



**Vlaanderen**  
is wetenschap



16\_106\_1  
WL rapporten

## Haven Antwerpen – Kieldrechtsluis

Meting overvulling en overlediging

DEPARTEMENT  
**MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN**

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Haven Antwerpen - Kioldrechtsluis

## Meting overvulling en overlediging

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.



#### Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

#### Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017  
D/2017/3241/144

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017). Haven Antwerpen - Kieldrechtsluis: Meting overvulling en overlediging. Versie 4.0. WL Rapporten, 16\_106\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

#### Documentidentificatie

|                 |                                                                           |                    |                                                      |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------|
| Opdrachtgever:  | Afdeling Maritieme Toegang                                                | Ref.:              | WL2017R16_106_1                                      |
| Keywords (3-5): | Maritime lock, measurements, filling, emptying, overtravel, hawser forces |                    |                                                      |
| Tekst (p.):     | 22                                                                        | Bijlagen (p.):     | 58                                                   |
| Vertrouwelijk:  | <input checked="" type="checkbox"/> Ja                                    | Vrijgegeven vanaf: | 02/05/2022                                           |
|                 |                                                                           | Uitzondering:      | <input checked="" type="checkbox"/> Vlaamse overheid |

|            |                |
|------------|----------------|
| Auteur(s): | Vercruysse, J. |
|------------|----------------|

#### Controle

|                | Naam           | Handtekening                                                                         |
|----------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Revisor(en):   | Verelst, K.    |   |
| Projectleider: | Vercruysse, J. |  |

#### Goedkeuring

|                              |              |                                                                                      |
|------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Coördinator onderzoeksgroep: | Peeters, P.  |   |
| Afdelingshoofd:              | Mostaert, F. |  |







# Abstract

Op vraag van de afdeling Maritieme Toegang (contactpersoon: Wim De Cock) heeft het Waterbouwkundig Laboratorium op 19/10/2016 en 20/10/2016 een meetcampagne uitgevoerd in de Kieldrechtsluis. Het doel van deze meting is om het over/ondervullen en over/onderledigen van de sluis te kwantificeren. Door de inertie van het nivelleersysteem staat het water niet onmiddellijk stil wanneer het kolkpeil het eindpeil bereikt. Bij vullen ontstaat er een uitdempend patroon van over- en ondervullen en bij ledigen ontstaat er een uitdempend patroon van over- en onderledigen. Dit zorgt voor een waterstandsverschil over de roldeuren tijdens openen. Bijkomend zullen de meetresultaten op vlak van nivelleertijd, stijgsnelheid van het kolkpeil en langshelling ook vergeleken worden met de meetresultaten van de in 2008 uitgevoerde meting in de Berendrechtsluis en de resultaten van het voor het ontwerp van de Kieldrechtsluis gebruikte hydraulisch netwerkmodel.

De metingen in de Kieldrechtsluis zijn analoog uitgevoerd als deze in 2007 en 2008 in de Zandvlietluis- en Berendrechtsluis. Door middel van druksensoren geplaatst in de laddernissen wordt het kolkpeil en de optredende langse waterspiegelhellingen in de kolk opgemeten. Bijkomend wordt ook een druksensor geplaatst in het Deurganckdok en in de Waaslandhaven. Hiernaast worden door het Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen (GHA) de continue metingen van de peilen (kolk, Waaslandhaven en Deurganckdok), de positie van de hefschuiven en de stroom van de deuren aangeleverd.

In totaal zijn gedurende de meetperiode 27 nivelleringen uitgevoerd. Hierbij werd afwisselend deurcombinatie 13 en 23 gebruikt. De door WL en GHA opgemeten peilen vallen zo goed als samen. De schuiven openen in ca. 150 s tot een hoogte 7.0 m (i.e. de rioolhoogte). Dit is een halvering van de heftijd ten opzichte van de schuiven in de Berendrechtsluis. De opgemeten nivelleringen zijn vergeleken met de in 2008 opgemeten nivelleringen in de Berendrechtsluis. Het nivelleren van de Kieldrechtsluis wordt iets sneller uitgevoerd dan de Berendrechtsluis. De vermoedelijk oorzaak hiervan is dat bij de meting in de Kieldrechtsluis niet de uiterste deurcombinatie gebruikt wordt en dat de schuiven sneller geopend worden. Bij het vergelijken met de hydraulische simulaties valt ook op dat het ledigen van de Kieldrechtsluis goed voorspeld wordt met het hydraulisch netwerkmodel maar dat voor vullen de verliezen wat overschat werden. De opgemeten extrema van de end-to-end langshellingen in de Kieldrechtsluis zijn van een zelfde grootteorde als bij de meting in de Berendrechtsluis.

Voor het analyseren van de overvulling en onderlediging werd de tijd berekend tussen *einde nivellering* (i.e. eerste tijdstip dat het restverval gelijk is aan 0) en *start openen* deuren en *einde openen* deuren. Hieruit volgde dat van de 27 nivelleringen in totaal bij 14 nivelleringen de tijd tussen *einde nivelleren* en *start openen* deuren kleiner is dan 60 s. Bij 7 nivelleringen bedraagt deze tijd tussen 60 s en 120 s en bij 6 nivelleringen is deze tijd groter dan 120 s. Het maximale opgemeten waterstandsverschil tijdens *start openen deuren* is 0.12 m aan zijde Waaslandhaven en 0.08 m aan zijde Deurganckdok. De openingstijd van de deuren bedraagt steeds 249 s en op het tijdstip *einde openen* is het waterstandsverschil beperkt tot enkele centimeters.



# Inhoudstafel

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Abstract .....                                                | III |
| Inhoudstafel.....                                             | V   |
| Lijst van de tabellen.....                                    | VI  |
| Lijst van de figuren .....                                    | VII |
| 1 Inleiding .....                                             | 1   |
| 2 Meetgegevens .....                                          | 3   |
| 2.1 Metingen WL .....                                         | 3   |
| 2.2 Metingen GHA .....                                        | 5   |
| 2.3 Verwerking .....                                          | 6   |
| 3 Metingen .....                                              | 8   |
| 3.1 Overzicht geregistreerde nivelleringen .....              | 8   |
| 3.2 Nivelleren .....                                          | 9   |
| 3.3 Overvullen en overledigen .....                           | 14  |
| 4 Simulatie .....                                             | 17  |
| 5 Conclusie.....                                              | 20  |
| 5.1 Metingen .....                                            | 20  |
| 5.2 Simulatie .....                                           | 21  |
| 5.3 Aanbevelingen .....                                       | 21  |
| 6 Referenties .....                                           | 22  |
| Bijlage A : Nauwkeurigheid langshelling.....                  | B1  |
| Bijlage B : Resultaten per nivellering.....                   | B2  |
| Bijlage B.1 – Tabel.....                                      | B2  |
| Bijlage B.2 – Figuren tijdschaal overvulling/overledigen..... | B5  |
| Bijlage B.3 – Figuren tijdschaal nivellering .....            | B32 |

## Lijst van de tabellen

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 – Technische specificaties druksensoren.....                               | 3  |
| Tabel 2 – Geregistreerde schuttingen .....                                         | 9  |
| Tabel 3 – Tijdstip openen deuren na einde nivelleren en bijhorend restverval ..... | 15 |
| Tabel 4 – Resultaten nivellering .....                                             | B3 |
| Tabel 5 – Resultaten per nivellering – openen roldeuren.....                       | B4 |

# Lijst van de figuren

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 1 – Illustratie nivelleersysteem Kieldrechtsluis .....                                                                     | 1  |
| Figuur 2 – Illustratie meetopstelling.....                                                                                        | 3  |
| Figuur 3 – Locatie druksensoren WL .....                                                                                          | 4  |
| Figuur 4 – Locatie meetpunten tijdens meetcampagne E in de Berendrechtsluis.....                                                  | 5  |
| Figuur 5 – Meting Kieldrechtsluis – end-to-end langshellingen .....                                                               | 7  |
| Figuur 6 – Voorbeeld nivellering vullen bovenhoofd (nr. 27) .....                                                                 | 10 |
| Figuur 7 – Voorbeeld nivellering ledigen benedenhoofd (nr. 16) .....                                                              | 11 |
| Figuur 8 – Nivelleertijd in functie van verval.....                                                                               | 12 |
| Figuur 9 – Extrema stijgsnelheid in functie van verval .....                                                                      | 13 |
| Figuur 10 – Extremum langshelling in functie van verval.....                                                                      | 13 |
| Figuur 11 – Vergelijking opgemeten en met LOCKSIM gesimuleerde nivelleerkromme voor vullen<br>bovenhoofd (nivellering 25) .....   | 17 |
| Figuur 12 – Vergelijking opgemeten en met LOCKSIM gesimuleerde nivelleerkromme voor ledigen<br>benedenhoofd (nivellering 8) ..... | 18 |
| Figuur 13 – Simulatie vullen bovenhoofd en ledigen benedenhoofd – Debiet en restverval in functie van tijd<br>.....               | 18 |
| Figuur 14 – Simulatie vullen bovenhoofd en ledigen benedenhoofd – end-to-end langshelling .....                                   | 19 |
| Figuur 15 – Nauwkeurigheid langse waterspiegelhelling in functie van langse waterspiegelhelling .....                             | B1 |





# 1 Inleiding

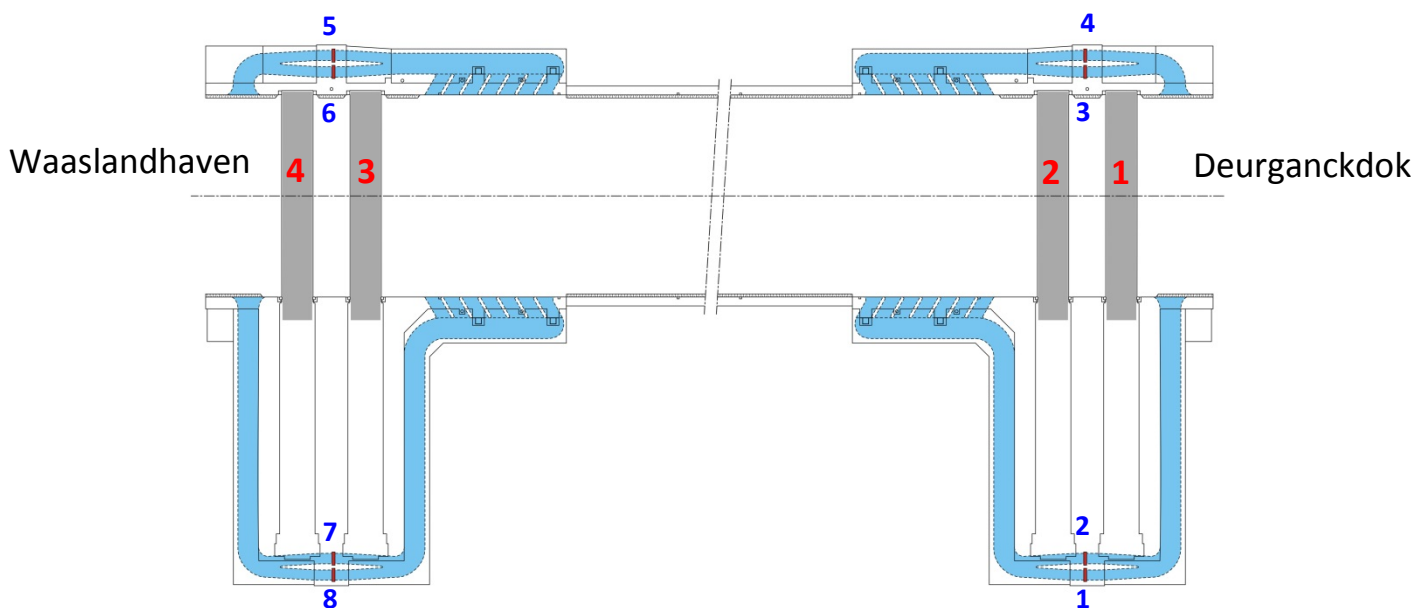
Op vraag van afdeling Maritieme Toegang (contactpersoon Wim De Cock) heeft het Waterbouwkundig Laboratorium op 19/10/2016 en 20/10/2016 een meetcampagne uitgevoerd in de Kieldrechtsluis. De metingen in de Kieldrechtsluis zijn analoog uitgevoerd als de in 2007 en 2008 door WL uitgevoerde metingen in de Zandvlietsluis- en Berendrechtsluis. Door middel van druksensoren geplaatst in de laddernissen wordt het kolkpeil en de optredende lange waterspiegelhellingen in de kolk opgemeten.

Het doel van deze meting is om het over/ondervullen en over/onderledigen aan het einde van de nivellering te kwantificeren. Door inertie van het nivelleersysteem staat het water niet onmiddellijk stil wanneer het kolkpeil het eindpeil bereikt. Bij vullen ontstaat er een uitdempend patroon van over- en ondervullen en bij ledigen ontstaat er een uitdempend patroon van overledigen en onderledigen. Dit effect zorgt voor een waterstandsverschil over de roldeuren tijdens het openen.

Hiernaast zal door middel van de meting ook nagegaan worden hoe de sluis presteert ten opzichte van de voor het ontwerp uitgevoerde numerieke simulaties en ten opzichte van de Berendrechtsluis die als benchmark voor de Kieldrechtsluis diende.

Een illustratie van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis wordt gegeven in Figuur 1.

Figuur 1 – Illustratie nivelleersysteem Kieldrechtsluis



Nummeringen deuren: rood, nummering hefschuiven: blauw

Het nivelleren van de sluis kolk via het bovenhoofd respectievelijk het benedenhoofd gebeurt door middel van een nivelleersysteem met korte omloopriolen. Op een verschil in peil van de inlaat aan dok respectievelijk Scheldezijde na is het nivelleersysteem van het bovenhoofd (zijde Waaslandhaven) en het benedenhoofd (zijde Deurganckdok) identiek. Bemerkt dat aan de zijde van de roldeuren de omloopriolen omheen de deur worden geleid waardoor de riolen een verschil in lengte hebben. In het vervolg van dit rapport wordt de term lange omloopriool gebruikt voor de riolen die omheen de deuren lopen en korte omloopriool voor de riolen die niet omheen de deuren lopen. Dit is in tegenstelling met de literatuur waar de term lange omloopriool gebruikt wordt voor een nivelleersysteem waarbij de riolen van het boven- en benedenhoofd verbonden zijn. Ter hoogte van de schuiven wordt het riool gesplitst in twee. De uitstroming

in de kolk gebeurt door middel van een uitstroomconstructie die als doel heeft de uitgaande stroming te spreiden en loodrecht op de kolk-as te richten.

Het WL heeft in het verleden het ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem voor de Kieldrechtsluis. Hiervoor werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a). De Kieldrechtsluis is geometrisch sterk verwant met de Zandvlietsluis en de Berendrechtsluis. Voor de validatie van het hydraulisch netwerkmodel werden metingen uitgevoerd in de Zandvlietsluis en Berendrechtsluis (De Mulder & Vercruysse, 2007; De Mulder *et al.*, 2008). Door middel van dit hydraulisch netwerk model en een desktop analyse werd vervolgens het ontwerp voor de Kieldrechtsluis uitgevoerd (De Mulder *et al.*, 2010b).

Onderhavig rapport is als volgt opgebouwd:

De door WL uitgevoerde metingen, de door GHA ter beschikking gestelde meetgegevens en de toegepaste verwerking hierop worden besproken in hoofdstuk 2.

De resultaten van de metingen worden besproken in hoofdstuk 3.

Een opgemeten vulling via het bovenhoofd en een lediging via het benedenhoofd wordt gesimuleerd, zie hoofdstuk 4.

De conclusies worden samengevat in hoofdstuk 5.

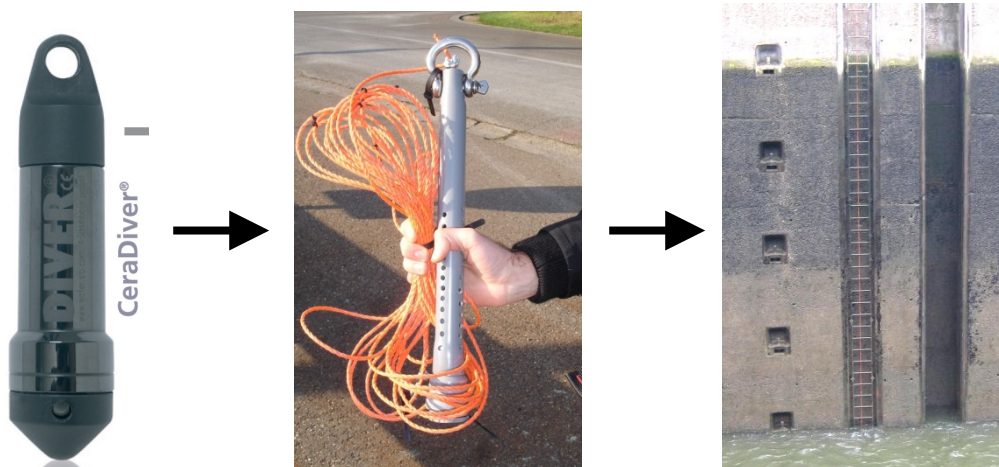
## 2 Meetgegevens

De metingen uitgevoerd door WL worden beschreven in paragraaf 2.1. Hiernaast wordt ook gebruik gemaakt van de continue metingen van GHA, zie paragraaf 2.2. De toegepaste verwerking wordt besproken in paragraaf 2.3.

### 2.1 Metingen WL

Om de waterpeilen in de kolk en aan zijde Waaslandhaven en Deurganckdok op te meten heeft WL een meetopstelling met 8 druksensoren ingezet. Deze druksensoren zijn van het type CeraDiver geproduceerd door Schlumberger. Een illustratie van de meetopstelling wordt gegeven in Figuur 2 en de karakteristieken van de druksensoren worden gegeven in Tabel 1. De druksensoren meten de totale druk bestaande uit de waterdruk van de bovenliggende waterkolom en de luchtdruk. De luchtdruk dient dus afgetrokken te worden van de opgemeten druk. Hiervoor wordt de luchtdruk opgemeten door middel van een BaroDiver. De dichtheid van het water is afhankelijk van de temperatuur en de saliniteit. De druksensoren meten naast de druk ook de temperatuur en berekenen op basis van de opgemeten druk en temperatuur inwendig de waterhoogte. De druksensoren meten geen zoutgehalte en kunnen hierdoor de dichtheid niet aanpassen op basis van het zoutgehalte.

Figuur 2 – Illustratie meetopstelling

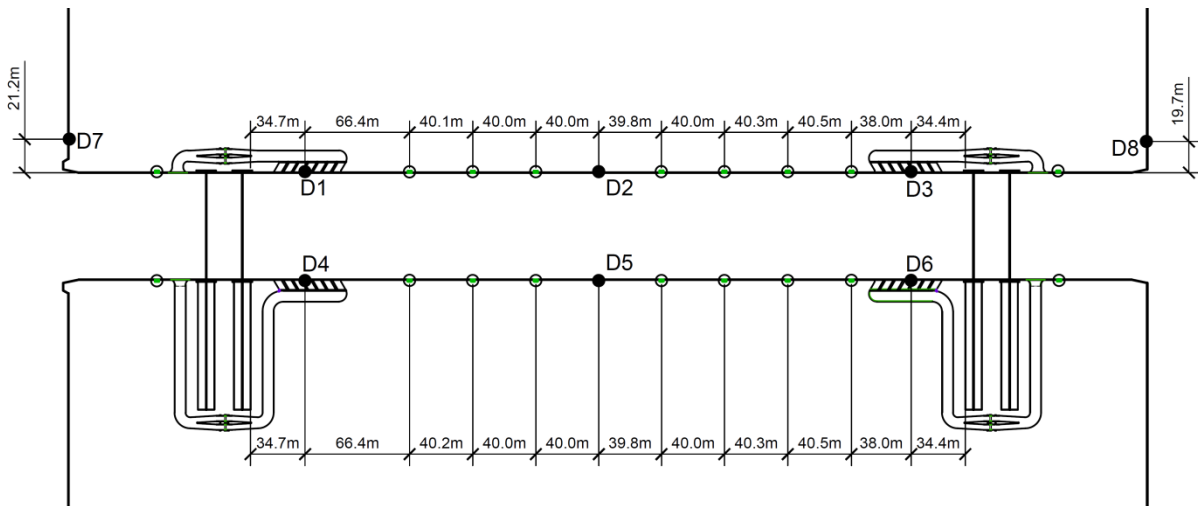


Tabel 1 – Technische specificaties druksensoren

| type                | meetbereik<br>[m] | nauwkeurigheid<br>[%] | nauwkeurigheid<br>over meetbereik<br>[mm] | geheugen-<br>capaciteit<br>[# metingen] |
|---------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| CeraDiver<br>DI 701 | 10.00             | ± 0.05                | ± 5.0                                     | 48000                                   |
| BaroDiver<br>DI 500 | 1.50              | ± 0.33                | ± 5.0                                     | 24000                                   |

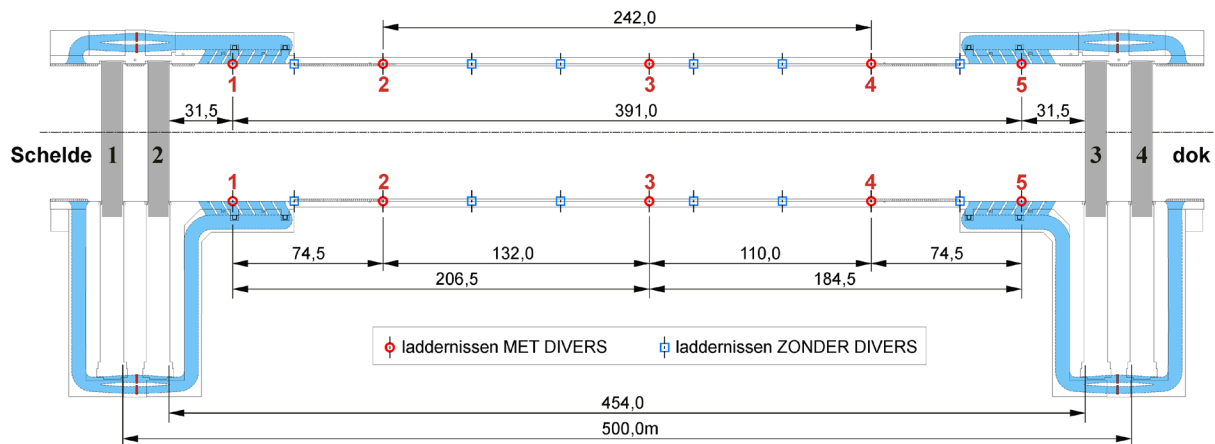
Voor de meting in de Kieldrechtsluis werd analoog met de in 2010 uitgevoerde meting in de Berendrechtsluis een tijdstap van 3 s gekozen. De druksensoren hebben gelogd tussen 18/10/2016 23:00 en 20/10/2016 13:00. De tijdsaanduiding van de druksensoren was in zomertijd (UTC+2). Voor de rest van de verwerking in dit rapport wordt zomertijd gebruikt. De positie van de druksensoren wordt gegeven in Figuur 3. Merk op dat de druksensoren genummerd worden van D1 tot en met D8.

Figuur 3 – Locatie druksensoren WL



De 6 druksensoren in de kolk zijn symmetrisch gepositioneerd. De uiterste druksensoren liggen boven de uitstroomopeningen van de omloopriolen in de kolk. Bij meetcampagne E in de Berendrechtsluis werden 10 druksensoren in de kolk ingezet. Hiervan werden 6 gepositioneerd analoog met de meting in de Kieldrechtsluis. De bijkomende 4 werden meer naar het midden van de kolk, weg van de uitstroomconstructie geplaatst, zie Figuur 4. Uit de analyse van de metingen in de Berendrechtsluis volgde een goede vergelijkbaarheid tussen de helling bepaald uit de uiterste meetpunten en de hellingen bepaald op basis van de meer naar het midden van de kolk liggende meetpunten. Hierom werden deze punten niet meer opgemeten tijdens de meting in de Kieldrechtsluis. Omdat in dit advies specifiek aandacht zal besteed worden aan overvulling en overlediging wordt ook een druksensor geplaatst in een laddernis van de kopmuren zijde Waaslandhaven en zijde Deurganckdok.

Figuur 4 – Locatie meetpunten tijdens meetcampagne E in de Berendrechtsluis



De exacte hoogte van de druksensoren is niet gekend. De omzetting van de opgemeten waterhoogtes naar het referentiestelsel (m TAW) gebeurt als volgt. Op een moment dat de deur van het bovenhoofd gedurende langere tijd openstond (tussen 19/10/2016 09:47 en 19/10/2016 13:00) wordt de gemiddelde waterstand van de druksensoren in de kolk en de druksensor in de Waaslandhaven gelijkgesteld aan het door GHA opgemeten peil in de kolk. Vervolgens wordt voor een periode waarop de deur van het benedenhoofd openstaat (tussen 19/10/2016 2:25 en 19/10/2016 3:41) het peil van de druksensor aan Scheldezijde gelijkgesteld aan het gemiddeld peil in de kolk opgemeten door de druksensoren.

Vervolgens zijn nog twee correcties doorgevoerd. Druksensor D5 vertoont een afwijkende waarde tussen 20/10/2016 04:05:50 en 20/10/2016 05:01:10. Voor deze periode wordt het signaal van druksensor D5 niet meegenomen in de berekening van het gemiddeld kolkpeil. De druksensor aan zijde Deurganckdok komt droog te hangen bij een peil onder + 0.59 m TAW. Voor alle peilen lager dan + 0.65 m TAW wordt het meetsignaal van de druksensor vervangen door de meting van het Deurganckdok door GHA. Hiernaast bevatten de metingen nog enkele spikes. Deze beïnvloeden de verwerking en de resultaten niet en zijn hierom niet aangepakt.

## 2.2 Metingen GHA

GHA heeft voor de periode 18/10/2016 23:39:03 tot 20/10/2016 23:35:51 volgende gegevens overgemaakt:

- Saspeil, dokpeil en Scheldepeil,
- Positie van de 8 hefschuiven,
- Stroom doorheen de drives die de roldeuren aansturen (per hoofd).

Het saspeil wordt gemeten in het midden van de kolk op linkeroever (ter hoogte van druksensor D2 in Figuur 2). Het peil aan de zijde van het Deurganckdok en de Waaslandhaven wordt gemeten binnen de kopmuren van de kolk.

Deze data hebben een frequentie van 2 Hz. Uit de vergelijking van de waterpeilmetingen van GHA en WL volgt dat op de peilmeting van GHA vermoedelijk een filtering zit waarmee de hoge frequenties afgevlakt worden. Bij het vergelijken van de tijdschaal van de GHA metingen met deze van WL volgde dat er een aantal verschuivingen optraden. De tijdschaal van de GHA metingen werd op volgende wijze aangepast:

- De tijdsaanduiding van de metingen van GHA is wintertijd (UTC+1). Bij de volledige tijdschaal is 59 min en 52 s bijgeteld.
- De tijdschaal bevat twee gaten een eerste van 72.5 s op 19/10/2016 17:10:51 en een tweede van 193 s op 19/10/2016 09:57:09. Deze gaten werden verwijderd door het opschuiven van de voorgaande uren.
- Vervolgens werd de tijd voorgaand 19/10/2016 17:12:30 vermeerderd met 52 s.
- Als laatste werd de tijd voorgaand 19/10/2016 13:19:33 verminderd met 126 s. Hierdoor ontstaat terug een gat in de tijdschaal.

De door GHA opgeleverde data bevat per signaal een tijds-as. Bij de hierboven toegepaste tijdscorrectie wordt aangenomen dat al deze signalen onderling gesynchroniseerd zijn waardoor na de hierboven beschreven correcties ook de beweging van de schuiven en deuren gesynchroniseerd zijn met de divermetingen van WL.

Het bewegen van de deuren wordt afgeleid uit de stroom doorheen de drives die de motoren van de deuren aansturen. Als de stroom hoog is zijn de deuren in beweging, als de stroom 0 is staan de deuren stil. Elk hoofd heeft twee drives. Deze drives kunnen echter de motoren van beide deuren aansturen waardoor het niet geweten is welke deur in beweging is. In de toekomst zal de door GHA uitgevoerde registratie aangepast worden zodat ook de deurbewegingen geregistreerd worden.

De gebruikte deurcombinatie en het type schepen (zeevaart/binnenvaart) dat verschut wordt is overgenomen uit APICS (Antwerp Port Information and Control System). Op 19/10 werden tussen 8u en 17u testmetingen uitgevoerd zonder scheepvaart. Deze schuttingen zijn niet teruggevonden in APICS. De gebruikte deurcombinatie tijdens de testmetingen werd wel geregistreerd door GHA.

## 2.3 Verwerking

Na de eerste verwerking op de globale meetreeks, besproken in voorgaande paragrafen, wordt het signaal verder verwerkt per nivellering.

Het starttijdstip van de schuttingen wordt bepaald als het ogenblik dat de hefschuiven van het bovenhoofd respectievelijk benedenhoofd starten met openen. Per hoofd wordt hiervoor het gemiddelde starttijdstip van de 4 hefschuiven gebruikt. Doordat het door GHA bezorgde meetsignaal geen ruis bevatte kon het tijdstip van start openen eenvoudig gedetecteerd worden. Op basis van het op deze wijze vastgestelde starttijdstip worden de gegevens binnen een tijdsvenster van 360 s voor start openen tot 1600 s na start openen beschouwd. Binnen dit tijdsvenster (één nivellering) worden de gegevens vervolgens verder verwerkt.

Het restverval in functie van de tijd wordt berekend tussen het gemiddeld kolkpeil en het peil van het pand waarnaartoe genivelleerd wordt (Waaslandhaven respectievelijk Deurganckdok). De nivelleertijd wordt gedefinieerd als het verschil tussen het starttijdstip van de schutting en het tijdstip dat het restverval een eerste keer gelijk is aan 0.

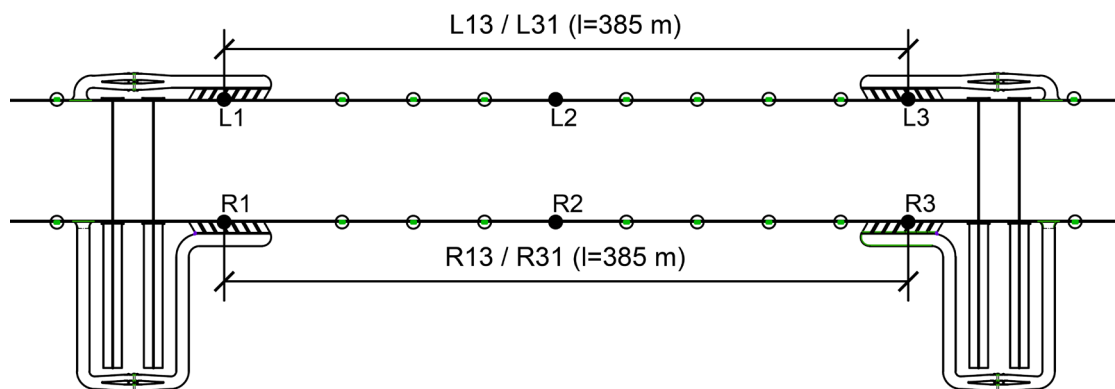
De stijgsnelheid wordt bepaald uit het gemiddeld kolkpeil. Omwille van de aanwezigheid van schommelingen van het kolkpeil wordt hiervoor eerst een lopend gemiddelde met een tijdsvenster van 15 s toegepast op het gemiddeld kolkpeil.

Het verval van een nivellering wordt gedefinieerd als het verschil in kolkpeil tussen begin en einde nivellering. Bemerk dat bij een nivellering met het Benedenhoofd het eindpeil (i.e. het peil van het Deurganckdok) kan stijgen of dalen. Een beweging van het peil in het Deurganckdok naar het peil van de

Waaslandhaven toe zal zorgen voor een afname van de nivelleertijd en een beweging van het peil van het Deurganckdok van het peil van de Waaslandhaven weg zal zorgen voor een toename van de nivelleertijd.

De end-to-end langse waterspiegelhellingen worden berekend door het hoogte verschil tussen de uiterste druksensoren per oever te delen door de tussenafstand. De gedefinieerde langse waterspiegelhellingen in dit advies worden gegeven in Figuur 5. Bemerkt hierin dat de nummering van de druksensor aangepast werd ten opzichte van Figuur 3. De druksensoren worden afhankelijk van de kolkmuur voorafgaan door R (rechterkolkmuur) of L (linkerkolkmuur). Hierbij wordt ook de nummering van de druksensoren op de rechterkolkmuur aangepast zodat deze samenvalt met de nummering aan de linkerkolkmuur.

Figuur 5 – Meting Kieldrechtsluis – end-to-end langshellingen



De conventie van de langse waterspiegelling wordt zo gekozen dat de helling positief is wanneer het peil hoger is aan het voor nivelleren gebruikte hoofd. Een positieve helling zorgt voor een kracht van het gebruikte hoofd weg en een negatieve helling zorgt voor een kracht naar het voor het nivelleren gebruikt hoofd toe. Elke langshelling krijgt een code bestaande uit de twee nummers van de meetlocaties op basis waarvan ze gedefinieerd is, voorafgegaan hetzij door de letter L indien de meetlocaties zich langs de linkeroever bevinden, hetzij door de letter R indien het om meetlocaties op de rechteroever gaat. Wat betreft de onderlinge volgorde van de nummers van de twee meetlocaties in de code van de langshelling, wordt eerst het nummer vermeld van de meetlocatie die zich het dichtst bij het tijdens de nivellering gebruikt hoofd bevindt. Deze afspraak zorgt er samen met volgende formule voor dat de hoger vermelde tekenconventie voor de langshellingen gerespecteerd wordt.

$$S_{ij} = \frac{h_i - h_j}{l_{ij}}$$

waarin S [in ‰] de langshelling L<sub>ij</sub> of R<sub>ij</sub> voorstelt, gedefinieerd op basis van de waterstanden h<sub>i</sub> en h<sub>j</sub> in de meetlocaties met nummers i resp. j, met een tussenafstand l<sub>ij</sub>.

In Bijlage A : Nauwkeurigheid langshelling wordt de nauwkeurigheid van de langshellingen begroot.

De tijdstippen van begin en einde openen van de deuren worden bepaald op basis van de stroom naar de roldeuren. Bij een toename van de stroom start het bewegen (openen respectievelijk sluiten) van de deuren en wanneer de stroom terug afneemt naar 0 zijn de deuren in positie (open respectievelijk gesloten).



## 3 Metingen

In totaal zijn 27 nivelleringen opgemeten. Een overzicht van de uitgevoerde nivelleringen wordt gegeven in paragraaf 3.1. De resultaten voor het nivelleren van de kolk worden besproken in paragraaf 3.2. De vaststellingen met betrekking tot over/ondervullen en over/onderledigen worden besproken in paragraaf 3.3.

In Bijlage B : Resultaten per nivellering wordt per schutting een figuur gegeven met de variatie in de tijd van de peilen, het openen en sluiten van de deuren, de stijgsnelheid van het kolkpeil, het openen en sluiten van de schuiven en de end-to-end langse waterspiegelhelling.

### 3.1 Overzicht geregistreerde nivelleringen

In de periode dat de druksensoren hebben gelogd (tussen 18/10/2016 23:00 en 19/10/2016 13:00) werden 27 nivelleringen uitgevoerd. In Tabel 2 wordt voor deze schuttingen het type nivellering, het starttijdstip, de deurcombinatie, de gebruikte schuiven en het verval gegeven.

Om het type nivellering te karakteriseren worden volgende afkortingen geïntroduceerd:

- VBO= vullen bovenhoofd,
- VBE = vullen benedenhoofd,
- LBO = ledigen bovenhoofd,
- LBE= ledigen benedenhoofd.

De term bovenhoofd wordt gebruikt voor het sluishoofd zijde Waaslandhaven en de term benedenhoofd wordt gebruikt voor het sluishoofd zijde Deurganckdok. Een nivellering met de term VBO betreft dus het vullen van de kolk met water vanuit de Waaslandhaven.

Het in de tabel weergegeven verval betreft het verschil tussen kolkpeil bij begin nivelleren en het kolkpeil bij einde nivelleren. Uit de registraties van de sluisbediening was het niet mogelijk om de gebruikte deur per hoofd te achterhalen. Uit overleg met GHA volgde dat voor nivellering nr. 9 deurcombinatie 23 werd gebruikt en voor nivellering nr. 8 en nr. 25 deurcombinatie 13 werd gebruikt. De overige nivelleringen zijn vermoedelijk uitgevoerd met deurcombinatie 13.

