

Opdrachtgever

Dienst Weg- en Waterbouwkunde



## Bepaling golfdrukken met SKYLLA

Onderzoeksprogramma

Kennisleemtes Steenbekledingen

rapport

november 2004

H4424

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



wL | delft hydraulics

# **Eindconcept**

Opdrachtgever:

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

## **Bepaling golfdrukken met SKYLLA**

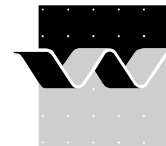
Vergelijking van berekende resultaten met metingen

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

C. Kuiper, N. Doorn

Onderzoeksrapport

november 2004



<b>OPDRACHTGEVER:</b>	Dienst Weg- en Waterbouwkunde; DG Rijkswaterstaat							
<b>TITEL:</b>	Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen Bepaling golfdrukken met SKYLLA. Vergelijking van berekende resultaten met metingen							
<b>SAMENVATTING:</b>	<p>Het voorliggende rapport bevat de resultaten van een eerste toepassing van het numerieke golfmodel SKYLLA in combinatie met het rekenmodel ZSTEEN in het steenzettingenonderzoek. Gekeken is of de SKYLLA-resultaten het thans in gebruik zijnde databestand van gemeten golfdrukken kan vervangen. De studie is uitgevoerd binnen het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes van de DWW. Doel van dit Onderzoeksprogramma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten.</p> <p>De meetresultaten van drie proeven met verschillende golfparameters zijn bestudeerd. Omdat SKYLLA op dit moment nog te rekenintensief is om een volledig golfveld met meer dan 1000 golven door te rekenen is er per proef een drietal tijdsintervallen van 10 à 20 golven gekozen voor een vergelijking. De door SKYLLA berekende golfdrukken vertonen grote overeenkomst met de berekende golfdrukken, zowel wat orde-grootte betreft als de vorm van het tijdsignaal.</p> <p>In het rapport is een aantal praktische aanbevelingen opgenomen voor verdere ontwikkeling van de gecombineerde toepassing van SKYLLA en ZSTEEN.</p>							
<b>REFERENTIES:</b>	Contract DWW-2579 d.d. 20 oktober 2004 verplichtingnummer 3100/1979							
VER	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW		GOEDKEURING	
1	N.Doom & C.Kuiper		oktober 2004	concept	M.J.A. Borsboom		W.M.K. Tilmans	
2	N.Doom & C.Kuiper		november 2004	eindconcept	M.J.A. Borsboom		W.M.K. Tilmans	
<b>PROJECTNUMMER:</b>			H4424					
<b>TREFWOORDEN:</b>			steenzettingen, numerieke modellering, golfdrukken, SKYLLA					
<b>AANTAL BLADZIJDEN:</b>								
<b>VERTROUWELIJK:</b>			<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)		<input checked="" type="checkbox"/> NEE			
<b>STATUS:</b>			<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input checked="" type="checkbox"/> CONCEPT		<input type="checkbox"/> DEFINITIEF	

Dit document is een concept rapport, niet een definitief rapport, en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden.  
Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

## Inhoud

### Lijst van Figuren

### Lijst van Tabellen

### Lijst van Symbolen

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Onderzoekopzet .....</b>	<b>3</b>
	2.1 Opbouw van het onderzoek .....	3
	2.2 Geselecteerde proeven .....	4
	2.3 Geselecteerde tijdtippen.....	5
<b>3</b>	<b>SKYLLA-berekeningen.....</b>	<b>7</b>
	3.1 Inleiding.....	7
	3.2 Numerieke modelopzet.....	7
	3.2.1 Gridafmetingen en tijdstap .....	7
	3.2.2 Interpolatie naar uitvoerlocaties.....	8
	3.2.3 Instellingen .....	9
	3.3 Resultaten .....	10
	3.4 Conclusies.....	14
<b>4</b>	<b>Analyse.....</b>	<b>16</b>
	4.1 Inleiding.....	16
	4.2 Vergelijking golflapparameters.....	16
	4.3 Variatie wrijvingscoëfficiënt in SKYLLA .....	20
	4.4 Vergelijking stijghoogteverschil en blokbeweging (ZSTEEN) .....	22
	4.5 Conclusies.....	25

<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>26</b>
5.1	Conclusies.....	26
5.2	Aanbevelingen.....	27

**Literatuur**

**Bijlagen:**

- A**     **Figuren**
- B**     **Beschrijving SKYLLA**
- C**     **Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen**

## Lijst van Figuren

### *In tekst:*

- Figuur 2.1 Relevante eigenschappen van golfbelasting op een talud
- Figuur 3.1 Principe van 'raai-methode' voor de bepaling van de druk in uitvoerpunten
- Figuur 3.2 Snapsnot van SKYLLA berekening
- Figuur 4.1a Grafische weergave gebruikte golfklapparameters
- Figuur 4.1b Grafische weergave gebruikte golffrontparameters
- Figuur 4.2 Golfklap uit de metingen en volgens SKYLLA-berekeningen voor Proef 21o12-t3; stijghoogte als functie van de locatie
- Figuur 4.3 Golfklap uit de metingen en volgens SKYLLA-berekeningen voor Proef 23o06-t1; stijghoogte als functie van de locatie
- Figuur 4.4 Golfklap uit de metingen en volgens SKYLLA-berekeningen voor Proef 23o06-t3; stijghoogte als functie van de locatie

### *In Bijlage A 'Figuren':*

- Figuur A2.1 Geometrie metingen; Proef 21o12 en 23o06 (a) en P022 (b).
- Figuur A3.1 Vergelijking opgelegd en berekend signaal aan de rand.
- Figuur A3.2a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t1; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO07.
- Figuur A3.2b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t1; drukopnemers DRO09, DRO12, DRO13, DRO15, DRO16, DRO18.
- Figuur A3.2c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t1; drukopnemers DRO20, DRO22, DRO24, DRO26, DRO28, DRO29.
- Figuur A3.2d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t1; drukopnemers DRO31, DRO32, DRO33, DRO34
- Figuur A3.3a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t2; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO07.
- Figuur A3.3b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t2; drukopnemers DRO09, DRO12, DRO13, DRO15, DRO16, DRO18.
- Figuur A3.3c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t2; drukopnemers DRO20, DRO22, DRO24, DRO26, DRO28, DRO29.
- Figuur A3.3d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t2; drukopnemers DRO31, DRO32, DRO33, DRO34
- Figuur A3.4a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t3; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO07.

- Figuur A3.4b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t3; drukopnemers DRO09, DRO12, DRO13, DRO15, DRO16, DRO18.
- Figuur A3.4c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t3; drukopnemers DRO20, DRO22, DRO24, DRO26, DRO28, DRO29.
- Figuur A3.4d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 21o12 op tijdstip t3; drukopnemers DRO31, DRO32, DRO33, DRO34
- Figuur A3.5a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t1; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO07.
- Figuur A3.5b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t1; drukopnemers DRO09, DRO10, DRO12, DRO13, DRO15, DRO16.
- Figuur A3.5c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t1; drukopnemers DRO18, DRO20, DRO22, DRO24, DRO26, DRO28.
- Figuur A3.5d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t1; drukopnemers DRO29, DRO31, DRO32, DRO33, DRO34
- Figuur A3.6a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t2; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO07.
- Figuur A3.6b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t2; drukopnemers DRO09, DRO10, DRO12, DRO13, DRO15, DRO16.
- Figuur A3.6c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t2; drukopnemers DRO18, DRO20, DRO22, DRO24, DRO26, DRO28.
- Figuur A3.6d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t2; drukopnemers DRO29, DRO31, DRO32, DRO33, DRO34
- Figuur A3.7a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t3; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO07.
- Figuur A3.7b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t3; drukopnemers DRO09, DRO10, DRO12, DRO13, DRO15, DRO16.
- Figuur A3.7c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t3; drukopnemers DRO18, DRO20, DRO22, DRO24, DRO26, DRO28.
- Figuur A3.7d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t3; drukopnemers DRO29, DRO31, DRO32, DRO33, DRO34
- Figuur A3.8a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t1; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO06.
- Figuur A3.8b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t1; drukopnemers DRO07, DRO08, DRO09, DRO10, DRO11, DRO12.
- Figuur A3.8c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t1; drukopnemers DRO13, DRO14, DRO15, DRO16, DRO17, DRO18.
- Figuur A3.8d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t1; drukopnemers DRO20, DRO21, DRO22, DRO23, DRO25, DRO26.

- Figuur A3.9a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t2; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO06.
- Figuur A3.9b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t2; drukopnemers DRO07, DRO08, DRO09, DRO10, DRO11, DRO12.
- Figuur A3.9c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t2; drukopnemers DRO13, DRO14, DRO15, DRO16, DRO17, DRO18.
- Figuur A3.9d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t2; drukopnemers DRO20, DRO21, DRO22, DRO23, DRO25, DRO26.
- Figuur A3.10a Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t3; drukopnemers DRO01, DRO02, DRO03, DRO04, DRO05, DRO06.
- Figuur A3.10b Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t3; drukopnemers DRO07, DRO08, DRO09, DRO10, DRO11, DRO12.
- Figuur A3.10c Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t3; drukopnemers DRO13, DRO14, DRO15, DRO16, DRO17, DRO18.
- Figuur A3.10d Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t3; drukopnemers DRO20, DRO21, DRO22, DRO23, DRO25, DRO26.
- Figuur A4.1 Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef 23o06 op tijdstip t1; drukopnemers DRO28, DRO29, DRO31, DRO32, DRO33, DRO34 voor 2 verschillende instellingen van SKYLLA
- Figuur A4.2 Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor Proef P022 op tijdstip t3; drukopnemers DRO20, DRO21, DRO22, DRO23, DRO25, DRO26 voor 2 verschillende instellingen van SKYLLA
- Figuur A4.3 Vergelijking van een golfklap voor 2 instellingen van de wrijvingscoëfficiënt voor Proef 23o06 en Proef P022



## Lijst van Tabellen

*In tekst:*

Tabel 2.1	Golfcondities van de geselecteerde proeven
Tabel 2.2	Geselecteerde tijdstippen
Tabel 2.3	Tijdsintervallen gebruikt voor SKYLLA berekeningen
Tabel 3.1	Afmetingen rekendomein en resolutie
Tabel 3.2	Locatie drukopnemers
Tabel 3.3	Geschatte rekentijd van geselecteerde proeven voor een tijdsinterval van 10 golven
Tabel 4.1	Golfklapparameters voor de geselecteerde tijdstippen
Tabel 4.2	Constructieparameters gebruikt voor de ZSTEEN berekeningen
Tabel 4.3	Vergelijking van golfklap- en golffrontparameters waarbij de wrijvingsfactor in SKYLLA is aangepast
Tabel 4.4	Constructieparameters gebruikt voor de ZSTEEN berekeningen
Tabel 4.5	Met ZSTEEN berekende blokbeweging en stijghoogteverschil over de toplaag

## Lijst van Symbolen

### Romeinse letters:

$A_{zuil}$	: zuiloppervlak ( $m^2$ )
$B$	: blokbreedte, gemeten langs het talud omhoog (m)
$B_{klap50\%}$	: breedte van de golfklap (m)
$C_{gem}$	: gemiddelde golfsnelheid (m/s)
$f$	: wrijvingscoëfficiënt (-)
$g$	: zwaartekrachtversnelling ( $m/s^2$ )
$h$	: waterdiepte (m)
$H_s$	: significante golfhoogte, voor onregelmatige golven (m)
$I_{dip}$	: dipimpuls ( $m^2s$ )
$L_{ondiep}$	: ondiepwater golflengte (m)
$s_{op}$	: golfsteilheid, voor onregelmatige golven, $s_{op} = H_s / (gT_p^2/2\pi)$ (-)
$t_{klap50\%}$	: tijdsduur van de golfklap dat door 50% van de golven wordt overschreden (s)
$\Delta t$	: tijdstap in de SKYLLA berekening (s)
$T_p$	: golfpiekperiode, voor onregelmatige golven (s)
$T_m$	: gemiddelde golfperiode, voor onregelmatige golven (s)
$u$	: horizontale snelheid (m/s)
$v$	: verticale snelheid (m/s)
$x$	: horizontale afstand van het talud (m)
$Y_{max}$	: maximale blokbeweging (m)
$\Delta x$	: resolutie van het SKYLLA rooster in $x$ -richting (m)
$\Delta y$	: resolutie van het SKYLLA rooster in $y$ -richting (m)
$\Delta y$	: verandering van de hoogte van het talud in verticale richting (m)

### Griekse letters:

$\alpha$	: helling van de constructie ( $^\circ$ )
$\phi$	: stijghoogte op de bekleding (m)
$\phi_b$	: hoogte van golffront t.o.v. minimale stijghoogte aan de voet van het front (m)
$\phi_{dip}$	: gediptheid; grootte van de lokale dip in het stijghoogteverloop op het talud (m)
$\phi_{\hat{dip}}$	: geïntegreerde gediptheid (ms)
$\phi_k$	: golfklaphoogte (m)
$\phi_{min}$	: minimale stijghoogte aan de voet van het front (m)
$\phi_{w,max}$	: maximale stijghoogteverschil over de toplaag (m)
$\phi_{max}$	: maximale stijghoogte op de toplaag (m)
$\theta_f$	: helling van het golffront; gemeten vanaf de voet van het front tot het snijpunt van het front met SWL ( $^\circ$ )
$\nu_t$	: turbulente viscositeit ( $m^2/s$ )
$\xi_{op}$	: brekerparameter gebaseerd op $T_p$ ; $\xi_{op} = \tan \alpha / \sqrt{(s_{op})}$ (-)

### Afkortingen:

SWL	: stilstaand water niveau, ten opzichte van NAP (m)
-----	---

# I Inleiding

Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst te worden. In de praktijk kan aan veel steenzettingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden wegens een gebrek aan wetenschappelijke kennis. In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten. In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggend plan betrekking op het deelonderzoek 8.2.1 “Golfdrukken bepalen met SKYLLA, vergelijking van berekende resultaten met metingen”.

Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, zoals het begin 2004 voorzien was, is weergegeven in Bijlage C.

De Dienst Weg- en Waterbouwkunde van de DG Rijkswaterstaat heeft bij brief met kenmerk AK/044446 van 11 oktober 2004 aan WL | Delft Hydraulics opdracht verleend voor het uitvoeren van werkzaamheden voor de validatie van het numerieke simulatiemodel SKYLLA voor het berekenen van de golfdruk op steenbekledingen op dijken, en het opstellen van aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling.

## Aanleiding en doel van het onderzoek

Voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen wordt op dit moment het numerieke programma ZSTEEN ontwikkeld. In ZSTEEN wordt de blokbeweging berekend door gebruik te maken van gemeten stijghoogtes op het talud, die worden ingelezen uit een databestand. In dit databestand van ZSTEEN zijn slechts voor een beperkt aantal condities en geometrieën gemeten stijghoogtes aanwezig, hetgeen in veel gevallen tot onnauwkeurigheden leidt als gevolg van interpolaties. In dit rapport wordt een eerste inventarisatie gedaan of het mogelijk is om in deze gevallen SKYLLA te gebruiken voor het berekenen van de stijghoogtes op de bekleding. Deze berekende stijghoogtes worden dan gebruikt als invoer voor de ZSTEEN berekening. Toepassen van SKYLLA kan ZSTEEN breder toepasbaar maken.

SKYLLA is een numeriek model van WL | Delft Hydraulics dat nog in ontwikkeling is en dat gebaseerd is op de Volume-of-Fluid methode (VOF-methode). Het model is in principe geschikt om de golfbelasting als gevolg van het golffront en de golfklap te berekenen voor een brede range van golfcondities en alle dijkgeometrieën (ook met een of meerdere bermen, golfoverslag, etc.). Met de golfklap wordt in dit verband niet het allerhoogste drukpiekje bedoeld dat slechts orde 1/1000 s aanhoudt, maar meer een voor steenzettingen relevante golfklap die goed beschreven wordt met een bemonsteringsfrequentie van orde 20 Hz.

In dit rapport is onderzocht of rekenresultaten van SKYLLA gebruikt kunnen worden als input voor het rekenmodel ZSTEEN, als vervanging van het thans in gebruik zijnde databestand van gemeten drukken. Binnen het steenzettingenonderzoek is voorgesteld om deze onderzoekslijn verder te verkennen, zodat bij beoogde verdere ontwikkeling van SKYLLA op termijn (tweede helft van dit decennium) een flexibel rekengereedschap verkregen wordt waarmee de toepasbaarheid van ZSTEEN enorm verbreed kan worden.

Het doel van het project is om op basis van de resultaten die in dit onderzoek zijn verkregen een onderbouwde beslissing te kunnen nemen om SKYLLA verder te ontwikkelen ten behoeve van steenzettingen.

Er is gebruik gemaakt van SKYLLA versie 1.5.4.8 en ZSTEEN versie 1.9.

## **Leeswijzer**

Hoofdstuk 2 vormt een beschrijving van de onderzoeksopzet. In Hoofdstuk 3 wordt het golfmodel SKYLLA beschreven. Hierbij komen zowel de achterliggende fysica als de numerieke aspecten aan bod. Tevens wordt in dit hoofdstuk een eerste vergelijking gemaakt tussen de berekende en de gemeten druksignalen. In Hoofdstuk 4 worden de berekende stijghoogtes nader geanalyseerd langs een tweetal lijnen. Als eerste wordt gekeken naar de berekende golfklapparameters, welke volgen uit de speciaal hiervoor ontwikkelde analysesoftware van Klein Breteler & Coeveld (2004). Deze software zet een geregistreerd stijghoogtesignaal om in een aantal karakteristieke parameters, zoals de totale impuls van een golfklap, de gradiënt van de stijghoogte en de maximale kracht van een golfklap op het talud. Om blokbeweging en stijghoogteverschillen over de topplaat te kunnen vergelijken zijn ZSTEEN berekeningen gemaakt. Hiertoe zijn de berekende en gemeten stijghoogtes gebruikt als invoer voor het programma ZSTEEN. De berekende blokbeweging en stijghoogte over de topplaat worden in dit hoofdstuk geanalyseerd. Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen voor verdere ontwikkeling van SKYLLA (Hoofdstuk 5). Bijlage A bevat de figuren die niet zijn opgenomen in de hoofdtekst. Een beschrijving van het model SKYLLA is te vinden in Bijlage B.

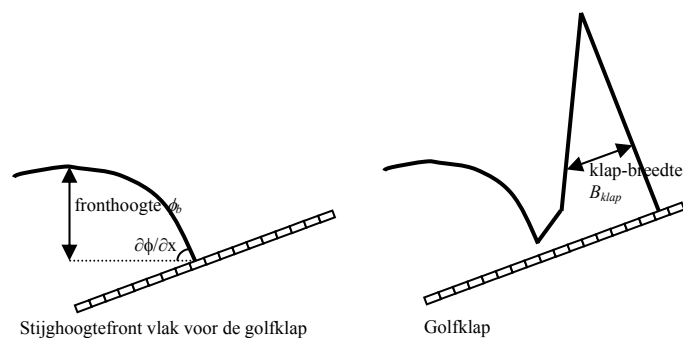
## 2 Onderzoeksopzet

### 2.1 Opbouw van het onderzoek

In het huidige project is bekeken welke rol SKYLLA kan spelen bij de bepaling van de stabiliteit van steenzettingen. Voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen wordt op dit moment het numerieke model ZSTEEN ontwikkeld en toegepast. ZSTEEN maakt gebruik van gemeten stijghoogtes op het talud (vanuit een database) om de blokbeweging te berekenen. De beperkingen van de database (o.a. een beperkt aantal dijkgeometrieën en  $\xi_{op}$ -waarden) zijn daarbij een belangrijk probleem. Een belangrijke verbetering zou bereikt kunnen worden, door de stijghoogtes (invoer voor ZSTEEN) te berekenen met SKYLLA. Om de bruikbaarheid van SKYLLA te kunnen beoordelen wordt in dit rapport primair gekeken naar het door ZSTEEN berekende stijghoogteverschil over de topklaag en de door ZSTEEN berekende blokbeweging. Daarnaast wordt gedetailleerd gekeken naar de belangrijkste aspecten van de belasting op het talud, namelijk:

- Een steil stijghoogtefront vlak vóór de golflap, met als belangrijkste eigenschappen:
  - de drukgradiënt in de plaats,  $\partial\phi/\partial x$ ,
  - de hoogte van het stijghoogtefront
  - de gediptheid (zoals gedefinieerd door Klein Breteler en Coeveld, 2004)
  - de duur dat dit aanhoudt
  
- Een grote golflap, met als belangrijkste eigenschappen:
  - de drukgradiënten in de plaats,  $\partial\phi/\partial x$ , van de flanken van de golflap tijdens het bereiken van de maximale drukpiek
  - de hoogte en breedte van het drukverloop tijdens het bereiken van de maximale drukpiek
  - de duur van de golflap
  - de gediptheid, zoals gedefinieerd door Klein Breteler en Coeveld (2004)

De locatie waar dit golffront en deze golflap plaatsvinden, zijn minder belangrijk, hoewel een zeer grote fout natuurlijk niet acceptabel is.



Figuur 2.1 Relevante eigenschappen van golfbelasting op een talud

De analyse is uitgevoerd langs een tweetal lijnen:

1. Analyse van het met ZSTEEN berekende stijghoogteverschil over de topklaag en de blokbeweging. De analyse wordt uitgevoerd door de met ZSTEEN berekende blokbeweging en stijghoogteverschillen met gemeten stijghoogtes op het talud als invoer en invoer op basis van door SKYLLA berekende stijghoogtes met elkaar te vergelijken. Voor de vergelijking zijn figuren gemaakt met berekende en gemeten stijghoogtes op verschillende plaatsen als functie van de tijd en plaats.
2. Vergelijking van verschillende parameters die de golfklap kwantificeren, bepaald met de software van Klein Breteler & Coeveld (2004).

De eerste lijn van de analyse is uitgevoerd door berekeningen te maken met het programma ZSTEEN met zowel de berekende als de gemeten stijghoogtes op het talud. Met dit programma kan het stijghoogteverschil over de topklaag en de blokbeweging worden uitgerekend. Ondanks mogelijke afwijkingen in de afzonderlijke aspecten van de belasting, is het eindresultaat in de vorm van een stijghoogteverschil en blokbeweging van groter belang.

## 2.2 Geselecteerde proeven

Voor de vergelijking tussen de rekenresultaten op basis van de metingen en die op basis van de berekende stijghoogtes zijn 3 proeven geselecteerd uit recent Deltagootonderzoek (zie Tabel 2.1). De proeven 21o12 en 23o06 zijn uitgevoerd in 1997/1998 en worden beschreven in Smith *et. al.* (2000). Proef P022 is uitgevoerd in 2003 en wordt beschreven in rapport Eysink en Klein Breteler (2003).

Tabel 2.1 Karakteristieken van de geselecteerde proeven

<i>test</i>	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$T_m$ [s]	$s_{op}$ [-]	$\xi_{op}$ [-]	$L_{ondiep}$ [m]	$h$ [m]	<i>berm</i>
#21o12	1.17	5.40	4.50	0.026	1.78	26.30	5.00	ja
#23o06	0.73	5.08	4.23	0.018	2.12	23.59	4.64	ja
#P022	1.18	7.50	6.25	0.013	2.47	39.47	4.84	nee

De proeven zijn geselecteerd, zodat de afstand tussen de golfhoogtemeters en de waterlijn op het talud ongeveer gelijk is aan tweemaal de ondiepwater golflengte ( $L_{ondiep}$ ). Dit is gedaan omdat het rekendomein van SKYLLA niet te groot mag worden. De berekeningen zijn uitgevoerd met de rand van het rekendomein op de plaats van de golfhoogtemeters.

Voor de proeven 21o12 en 23o06 is de geometrie hetzelfde. Het betreft hier een talud van 1:3.5 met een berm halverwege met een taludhelling van 1:15 (zie Figuur A2.1a in Bijlage A). Bij de derde Proef, P022, is de taludhelling ook 1:3.5 maar hier is de berm afwezig (zie Figuur A2.1b in Bijlage A). Tabel 2.1 bevat de golfcondities van de drie series.

Deze selectie van proeven voldoet aan de volgende criteria:

- veel drukopnemers op het talud;
- brede range aan golfsteilheden;
- variatie in lek lengte van de constructie. Er zijn 2 proeven gekozen waarbij de toplaag bestond uit betonblokken op hun kant (Haringmanblokken bij Proef 21o12 en normale betonblokken bij Proef 23o06). Tijdens Proef P022 bestond de toplaag uit een Basalton bekleding.

Het laatste criterium is van belang omdat bij constructies met een lange lek lengte vooral het stijghoogtefront van belang is, terwijl bij constructies met een korte lek lengte met name de golfklap van belang is.

## 2.3 Geselecteerde tijdstippen

Uit elk van deze proeven zijn drie series van 10 à 20 golven geselecteerd ten behoeve van de analyse. De tijdstippen van deze series zijn geselecteerd op basis van de onderstaande criteria:

1. *Grootste golftophoogte van het inkomende golfsignaal*, gemeten ter plaatse van de golfhoogtemeters; van de totale proef is het tijdstip gekozen, waarbij de maximale oppervlakte-uitwijking optrad. De geselecteerde golftrein is zo gekozen dat enkele golven voor en na dit tijdstip aanwezig waren om inspeleeffecten van het numerieke model buiten het interessegebied te houden.
2. *Maximale golfklap op het talud*; op basis van de gemeten drukken op het talud (golfdrukken gemeten in het filter zijn niet beschouwd) is het tijdstip geselecteerd waarbij de stijghoogte op het talud maximaal was. De SKYLLA berekening werd gestart ter hoogte van de golfhoogtemeters die circa 2 golflengtes voor de constructie stonden. Derhalve is het tijdstip waarop de maximale stijghoogte op het talud optrad terug gerekend naar de locatie van de golfhoogte meters (GHM01). Dit is gedaan op basis van de gemiddelde voortplantingssnelheid van de golven:  $C_{gem} = L_{ondiep}/T_m$ .

$L_{ondiep}$  : ondiepwater golflengte op basis van  $T_m$  (m)  
 $T_m$  : gemiddelde golfperiode (s)

3. *Maximale blokbeweging berekend met ZSTEEN*; op basis van het volledige meetbestand en de werkelijke constructie is een berekening met ZSTEEN gemaakt (type berekening: narekenen). Het tijdstip van optreden van de maximum blokbeweging is volgens de methode als beschreven onder (2) teruggerekend naar de locatie van de golfhoogtemeters.

De drie geselecteerde tijdstippen per proef (in seconde) zijn weergegeven in onderstaande tabel. Tussen haakjes staan de tijden teruggerekend naar de locatie van de golfhoogtemeters. Het tijdstip van de grootste golftophoogte is bepaald voor de golfhoogtemeter en hoeft derhalve niet teruggerekend te worden.

Tabel 2.2 Geselecteerde tijdstippen

<i>criterium</i>	Tijdstip van optreden (s)		
	<i>Grootste oppervlakte uitwijking (t1)</i>	<i>Maximale stijghoogte (t2)</i>	<i>Maximale blokbeweging (t3)</i>
#21o12	2781	3782 (3769)	3972 (3959)
#23o06	49	3922 (3909)	2839 (2825)
#P022	6084	804 (789)	1581 (1566)

Op basis van de tijdstippen die vermeld staan in Tabel 2.2 zijn tijdsintervallen van het inkomende golfsignaal geselecteerd als invoer voor de SKYLLA berekeningen (zie Tabel 2.3).

Tabel 2.3 Tijdsintervallen gebruikt voor SKYLLA berekeningen

<i>criterium</i>	Tijdsseries voor SKYLLA (s)		
	$t_1$	$t_2$	$t_3$
#21o12	2757 – 2812	3747 – 3802	3927 – 2981
#23o06	21 – 76	3883 – 3937	2804 – 2859
#P022	6044 – 6135	759 - 849	1529 - 1620

Voor het bepalen van de golfklapparameters en het uitvoeren van de ZSTEEN berekeningen zijn alleen tijdstippen beschouwd binnen deze intervallen. Op deze manier worden enkel de golven beschouwd die zowel in de metingen als in de SKYLLA-berekeningen voorkomen. De analyse is beschreven in Hoofdstuk 4.



## 3 SKYLLA-berekeningen

### 3.1 Inleiding

Het numerieke model dat is toegepast in het huidige project is het tijddomein model SKYLLA (versie 1.5.4.8) dat speciaal ontworpen is om de golfbeweging op constructies te simuleren. Voor een gedetailleerde beschrijving van het model wordt verwezen naar Van Gent (1995), Petit *et al.* (1994) en Van Gent *et al.* (1994). In Bijlage B komen de hoofdlijnen van het model aan bod.

### 3.2 Numerieke modelopzet

#### 3.2.1 Gridafmetingen en tijdstap

Op basis van de golfhoopte die door twee golfhooptemeters (drie golfhooptemeters voor Proef P022) is gemeten, is een inkomend golfsignaal berekend dat als invoer voor de berekeningen gebruikt is. De locatie van deze golfhooptemeters bepaalden hiermee de positie van de zeewaartse rand van het rekendomein.

De afmetingen van het rekendomein worden daarnaast bepaald door de positie van de constructie ten opzichte van de golfhooptemeter. Voor alle testseries geldt dat de oorsprong is gekozen ter plaatse van de linkerrand van het rekendomein. Aan de linkerrand van het rekendomein geldt dus  $x = 0$  m. Voor Proef 21o12 en Proef 23o06 ligt de teen van de constructie op  $x = 62$  m. Voor Proef P022 ligt deze op  $x = 81$  m. De lengte van het rekendomein is in het laatste geval derhalve ook wat langer dan bij de Proef 21o12 en Proef 23o06. De layout van de constructies is weergegeven in Figuur A2.1 in Bijlage A 'Figuren'.

Bij de numerieke modellering van constructies is het belangrijk dat de relevante fysische processen met voldoende hoge resolutie worden opgelost. Dit betekent dat in de gebieden waar de hydrodynamica relatief complex is, bijvoorbeeld in de gebieden waar de golven breken, de resolutie relatief hoog moet zijn. Aan de bodem en bij de instroomrand kan met een lagere resolutie worden volstaan. Voor het huidige project is gekozen voor een grid met een resolutie van  $\Delta x = \Delta y = 0.08$  m rond de constructie. Voor de proeven 21o12 en 23o06 was de resolutie constant over het hele rekendomein (grid A). De lengte van het rekendomein was bij deze proeven gelijk aan 90 m.

Het rekendomein van de Proef P022 is langer, namelijk 107 m. Voor deze serie is derhalve gekozen voor een iets lagere resolutie in  $x$ -richting, omdat de gridafmetingen anders de geheugencapaciteit van de computer te boven zouden gaan. Dit tweede grid (Grid B), heeft aan de linkerrand celgrootte van  $\Delta x = 0.12$  m en deze neemt tussen  $x = 0$  m en  $x = 61$  m af tot  $\Delta x = 0.08$  m. Tussen  $x = 61$  m en  $x = 107$  m (de rechtterrand) is de resolutie gelijk aan die van het andere grid, te weten  $\Delta x = 0.08$  m. De resolutie in  $y$ -richting is constant over het hele domein:  $\Delta y = 0.08$  m.

In Tabel 3.1 is het bovenstaande samengevat.

Tabel 3.1 Afmetingen rekendomein en resolutie

<i>Proef</i>	<i>lengte rekendomein</i>		<i>aantal cellen</i>		<i>resolutie</i>	
	<i>x-richting</i>	<i>y-richting</i>	<i>x-richting</i>	<i>y-richting</i>	$\Delta x$	$\Delta y$
	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]
#21o12	90	7.6	1127	97	0.08	0.08
#23o06	90	7.6	1127	97	0.08	0.08
#P022	107	7.6	1182	97	$0.08 \leq \Delta x \leq 0.12$	0.08

Als uitgangspunt voor de tijdstap is voor deze berekeningen gekozen voor  $\Delta t = 0.025$  s voor Proef 21o12 en Proef 23o06 en  $\Delta t = 0.010$  s voor Proef P022. Tijdens het rekenproces wordt de tijdstap een aantal malen verkleind met een factor 2 als dat voor de stabiliteit van het rekenproces noodzakelijk is. Het programma beoordeelt dit zelf en werkt doorgaans met een verkleinde tijdstap op het moment dat de golf breekt op het talud. De gemiddelde tijdstapgrootte varieerde daardoor tussen  $\Delta t = 0.006$  s en  $\Delta t = 0.013$  s. Deze verkleinde tijdstap heeft geen invloed op de uitvoer-file. De resultaten worden weggeschreven volgens een van tevoren gekozen frequentie, die in dit geval gelijk gekozen is aan de bemonsteringsfrequentie van de proeven in de Deltagoot.

