6 Analyse invloed onderliggende trend model aanname – Case study Ten Post

De trend  $s(t)$  in het stations model kan een simpele lineaire trend zijn, maar ook hogere orde polynomen en splines zijn mogelijk. Omdat de meeste tijdseries slechts iets meer dan een jaar lang zijn is begonnen met een lineair model  $s(t) = x(t_0) + v * (t - t_0)$ . Alleen voor **tenp**, is vanwege de duidelijk niet lineaire beweging, naast een lineair model ook een spline model gebruikt. Het spline model is een *piecewise polynomial* van de derde orde met continuïteit in de eerste afgeleide (snelheid) in de *breakpoints*. De lengte van de piecewise polynomials is ongeveer 1 jaar. Dit houdt in dat **tenp** met drie piecewise polynomials is gemodelleerd.

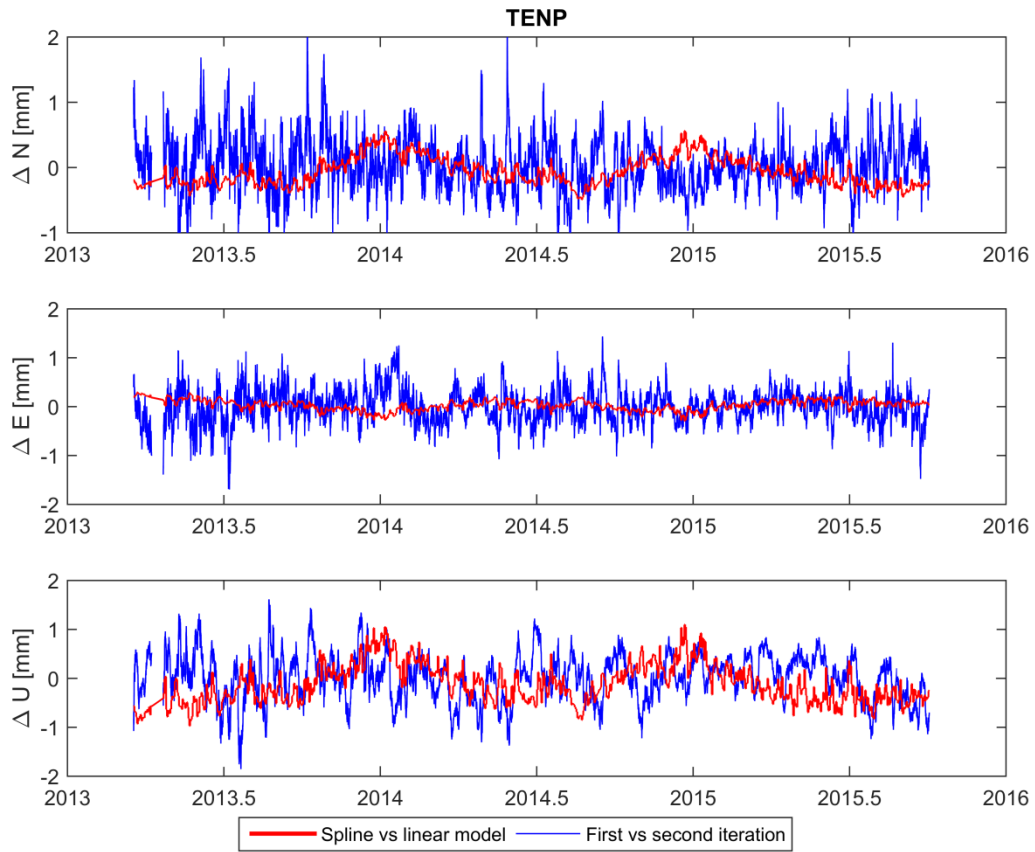
De onderstaande plot laat de uiteindelijke resultaten voor Ten Post (**tenp**) zien. De getoonde tijdseries is de gecorrigeerde tijdserie uit de tweede iteratie, zonder periodieke of verstoringe effecten, en is berekend uit de cubic spline fit  $\hat{s}(t)$  en residuen  $\hat{\epsilon}$

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

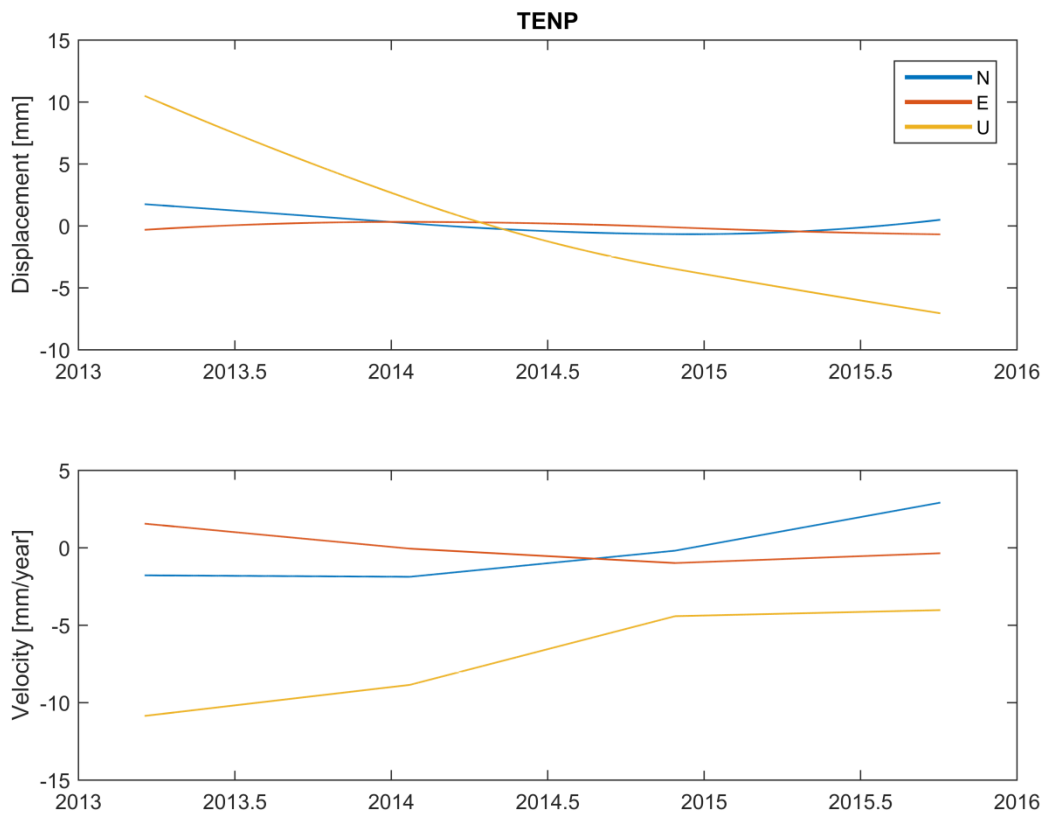
De cubic spline bestaat drie piecewise polynomial intervallen en continuïteit in de 1e afgeleide tussen de piecewise polynomials. De spline fit en residuen zijn bepaald uit de met de residual stack gecorrigeerde data.



Het onderliggende trend model is van relatief weinig invloed op de uiteindelijke tijdserie aangezien deze wordt gecorrigeerd met de residuen. Er is wel een indirecte invloed, aangezien de keuze voor het trend model de schatting van de overige parameters (harmonische, temperatuur invloed, etc.) beïnvloed. De verschillen tussen een lineair en spline model, en tussen de eerste en tweede iteratie, zijn hieronder weergegeven. De verschillen ten gevolge van het gekozen onderliggende model zijn kleiner dan 1 mm.



In de onderstaande figuur is het geschatte trend model (displacement) voor **tenp** geplot, en de eerste afgeleide daarvan (snelheid).