Tabel 2 – Geregistreerde schuttingen

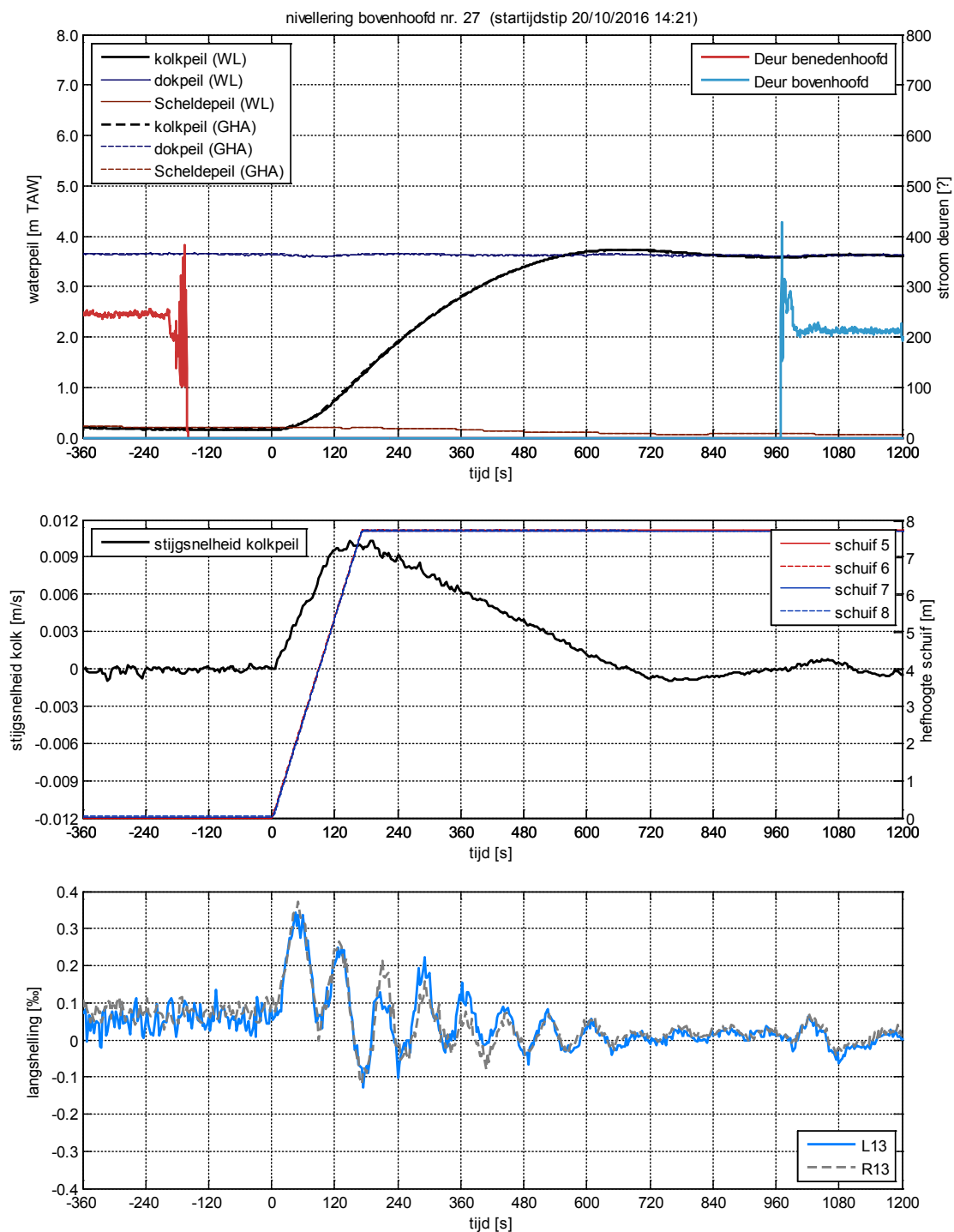
| schutting nr. | hoofd | startijdstip | deurcombinatie | schuiven | verval [m] | schepen* |
|---------------|-------|--------------|----------------|----------|------------|----------|
| 1             | VBO   | 19/10 0:15   | 14             | 5,6,7,8  | 2.77       | 2BS      |
| 2             | LBE   | 19/10 0:58   | 14             | 1,2,3,4  | 3.43       | 2BS      |
| 3             | VBO   | 19/10 3:52   | 24             | 5,6,7,8  | 1.12       | 1BS      |
| 4             | LBE   | 19/10 4:13   | 23             | 1,2,3,4  | 0.82       | 0        |
| 5             | VBO   | 19/10 5:20   | 23             | 5,6,7,8  | 0.14       | 1ZS      |
| 6             | VBE   | 19/10 6:44   | 24             | 1,2,4    | 2.80       | 0        |
| 7             | LBO   | 19/10 8:43   | 13             | 5,6,7,8  | 1.59       | 0        |
| 8             | LBE   | 19/10 13:03  | 13             | 1,2,3,4  | 2.93       | 0        |
| 9             | VBO   | 19/10 13:36  | 23             | 5,6,7,8  | 3.03       | 0        |
| 10            | LBE   | 19/10 16:01  | 23             | 1,2,3,4  | 0.84       | 0        |
| 11            | LBO   | 19/10 18:29  | 14             | 5,6,7,8  | 1.15       | 2ZS      |
| 12            | VBE   | 19/10 19:48  | 14             | 1,2,3,4  | 2.44       | 1ZS/6BS  |
| 13            | LBO   | 19/10 21:32  | 24             | 5,6,7,8  | 0.92       | 1ZS, 2BS |
| 14            | LBE   | 19/10 23:06  | 23             | 1,2,3,4  | 1.05       | 2BS      |
| 15            | VBO   | 19/10 23:52  | 23             | 5,6,7,8  | 1.80       | 3BS      |
| 16            | LBE   | 20/10 0:31   | 24             | 1,2,3,4  | 2.74       | 0        |
| 17            | VBO   | 20/10 2:26   | 14             | 5,6,7,8  | 3.80       | 1ZS/2BS  |
| 18            | LBE   | 20/10 3:13   | 13             | 1,2,3,4  | 2.89       | 1BS      |
| 19            | VBO   | 20/10 4:31   | 13             | 5,6,7,8  | 1.68       | 1ZS/1BS  |
| 20            | LBE   | 20/10 5:14   | 14             | 1,2,3,4  | 1.06       | 1BS      |
| 21            | LBO   | 20/10 6:31   | 14             | 5,6,7,8  | 0.10       | 1ZS      |
| 22            | VBE   | 20/10 8:07   | 14             | 1,2,3,4  | 2.28       | 1ZS      |
| 23            | LBO   | 20/10 10:23  | 14             | 5,6,7,8  | 0.54       | 0        |
| 24            | LBE   | 20/10 11:41  | 14             | 1,2,3,4  | 1.31       | 3BS      |
| 25            | VBO   | 20/10 12:50  | 14             | 5,6,7,8  | 2.35       | 2BS      |
| 26            | LBE   | 20/10 13:32  | 14             | 1,2,3,4  | 3.09       | 2BS      |
| 27            | VBO   | 20/10 14:21  | 14             | 5,6,7,8  | 3.45       | 2BS      |

(\*BS= binnenvaartuig, ZS= zeeschip)

## 3.2 Nivelleren

Voor een vulling van het bovenhoofd (nivellering nr. 27) respectievelijk een lediging van het benedenhoofd (nivellering nr. 16) wordt in Figuur 6 respectievelijk Figuur 7 een figuur gegeven met de nivelleerkromme, het openen van de roldeuren, de variatie in de tijd van de stijgsnelheid van het kolkpeil, de hefhoogte van de schuiven en de end-to-end langse waterspiegelhelling. De figuren voor de overige nivellerings zijn terug te vinden in Bijlage B : Resultaten per nivellering.

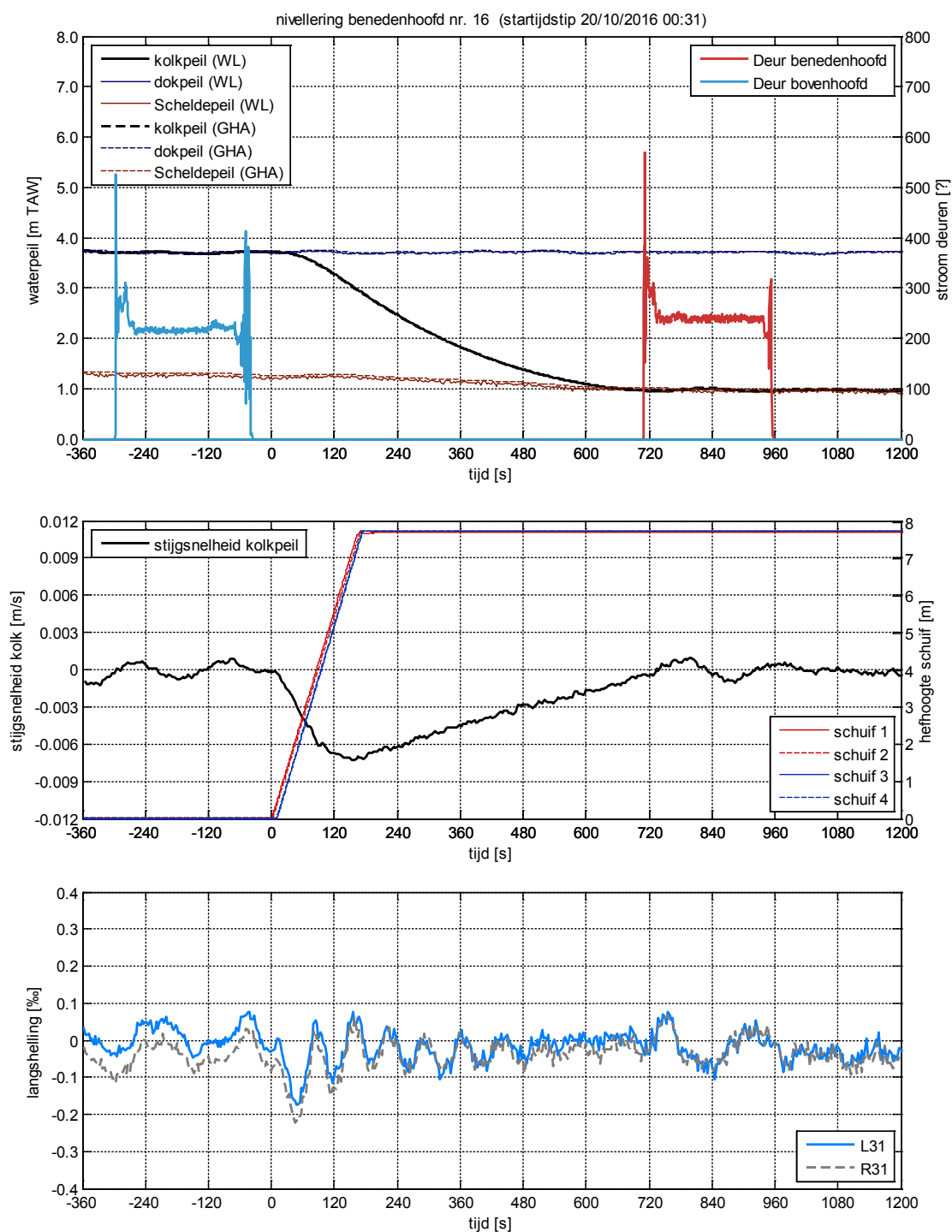
Figuur 6 – Voorbeeld nivellering vullen bovenhoofd (nr. 27)



Uit Figuur 6 volgt een goede overeenkomst tussen de peilmetingen van WL en de continue pielmetingen van GHA. Net voorafgaand aan de vulling wordt de roldeur- zijde Deurganckdok gesloten. De roldeur zijde Waaslandhaven opent na de eerste piek van de overvulling. De start van nivellering valt samen met het openen van de hefschuiven. De vier schuiven openen synchroon in 172 s met een constante snelheid. Bemerk dat de opgemeten eindhoogte van de schuiven 7.74 m bedraagt. De schuiven sluiten niet in een verdiepte nis en worden dus 0.74 m hoger opgetrokken dan het plafond. De start van de nivellering valt vrijwel samen met het ogenblik waarop de schuiven geopend worden. De variatie in de tijd van de

langshelling opgemeten aan linker- en rechteroever is gelijklopend. Zoals verwacht bij vullen heeft de eerste piek een positieve waarde, wat resulteert in een kracht weg van het gebruikte hoofd. Bemerkt dat bij begin nivelleren zowel de helling aan linkeroever als deze aan rechteroever een gelijke offset (ca. + 0.06 ‰) vertonen. Deze offset is afkomstig uit de meetmethode en wordt vermoedelijk veroorzaakt door de ophangingsmethode van de druksensoren.

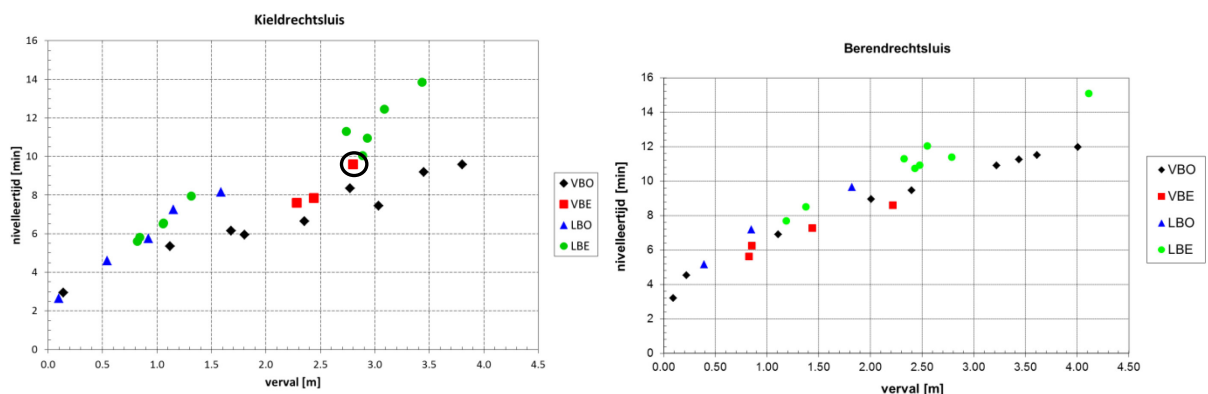
Figuur 7 – Voorbeeld nivellering ledigen benedenhoofd (nr. 16)



Uit Figuur 7 volgt dat er hier eveneens een goede overeenkomst is tussen de peilmetingen van WL en de continue peilmetingen van GHA. Net voorafgaand de lediging wordt de roldeur zijde Waaslandhaven gesloten en op het tijdstip einde nivellering wordt de roldeuren zijde Deurganckdok geopend. De vier schuiven openen synchroon met een constante snelheid in 175 s. Bemerk dat ook bij deze nivellering de opgemeten eindhoogte van de schuiven 7.74 m bedraagt. De schuiven sluiten niet in een verdiepte nis en worden dus 0.74 m hoger opgetrokken dan het plafond. De start van de nivellering valt vrijwel samen met het ogenblik waarop de schuiven geopend worden. Bij start nivellieren ontstaat er een negatieve langshelling van de waterspiegel in de kolk die overgaat in een translatiegolf met een gemiddeld negatieve component. De variatie in de tijd van de langshelling aan linker- en rechteroever is vrijwel gelijklopend. De helling opgemeten aan rechteroever heeft bij begin nivellieren een offset van ca. 0.04 ‰ ten opzichte van de helling opgemeten aan linkeroever. Op het einde van de nivellering vallen beide opgemeten langshellingen goed samen. Deze offset is afkomstig uit de meetmethode en wordt vermoedelijk verzaakt door de ophangingsmethode van de druksensoren.

Achtereenvolgens wordt de nivelleertijd (Figuur 8), het extremum van de stijgsnelheid (Figuur 9) en het extremum van de langshelling (Figuur 10) grafisch voorgesteld in functie van het verval. Bemerk dat de linkse helft van de figuren de resultaten van de meting in de Kieldrechtsluis betreft en dat de rechtse helft de resultaten van een eerder uitgevoerde meting in Berendrechtsluis betreft. Op één nivellering na zijn bij de metingen in de Kieldrechtsluis steeds 4 hefschuiven gebruikt. Bij nivellering nr. 6 (vullen benedenhoofd met een verval 2.83 m) werd hefschuif nummer 3 (zie Figuur 1) niet gebruikt. Deze nivellering wordt in de figuren gemarkeerd door middel van een cirkel. In totaal zijn drie metingen uitgevoerd in de Berendrechtsluis. In deze paragraaf wordt enkel vergeleken met de derde meetcampagne (De Mulder *et al.*, 2008). Tijdens de eerste twee metingen in de Berendrechtsluis waren niet alle hefschuiven in dienst waardoor de resultaten niet rechtstreeks met de meting in de Kieldrechtsluis vergeleken kunnen worden.

Figuur 8 – Nivelleertijd in functie van verval

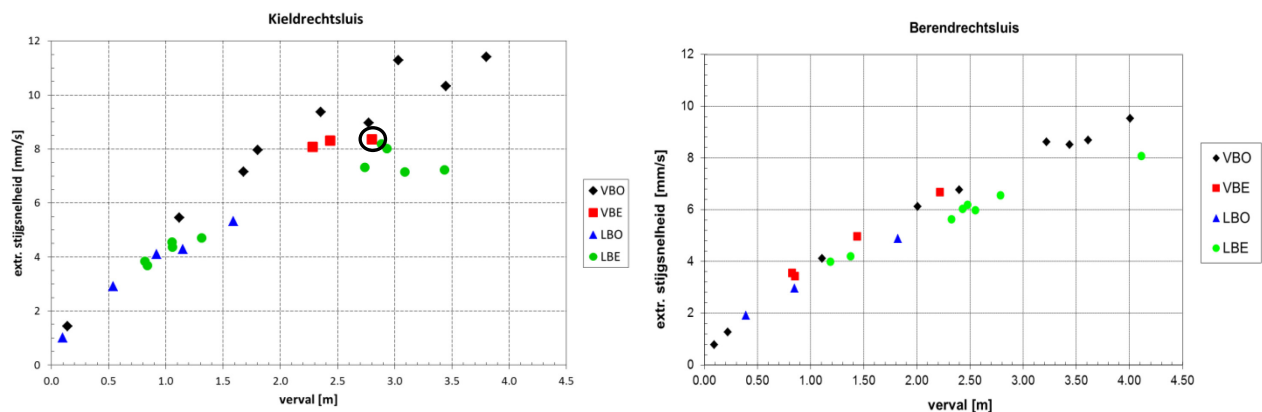


Meting Kieldrechtsluis: nivellering nr. 6 (vullen benedenhoofd) gemarkeerd met een cirkel.

Vanaf een bepaald verval is de nivelleertijd afhankelijk van het type nivellering: vullen of ledigen. De nivelleertijd bij een verval 3.5 m bedraagt ca. 9 min voor vullen via het bovenhoofd en 14.0 min voor ledigen via het benedenhoofd. Vanaf een verval boven 1.0 m verloopt het vullen van de kolk sneller dan het ledigen. De verklaring hiervoor is dat bij nivelleringen met een beperkt verval de invloed van de (richtingsonafhankelijke) hefschuifverliezen en massa-traagheid relatief groter zijn. Bij een toename van het verval neemt vervolgens de invloed van de richtingsafhankelijke hydraulische verliezen toe en is er een onderscheid tussen vullen en ledigen. De nivelleertijd lijkt onafhankelijk van het gebruikte hoofd (bovenhoofd of benedenhoofd). De nivelleertijden met het benedenhoofd vertonen een zekere spreiding. Deze spreiding wordt verklaard door de variatie van het peil in het Deurganckdok tijdens de nivellering. Bij vullen via het bovenhoofd met een verval 3.03 m wordt een iets lagere nivelleertijd bekomen. De oorzaak hiervan is het gebruik van deurcombinatie 23 bij nivellering nr. 9 in plaats van 14. Bij vullen via het

benedenhoofd met een verval 2.83 m wordt een iets hogere nivelleertijd bekomen, de oorzaak hiervan is dat bij nivellering nr. 6 één schuif niet geopend werd. Voor nivellieren via het bovenhoofd zijn de nivelleertijden van de Kieldrechtsluis lager dan de Berendrechtsluis (tot 2.0 min bij een verval 4.0 m). De vermoedelijke verklaring hiervoor is de snellere opening van de hefschuiven in de Kieldrechtsluis (176 s ten opzichte van 313 s)). Ook bij nivellieren met het benedenhoofd is de nivelleertijd opgemeten in de Kieldrechtsluis lager dan in de Berendrechtsluis. Bemerk wel dat het verschil hier kleiner is en dat naast de deurcombinatie en de hefsnelheid van de schuiven ook de variatie van het Scheldepeil een invloed heeft.

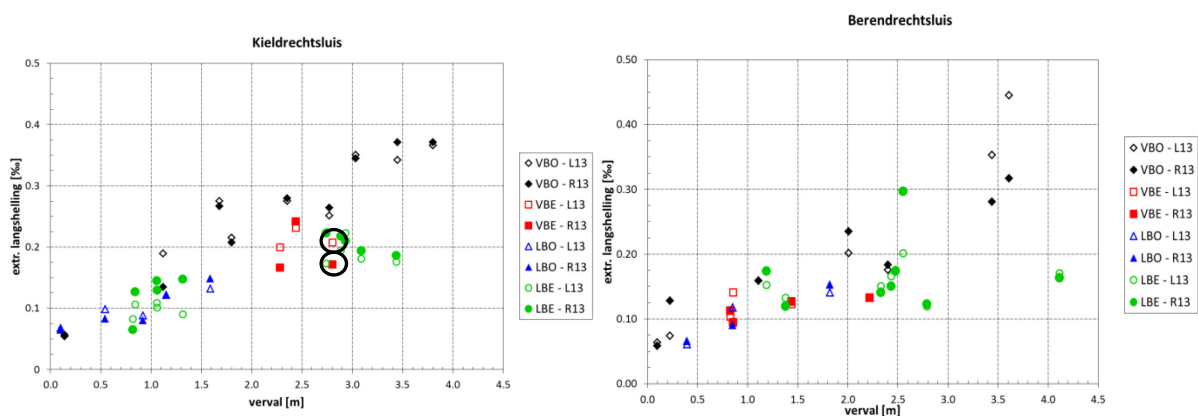
Figuur 9 – Extrema stijgsnelheid in functie van verval



Meting Kieldrechtsluis: nivellering nr. 6 (vullen benedenhoofd) gemarkeerd met een cirkel.

Het extremum van de stijgsnelheid bij een verval 3.5 m bedraagt ca. 11 mm/s voor vullen via het bovenhoofd en 8 mm/s voor ledigen via het benedenhoofd. Bij een verval kleiner dan 1.0 m is het extremum van de stijgsnelheid onafhankelijk van het type nivellering. De verklaring hiervoor is dat bij nivelleringen met een beperkt verval de invloed van de hefschuifverliezen en massastraagheid relatief groter zijn. Bij een toename van het verval neemt vervolgens de invloed van de richtingsafhankelijke verliezen toe en is er een onderscheid tussen vullen en ledigen. Ten opzichte van de metingen in de Berendrechtsluis zijn de extrema van de stijgsnelheid hoger. De vermoedelijke verklaring hiervoor is de snellere opening van de hefschuiven in de Kieldrechtsluis (176 s ten opzichte van 313 s).

Figuur 10 – Extremum langshelling in functie van verval



Meting Kieldrechtsluis: nivellering nr. 6 (vullen benedenhoofd) gemarkeerd met een cirkel.

Het extremum van de langse waterspiegelhelling neemt toe met het verval. Vanaf een verval 1.5 m zijn de extrema voor vullen via het bovenhoofd groter dan voor vullen of ledigen via het benedenhoofd. Het extremum voor vullen via het bovenhoofd bedraagt ca. 0.37 ‰ bij een verval 3.5 m. Voor ledigen via het benedenhoofd bedraagt het opgemeten extremum 0.24 ‰. Een vulling via het bovenhoofd gebeurt bij een lager initieel kolkpeil (initieel kolkpeil < peil Waaslandhaven) dan een vulling via het benedenhoofd (initieel kolkpeil = peil Waaslandhaven). Dit lagere kolkpeil is de verklaring dat het extremum van de langse waterspiegelhelling hoger is voor vullen via het bovenhoofd dan voor vullen via het benedenhoofd. De extrema van de langse waterspiegelhellingen opgemeten in de Berendrechtsluis zijn van dezelfde grootteorde als in de Kieldrechtsluis. Bij de metingen in de Berendrechtsluis valt voornamelijk de grote spreiding van het extremum voor de ledigingen via het benedenhoofd op. Hiervoor werd geen verklaring gevonden. Bemerk hierbij dat de aanwezige schepen in de kolk ook een invloed hebben op de optredende langse waterspiegelhellingen. Uit de numerieke simulaties volgde een toename van de langshelling bij een toename van de grootte van het schip (De Mulder *et al.*, 2010b). Dit volgde evenwel niet uit de metingen in de Berendrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2010a). De vermoedelijke verklaring is de hoeveelheid invloedsfactoren: verval, initiële hellingen voorafgaand de nivellering, meeton nauwkeurigheid, range scheepsdimensies.

### 3.3 Overvullen en overledigen

Het tijdstip waarop de deuren geopend worden na het einde van nivelleren (i.e. het eerste tijdstip waarop het kolkpeil genivelleerd is met het eindpeil) wordt gegeven in Tabel 3. Ook wordt het waterstandsverschil over de deur bij begin en einde van het openen van de deuren vermeld. Het waterstandsverschil heeft een positief teken als het peil in de kolk hoger is dan het peil in het Deurganckdok respectievelijk de Waaslandhaven. Het waterstandsverschil werd bepaald uit het door het WL gemeten gemiddeld kolkpeil en peil aan zijde Waaslandhaven, respectievelijk Deurganckdok. Een vergelijking met enerzijds de metingen van GHA en anderzijds de WL drukmetingen nabij de deur leverden een verschil van +/- 1 cm. Zie Bijlage B : Resultaten per nivellering.

De nivelleringen worden gesorteerd op de tijd dat de deuren geopend worden. Ook wordt nog een onderverdeling toegepast in de tijd tot openen deuren: kleiner dan 60 s, tussen 60 s en 120 s en meer dan 120 s. Van de 27 nivelleringen is de tijd in 14 gevallen kleiner dan 60 s en in 7 gevallen tussen 60 s en 120 s. In 6 gevallen is de tijd tot openen deuren langer dan 120 s. Uit een analyse van de figuren per nivellering in Bijlage B : Resultaten per nivellering volgt dat bij een tijd tot openen van de deuren kleiner dan 120 s de deuren geopend worden tijdens de eerste overvulling of overlediging. De grootste waterstandsverschillen worden opgemeten bij een tijd tot openen deuren tussen 0 s en 120 s. Voor vullen via het bovenhoofd bedraagt het maximale opgemeten waterstandsverschil tijdens start openen deuren 0.12 m. Voor ledigen via het benedenhoofd bedraagt het maximale waterstandsverschil tijdens start openen deuren -0.08 m. De openingstijd van de deuren bedraagt steeds 249 s en op einde openen is het verval beperkt.

Als de tabel gesorteerd wordt op waterstandsverschil bij begin openen volgt hieruit het volgende:

- waterstandsverschil lager of gelijk aan 0.05 m: 16 nivelleringen,
- waterstandsverschil groter dan 0.05 m en lager of gelijk aan 0.10 m: 9 nivelleringen,
- waterstandsverschil groter dan 0.10 m: 2 nivelleringen.



Tabel 3 – Tijdstip openen deuren na einde nivelleren en bijhorend restverval

| schutting<br>nr. | type<br>type | deur-<br>combi-<br>natie | verval | openen deuren na<br>einde nivelleren |                                            | waterstandsverschil |              |
|------------------|--------------|--------------------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|--------------|
|                  |              |                          |        | [m]                                  | [s]                                        | begin openen        | einde openen |
| 14               | LBE          | 23                       | 1.05   | 24                                   | < 60s<br>(14<br>schutting<br>en)           | 0.00                | 0.01         |
| 10               | LBE          | 23                       | 0.84   | 27                                   |                                            | -0.03               | 0.00         |
| 16               | LBE          | 24                       | 2.74   | 31                                   |                                            | -0.02               | 0.05         |
| 3                | VBO          | 24                       | 1.12   | 40                                   |                                            | 0.06                | 0.04         |
| 1                | VBO          | 14                       | 2.77   | 42                                   |                                            | 0.06                | 0.00         |
| 6                | VBE          | 24                       | 2.80   | 46                                   |                                            | 0.05                | 0.02         |
| 17               | VBO          | 14                       | 3.80   | 46                                   |                                            | 0.07                | 0.00         |
| 7                | LBO          | 13                       | 1.59   | 47                                   |                                            | -0.01               | 0.01         |
| 11               | LBO          | 14                       | 1.15   | 48                                   |                                            | -0.03               | -0.01        |
| 15               | VBO          | 23                       | 1.80   | 49                                   |                                            | 0.12                | 0.02         |
| 12               | VBE          | 14                       | 2.44   | 56                                   |                                            | 0.06                | 0.02         |
| 5                | VBO          | 23                       | 0.14   | 57                                   |                                            | 0.03                | -0.01        |
| 9                | VBO          | 23                       | 3.03   | 60                                   |                                            | 0.10                | 0.04         |
| 18               | LBE          | 13                       | 2.89   | 60                                   |                                            | -0.06               | 0.02         |
| 13               | LBO          | 24                       | 0.92   | 61                                   | 60 s en<br>120 s<br>(7<br>schutting<br>en) | -0.04               | 0.00         |
| 4                | LBE          | 23                       | 0.82   | 63                                   |                                            | -0.05               | -0.01        |
| 19               | VBO          | 13                       | 1.68   | 65                                   |                                            | 0.12                | 0.00         |
| 21               | LBO          | 14                       | 0.10   | 71                                   |                                            | -0.03               | 0.01         |
| 24               | LBE          | 14                       | 1.31   | 93                                   |                                            | 0.01                | 0.01         |
| 2                | LBE          | 14                       | 3.43   | 95                                   |                                            | -0.08               | -0.05        |
| 20               | LBE          | 14                       | 1.06   | 105                                  | > 120 s<br>(6<br>schutting<br>en)          | -0.07               | 0.00         |
| 26               | LBE          | 14                       | 3.09   | 130                                  |                                            | -0.06               | -0.03        |
| 23               | LBO          | 14                       | 0.54   | 237                                  |                                            | 0.04                | 0.00         |
| 22               | VBE          | 14                       | 2.28   | 297                                  |                                            | 0.03                | 0.01         |
| 8                | LBE          | 13                       | 2.93   | 336                                  |                                            | 0.01                | 0.04         |
| 27               | VBO          | 14                       | 3.45   | 417                                  |                                            | -0.02               | -0.02        |
| 25               | VBO          | 14                       | 2.35   | 684                                  |                                            | -0.03               | -0.01        |

In het rapport van de metingen van de Berendrechtsluis wordt het tijdstip van openen van de deuren niet expliciet vermeld in een tabel. Wel wordt het begin en einde van het openen van de deuren weergegeven in de figuren met de meetresultaten per schutting. Hierbij valt op dat tijdens de metingen in de Berendrechtsluis bij het merendeel van de nivelleringen de deuren openden op het ogenblik dat het eindpeil bereikt werd.

In gesloten toestand bevindt de kop van een roldeur zich in een nis met diepte 1.35 m op de linkeroever. De kop van deuren wordt in deze nis tegen de zijde geduwd waar het peil het laagste is. Tijdens een nivellering met een laag peil in het Deurganckdok duwen de deuren in het boven- en benedenhoofd tegen de naar het Deurganckdok toe gelegen zijwand. De sturingscomputer geeft toestemming voor het openen van de deuren op het ogenblik dat er geen verval optreedt en de deuren zich dus in het center van de nis bevinden. De locatie van de deuren in de nis wordt opgemeten door middel van een sensor. Bij het overvullen en overledigen wisselt het teken van het restverval en wijzigt dus de zijde van de nis waartegen de deur duwt. Tijdens dit wisselen is er dus een korte periode waarin de deur in het center staat. Tijdens dit ogenblik kan het startsignaal gegeven worden om de deuren te openen. Door de traagheid van het systeem



(opstarten drives, aanspannen kabels,....) zal op het ogenblik dat de deuren werkelijk in beweging treden al terug een restverval optreden. Een restverval leidt tot een toename van de kracht die nodig is om de deur te openen. GHA merkt dit ook op aan de piek van het stroomverbruik bij het begin van openen van de deuren. Dit is mogelijks niet gewenst voor de duurzaamheid.

Uit de analyse van de metingen volgt inderdaad dat de deuren bij het merendeel van de nivellerings openen voor het bereiken van de piek van de eerste overvulling respectievelijk overlediging. Start openen wordt dus gegeven op het eerste ogenblik dat het restverval doorheen nul gaat.

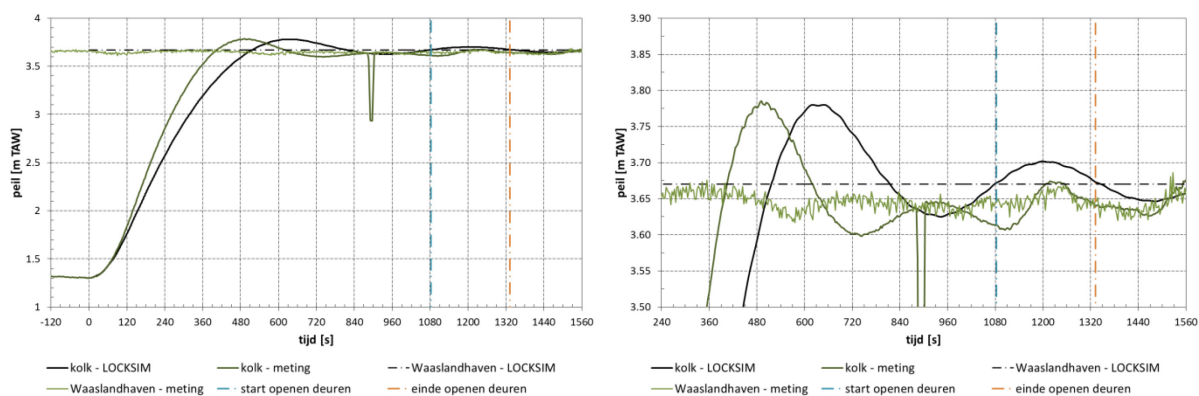
## 4 Simulatie

In dit hoofdstuk wordt met het hydraulisch netwerkmodel dat opgesteld is voor het ontwerp van de Kieldrechtsluis een vulling via het bovenhoofd en een lediging via het benedenhoofd gesimuleerd. Dit model werd gekalibreerd op basis van metingen in de Berendrechtsluis. Een nieuwe kalibratie op basis van metingen in de Kieldrechtsluis werd niet uitgevoerd. Voor het simuleren wordt het programma LOCKSIM<sup>1</sup> gebruikt. Om zoveel mogelijk van de over- en ondervulling te kunnen vergelijken wordt de nivellering met de langste wachttijd tot het openen van de deuren gekozen. Voor vullen via het bovenhoofd betreft dit nivellering nr. 25 en voor ledigen via het benedenhoofd betreft dit nivellering nr. 8.

In paragraaf 3.2 werd opgemerkt dat de schuiven in ca. 175 s opgetrokken worden tot 7.74 m. De riolen hebben een hoogte 7.0 m en de schuiven zitten niet in een verdiepte nis waardoor enkel de eerste 7.00 m van openen in rekening gebracht moet worden. Uit de metingen volgt dat voor nivellering nr. 8 respectievelijk nr. 25 de schuiven geopend zijn tot een hoogte 7.0 m na 150 s respectievelijk na 155 s.

Figuur 11 en Figuur 12 vergelijken voor deze beide nivelleringen de opgemeten en de met LOCKSIM gesimuleerde nivelleerkromme.

Figuur 11 – Vergelijking opgemeten en met LOCKSIM gesimuleerde nivelleerkromme voor vullen bovenhoofd (nivellering 25)



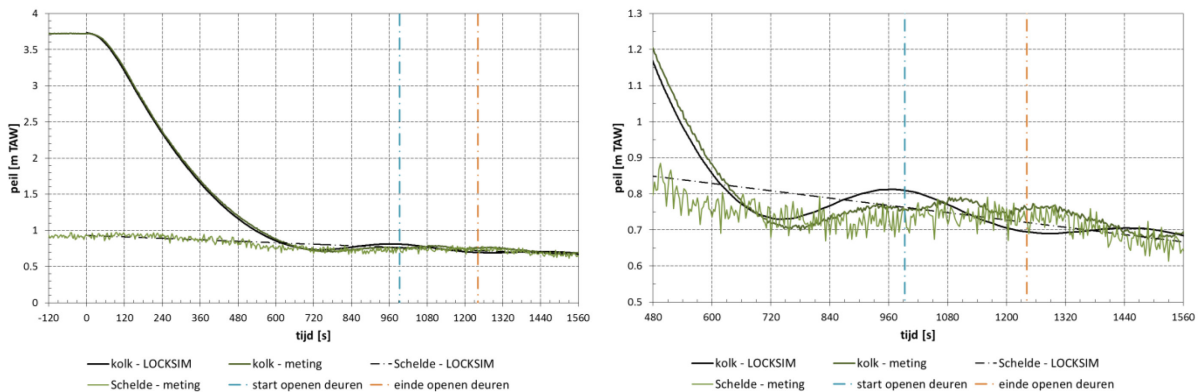
Links: nivelleerkromme – rechts: detail over- en ondervulling.

Merk in Figuur 11 op dat de LOCKSIM simulatie op het einde van de nivellering 110 s trager is dan de meting. De nivelleertijd bedraagt 517 s bij de LOCKSIM simulatie ten opzichte van 399 s bij de meting. Het achterlopen van de simulatie start vanaf een 100 s. De hefschuif is hierbij voor 66 % geopend en de verliezen ten gevolge van de hefschuif zijn op dit tijdstip van dezelfde grootteorde als de overige bijzondere ladingsverliezen (i.e. de verliezen met uitzondering van de wrijvingsverliezen; De Mulder *et al.*, (2007)). De grootte van de eerste overvulling is gelijk voor de meting en de simulaties nl. +3.78 m TAW. Hierna dempt de meting sterker uit dan de simulatie. De periode van de over- en ondervulling is kleiner bij de meting dan in de simulaties. De tijdsduur tussen de eerste en tweede overvulling bedraagt ca. 575 s bij de simulatie en ca. 400 s bij de meting. In de LOCKSIM simulatie wordt het peil in de Waaslandhaven benaderd door een

<sup>1</sup> Het programma LOCKSIM (Schohl G.A., 1998) werd ter beschikking gesteld van het WL door de ontwikkelaar Dr. G.A. Schohl (Tennessee Valley Authority, USA). LOCKSIM wordt courant gebruikt voor sluismodellering door de USACE (U.S. Army Corps of Engineers).

constante in de tijd. In werkelijkheid fluctueert dit peil. Deze fluctuatie heeft een invloed op de overvulling. Het verdient aanbeveling om bij vervolgsimulaties een nauwkeurigere benadering voor het peil in de Waaslandhaven en het Deurganckdok toe te passen.

Figuur 12 – Vergelijking opgemeten en met LOCKSIM gesimuleerde nivelleerkromme voor ledigen benedenhoofd (nivellering 8)

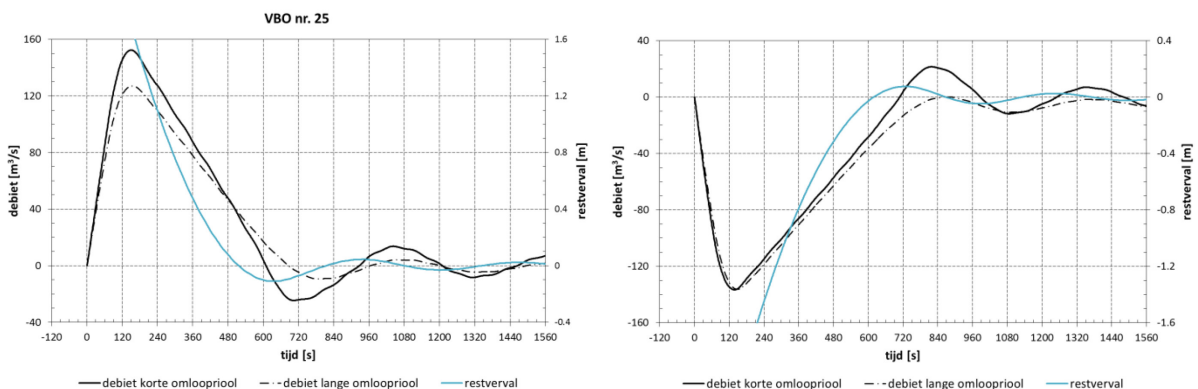


Links: nivelleerkromme – rechts: detail over- en onderlediging.

Uit Figuur 12 volgt dat voor ledigen via het benedenhoofd de nivelleerkromme uit de LOCKSIM simulatie goed samenvalt met deze uit de metingen. Het peil van de eerste overlediging bedraagt + 0.70 m TAW in de meting en + 0.73 m TAW in de simulatie. De vermoedelijke verklaring dat de gesimuleerde overlediging lager is, is de benadering van het peil van het Deurganckdok in de simulatie. In de simulaties wordt een lineaire benadering gebruikt van het peil in het Deurganckdok. Op het ogenblik dat het eindpeil bereikt wordt doet zich een tijdelijke peilverlaging ten opzichte van de lineaire benadering voor. De tijdsduur tussen de eerste en tweede overlediging bedraagt ca. 500 s voor de LOCKSIM simulatie. In de meting worden de roldeuren al geopend na de piek van de eerste onderlediging. De tijdsduur van de overlediging tot de onderlediging is bij de meting kleiner dan bij de simulatie.

Het gesimuleerde debiet doorheen de korte en lange omloopriool en het restverval in functie van de tijd voor de vulling via het bovenhoofd en de lediging via het benedenhoofd wordt gegeven in Figuur 13.