### 3.2.2 Interpolatie naar uitvoerlocaties

De locaties waar de druk door SKYLLA berekend moet worden (locatie van een drukopnemer, zie ook Sectie 3.3) zullen doorgaans niet precies op een roosterpunt liggen. Er moet derhalve geïnterpoleerd worden tussen de vier omliggende punten.

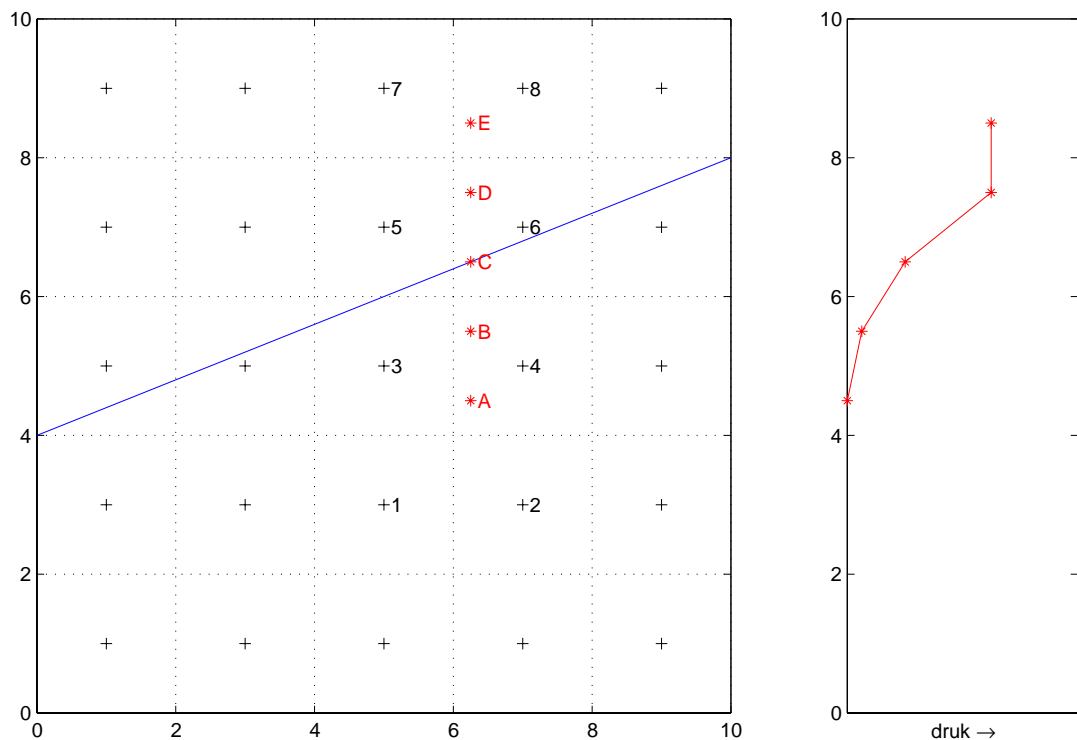
In plaats van uitvoer op één los punt te generen, is hier gebruik gemaakt van de mogelijkheid binnen SKYLLA om uitvoer op discrete punten langs een raai te genereren. Op elke  $x$ -positie van een drukopnemer is een verticale raai gedefinieerd die het talud doorsnijdt op de plek van de drukopnemer.

In Figuur 3.1 is een en ander in versimpelde vorm weergegeven. De ‘plus-tekens’ geven de locaties aan van de drukpunten waar SKYLLA de druk berekent. De ‘sterretjes’ geven de locaties aan waar uitvoer is gevraagd (locatie van een drukopnemer). We beperken ons hier even tot de genummerde locaties: 1- 8 voor de drukpunten en A – E voor de uitvoerpunten. De getrokken lijn geeft het talud aan. Omdat de drukpunten onder deze lijn (de punten 1 – 4) niet in het water liggen, maar in de bodem, hebben deze punten een druk gelijk aan nul. De punten boven de lijn (5 – 8) hebben een reële waarde (dat wil zeggen, een waarde groter dan nul) voor de druk. Voor alle punten langs de raai wordt vervolgens bekeken wat de waarde van de druk is.

Voor het punt A zal deze waarde gelijk zijn aan nul omdat in dit geval geïnterpoleerd wordt tussen vier drukpunten met een druk gelijk aan nul (1 – 4). Voor de punten B en C zal de waarde weliswaar groter dan nul zijn, maar nog steeds aanzienlijk lager dan de werkelijke druk omdat de interpolatie hier wordt uitgevoerd op basis van twee punten met een druk ongelijk aan nul (5 en 6) maar ook twee punten met een druk gelijk aan nul (3 en 4). De druk in de punten D en E wordt wel bepaald op basis van vier drukpunten met een waarde

ongelijk aan nul (5 – 8). Dat betekent dat de waarde voor de druk in deze uitvoerpunten bruikbaar is als invoer voor ZSTEEN.

Het hier beschrevene is ook zichtbaar wanneer we een grafiek maken van het verloop van de niet-hydrostatische druk in de punten langs de raai, dat wil zeggen de druk minus de lineair verlopende hydrostatische component van de druk (rechter paneel in Figuur 3.1). Waar de overgang is van een onbruikbaar naar een bruikbaar punt, dat is hier tussen de punten C en D, vertoont de grafiek een knik. De druk die uiteindelijk gekozen is als uitvoer is de druk in het laagste uitvoerpunt dat volledig omsloten is door drukpunten die boven het talud liggen. In het huidige voorbeeld zou dat locatie D zijn. Het verschil in niet-hydrostatische druk tussen de locaties D en E, en de druk op het talud in het prototype, is overigens verwaarloosbaar klein.



Figuur 3.1 Principe van 'raai-methode' voor de bepaling van de druk in uitvoerpunten

Wanneer niet gebruik zou zijn gemaakt van deze 'raai-methode' en de druk op de exacte positie op het talud zou zijn bepaald (locatie C in Figuur 3.1) zou dit geresulteerd hebben in een te lage druk.

Het zij opgemerkt dat SKYLLA intern rekent met een glad talud zonder discrete overgangen tussen volledig gevulde en volledig lege roostercellen. Het talud kan de roostercellen gedeeltelijk doorsnijden (zoals bijvoorbeeld de cellen rondom de drukpunten 3 – 6) en dat resulteert in gedeeltelijk gevulde cellen. Hoewel er voor de uitvoerlocaties dus sprake is van een zekere getraptheid, namelijk tussen de uitvoerpunten C en D, wordt er intern gerekend met een glad talud.

### 3.2.3 Instellingen

In eerste instantie zijn de berekeningen gedaan met de volgende instellingen (Serie b4):

- wrijvingscoëfficiënt  $f = 10$ .
- turbulente viscositeit  $\nu_t = 0.03 \text{ m}^2/\text{s}$
- upwind-fractie  $\alpha = 0.4$

De upwind fractie heeft een dissipatieve werking. Dit betekent dat eventuele verstoringen enigszins onderdrukt worden. Dit is nodig omdat bij de huidige randafhandeling voor onregelmatige golven, er verstoringen kunnen optreden die onderdrukt moeten worden. Een van de manieren om dit te bereiken is een hogere waarde voor deze upwind fractie. Een vergelijking tussen berekeningen met de upwind fractie  $\alpha = 0.2$  en berekeningen met  $\alpha = 0.4$  toonde aan dat het berekende signaal bij  $\alpha = 0.4$  inderdaad een wat gladder verloop kreeg.

Het bleek dat de amplitude van het berekende druksignaal systematisch iets lager was dan het gemeten druksignaal. Omdat een lagere waarde voor de upwind fractie tot verstoringen aan de rand zou leiden, resteerden er twee opties om hogere golven (en dus ook druksignalen) te verkrijgen. De eerste methode was middels de turbulente viscositeit. Hiervoor geldt hetzelfde als voor de upwind fractie. Naarmate deze hoger wordt, zullen verstoringen meer onderdrukt worden. Maar dit zou dus ook resulteren in lagere golfhoogtes en navenant lagere drukken op het talud. Omdat enige vorm van turbulente dissipatie nu eenmaal nodig is om de golven goed het rekendomein in te sturen is ervoor gekozen de viscositeit niet te wijzigen.

Omdat de golfhoogte systematisch iets lager was, is gekozen voor een tweede optie waarin de golven iets minder gedissipeerd werden. Dit is gedaan door het verlagen van de bodemwrijving. In eerste instantie was gekozen voor een waarde die behoort bij een relatief ruw talud. Het verlagen van de wrijvingscoëfficiënt  $f$  (corresponderend met een gladder talud en dus meer conform werkelijkheid) resulteerde in iets hogere golven en grotere gradiënten. De verschillen tussen beide instellingen zijn behoorlijk.

De definitieve set instellingen is (Serie a4):

- wrijvingscoëfficiënt  $f = 1$ .
- turbulente viscositeit  $\nu_t = 0.03 \text{ m}^2/\text{s}$
- upwind-fractie  $\alpha = 0.4$

Ondanks dat er behoorlijke verschillen optreden is gekozen om de instellingen van SKYLLA berekeningen Serie a4 (lage bodemwrijving) te gebruiken, omdat de bodemwrijving meer overeenkomt met de omstandigheden met een glad talud. Tevens zijn als gevolg van de lagere bodemwrijving de gradiënten meer gepiekt wat ook in de metingen naar voren komt. In Hoofdstuk 4 wordt voor 2 proeven een vergelijking op basis van de golfklapparameters voor beide instellingen van ZSTEEN.

### 3.3 Resultaten

Bij alle drie de proeven zijn drukmetingen gedaan op een 34-tal locaties. De posities van de drukopnemers zijn in SKYLLA aangewezen als uitvoerlocaties. In Tabel 3.2 staat een overzicht van de drukopnemers en de bijbehorende locaties. De positie van alle drukopnemers is ook aangegeven in Figuur A2.1 in Bijlage A 'Figuren'. De drukopnemers die onder de bekleding zaten gemonteerd zijn in deze analyse niet beschouwd en zijn in Tabel 3.2 weergegeven met een 'x'.

Tabel 3.2 Locatie drukopnemers (x = drukopnemer onder de bekleding; vet en grijs = kapotte drukopnemer)

<i>drukopnemer</i>	<i>positie drukopnemer [in meter vanaf de golfhoogtemeter]</i>		
	<i>Proef #21o12</i>	<i>Proef #23o06</i>	<i>Proef #P022</i>
<i>DRO01</i>	74.18	74.20	91.41
<i>DRO02</i>	74.58	74.56	91.89
<i>DRO03</i>	75.00	74.95	92.39
<i>DRO04</i>	75.38	75.34	92.71
<i>DRO05</i>	75.70	75.63	92.81
<i>DRO06</i>	x	x	92.97
<i>DRO07</i>	75.99	75.93	93.11
<i>DRO08</i>	x	x	93.24
<i>DRO09</i>	76.08	76.02	93.38
<i>DRO10</i>	<b>76.19</b>	76.12	93.52
<i>DRO11</i>	x	x	93.64
<i>DRO12</i>	76.27	76.21	93.76
<i>DRO13</i>	76.35	76.31	93.90
<i>DRO14</i>	x	x	94.05
<i>DRO15</i>	76.46	76.41	94.18
<i>DRO16</i>	76.56	76.50	94.30
<i>DRO17</i>	x	x	94.45
<i>DRO18</i>	76.65	76.61	94.59
<i>DRO19</i>	x	x	<b>94.72</b>
<i>DRO20</i>	76.76	76.71	94.87
<i>DRO21</i>	x	x	95.00
<i>DRO22</i>	76.87	76.80	95.14
<i>DRO23</i>	x	x	95.44
<i>DRO24</i>	76.95	76.90	<b>95.75</b>
<i>DRO25</i>	x	x	96.22
<i>DRO26</i>	77.07	77.00	96.72
<i>DRO27</i>	x	x	x
<i>DRO28</i>	77.16	77.09	x
<i>DRO29</i>	77.26	77.18	x
<i>DRO30</i>	x	x	x
<i>DRO31</i>	77.47	77.38	x
<i>DRO32</i>	77.66	77.58	x
<i>DRO33</i>	77.84	77.77	x
<i>DRO34</i>	78.18	78.06	x

Tijdens Proef 21o12 heeft DRO10 niet goed gewerkt (in de tabel vetgedrukt en grijs). Derhalve zijn hier geen metingen beschikbaar. Tijdens Proef P022 hebben DRO19 en DRO24 niet goed gewerkt (zie vetgedrukt en grijs gemaakte waarden in Tabel 3.2). In de SKYLLA-berekeningen is het stijghoogteverloop op deze locaties wel bepaald en zijn die

meegenomen in de analyse. Dit zou voor Proef P022 het resultaat van de vergelijking tussen de metingen en de berekeningen iets beïnvloed kunnen hebben. Voor Proef 21o12 is de beïnvloeding waarschijnlijk klein, omdat de niet-werkende drukopnemer niet op de plaats zit waar de golven breken. Bij Proef 23o06 hebben zich geen problemen voorgedaan met de drukopnemers.

Omdat het nog niet mogelijk is om met SKYLLA lange berekeningen te maken is drie keer een tijdsinterval van ongeveer 10 golven geselecteerd. De reden dat er beperkingen zijn aan de duur van de SKYLLA-berekening is tweeledig:

1. Het model is dermate rekenintensief dat het op dit moment praktisch gezien onmogelijk is om al te lange signalen door te rekenen. Met de toenemende reken capaciteit van computers zal dit bezwaar in de toekomst minder zwaar wegen. Tabel 3.3 bevat, ter illustratie, een overzicht van de reketijden van de geselecteerde proeven voor een interval van 10 golven, gebruik makend van Pentium 4 computer met 2.8 GHz processor met een intern geheugen van 512 MB.

Tabel 3.3 Geschatte reketijd van geselecteerde proeven voor een tijdsinterval van 10 golven

<i>test</i>	<i>tijdsinterval</i> [s]	<i>benodigde reketijd</i> [uren]	<i>aantal roosterpunten</i>	<i>aantal rekenstappen</i>
#21o12	54.	4 – 6	109319	6000 – 9000
#23o06	51.	3 – 4	109319	4000 – 5000
#P022	75.	5 – 7	114654	7000 – 10000

2. De huidige versie van SKYLLA introduceert in sommige gevallen steeds meer luchtbellen in het water die niet meer verdwijnen. Dit treedt met name op bij sterk brekende golven, zoals het geval is bij deze proeven. De opwaartse kracht veroorzaakt door dichtheidsverschillen die luchtbellen naar het oppervlak zou moeten drijven is in SKYLLA niet gemodelleerd. Het ontbreken van dit mechanisme is de reden dat bellen met de stroming worden meegevoerd en zich in het water kunnen ophopen. Hierdoor kan de waterstand significant toenemen en worden de resultaten navenant minder nauwkeurig. De soortelijke massa van het water wordt in SKYLLA niet beïnvloed door de bellen, waardoor de hogere waterstand ook leidt tot een hogere druk op het talud.

In Figures A3.2 tot en met Figuur A3.10 in Bijlage A is voor de geselecteerde drukopnemers het verloop van de druk in de tijd gegeven. De rode lijn komt overeen met de gemeten drukken en de blauwe lijn met de door SKYLLA berekende drukken.

Omdat de aanpassing van het model voor onregelmatige golven van recente datum is en deze optie nog niet uitgebreid is getest, hebben we ons in het onderzoek eerst gericht op de randvoorwaarde. Bij het opleggen van een golf aan de rand moet er een splitsing worden gemaakt tussen de inkomende en de uitgaande golf. Naarmate er een grotere range aan golfperiodes wordt doorgerekend, wordt het moeilijker om het signaal goed te splitsen. De testserie waar de golfperiode het meest varieert over het tijdsinterval is Proef 21o12. Figuur A3.1 in de bijlage laat het verloop van het opgelegde signaal, namelijk het signaal dat is afgeleid van de twee signalen van de golfhoogtemeters, en het berekende signaal aan de rand zien. Het blijkt dat de signalen goed overeen komen, hetgeen erop duidt dat de randvoorwaarde goed wordt opgelegd.

Er volgt nu per proef een kwalitatieve bespreking van de resultaten. De kwantitatieve analyse komt aan bod in het volgende hoofdstuk. In de figuren is geen faseverschuiving toegepast, omdat wanneer de faseverschuiving niet al te groot is (kleiner dan 1 s) dit in het kader van dit onderzoek niet relevant is. Derhalve wordt in deze analyse in geval van verschillen gesproken over drukverschillen en niet in tijdverschuivingen tussen berekende en gemeten drukken. Voor de vergelijking met de metingen zijn de rekenresultaten van SKYLLA gebruikt met de lage bodemwrijving (Serie a4).

### **Proef #21o12**

Zoals in Tabel 2.1 is af te lezen zijn de golven in deze proef relatief steil en is de brekerparameter  $\xi_{op} = 1.78$ . De steilheid van de golven, gebaseerd op de piekperiode  $T_p$ , is ongeveer  $s_{op} = 0.026$ . De waarde van de brekerparameter geeft aan dat verwacht mag worden dat golven op het talud sterk zullen breken. In de Figuur A3.2 tot en met Figuur A3.4 is de grafische vergelijking van de gemeten en de berekende druksignalen te zien. Figuur A3.2a-d correspondeert met het eerste geselecteerde tijdstip (gebaseerd op de maximale golfklap).

Zoals in Figuur A3.2a-d (Tijdsinterval 21o12-t1) te zien is, blijkt het berekende signaal systematisch wat hoger te liggen dan de gemeten drukken. Hier spelen twee effecten een rol. Ten eerste is tijdens de eerste golven die breken op het talud er nog geen grote golf vooraf gegaan die een grote golfneerloop geeft tijdens het brekerproces. Hierdoor is de wijze van breken van deze eerste golven niet helemaal overeenkomstig de experimenten (inspeleffecten) en dat komt onder andere tot uiting in een wat hoger niveau van de stijghoogte in de brekerzone. Dit effect verdwijnt na een paar golven.

Ten tweede ontstaan er luchtbellens in het water, die niet meer verdwijnen. Dat dit juist bij deze serie optreedt, is niet verwonderlijk, aangezien bij deze serie – met de steilste golven – op het tijdstip met de zwaarste golfklappen de golven ook het sterkst zullen breken. Dit is tijdens de eerste golven nog niet zo merkbaar, maar na een aantal golven gaat dit de stijghoogte belangrijk beïnvloeden. Wanneer we kijken naar het tweede tijdstip (Figuren A3.3a-d) en het derde tijdstip (Figuren A3.4a-d) zien we een vergelijkbaar patroon. De verticale shift is in dit geval afwezig, hetgeen erop duidt dat het probleem van de ingesloten luchtbellens zich hier minder voordoet. Dat is ook wat valt te verwachten omdat deze series iets minder hoge golven bevatten dan de serie die behoort bij tijdsinterval t1.

In combinatie met het voorgaande kunnen problemen zijn ontstaan doordat SKYLLA op de rand alleen eerste orde golven opwekt. Net als in een golfgoot, ontstaan er stoorgolven als alleen eerste orde golven worden opgewekt, die het brekerproces beïnvloeden. Daarom zijn onze golf faciliteiten inmiddels voorzien van tweede orde golfschotsturing en zou het wenselijk zijn dat dit ook in SKYLLA geïmplementeerd wordt.

Los van deze verticale verschuiving is de overeenkomst tussen metingen en berekeningen redelijk te noemen. Zowel de orde van grootte van de golfklappen als de vorm van het tijdsignaal worden door het numerieke model redelijk gereproduceerd.

### **Proef #23o06**

De golven voor deze proef zijn iets langer in vergelijking met de vorige proef. De golfhoogte is aanzienlijk lager waardoor de golfsteilheid bij deze proevenserie uitkomt op

ongeveer  $s_{op} = 0.018$  en een  $\xi_{op} = 2.12$ . Een vergelijking van de gemeten en berekende signalen (Figuren A3.5 – A3.7) levert voor alle drie de tijdstippen een zeer goede overeenkomst op. Op enkele losse pieken volgen de metingen grotendeels het gemeten signaal. De toename van de verschillen tussen het berekende en gemeten signaal is hier niet echt aanwezig en dus lijken reflecties hier een verwaarloosbaar effect te hebben.

## Proef #P022

Proef P022 onderscheidt zich in twee opzichten van de twee voorgaande testen. De gemiddelde golflengte is aanzienlijk langer – deze is ongeveer 45 m terwijl de golflengte in de twee andere testen rond de 30 meter is – en daarnaast is de berm bij deze meetopstelling afwezig. De golfsteilheid van deze proevenserie is relatief laag,  $s_{op} \approx 0.013$  en de  $\xi_{op}$ -waarde is groter ( $\xi_{op} = 2.47$ ), hetgeen erop duidt dat minder golfbreking op het talud zal plaatsvinden. Omdat bij deze proef de berm afwezig was, kunnen de golven tijdens het breken op het talud mogelijk sterker beïnvloed worden door de golfneerloop.

De vergelijking van de druksignalen is weergegeven in de figuren A3.8 – 10. Voor de drie tijdsintervallen geldt dat de berekende druksignalen het gemeten signaal goed volgen. Bij alledrie de tijdsintervallen zien we weer een lichte verticale shift maar deze is lang niet zo sterk aanwezig als bij het eerste tijdstip van Proef 21o12. Over het geheel genomen is de overeenkomst goed te noemen.

Aangezien bij deze proevenserie meer golfneerloop optreedt, valt te verwachten dat het veranderen van de wrijvingscoëfficiënt hier relatief grote veranderingen teweeg brengt. Toch is dit niet wat we zien gebeuren. Dit duidt erop dat ook bij deze proevenserie het verloop van de druksignalen, ondanks de geringe golfsteilheid, gedomineerd wordt door breking.

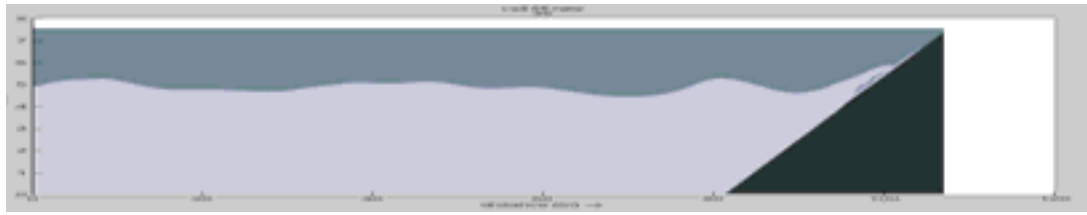
## 3.4 Conclusies

Op basis van de SKYLLA-berekeningen en de kwalitatieve vergelijkingen kunnen de volgende voorlopige conclusies getrokken worden:

- de randvoorwaarde voor onregelmatige golven lijkt goed te werken. De vorm en grootte van het berekende tijdsignaal op de rand komen goed overeen met die van de opgelegde golf. De kleine afwijkingen zijn waarschijnlijk het gevolg van het optreden van stoorgolven als gevolg van het feit dat aan de rand alleen eerste orde golven worden opgewekt. Deze stoorgolven beïnvloeden het brekerproces.
- de golfbeweging wordt sterk gedomineerd door het fenomeen breken. Als gevolg van dit breken en de onvolledige modellering van de fysica in SKYLLA kunnen er luchtbellens in het water ontstaan en deze blijven er gedurende de rest van de berekening inzitten. Belangrijker dan het effect van deze luchtbellens op de hoogte van de golftoppen, is dat door het insluiten van de luchtbellens het volume toeneemt, terwijl in SKYLLA de soortelijke massa van het water/luchtmengsel gelijk blijft aan dat van water. Hierdoor stijgt niet alleen de waterstand maar ook de (niet-hydrostatische) druk op het talud.

Ter illustratie is een snapsnot weergegeven van een SKYLLA-berekening, waarbij de watertong breekt op het talud.





Figuur 3.2 Snapsnot van een SKYLLA berekening

## 4 Analyse

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal de kwantitatieve analyse van de resultaten van de berekeningen besproken worden. Zoals in Hoofdstuk 2 is vermeld, zal deze analyse langs een tweetal lijnen plaatsvinden. Voor het berekenen van het stijghoogteverschil met ZSTEEN (Versie 1.9) is de vorm van de golf(klap) van groot belang. Deze vorm bepaalt in belangrijke mate de duur en de grootte van de belasting en hoe een steenzetting hierop reageert. Daarom zijn ten eerste middels de door Klein Breteler & Coeveld (2004) ontwikkelde software de golfklappen gekwantificeerd. Deze software zet een geregistreerd signaal om in een aantal karakteristieke parameters, zoals de totale impuls van een golfklap, de gradiënt van de stijghoogte en de maximale kracht van een golfklap op het talud.

Daarnaast zijn de door SKYLLA berekende stijghoogtes en de stijghoogtes verkregen uit metingen gebruikt als invoer voor het programma ZSTEEN. ZSTEEN is een gereedschap voor het dimensioneren en toetsen van dijkbekledingen die bestaan uit een gezette steenbekleding op een filterlaag. Gegeven een bepaalde geometrie van een constructie (talud, bekleding) bepaalt ZSTEEN het stijghoogteverschil over de toplaag en bepaalt aan de hand van de berekende blokbeweging of de betreffende constructie bestand is tegen de golfaanval. Voor de analyse is gebruik gemaakt van de SKYLLA-berekeningen met de lage wrijvingsfactor (instellingen van Serie a4).

Om een idee te krijgen van de invloed van een wijziging in de SKYLLA instellingen op de berekende golfklapparameters is in Paragraaf 4.2.1 voor 2 proeven een vergelijking gemaakt voor 2 instellingen van de bodemwrijving (Serie a4 en Serie b4). Voor beide instellingen zijn de golffront- en golfklapparameters met elkaar vergeleken.

### 4.2 Vergelijking golfklapparameters

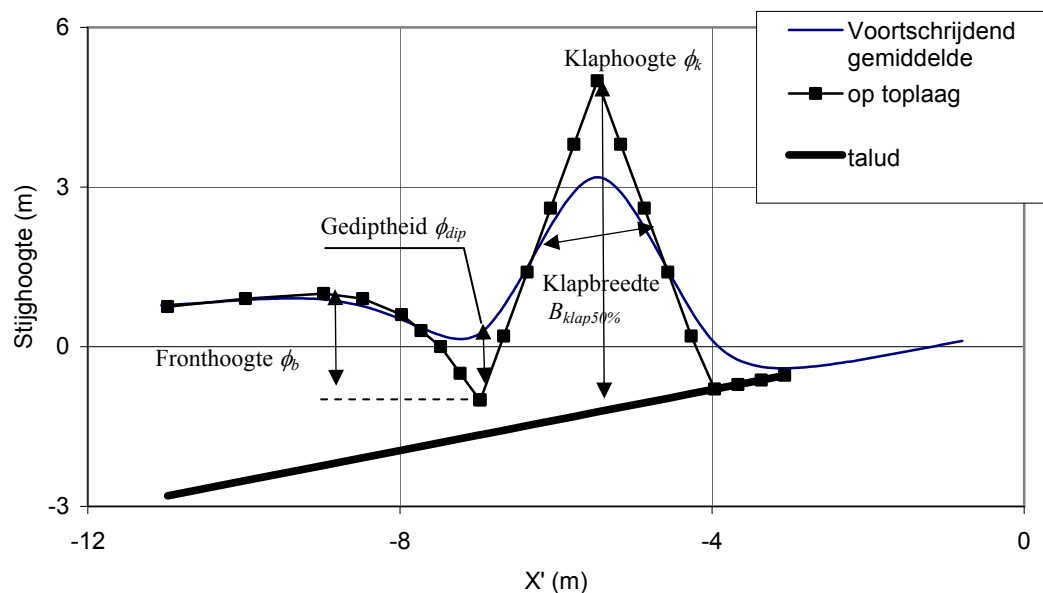
Met het toepassen van de analysesoftware worden vele karakteristieke parameters van een golfklap bepaald. In dit rapport zal de aandacht gericht zijn op de volgende parameters die van invloed zijn op het stijghoogteverschil over de toplaag:

- **Gediptheid** ( $\phi_{dip}$ ); gedefinieerd als de grootte van de lokale dip in het stijghoogteverloop op het talud. De gediptheid wordt beschouwd als een maat voor het stijghoogteverschil over de toplaag;
- **Golfklaphoogte** ( $\phi_k$ ); maximale stijghoogte op het talud tijdens de golfklap ten opzichte van de minimale stijghoogte in de trog tussen de golfklap en het golffront;
- **Golfklapbreedte** ( $B_{klap50\%}$ ); breedte van de golfklap ter plaatse van de helft van de maximale stijghoogte in de golfklap;
- **Duur van de golfklap** ( $t_{klap50\%}$ ); duur van de golfklap ter plaatse van de helft van de maximale stijghoogte in de golfklap;
- **Fronthoogte** ( $\phi_b$ ); hoogte van golffront ten opzichte van de minimale stijghoogte aan de voet van het front;

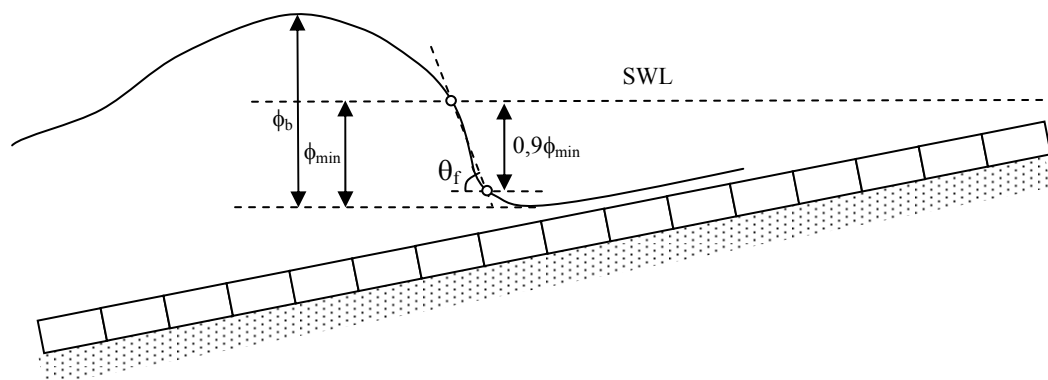
- **Helling van het golffront** ( $\theta_f$ ); gedefinieerd als de helling van de lijn tussen de voet van het front en het snijpunt van het front met SWL;
- **Geïntegreerde gediptheid** ( $\phi_{dip}$ ); gedefinieerd als het oppervlak onder het verloop van de gediptheid als functie van de tijd boven een vastgestelde drempelwaarde ( $0.4H_s$ ). De geïntegreerde gediptheid wordt beschouwd als een maat voor de blokbeweging.
- **Dipimpuls** ( $I_{dip}$ ); gedefinieerd als de geïntegreerde dipkracht, die gelijk is aan het oppervlak onder het verloop van de dipkracht als functie van de tijd boven een vastgestelde drempelwaarde ( $0.4H_s$ ). De dipimpuls wordt beschouwd als een maat voor de toplaagbeweging.

De geïntegreerde gediptheid en de dipimpuls zijn in theorie een goede maat voor de karakterisatie van de golfklap, echter, de waarde van deze parameters was in bijna alle gevallen 0 (zowel in de metingen als in de SKYLLA-berekeningen), zodat dit geen bruikbare informatie opleverde. In Paragraaf 4.3 worden beide parameters wel opgenomen om voor 2 proeven de invloed van 2 verschillende SKYLLA instellingen te vergelijken.

Ter illustratie zijn in Figuur 4.1a de bovenstaande golfklap- en in Figuur 4.1b de golffrontparameters grafisch weergegeven.