De daling in Ten Post (**tenp**) laat een afnemende trend zien. Dit is ook goed te zien in de plot van de snelheid, van ongeveer -10 mm/jaar in 2013 tot -5 mm/jaar in 2015.

In de plot van de snelheid is tevens te zien dat het spline model een piecewise polynomial model is van de derde orde (kwadratisch) met continuïteit in de eerste afgeleide (snelheid) in de breakpoints. Dit houdt in dat de snelheid (1<sup>e</sup> afgeleide) een piecewise linear polynoom is met continuïteit in de (snelheid) functie zelf. De break points zijn willekeurig gekozen, deze verdelen de data set in drie gelijke intervallen. De keuze heeft geen relatie met variaties in de productie van de gaswinning. Een verdere optimalisatie van de break points, op basis van een best fit aan de data, en/of productie gegevens, is wellicht mogelijk.

#### 4.8 Vergelijking met fase 1

[Verschijnt in versie 1.2]

### 5 Gipsy/Oasis processing

[Verschijnt in versie 1.2]

### 6 Conclusie

Het doel van dit onderzoek was de GNSS tijdreeksen van Groningen zoals berekend door 06-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 gelijdelijk afneemt en goed kan worden beschreven met een spline model. De daling in Ten Post was ongeveer -10 mm/jaar in 2013 en is teruggelopen tot ongeveer -5 mm/jaar in 2015.

De berekeningen van 06-GPS zijn gecontroleerd door middel van een onafhankelijke verwerking van de GPS data aan de TU Delft m.b.v. de Gipsy/Oasis software van Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA. Hierbij is gebruik gemaakt van het *Precise Point Positioning* (PPP) concept in combinatie met ambiguity resolution. Deze verwerking laat toe de ruwe GPS data (in RINEX format) station voor station te verwerken; er is dus geen sprake meer van referentiestations. Het referentie frame komt van de gebruikte satelliet banen en klokken, welke door JPL op basis van een globaal netwerk worden berekend. Door de aard van de berekeningen zijn de resultaten van de PPP minder precies dan de netwerk berekening zoals uitgevoerd door 06-GPS; echter de geschatte trends, afgezien van constante snelheid (referentie frame) die gelijk is voor alle stations, komen overeen met die van 06-GPS.



Gezien de beperkt beschikbare tijd voor dit onderzoek zijn niet alle vragen in evenveel detail onderzocht en is de huidige versie van het rapport nog niet afgerond: de vergelijking met de oplossing van 30 April 2015 en de resultaten van de berekeningen m.b.v. Gipsy/Oasis worden aan versie 1.2 toegevoegd.

De belangrijkste onderzoek vragen die nog open staan zijn: het kansmodel van de GNSS metingen, en de verklaring voor de station afhankelijke effecten.

Een eerste aanzet voor het GNSS kansmodel 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.

Verder wordt aanbevolen verder onderzoek te doen naar de periodieke (seizoen) effecten op de stations. Hiervoor kan het nodig zijn meer in detail naar de constructie van de stations te kijken. Voorts wordt aanbevolen te bekijken of dezelfde effecten in andere datasets, zoals InSAR, zijn waar te nemen.

## **Referenties**

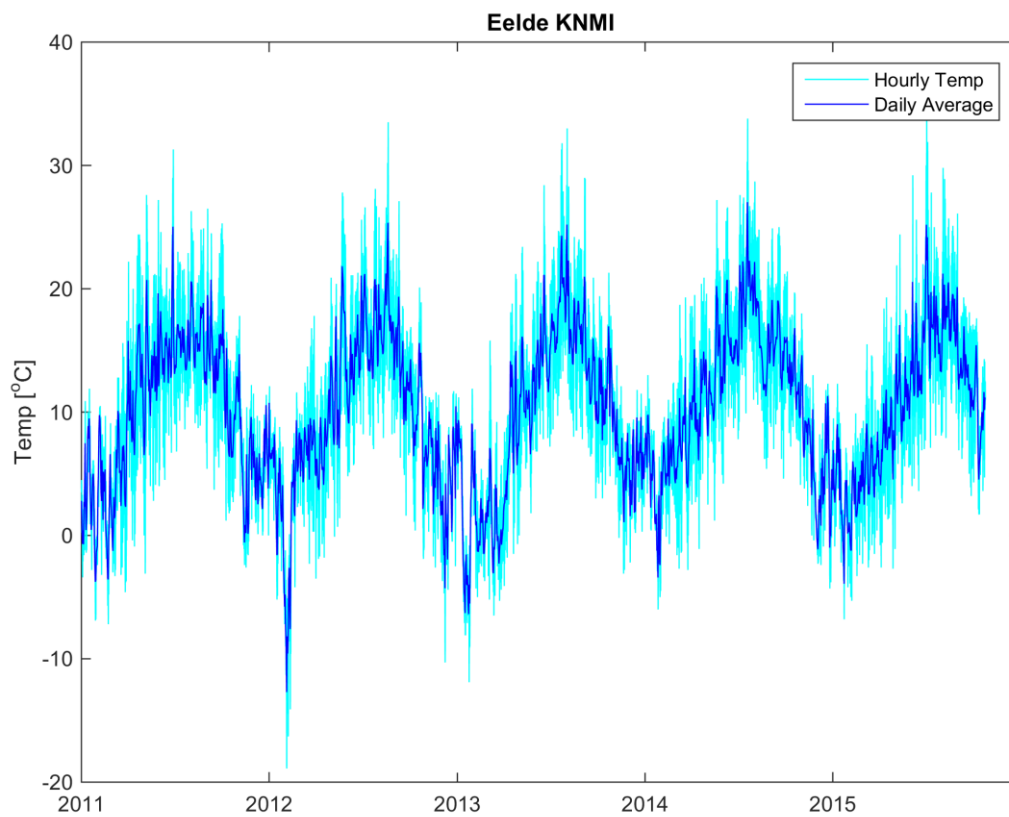
[1] Hans van der Marel, GNSS Processing Groningen – Fase 1, Rapport voor Staatstoezicht op de Mijnen (SodM), 30 April 2015, Versie 1.0, 32p., TU Delft, 2015.