Figuur 13 – Simulatie vullen bovenhoofd en ledigen benedenhoofd – Debiet en restverval in functie van tijd



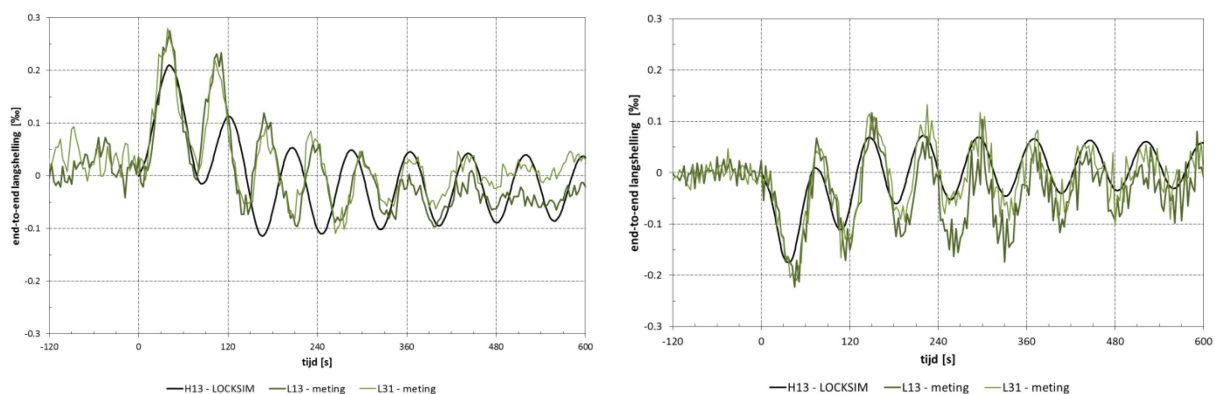
Links vullen bovenhoofd nivellering nr. 25; rechts ledigen benedenhoofd nivellering nr. 8

Nadat het restverval een eerste keer gelijk is aan 0 (tijdstip einde nivellering) blijft zowel bij vullen als bij ledigen het water stromen in de riool. Door de kleinere massastraagheid van de kleine omloopriool zal het debiet hier het eerste van teken veranderen. Het debiet in de lange omloopriool wijzigt pas later van teken en de pieken van het schommelend debiet in de lange omloopriool zijn merkbaar kleiner. Bemerkt bij ledigen via het benedenhoofd dat het debiet van de lange omloopriool een negatieve offset lijkt te vertonen. Dit wordt verklaard door het dalen van het peil in het Deurganckdok waardoor er ook na einde nivellering water uit de kolk stroomt. Door de grotere fluctuaties bij de korte omloopriool is dit hier minder duidelijk.

Om het inzicht in dit proces en het numeriek model te verbeteren verdient het de aanbeveling om de verliezen van de korte en lange omloopriool afzonderlijk te kalibreren door middel van opgemeten eenzijdige nivelleringen. Bij deze eenzijdige nivelleringen wordt bij voorkeur ook enkele periodes van overvulling respectievelijk overlediging gewacht vooraleer de deuren geopend worden.

De opgemeten end-to-end langshellingen van de waterspiegel in de kolk worden in Figuur 14 vergeleken met deze berekend met LOCKSIM. Bemerkt hierbij dat de karakteristieken en de positie van de schepen in de kolk niet gekend is. De simulaties werden hierom uitgevoerd met een lege kolk. De aanwezigheid van een schip in de kolk bij de simulaties leidt tot hogere langshellingen.

Figuur 14 – Simulatie vullen bovenhoofd en ledigen benedenhoofd – end-to-end langshelling



Links vullen bovenhoofd nr. 25 en Rechts ledigen benedenhoofd nr. 8

Zowel voor de vulling via het bovenhoofd als de lediging via het benedenhoofd is de overeenkomst tussen de opgemeten end-to-end langse langshelling en de simulatie vrij goed. De periode van de metingen en simulaties valt zo goed als samen voor de lediging via het benedenhoofd. Voor de vulling via het bovenhoofd is de periode van de simulaties groter dan bij de meting. De waarde van de eerste piekwaarde wordt zowel voor vullen (+0.28 ‰ ten opzichte van +0.21 ‰) als voor ledigen (−0.22 ‰ ten opzichte van −0.17 ‰) onderschat door de simulatie.

## 5 Conclusie

Op vraag van afdeling Maritieme Toegang (contactpersoon Wim De Cock) heeft het Waterbouwkundig Laboratorium op 19/10/2016 en 20/10/2016 een meting uitgevoerd in de Kieldrechtsluis. Tijdens de meting werden het kolkpeil, de end-to-end langshellingen in de kolk en het peil aan Waaslandhaven en Deurganckdok opgemeten door WL. De metingen van WL werden gecombineerd met de continue metingen van het Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen (peilen en positie schuiven en deuren).

In totaal zijn tijdens de periode waarin de druksensoren gelogd hebben 27 nivelleringsen uitgevoerd. Op één nivellering na werden steeds 4 schuiven per hoofd ingezet. De helft van de opgemeten nivelleringsen zijn uitgevoerd met aan zijde Deurganckdok deur 1 gesloten en aan zijde Waaslandhaven deur 4 gesloten. De overige helft van de nivelleringsen zijn uitgevoerd met de andere drie mogelijke deurcombinaties.

### 5.1 Metingen

De door WL en GHA opgemeten peilen (zowel in de kolk als aan zijde Deurganckdok en Waaslandhaven) vallen zo goed als samen. De schuiven van het bovenhoofd en het benedenhoofd openen synchroon met een constante hefsnelheid in ca. 175 s tot een hoogte 7.74 m, of ca. 150 s tot de volledig rioolhoogte (7.0 m) is vrijgemaakt. Dit is een halvering van de heftijd ten opzichte van de schuiven in de Berendrechtsluis. De end-to-end langshelling opgemeten aan linker- en rechteroever verlopen vrijwel synchroon. Bij vullen ontstaat eerst een positieve piek die een schip wegduwt van het voor nivelleren gebruikte hoofd en bij ledigen ontstaat eerst een negatieve piek waarbij een schip een kracht zal ondervinden in de richting van het voor nivelleren gebruikte hoofd. Op de opgemeten langshelling wordt nu en dan een offset vastgesteld bij begin of einde nivelleren en bij één of bij beide oevers. De verklaring hiervoor is meettechnisch.

De opgemeten nivelleringsen zijn vervolgens vergeleken met de in 2008 uitgevoerde meting in de Berendrechtsluis. Hierbij moet opgemerkt worden dat in de Berendrechtsluis de schuiven openen in 313 s wat tweemaal zo lang als in de Kieldrechtsluis. Bij een verval 3.5 m bedraagt de opgemeten nivelleertijd in de Kieldrechtsluis voor ledigen via het benedenhoofd 14 min en voor vullen via het bovenhoofd 9.0 min. Ten opzichte van de Berendrechtsluis is vullen via het bovenhoofd tot 120 s sneller. Voor ledigen via het benedenhoofd is het verschil met de Berendrechtsluis kleiner. Het extremum van de stijgsnelheid bij een verval 3.5 m bedraagt ca. 11 mm/s voor vullen via het bovenhoofd en 8 mm/s voor ledigen via het benedenhoofd. Door het sneller openen van de hefschuiven in de Kieldrechtsluis is de stijgsnelheid tot ca. 2 mm/s hoger dan in de Berendrechtsluis. De optredende langshelling van de waterspiegel in de kolk zijn een goede maat voor de optredende (langs)krachten op de verschutten schepen. Het in de Kieldrechtsluis opgemeten extremum van de end-to-end langshelling voor vullen via het bovenhoofd bedraagt 0.37 ‰ bij een verval ca. 3.5 m. Voor ledigen via het bovenhoofd bedraagt het opgemeten extremum 0.24 ‰. De optredende extremum end-to-end langshellingen zijn van een zelfde grootteorde als bij de meting in de Berendrechtsluis.

Voor het analyseren van de overvulling en onderlediging werd de tijd berekend tussen *einde nivellering* (i.e. eerste tijdstip dat restverval gelijk is aan 0) en het tijdstip van *start openen* deuren en het tijdstip van *einde openen* deuren. Hieruit volgde dat van de 27 nivelleringsen in totaal bij 14 nivelleringsen de tijd tot *start openen* deuren kleiner is dan 60 s, bij 7 nivelleringsen de tijd tot *start openen* deuren tussen 60 s en 120 s bedraagt en bij 6 nivelleringsen de tijd tot *start openen* deuren groter is dan 120 s. Het maximale opgemeten waterstandsverschil tijdens *start openen deuren* is 0.12 m aan zijde Waaslandhaven en 0.08 m aan zijde Deurganckdok. De openingstijd van de deuren bedraagt steeds 249 s en op het tijdstip *einde*

*openen* is het waterstandsverschil beperkt tot enkele centimeter. Bij de in 2008 uitgevoerde meting in de Berendrechtlsuis werd opgemerkt dat de deuren hier onmiddellijk na het bereiken van het eindpeil openen.

In gesloten toestand bevindt de kop van een roldeur zich in een nis met diepte 1.3 m op de linkeroever. De kop van de deuren wordt in deze nis tegen de zijde geduwd waar het peil het laagste is. De sturingscomputer geeft toestemming voor het openen van de deuren op het ogenblik dat er geen verval optreedt en de deuren zich dus in het center van de nis bevinden. Bij het overvullen en overledigen wisselt het teken van het restverval en wijzigt dus de zijde van de nis waartegen de deur duwt. Tijdens dit wisselen is er dus een korte periode waarin de deur in het center staat. Tijdens dit ogenblik kan het startsignaal gegeven worden voor de deuren te openen. Door de traagheid van het systeem zal op het ogenblik dat de deuren werkelijk in beweging treden al terug een restverval optreden. Een restverval leidt tot een toename van de kracht die nodig is om de deur te openen. GHA merkt dit ook op aan de piek van het stroomverbruik bij het begin van openen van de deuren. Dit is mogelijks niet gewenst voor de duurzaamheid. Uit de analyse van de metingen volgt inderdaad dat de deuren bij het merendeel van de nivellerings openen voor het bereiken van de eerste overvulling respectievelijk overlediging. *Start openen* wordt dus bij de meeste nivellerings gegeven op het eerste tijdstip dat het restverval gelijk is aan nul.

## 5.2 Simulatie

De vulling met het bovenhoofd en de lediging met het benedenhoofd met de langste wachttijd tussen einde nivellering en het tijdstip start openen deuren werd gesimuleerd met het voor het ontwerp gebruikte hydraulische netwerkmodel van de Kieldrechtsluis. De opgemeten nivelleerkromme voor de lediging via het benedenhoofd valt vrijwel samen met de gesimuleerde nivelleerkromme. Voor de vulling via het bovenhoofd is de opgemeten nivelleerkromme sneller dan de simulatie, tot 110 s op tijdstip einde nivelleren.

De grootte van de eerste piek van overvulling respectievelijk overlediging wordt vrij goed gesimuleerd. Voor de vulling via het bovenhoofd wordt opgemerkt dat de opgemeten schommelingen sneller uitdempen dan de simulaties. Voor ledigen via het benedenhoofd worden de deuren geopend na de eerste onderlediging. De periode van de gesimuleerde schommelingen zijn groter dan de metingen. Hiervoor werd geen verklaring gevonden.

## 5.3 Aanbevelingen

Het uitvoeren van een literatuurstudie over overvulling en overlediging was niet mogelijk binnen het tijdsbestek van een advies. Een in 2012-2013 uitgevoerde thesisonderzoek aan UGent (Schindfessel, 2013) betrof het overvullen van sluizen. In kader van deze thesis werden analytische formules opgesteld voor overvullen en overledigen. Vervolgens werden deze vergeleken met metingen op een schaalmodel en LOCKSIM simulaties. Een van de test cases betrof het vullen van een sluis door middel van een korte en lange omloopriool.

Indien het wenselijk is om het overvullen en overledigen verder te onderzoeken verdient het aanbeveling om voor vullen via het bovenhoofd en ledigen via het benedenhoofd eenzijdige nivellerings uit te voeren waarbij na *einde nivelleren* voldoende lang (20 min of langer) gewacht wordt vooraleer de deuren geopend worden. De continue peilmetingen van GHA zijn geschikt om deze nivellerings te registreren. Door middel van deze eenzijdige nivellerings kunnen de verliezen van de lange en korte omloopriool afzonderlijk gekalibreerd worden in het hydraulisch netwerkmodel. Ook kan het inertie gedrag van beide riolen afzonderlijk gevalideerd worden op basis van het opgemeten verval en het debiet afgeleid uit de stijgsnelheid van het kolkpeil. Met dit gekalibreerd hydraulisch netwerkmodel kunnen vervolgens scenario's geanalyseerd worden waarbij getracht wordt de overvulling respectievelijk overlediging te reduceren door het sluiten van de schuiven naar het einde van de nivellering toe.

## 6 Referenties

**De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.** (2007). Tweede sluis Waaslandhaven: verslag van de meetcampagnes Berendrecht- en zandvlietsluis. *WL Rapporten, 760/03A*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Cui, J.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2008). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 3. Verslag van bijkomende meetcampagne Berendrechtsluis. *WL Rapporten, 760\_03A*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2007). Tweede sluis Waaslandhaven: opmaak numeriek modelinstrumentarium voor vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten, 760/03A-2*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2010a). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 4. Aanpassing numeriek modelinstrumentarium voor vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten, 760\_03a*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2010b). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 5. Evaluatie van hydraulische performantie ontwerp vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten, 760\_03a*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Schindfessel, L.** (2013). On inertia phenomena in navigation lock filling and emptying. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur: Gent. 144 pp.

**Schohl G.A.** (1998). User's Manual for LOCKSIM – Hydraulic simulation of navigation lock filling and emptying systems

## Bijlage A : Nauwkeurigheid langshelling

De (ogenblikkelijke waarde van de) langse waterspiegelhelling  $S$  wordt bepaald als de verhouding tussen het (ogenblikkelijk) waterstandsverschil  $H$  en de tussenafstand  $\ell$  van twee waterstandsmeters:  

$$S = H / \ell .$$

Zij  $\Delta S$  de absolute fout op  $S$ , dan wordt de relatieve fout op  $S$  gedefinieerd als:  $\delta S = \frac{\Delta S}{S}$

Volgens de foutentheorie wordt de relatieve fout op een quotiënt ( $S=H/ \ell$ ) gegeven door de som van de relatieve fouten op teller ( $H$ ) en noemer ( $\ell$ ):

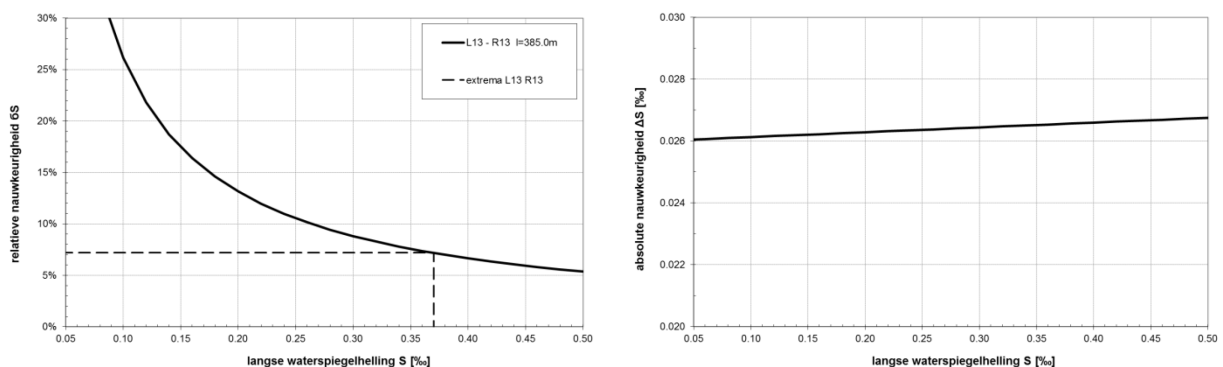
$$\delta S = \delta H + \delta \ell = \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta \ell}{\ell} .$$

Het waterstandsverschil  $H$  wordt bepaald uit het verschil tussen twee gemeten waterstanden. Volgens de foutentheorie is de absolute fout op een verschil gelijk aan de som van de absolute fouten op de termen. Bijgevolg wordt de absolute fout  $\Delta H$  op het waterstandsverschil gegeven door twee maal de meetnauwkeurigheid van een CeraDiver® (zie Tabel 1):  $\Delta H = 2 \times 5 \text{ mm}$ .

De tussenafstand  $\ell$  van twee waterstandsmeters wordt bepaald uit de op plan afgemeten afstand (as-op-as) van de laddernissen waarin de meters geplaatst werden, zie Figuur 15. Als raming van de absolute fout  $\Delta \ell$  op de tussenafstand, wordt één keer de breedte van een laddernis genomen:  $\Delta \ell = 0.6 \text{ m}$ .

In Figuur 15 wordt op basis van de voorgaande formules en ramingen de relatieve nauwkeurigheid  $\delta S$  en de absolute nauwkeurigheid  $\Delta S$  uitgezet in functie van de grootte van de langse waterspiegelhelling  $S$ .

Figuur 15 – Nauwkeurigheid langse waterspiegelhelling in functie van langse waterspiegelhelling



links: relatieve nauwkeurigheid  $\delta S$  / rechts: absolute nauwkeurigheid  $\Delta S$

Hoe Figuur 15 afgelezen dient te worden, wordt geïllustreerd met een voorbeeld. Voor vullen via het bovenhoofd werd een extremum van 0.37 ‰ opgemeten. Uit Figuur 15 volgt dan dat deze piekwaarde met een relatieve nauwkeurigheid van ongeveer 7 % bepaald wordt.

Uit nadere analyse van de curven in Figuur 15 blijkt verder dat de absolute fout quasi constant is en ca. 0.0265 ‰ bedraagt. Hoe groter (in absolute waarde) de optredende langse waterspiegelhelling is, hoe relatief nauwkeuriger deze bepaalt kan worden.

**Opmerking:** In bovenstaande, eenvoudige raming van de onzekerheid op de langse waterspiegelhellingen wordt geen rekening gehouden met een mogelijke verplaatsing in het verticaal vlak van de waterstandsmeters tijdens een schutting. Bemerkt dat in paragraaf 3.2 een offset tot ca. + 0.06 ‰ werd opgemerkt die vermoedelijk te wijten is aan de meetnauwkeurigheid. Dit betreft ca. 2 x de hierboven afgeleide meetnauwkeurigheid. Evenmin wordt rekening gehouden met de kloknaauwkeurigheid van de meettoestellen.



## Bijlage B : Resultaten per nivellering

De tabellen worden gegeven in Bijlage B.1 – Tabel. Voor de figuren wordt zowel een variant met een grote tijdschaal (-360 s tot 1200 s) als een variant met een kleinere tijdschaal gegeven (- 60 s tot + 600 s). De figuren met een grote tijdschaal hebben als doel de overvulling respectievelijk overlediging te visualiseren. De figuren met een kleinere tijdschaal geven meer detail over het eigenlijke nivelleren. Deze figuren bevatten:

- de nivelleerkromme,
- de stroom naar de roldeuren,
- de stijgsnelheid van het kolkpeil,
- de positie van de hefschuiven in het voor nivelleren gebruikte hoofd,
- de end-to-end langse waterspiegelhelling (L13 en R13).

De figuren met grote tijdschaal worden gegeven in Bijlage B.2 – Figuren tijdschaal overvulling/overledigen, de figuren met kleinere tijdschaal worden gegeven in Bijlage B.3 – Figuren tijdschaal nivellering.

### Bijlage B.1 – Tabel

Tabel 4 bevat per nivellering:

- het nummer van de nivellering,
- het type,
- het starttijdstip,
- de deurcombinatie en de gebruikte schuiven,
- het begin-, eindpeil en verval,
- de nivelleertijd,
- het extremum van de stijgsnelheid en het bijhorend tijdstip,
- het extremum van de end-to-end langse waterspiegelhelling aan linkeroever (L13) respectievelijk recheroever (R13) met het bijhorend tijdstip.

Tabel 5 bevat per nivellering:

- het nummer van de nivellering,
- Het type,
- Het verval,
- de deurcombinatie,
- de wachttijd tot start openen deuren ten opzichte van einde nivellering en het waterstandsverschil op het begin van openen deuren,
- de tijd dat de deuren openen,
- het eindtijdstip van openen deuren ten opzichte van einde nivellering en het waterstandsverschil op het einde van openen deuren.

Tabel 4 – Resultaten nivellering

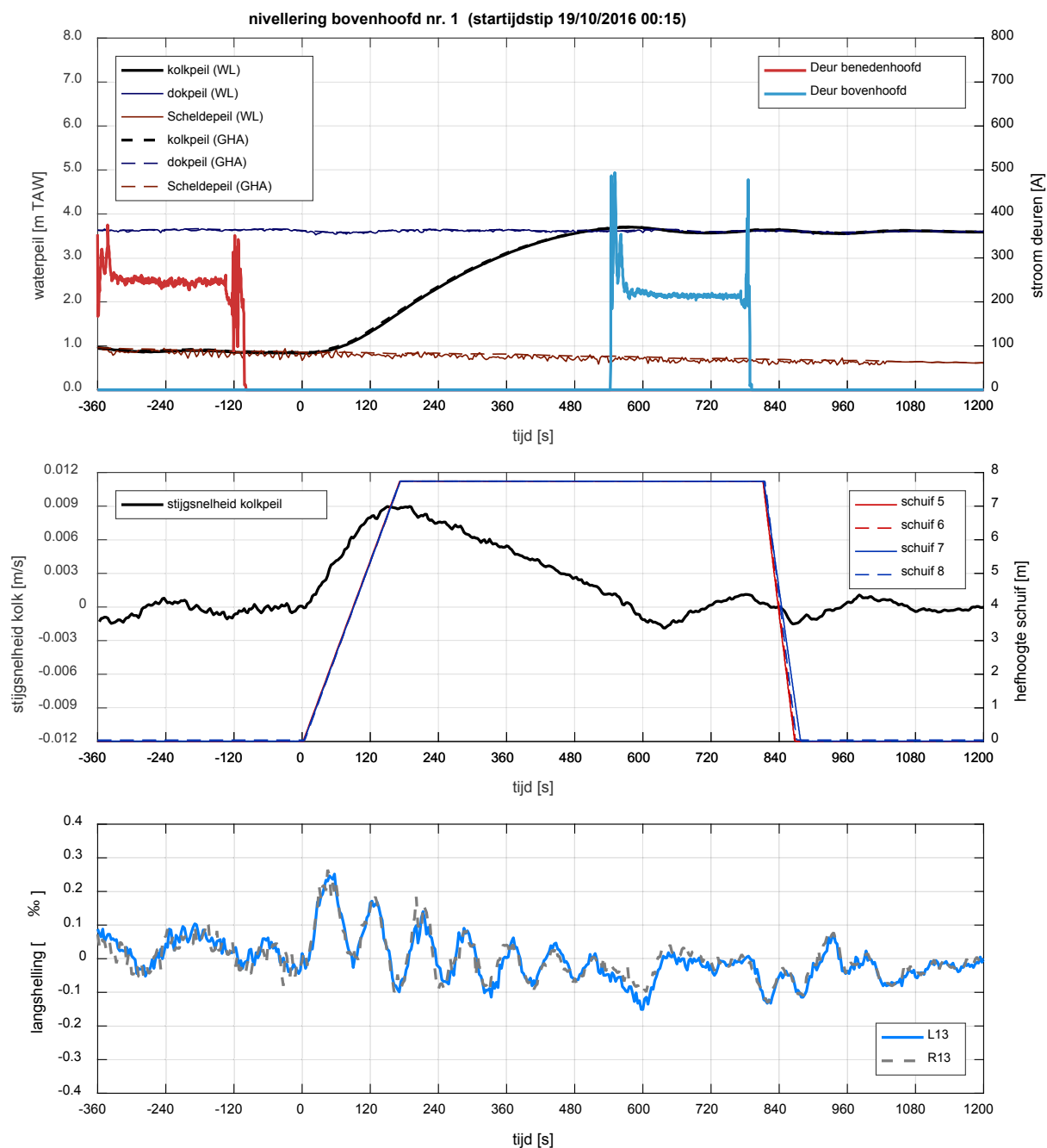
| num-<br>mer | type | start<br>(openen schuiven) | deur-<br>combi-<br>natie | schuiven | beginpeil | eindpeil | verval | nive-<br>leertijd | stijgsnelheid |          | end-to-end langshelling<br>L13 |          | end-to-end langshelling<br>R13 |          |
|-------------|------|----------------------------|--------------------------|----------|-----------|----------|--------|-------------------|---------------|----------|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
|             |      |                            |                          |          |           |          |        |                   | extr.         | tijdstip | extr.                          | tijdstip | extr.                          | tijdstip |
| [-]         | [-]  | [-]                        | [-]                      | [-]      | [m TAW]   | [m]      | [m]    | [s]               | [mm/s]        | [s]      | [‰]                            | [s]      | [‰]                            | [s]      |
| 1           | VBO  | 19/10_00:15:30             | 14                       | 5,6,7,8  | 0.84      | 3.61     | 2.77   | 501               | 9.0           | 189      | 0.25                           | 57       | 0.26                           | 45       |
| 2           | LBE  | 19/10_00:58:51             | 14                       | 1,2,3,4  | 3.57      | 0.14     | -3.43  | 831               | -7.2          | 165      | -0.18                          | 48       | -0.19                          | 45       |
| 3           | VBO  | 19/10_03:52:51             | 24                       | 5,6,7,8  | 2.46      | 3.58     | 1.12   | 321               | 5.5           | 159      | 0.19                           | 60       | 0.13                           | 39       |
| 4           | LBE  | 19/10_04:13:21             | 23                       | 1,2,3,4  | 3.58      | 2.76     | -0.82  | 336               | -3.8          | 177      | -0.08                          | 51       | 0.07                           | 213      |
| 5           | VBO  | 19/10_05:20:45             | 23                       | 5,6,7,8  | 3.42      | 3.56     | 0.14   | 177               | 1.4           | 93       | -0.05                          | 162      | 0.06                           | 132      |
| 6           | VBE  | 19/10_06:44:00             | 24                       | 1,2,4    | 3.58      | 6.38     | 2.80   | 576               | 8.4           | 171      | -0.21                          | 291      | 0.17                           | 45       |
| 7           | LBO  | 19/10_08:43:18             | 13                       | 5,6,7,8  | 5.27      | 3.68     | -1.59  | 489               | -5.3          | 150      | -0.13                          | 48       | -0.15                          | 48       |
| 8           | LBE  | 19/10_13:03:12             | 13                       | 1,2,3,4  | 3.72      | 0.79     | -2.93  | 657               | -8.0          | 135      | -0.22                          | 45       | -0.21                          | 48       |
| 9           | VBO  | 19/10_13:36:12             | 23                       | 5,6,7,8  | 0.66      | 3.69     | 3.03   | 447               | 11.3          | 150      | 0.35                           | 51       | 0.35                           | 42       |
| 10          | LBE  | 19/10_16:01:39             | 23                       | 1,2,3,4  | 3.70      | 2.86     | -0.84  | 348               | -3.7          | 144      | -0.11                          | 39       | -0.13                          | 39       |
| 11          | LBO  | 19/10_18:29:33             | 14                       | 5,6,7,8  | 4.83      | 3.68     | -1.15  | 435               | -4.3          | 162      | -0.12                          | 48       | -0.12                          | 48       |
| 12          | VBE  | 19/10_19:48:39             | 14                       | 1,2,3,4  | 3.73      | 6.17     | 2.44   | 471               | 8.3           | 174      | 0.23                           | 45       | 0.24                           | 45       |
| 13          | LBO  | 19/10_21:32:57             | 24                       | 5,6,7,8  | 4.64      | 3.72     | -0.92  | 345               | -4.1          | 147      | -0.09                          | 45       | 0.08                           | 165      |
| 14          | LBE  | 19/10_23:06:36             | 23                       | 1,2,3,4  | 3.71      | 2.66     | -1.05  | 390               | -4.6          | 132      | -0.11                          | 51       | -0.15                          | 45       |
| 15          | VBO  | 19/10_23:52:24             | 23                       | 5,6,7,8  | 1.92      | 3.72     | 1.80   | 357               | 8.0           | 135      | 0.22                           | 36       | 0.21                           | 45       |
| 16          | LBE  | 20/10_00:31:54             | 24                       | 1,2,3,4  | 3.72      | 0.98     | -2.74  | 678               | -7.3          | 156      | -0.17                          | 51       | -0.22                          | 45       |
| 17          | VBO  | 20/10_02:26:06             | 14                       | 5,6,7,8  | -0.14     | 3.66     | 3.80   | 576               | 11.4          | 165      | 0.37                           | 51       | 0.37                           | 45       |
| 18          | LBE  | 20/10_03:13:54             | 13                       | 1,2,3,4  | 3.68      | 0.80     | -2.89  | 603               | -8.2          | 135      | -0.19                          | 51       | -0.22                          | 48       |
| 19          | VBO  | 20/10_04:31:18             | 13                       | 5,6,7,8  | 1.97      | 3.65     | 1.68   | 369               | 7.2           | 144      | 0.28                           | 48       | 0.27                           | 45       |
| 20          | LBE  | 20/10_05:14:48             | 14                       | 1,2,3,4  | 3.68      | 2.63     | -1.06  | 393               | -4.4          | 138      | -0.10                          | 54       | -0.13                          | 51       |
| 21          | LBO  | 20/10_06:31:57             | 14                       | 5,6,7,8  | 3.77      | 3.67     | -0.10  | 159               | -1.0          | 135      | -0.07                          | 0        | 0.06                           | 36       |
| 22          | VBE  | 20/10_08:07:06             | 14                       | 1,2,3,4  | 3.63      | 5.91     | 2.28   | 456               | 8.1           | 153      | 0.20                           | 45       | 0.17                           | 45       |
| 23          | LBO  | 20/10_10:23:33             | 14                       | 5,6,7,8  | 4.19      | 3.65     | -0.54  | 276               | -2.9          | 126      | -0.10                          | 45       | 0.08                           | 162      |
| 24          | LBE  | 20/10_11:41:57             | 14                       | 1,2,3,4  | 3.65      | 2.33     | -1.31  | 477               | -4.7          | 153      | -0.09                          | 36       | -0.15                          | 33       |
| 25          | VBO  | 20/10_12:50:48             | 14                       | 5,6,7,8  | 1.30      | 3.65     | 2.35   | 399               | 9.4           | 153      | 0.28                           | 42       | 0.28                           | 39       |
| 26          | LBE  | 20/10_13:32:54             | 14                       | 1,2,3,4  | 3.64      | 0.55     | -3.09  | 747               | -7.2          | 165      | -0.18                          | 42       | -0.19                          | 48       |
| 27          | VBO  | 20/10_14:21:33             | 14                       | 5,6,7,8  | 0.16      | 3.61     | 3.45   | 552               | 10.3          | 150      | 0.34                           | 45       | 0.37                           | 51       |

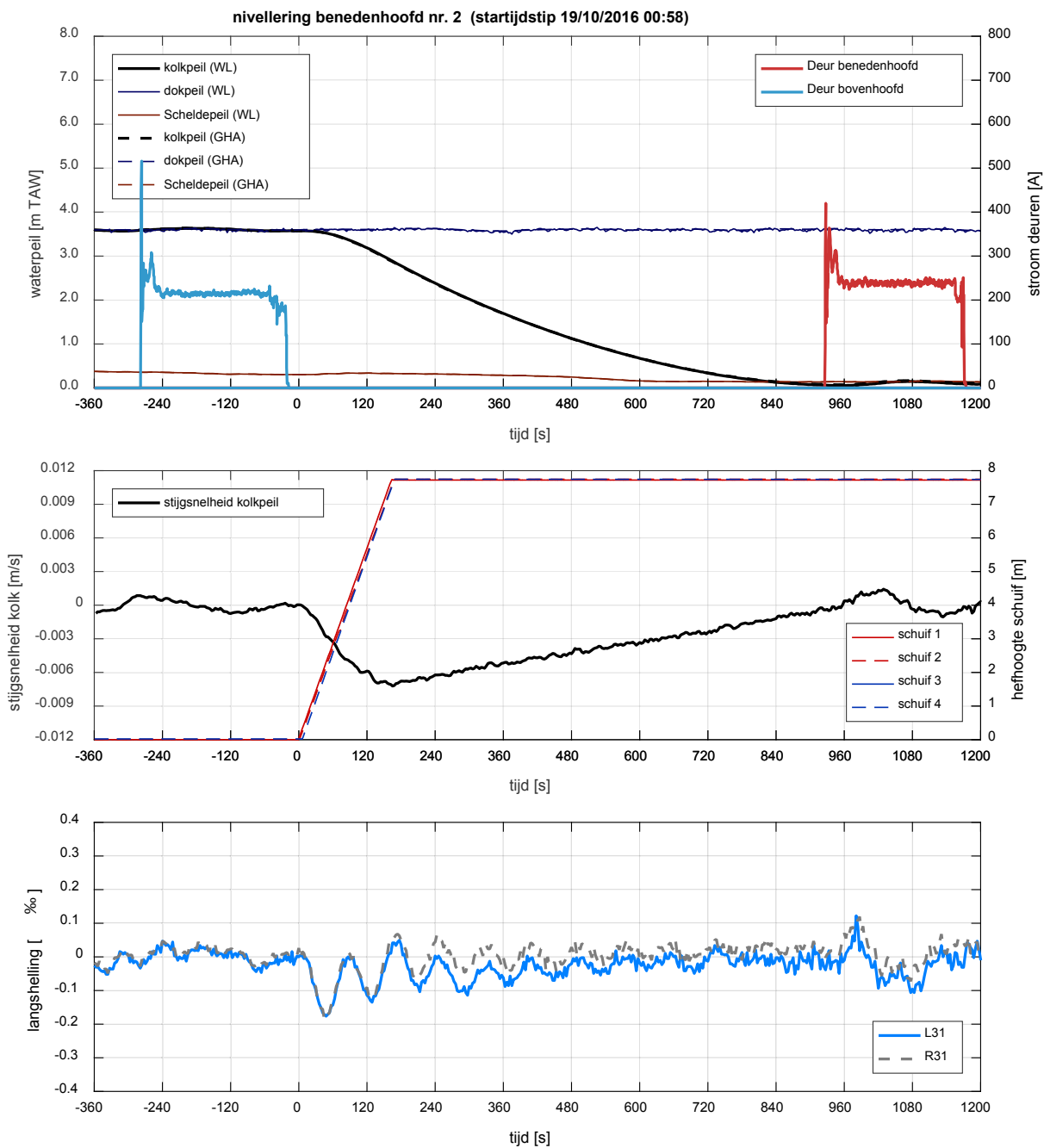
Tabel 5 – Resultaten per nivellering – openen roldeuren

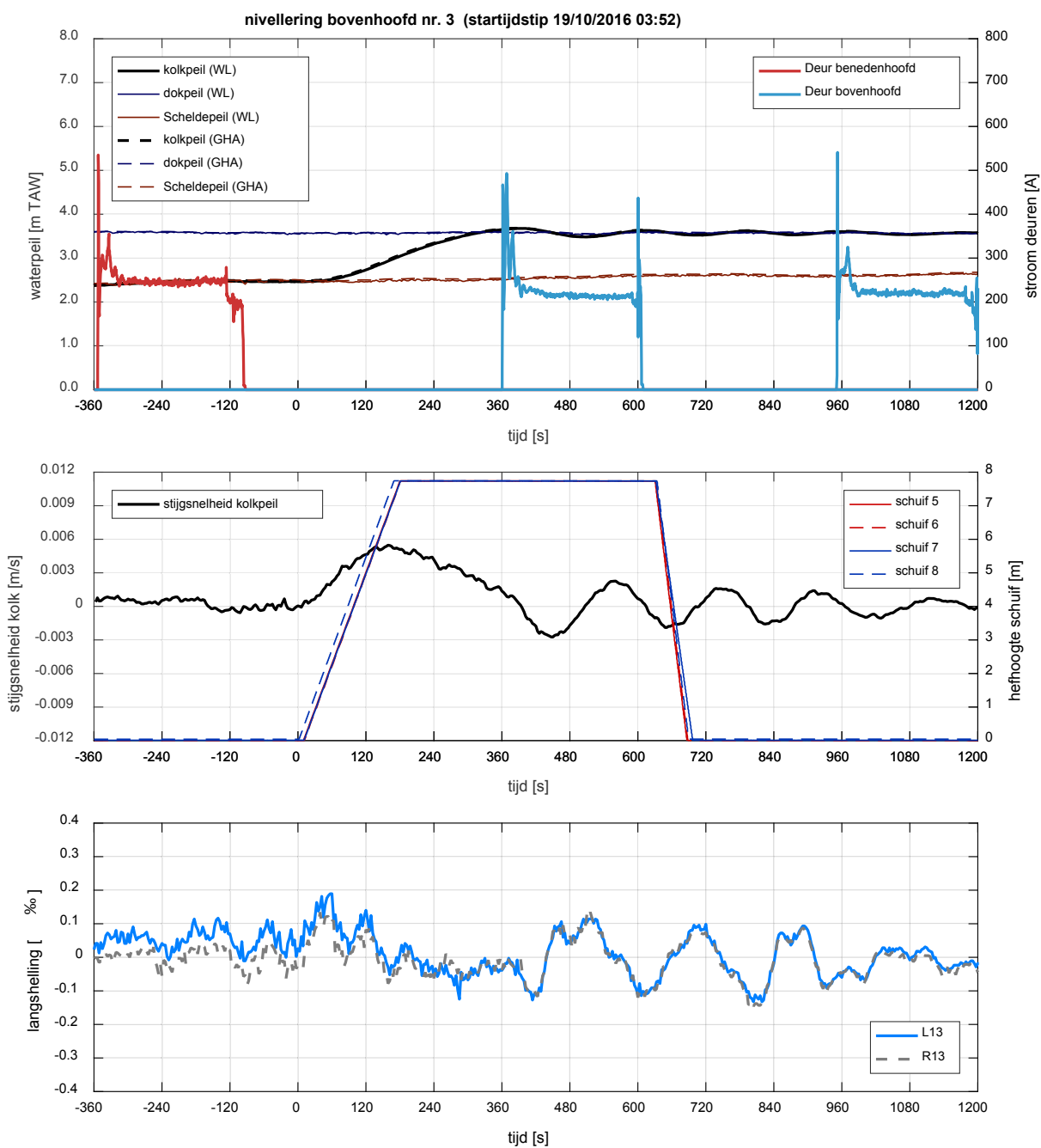
| nummer | type | verval | deurcombinatie | start<br>openen<br>deuren | waterstandsverschil op tijdstip start<br>openen deuren |        |                       | tijd<br>openen<br>deuren | einde<br>openen<br>deuren | waterstandsverschil op tijdstip<br>einde openen deuren |        |                       |
|--------|------|--------|----------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------|-----------------------|
|        |      |        |                |                           | WL gem<br>kolkpeil                                     | GHA    | WL lokaal<br>kolkpeil |                          |                           | WL gem<br>kolkpeil                                     | GHA    | WL lokaal<br>kolkpeil |
| [-]    | [-]  | [m]    | [-]            | [s]                       | [m]                                                    | [m]    | [m]                   | [s]                      | [s]                       | [m]                                                    | [m]    | [m]                   |
| 1      | VBO  | 2.77   | 14             | 42                        | 0.063                                                  | 0.059  | 0.069                 | 249                      | 291                       | 0.000                                                  | -0.002 | 0.014                 |
| 2      | LBE  | -3.43  | 14             | 95                        | -0.076                                                 | -0.073 | -0.061                | 248                      | 343                       | -0.053                                                 | -0.043 | -0.031                |
| 3      | VBO  | 1.12   | 24             | 40                        | 0.063                                                  | 0.059  | 0.066                 | 248                      | 288                       | 0.045                                                  | 0.024  | 0.044                 |
| 4      | LBE  | -0.82  | 23             | 63                        | -0.045                                                 | -0.047 | -0.077                | 248                      | 311                       | -0.007                                                 | -0.007 | -0.021                |
| 5      | VBO  | 0.14   | 23             | 57                        | 0.033                                                  | 0.031  | 0.027                 | 243                      | 300                       | -0.014                                                 | -0.014 | -0.018                |
| 6      | VBE  | 2.80   | 24             | 46                        | 0.054                                                  | 0.043  | -0.021                | 249                      | 295                       | 0.023                                                  | 0.007  | 0.007                 |
| 7      | LBO  | -1.59  | 13             | 47                        | -0.008                                                 | -0.004 | -0.037                | 249                      | 296                       | 0.010                                                  | -0.005 | 0.000                 |
| 8      | LBE  | -2.93  | 13             | 336                       | 0.008                                                  | -0.004 | -0.007                | 249                      | 586                       | 0.036                                                  | 0.030  | 0.010                 |
| 9      | VBO  | 3.03   | 23             | 60                        | 0.101                                                  | 0.105  | 0.108                 | 249                      | 309                       | 0.044                                                  | 0.025  | 0.030                 |
| 10     | LBE  | -0.84  | 23             | 27                        | -0.035                                                 | -0.036 | -0.060                | 248                      | 275                       | -0.005                                                 | 0.004  | -0.038                |
| 11     | LBO  | -1.15  | 14             | 48                        | -0.035                                                 | -0.034 | -0.053                | 249                      | 297                       | -0.007                                                 | -0.004 | -0.019                |
| 12     | VBE  | 2.44   | 14             | 56                        | 0.064                                                  | 0.054  | 0.050                 | 249                      | 305                       | 0.023                                                  | 0.006  | 0.005                 |
| 13     | LBO  | -0.92  | 24             | 61                        | -0.038                                                 | -0.035 | -0.057                | 248                      | 309                       | 0.003                                                  | 0.001  | -0.012                |
| 14     | LBE  | -1.05  | 23             | 24                        | -0.004                                                 | -0.010 | -0.042                | 248                      | 272                       | 0.011                                                  | 0.005  | -0.013                |
| 15     | VBO  | 1.80   | 23             | 49                        | 0.115                                                  | 0.116  | 0.093                 | 243                      | 292                       | 0.021                                                  | 0.009  | 0.009                 |
| 16     | LBE  | -2.74  | 24             | 31                        | -0.023                                                 | -0.028 | -0.055                | 248                      | 279                       | 0.050                                                  | 0.049  | -0.008                |
| 17     | VBO  | 3.80   | 14             | 46                        | 0.065                                                  | 0.065  | 0.047                 | 249                      | 295                       | 0.004                                                  | -0.003 | -0.012                |
| 18     | LBE  | -2.89  | 13             | 60                        | -0.061                                                 | -0.058 | -0.091                | 249                      | 309                       | 0.020                                                  | 0.030  | -0.024                |
| 19     | VBO  | 1.68   | 13             | 65                        | 0.119                                                  | 0.118  | 0.097                 | 248                      | 313                       | 0.004                                                  | 0.005  | -0.010                |
| 20     | LBE  | -1.06  | 14             | 105                       | -0.065                                                 | -0.055 | -0.086                | 248                      | 353                       | -0.001                                                 | -0.006 | -0.017                |
| 21     | LBO  | -0.10  | 14             | 71                        | -0.025                                                 | -0.027 | -0.039                | 249                      | 320                       | 0.005                                                  | 0.005  | -0.004                |
| 22     | VBE  | 2.28   | 14             | 297                       | 0.031                                                  | 0.020  | 0.016                 | 249                      | 546                       | 0.007                                                  | -0.013 | -0.008                |
| 23     | LBO  | -0.54  | 14             | 237                       | 0.036                                                  | 0.033  | 0.008                 | 248                      | 485                       | 0.005                                                  | 0.004  | -0.014                |
| 24     | LBE  | -1.31  | 14             | 93                        | 0.005                                                  | -0.003 | -0.026                | 248                      | 341                       | 0.010                                                  | -0.005 | -0.023                |
| 25     | VBO  | 2.35   | 14             | 684                       | -0.031                                                 | -0.030 | -0.042                | 249                      | 933                       | -0.009                                                 | -0.016 | -0.011                |
| 26     | LBE  | -3.09  | 14             | 130                       | -0.063                                                 | -0.064 | -0.061                | 248                      | 378                       | -0.033                                                 | -0.032 | -0.028                |
| 27     | VBO  | 3.45   | 14             | 417                       | -0.019                                                 | -0.015 | -0.026                | 249                      | 666                       | -0.022                                                 | -0.022 | -0.020                |