Figuur 4.1a Grafische weergave golfklapparameters



Figuur 4.1b Grafische weergave golffrontparameters

Voor de geselecteerde tijdsintervallen zijn voor zowel de metingen als de SKYLLA berekeningen de parameters bepaald, voor zover er golfklappen gedetecteerd werden. De analyse is geconcentreerd op de golf waarin volgens ZSTEEN de grootste blokbeweging optrad. Wanneer de grootste blokbeweging, bepaald met het meetsignaal en met het SKYLLA signaal, niet in dezelfde golf lag, is de vergelijking van de golfparameters gebaseerd op de golf waar met de metingen de grootste blokbeweging optrad. De begin en eindtijden van de golf zijn bepaald met de analyse software. Deze aanpak is gevolgd omdat op deze manier steeds dezelfde golven met elkaar werden vergeleken. Het bleek echter dat slechts in 2 gevallen de grootste blokbeweging optrad in dezelfde golf. De golfklapparameters zijn weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Golfklap- en golffrontparameters voor de geselecteerde tijdstippen

	<i>Golfklap</i>									
	<i>Tijdstip golf</i>		$\phi_{dip}$		$\phi_k$		$B_{klap50\%}$		$t_{Bklap50\%}$	
	Begin	Einde	Meting	SKYLLA	Meting	SKYLLA	Meting	SKYLLA	Meting	SKYLLA
<i>21o12</i>										
<i>t1</i>	2792	2798	1.00	0.37	2.75	1.21	0.87	-	0.17	-
<i>t2</i>	3790	3794	0.45	0.19	1.17	0.43	0.37	-	0.64	-
<i>t3</i>	3954	3957	0.47	0.42	1.16	1.04	0.54	0.78	0.46	1.01
<i>23o06</i>										
<i>t1</i>	66	71	0.64	0.58	1.65	2.18	0.57	0.34	0.26	0.86
<i>t2</i>	3927	3932	0.66	0.23	1.43	1.36	0.70	0.82	0.14	0.02
<i>t3</i>	2847	2850	0.31	0.19	0.99	0.27	0.29	-	0.35	-
<i>P022</i>										
<i>t1</i>	6106	6118	0.28	0.60	0.95	2.79	-	0.95	-	0.19
<i>t2</i>	814	820	0.39	0.62	1.24	1.38	-	-	-	-
<i>t3</i>	1579	1586	0.82	0.86	2.58	2.81	0.50	0.67	0.16	0.70

	<i>Golffront</i>			
	$\phi_b$		$\theta_f$	
	Meting	SKYLLA	Meting	SKYLLA
<i>21o12</i>				
<i>t1</i>	1.61	1.20	74.6	23.8
<i>t2</i>	0.83	0.59	31.9	35.6
<i>t3</i>	0.84	0.80	31.9	53.0
<i>23o06</i>				
<i>t1</i>	0.92	0.98	74.6	57.0
<i>t2</i>	0.73	0.81	31.7	28.0
<i>t3</i>	0.56	0.65	44.5	68.7
<i>P022</i>				
<i>t1</i>	0.82	1.43	71.7	49.9
<i>t2</i>	1.67	1.39	77.4	79.3
<i>t3</i>	1.63	1.71	78.5	70.2

Tijdens Proef 21o12 en Tijdsinterval P022-t2 zijn geen golfklapbreedte en golfklapduur vastgesteld, omdat de minimum stijghoogte aan één van de kanten van de golfklap hoger lag dan  $\phi_k/2$  (vastgesteld criterium Klein Breteler & Coeveld 2004).

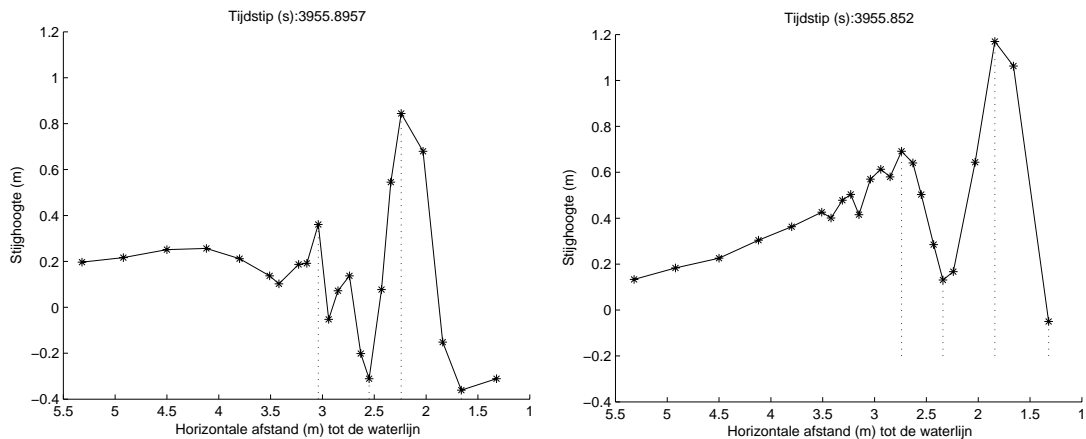
In bijna de helft van de golven is de berekende gediptheid ongeveer gelijk aan de gemeten waarde. Ook voor de golfklaphoogte geldt dat bijna de helft van de berekende golfklappen goed overeenkomt met de metingen.

Ten aanzien van de breedte van de golfklap is er soms een overschatting, en soms een onderschatting. Over het algemeen kan gesteld worden dat de golfklapbreedte wordt overschat door de berekeningen (gemiddeld over alle waarden met circa 19%).

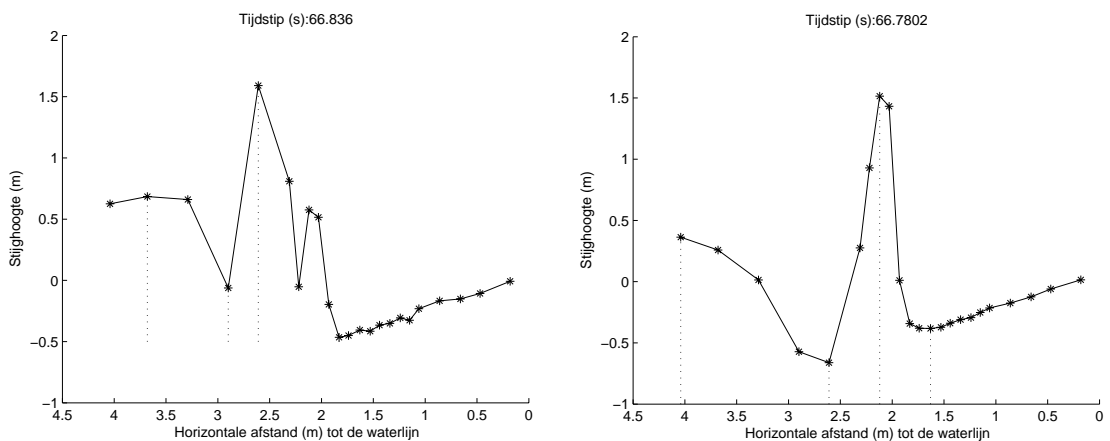
De golfklapduur varieert in de berekeningen sterk, van 0.02 s (Proef 23o06-t2) tot en met 1 s (Proef 21o12-t3). In de metingen was deze variatie minder sterk aanwezig (0.14s tot 0.64s).

De berekende hoogte van het golffront en de berekende helling van dit front zijn in de helft van de beschouwde gevallen ongeveer gelijk aan de metingen.

In Figuur 4.2 en Figuur 4.3 is links het verloop van de stijghoogte als functie van de plaats op het talud getekend voor de metingen. In de rechter figuur is de stijghoogte weergegeven die uit de SKYLLA-berekeningen komt op hetzelfde tijdstip (tijdstip waarop de maximale blokbeweging optrad voor de metingen). Beide figuren laten zien dat de vorm van de golfklap weliswaar niet helemaal overeenkomt, maar dat de locatie en de grootte ervan wel goed bepaald worden door SKYLLA.

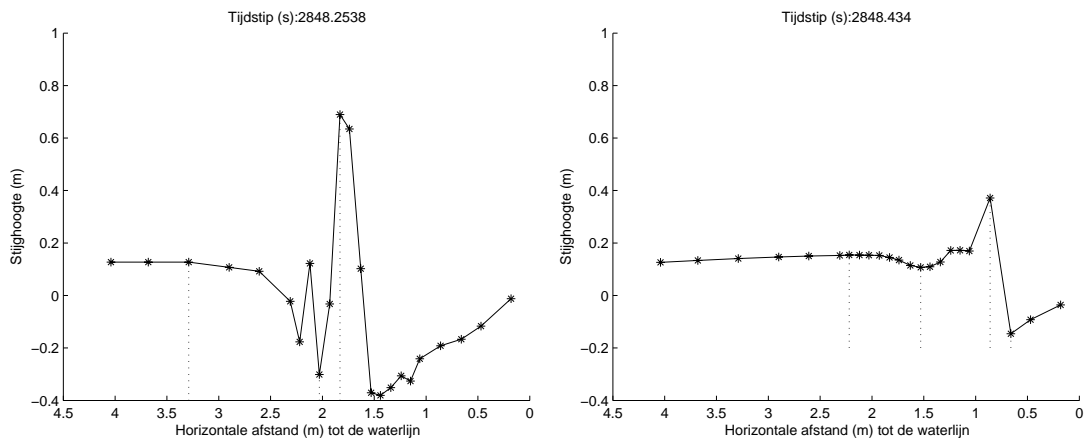


Figuur 4.2 Links golfklap uit de metingen en rechts volgens SKYLLA-berekeningen voor Proef 21o12-t3



Figuur 4.3 Links golfklap uit de metingen en rechts volgens SKYLLA berekeningen voor Proef 23o06-t1

In Figuur 4.4 is het stijghoogteverloop als functie van de locatie op het talud gegeven tijdens een golfklap uit tijdsinterval 23o06-t3. Hieruit blijkt dat de grootte van de stijghoogte in de metingen bijna twee keer zo groot is als het stijghoogteverloop van de SKYLLA-berekening. Deze figuur verklaart ook het grote verschil in klaphoogte ( $\phi_k$ ) voor dit tijdsinterval in Tabel 4.1.



Figuur 4.4 Links golfklap uit de metingen en rechts volgens SKYLLA berekeningen voor Proef 23o06-t3

Hoewel in deze paragraaf gekeken is naar specifieke momenten en relatief kleine details is dit eigenlijk niet helemaal terecht. Het proces van golfbreking en de golfklap is namelijk onderhevig aan toeval. Door dit toeval is er een grote spreiding in golfklapgrootte, zelfs als die van regelmatige golven wordt beschouwd (Coeveld, 2003). Een goede vergelijking tussen metingen en berekeningen is pas mogelijk als lange meetreeksen vergeleken worden met honderden golven, die vervolgens statistisch geanalyseerd moeten worden. Helaas is dit met de huidige SKYLLA versie nog niet mogelijk. Deze analyse is dan ook uitgevoerd om een beeld te krijgen van hoe goed het huidige SKYLLA de golfklappen voorspeld en, nog belangrijker, wat de berekende stijghoogteverschillen en blokbewegingen zijn wanneer SKYLLA resultaten (stijghoogtes) worden gebruikt als invoer voor ZSTEEN.

### 4.3 Variatie wrijvingscoëfficiënt in SKYLLA

In deze paragraaf wordt bekeken wat een verandering van 1 instelling in SKYLLA voor invloed heeft op de golfklap- en golffront parameters. Voor de hiervoor gepresenteerde analyse is gebruik gemaakt van de bodemwrijvingscoëfficiënt  $f = 1$  (Serie a4). Daarnaast zijn SKYLLA-berekeningen gemaakt met een bodemwrijvingscoëfficiënt van  $f = 10$  (Serie b4). De invloed hiervan op de tijdserie is vooral hoger op het talud merkbaar, omdat deze coëfficiënt ook doorwerkt in de golfoploop en neerloop (zie ook Figuur A4.1 en A4.2 in Bijlage A). In Tabel 4.2 zijn de bepaalde golfklap- en golffrontparameters op basis van de tijdseries van beide SKYLLA-instellingen naast elkaar gezet.

Uit de Tabel 4.2 blijkt dat de golffrontparameters weinig verschil laten zien. De golfklapparameters vertonen grotere verschillen. Dit kan verklaard worden uit het feit dat de grootste golfklappen net onder de waterlijn optreden en dit ook juist de plaats is waar de bodemwrijving de grootste invloed heeft. Zeker bij de proeven waarbij de steilheid kleiner was (Proef 23o06 en Proef P022) en waarbij een grotere golfoploop en neerloop verwacht mag worden, lijken de golfklapparameters beduidend lager te zijn bij een hogere bodemwrijving. Het golffront ligt met een kleinere bodemwrijving over het algemeen wat meer zeewaarts en de invloed van de wrijvingscoëfficiënt is hier minder van belang door de grotere waterdiepte.

Tabel 4.2 Vergelijking van golfklap- en golffrontparameters waarbij de wrijvingsfactor in SKYLLA is aangepast

	<i>Golfklap</i>									
	<i>Tijdstip golf</i> [s]		$\phi_{dip}$ [m]		$\phi_k$ [m]		$B_{klap50\%}$ [m]		$t_{Bklap50\%}$ [s]	
	Begin	Einde	a4	b4	a4	b4	a4	b4	a4	b4
<i>21o12</i>										
<i>t1</i>	2792	2798	0.37	0.81	1.21	3.15	-	-	-	-
<i>t2</i>	3790	3794	0.19	0.67	0.43	1.61	-	-	-	-
<i>t3</i>	3954	3957	0.42	0.37	1.04	1.34	0.78	0.51	1.01	0.36
<i>23o06</i>										
<i>t1</i>	66	71	0.58	0.42	2.18	1.40	0.34	0.51	0.86	0.22
<i>t2</i>	3927	3932	0.23	0.25	1.36	0.85	0.82	0.54	0.02	0.28
<i>t3</i>	2847	2850	0.19	-	0.27	-	-	-	0.10	-
<i>P022</i>										
<i>t1</i>	6106	6118	0.60	0.26	2.79	0.56	0.95	-	0.19	-
<i>t2</i>	814	820	0.62	0.24	1.38	0.46	-	-	-	-
<i>t3</i>	1579	1586	0.86	0.51	2.81	1.27	0.67	-	0.70	-

	<i>Golffront</i>			
	$\phi_b$ [m]		$\theta_f$ [°]	
	a4	b4	a4	b4
<i>21012</i>				
<i>t1</i>	1.20	1.17	23.8	23.5
<i>t2</i>	0.59	0.35	35.6	25.8
<i>t3</i>	0.80	0.50	53.0	43.1
<i>23o06</i>				
<i>t1</i>	0.98	0.84	57.0	63.0
<i>t2</i>	0.81	0.76	28.0	26.4
<i>t3</i>	0.65	0.51	68.7	46.31
<i>P022</i>				
<i>t1</i>	1.43	1.39	49.9	60.9
<i>t2</i>	1.39	1.20	79.3	60.7
<i>t3</i>	1.71	1.55	70.2	64.7

Voor tijdsinterval 23o06-t1 en P022-t3 is het verloop van de stijghoogte langs het talud geplot in Figuur A4.3 in Bijlage A voor 1 golf op het moment dat de maximale stijghoogte optrad. De drie geplote signalen treden allemaal op in dezelfde golf. Van deze geselecteerde golven zijn de golfklapparameters en aanvullend de geïntegreerde gediptheid (gediptheid over de tijd geïntegreerd) en de dipimpuls weergegeven in Tabel 4.3.

Figuur A4.3 laat zien dat met de instelling b4 (hoge bodemwrijving) in beide gevallen de golfklap hoger op het talud optreedt. Dit wordt veroorzaakt, omdat de golfterugloop met een hogere bodemwrijving minder zal zijn. De grootte van de golfklap, bepaald met instelling a4 (gebruikt in de analyse), blijkt voor beide proeven redelijk overeen te komen. In Tabel 4.3 zijn de golfklapparameters van beide tijdseries weergegeven binnen de beschouwde golf.

Tabel 4.3 Vergelijking van de dipimpuls en de geïntegreerde gediptheid voor tijdserie 23o06-t1 en P022-t3.

		23o06-t1				
	<i>Tijdstip optreden</i> $\phi_{max}$ [s]	$\phi_{dip}$ [m]	$\phi_k$ [m]	$B_{klap50\%}$ [m]	<i>Dip impuls</i> [m <sup>2</sup> s]	<i>Geïnt. gediptheid</i> [ms]
Meting	66.84	0.64	1.65	0.57	0.008	0.057
SKYLLA a4	66.78	0.58	2.18	0.34	0.060	0.202
SKYLLA b4	67.02	0.42	1.40	0.51	0.000	0.002
		P022-t3				
	<i>Tijdstip optreden</i> $\phi_{max}$ [s]	$\phi_{dip}$ [m]	$\phi_k$ [m]	$B_{klap50\%}$ [m]	<i>Dip impuls</i> [m <sup>2</sup> s]	<i>Geïnt. gediptheid</i> [ms]
Meting	1580.44	0.82	2.58	0.50	0.007	0.020
SKYLLA a4	1579.95	0.86	2.81	0.67	0.149	0.169
SKYLLA b4	1580.43	0.51	1.27	-	0.000	0.004

Uit de tabel blijkt dat voor Tijdserie 23o06-t1 voor SKYLLA berekening b4 de dipimpuls en de geïntegreerde gediptheid erg klein te zijn (0 – 0.004), terwijl in de figuur toch een golfklap te zien is. Dit wordt veroorzaakt, omdat er een drempelwaarde van  $0.4H_s$  gekozen wordt om de geïntegreerde gediptheid te bepalen. Blijkbaar is de keuze van deze drempelwaarde van grote invloed, waardoor het resultaat zeer gevoelig is voor kleine onnauwkeurigheden in de gediptheid. Ook voor SKYLLA berekening met instelling a4 wijken de waarden van de geïntegreerde gediptheid en de dipimpuls nogal af van de gemeten waarden, ondanks dat de vorm van de golfklap op het tijdstip van  $\phi_{max}$  redelijk goed overeenkomen. In deze studie blijken deze twee parameters dus niet een goede maat om de golfklappen met elkaar te vergelijken. Voor instelling a4 wijkt vooral de klaphoogte bij Tijdserie 23o06 af, wat ook zichtbaar is in Figuur A4.3. De meeste andere golfklapparameters met SKYLLA instelling a4 komen vrij goed overeen met de metingen.

Uit deze vergelijking blijkt dat voor elke SKYLLA berekening goed gekeken moet worden naar de instellingen, omdat deze instellingen een grote invloed kunnen hebben op de golfklapparameters en daarmee samenhangend op de stabiliteit van de steenzetting.

#### 4.4 Vergelijking stijghoogteverschil en blokbeweging (ZSTEEN)

Voor elk tijdsinterval zijn ZSTEEN berekeningen uitgevoerd, met ZSTEEN-versie 1.9. Voor de drukkbestanden die gegenereerd zijn op basis van de SKYLLA-berekeningen zijn wederom de instellingen gebruikt met de lage bodemwrijving (Serie a4). In Tabel 4.4 zijn de constructieparameters weergegeven die zijn gebruikt voor de ZSTEEN berekeningen. De ingevoerde constructies zijn zoveel mogelijk gelijk gehouden aan de werkelijk geteste constructies in de Deltagoot. De blokdikte is waar nodig aangepast, omdat ZSTEEN niet in alle gevallen blokbeweging of juist erg veel blokbeweging gaf. De lek lengte is bepaald met ANAMOS 2.21.



Tabel 4.4 Constructieparameters gebruikt voor de ZSTEEN berekeningen

Proef		#21o12-t1	#21o12-t2	#21o12-t3	#23o06-t1
Type	[-]	Betonblokken op kant	Betonblokken op kant	Betonblokken op kant	Betonblokken op kant
Filterlaagdikte $b$	[m]	0.06	0.06	0.06	0.06
Korrelgrootte filter $D_{f15}$	[mm]	8	8	8	8
Porositeit filter $n$	[-]	0.3	0.3	0.3	0.3
Zuiloppervlak $A_{zuil}$	[m <sup>2</sup> ]	-	-	-	-
Breedte van het blok $B$	[m]	0.1	0.1	0.1	0.1
Lengte van het blok $L$	[m]	0.2	0.2	0.2	0.2
Toplaagdikte $D$	[m]	0.08	0.08	0.08	0.10
Dichtheid $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2313	2313	2313	2279
Perc. open ruimte $\Omega$	[%]	-	-	-	-
Spleetbreedte $s$	[mm]	3	3	3	5.8
Leklengte $\lambda$	[m]	0.140	0.140	0.140	0.116
Klemfactor	[-]	1	1	1	1

Proef		#23o06-t2	#23o06-t3	#P022-t1	#P022-t2	#P022-t3
Type	[-]	Betonblokken op kant	Betonblokken op kant	Basalton	Basalton	Basalton
Filterlaagdikte $b$	[m]	0.06	0.06	0.12	0.12	0.12
Korrelgrootte filter $D_{f15}$	[mm]	8	8	22	22	22
Porositeit filter $n$	[-]	0.3	0.3	0.35	0.35	0.35
Zuiloppervlak $A_{zuil}$	[m <sup>2</sup> ]	-	-	0.06	0.06	0.06
Breedte van het blok $B$	[m]	0.1	0.1	-	-	-
Lengte van het blok $L$	[m]	0.2	0.2	-	-	-
Toplaagdikte $D$	[m]	0.10	0.05	0.10	0.10	0.15
Dichtheid $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2279	2279	2827	2827	2827
Perc. open ruimte $\Omega$	[%]	-	-	12	12	12
Spleetbreedte $s$	[mm]	5.8	3	-	-	-
Leklengte $\lambda$	[m]	0.116	0.124	0.187	0.187	0.208
Klemfactor	[-]	1	1	1	1	1

Omdat de reeds bekende waterstandsproblematiek van ZSTEEN (Klein Breteler *et. al.*, 2003) ook hier een belangrijke factor kan spelen, zijn voor elk tijdsinterval 5 subberekeningen gemaakt, waarbij de waterstand gevarieerd is. Omdat er gerekend is met de mode 'Narekenen' van ZSTEEN is het niet mogelijk de waterstand te veranderen. Derhalve zijn de sectieranden van de constructie verticaal verschoven over verschillende afstanden binnen een interval  $\Delta y$ , (zie vergelijking (4.1)) om zo de positie van de spleten ten opzichte van de waterstand te veranderen.

$$\Delta y = +/-B \cdot \sin \alpha \quad (4.1)$$

$B$  : breedte van het blok (m); in geval van een zuil:  $B = (A_{zuil})^{0.5}$

$A_{zuil}$ : zuiloppervlak (m<sup>2</sup>)

$\alpha$  : taludhelling (°)

$\Delta y$  : verandering van de hoogte van het talud in verticale richting (m)

Voor elke berekening is handmatig de maximale blokbeweging ( $Y_{max}$ ) en het maximale stijghoogteverschil ( $\phi_{w,max}$ ) over de bekleding bepaald door de waarde af te lezen uit de grafieken. Per proef is de maximale blokbeweging en het maximale stijghoogteverschil bepaald over de 5 subberekeningen. Het tijdstip waarop de maximale blokbeweging optrad was niet voor alle gevallen hetzelfde tijdstip waarop het maximale stijghoogteverschil optrad. In deze analyse is gekozen om beide parameters als onafhankelijke grootheden te beschouwen. In Tabel 4.5 zijn alle waarden samengevat en tevens is het verschil weergegeven van de  $Y_{max}$  en  $\phi_{w,max}$  uit ZSTEEN berekend met SKYLLA-invoer ten opzichte van invoer gebaseerd op metingen. In de tabel is voor Proef P022-t2 een extra serie toegevoegd (P022-t2-lang). In deze serie zijn circa 5 extra golven doorgerekend om de invloed hiervan te bepalen.

Tabel 4.5 Met ZSTEEN berekende blokbeweging en stijghoogteverschil over de toplaa

	$Y_{max}$			$\phi_{w,max}$		
	[m]		[%]	[m]		[%]
	Meting	SKYLLA	<i>Vershil</i>	meting	SKYLLA	<i>Vershil</i>
#21o12-t1	0.032	0.015	-52%	0.617	0.193	-69%
#21o12-t2	0.009	0.010	11%	0.277	0.394	42%
#21o12-t3	0.036	0.023	-37%	0.343	0.368	7%
#23o06-t1	0.021	0.024	13%	0.278	0.235	-15%
#23o06-t2	0.017	0.011	-38%	0.242	0.155	-36%
#23o06-t3	0.019	0.001	-96%	0.197	0.107	-46%
#P022-t1	0.017	0.070	306%	0.368	0.281	-24%
#P022-t2	0.014	0.048	238%	0.408	0.401	-2%
#P022-t2-lang	0.051	0.106	109%	0.716	0.861	20%
#P022-t3	0.074	0.036	-52%	0.477	0.456	-4%

Het blijkt dat in 6 van de 10 gevallen het verschil tussen  $\phi_{w,max}$  uit de metingen ten opzichte van  $\phi_{w,max}$  uit SKYLLA minder dan 25% is. Doorgaans is het stijghoogteverschil op basis van de SKYLLA berekeningen wat te laag, namelijk gemiddeld over alle waarden circa 13%. Kleine verschillen in stijghoogteverschil kunnen al leiden tot grote verschillen in blokbeweging. Daarom is het niet verwonderlijk dat de blokbewegingen vrij grote afwijkingen laten zien. Zoals eerder gesteld, is er een invloed van toeval die het vergelijken van individuele golven beïnvloedt. Het is zinvoller om te kijken naar langere meetseries, zoals alle drie de tijdsintervallen van elke proef tezamen. Kijken we dan naar de grootste blokbeweging per proef (bestaande uit de 3 tijdsintervallen  $t_1$ ,  $t_2$  en  $t_3$ ) dan valt het op dat de blokbeweging op basis van de SKYLLA berekeningen steeds minder dan een factor 1.5 afwijkt van die op basis van de meting. Dit is een zeer goed resultaat.

Hierbij moet opgemerkt worden dat de spreiding die gevonden wordt in de ZSTEEN berekeningen, die zijn uitgevoerd om de waterstandsproblematiek te omzeilen, erg groot zijn (factor 7 voor Proef P022-t1 en zelfs een factor 31 voor Proef P022-t3).

Verlenging van de SKYLLA berekening (Proef P022-lang) heeft een relatief grote invloed op de maximale blokbeweging. Dit is omdat de maximale blokbeweging tijdens dit verlengde tijdsinterval nu optrad in een andere golf, zodat ook een ander maximum gevonden werd (dat een kleiner verschil opleverde tussen berekende en de gemeten waarde). Het groeiende aantal bellen in het water maakt de resultaten echter minder betrouwbaar.

## 4.5 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde analyse tussen de gemeten stijghoogtes en de berekende stijghoogtes met SKYLLA kan opgemerkt worden, dat bij het vergelijken van de karakteristieke golflapparameters er voor bijna de helft van de gevallen de berekende gediptheid en golflaphoogte ongeveer gelijk is aan de metingen. De golflapbreedte wordt door SKYLLA gemiddeld overschat met circa 19%, maar ook onderschattingen vinden plaats. Wat betreft de hoogte van het front en de fronthelling kan vastgesteld worden dat dit in de helft van de beschouwde situaties de berekeningen overeenkomen met de metingen.

Wordt gekeken naar de ZSTEEN berekeningen dan zijn de conclusies ten aanzien van de bepaalde blokbeweging dat er grote spreidingen optreden. Dit is omdat een kleine variatie in stijghoogteverschillen al kan leiden tot grote variaties in blokbeweging.

Algemeen kan gezegd worden dat de factor toeval een grote rol speelt bij golflappen en het effect van golflappen, met als gevolg dat in de resultaten een relatief grote spreiding optreedt in de waarden van de bepaalde golflapparameters. Zo kunnen bijvoorbeeld de locatie en grootte van de golflap van groot belang zijn voor de blokbeweging. Voor de analyse van de blokbeweging zou het beter zijn de resultaten te baseren op een statistische analyse (bijvoorbeeld een 2% overschrijdingswaarde), waardoor de toevalsfactor sterk gereduceerd wordt. Hiervoor zijn echter een groter aantal golven nodig dan de hier toegepaste 10 golven. Helaas is dit met de huidige SKYLLA-versie nog niet mogelijk.

Wanneer voor elke proef de 3 tijdsintervallen tezamen beschouwd worden, en de grootste blokbeweging per proef wordt bekeken, dan valt het op dat de blokbeweging op basis van de SKYLLA berekeningen steeds minder dan een factor 1.5 afwijkt van die op basis van de metingen. Dit is een zeer goed resultaat.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde SKYLLA-berekeningen en de analyse van de gemeten en berekende stijghoogtes op het talud kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

#### *Conclusies SKYLLA-berekeningen*

- Er is onderzocht bij welke instellingen de rekenresultaten het beste zijn. Het betreft de instelling van de wrijvingscoëfficiënt  $f$ , de turbulente viscositeit  $\nu_t$  en de upwindfractie  $\alpha$ . De invloed van de wrijvingscoëfficiënt blijkt in enkele gevallen behoorlijk groot te zijn als gekeken wordt naar het drukverloop in de tijd. Een lagere wrijvingscoëfficiënt geeft grotere gradiënten die beter overeenkomen met de metingen. Op basis van visuele inspectie van de tijdsignalen van de rekenresultaten en omdat een steenzetting beschouwd wordt met een glad talud, is besloten de berekeningen uit te voeren met een relatief lage  $f$  ( $f = 1$ ). De  $\alpha$  is niet verlaagd t.o.v. de als eerste geschatte instellingen ( $\alpha = 0.4$ ) en ook de  $\nu_t$  is onveranderd gelaten.
- De invloed van het veranderen van de wrijvingscoëfficiënt ( $f = 1$  naar  $f = 10$ ) heeft weinig invloed op de golffrontparameters. Echter, de verandering heeft wel een belangrijke invloed op de golfklapparameters.
- De randvoorwaarde voor onregelmatige golven lijkt goed te werken voor de korte tijdsintervallen zoals in deze studie gebruikt zijn. De vorm en grootte van het tijdsignaal komen goed overeen met die van de opgelegde golf zoals weergegeven in Figuur A3.1 in Bijlage A 'Figuren'. De kleine afwijkingen zijn waarschijnlijk een gevolg van het optreden van stoorgolven doordat aan de rand alleen eerste orde golven worden opgewekt. Deze stoorgolven beïnvloeden het brekerproces.
- De golfbeweging wordt sterk gedomineerd door het fenomeen breken. Als gevolg van dit breken kunnen er luchtbellens in het water ontstaan en deze blijven er gedurende de rest van de berekening inzitten. Belangrijker dan het effect van deze luchtbellens op de hoogte van de golftoppen, is dat door het optreden van de luchtbellens het volume toeneemt. Hierdoor stijgt de waterstand en de hydrostatische druk.
- Over het algemeen kan gesteld worden dat de tijdseries met stijghoogtes berekend met SKYLLA en de gemeten stijghoogtes grote overeenkomst vertonen. In gevallen waarbij breken een belangrijke rol speelt is een langzaam toenemende verticale shift waarneembaar, veroorzaakt door luchtbellens (zoals beschreven in de vorige conclusie)

#### *Conclusies ten aanzien van golfklapparameters en ZSTEEN-berekeningen*

Op basis van de uitgevoerde analyse tussen de gemeten stijghoogtes en de berekende stijghoogtes met SKYLLA kan opgemerkt worden dat bij het vergelijken van de karakteristieke golfklapparameters voor bijna de helft van de gevallen de gediptheid en de golfklaphoogte ongeveer gelijk zijn aan die zijn bepaald aan de hand van de metingen. De

golflapbreedte wordt door SKYLLA gemiddeld overschat met circa 19%, maar ook onderschattingen vinden plaats.

Wat betreft de hoogte van het front en de fronthelling kan vastgesteld worden dat in de helft van de beschouwde situaties de berekeningen overeenkomen met de metingen.

Wordt gekeken naar de ZSTEEN berekeningen dan zijn de conclusies ten aanzien van de berekende blokbeweging dat er grote spreidingen optreden. Dit kan verklaard worden uit het feit dat een kleine variatie in stijghoogteverschillen al kan leiden tot grote variaties in blokbeweging.

### ***Conclusies totaal***

De huidige SKYLLA resultaten zijn nog niet direct bruikbaar, maar lijken wel veelbelovend. De resultaten lijken een verdere ontwikkeling van SKYLLA te rechtvaardigen.