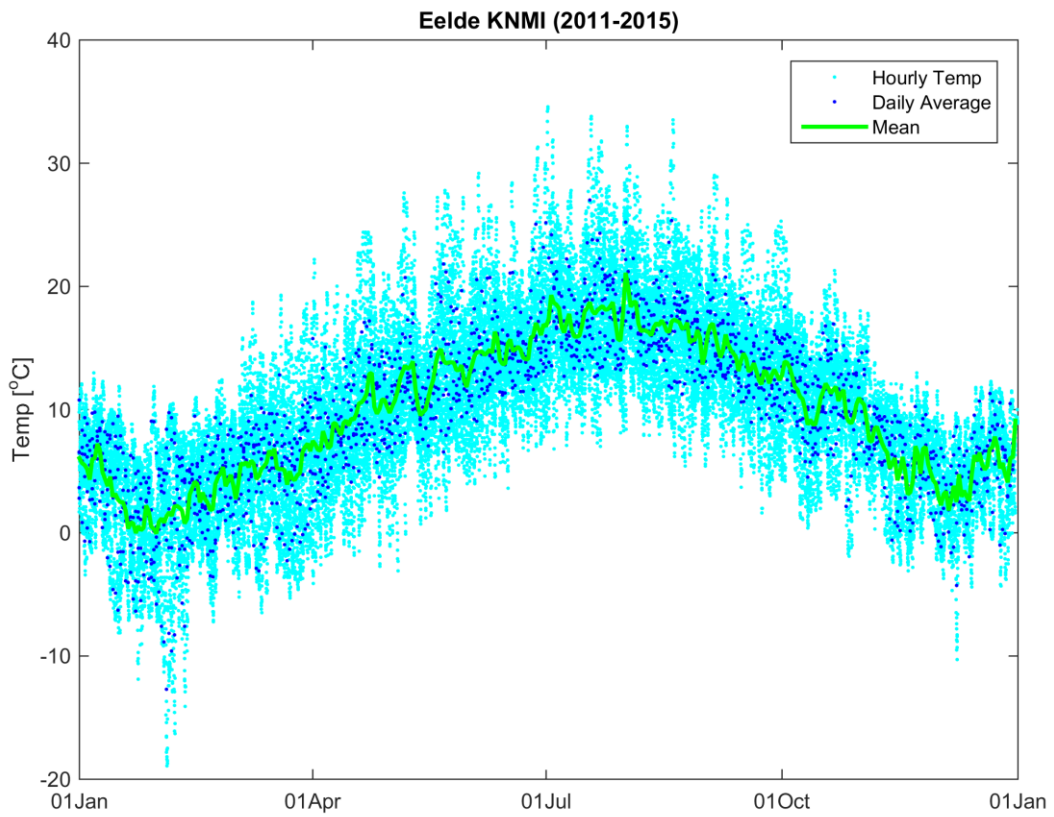
## Bijlagen

### Bijlage A: Meteo data KNMI station Eelde (280)

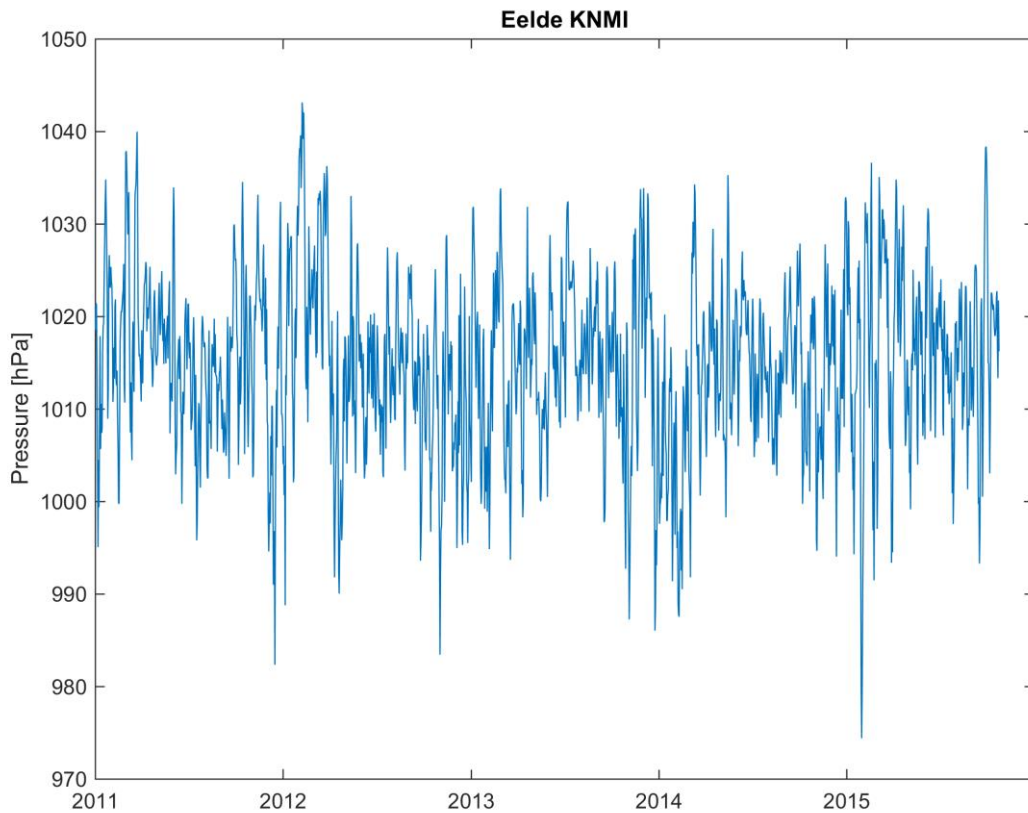
Het Matlab script `gmeteo.m` leest uurlijkse meteo data van het KNMI weerstation Eelde. Het script berekend ook het dagelijkse gemiddelde van de luchtdruk en temperatuur. De data wordt opgeslagen in een mat file `gmeteo.mat` die voor de tijdseries analyse wordt gebruikt. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een interpolatie op basis van de dagelijkse gemiddelden.

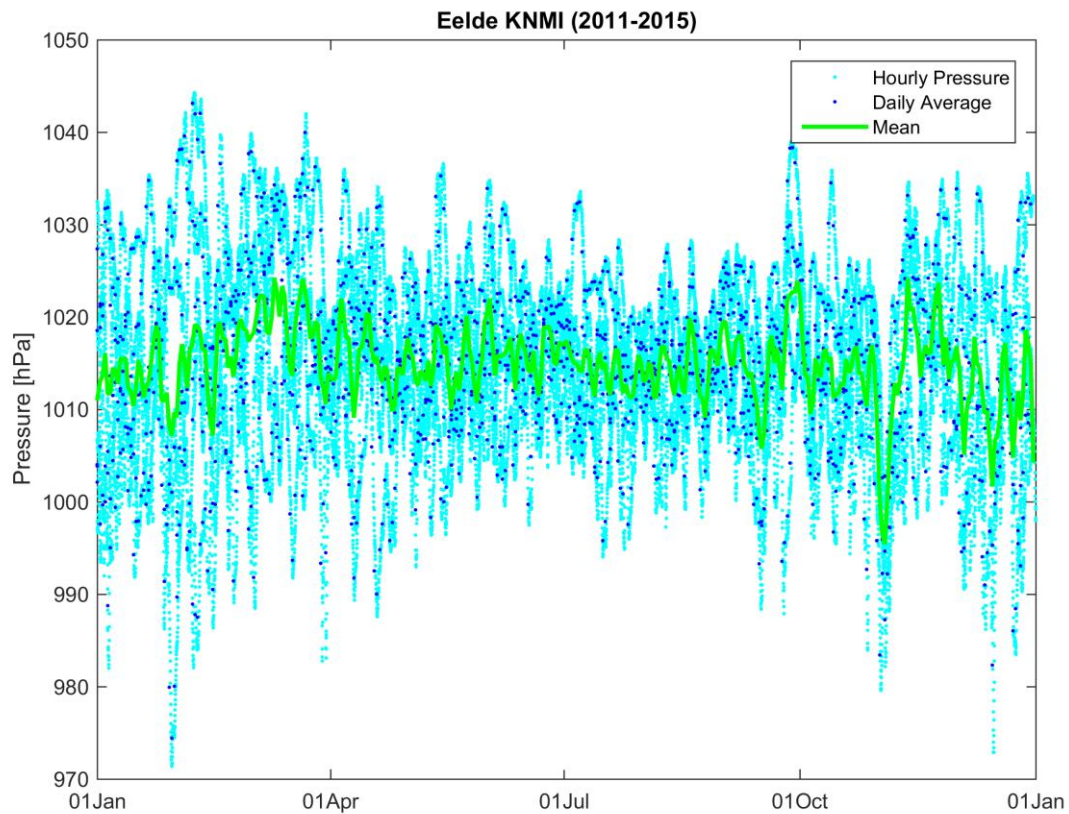
De onderstaande figuren geven de temperatuur weer voor de periode 2011-2015. In de tweede figuur is de temperatuur geplot ten opzichte van de dag van het jaar: deze figuur laat een duidelijke seizoen-variantie zien.





De luchtdruk is op een vergelijkbare manier geplot. Deze wordt in de onderstaande figuren weergegeven.