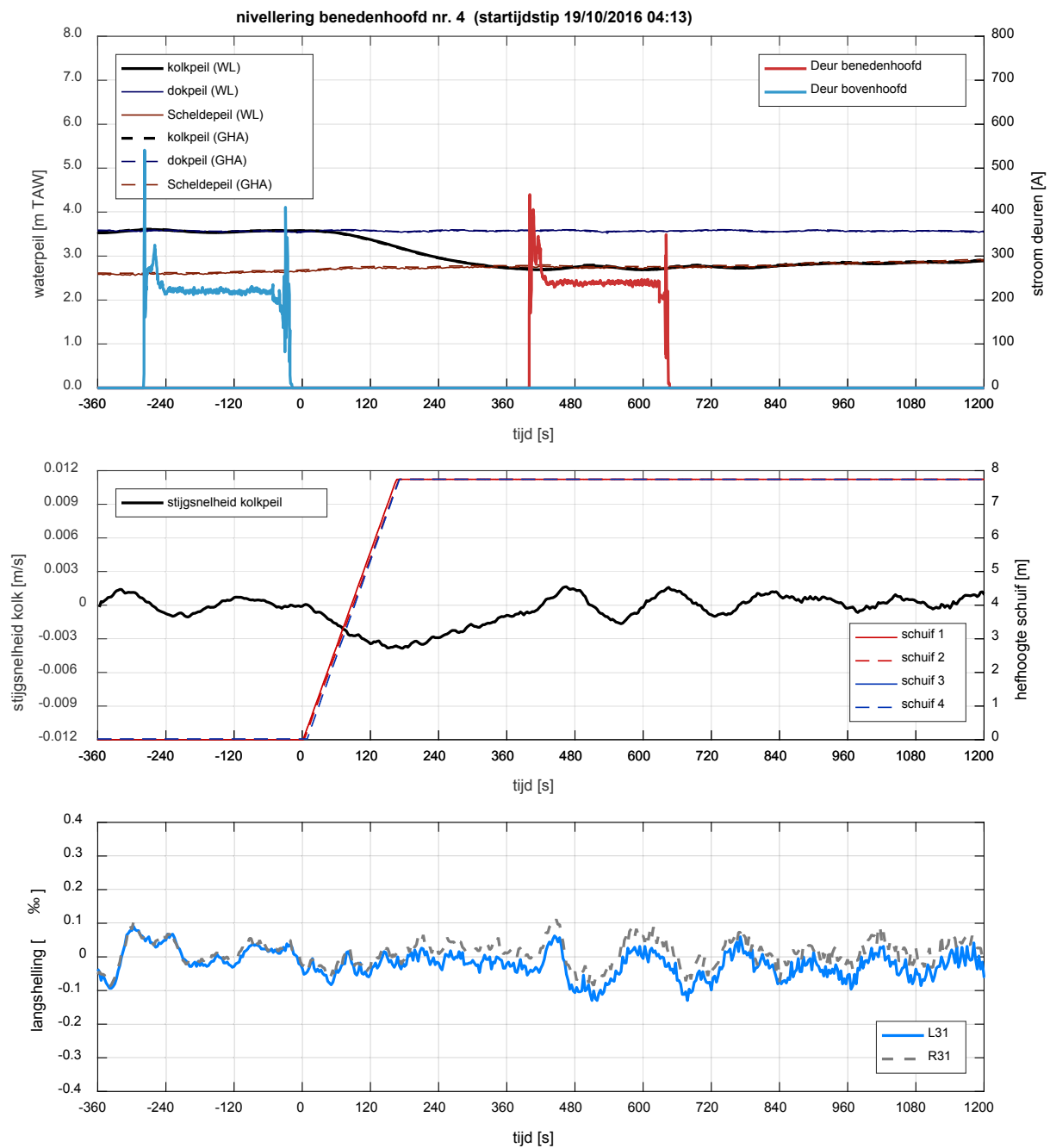
(WL lokaal kolkpeil = het waterstandsverschil berekend op basis van de twee meetpunten nabij het voor nivellieren gebruikte hoofd)

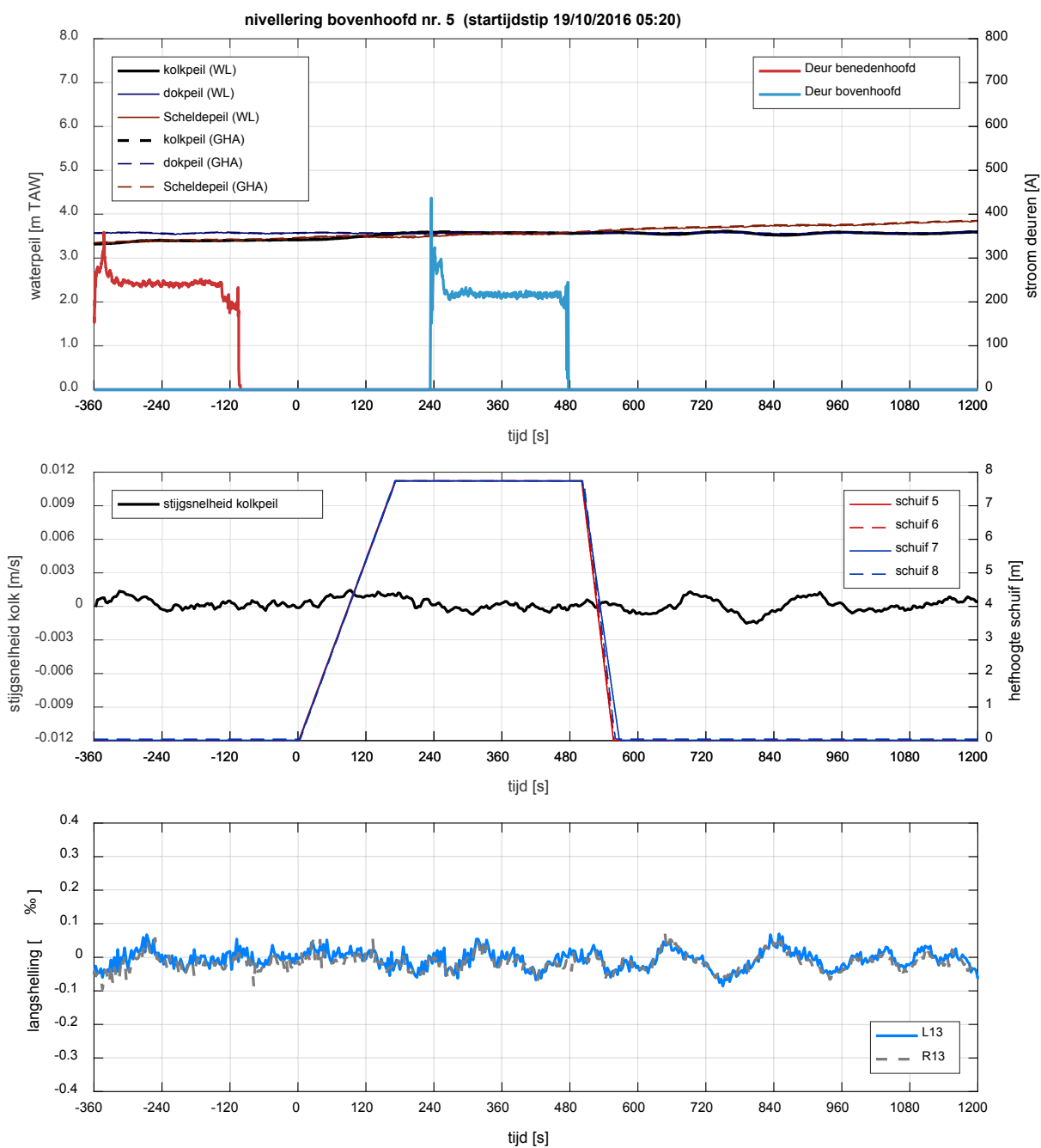
## Bijlage B.2 – Figuren tijdschaal overvulling/overlediging