Algemeen kan gezegd worden dat bij het optreden van een golflap de factor toeval een grote rol speelt. Dit geldt zowel voor wat betreft de golflap als voor wat betreft de effecten van de golflap. Juist deze effecten kunnen van groot belang zijn voor de blokbeweging. Voor de analyse van de blokbeweging zou het beter zijn de resultaten te baseren op een statistische analyse (bijvoorbeeld een 2% overschrijdingswaarde), waardoor de toevalsfactor sterk gereduceerd wordt. Dit wordt bevestigd door het volgende: Wanneer voor de 3 geselecteerde proeven de grootste blokbeweging over de 3 tijdsintervallen tezamen wordt beschouwd, dan valt het op dat de blokbeweging op basis van de SKYLLA berekeningen steeds minder dan een factor 1.5 afwijkt van die op basis van de metingen. Dit is een zeer goed resultaat.

Gezien de resultaten beschreven in dit rapport kan geconcludeerd worden dat het zinvol is om de ontwikkeling van SKYLLA voort te zetten, ten einde SKYLLA te kunnen gebruiken als inputrekenmodel voor ZSTEEN.

## **5.2 Aanbevelingen**

Dit project is uitgevoerd met een versie van SKYLLA die nog steeds in ontwikkeling is. Hieronder zullen een aantal belangrijke punten worden aangegeven waarop het model aangepast kan worden en die de nauwkeurigheid en bruikbaarheid van de berekeningen kunnen verbeteren. Daarna is nog een toelichting bij deze punten gegeven.

1. Ten gevolge van het breken van golven kan er lucht worden ingesloten in het water. In SKYLLA kunnen deze bellen zich ophopen en diep in de stroming doordringen. De opwaartse kracht, veroorzaakt door dichtheidsverschillen, die luchtbellen naar het oppervlak zou moeten drijven, is in SKYLLA niet gemodelleerd. Het ontbreken van dit mechanisme is de reden dat bellen met de stroming worden meegevoerd en zich in het water kunnen ophopen. Om in de toekomst langere tijdseries te kunnen berekenen is het nodig om het effect van dichtheidsvariaties correct te modelleren in SKYLLA. Dit zal naar schatting 3 à 4 mens-maanden werk zijn.
2. Bij het breken van golven speelt turbulentie een belangrijke rol. In SKYLLA worden op dit moment alleen de grote wervels gemodelleerd (Large Eddy Simulation). Hierbij wordt gewerkt met een constante (hoge) turbulente viscositeit. Hierdoor worden

kleinere wervelstructuren onnodig snel gedissipeerd, waardoor details verdwijnen. Het is de verwachting dat de drukvoorspelling kan worden verbeterd door het toepassen van een geavanceerder turbulentiemodel.

Dit zal naar schatting 4 à 6 mens-maanden werk zijn, waarbij het voorbehoud wordt gemaakt dat het voor een goede schatting van de hoeveelheid werk nodig is een inventarisatie te maken over wat hierbij komt kijken en hoe makkelijk dat in de code geïmplementeerd kan worden.

3. In SKYLLA worden op dit moment de randvoorwaarden opgelegd op basis van lineaire golftheorie. Echter wanneer langere simulaties worden uitgevoerd, kunnen verstoringen in het golfveld en het vrije wateroppervlak optreden die het noodzakelijk maken ook 2<sup>de</sup> orde golfopwekking te introduceren, zoals dit nu al wordt toegepast in bijvoorbeeld onze fysische faciliteiten. Tevens kan het noodzakelijk zijn, met name als in de toekomst de berekeningen langer worden, de absorptie van de door de constructie gereflecteerde golven op de zeewaartse rand te verbeteren.

Voorgesteld wordt om dit in fases uit te voeren. Afhankelijk van de relevantie voor de beoogde toepassingen kan ofwel gewerkt worden aan het verminderen van de reflecties, ofwel aan het verbeteren van het opleggen van hoge golven. Voor beide activiteiten geldt dat de functionaliteit het best in stappen kan worden ontwikkeld, omdat eerst moet blijken of ingewikkelde technieken wel nodig zijn.

- verminderen reflecties: 1 à 2 mens-maanden werk
- verbeteren inkomende golf: 1 à 2 mens-maanden werk

4. Het rekenschema van SKYLLA is op dit moment nog niet impulsbehoudend. Wat de invloed hiervan is op de berekende drukken is moeilijk te voorspellen. Aanbevolen wordt het rekenschema aan te passen.

Dit zal naar schatting 2 à 4 mens-maanden werk zijn, waarbij het voorbehoud wordt gemaakt dat het voor een goede schatting van de hoeveelheid werk nodig is een inventarisatie te maken over wat hierbij komt kijken en hoe makkelijk dat in de code geïmplementeerd kan worden.

5. In dit project zijn de berekeningsresultaten van SKYLLA gefit op de metingen door de bodemwrijving te variëren. In de toekomst zal SKYLLA geschikt moeten zijn om op basis van de golfcondities (golfhoogte, golfperiode en spectrumvorm) en geometrie, in combinatie met een onderbouwde schatting van parameters als de bodemwrijving, viscositeit en upwind-fractie, betrouwbare stijghoogtes te berekenen.

Dit zal naar schatting 2 à 4 mens-maanden werk zijn.

Het wordt aanbevolen om, na het realiseren van bovengenoemde verbeteringen, SKYLLA hiervoor te valideren. Daarbij is het aan te bevelen om ook opnieuw te onderzoeken of de verbeterde versie van SKYLLA al goed genoeg is om de databestanden voor ZSTEEN te vervangen. Deze laatste slag is niet opgenomen in de schatting van het aantal mensmaanden voor de SKYLLA verbeteringen.

Om de factor toeval bij de golfklappen te verkleinen dient SKYLLA verder ontwikkeld te worden c.q. aangepast te worden zodat het mogelijk wordt om voldoende lange tijdseries te genereren. Te verwachten valt dat de resultaten ten aanzien van blokbeweging en stijghoogte over de toplaag, berekend met ZSTEEN op basis van SKYLLA invoer, dan nog beter de resultaten op basis van de metingen kunnen benaderen. Om voldoende lange tijdseries te kunnen genereren moet SKYLLA ook over lange tijdschalen (tientallen of zelfs orde honderd

golfperiodes) voldoende nauwkeurig zijn en betrouwbare resultaten kunnen leveren. Tevens moet SKYLLA efficiënt genoeg zijn om een dergelijke berekening tegen een redelijke rekeninspanning te kunnen uitvoeren. De punten 1, 3 en 4 betreffen vooral het verbeteren van de nauwkeurigheid van SKYLLA. De verwachting is dat dit gunstige gevolgen zal hebben voor de efficiëntie. Hoewel Punt 2 in feite ook gerelateerd is aan het verbeteren van de nauwkeurigheid, levert deze verbetering de mogelijkheid op om op een grover rooster (dus met kleinere rekentijd) dezelfde kwaliteit te kunnen bereiken. Het gaat bij Punt 2 dus vooral om het verhogen van de efficiëntie. Punt 5 betreft de validatie van SKYLLA. Voor wat betreft het verhogen van de efficiëntie valt verder nog te denken aan het verbeteren van de implementatie en aan het optimaliseren van het numerieke oplosalgoritme. Omdat op dit moment niet duidelijk is hoeveel winst daarmee te behalen is, zijn deze zaken niet als aparte verbetermogelijkheid in dit overzicht opgenomen.

Uitvoering van Punt 1 is essentieel. Dit is op dit moment veruit het belangrijkste punt dat de bruikbaarheid van SKYLLA voor praktische toepassingen met steile golven beperkt. De verwachting is dat, als het probleem met de luchtbellens eenmaal is opgelost, Punt 3 de zwakke schakel wordt. Naast nauwkeurigheid is efficiëntie een probleem. Hieraan komt vooral Punt 2 tegemoet. Een betere efficiëntie is echter ook mogelijk door de gevoeligheid van SKYLLA voor niet-uniforme roosters te verminderen, zodat roosterpunten efficiënter kunnen worden ingezet. Vooral uitvoering van Punt 4 zal hier aan bij kunnen dragen.

## Literatuur

Ashgriz, N. en J.Y. Poo (1991), *FLAIR: Flux Line-Segment Model for Advection and Interface Reconstruction*, J. of Comp. Physics. Vol.93, pp.449-468.

Coeveld, E.M. (2003), *Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen. Invloed va golfklappen op stabiliteit: literatuurstudie*. WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4134 , november 2003. Delft

Doom, N. (2001), *Wave interaction with dikes. Numerical simulations with the VOF-model SKYLLA*. WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H3129, Maart 2001. Delft

Doom, N. and M.R.A. van Gent (2003), *Pressures by breaking waves on a slope computed with a VOF-model*. In Proc. Conference on Coastal Structures 2004 Portland, J. Melby (editor).

Eysink en Klein Breteler (2003), *Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen; Deltagootonderzoek naar stabiliteit van basalt*, WL | Delft Hydraulics, meetverslag H4327, december 2003

Hirt, C.W. en B.D. Nichols (1981), *Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries*, J. of Comp. Physics, Vol.39, pp.201-225.

Klein Breteler, Van Vossen en Kuiper (2003), *Testen van ZSTEEN versie 1.8*, WL | Delft Hydraulics, WL | Delft Hydraulics rapport H4331, 15 december 2003.

Klein Breteler (2004), *Voorlopige resultaten van analyse van stabiliteit bij lange golven*, WL | Delft Hydraulics, notitie H4421, 11 juni 2004.

Klein Breteler & Coeveld, E.M. (2004), *Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen. Kwantificering golfbelasting op steenbekledingen*. WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4419 (concept), oktober 2004. Delft

Petit, H.A.H., P. Tönjes, M.R.A. van Gent en P. van den Bosch (1994), *Numerical simulation and validation of plunging breakers using a 2D Navier-Stokes model*, Proc. ICCE'94, Vol.1, pp.511-524, Kobe.

Rienecker, M.M. en J.D. Fenton (1981), *A Fourier method for steady water waves*, J. of Fluid Mechanics, Vol.104, pp.119-137.

Smith, G.M., J. Wouters en M. Klein Breteler (2000), *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van talusbekledingen*. Meetverslag van Deltagootonderzoek. WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H3272

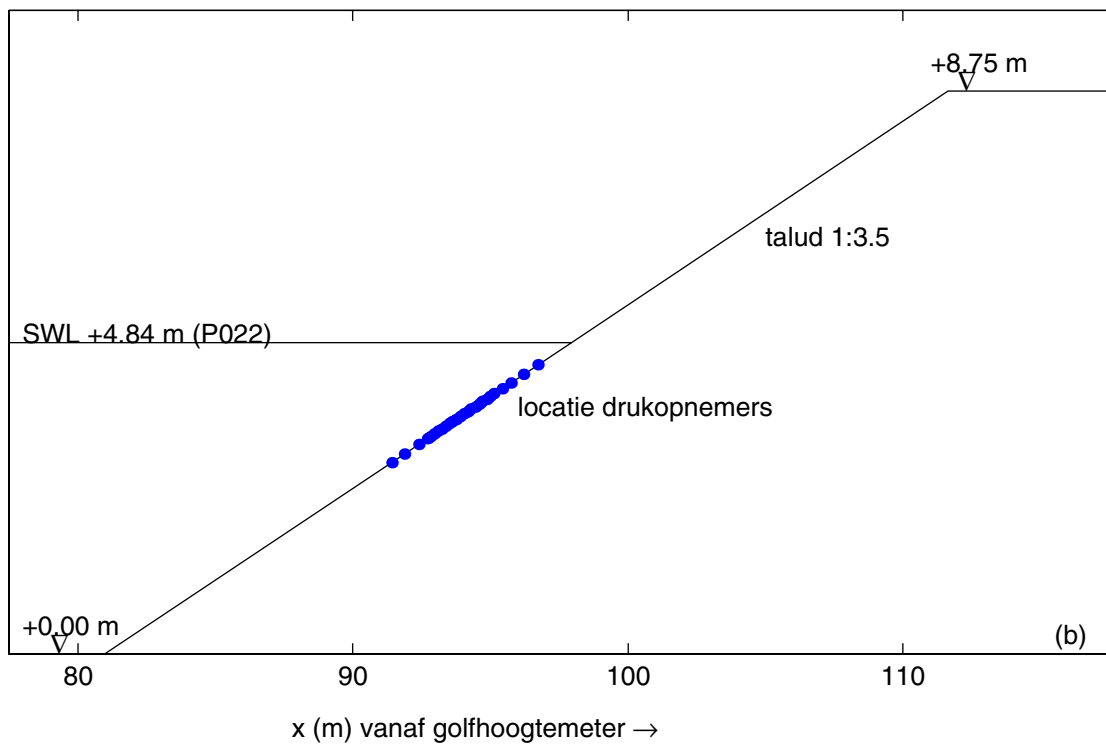
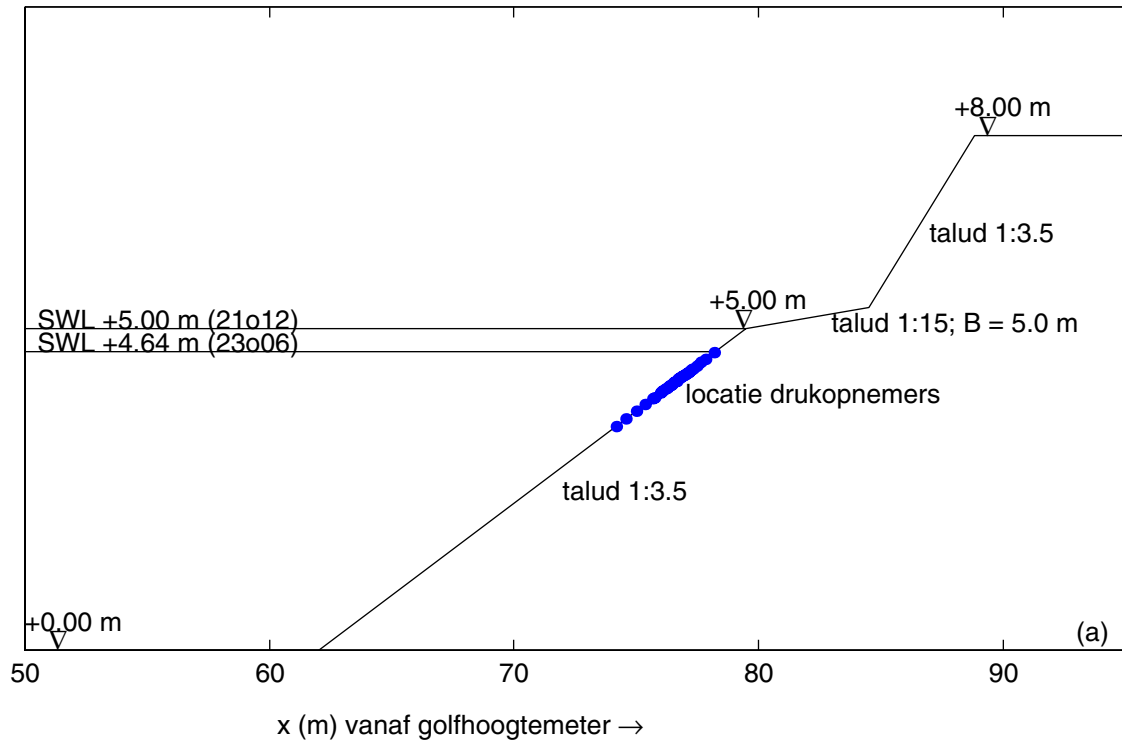
Ubbink, O. (1997), *Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces*, PhD Thesis, Imperial College, London

Van Gent, M.R.A., P. Tönjes, H.A.H. Petit en P. van den Bosch (1994), *Wave action on and in permeable structures*, Proc. ICCE'94, Vol.2, pp.1739-1753, Kobe.

Van Gent, M.R.A. (1995), *Wave interaction with permeable coastal structures*, Ph.D.-thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-407-1182-8, Delft University Press, Delft.

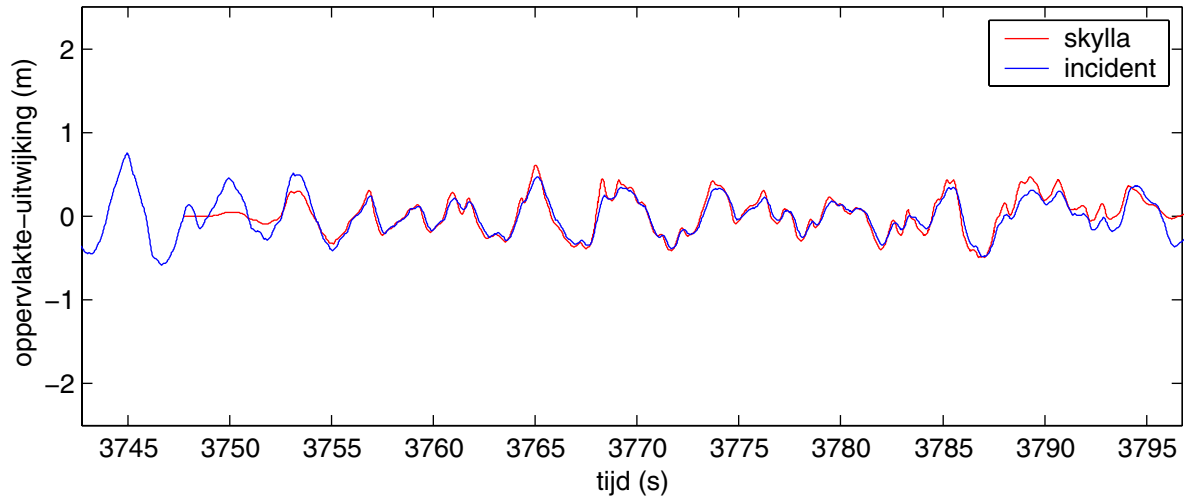


## **A Figuren**

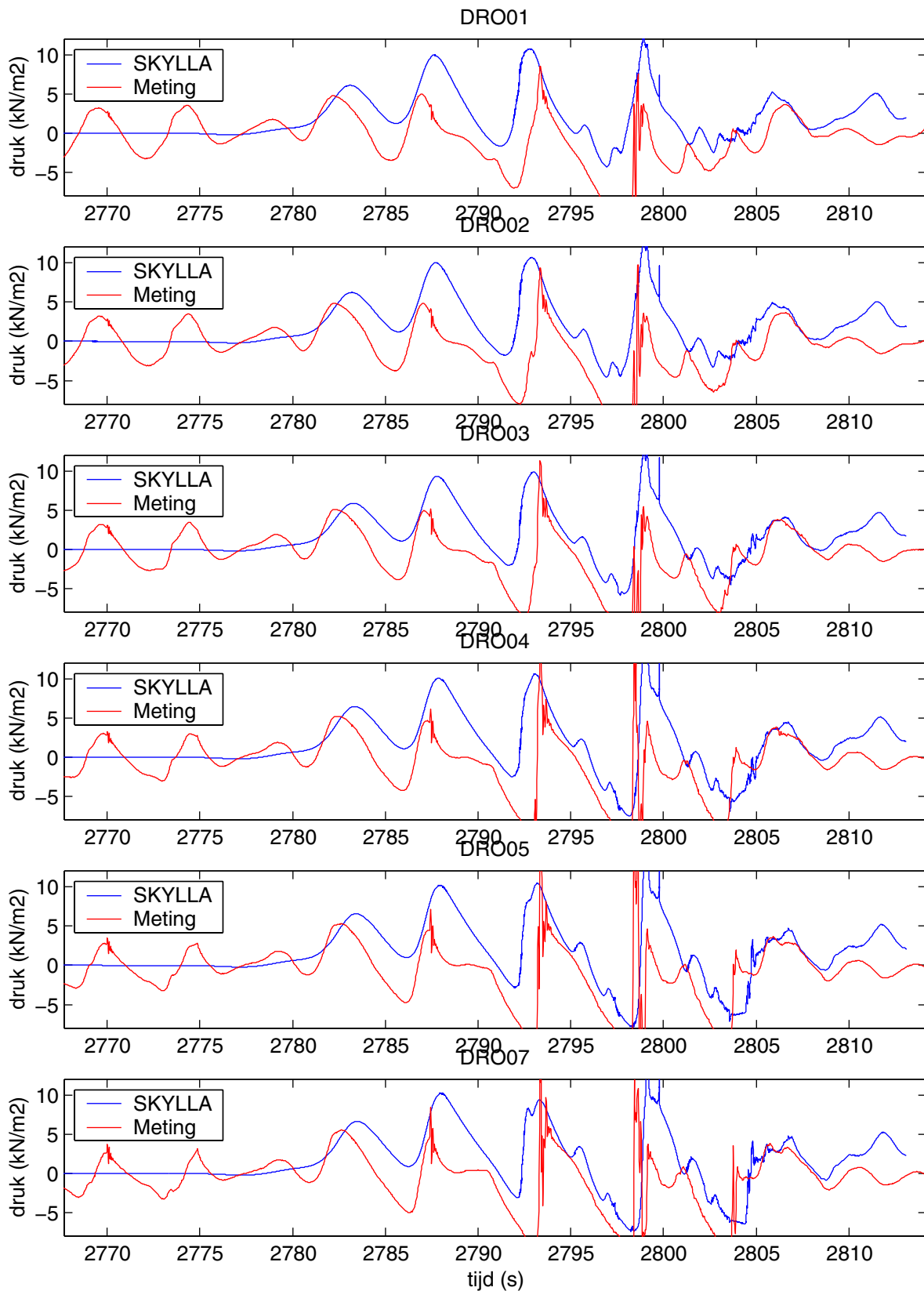


Geometrie metingen; proef 21o12 en 23o06 (a) en P022 (b)

vertrokken schaal



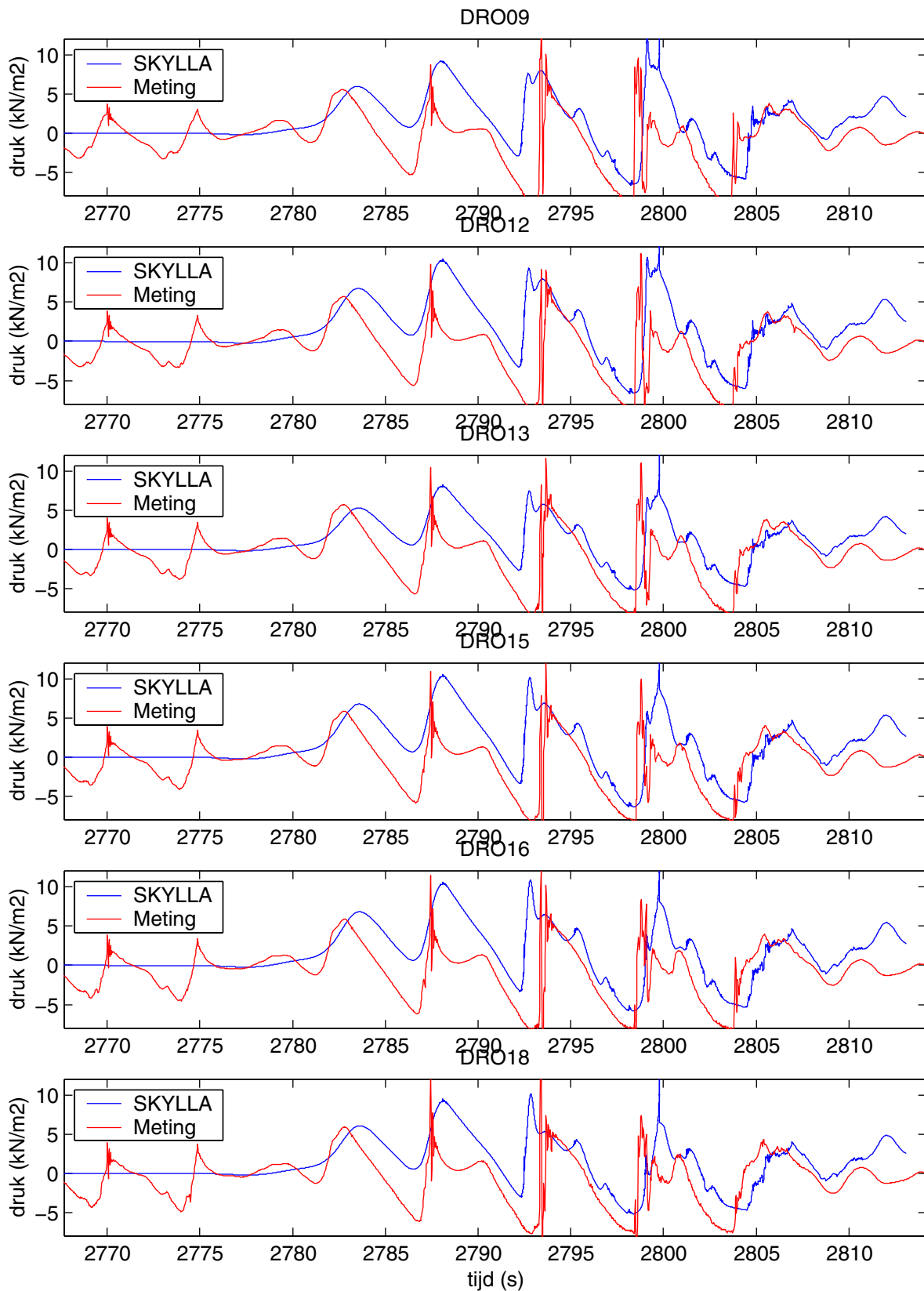
Vergelijking opgelegd en berekend signaal aan de rand.	21o12	t2
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4424	Fig. A3.1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t1

21o12

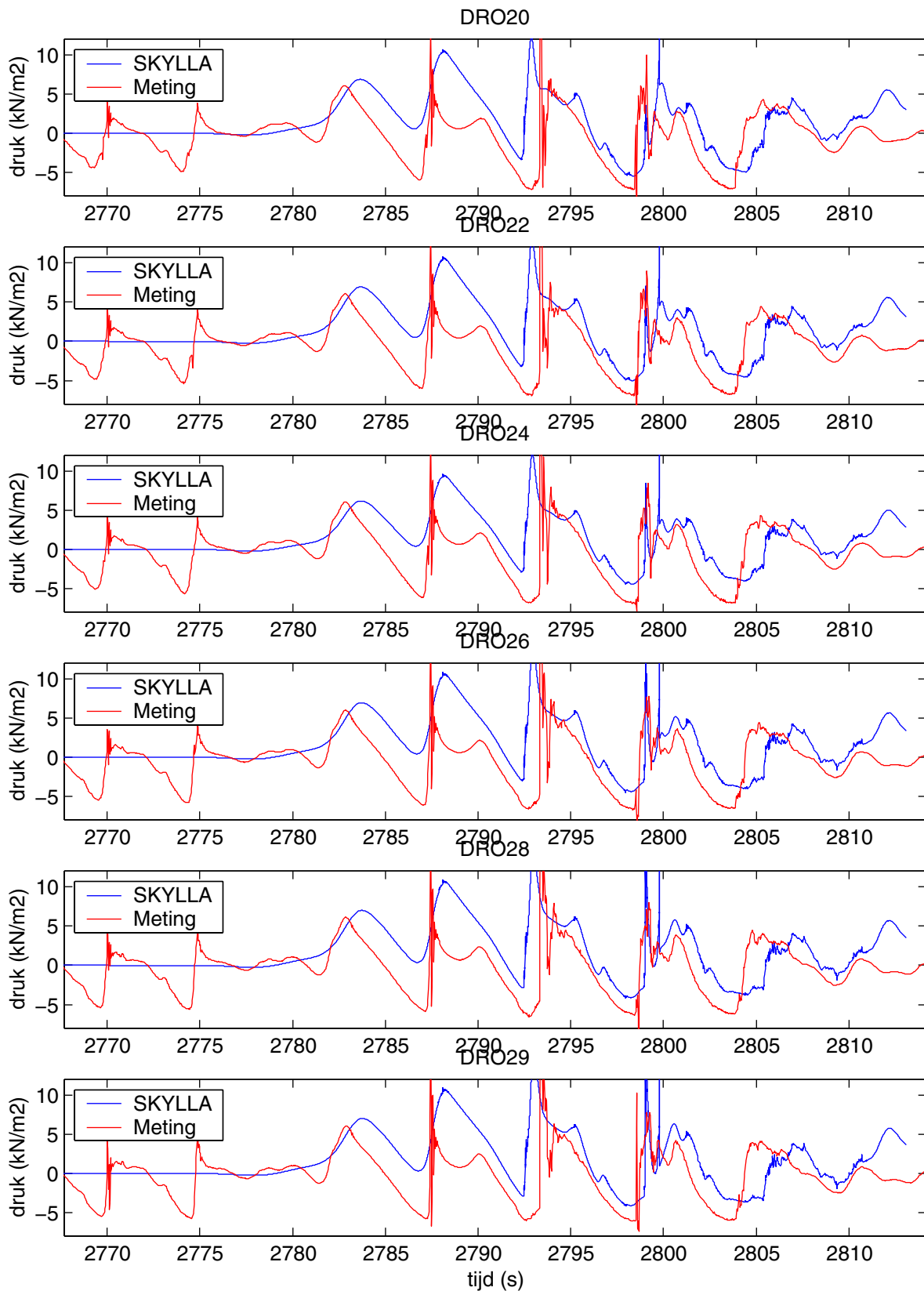
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t1

21o12

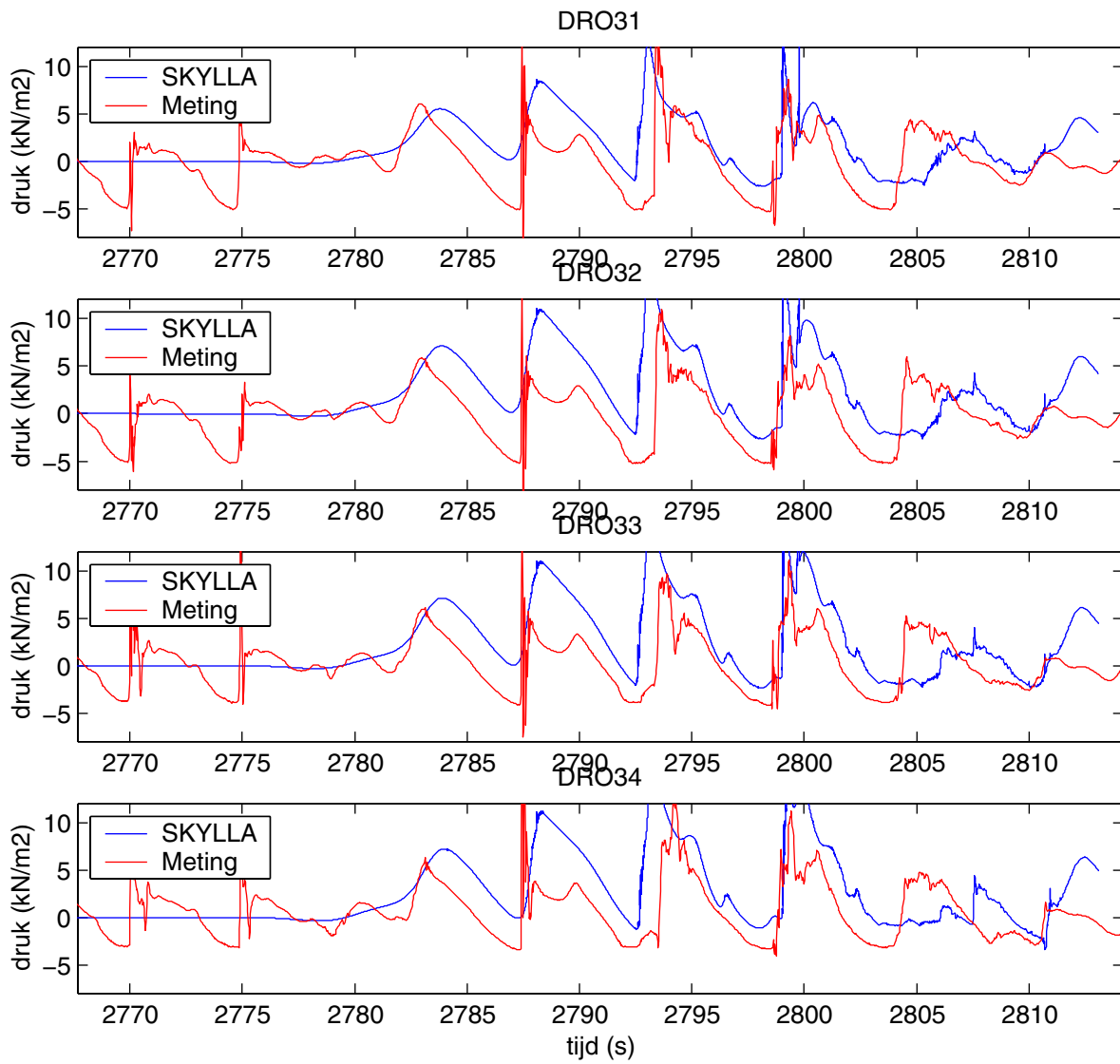
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t1