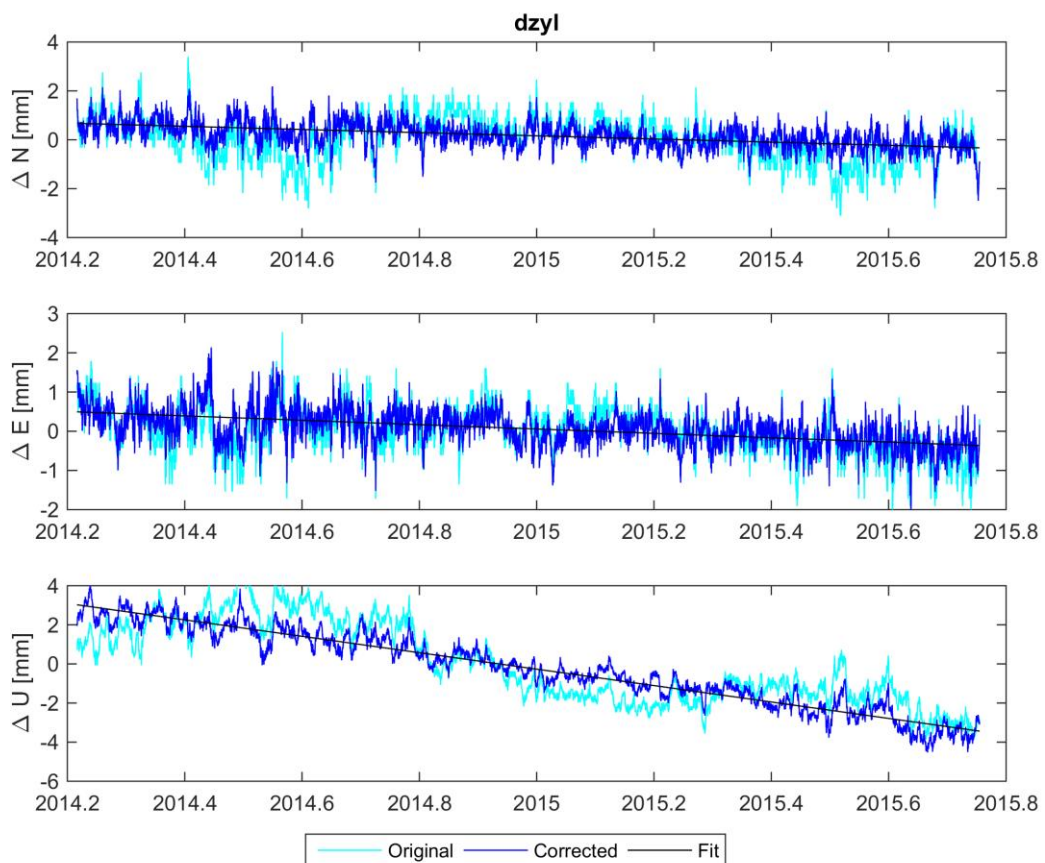
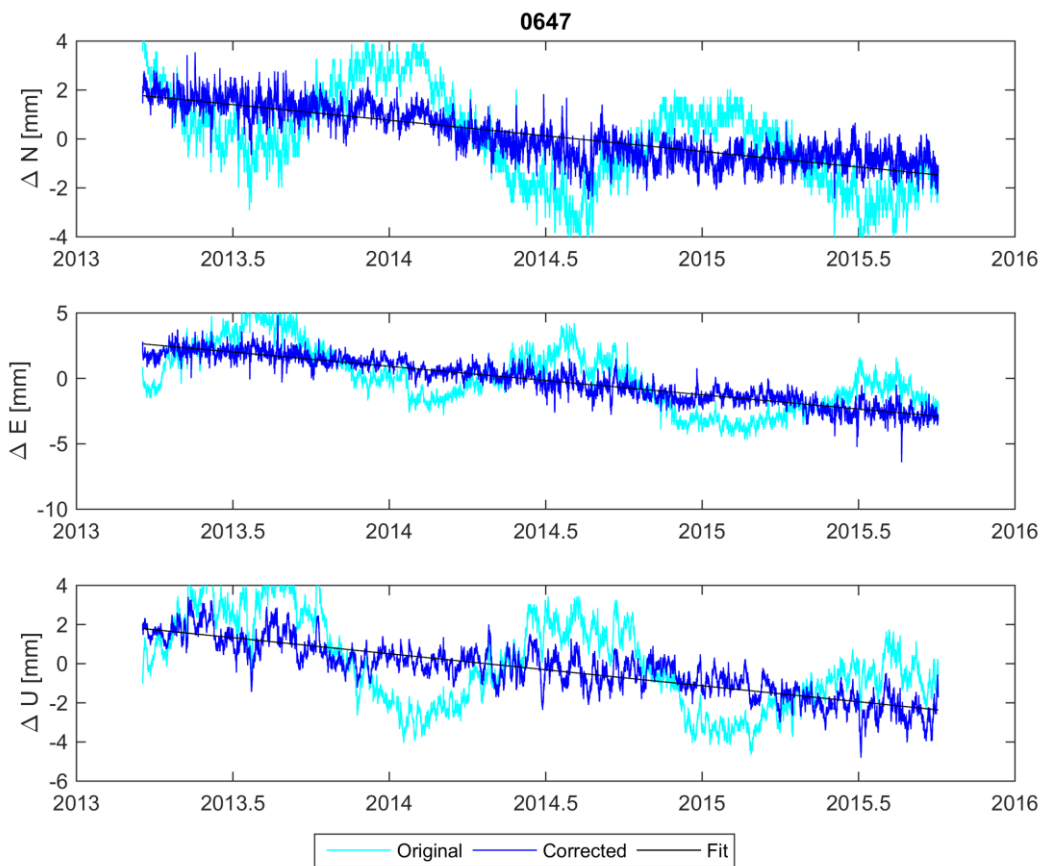