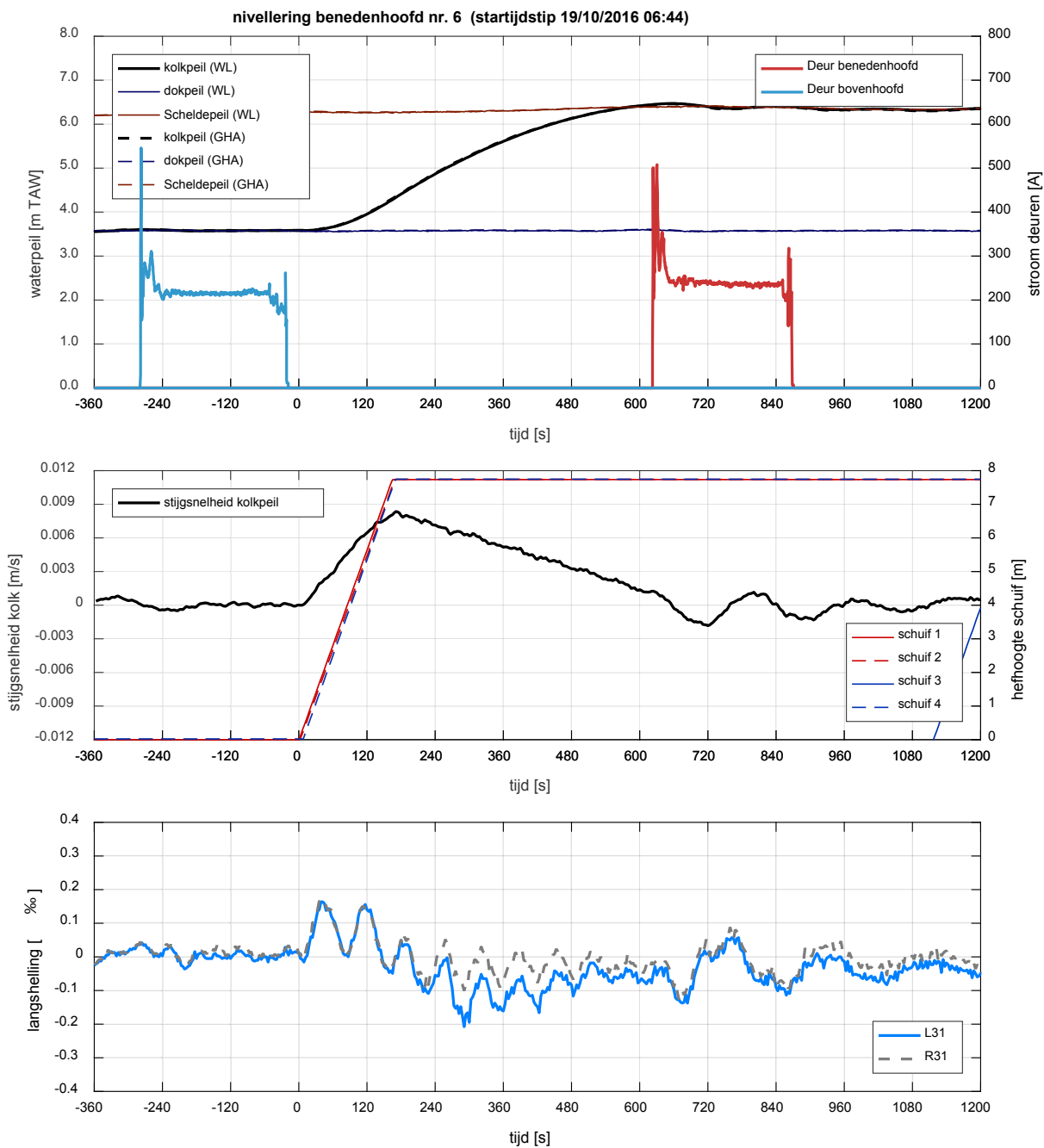


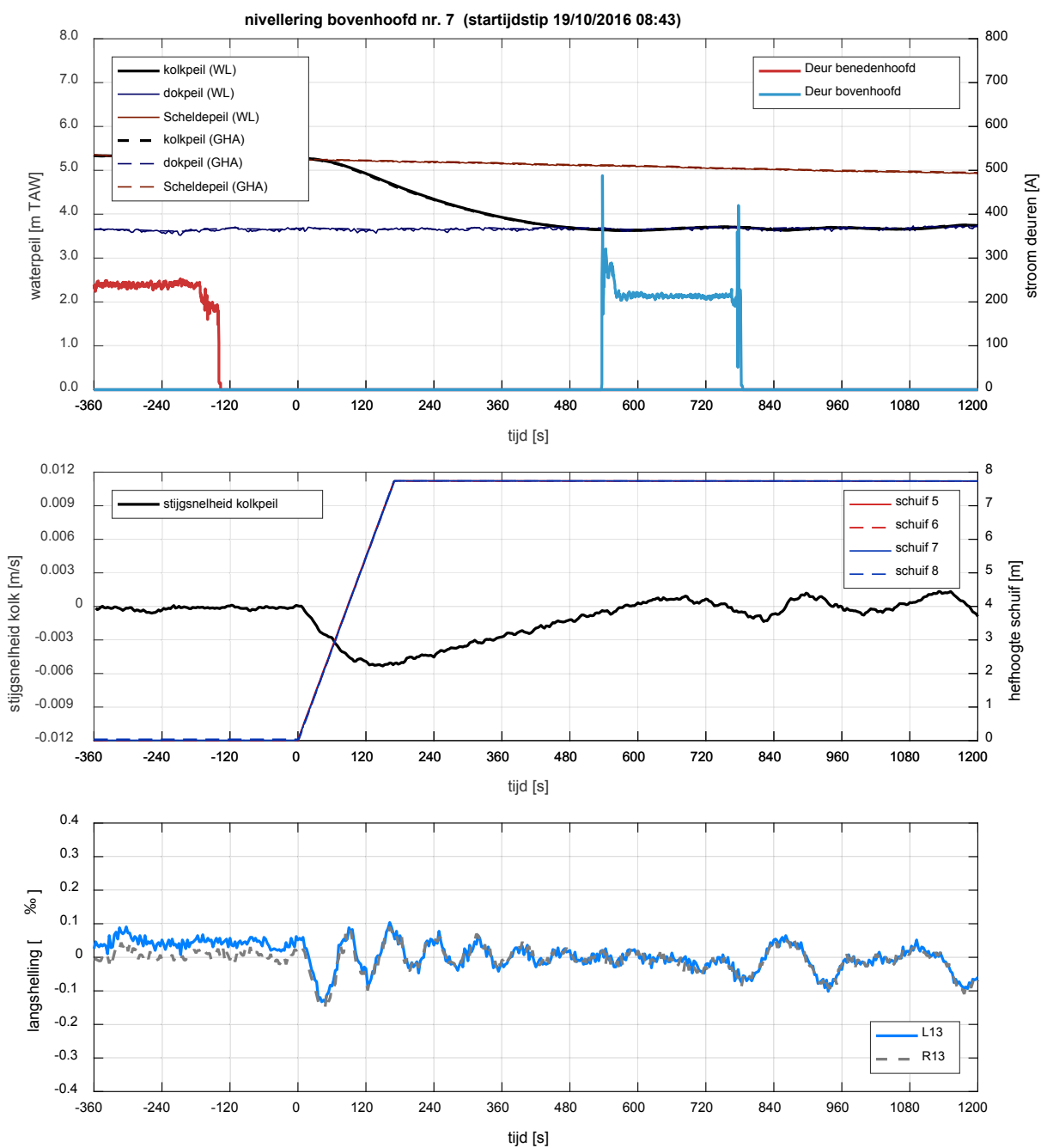


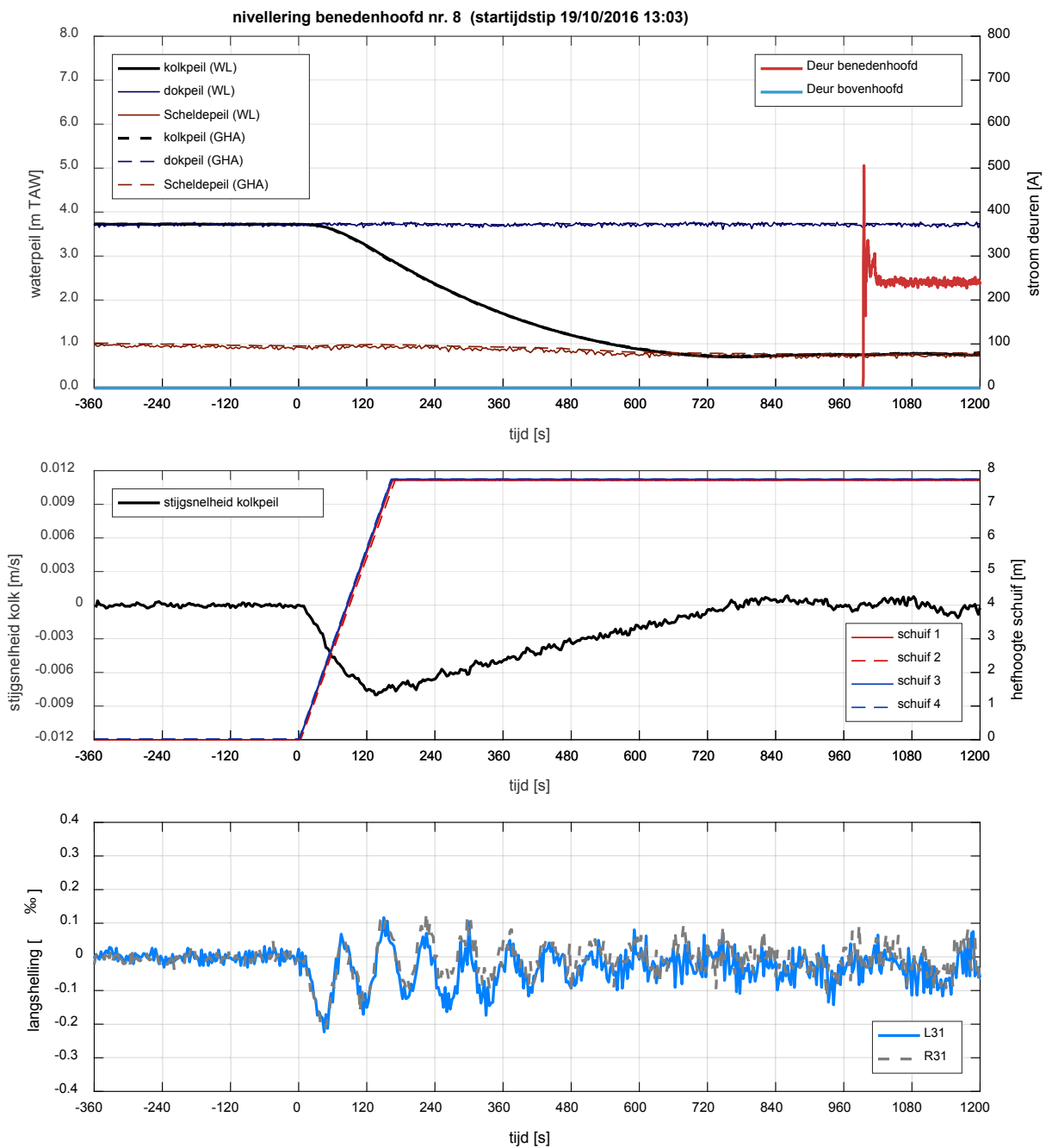


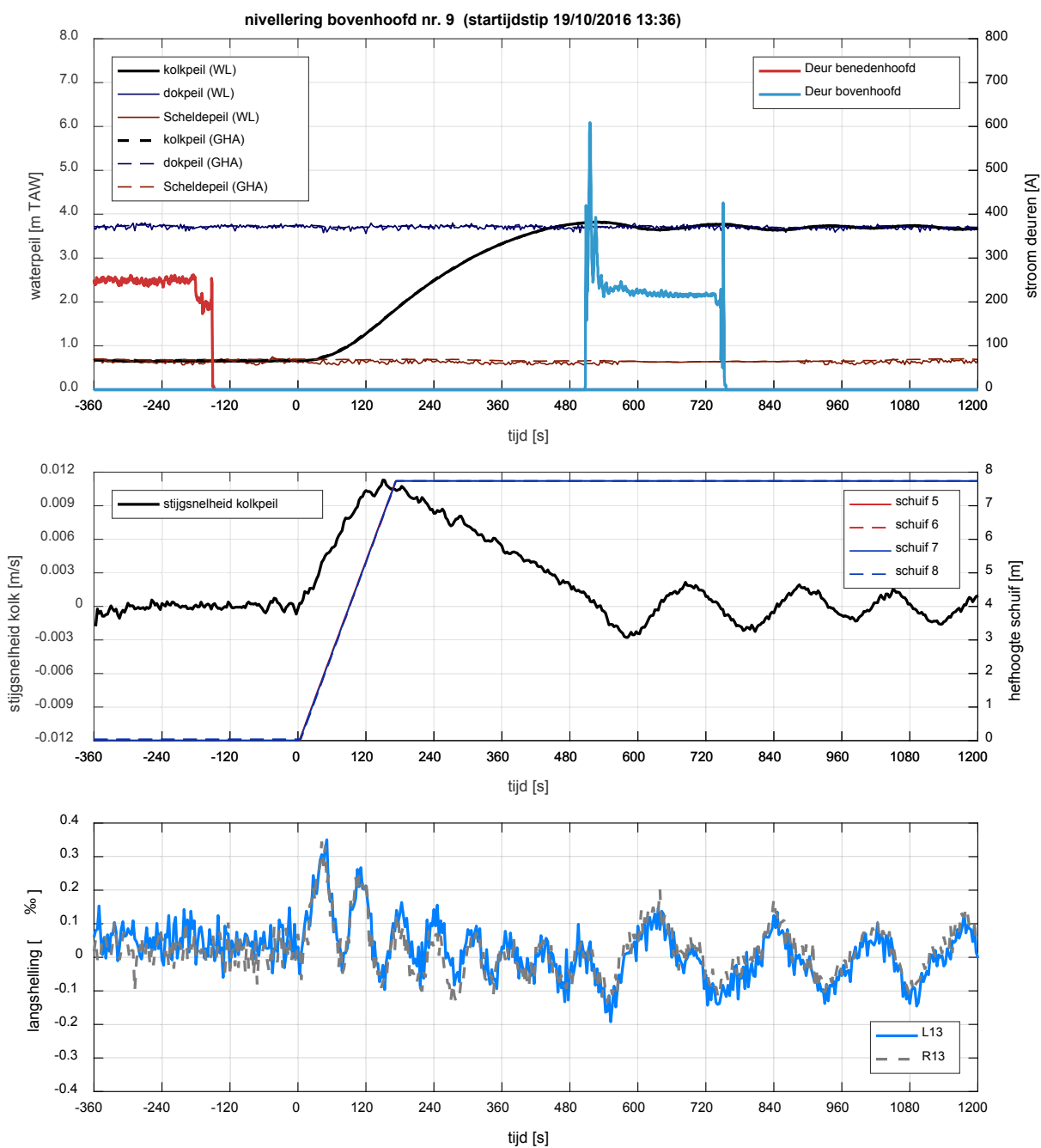


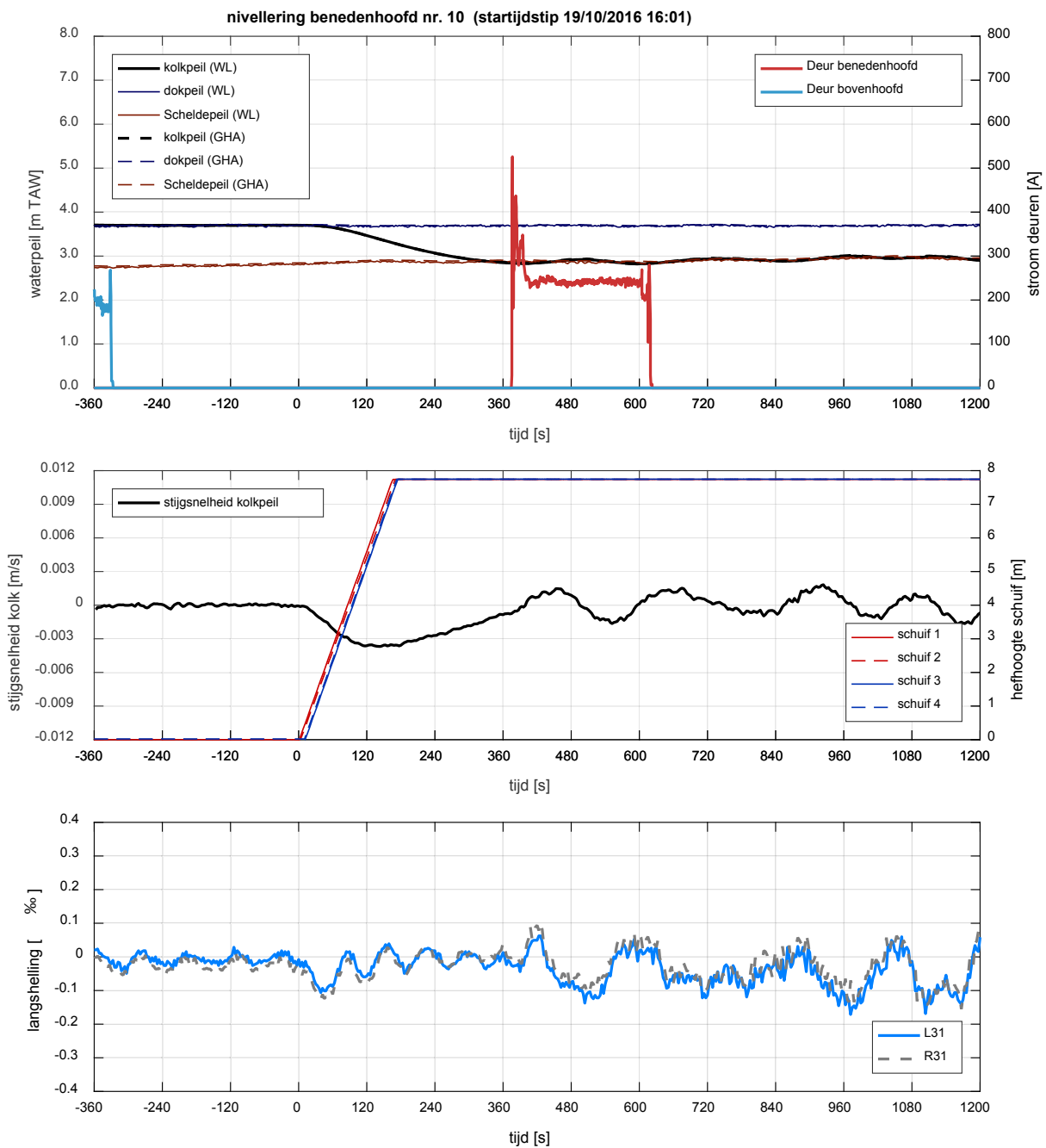


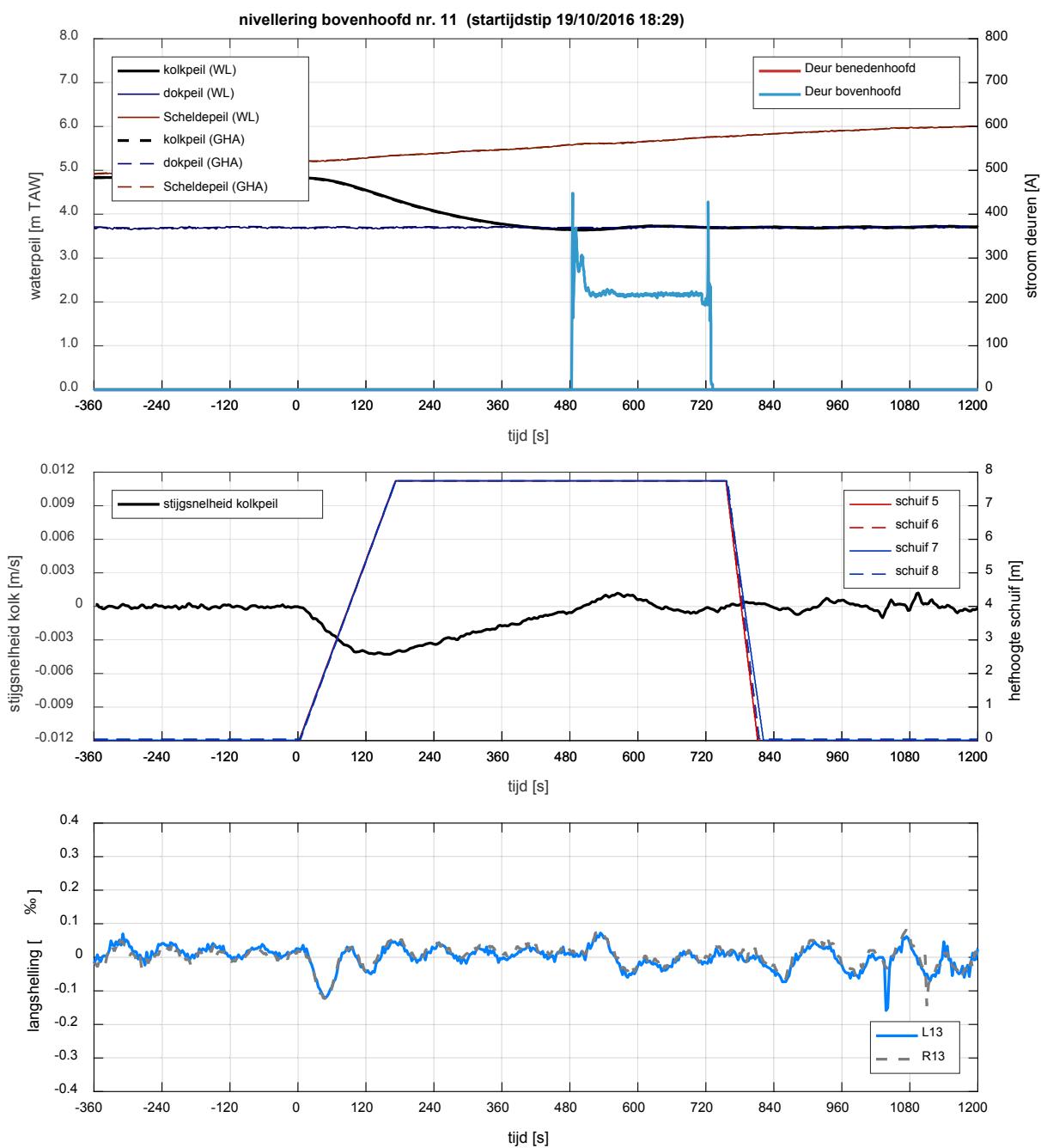


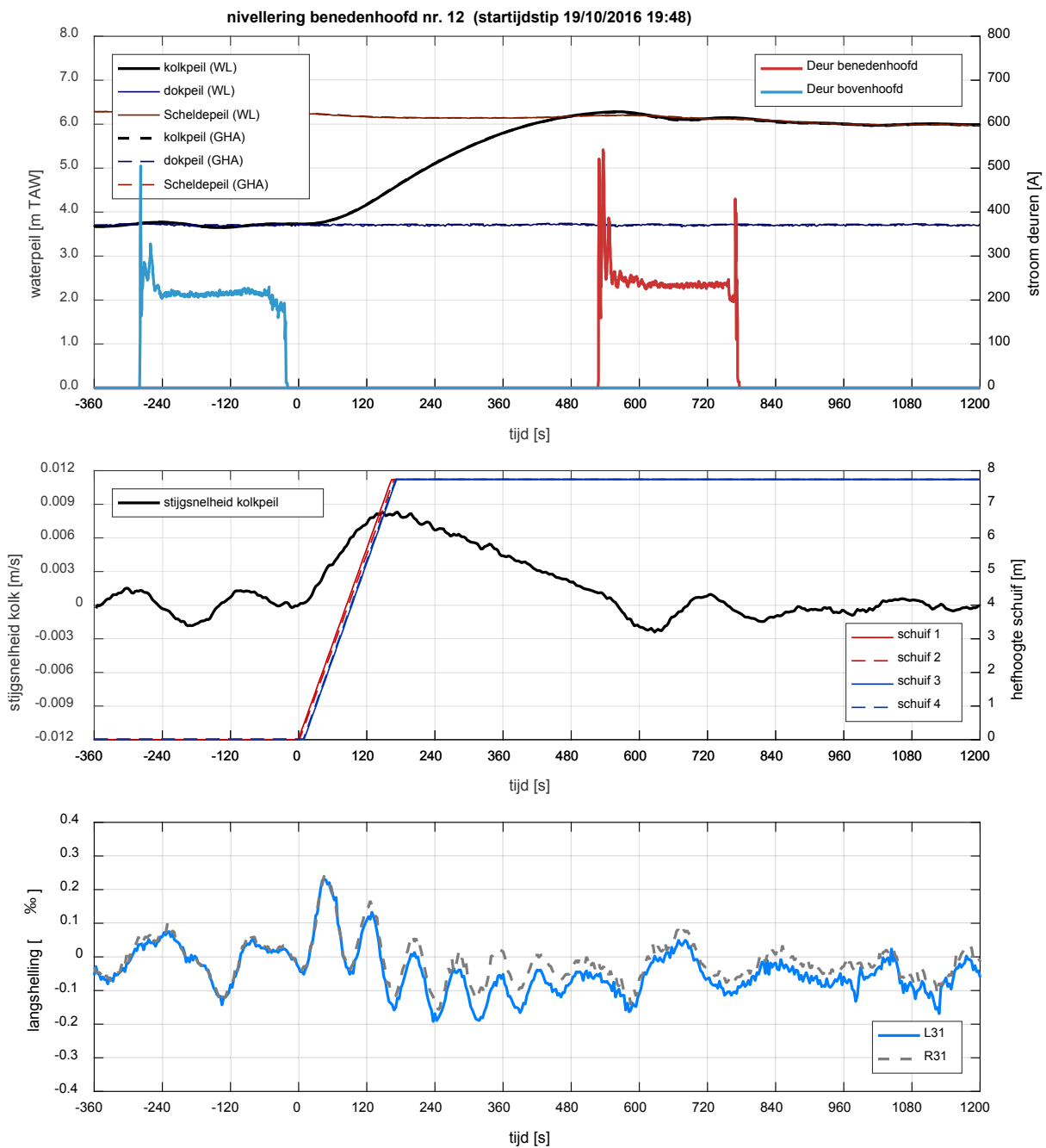


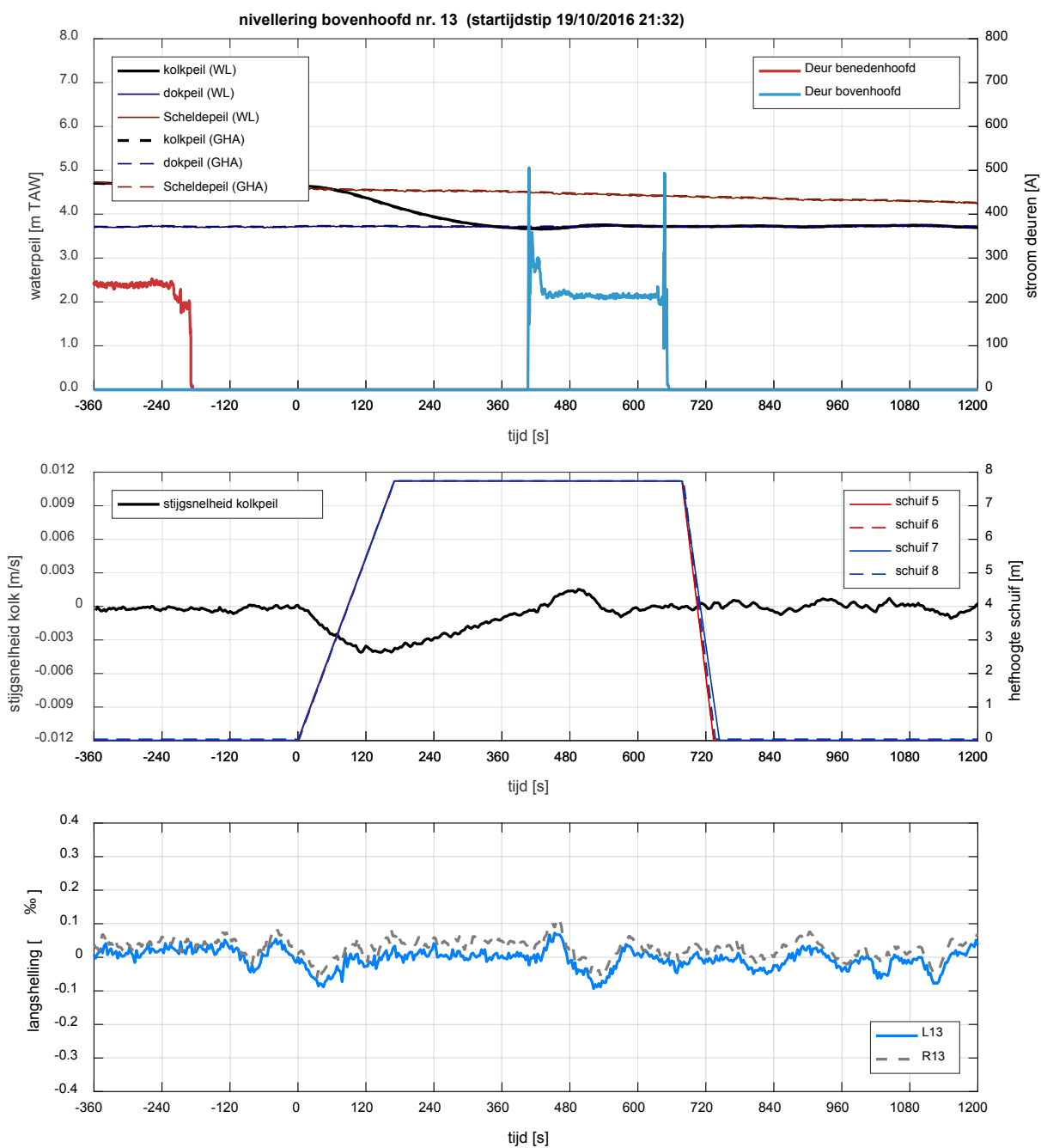




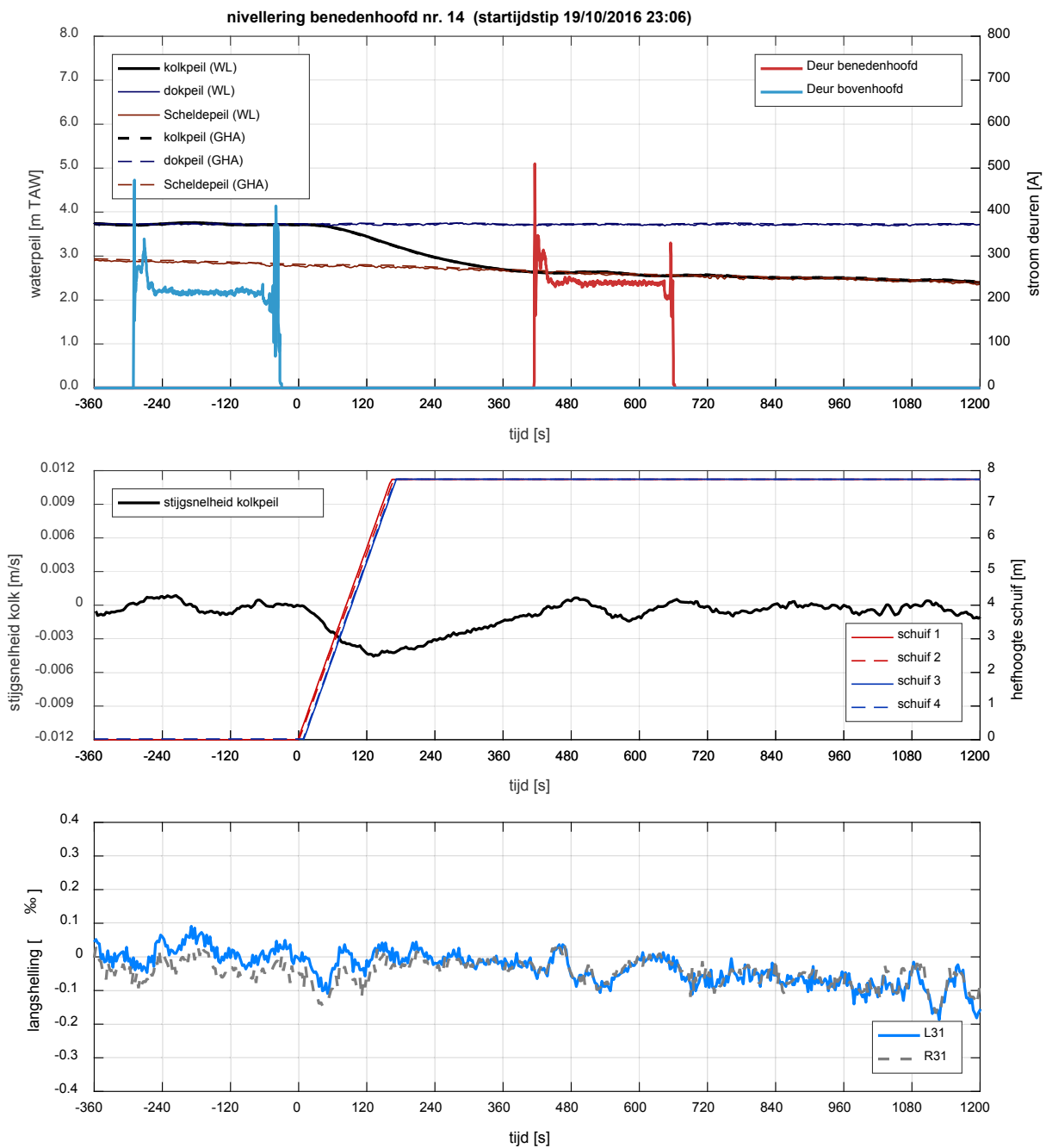


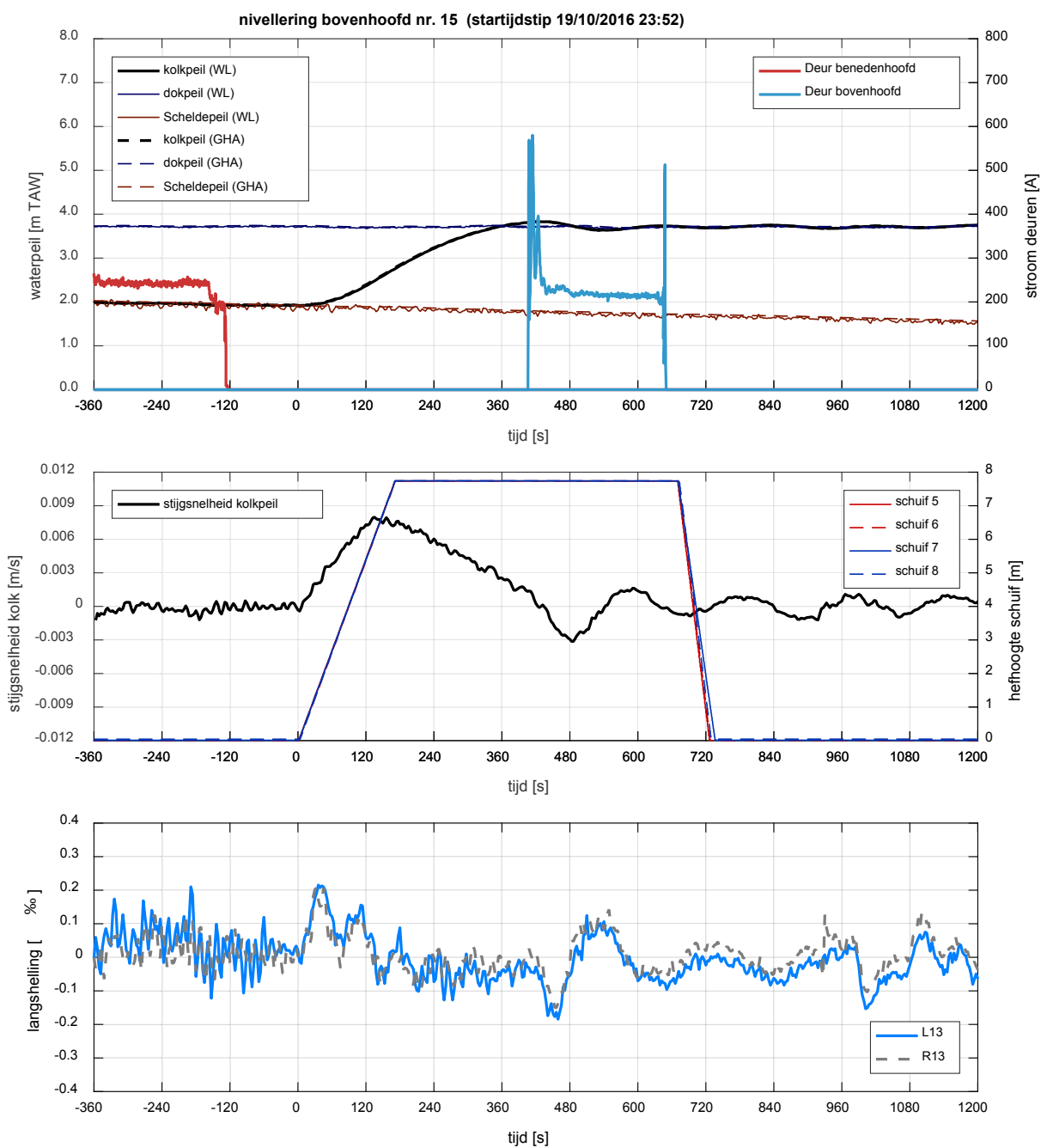


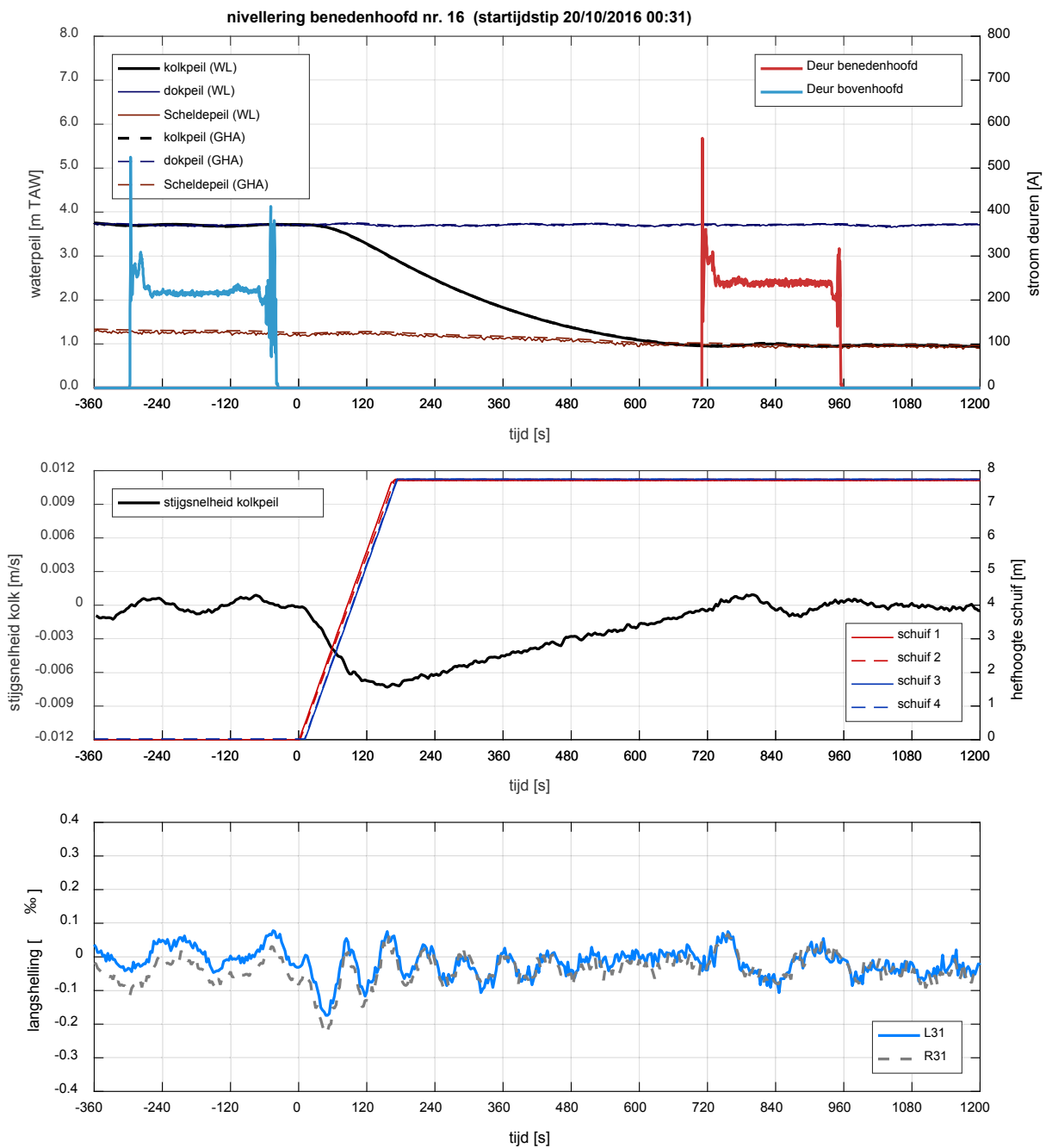


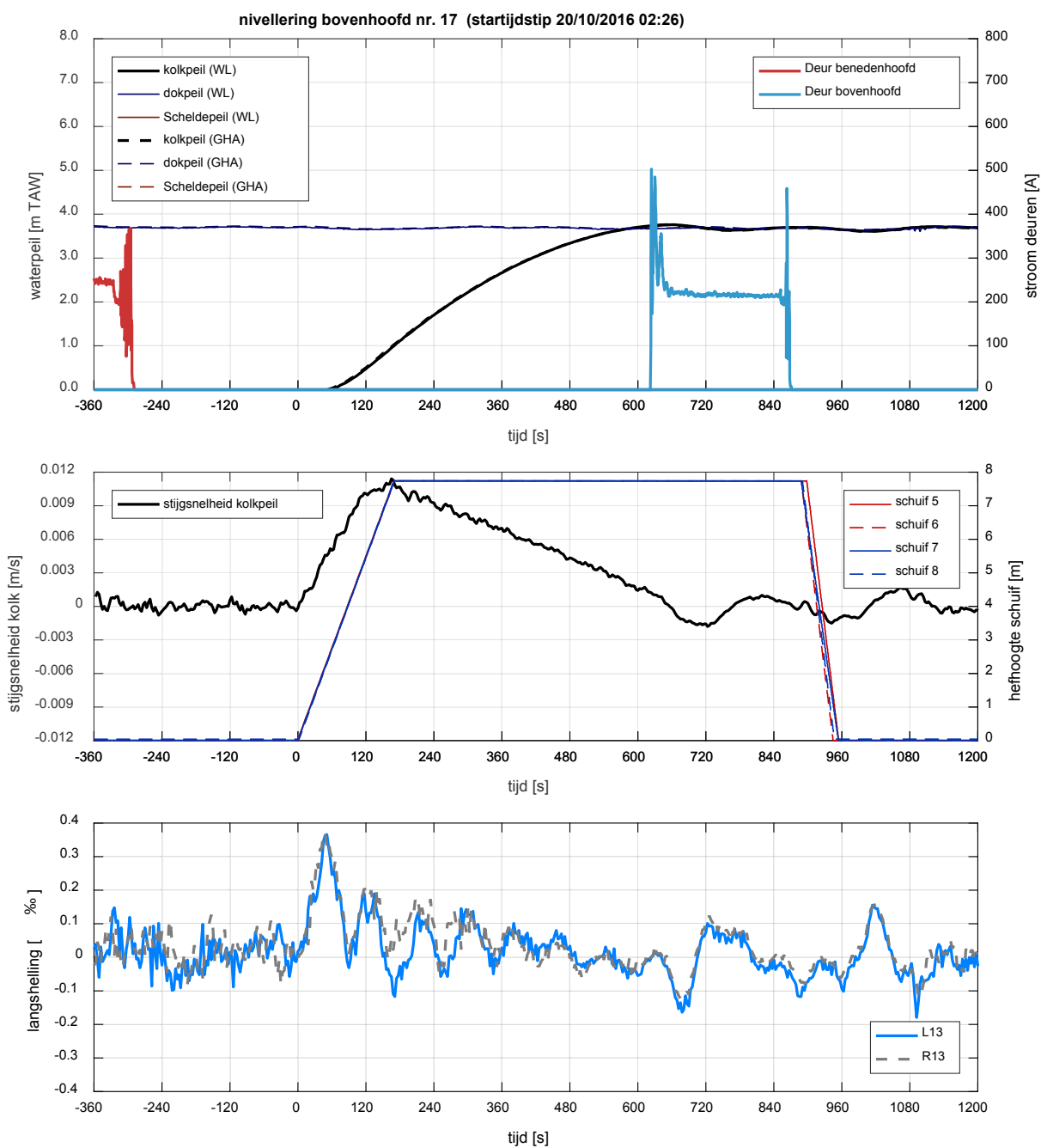


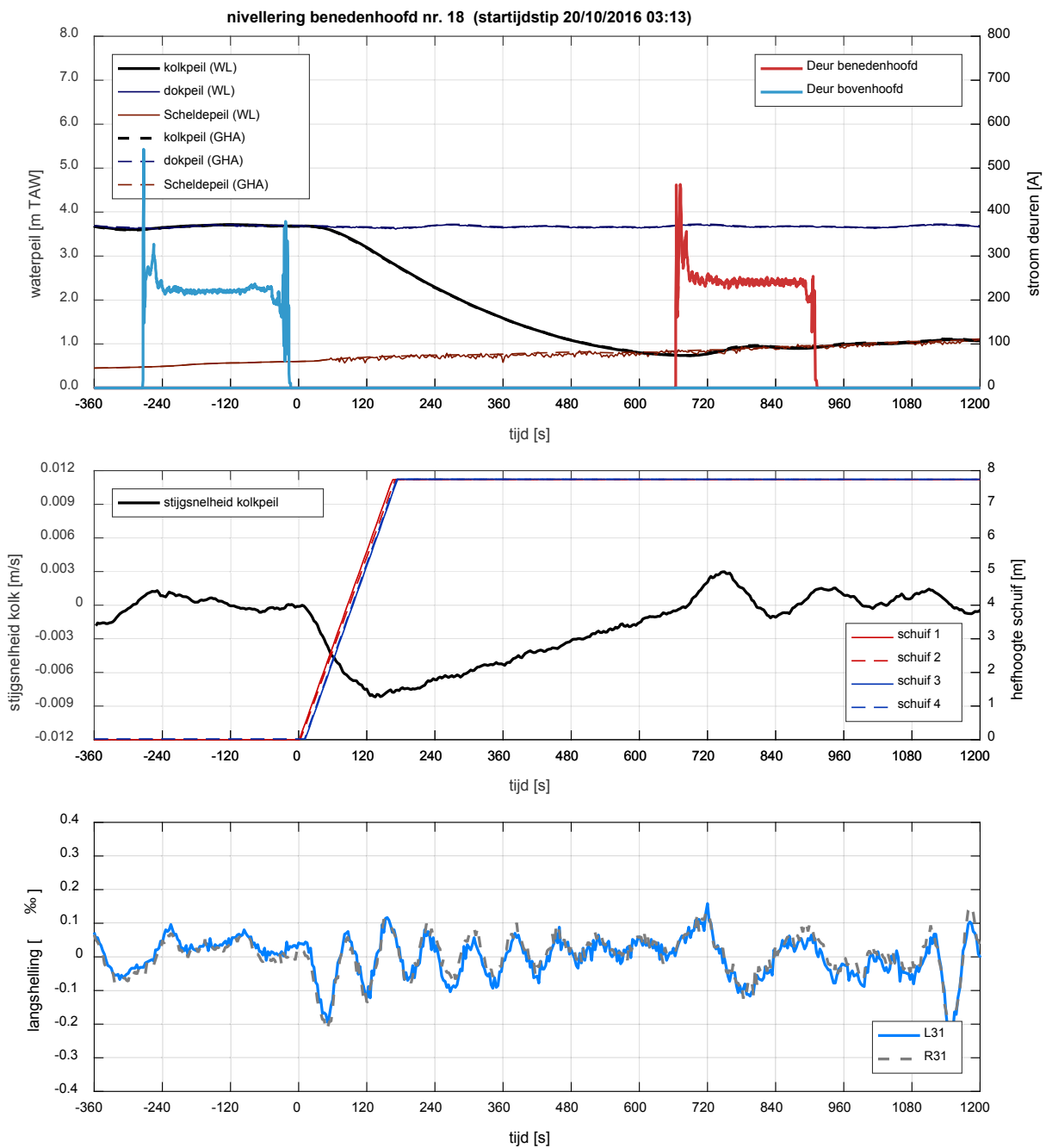


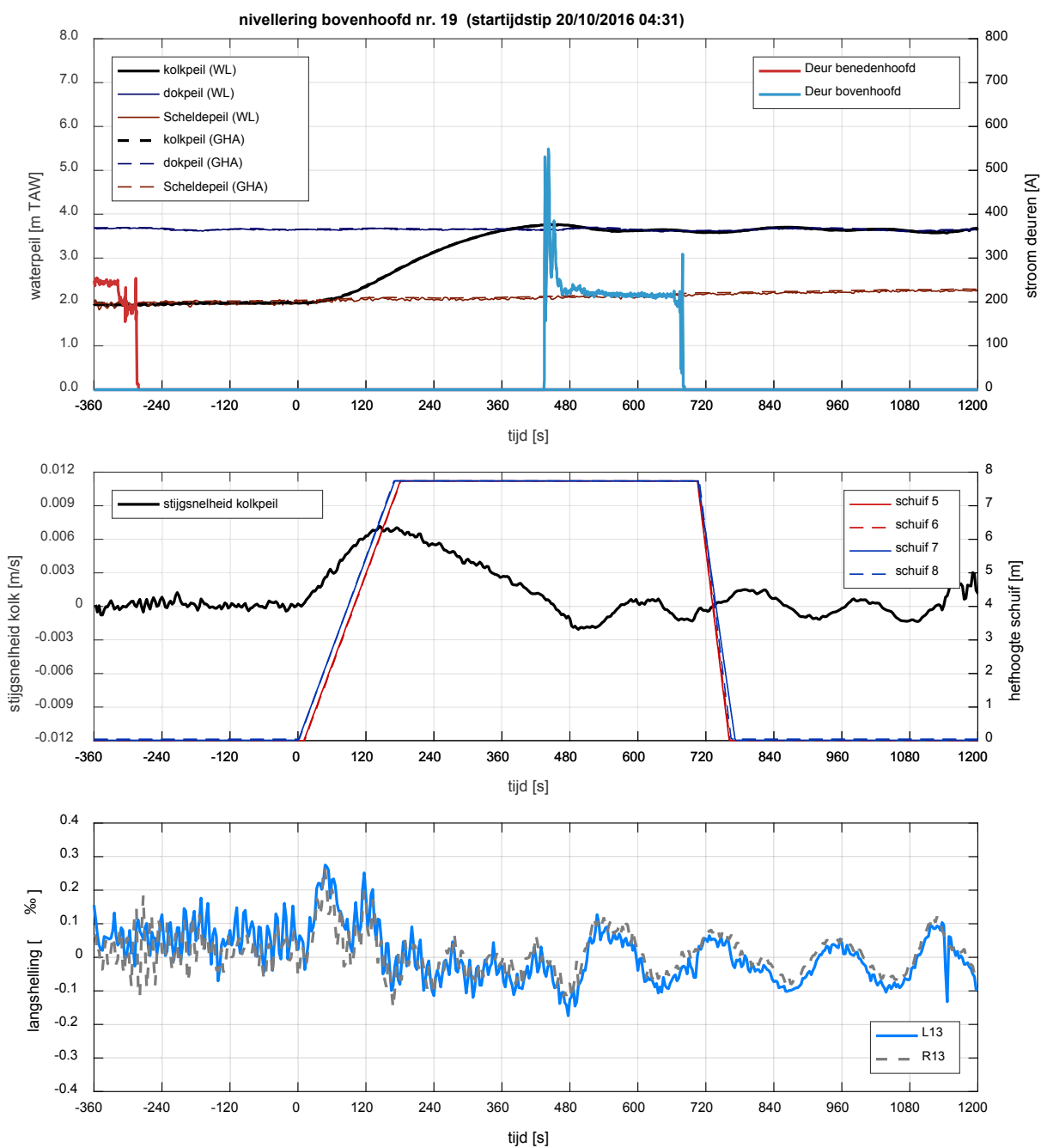