21o12

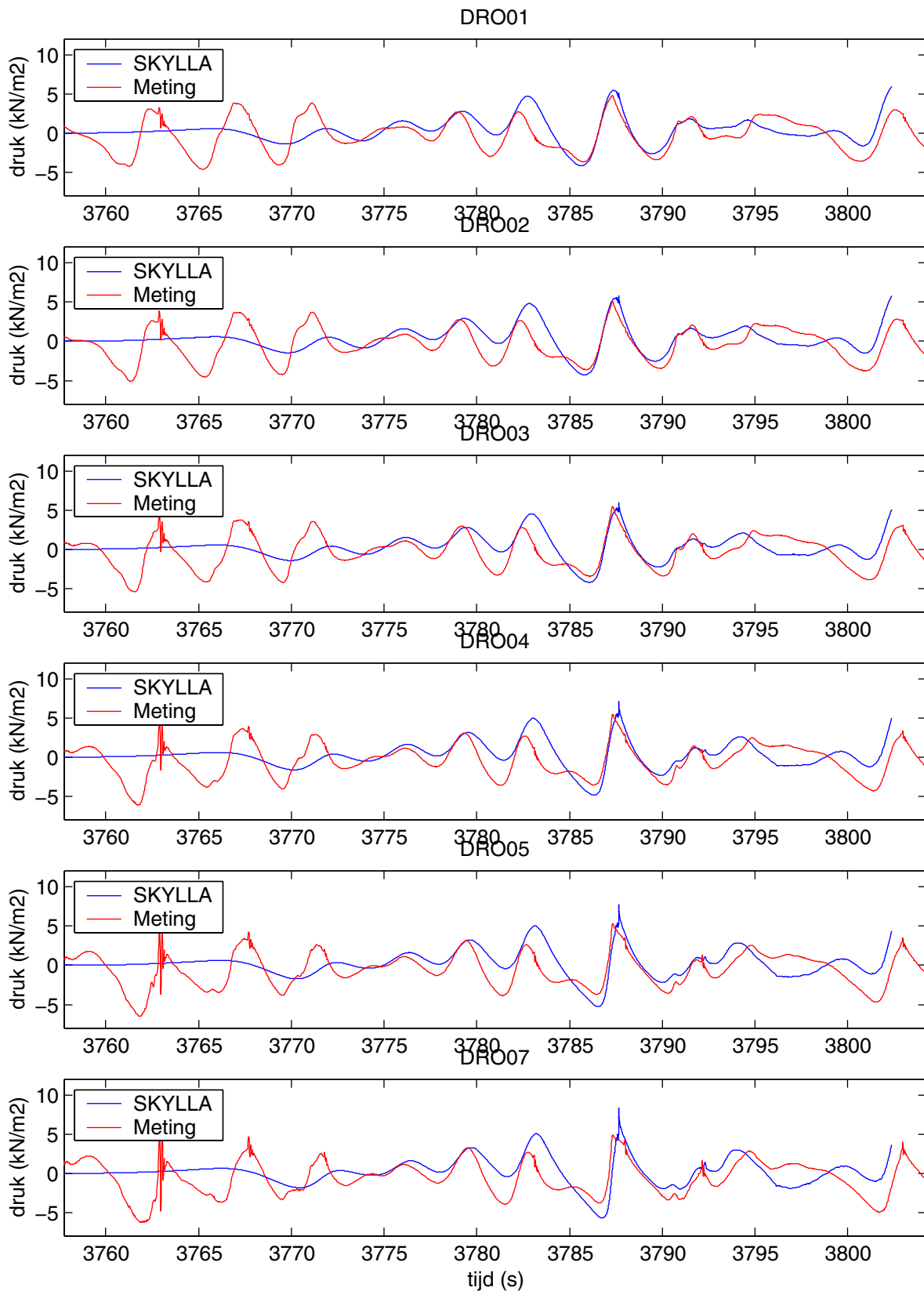
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t1

21o12

t1

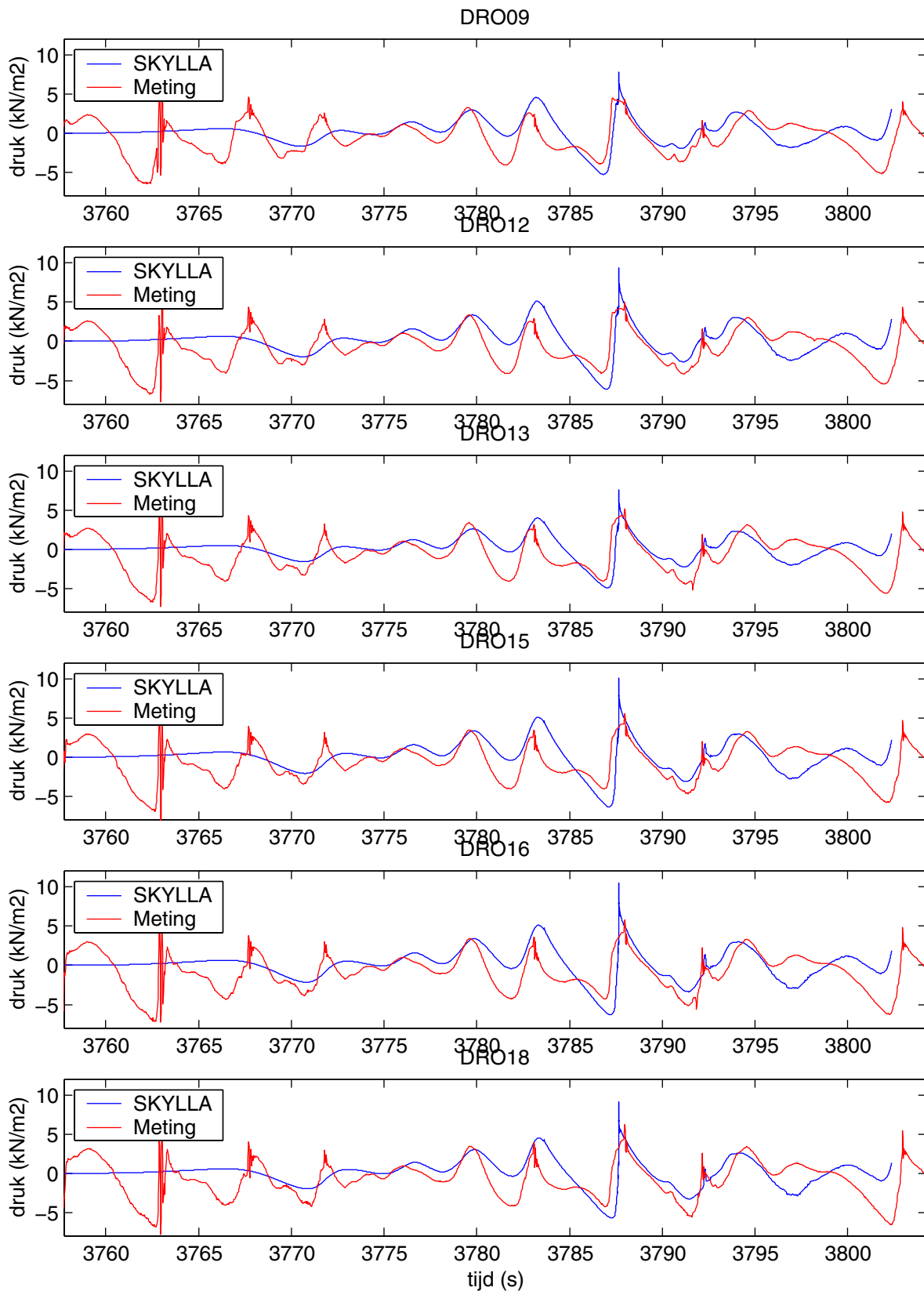


Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t2

21o12

t2

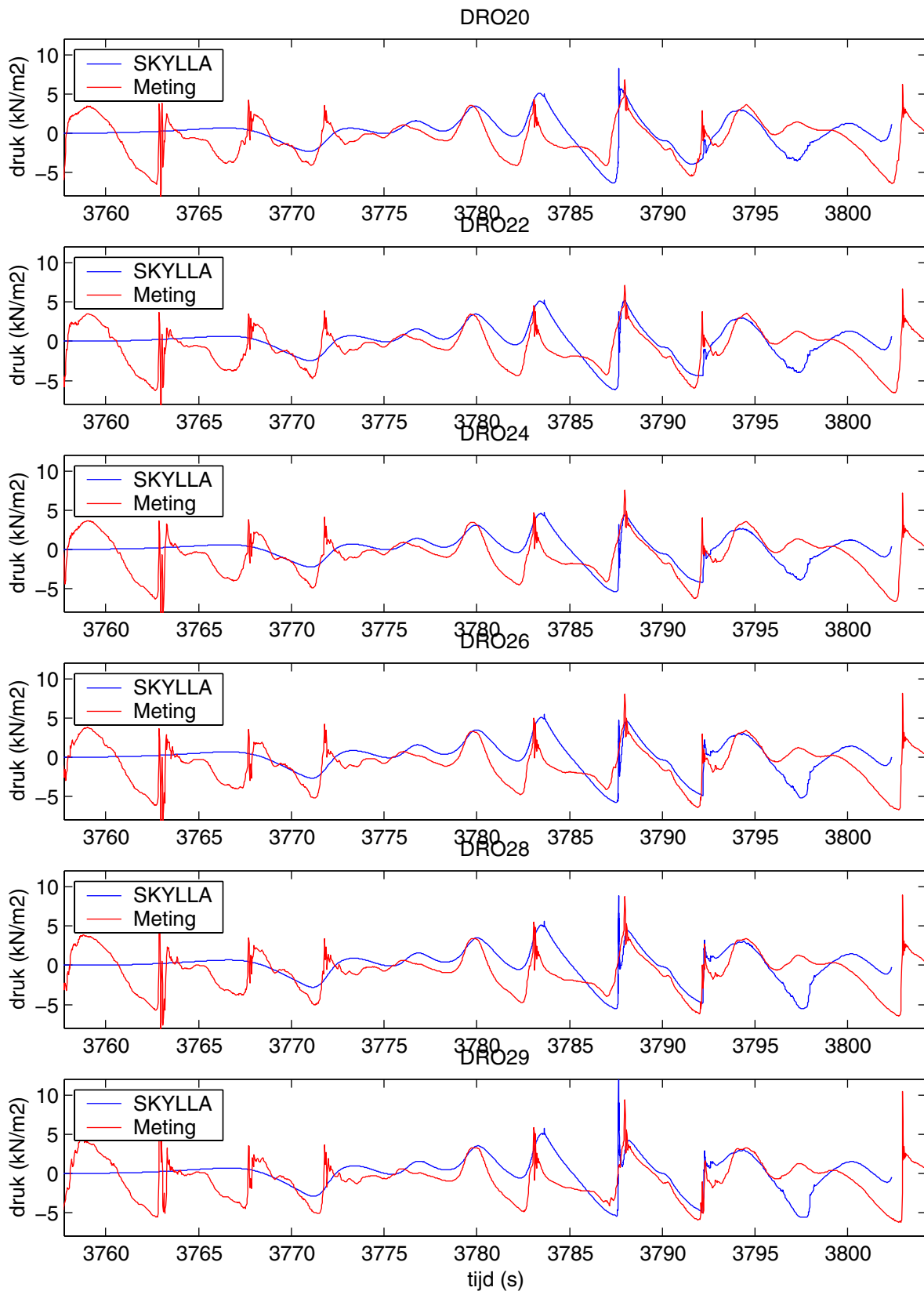




Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t2

21o12

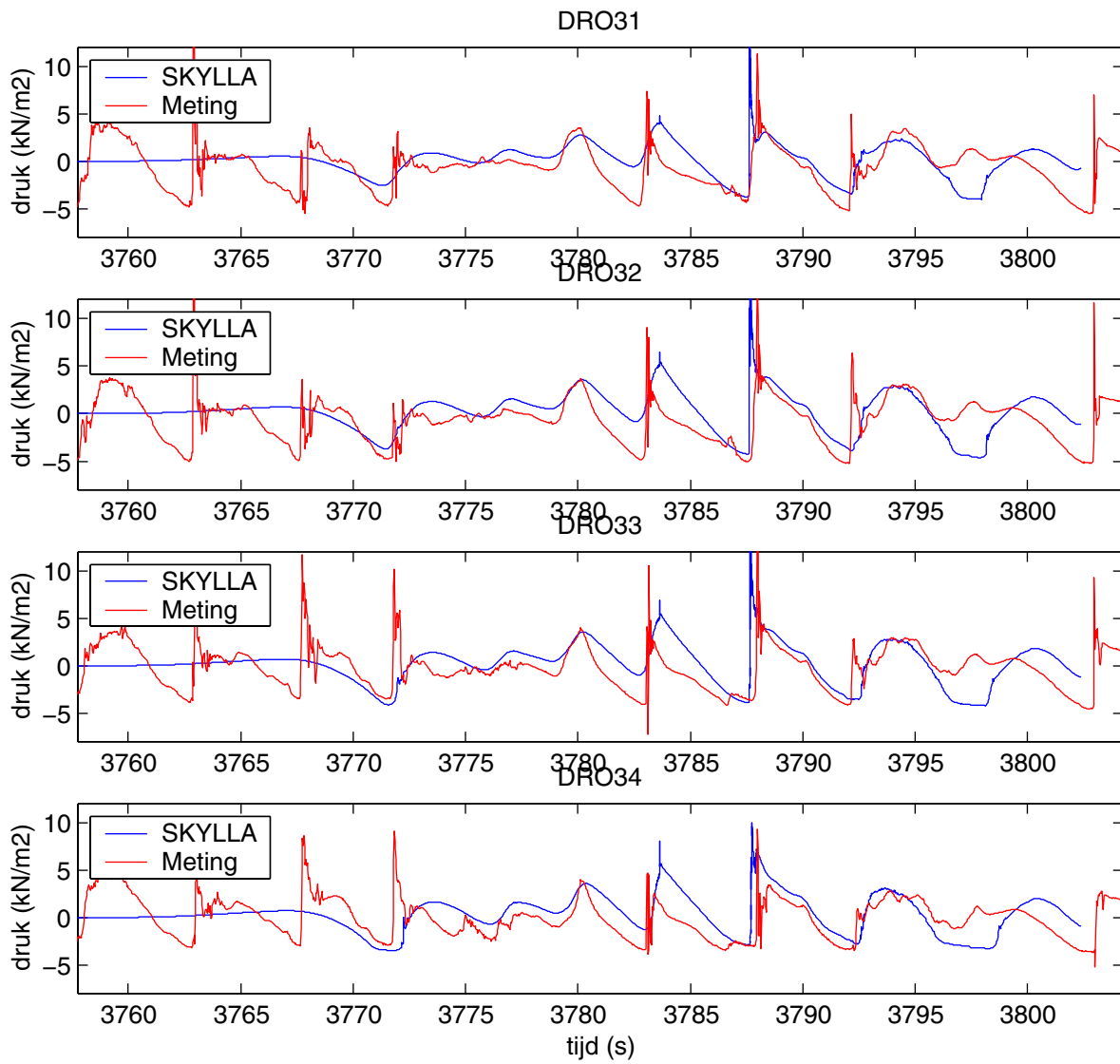
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t2

21o12

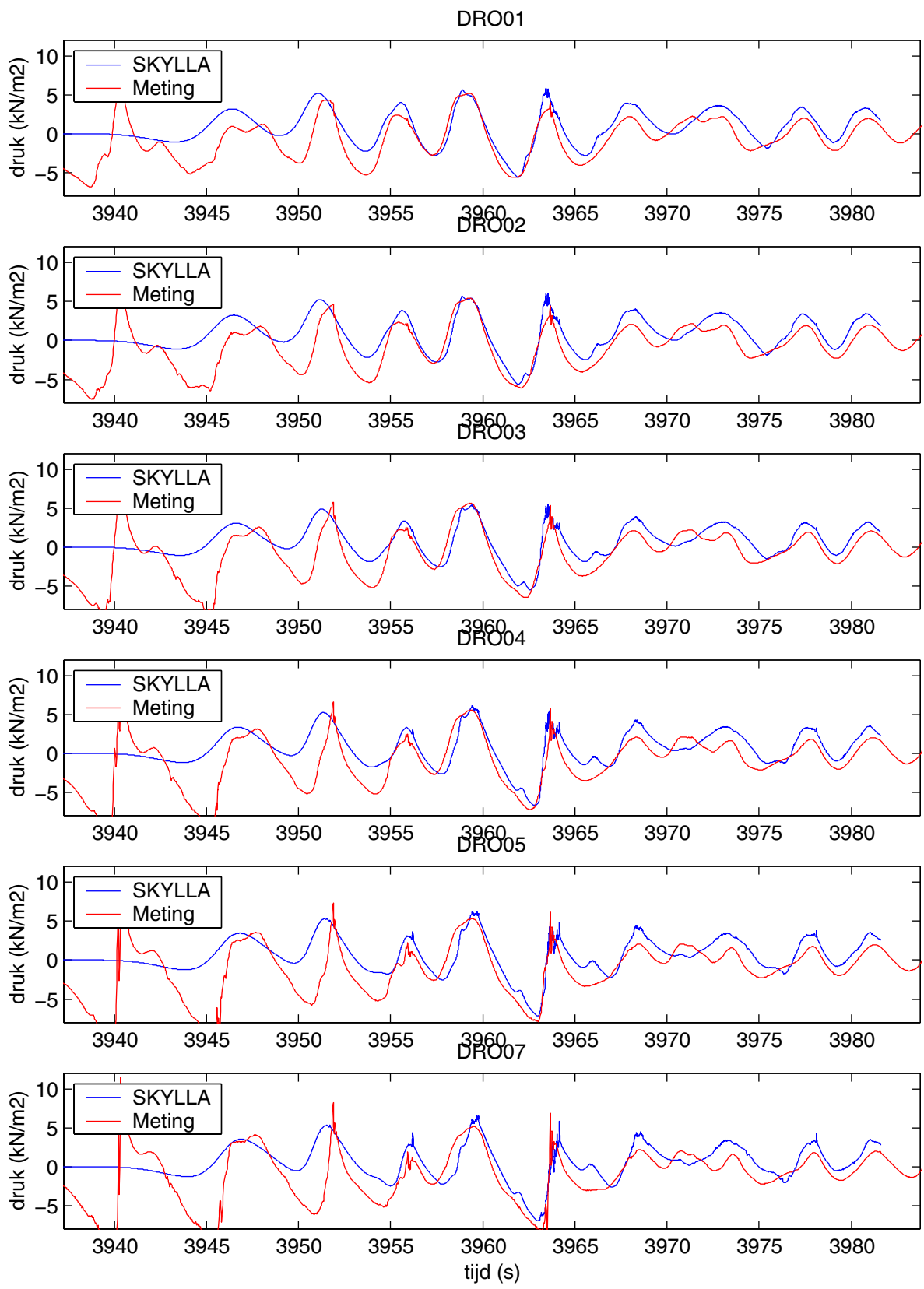
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t2

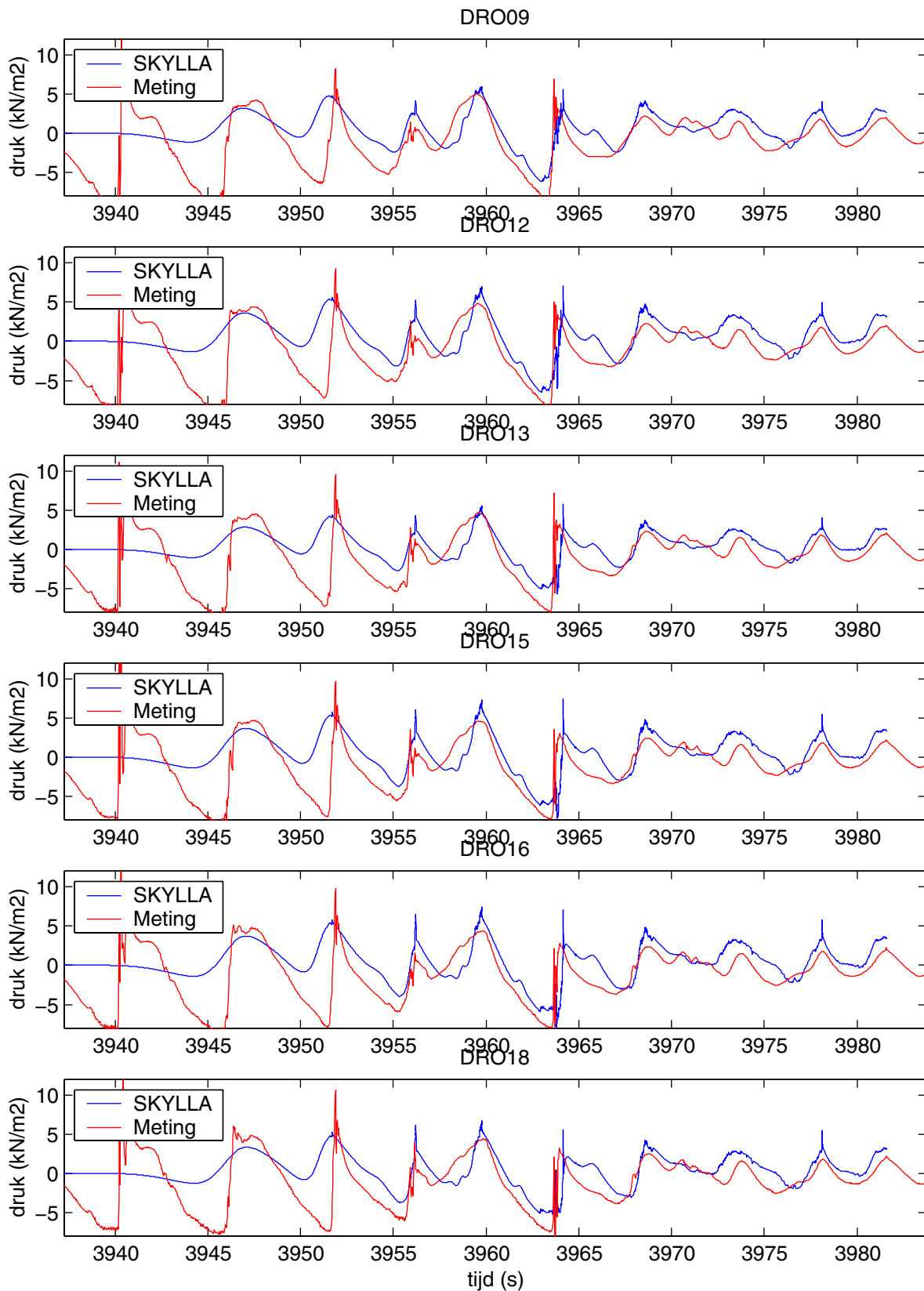
21o12

t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor proef 21o12 op tijdstip t3

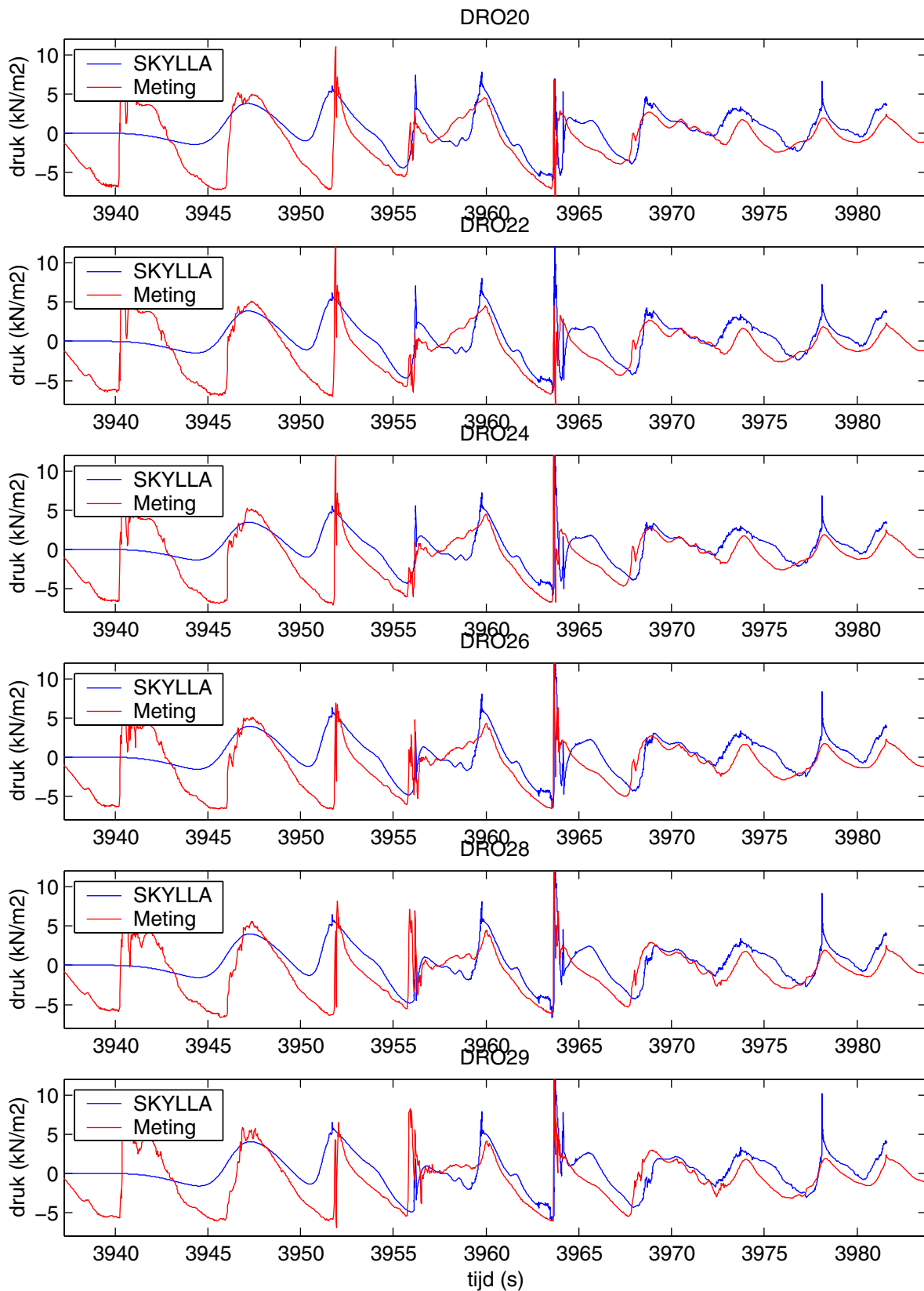
21o12      t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t3

21o12

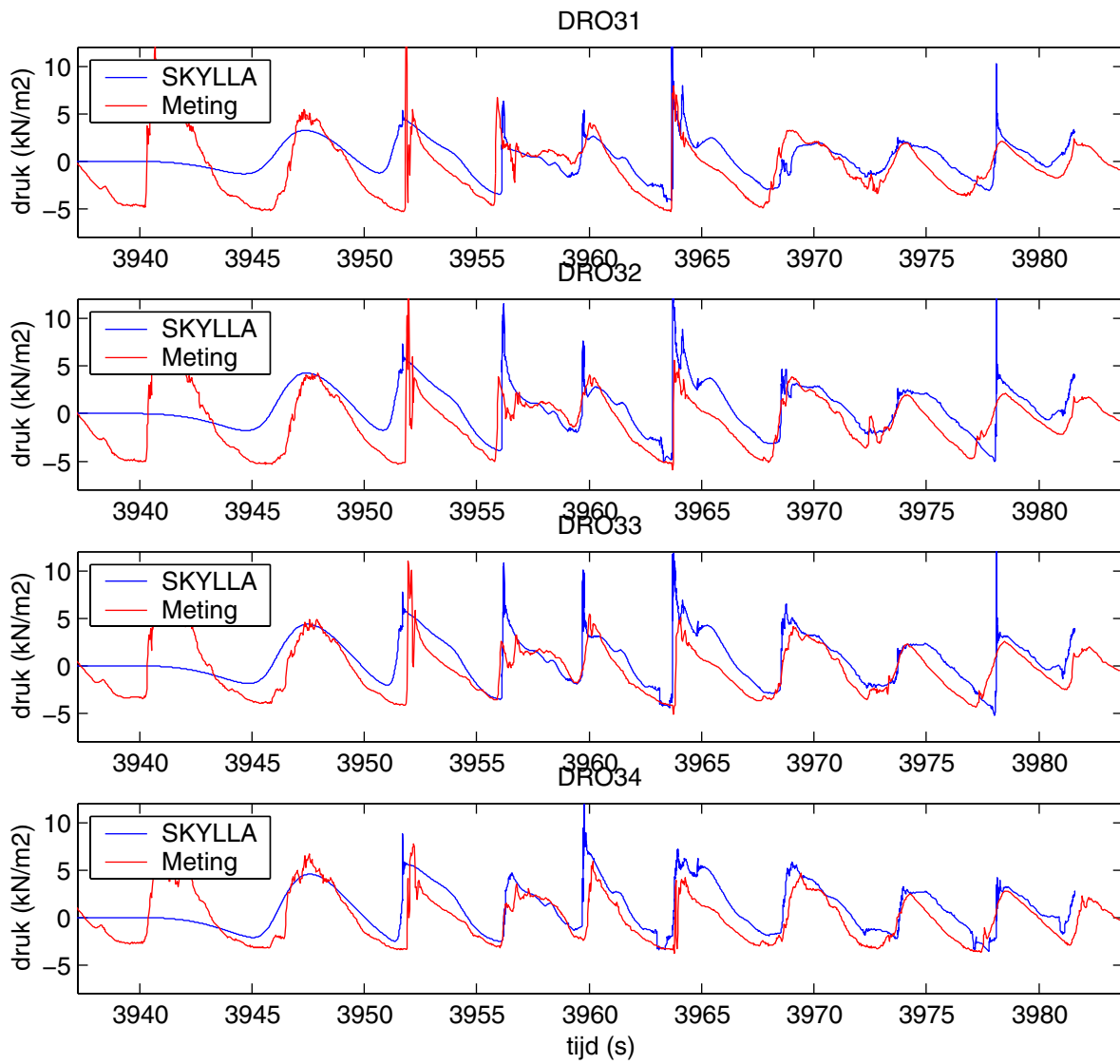
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t3