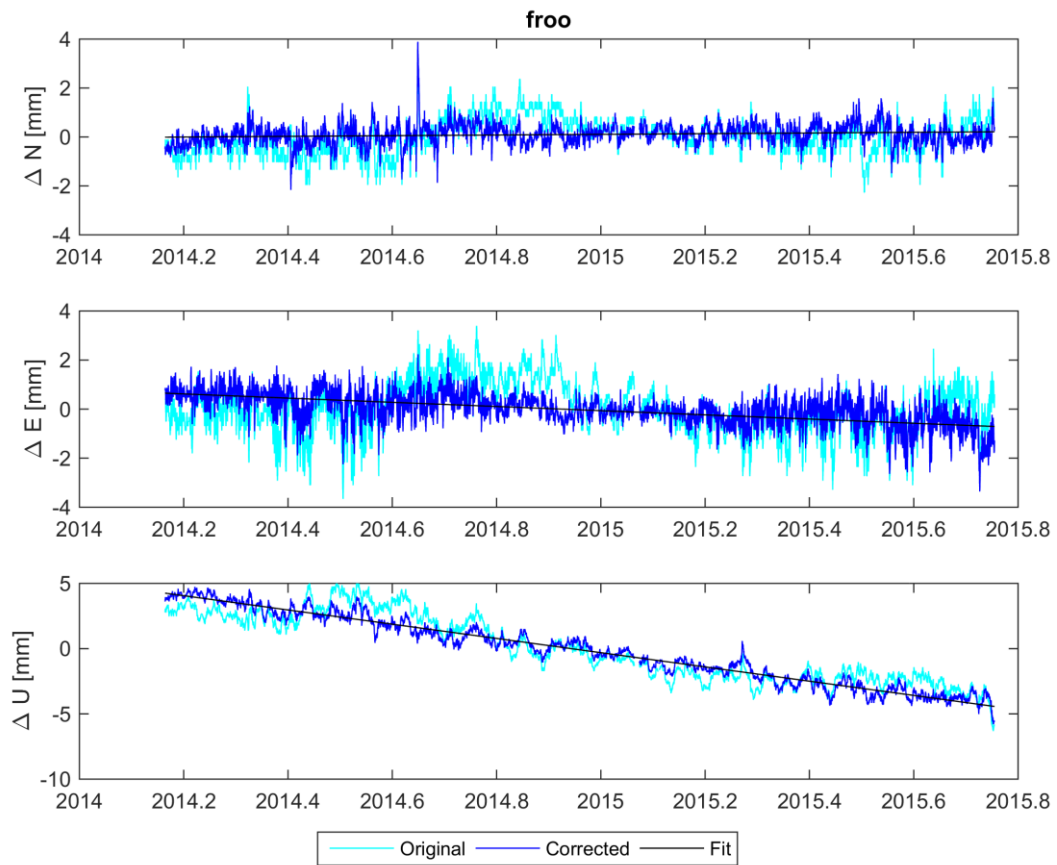
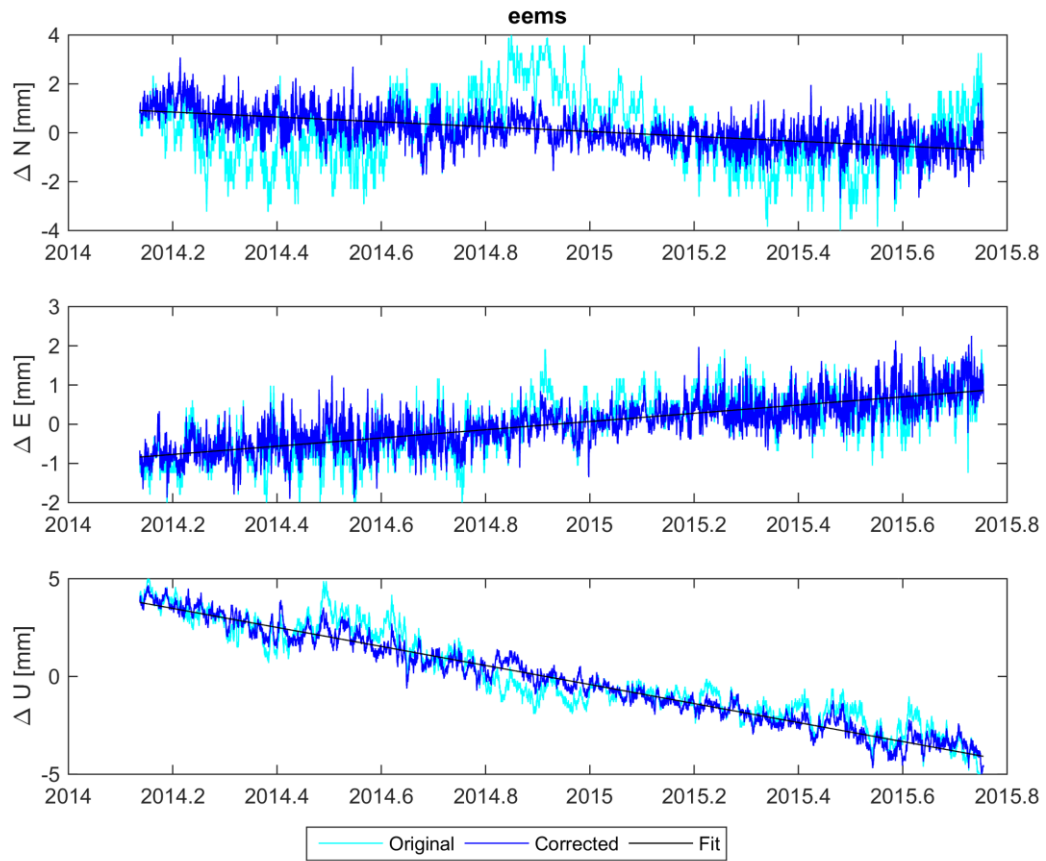
De seizoen-variantie in de luchtdruk is aanzienlijk minder dan de seizoen-variantie in de temperatuur.

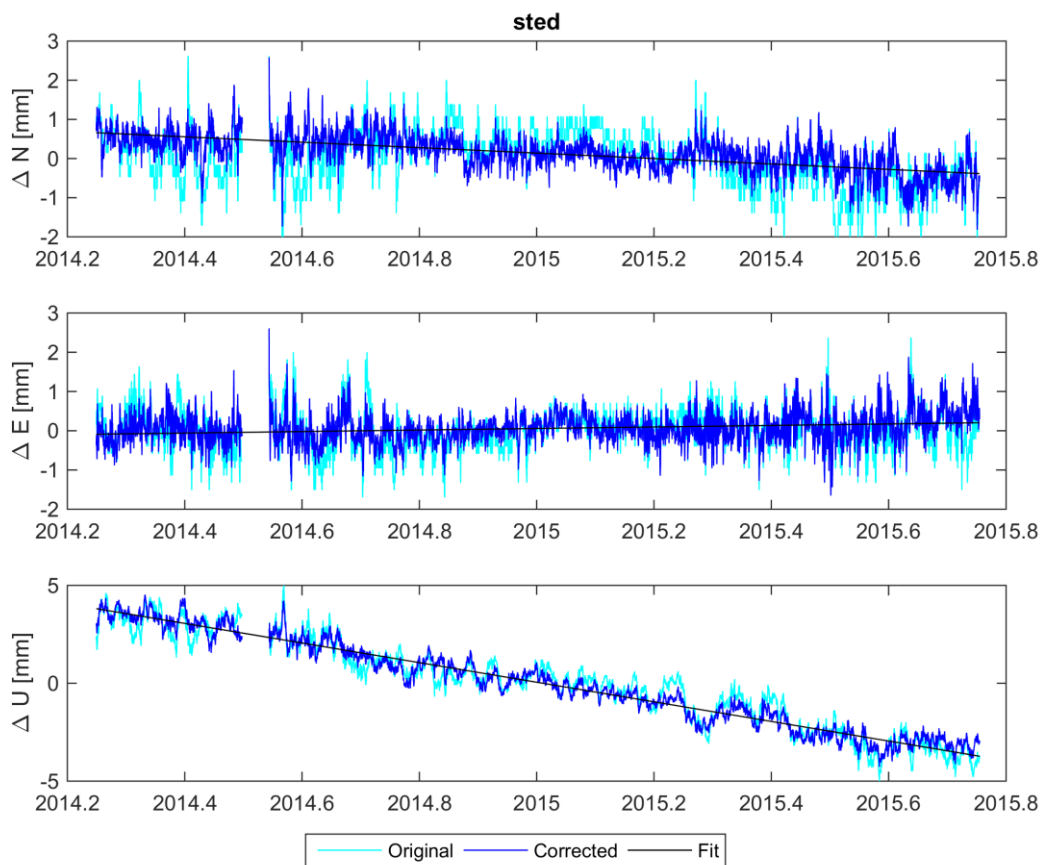
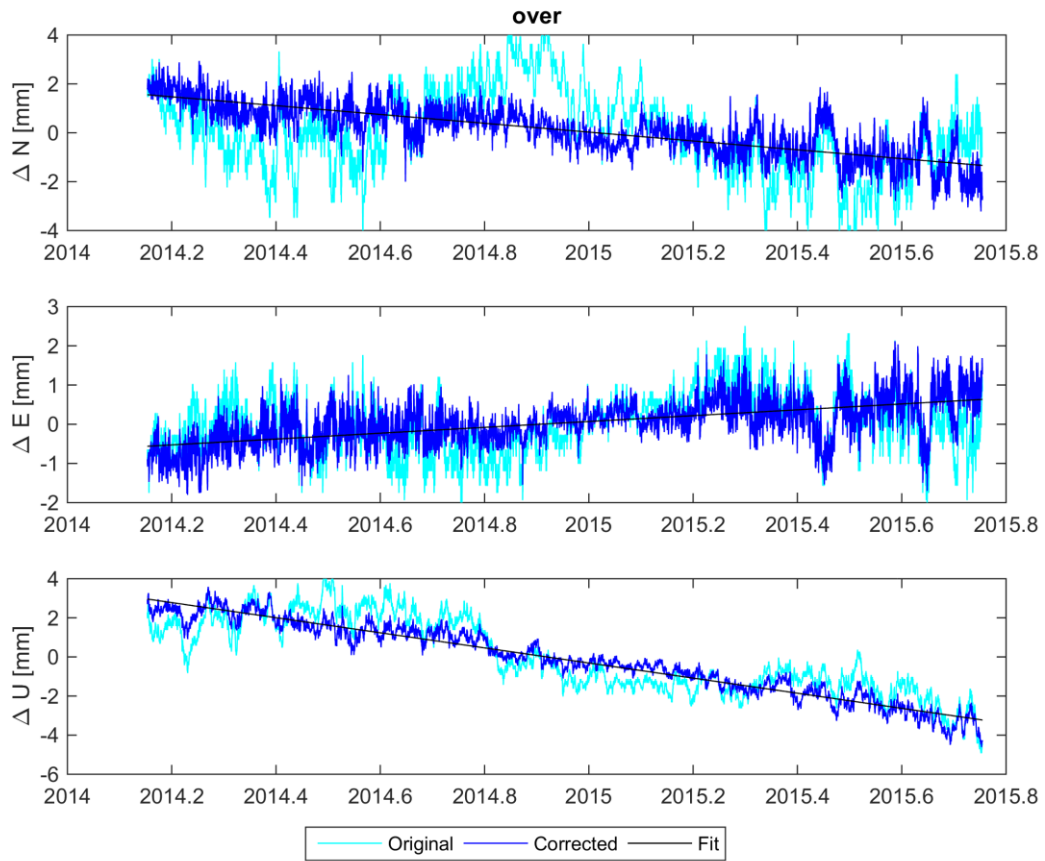
Temperatuur en luchtdruk kunnen een (grote) invloed hebben op GPS tijdseries. Bij de temperatuur moet men daarbij denken aan lokale effecten, zoals autonome bewegingen van een station onder invloed van temperatuursveranderingen (bv uitzetting van een gebouw of mast), maar ook secundaire effecten in de modellering van b.v. de atmosfeer. Luchtdruk is vooral gerelateerd aan atmospheric loading en variaties in de luchtdruk resulteren in kleine verplaatsingen van het station. Afhankelijk van de gekozen methode van processing kunnen deze effecten zich manifesteren in GPS tijdseries.