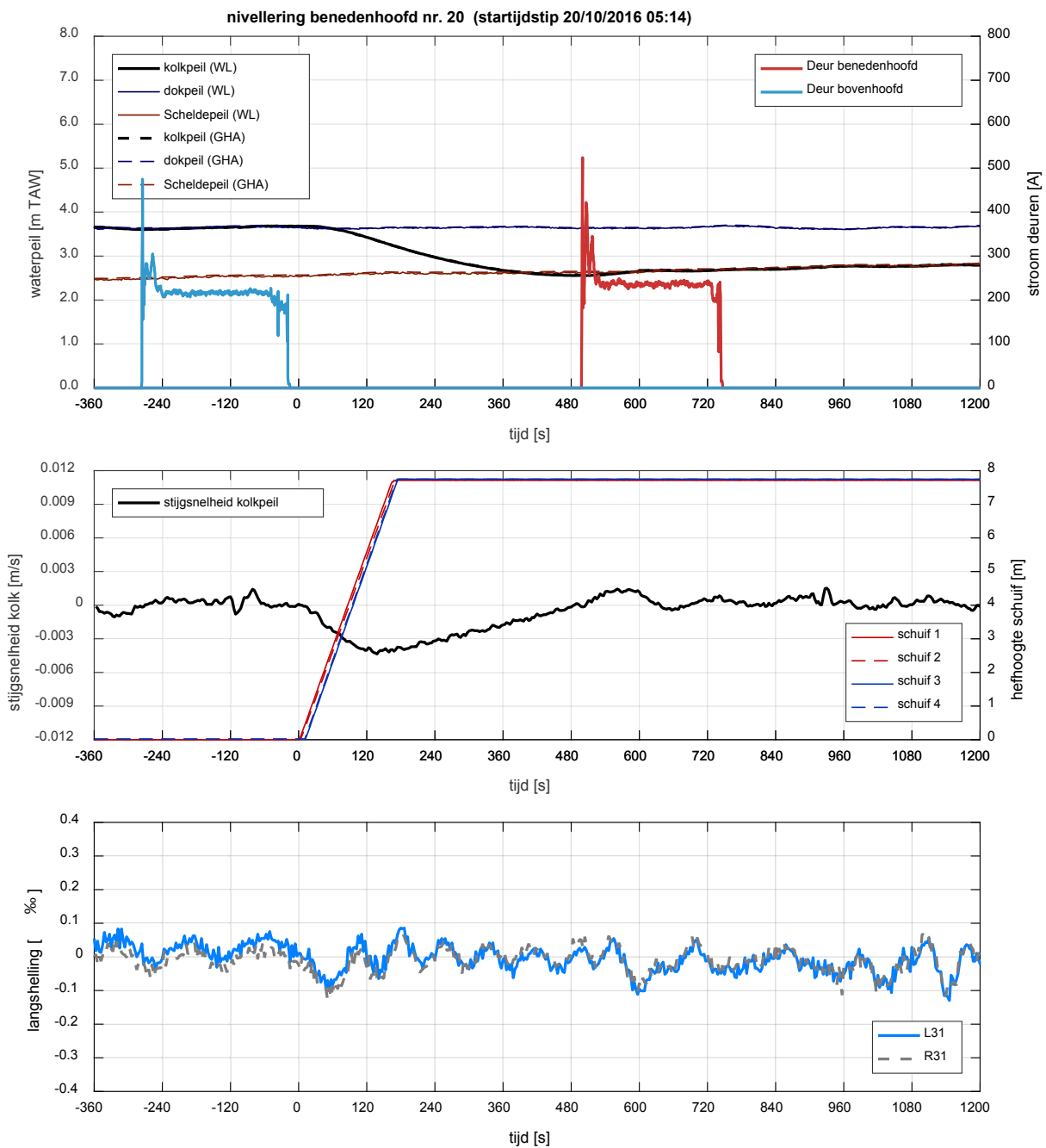


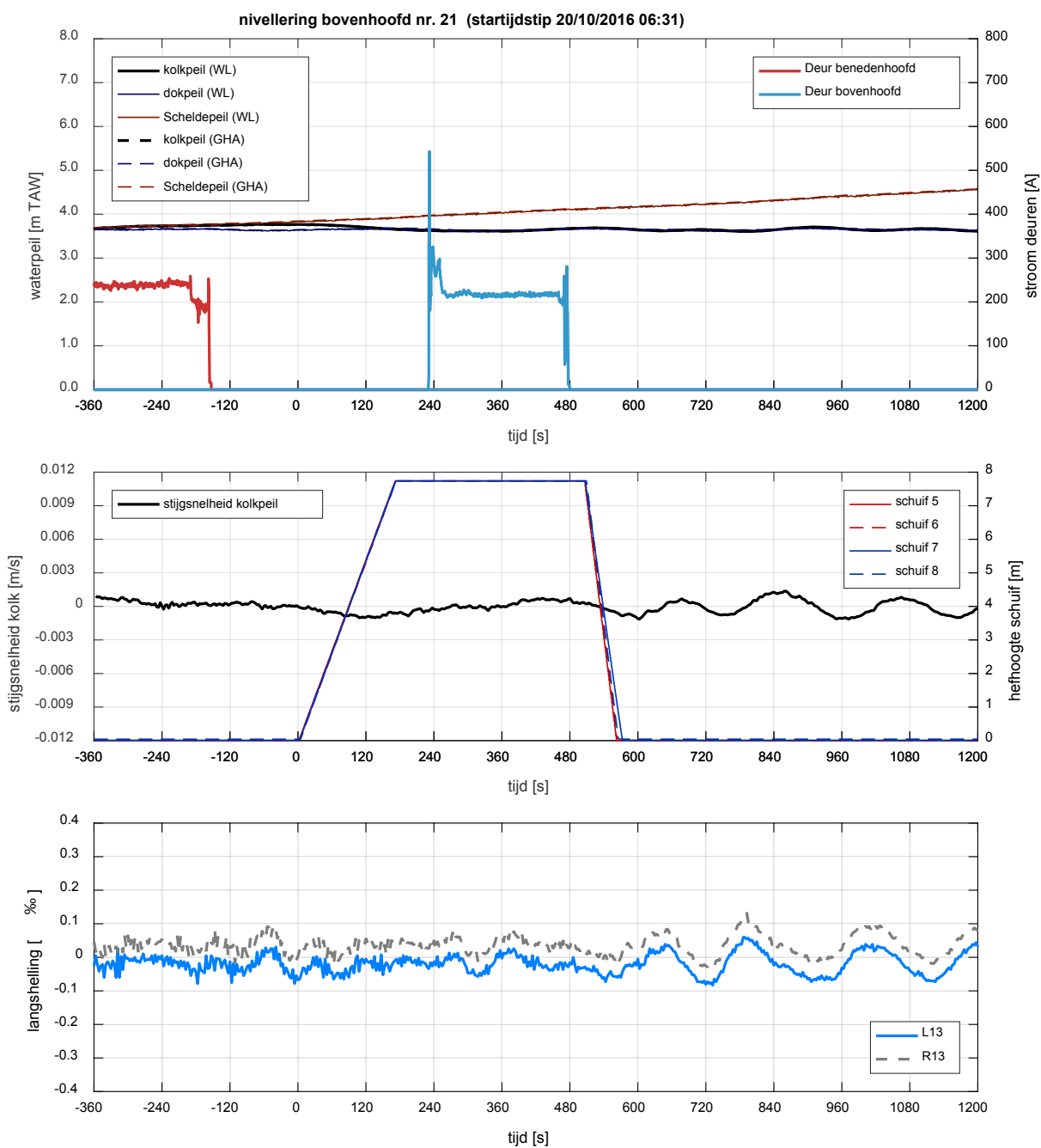




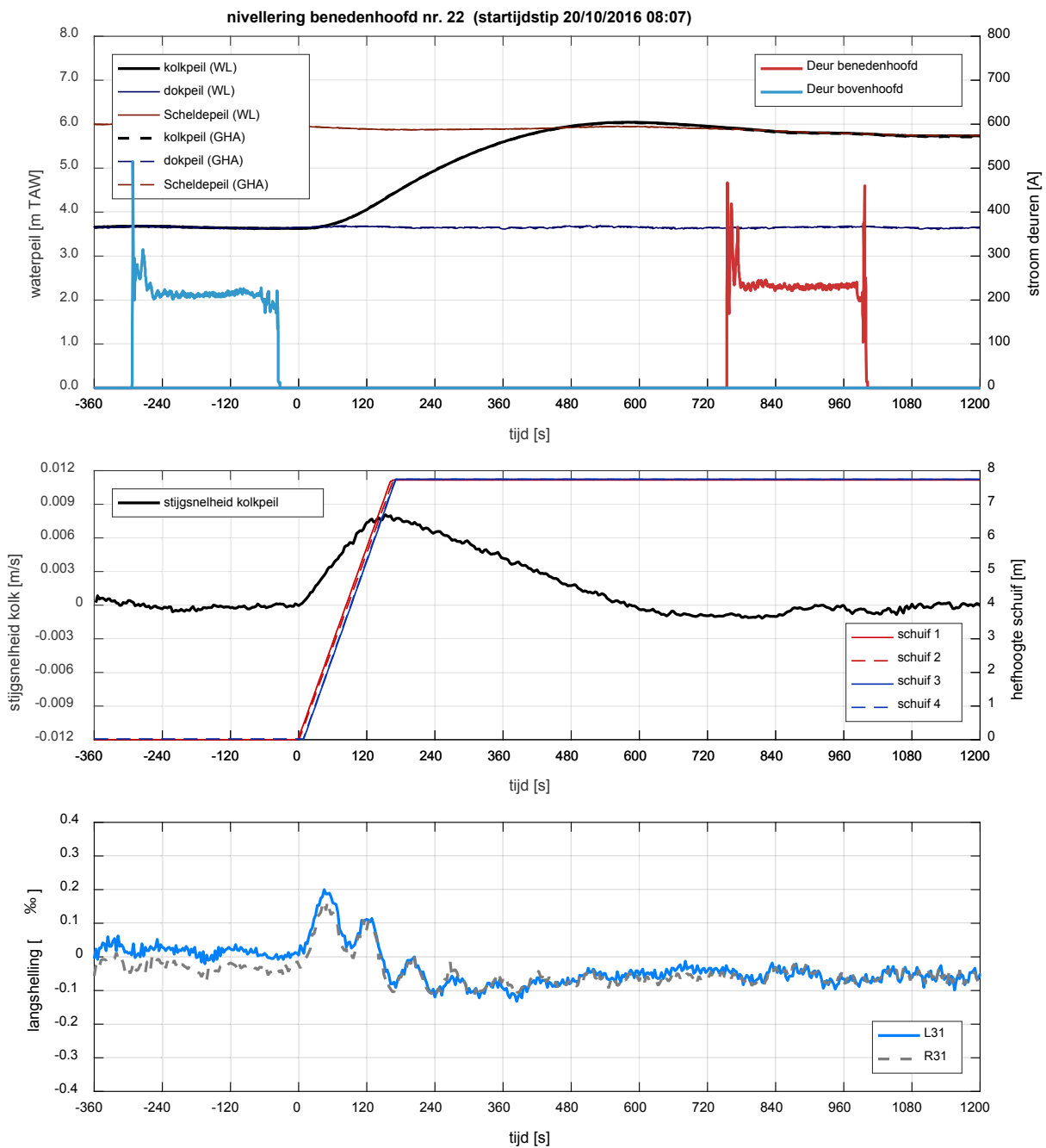


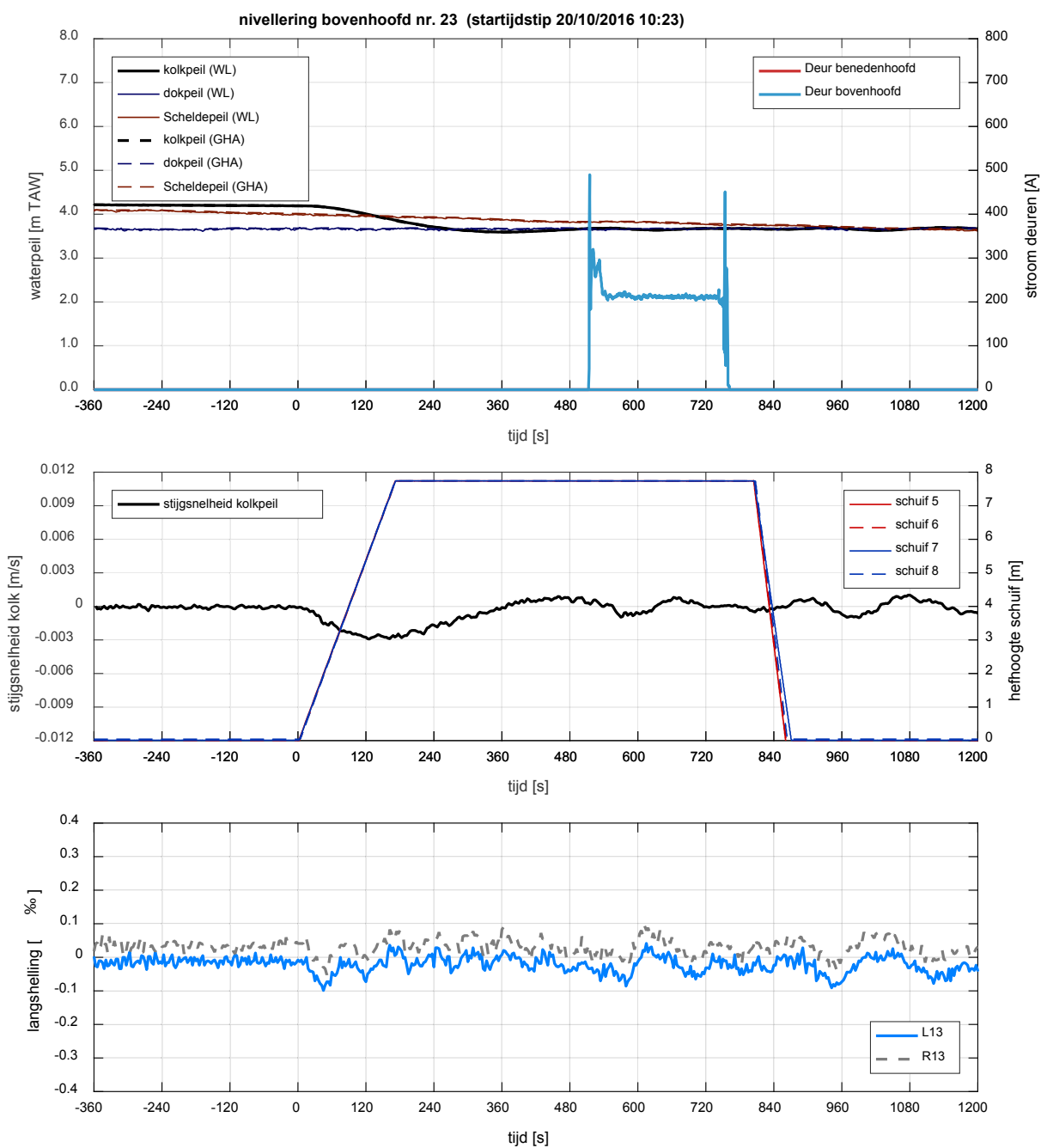


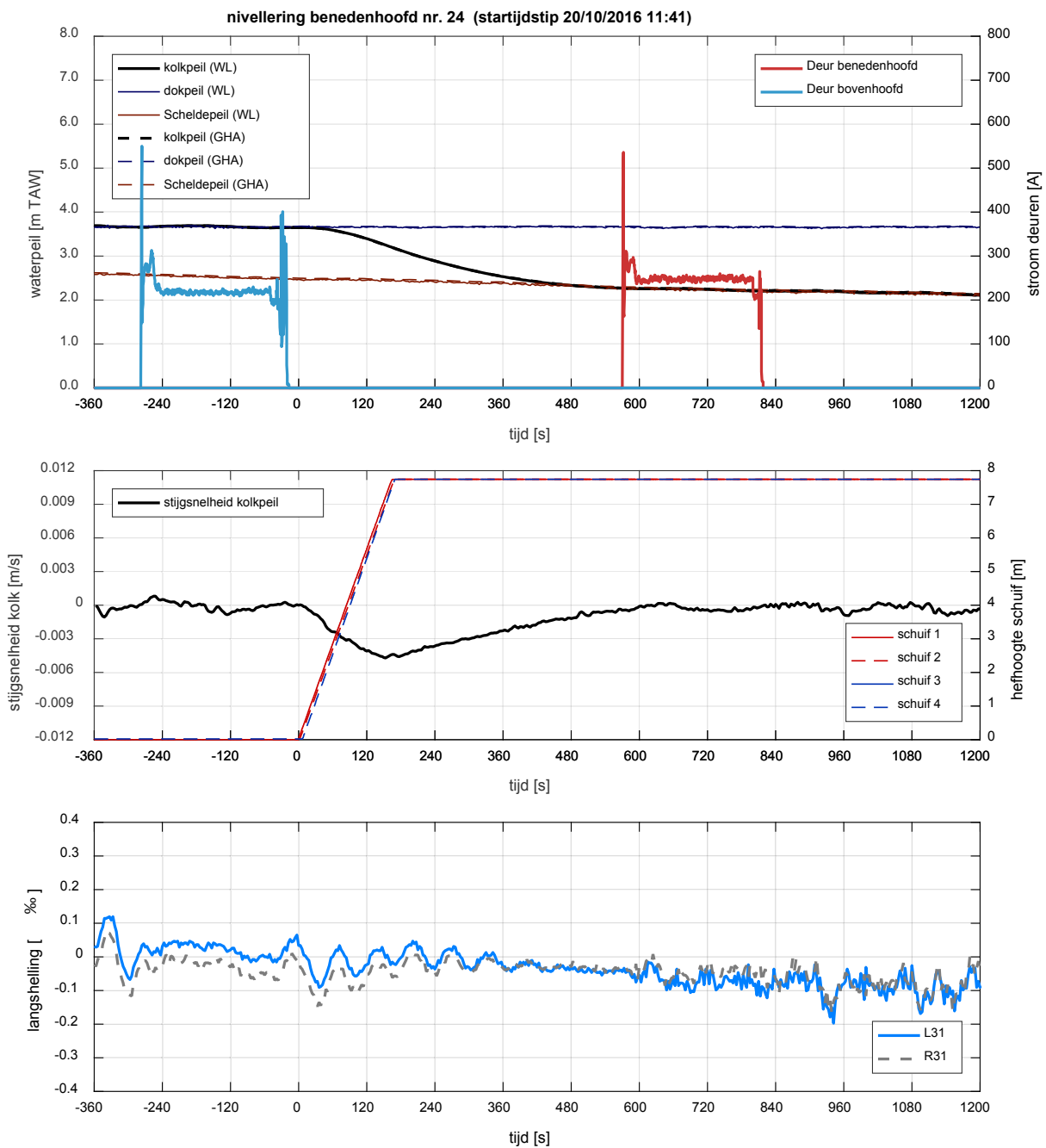


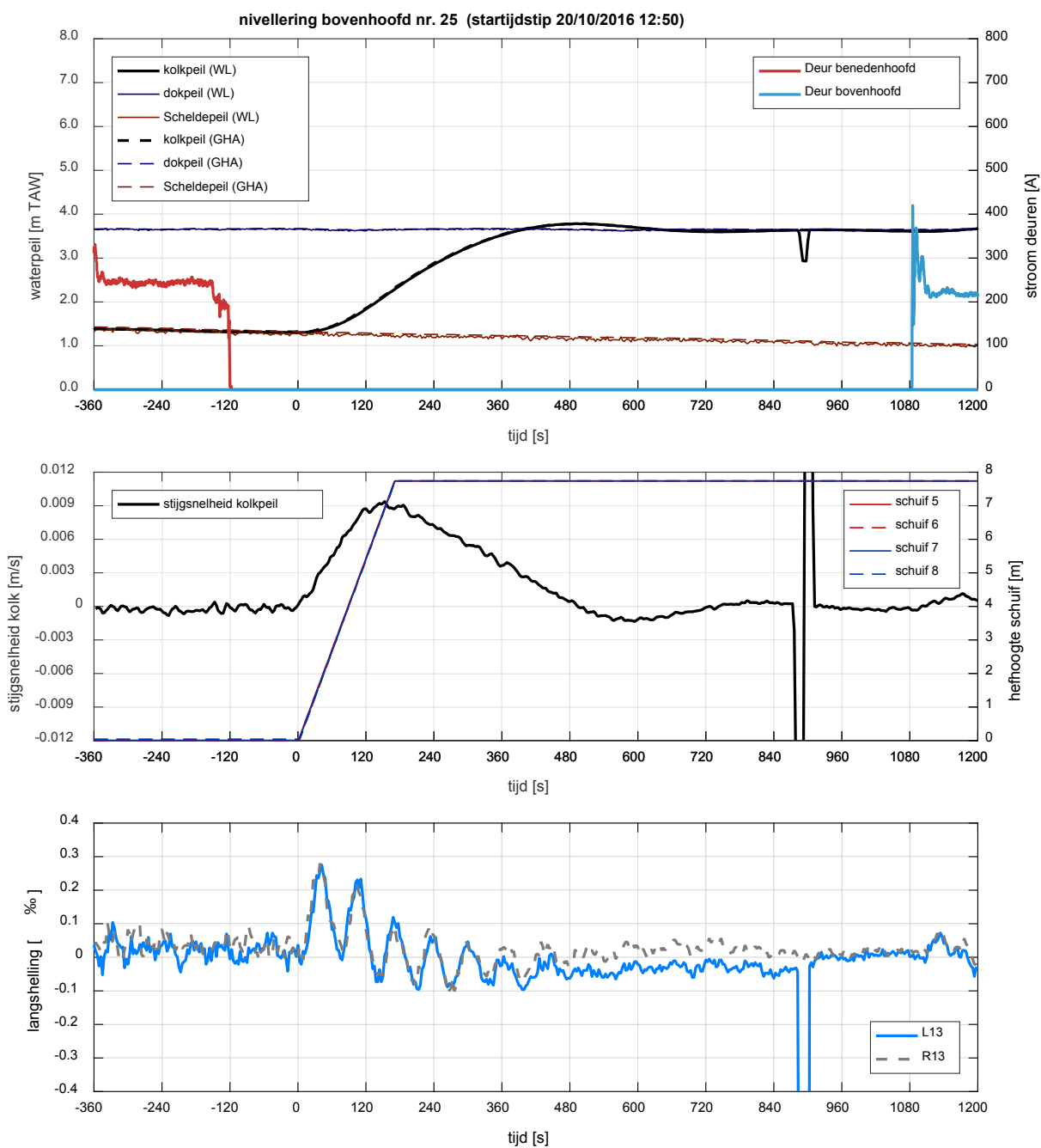


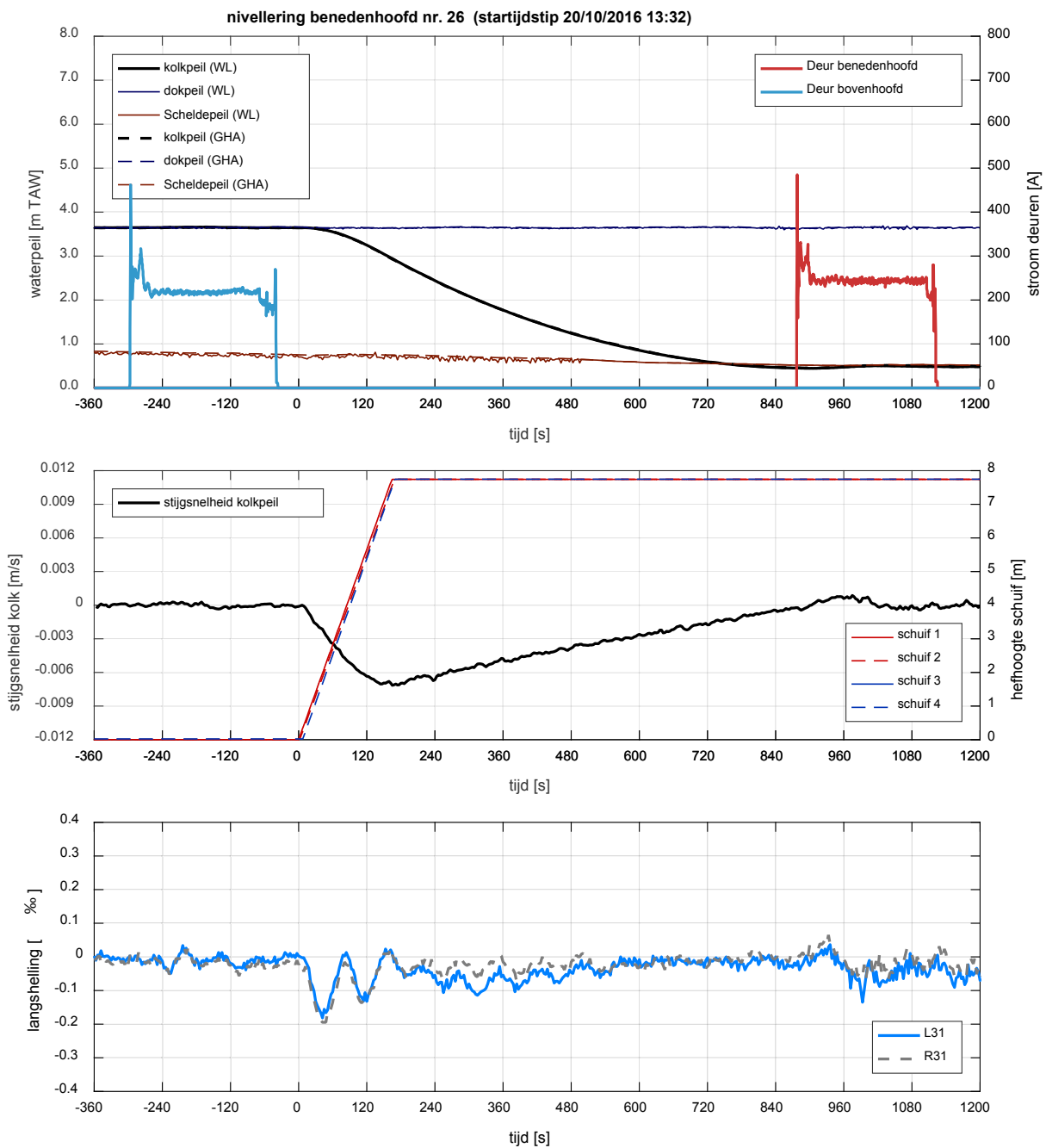


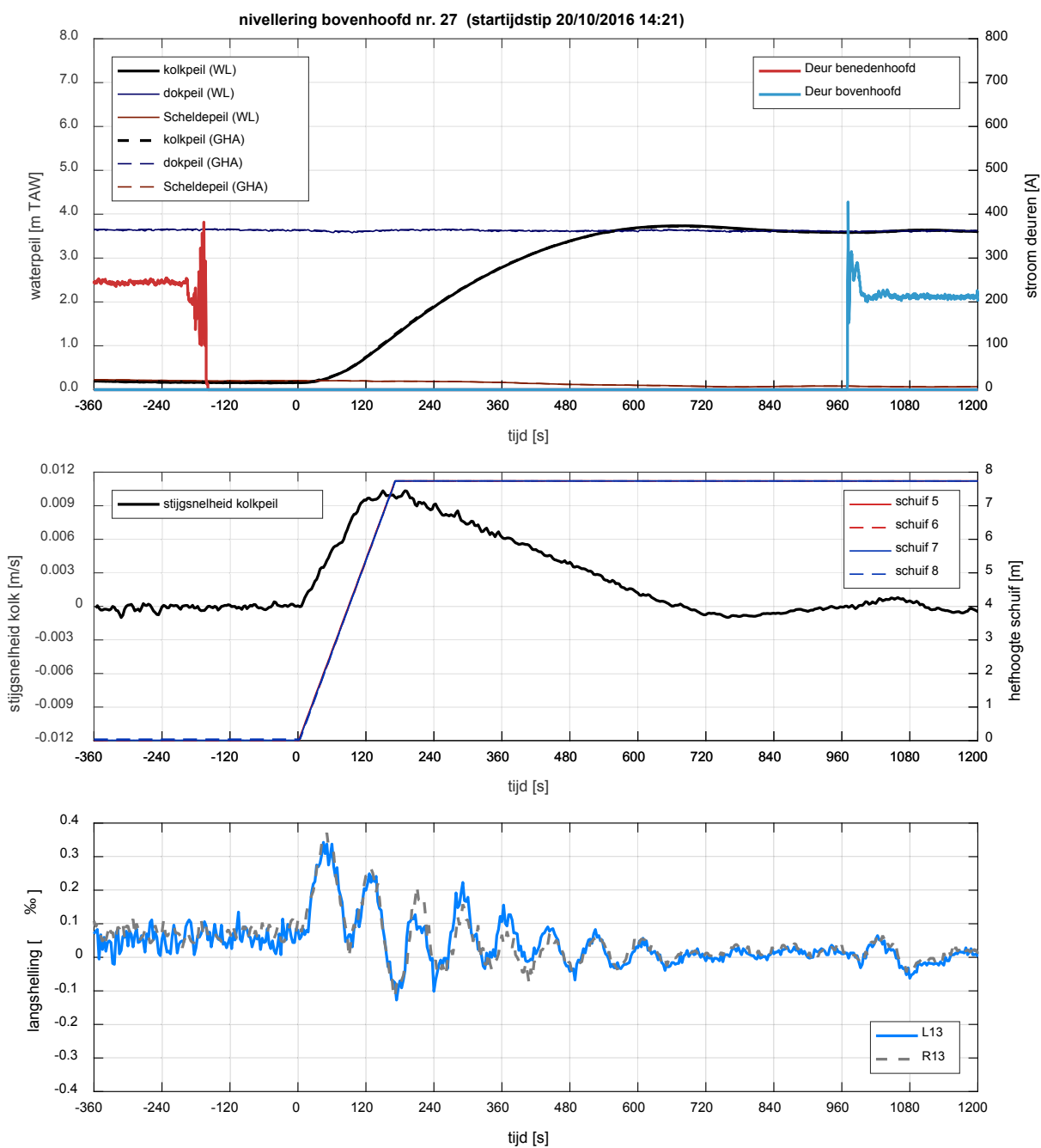




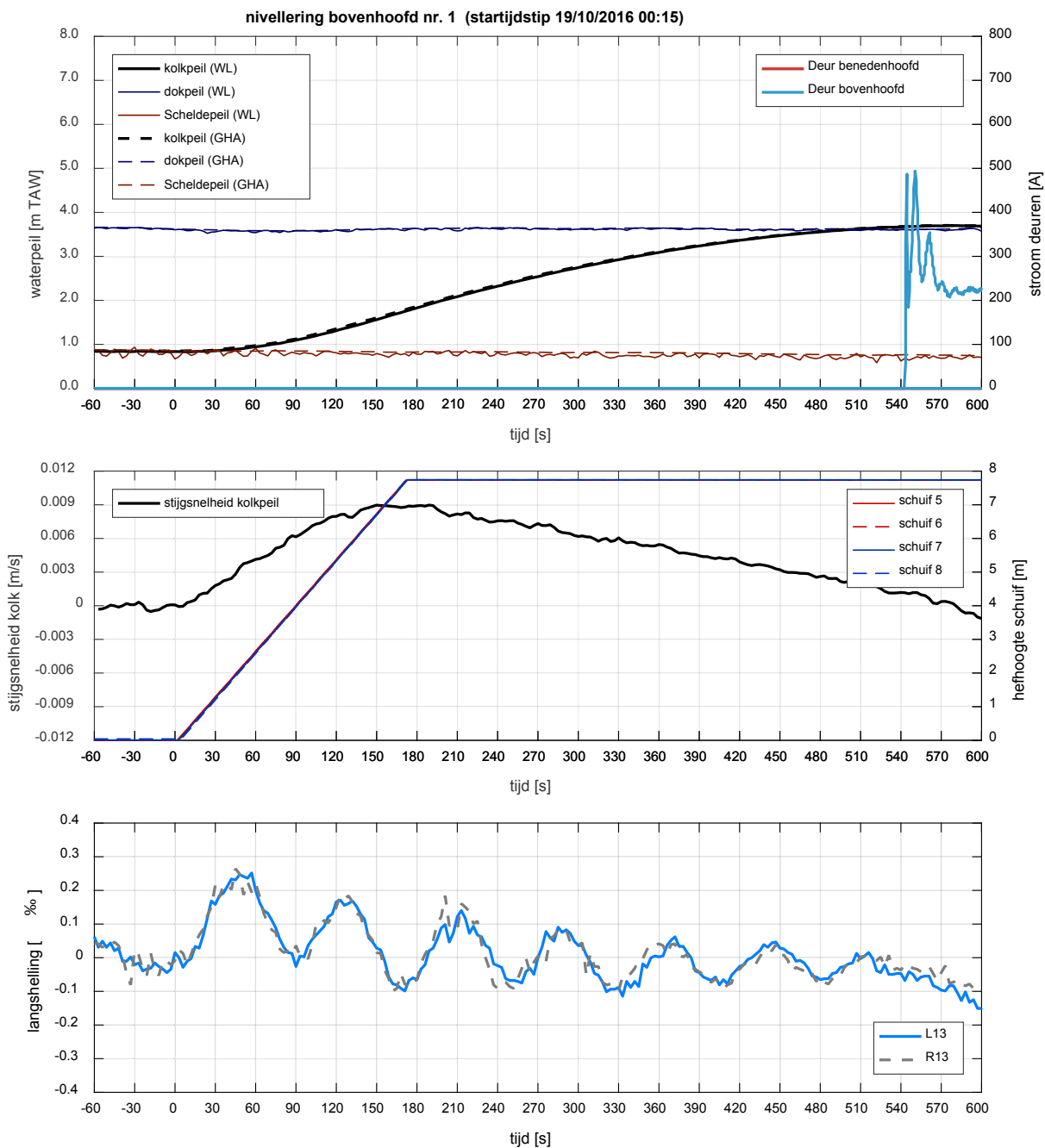


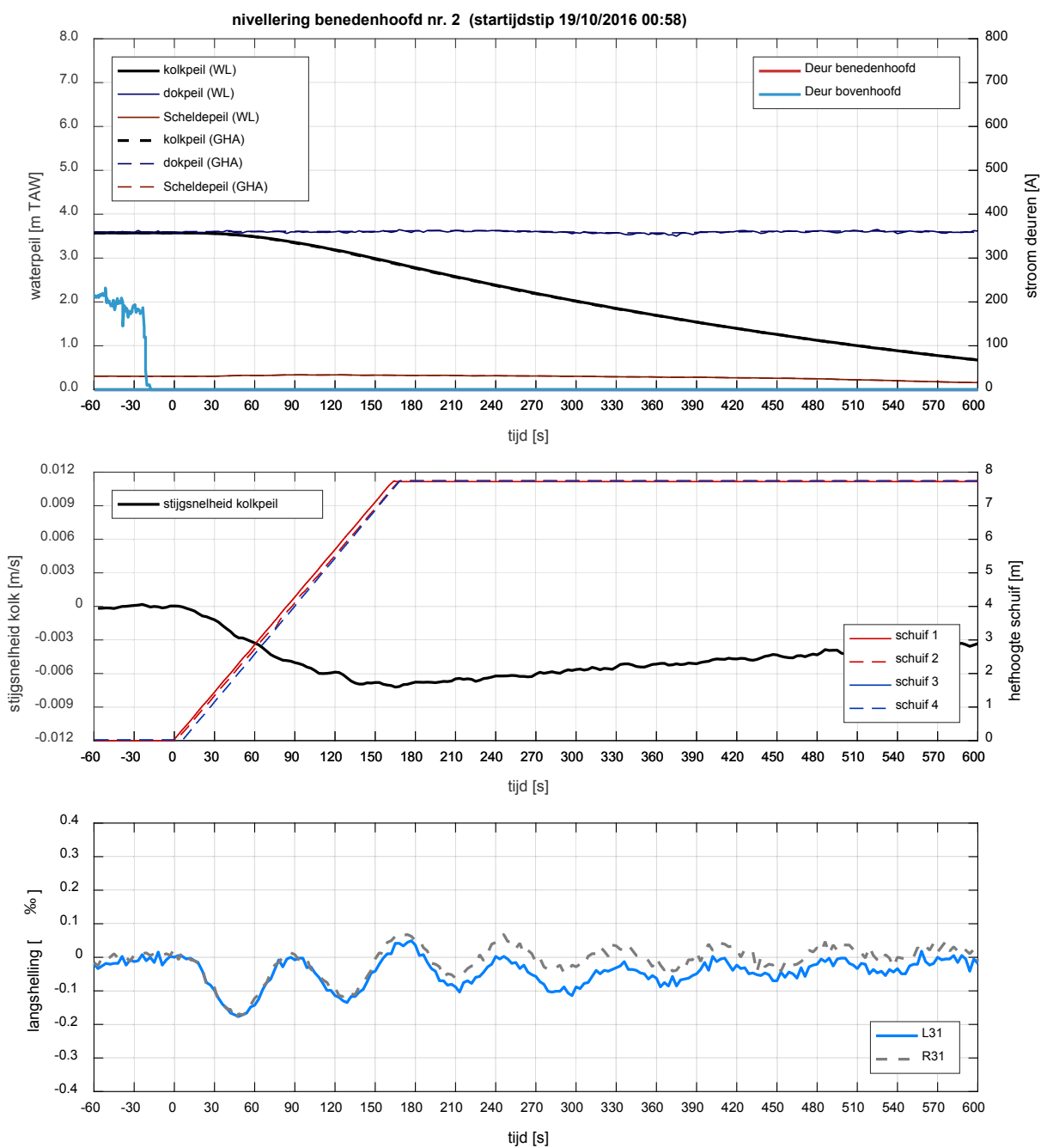




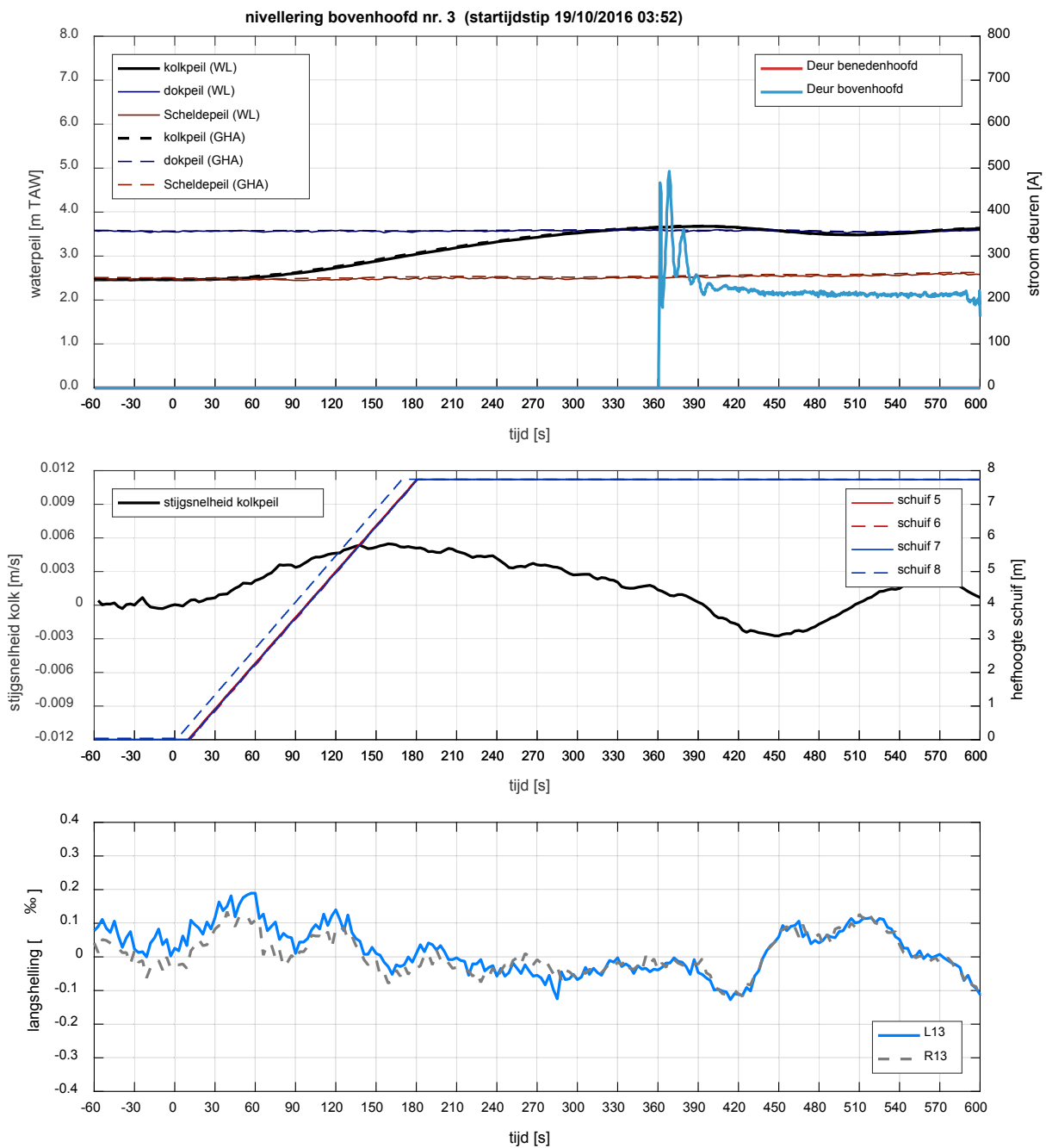


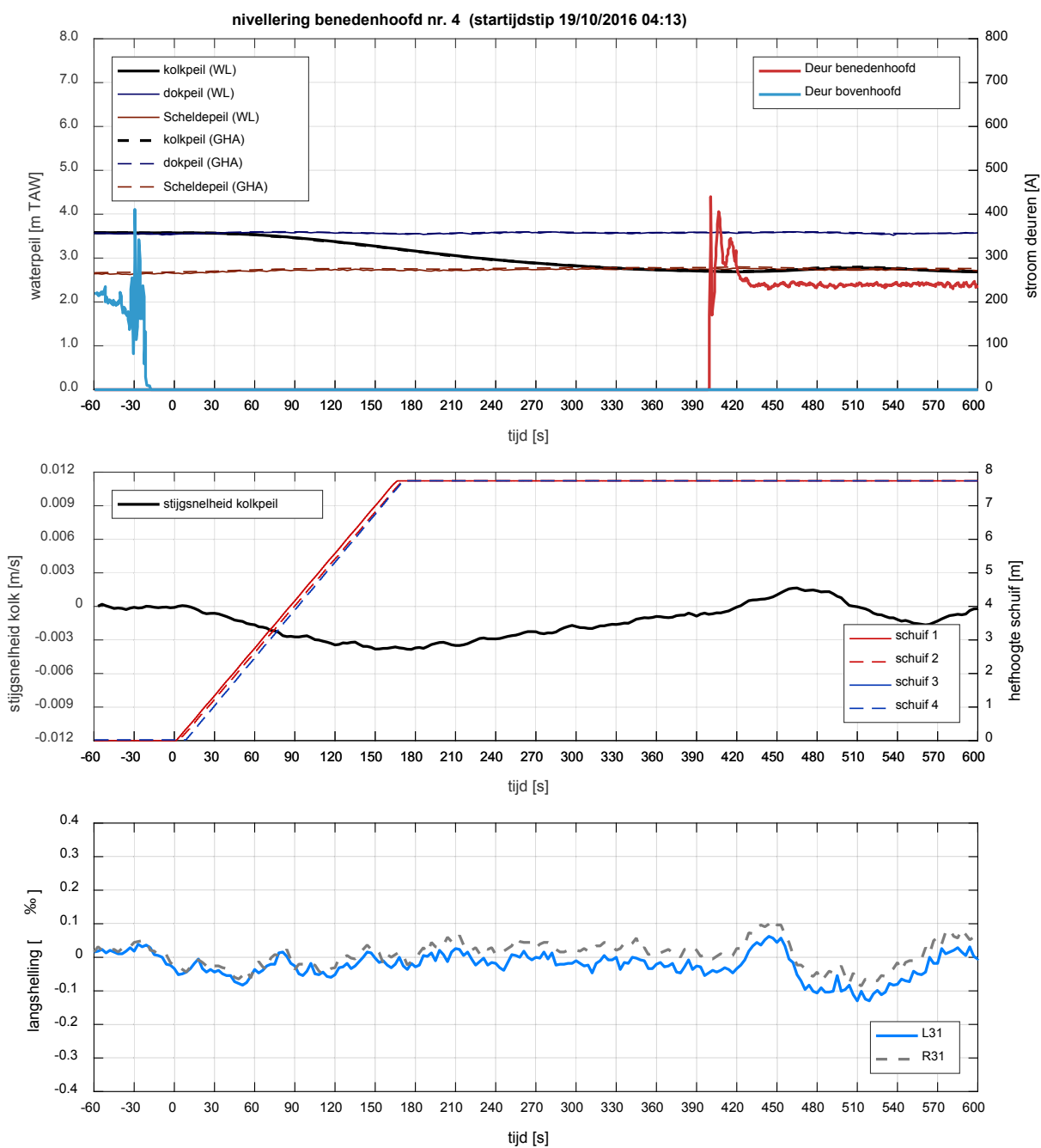
## Bijlage B.3 – Figuren tijdschaal nivellering