21o12

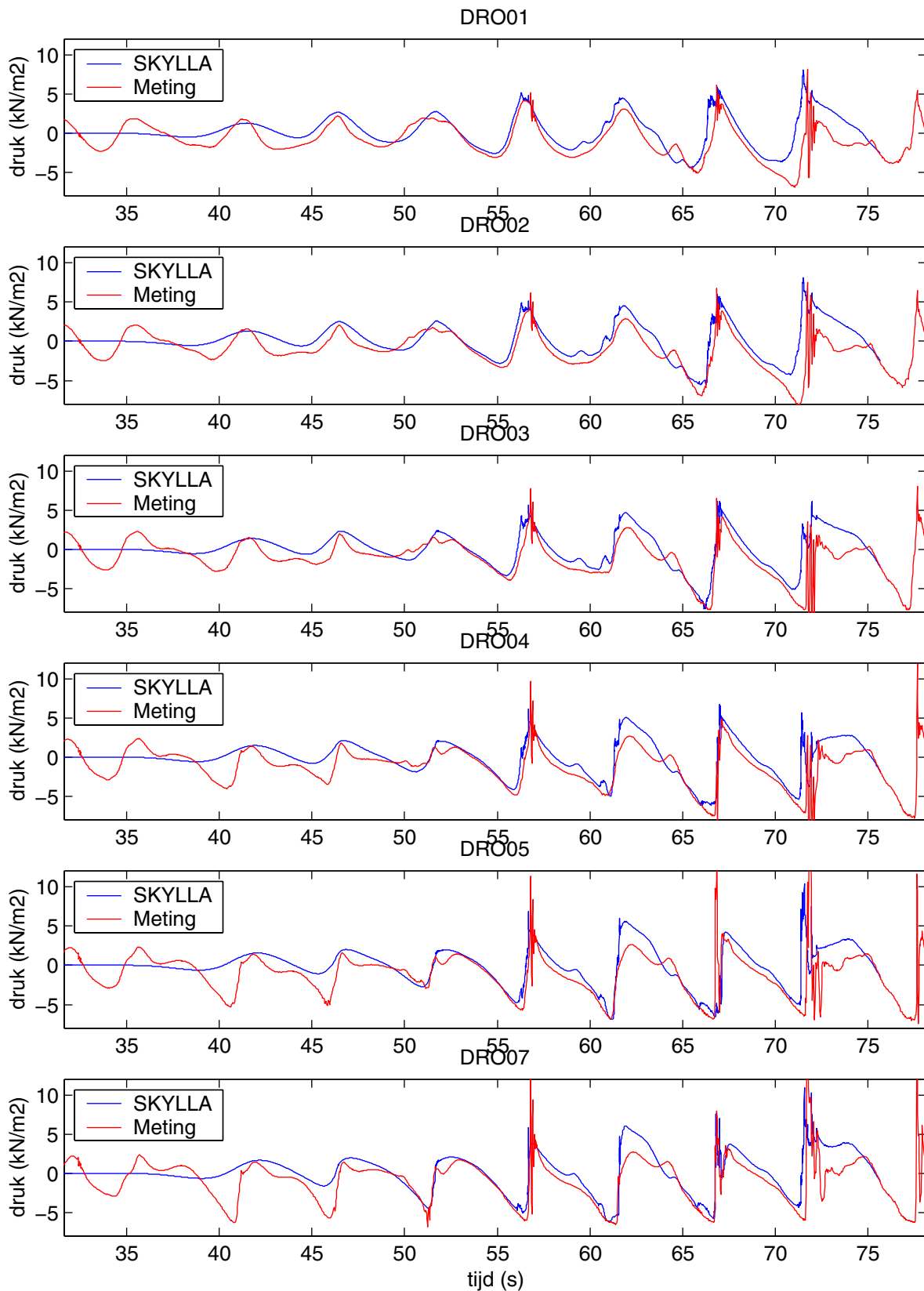
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 21o12 op tijdstip t3

21o12

t3

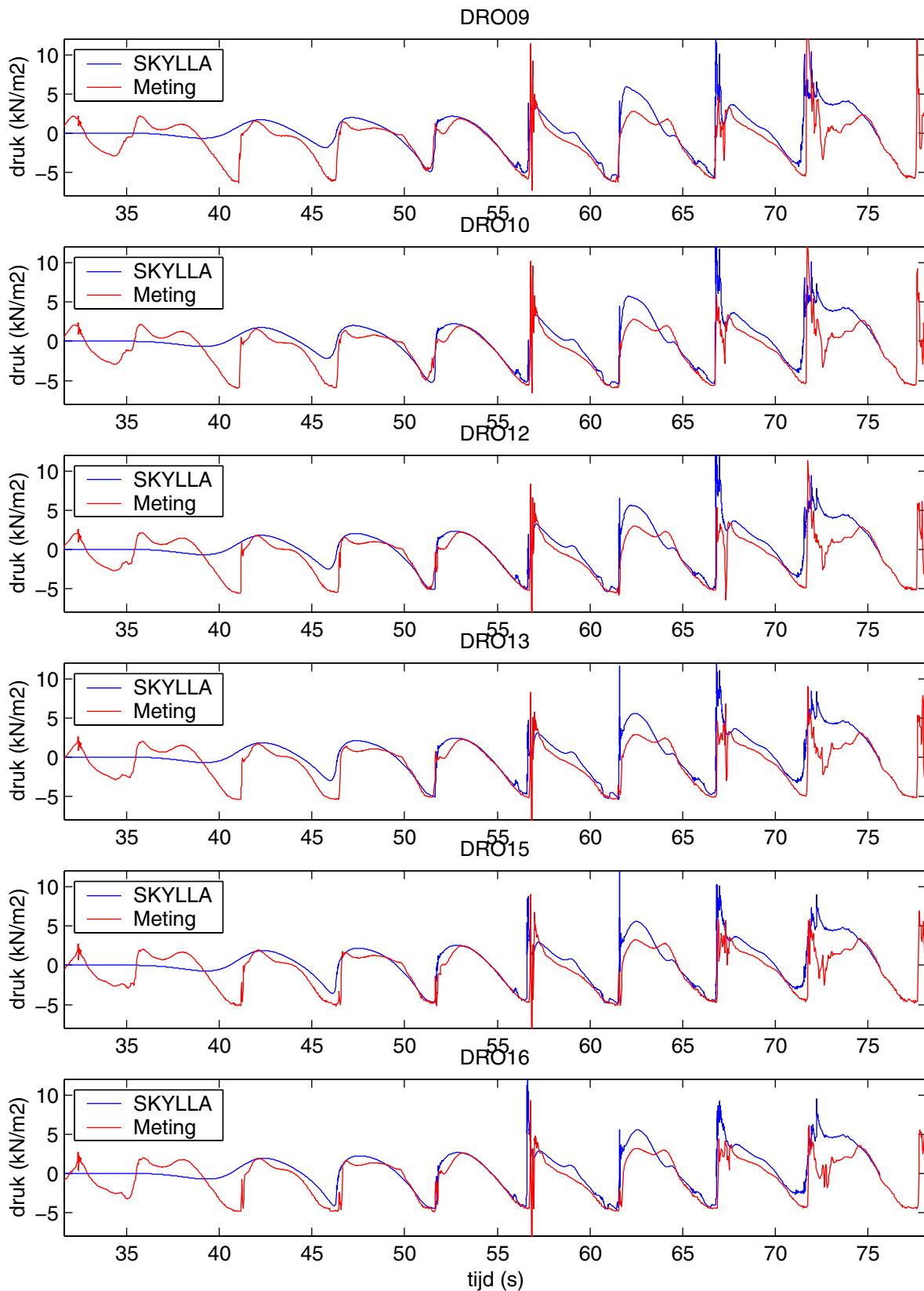


Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t1

23o06

t1

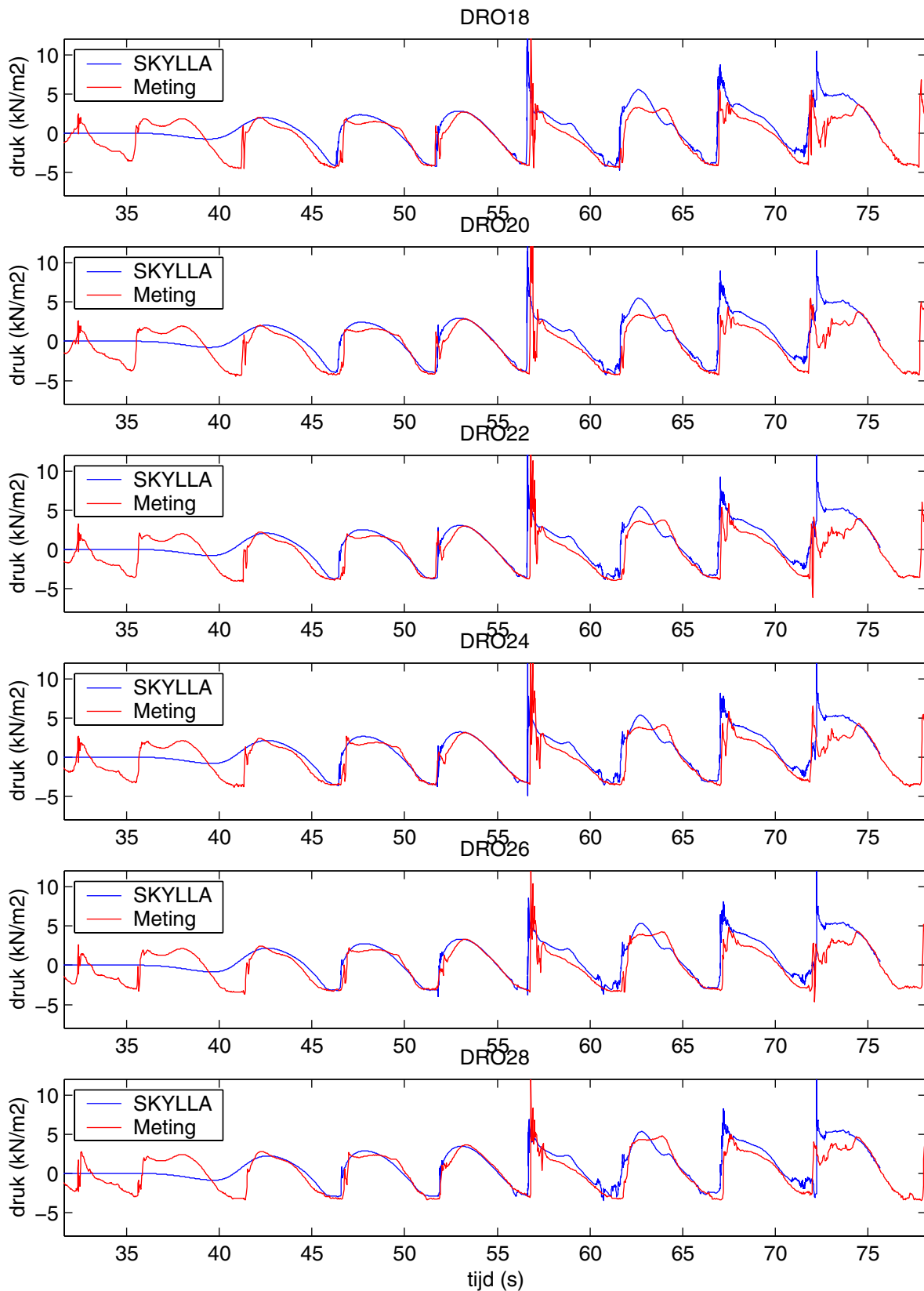




Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t1

23o06

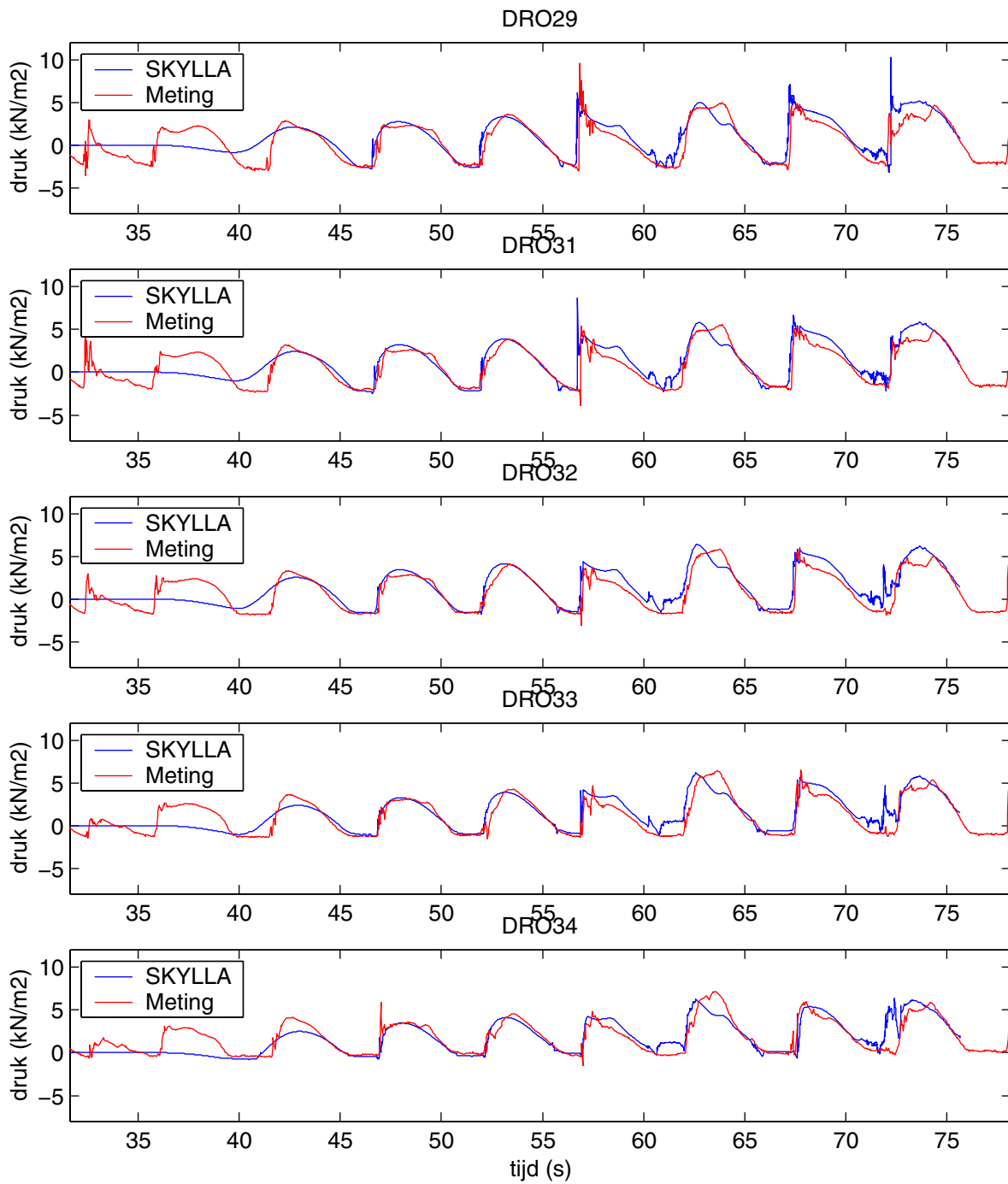
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t1

23o06

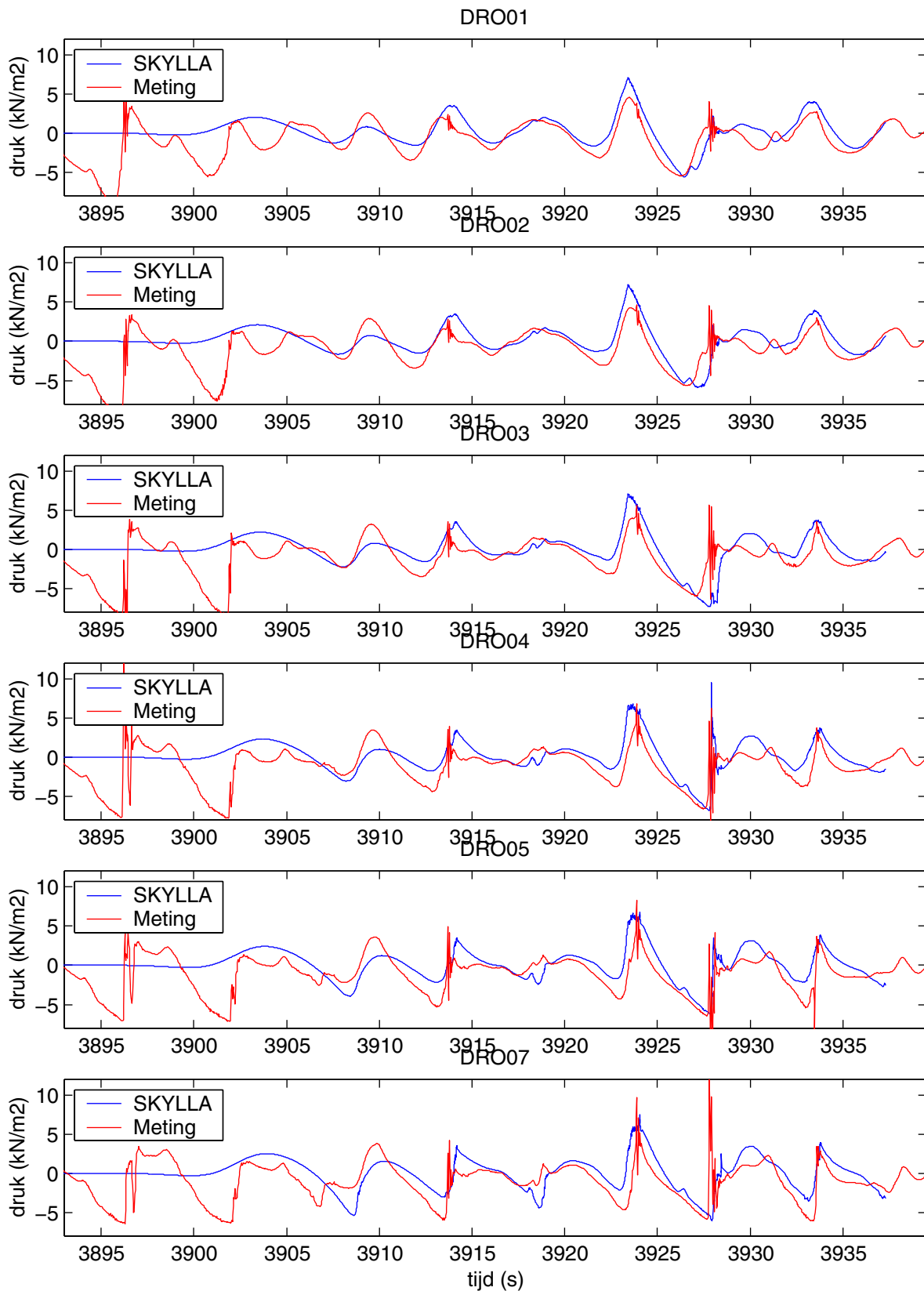
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t1

23o06

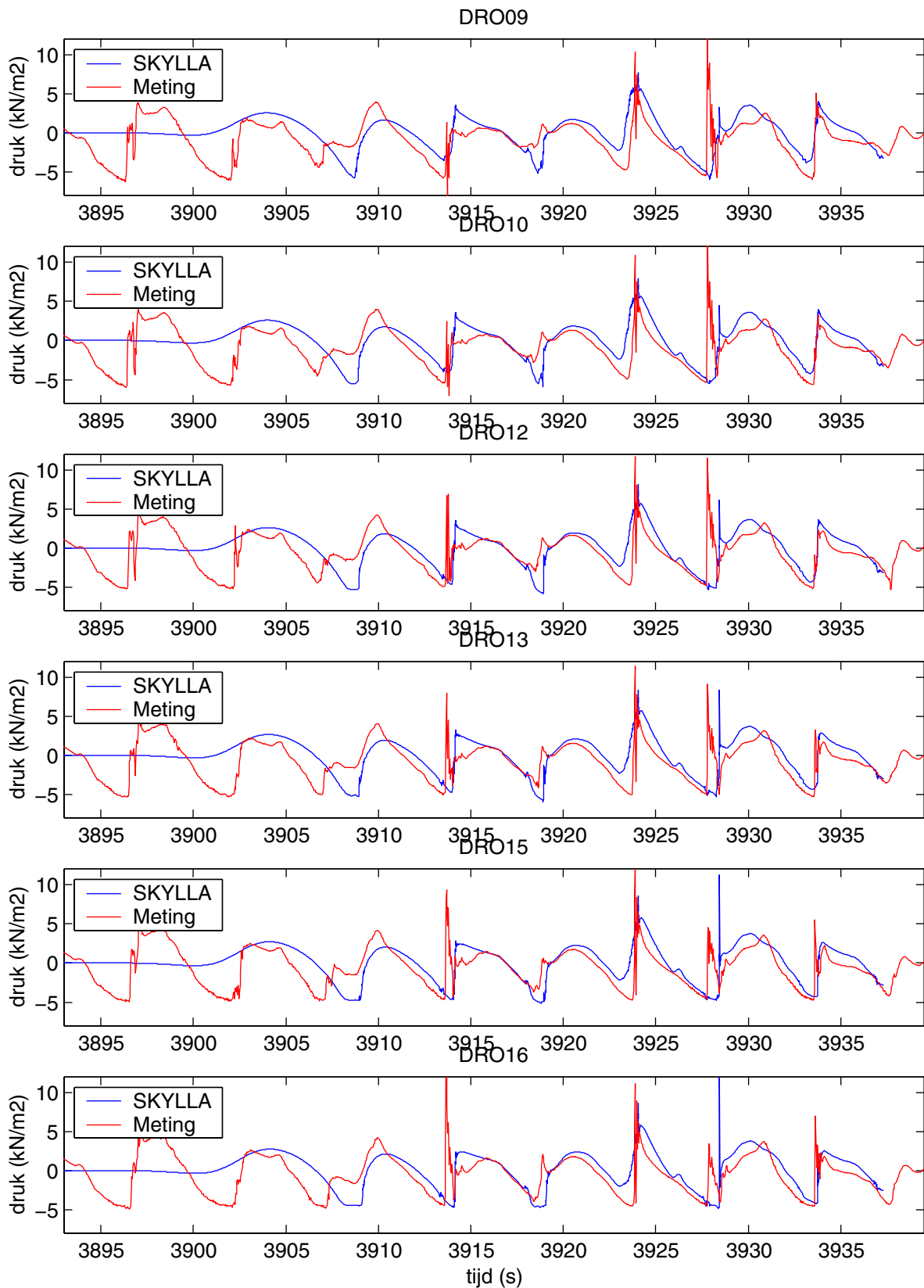
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t2

23o06

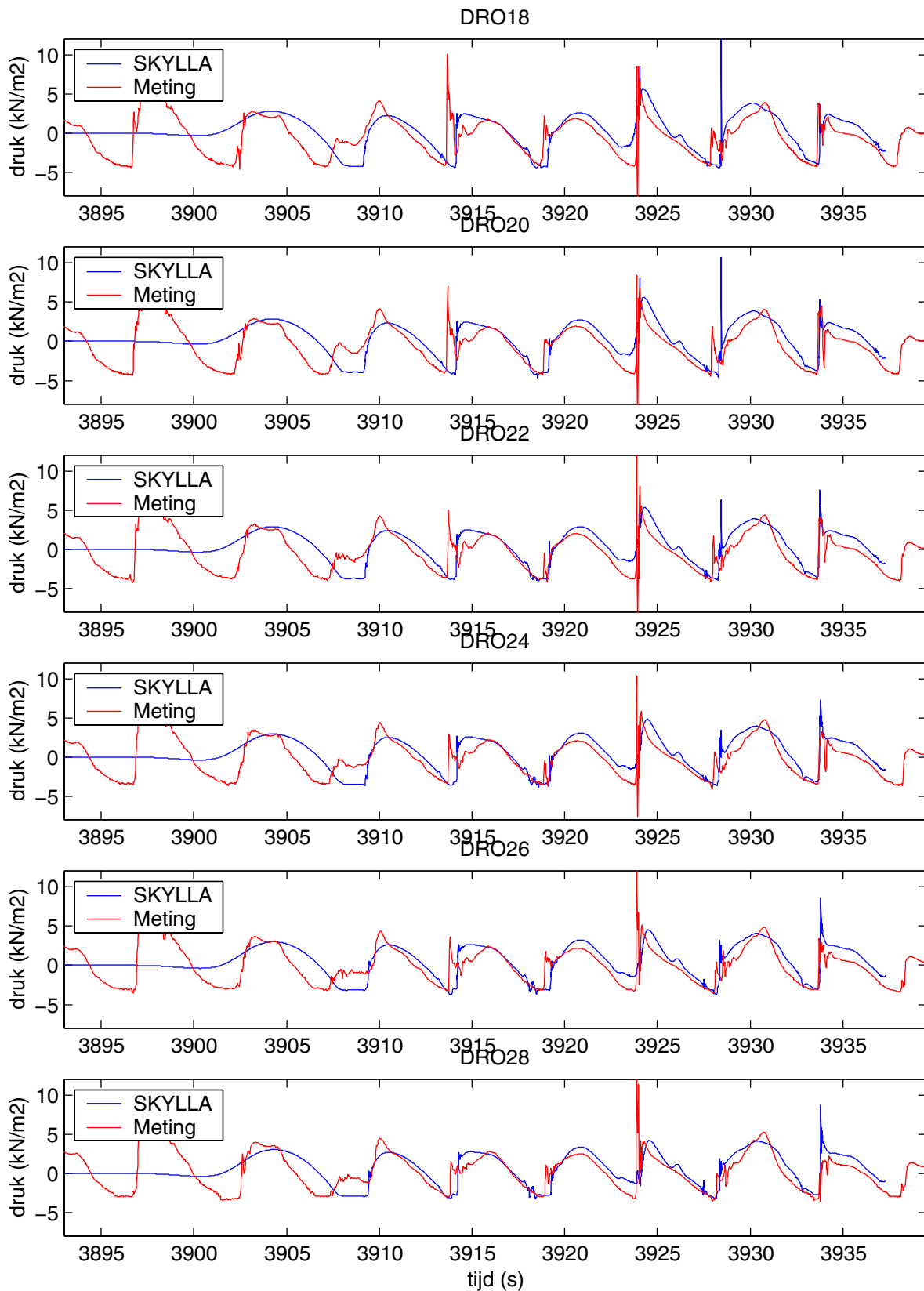
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t2

23o06

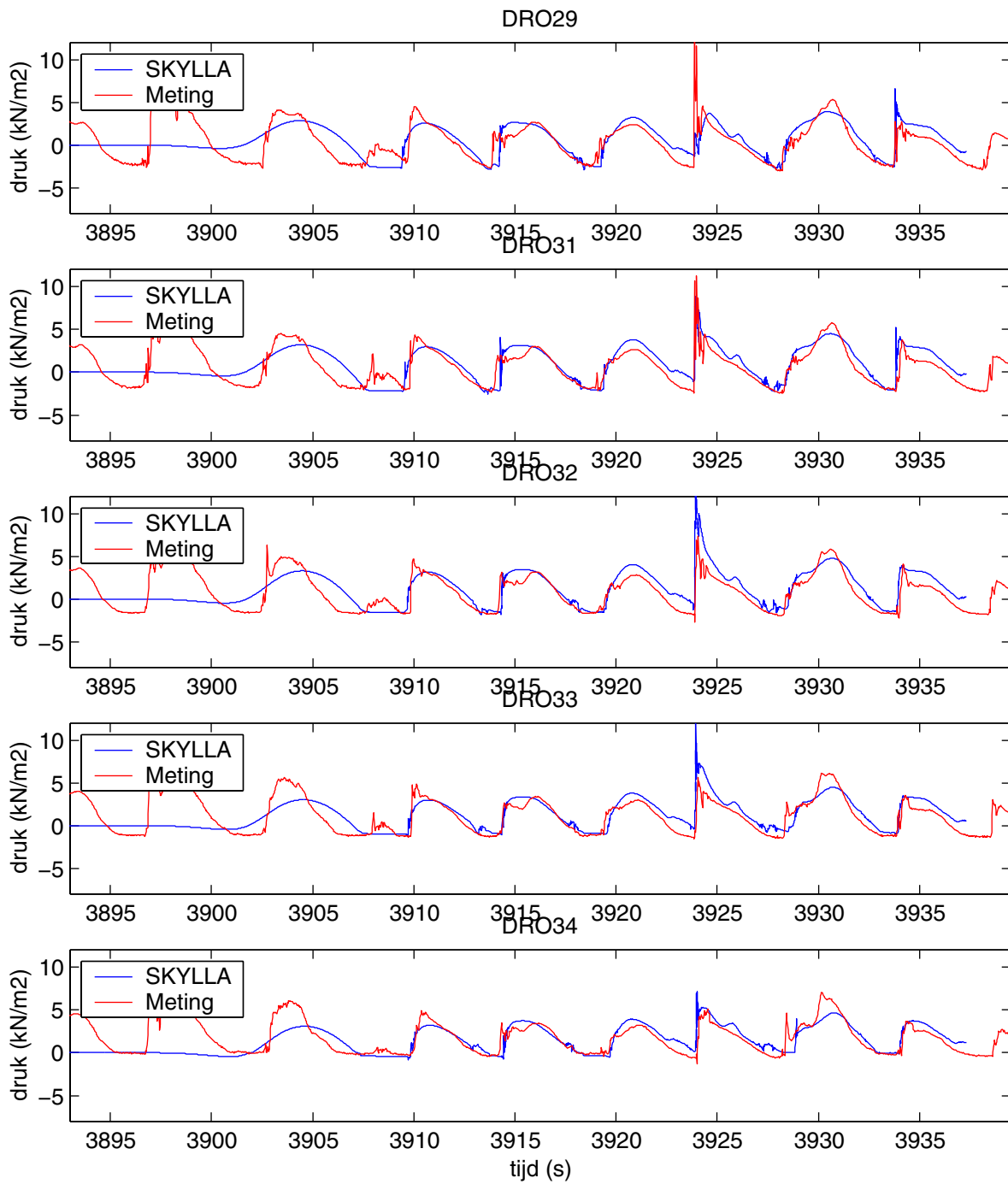
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t2

23o06

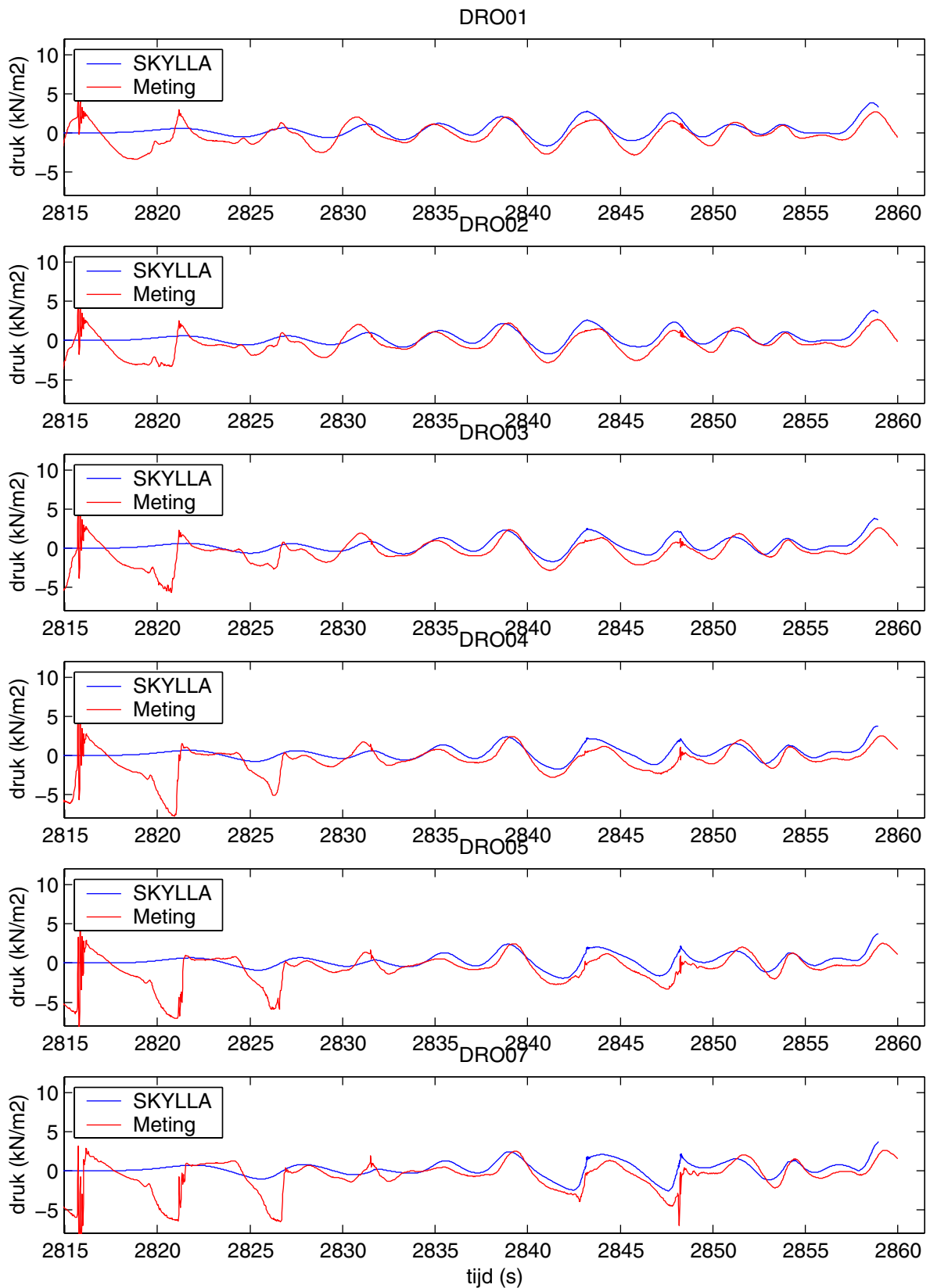
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t2