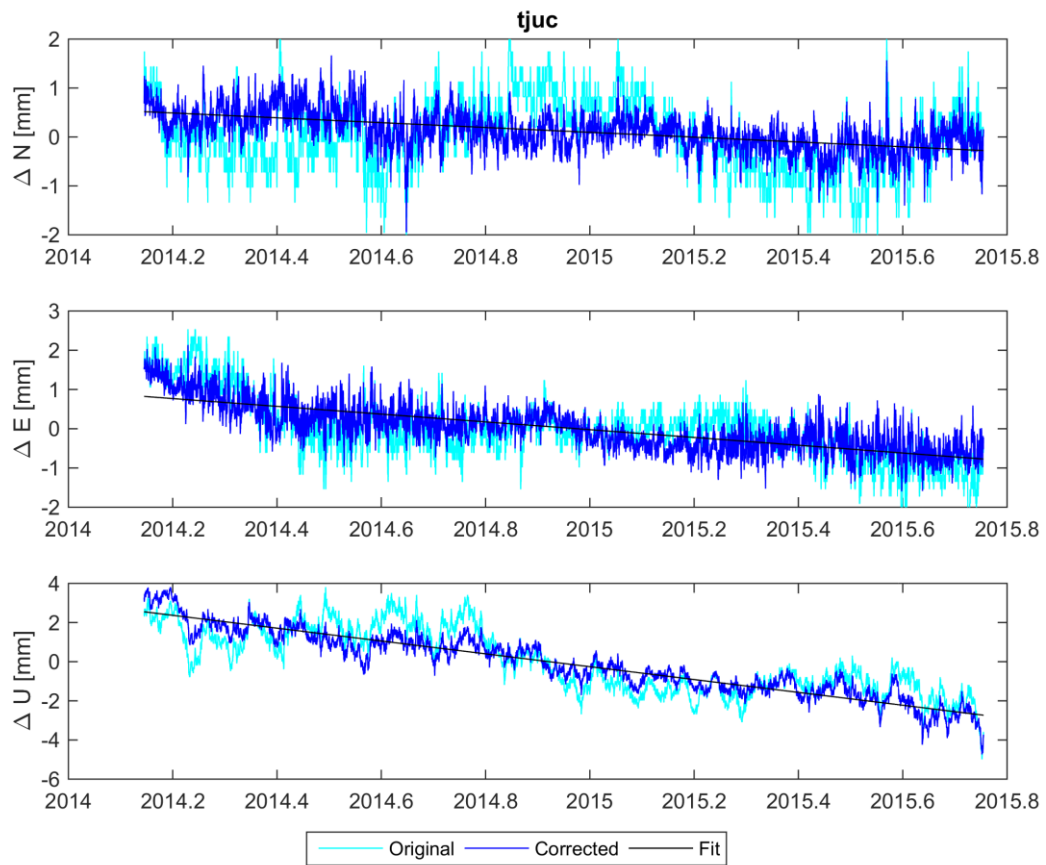
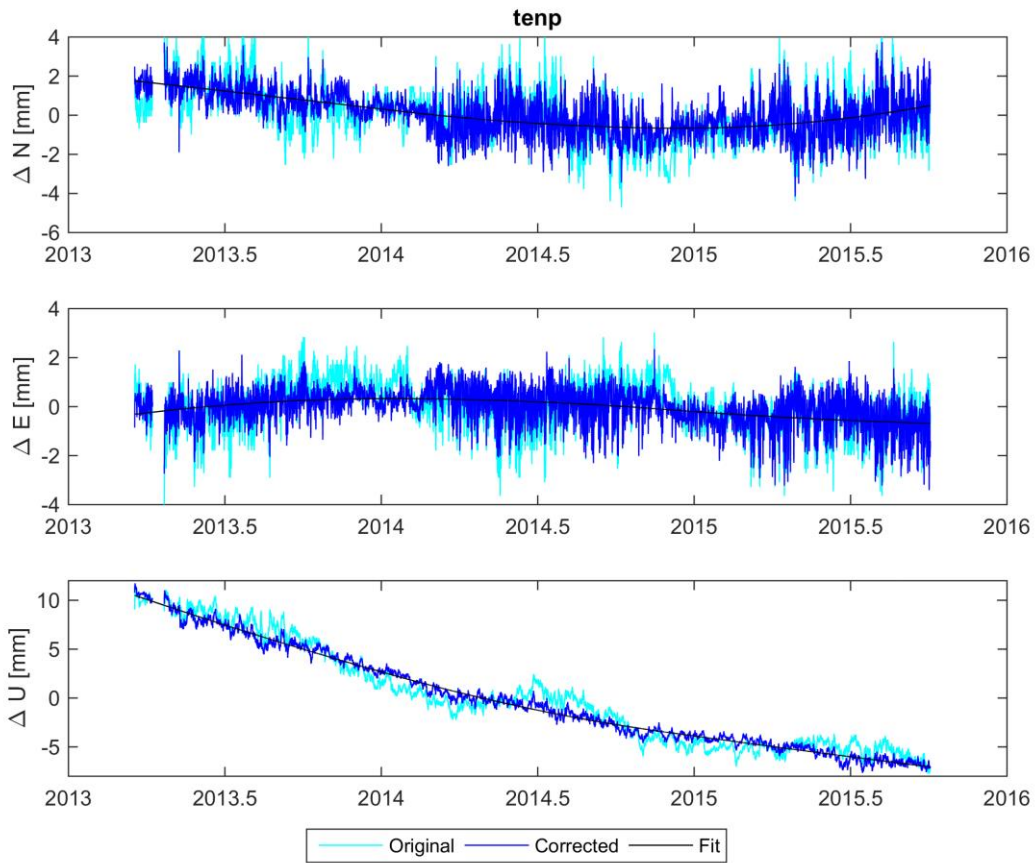
Wat opvalt is dat zowel temperatuur als luchtdruk niet met een zuiver periodieke functie zijn te beschrijven. Temperatuur en luchtdruk worden daarom als onafhankelijke parameters in de analyse meegenomen.