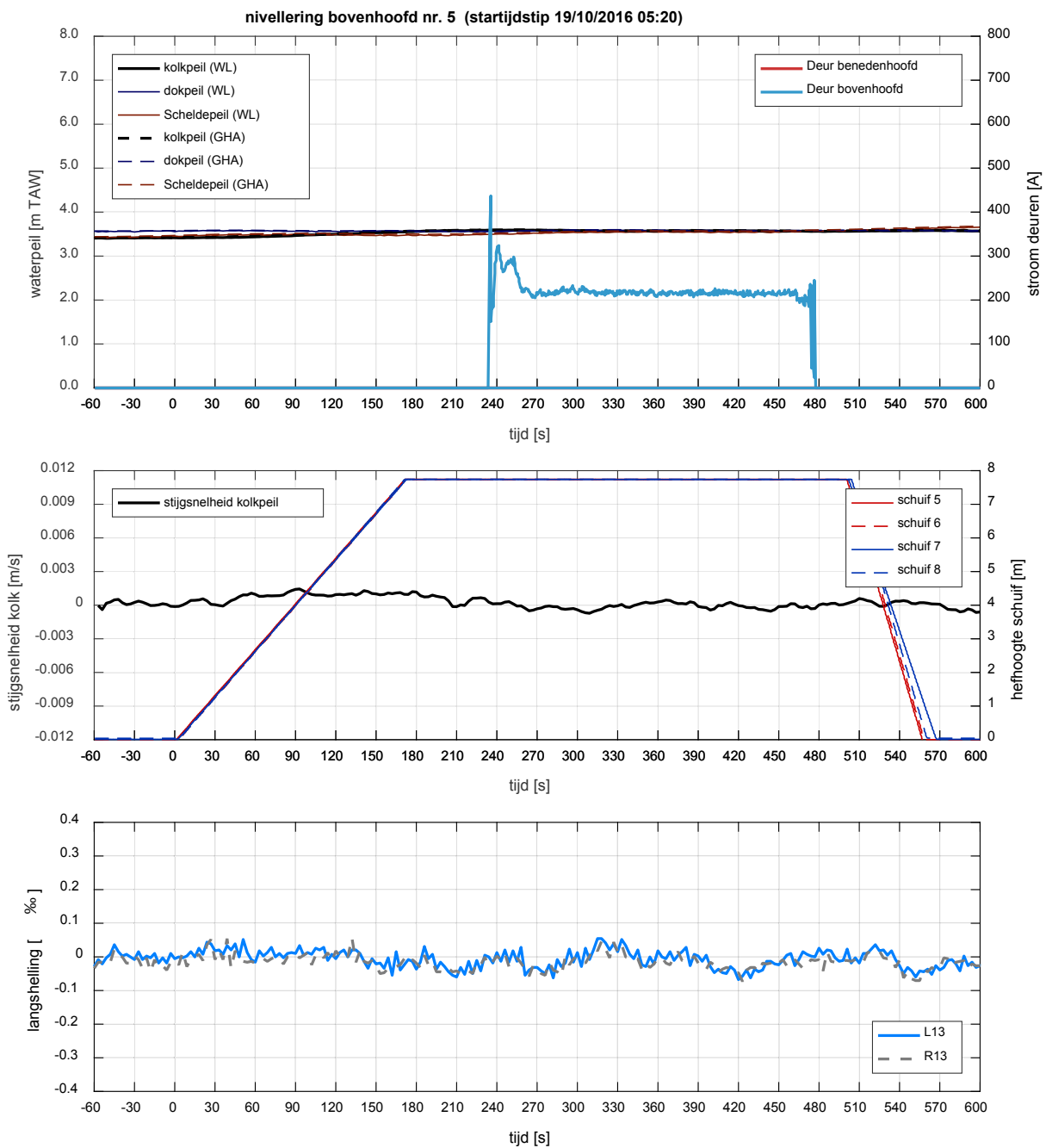


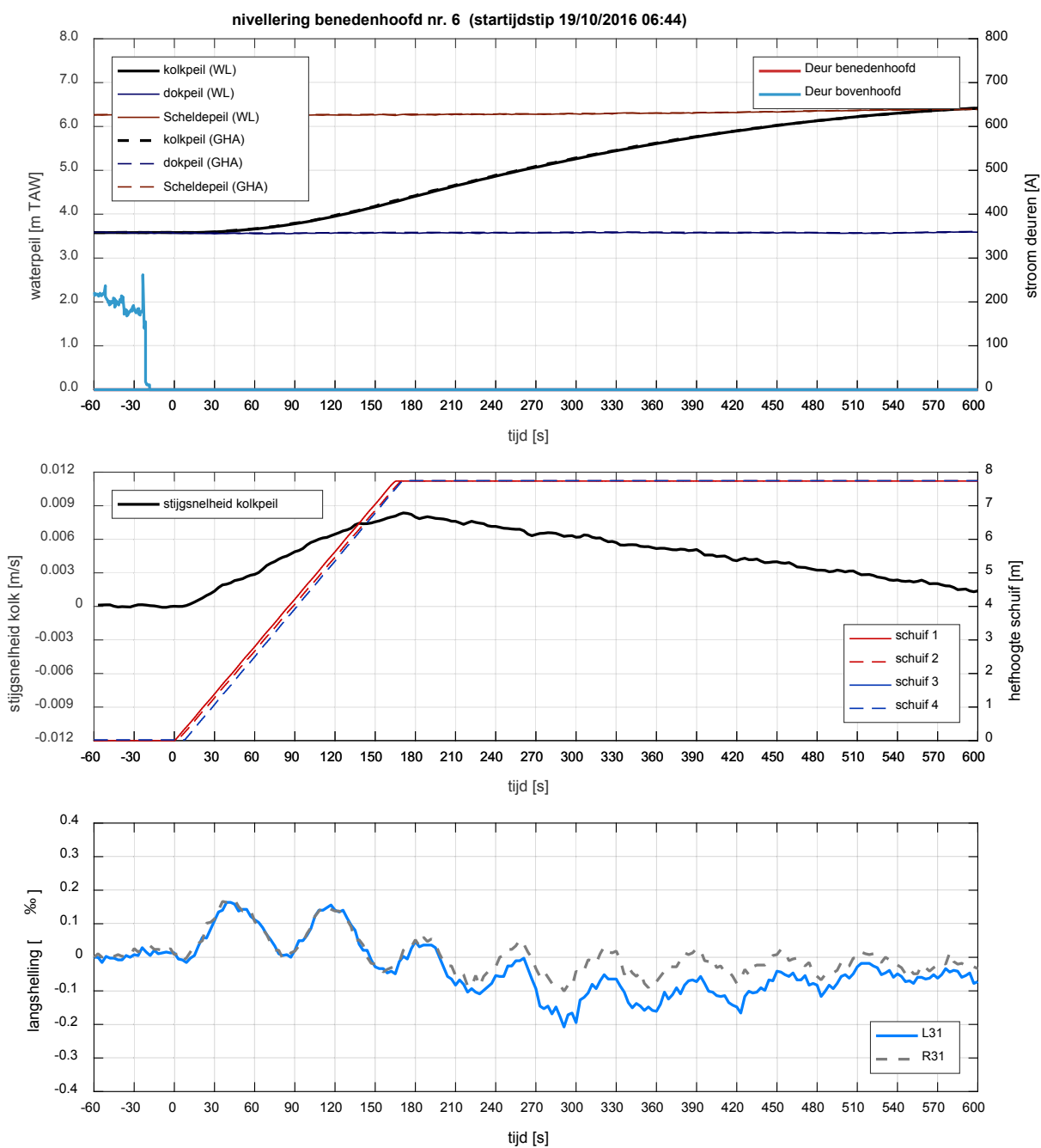


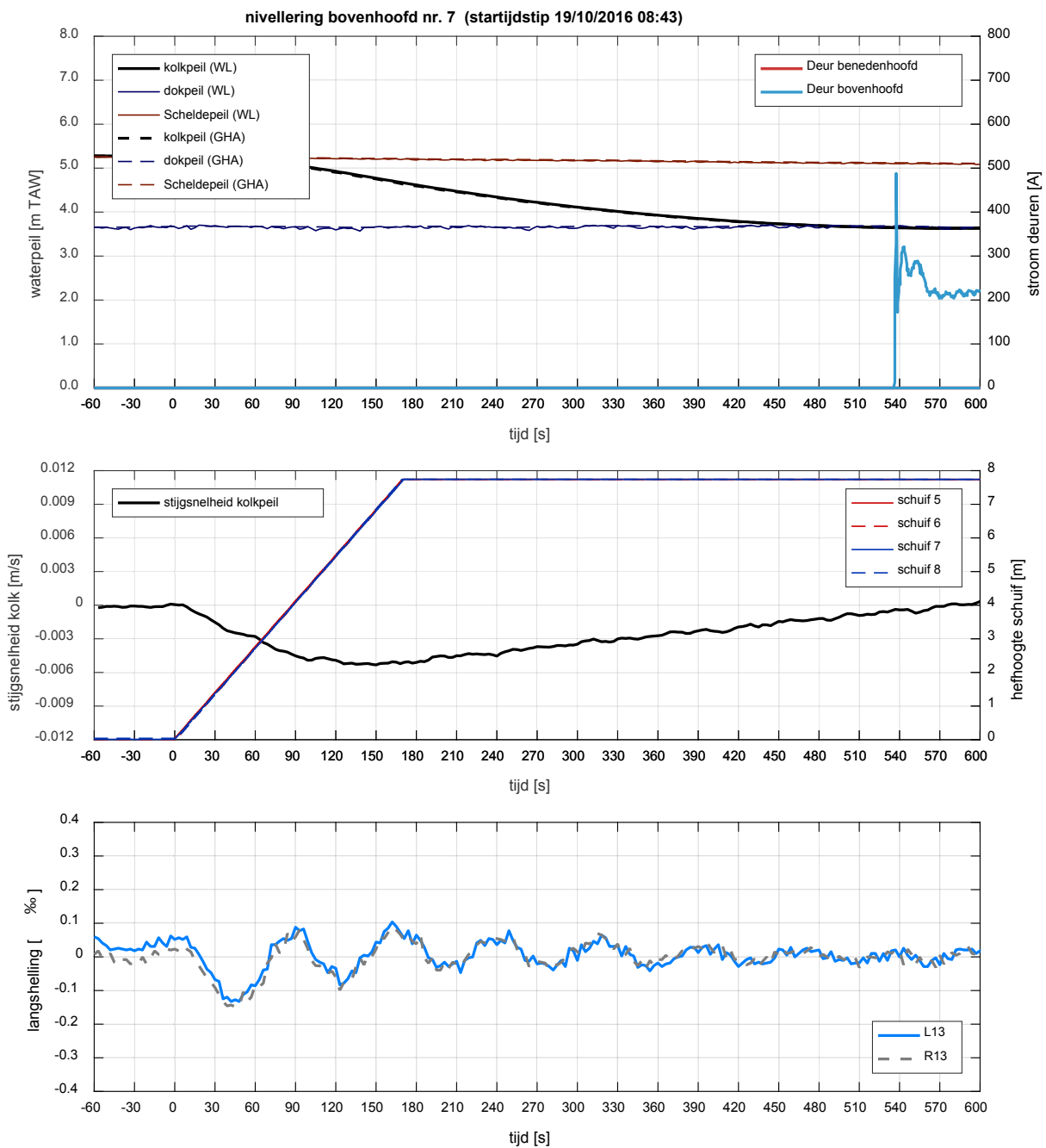


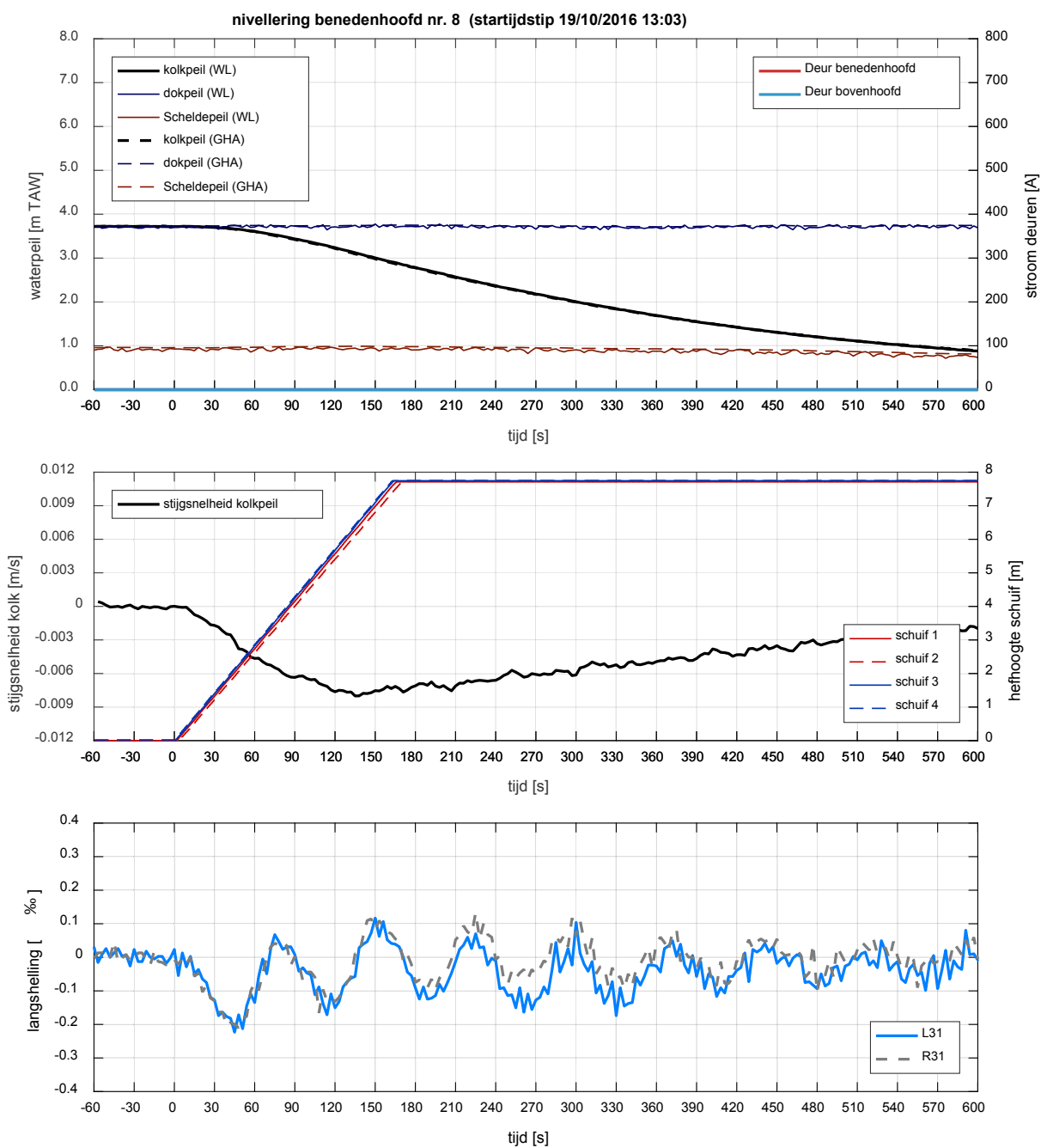


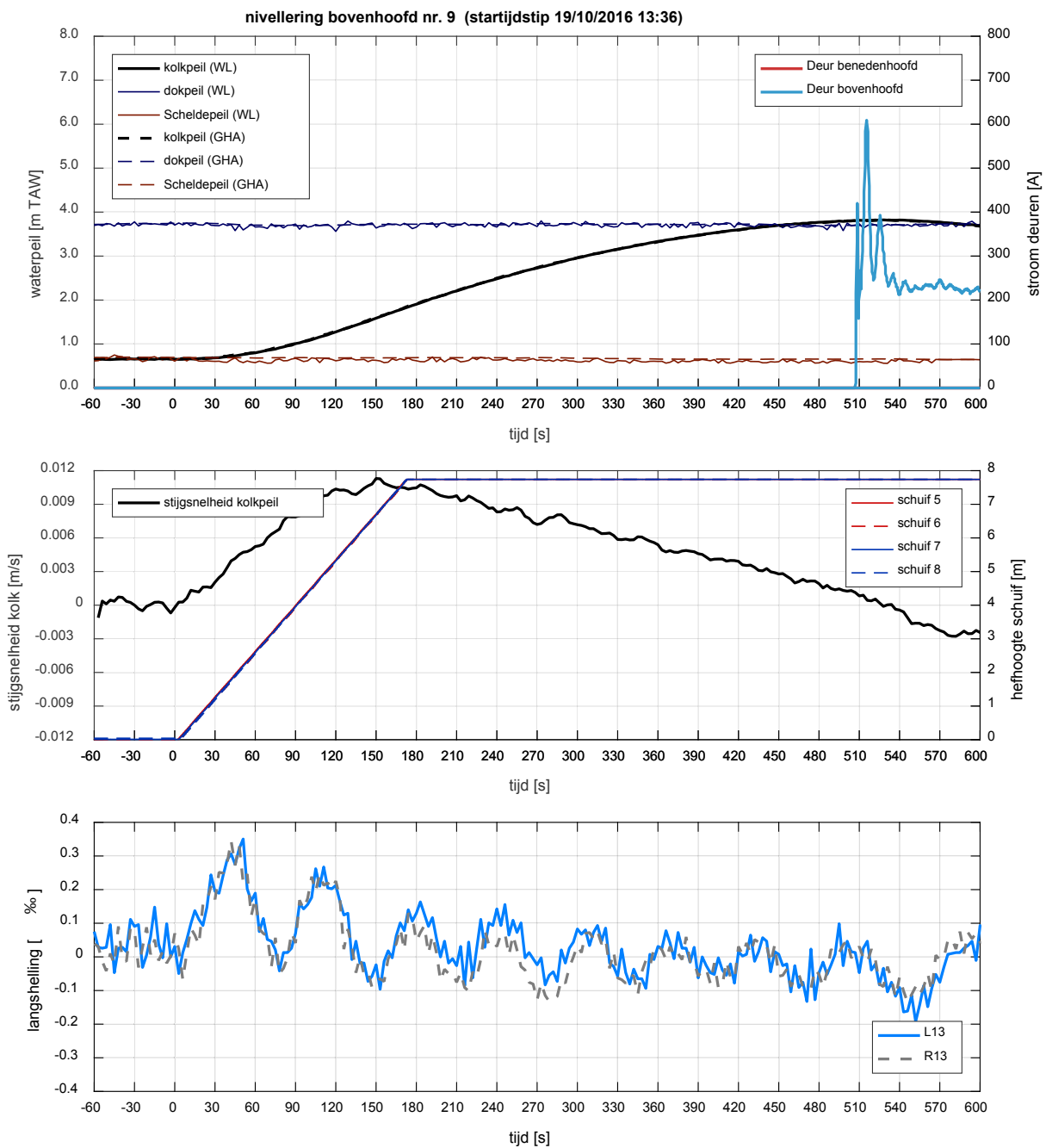


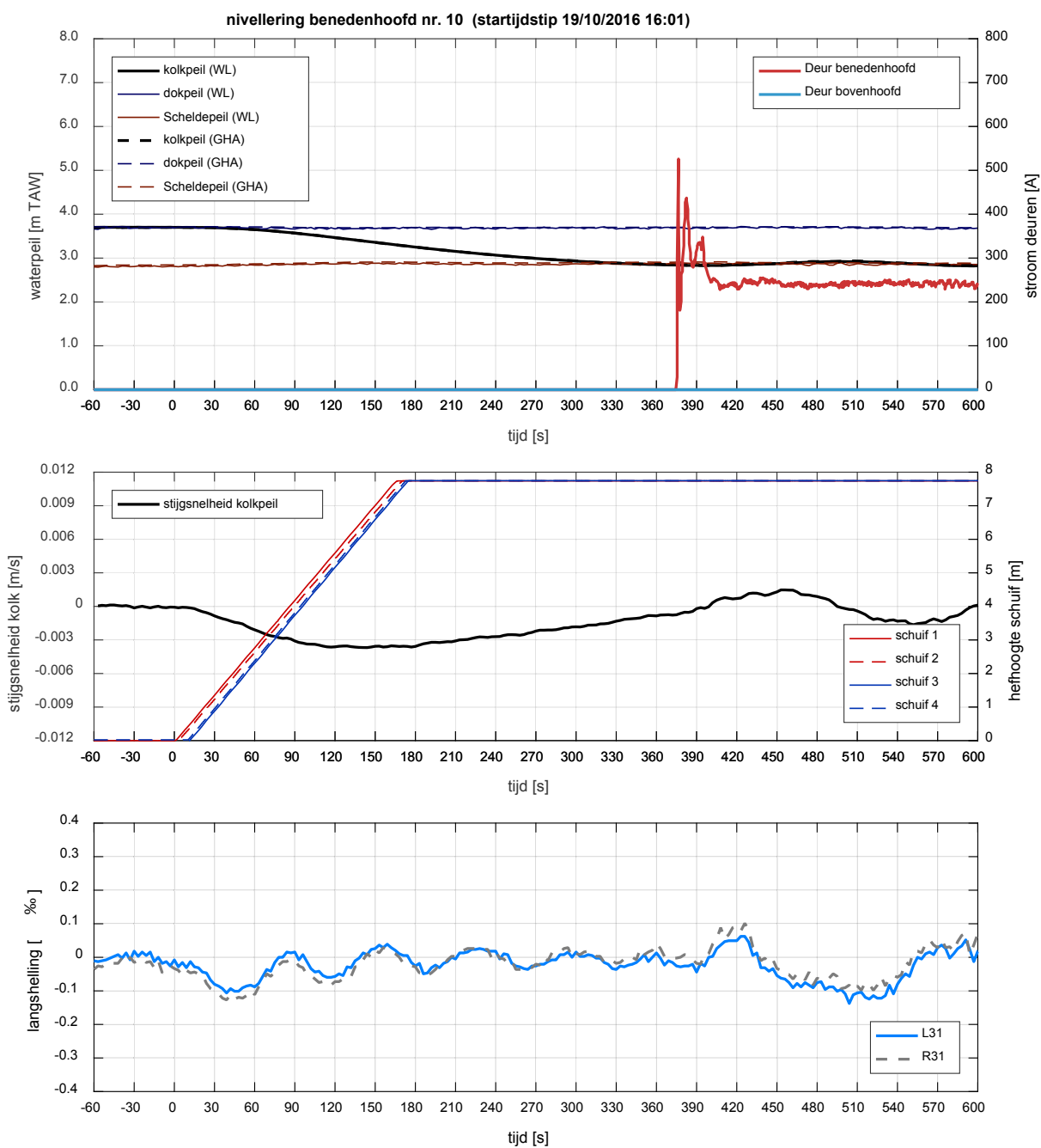




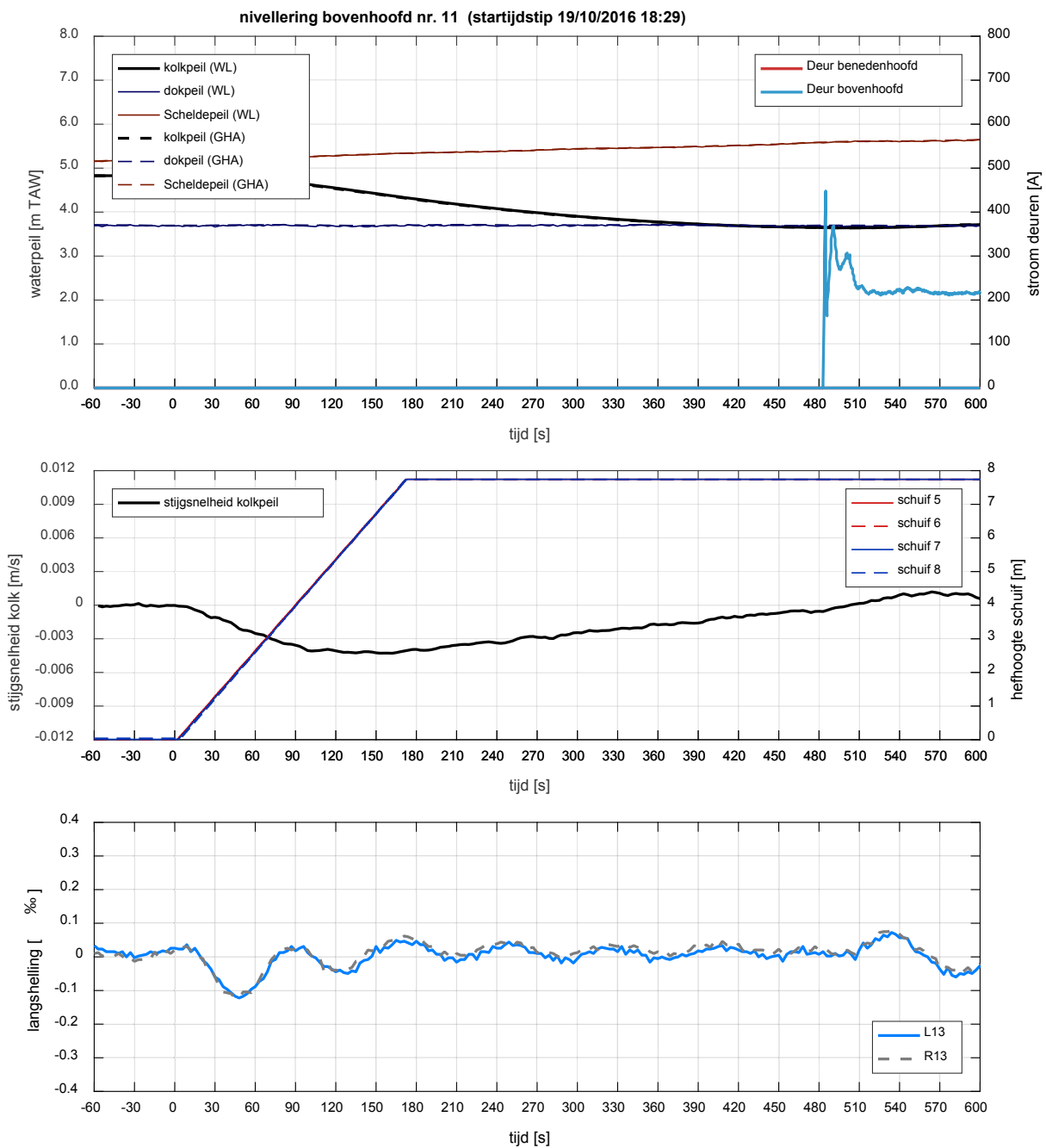


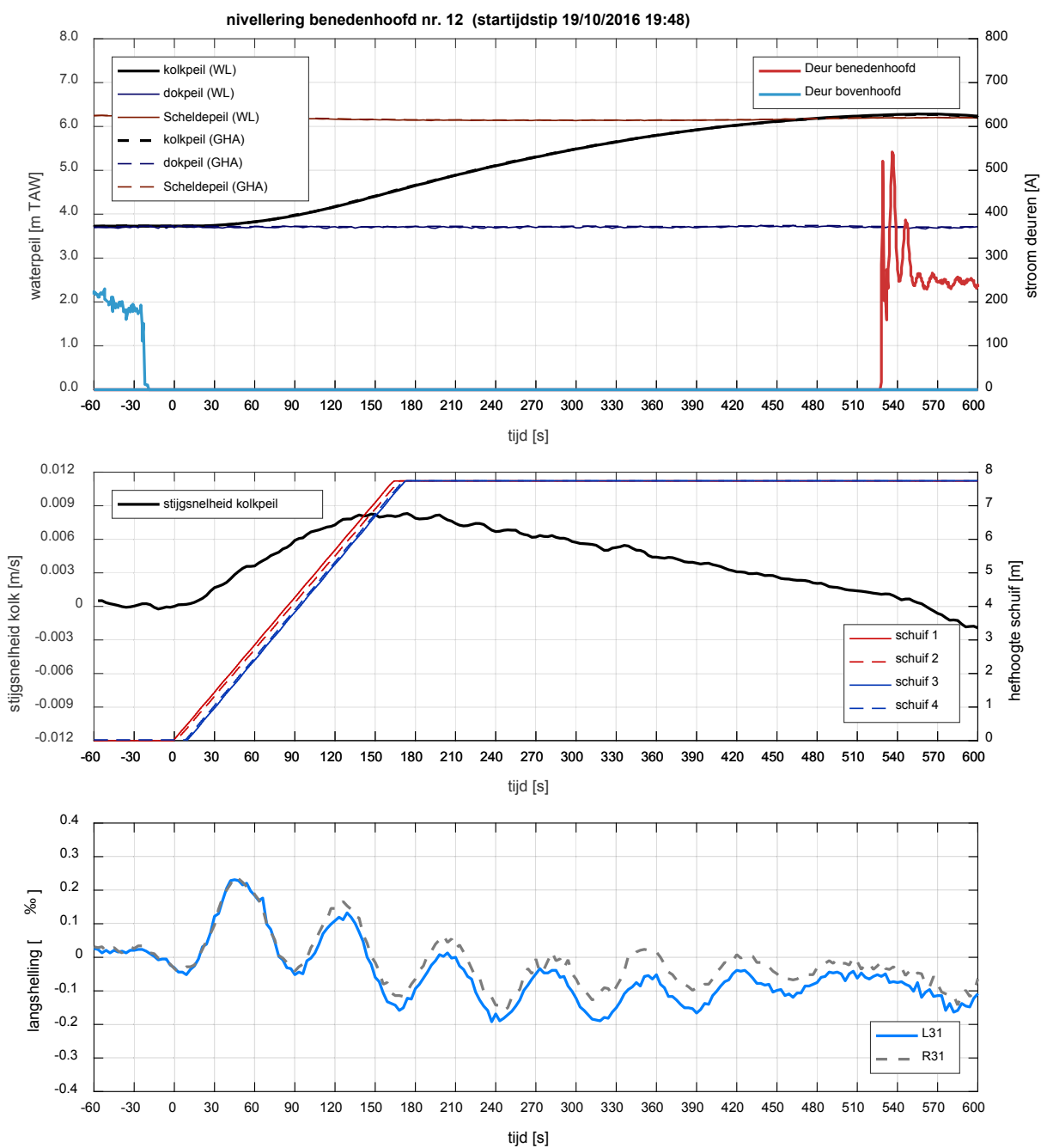


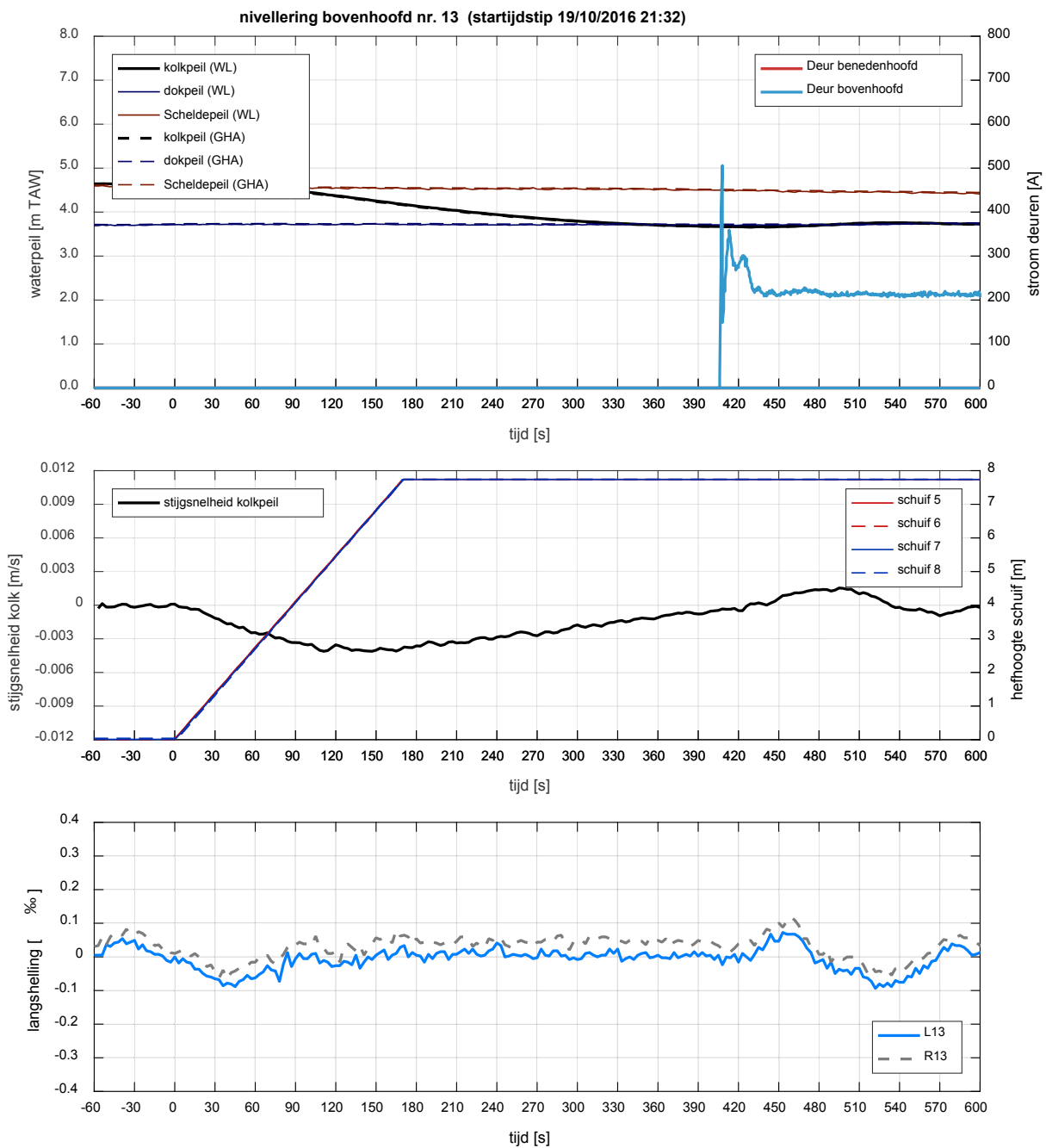


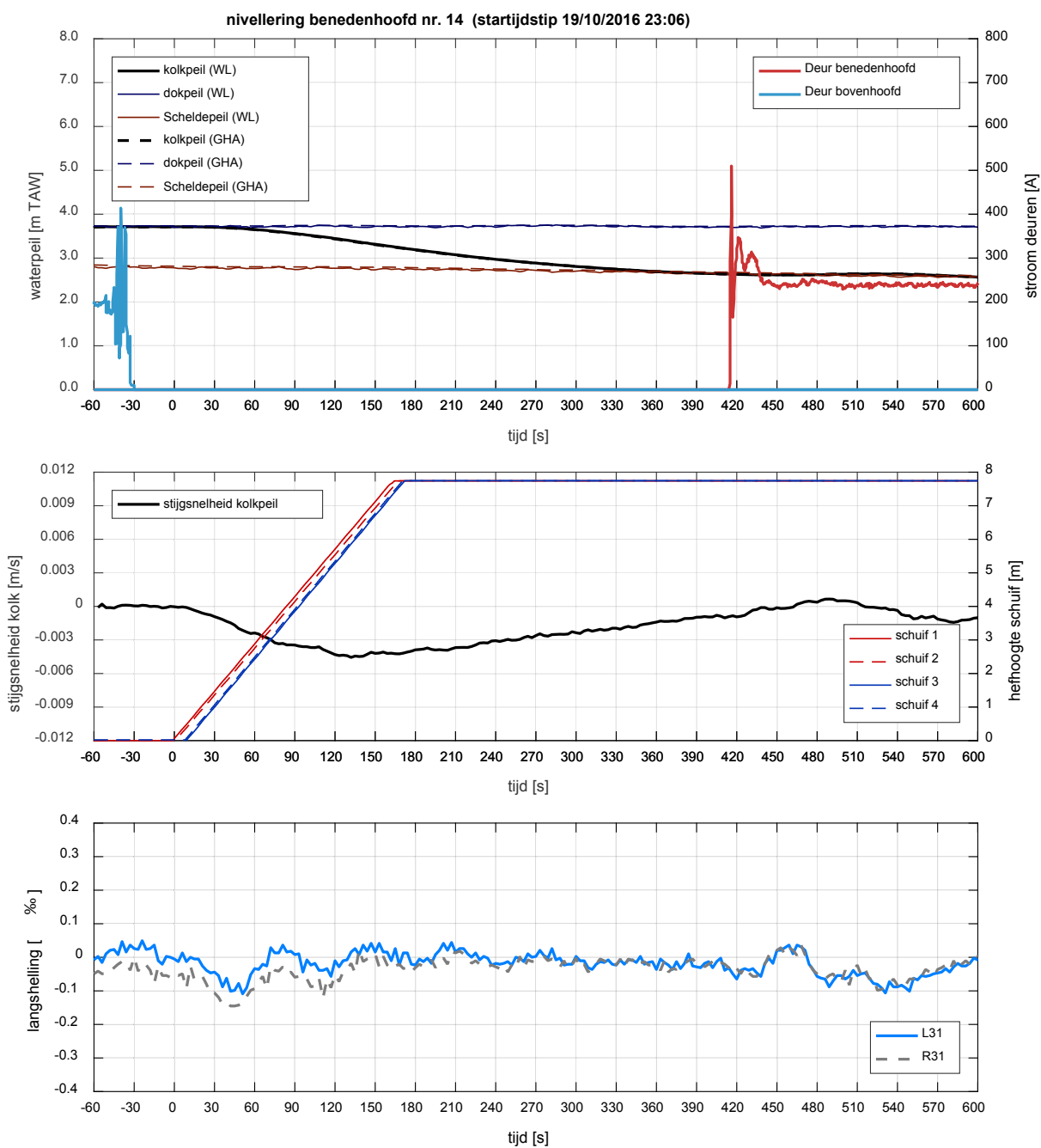


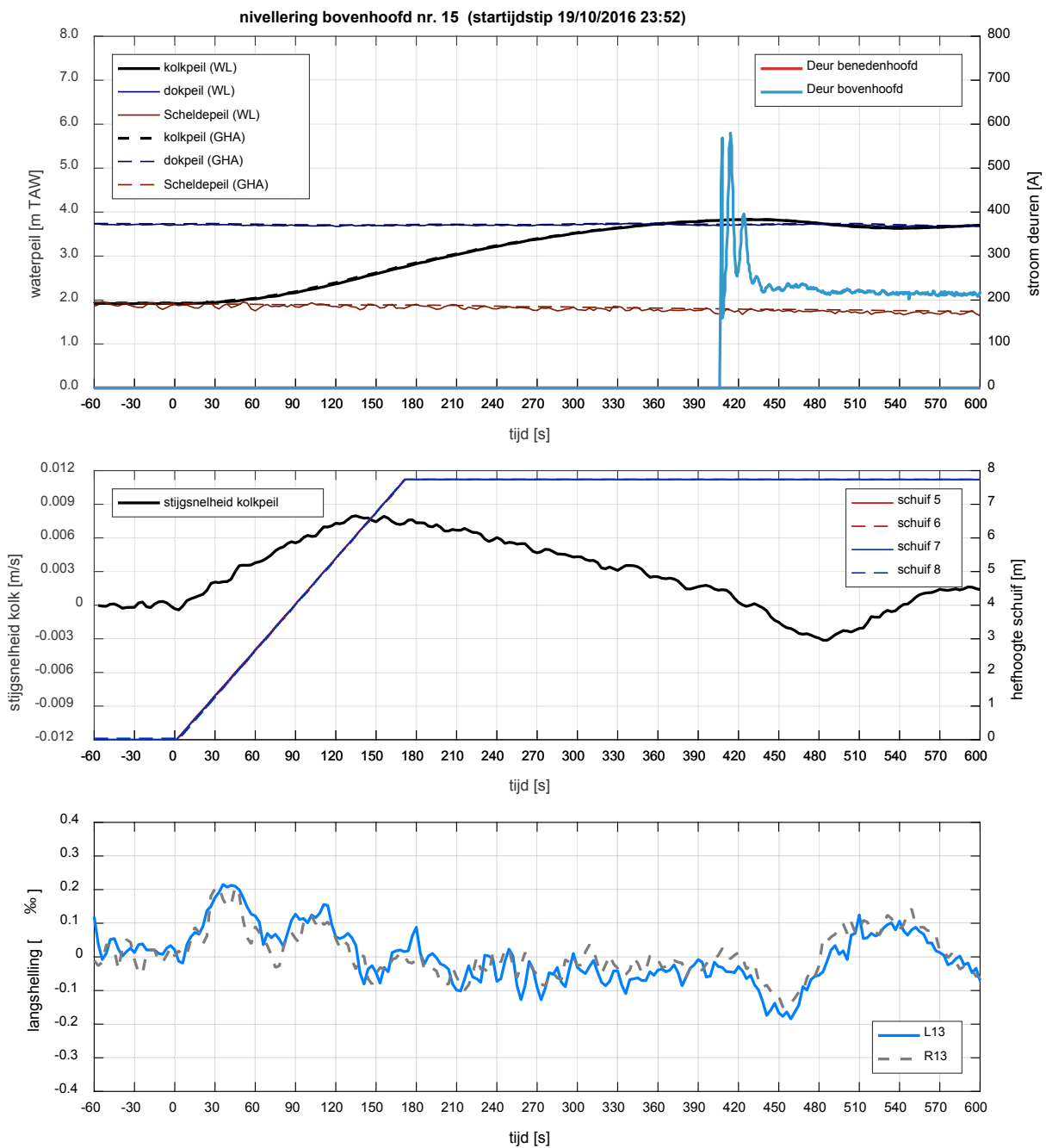


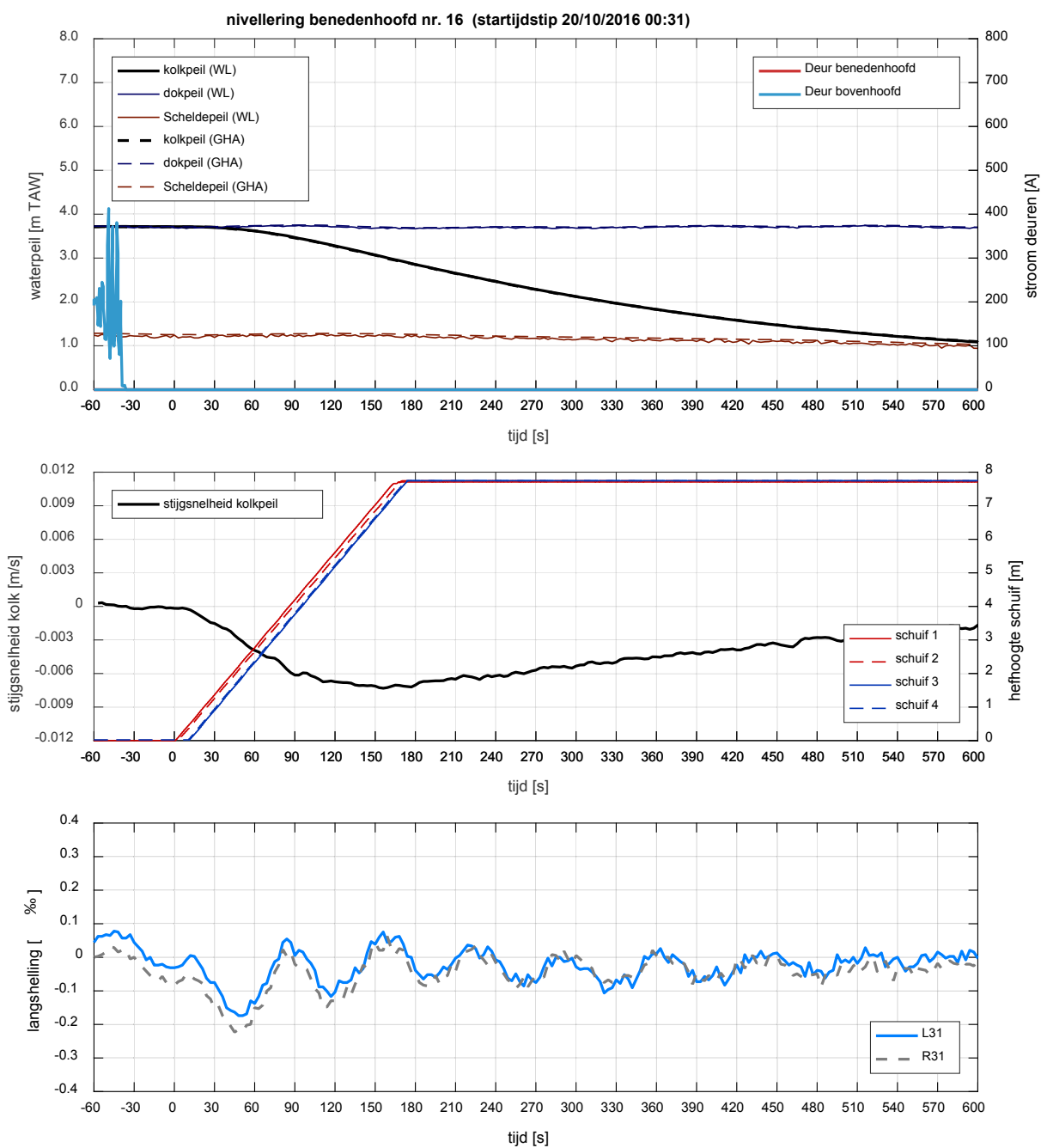


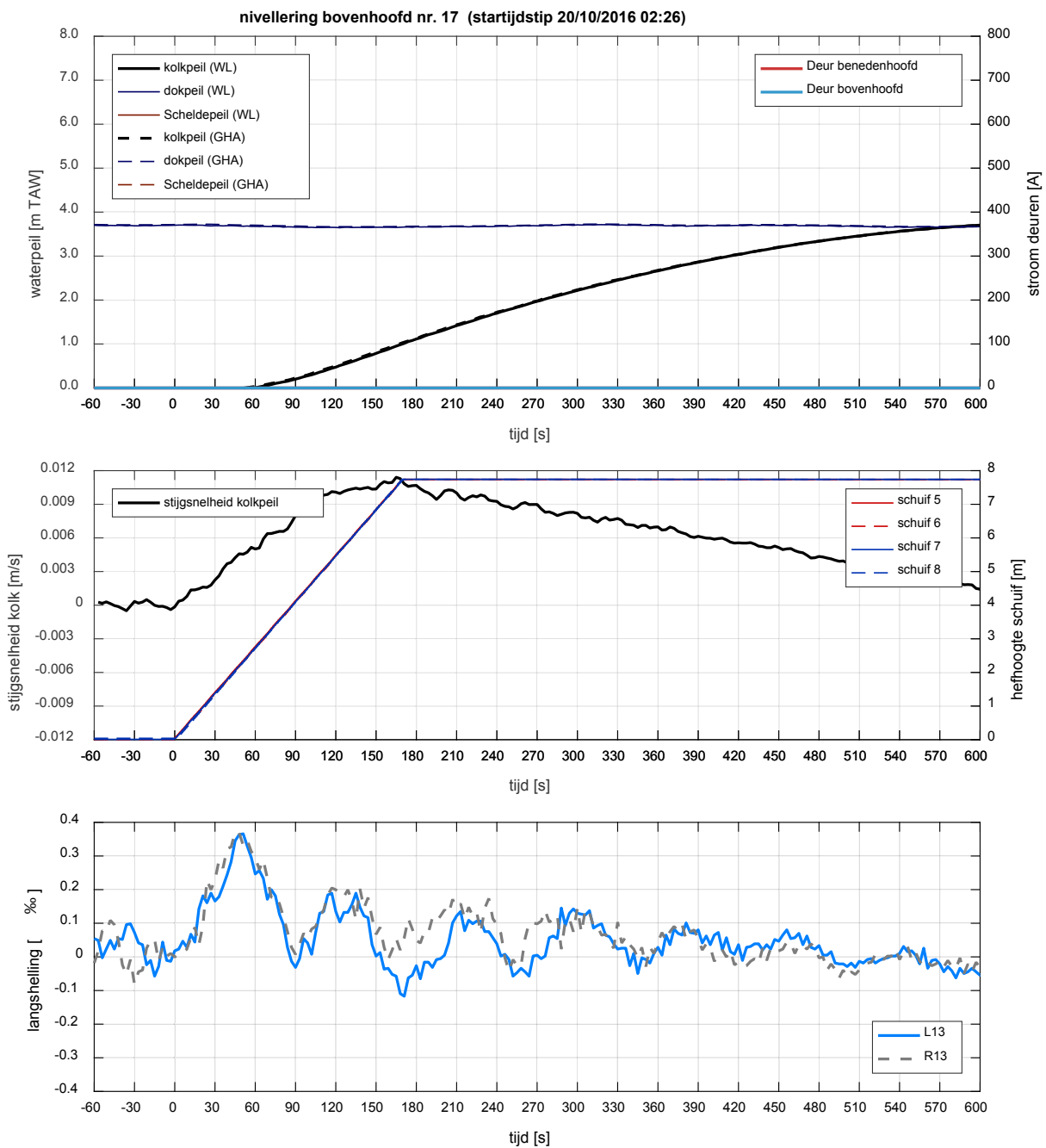


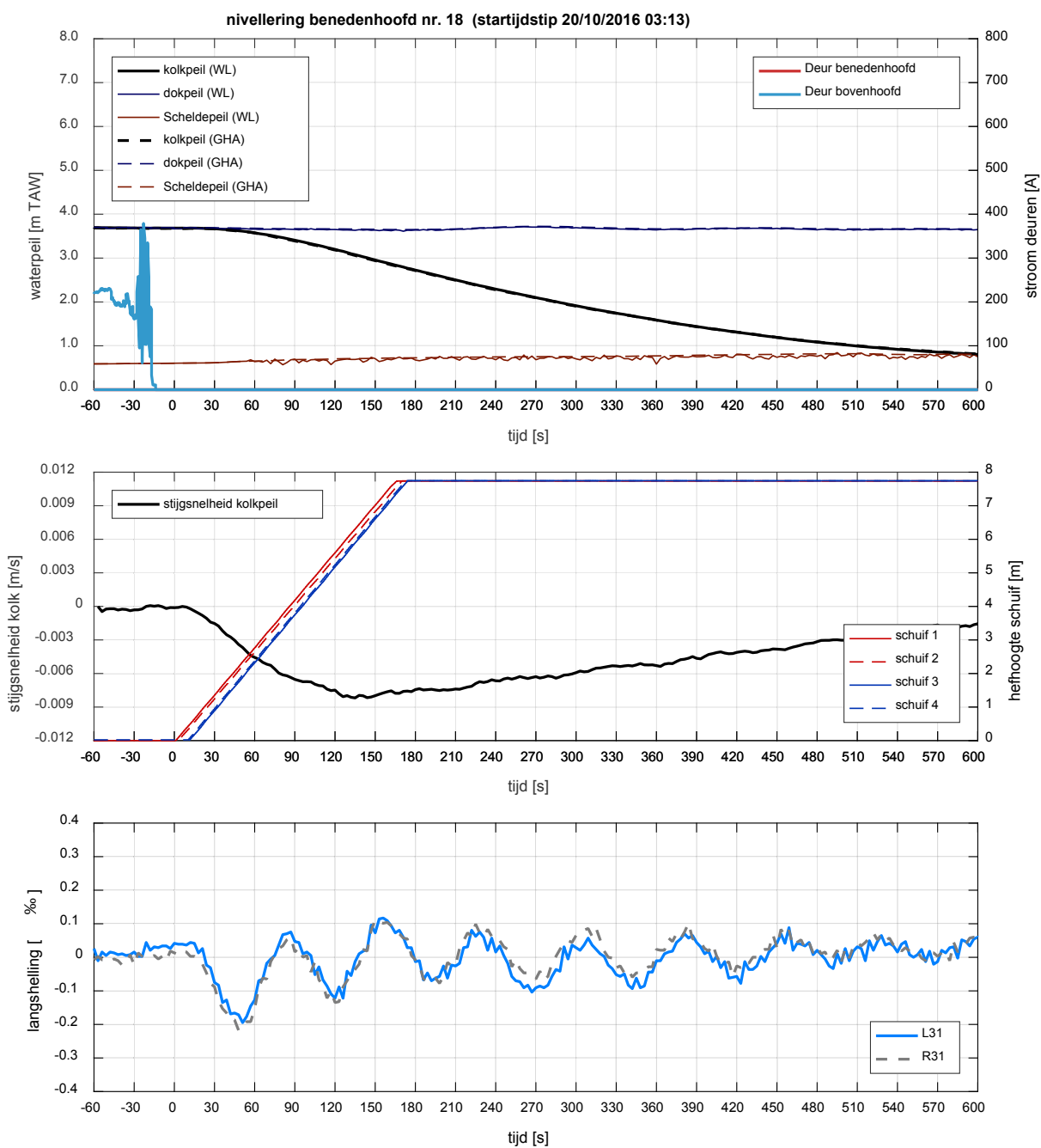