23o06

t2

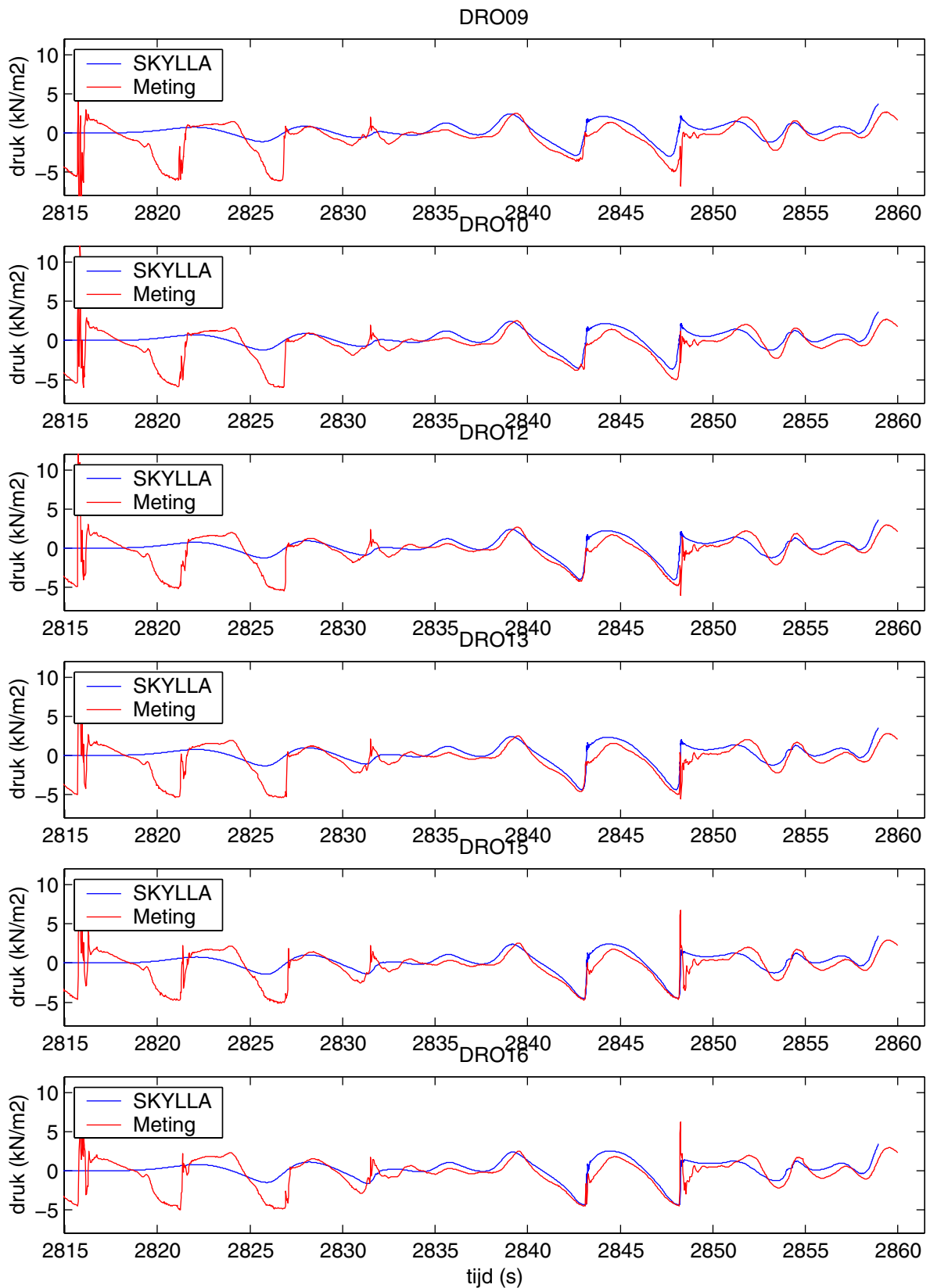


Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t3

23o06

t3

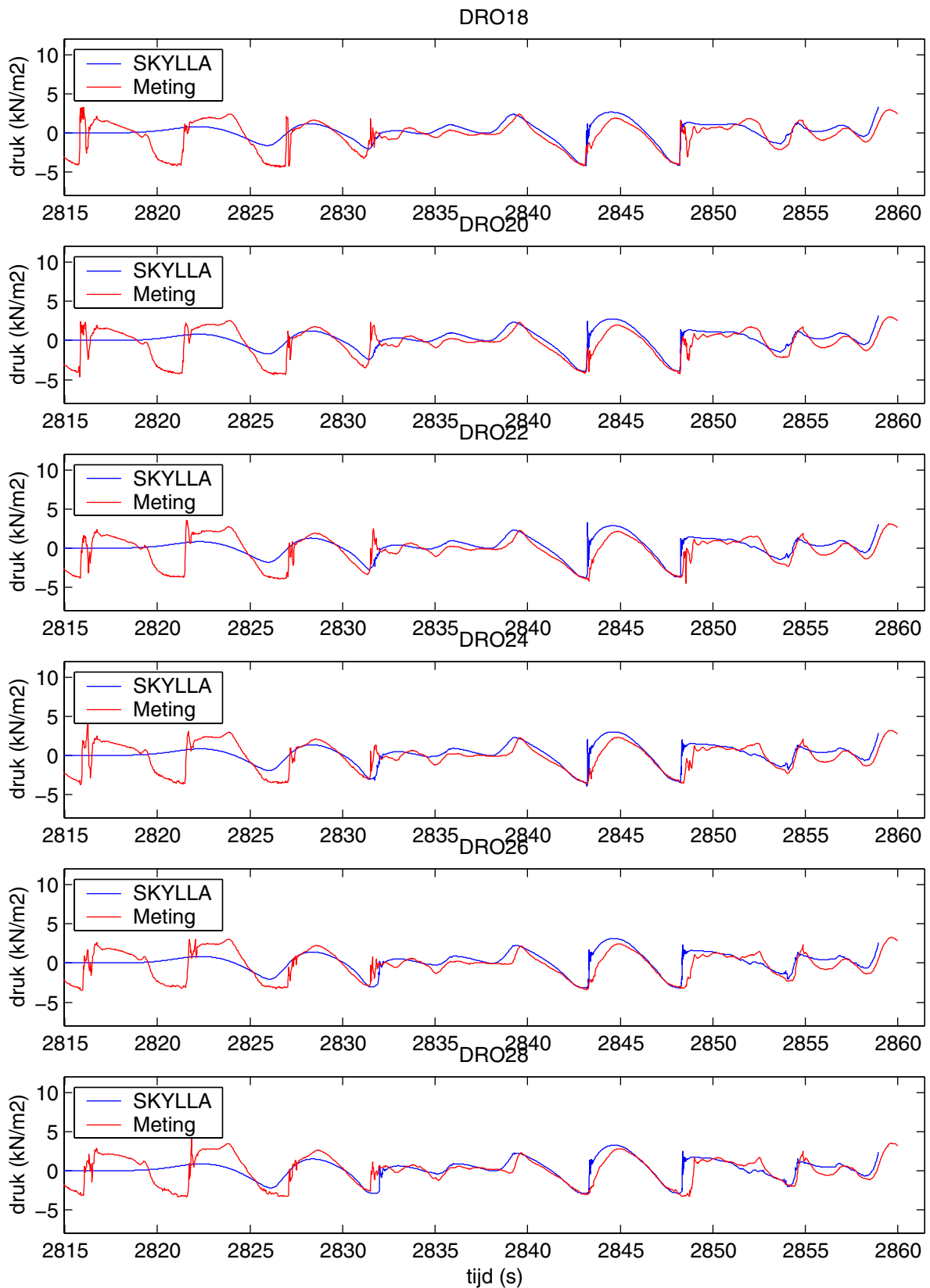




Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t3

23o06

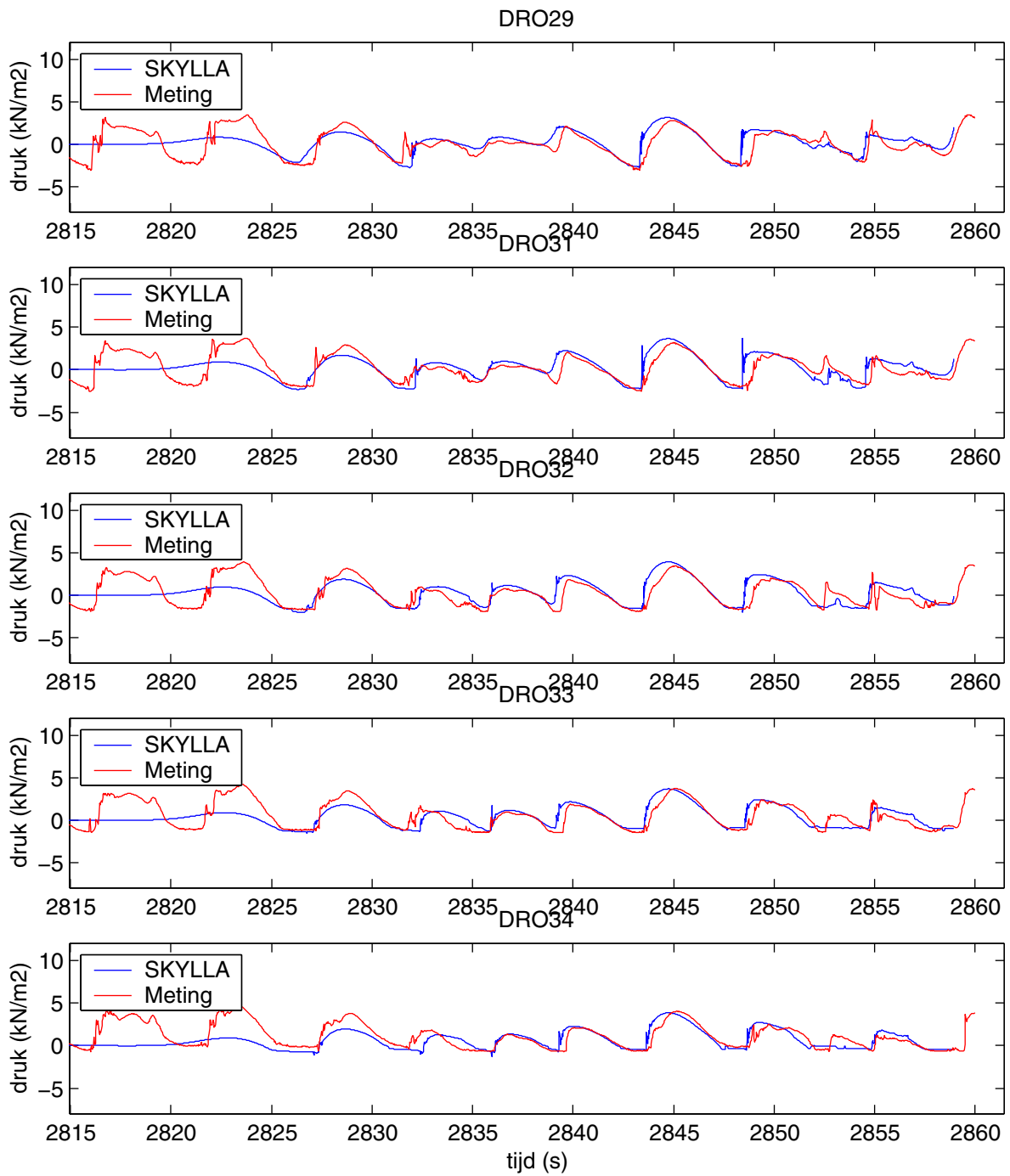
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t3

23o06

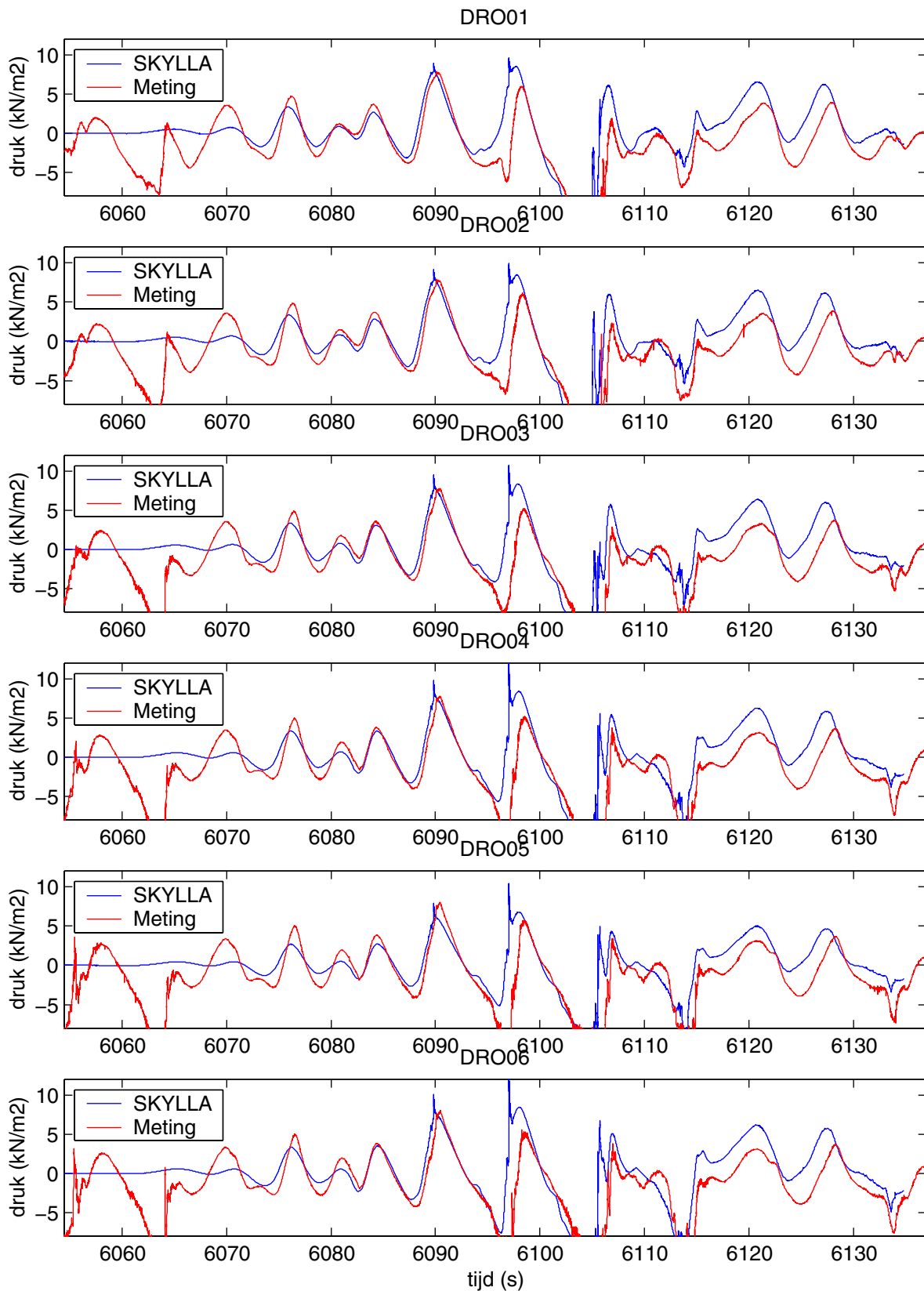
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef 23o06 op tijdstip t3

23o06

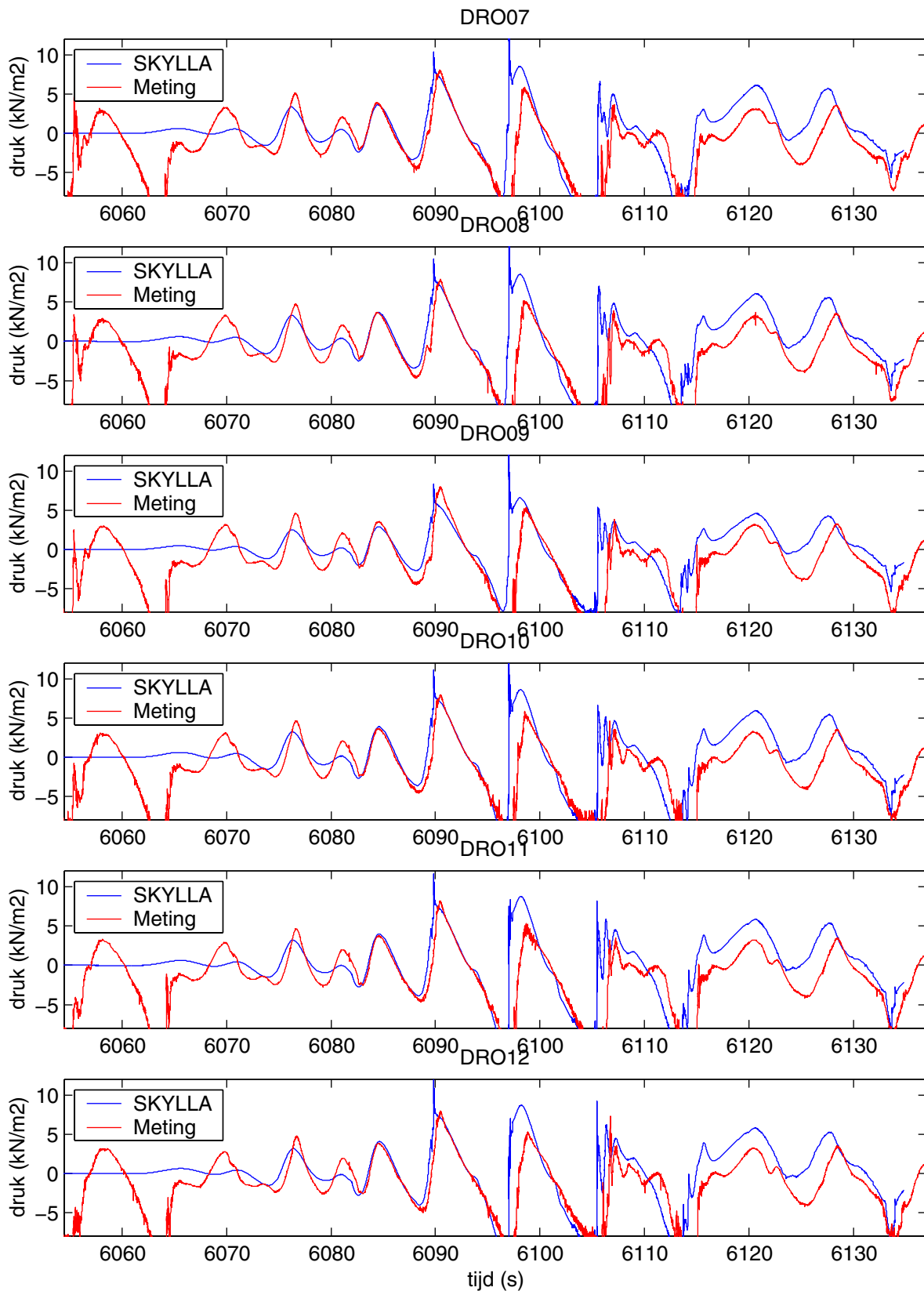
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t1

P022

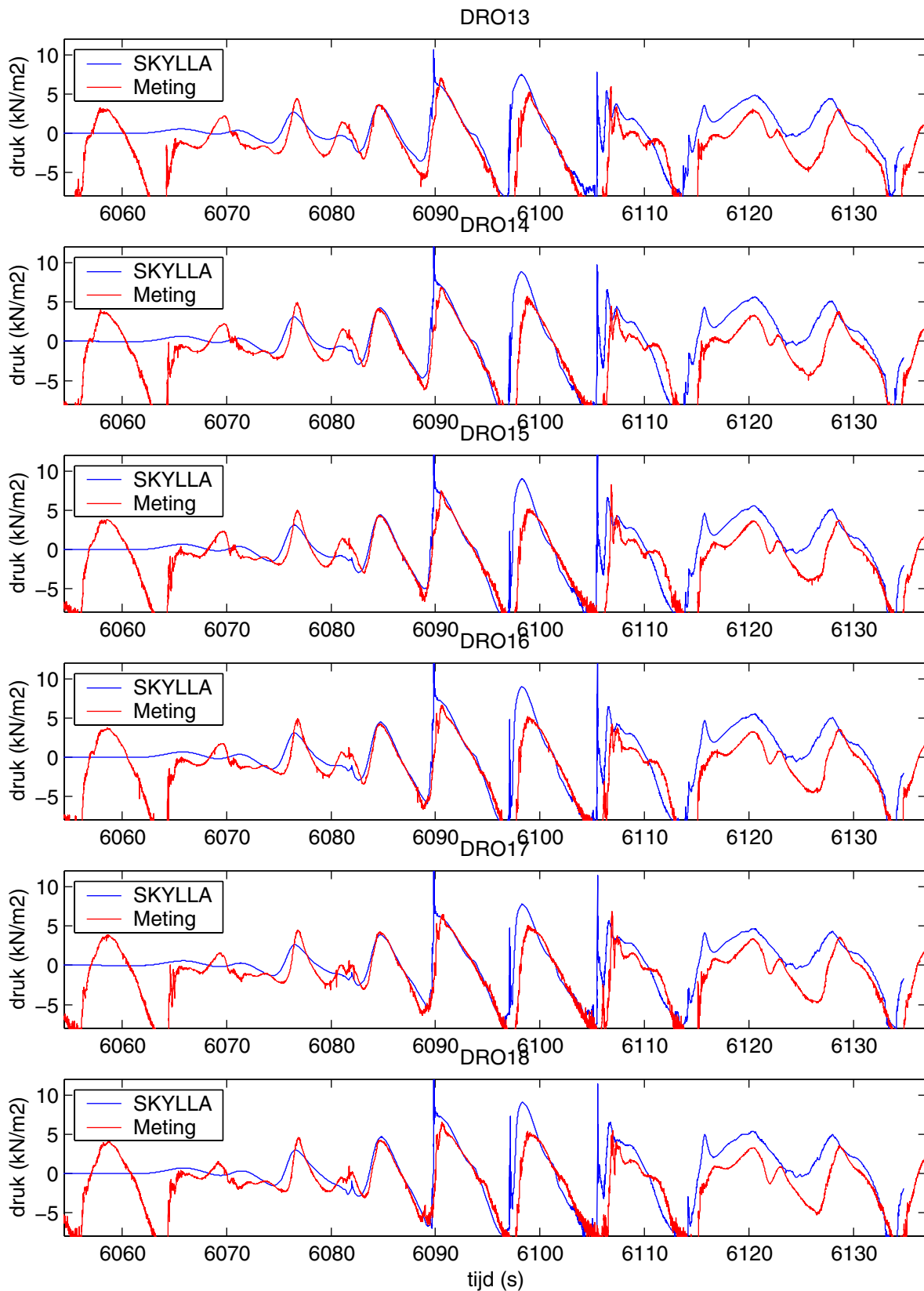
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t1

P022

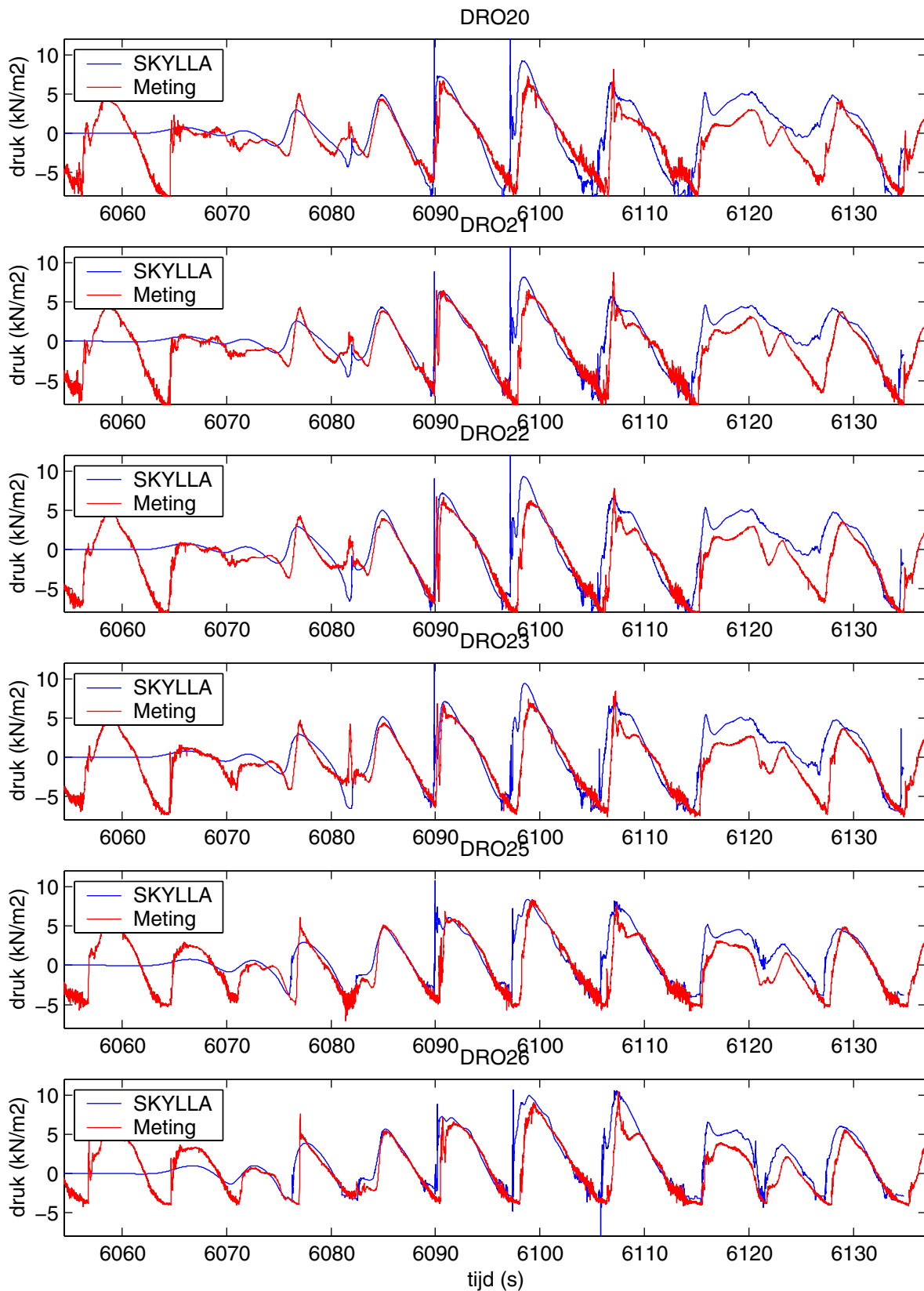
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t1