## Bijlage B: Resultaten per station

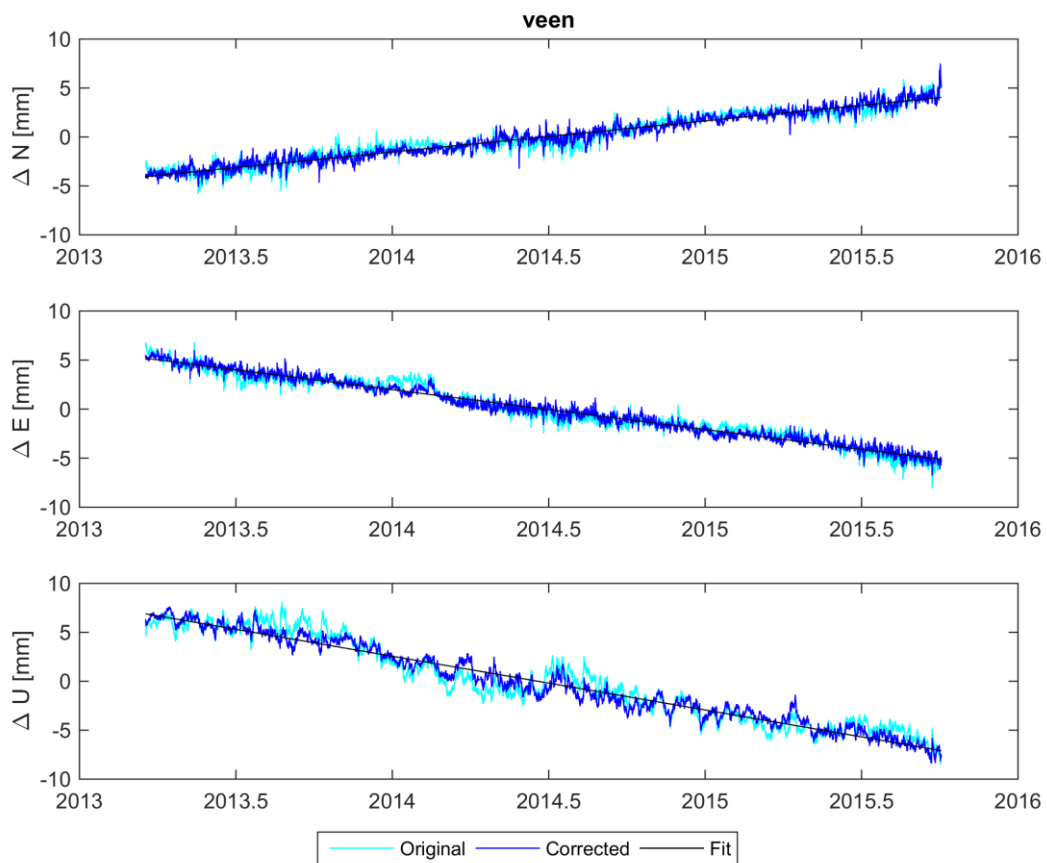
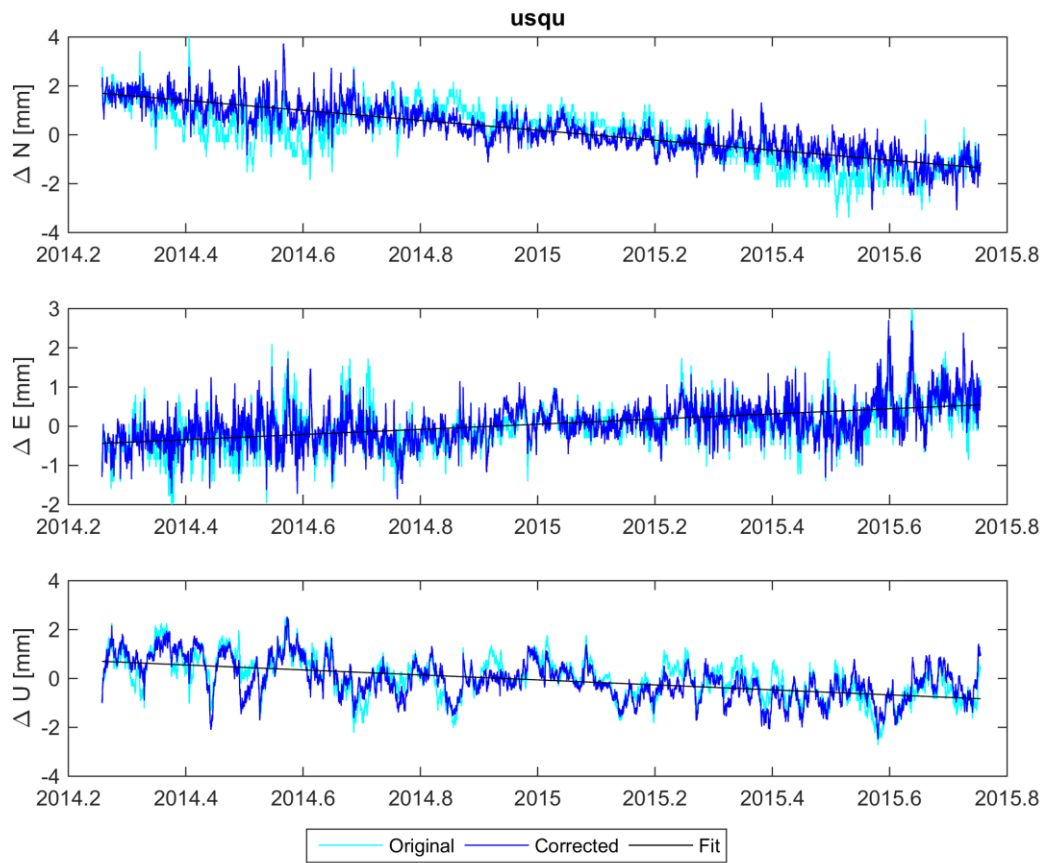