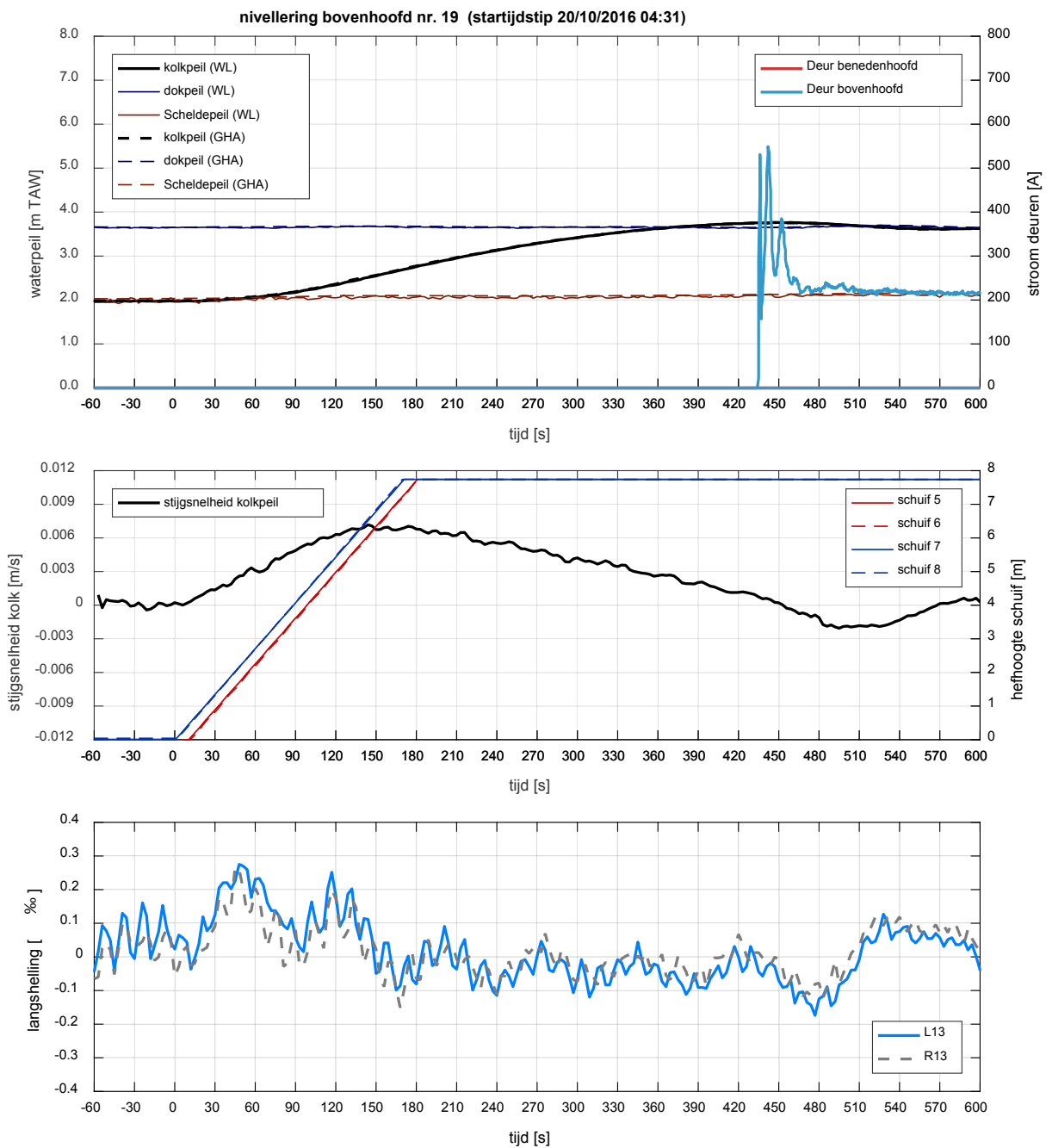


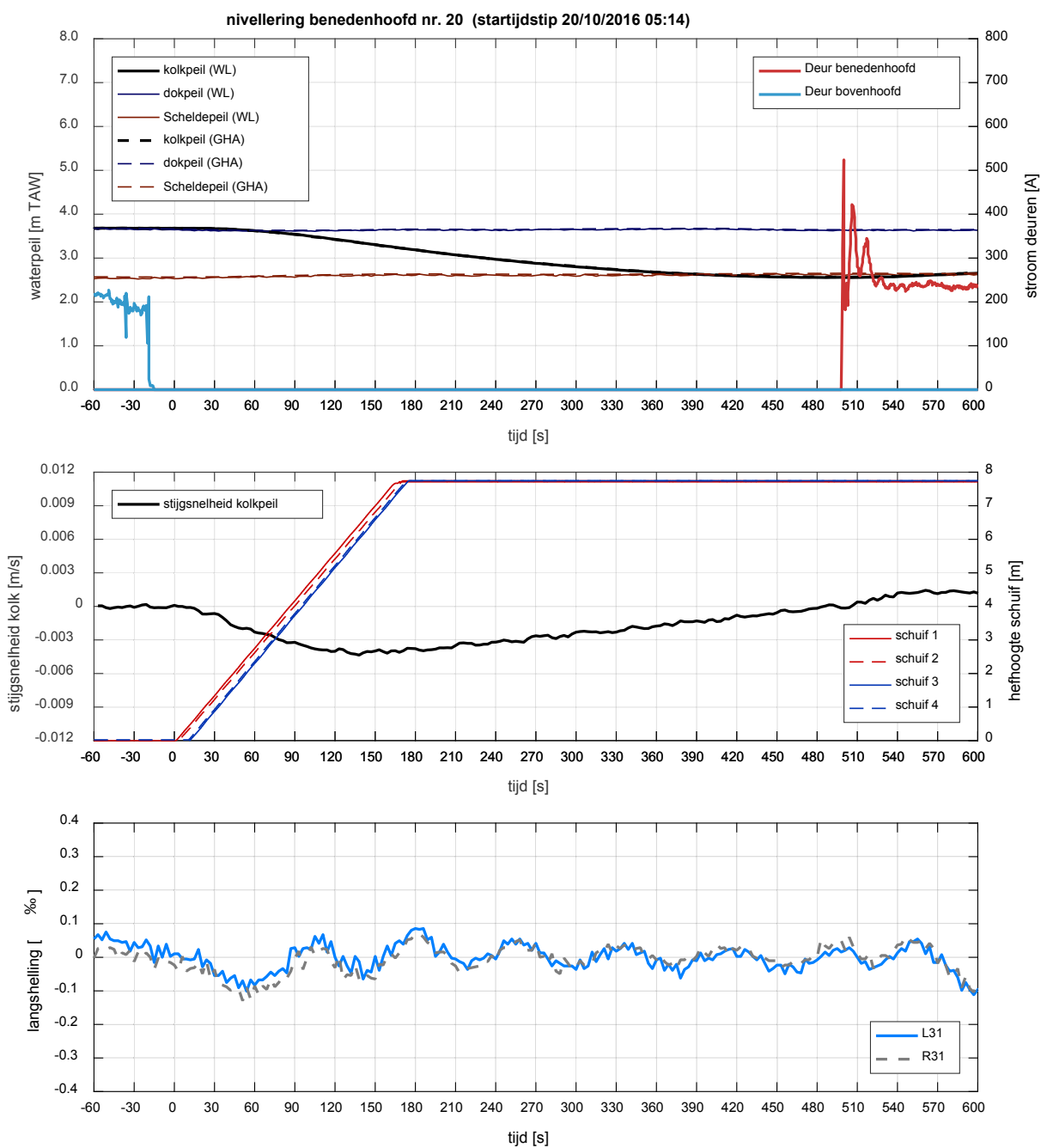


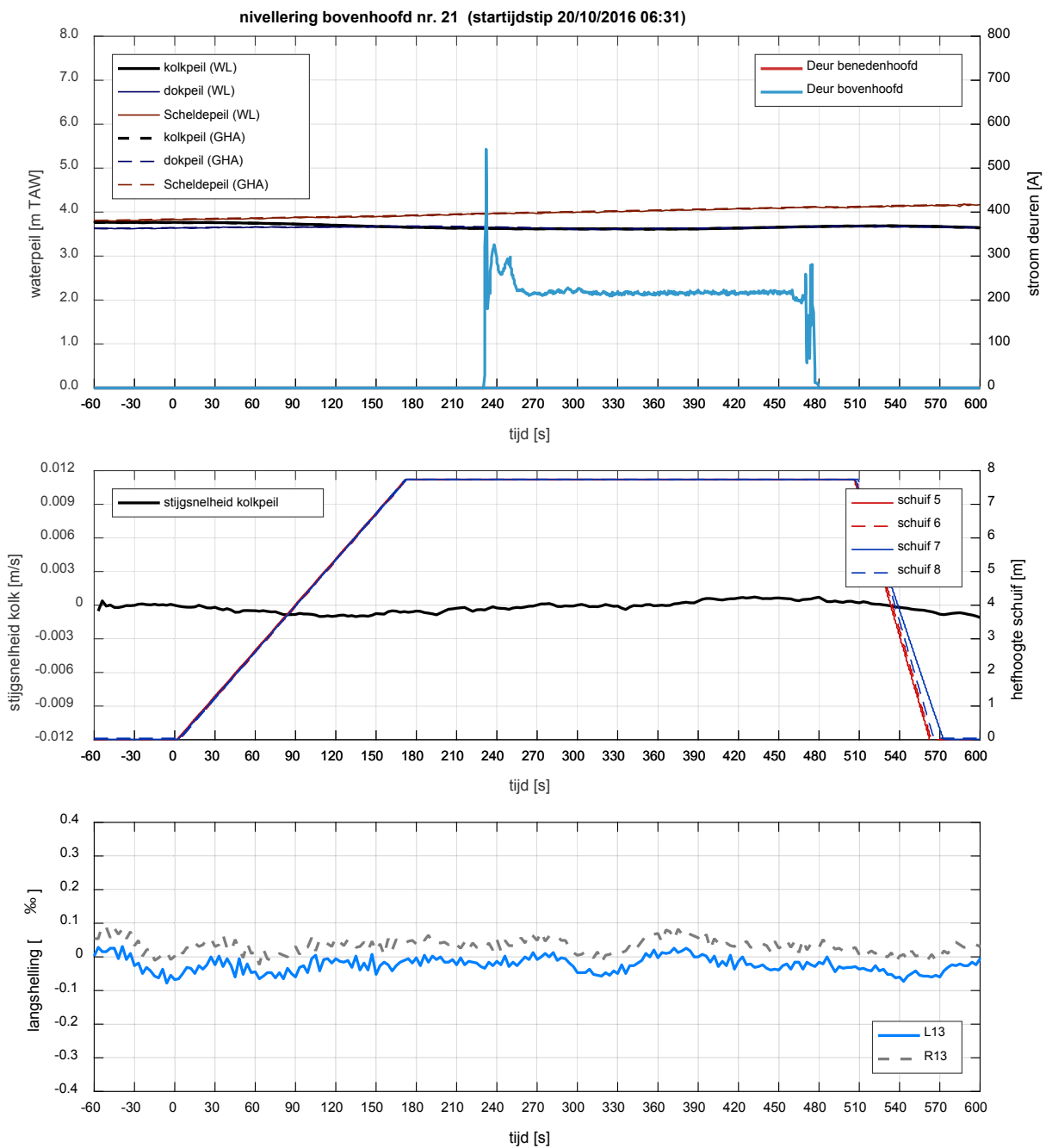


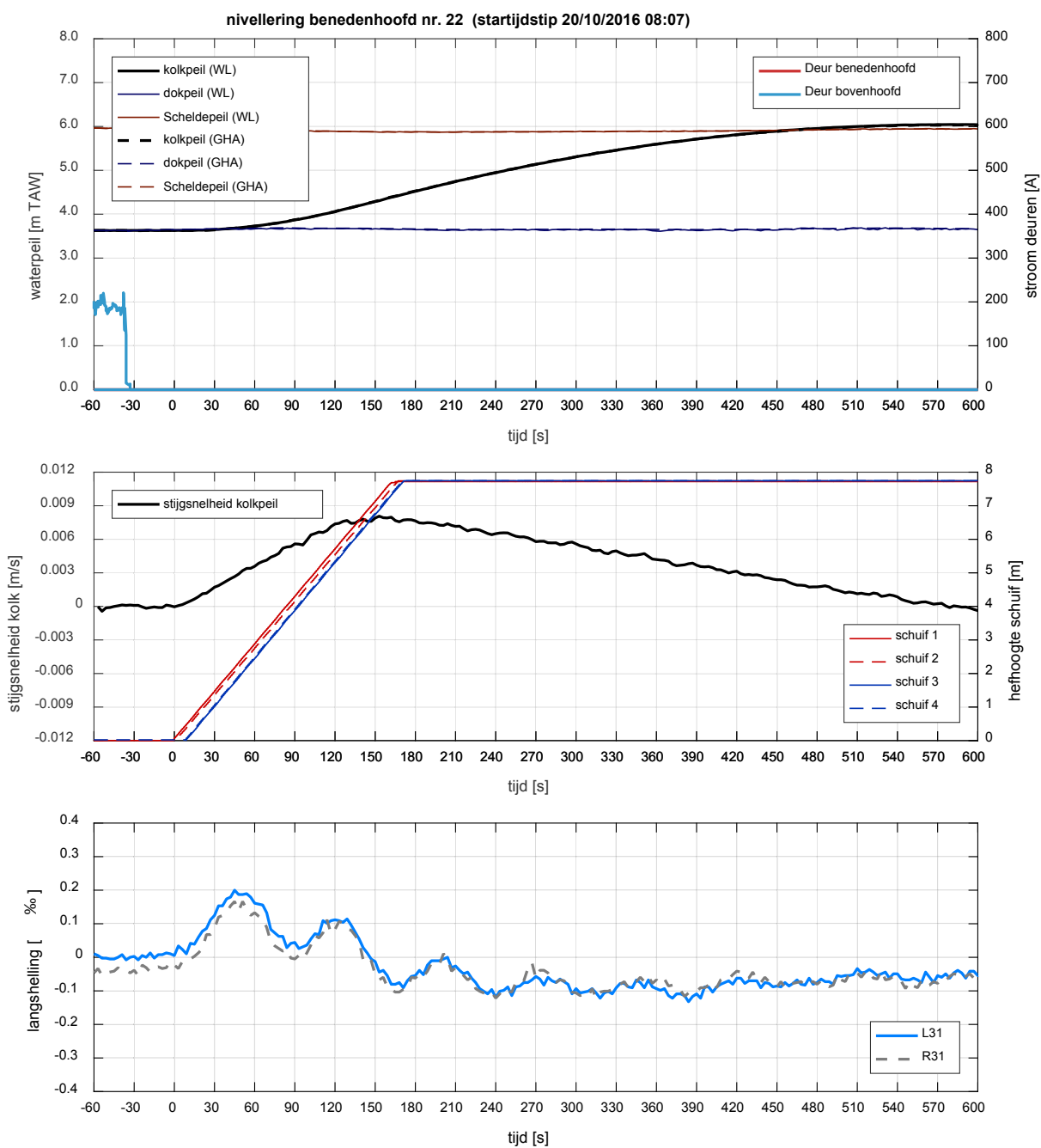


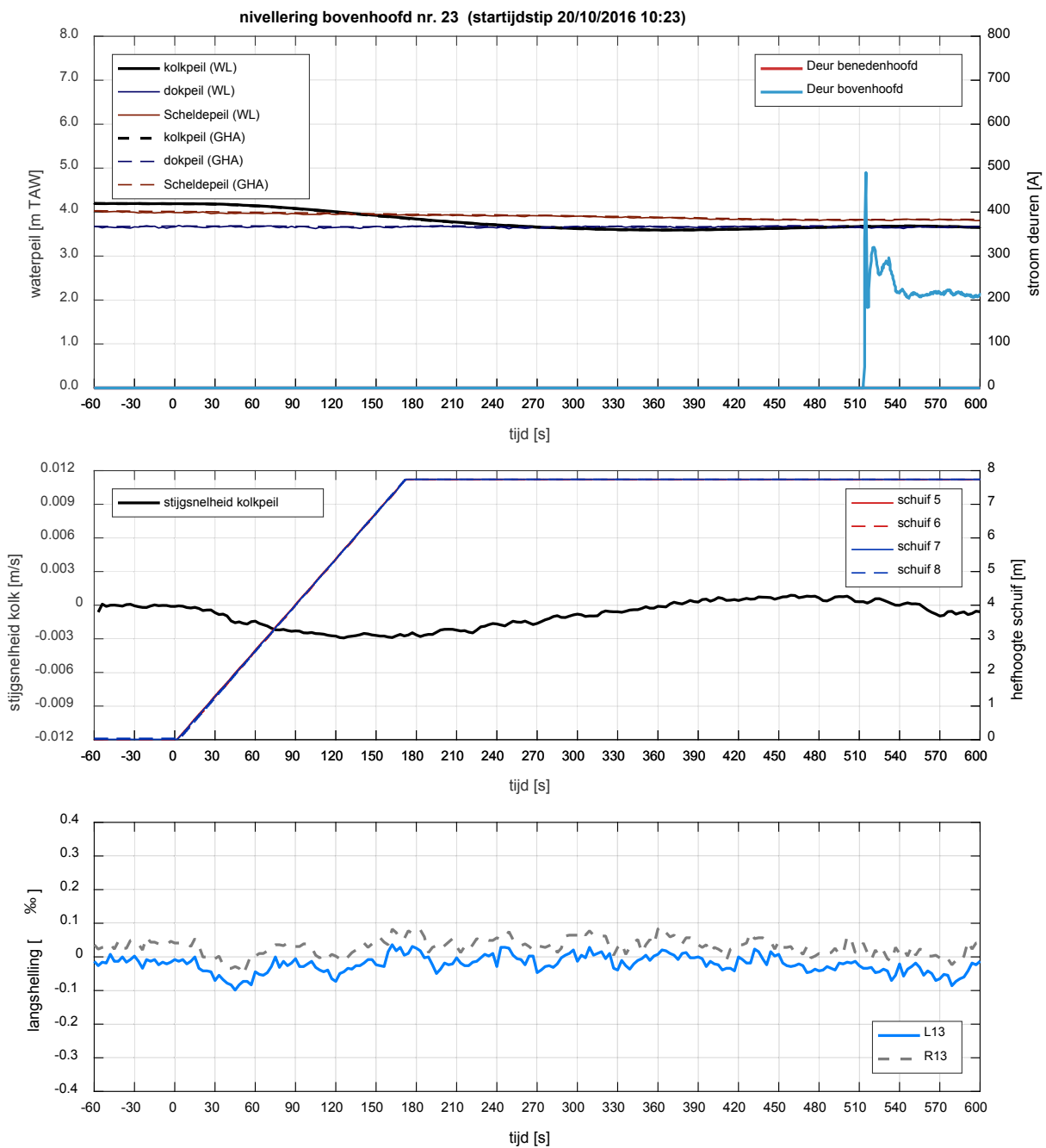


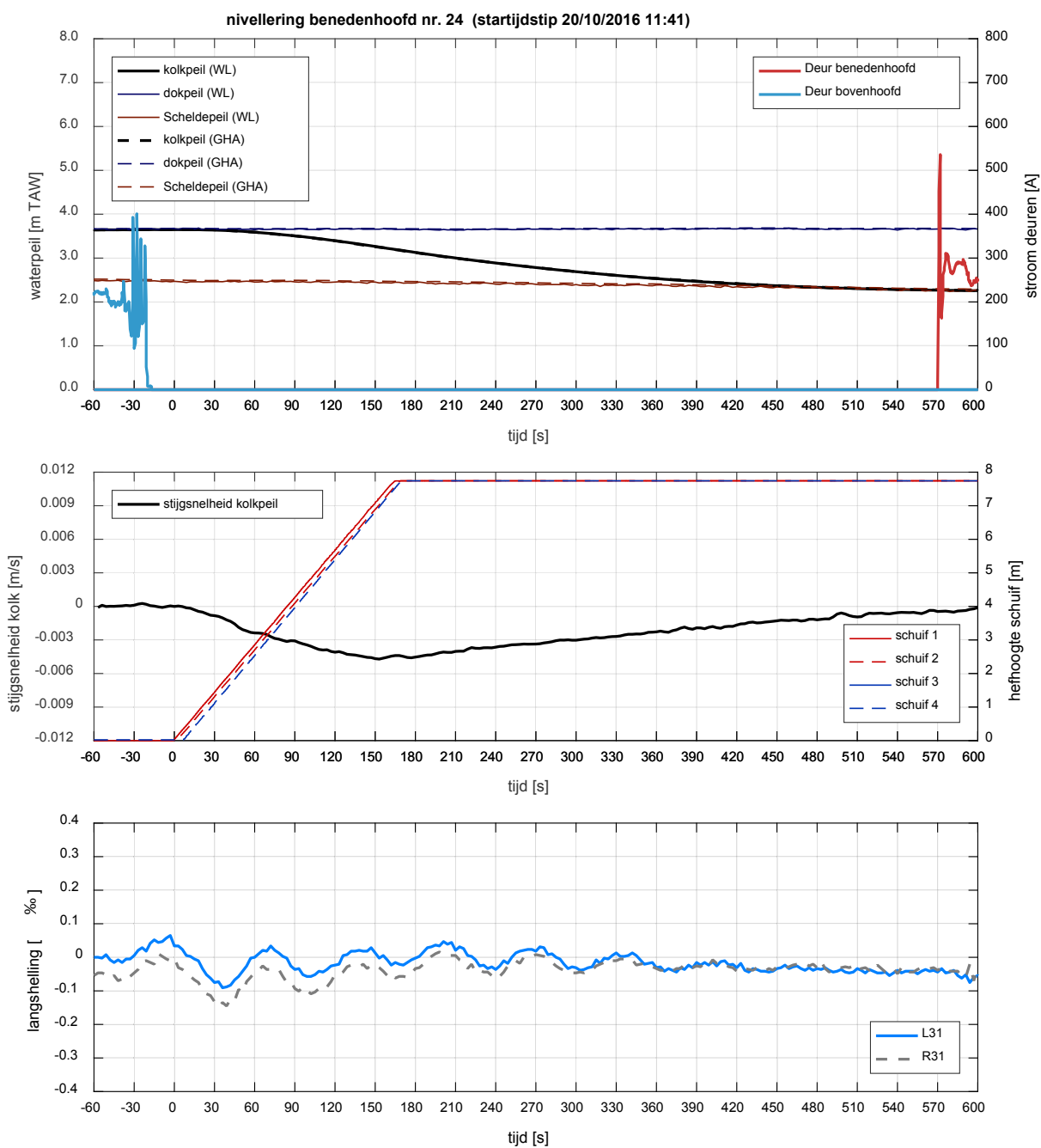


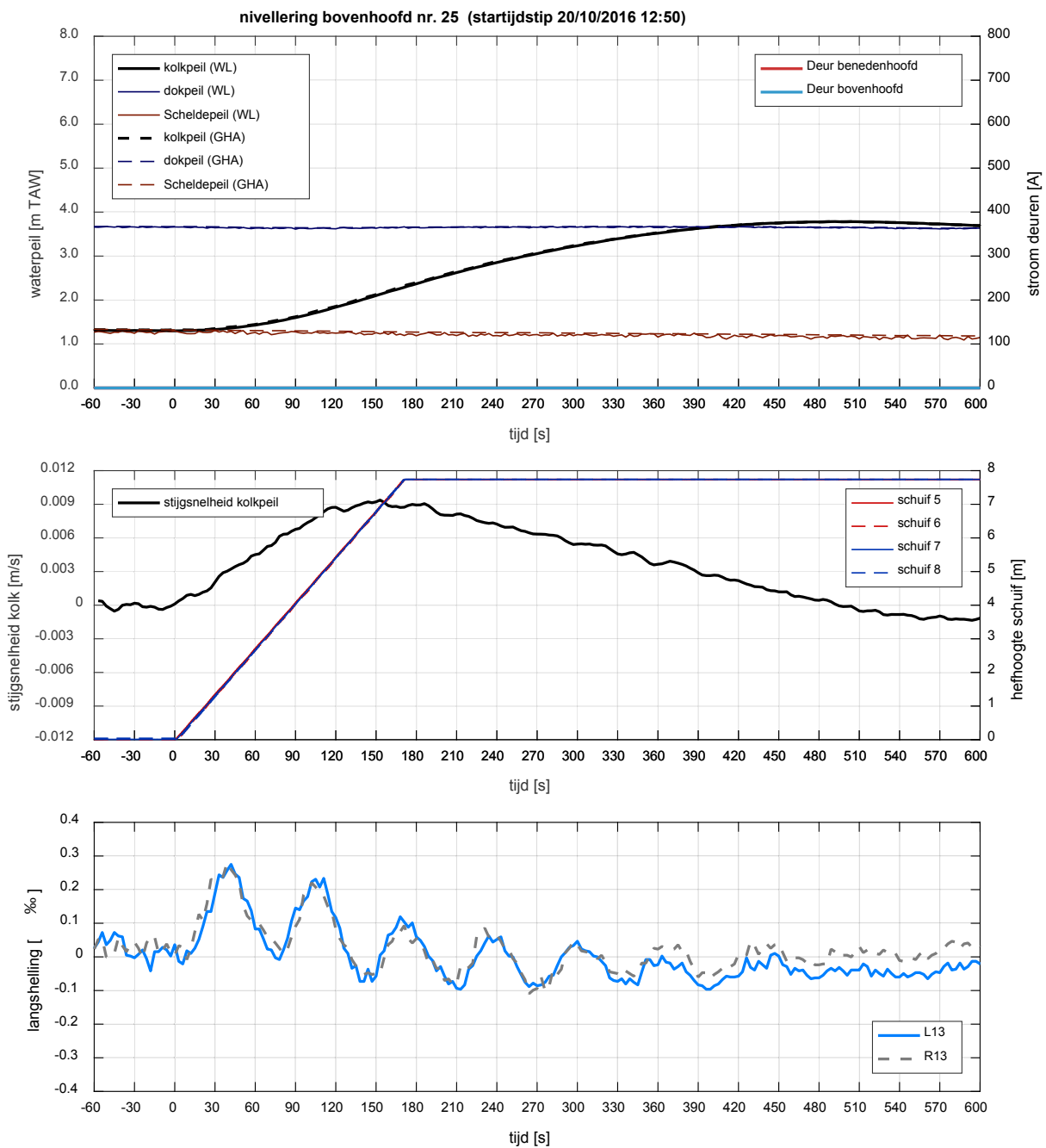


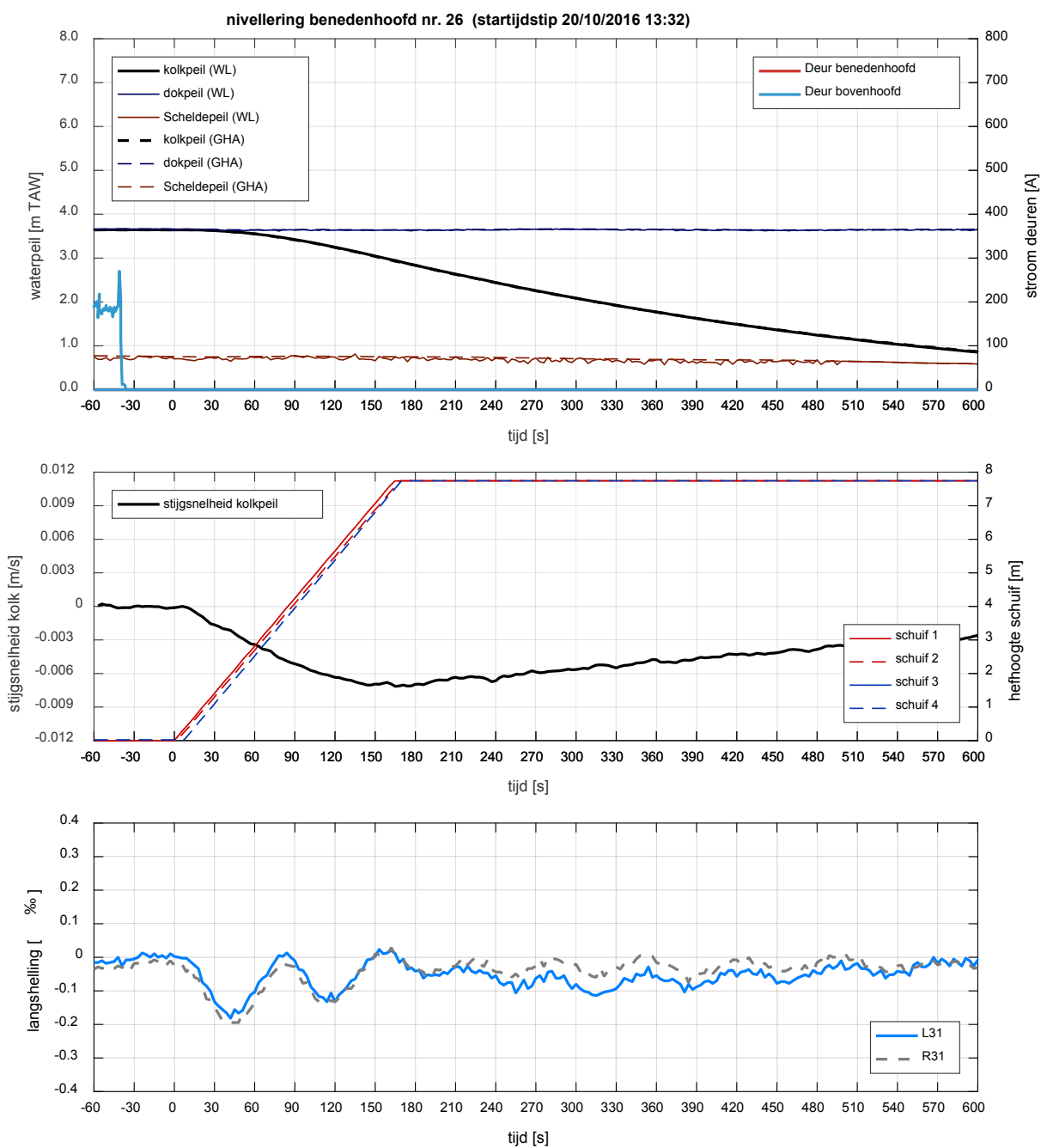




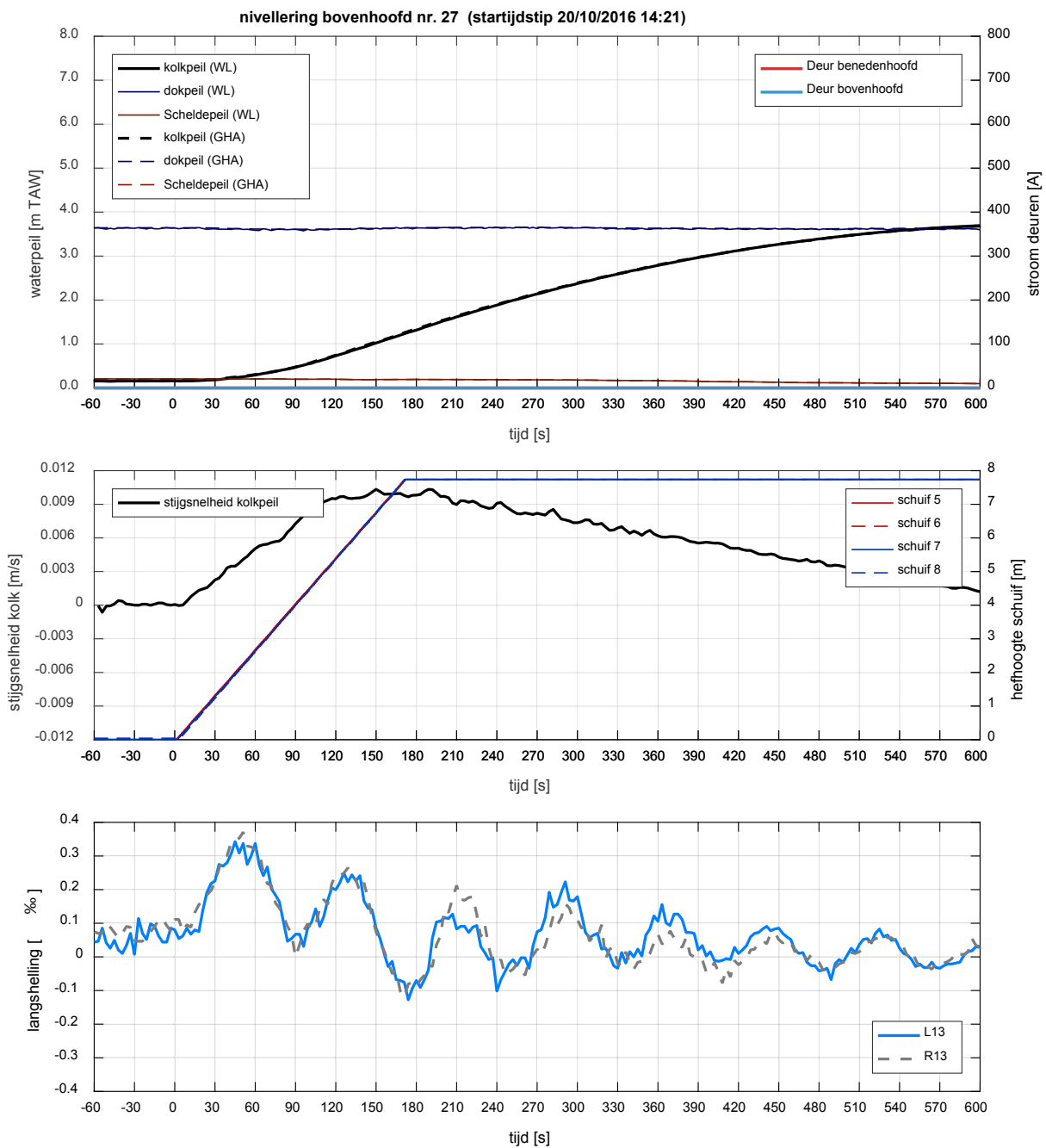












DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**  
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

**T** +32 (0)3 224 60 35

**F** +32 (0)3 224 60 36

[waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)