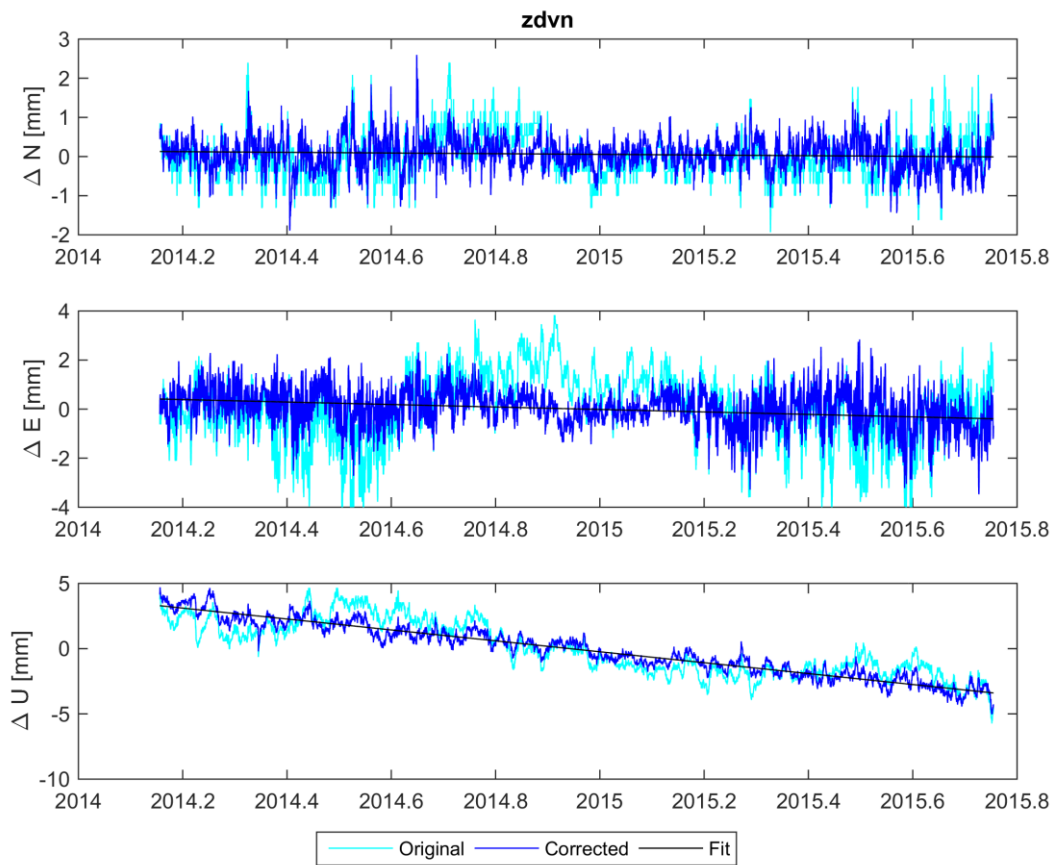
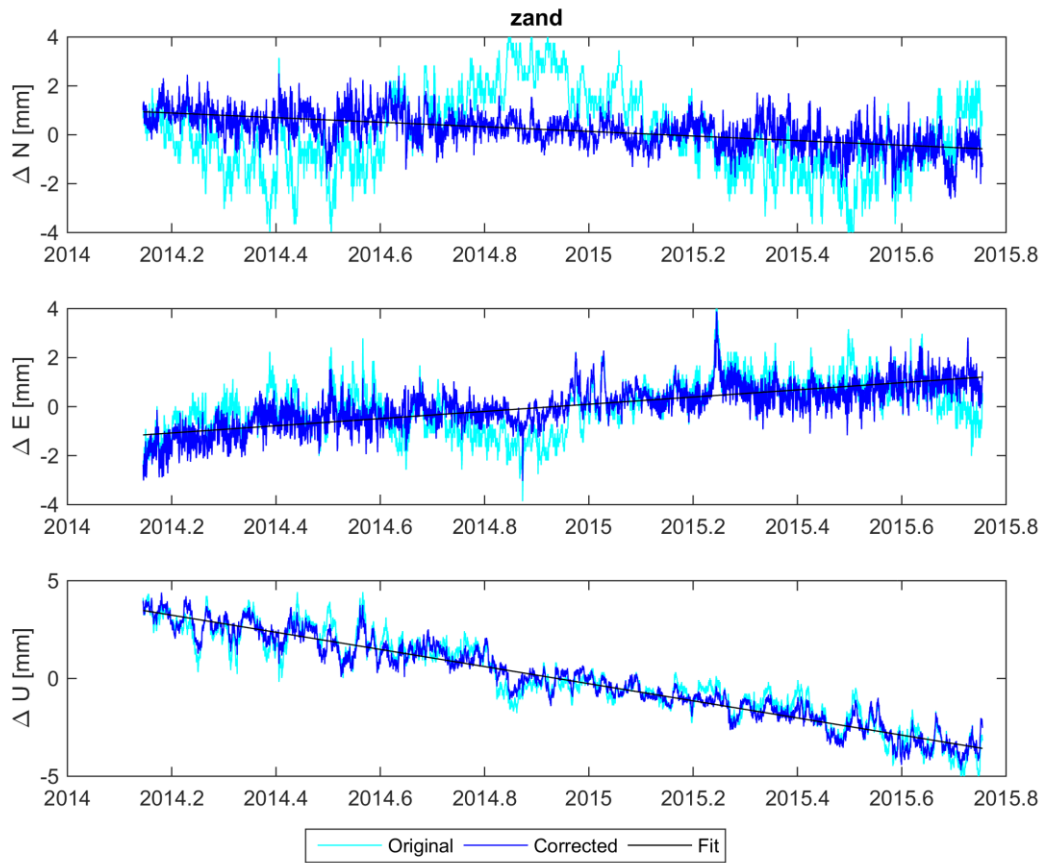


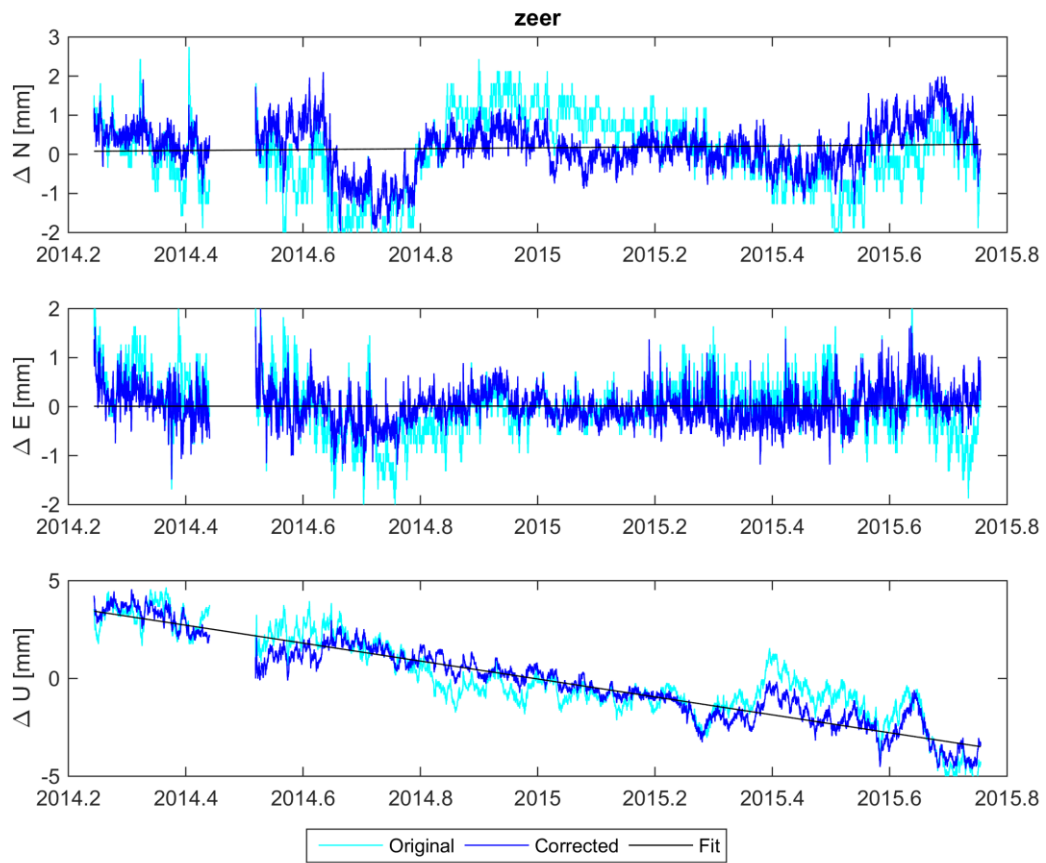












[einde van dit document]