P022

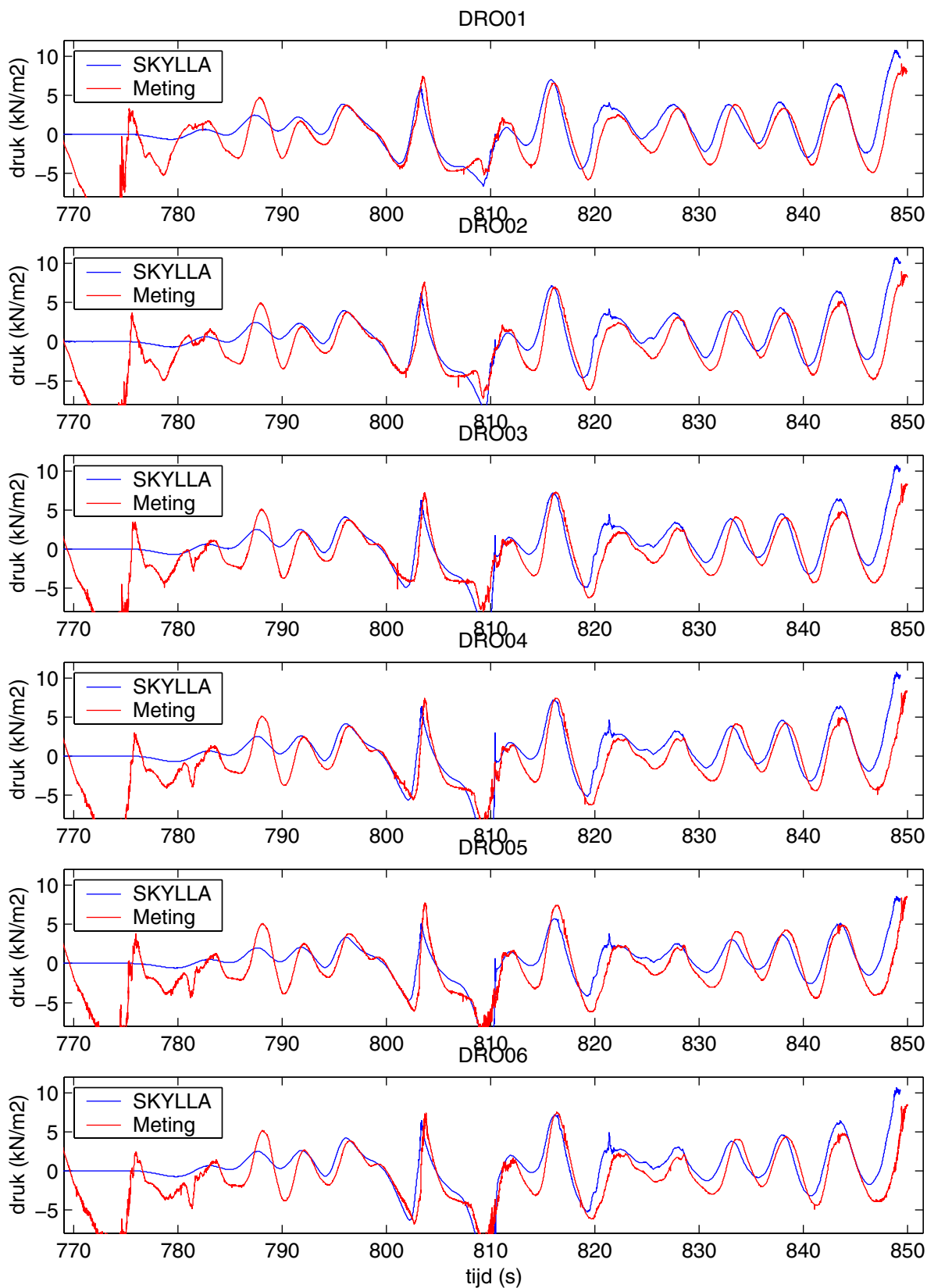
t1



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t1

P022

t1

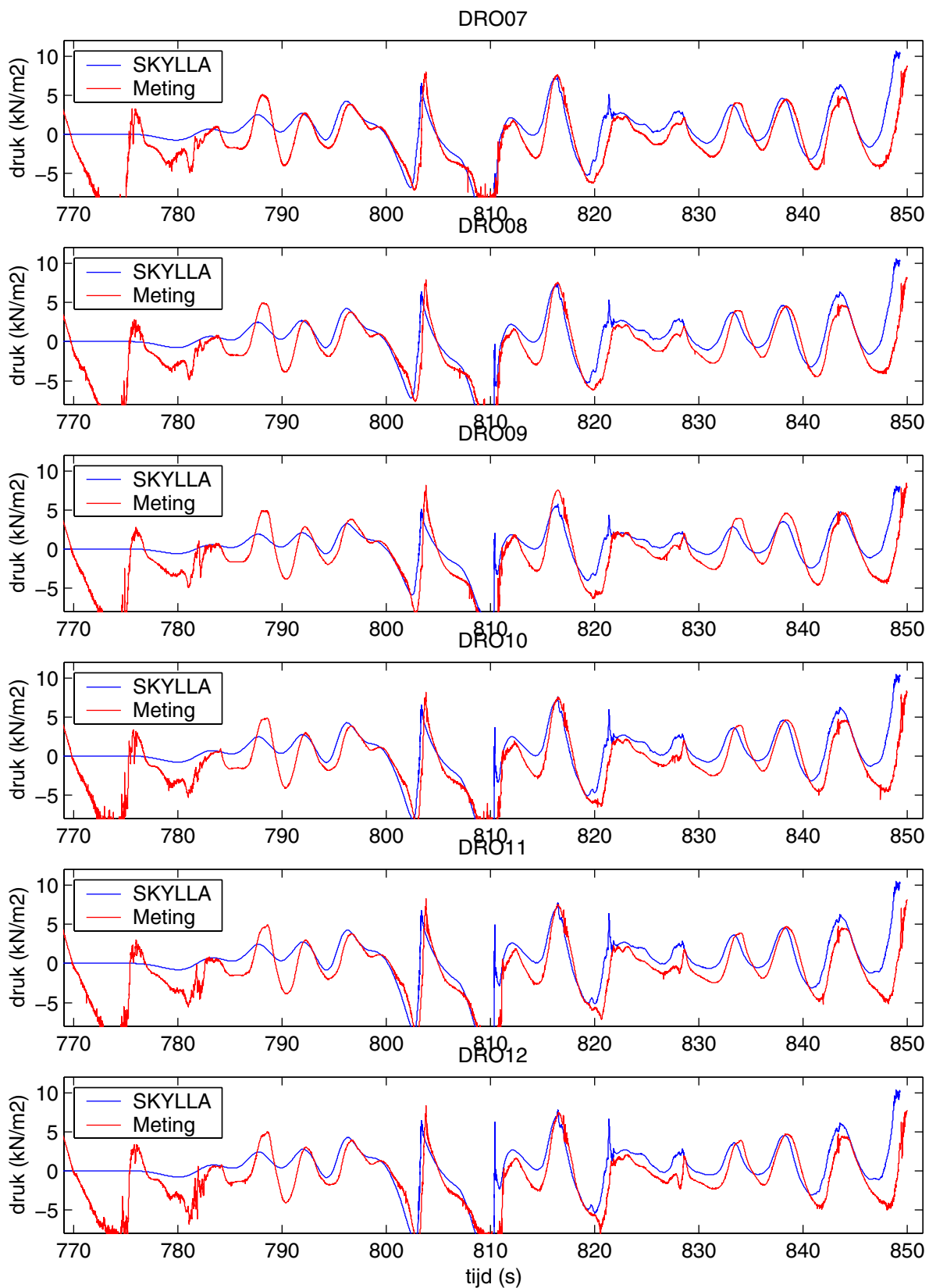


Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t2

P022

t2

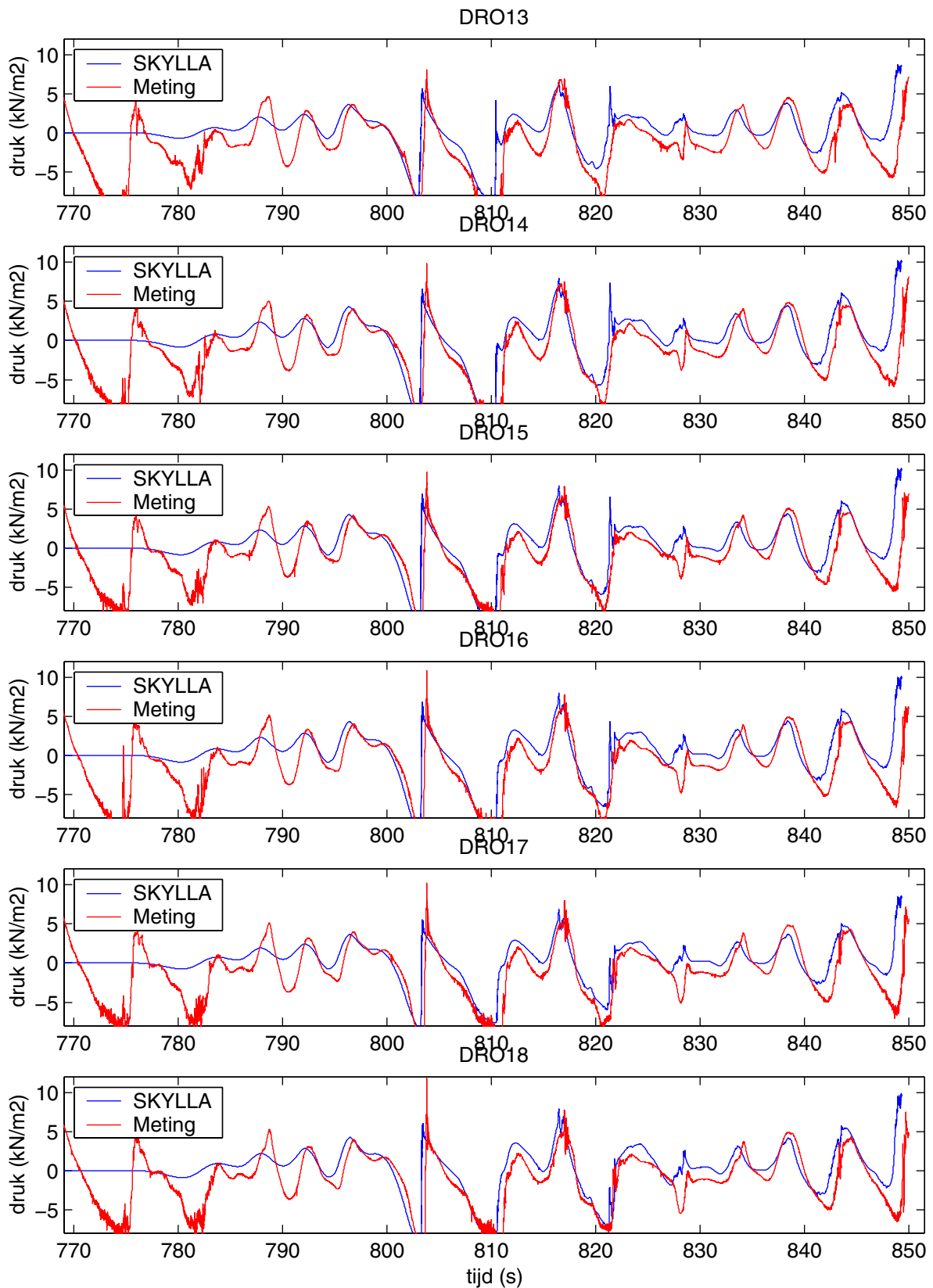




Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t2

P022

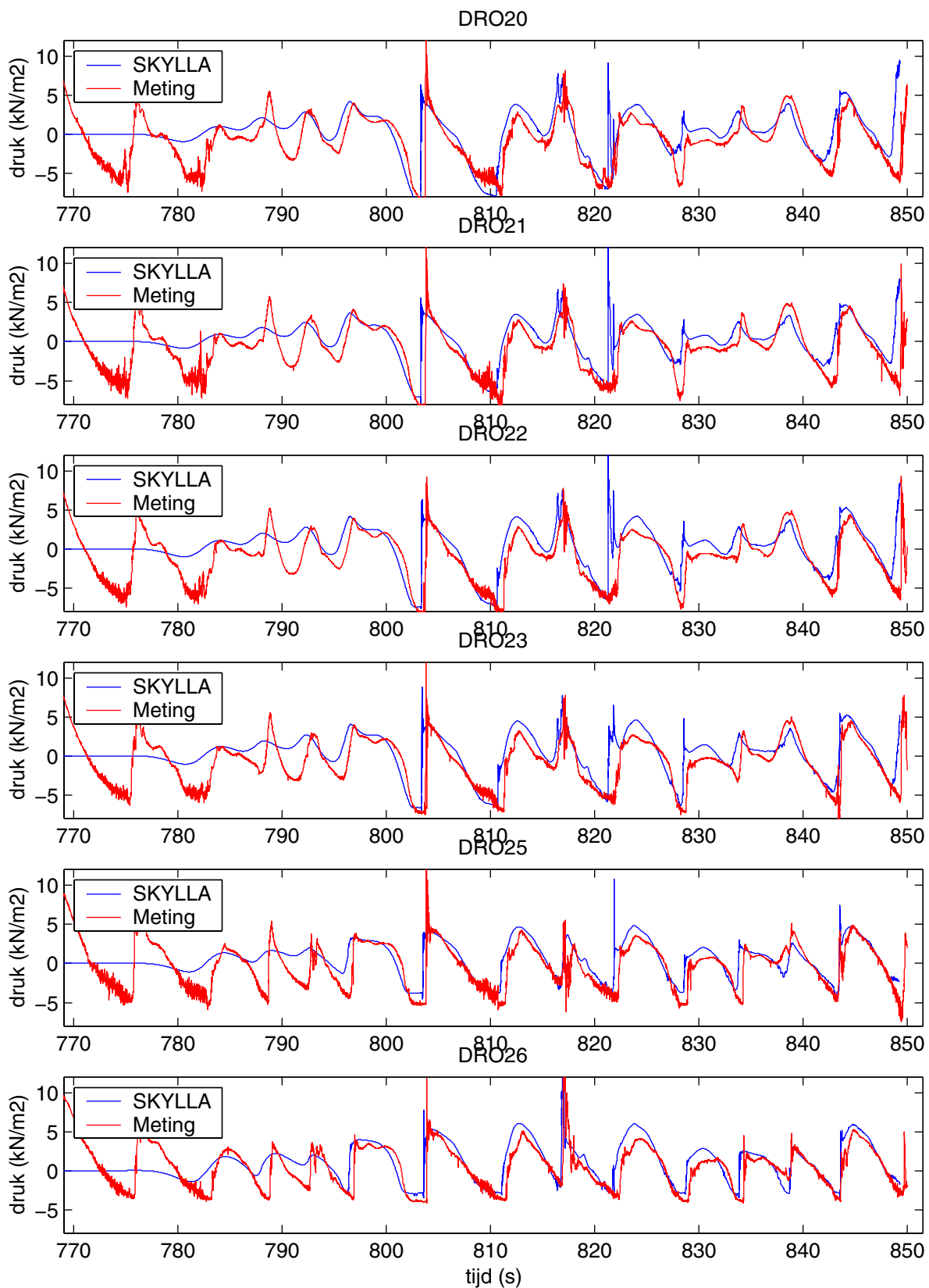
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t2

P022

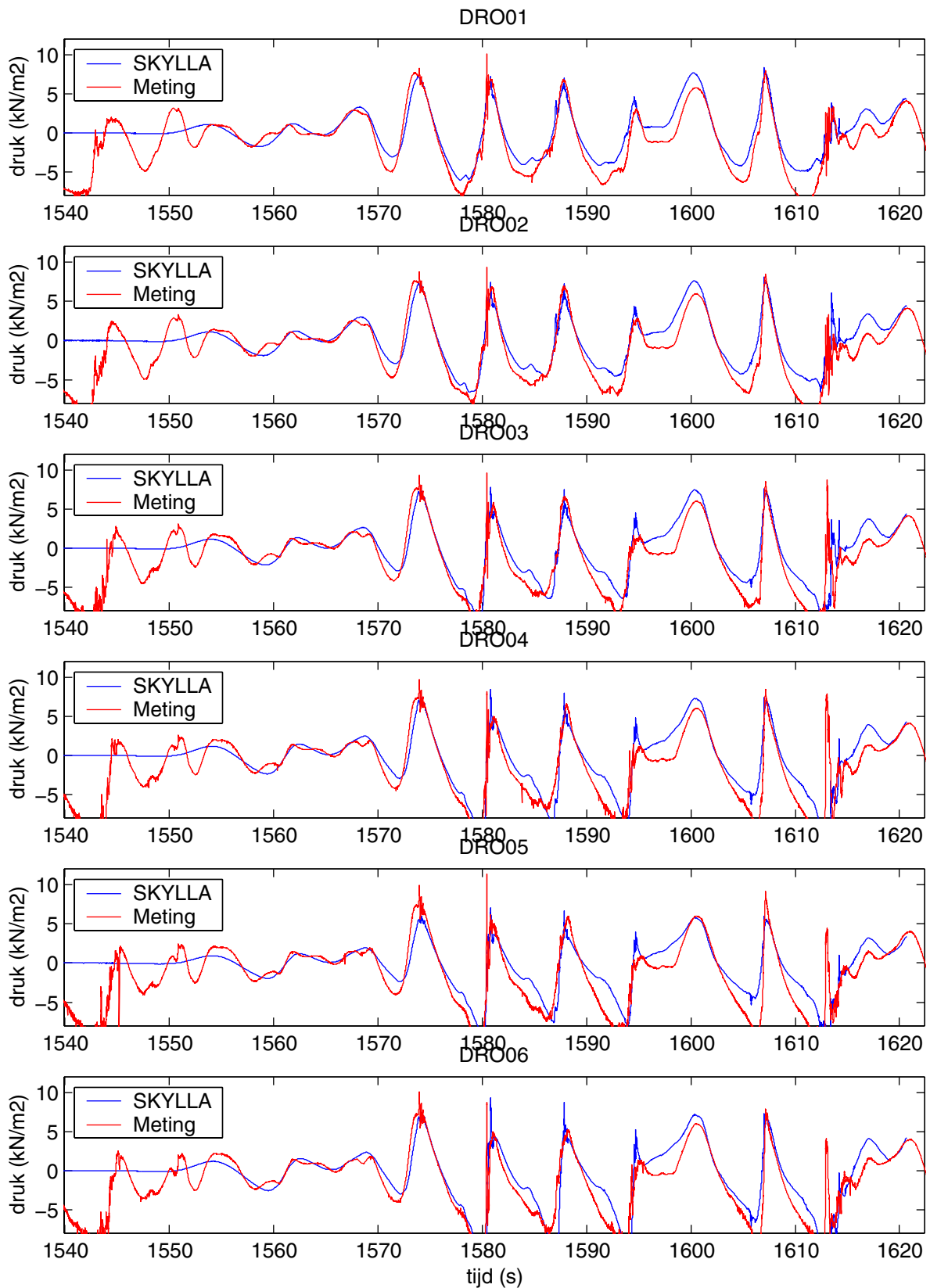
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t2

P022

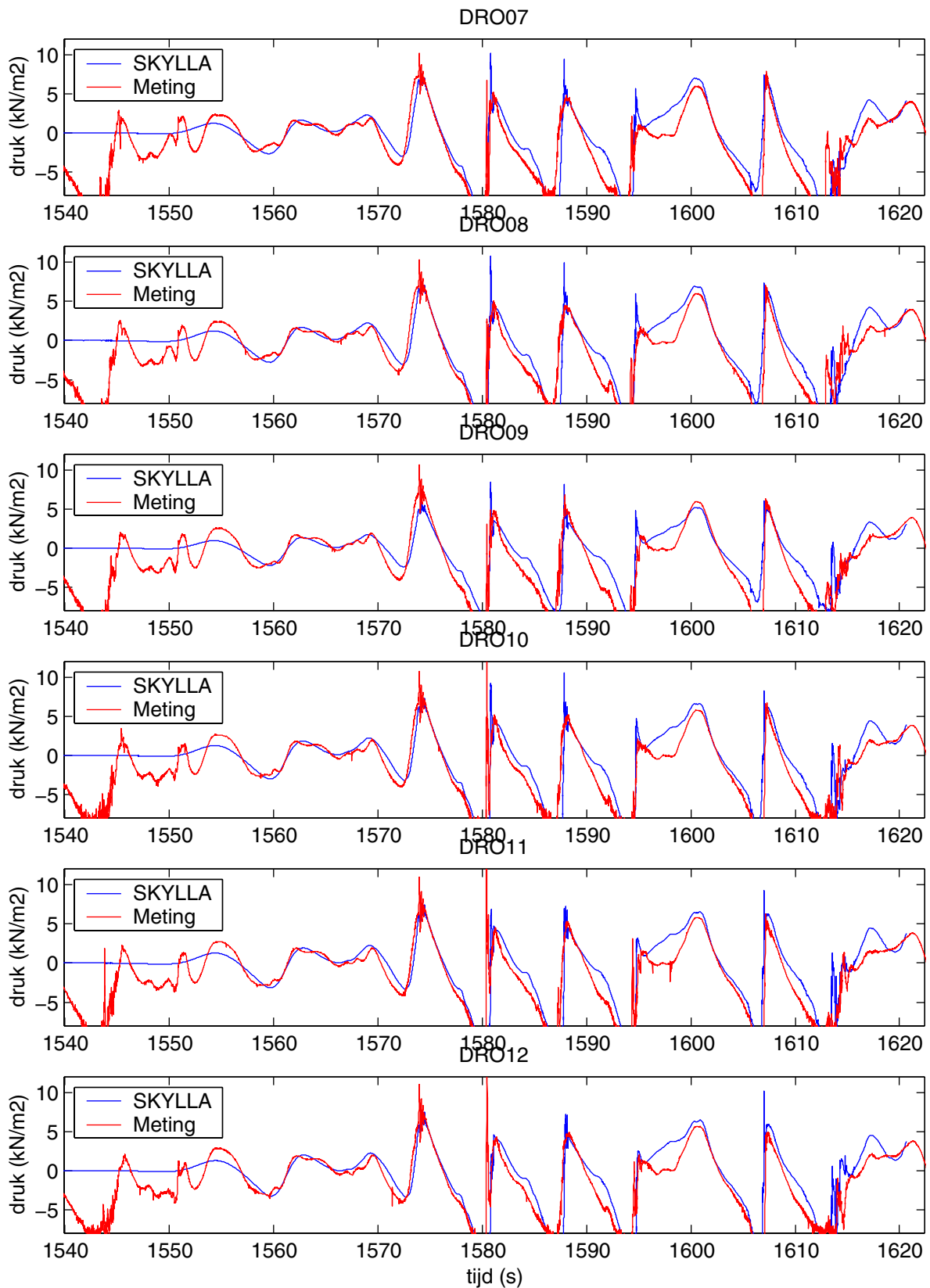
t2



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t3

P022

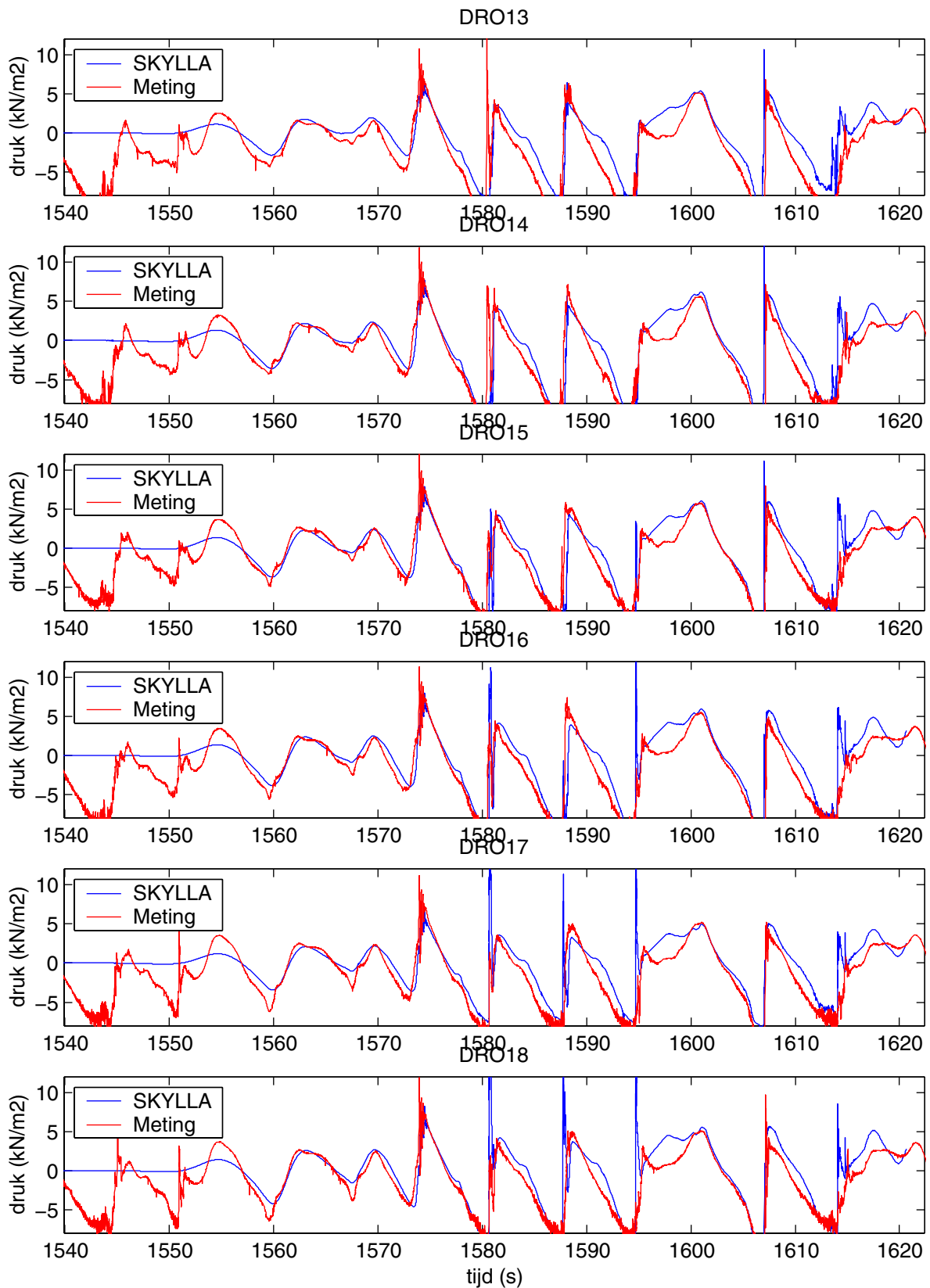
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t3

P022

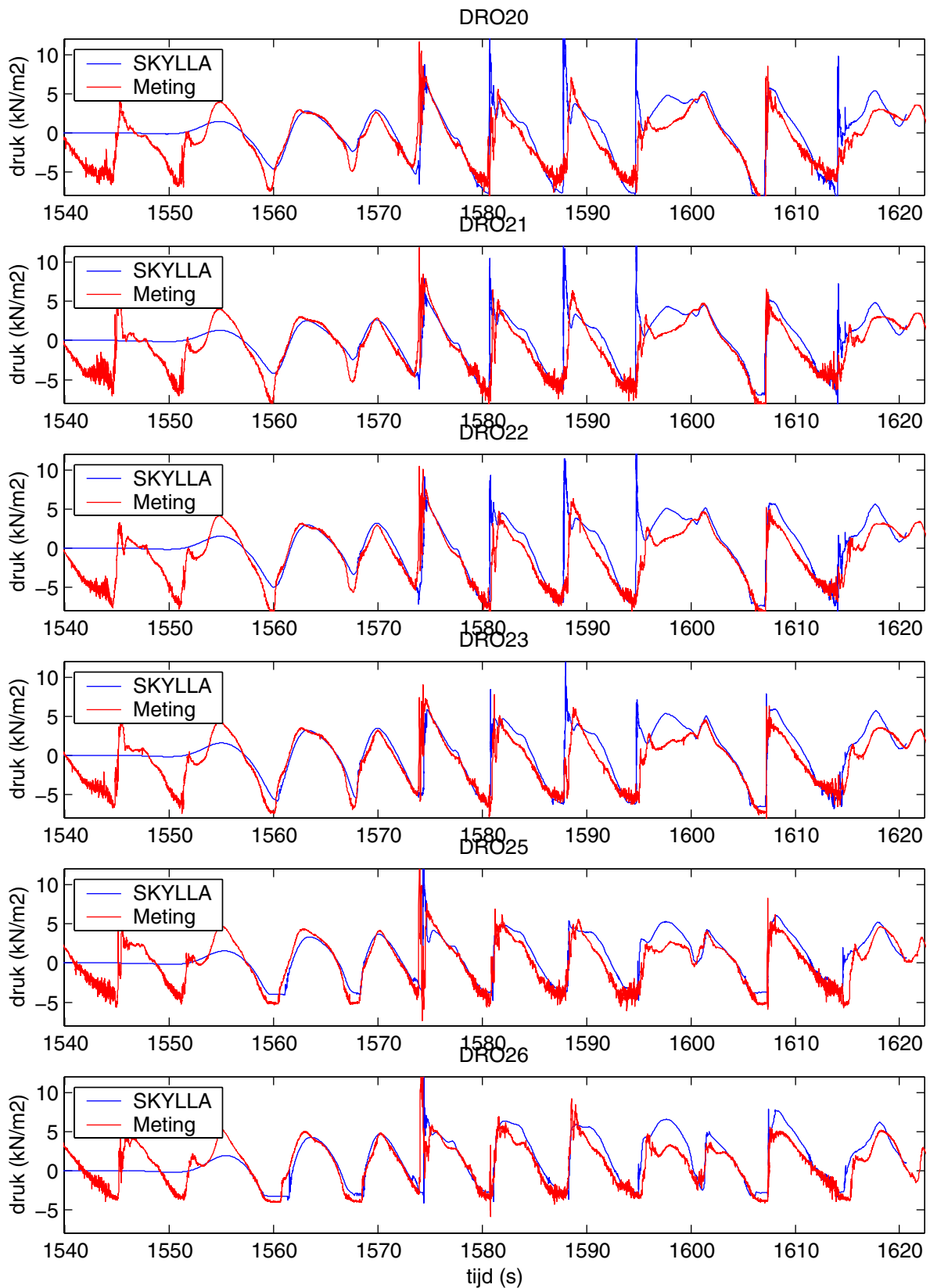
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t3

P022

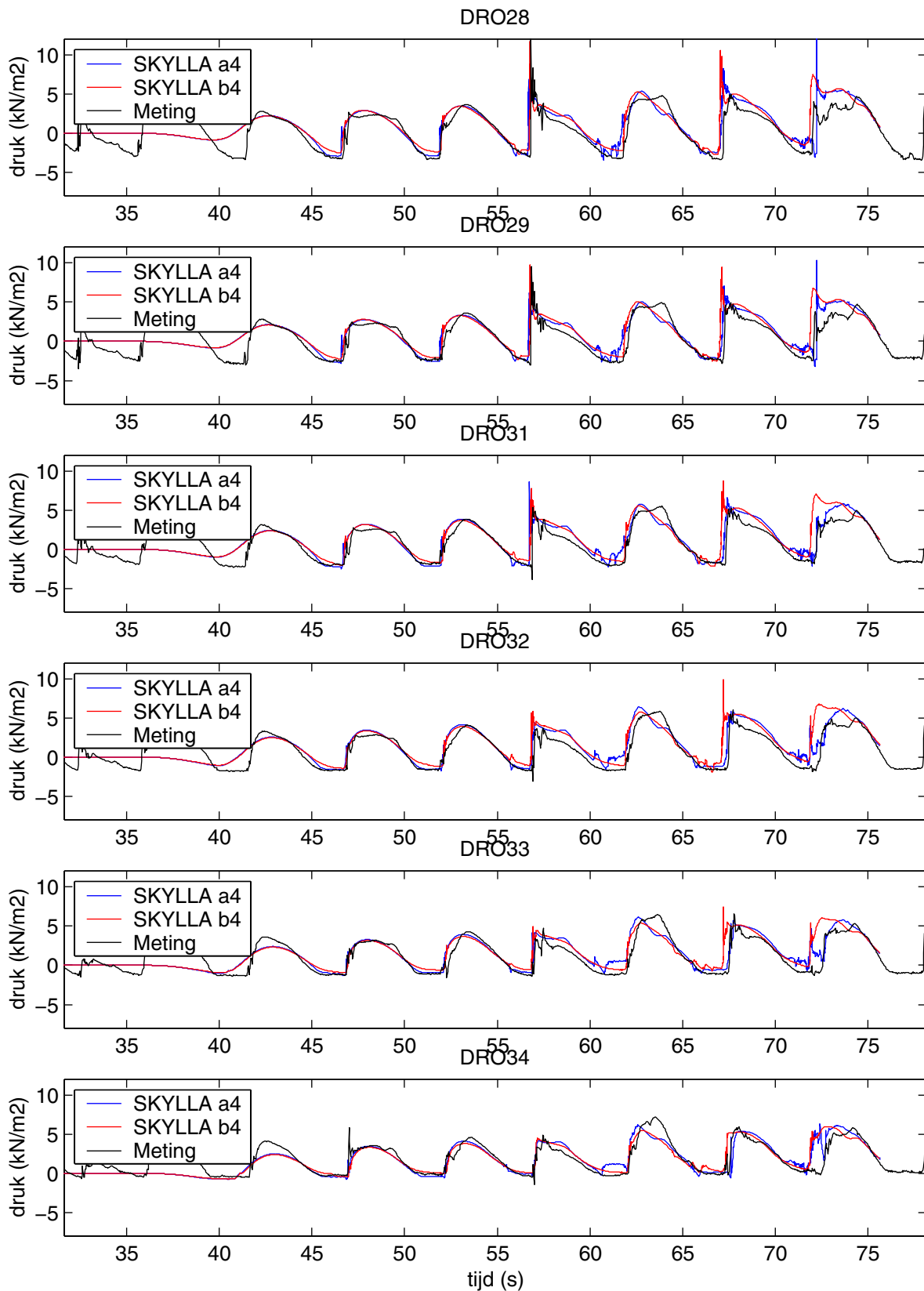
t3



Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t3

P022

t3

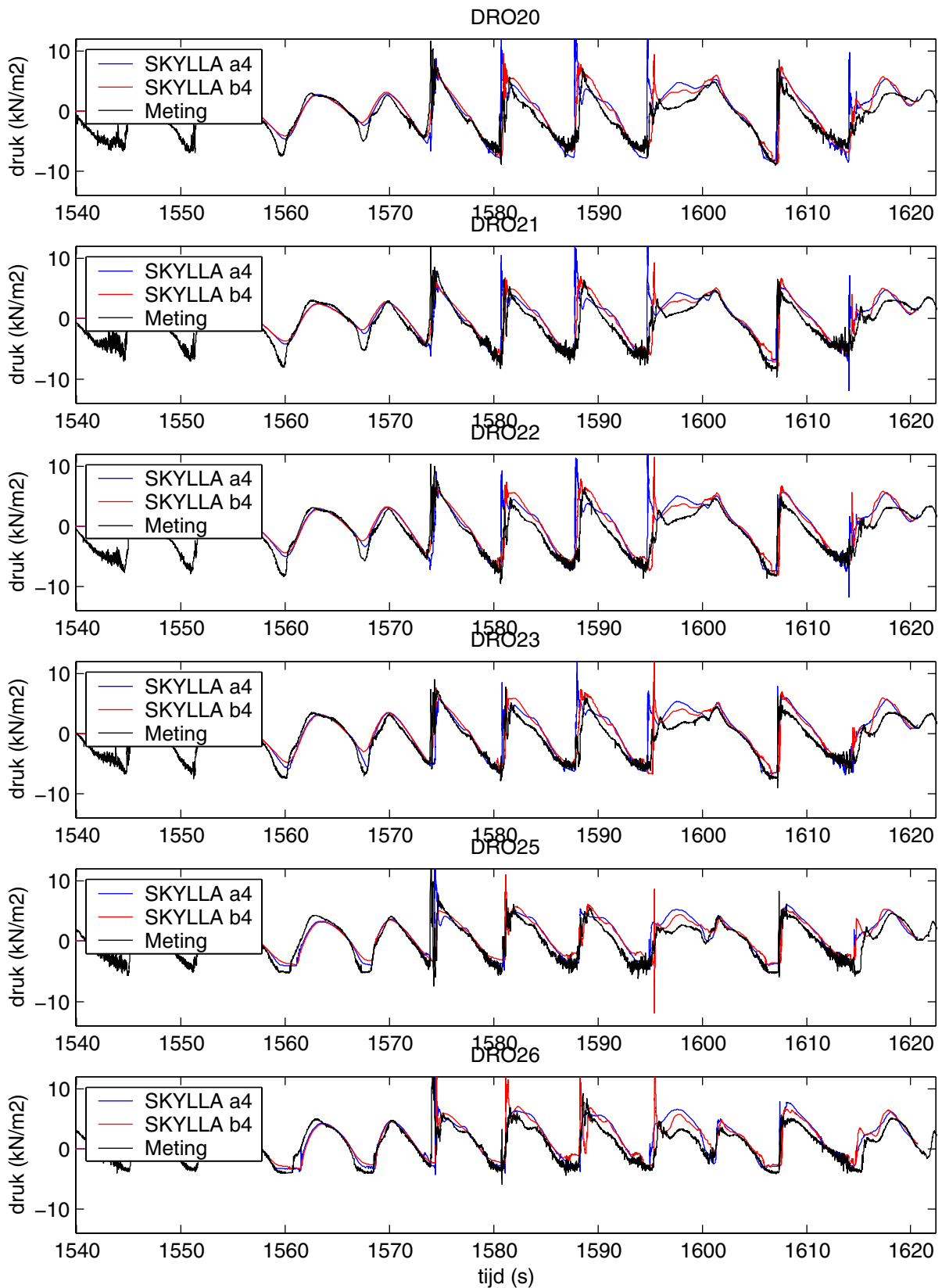


Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor proef 23o06 op tijdstip t1

23o06

t1

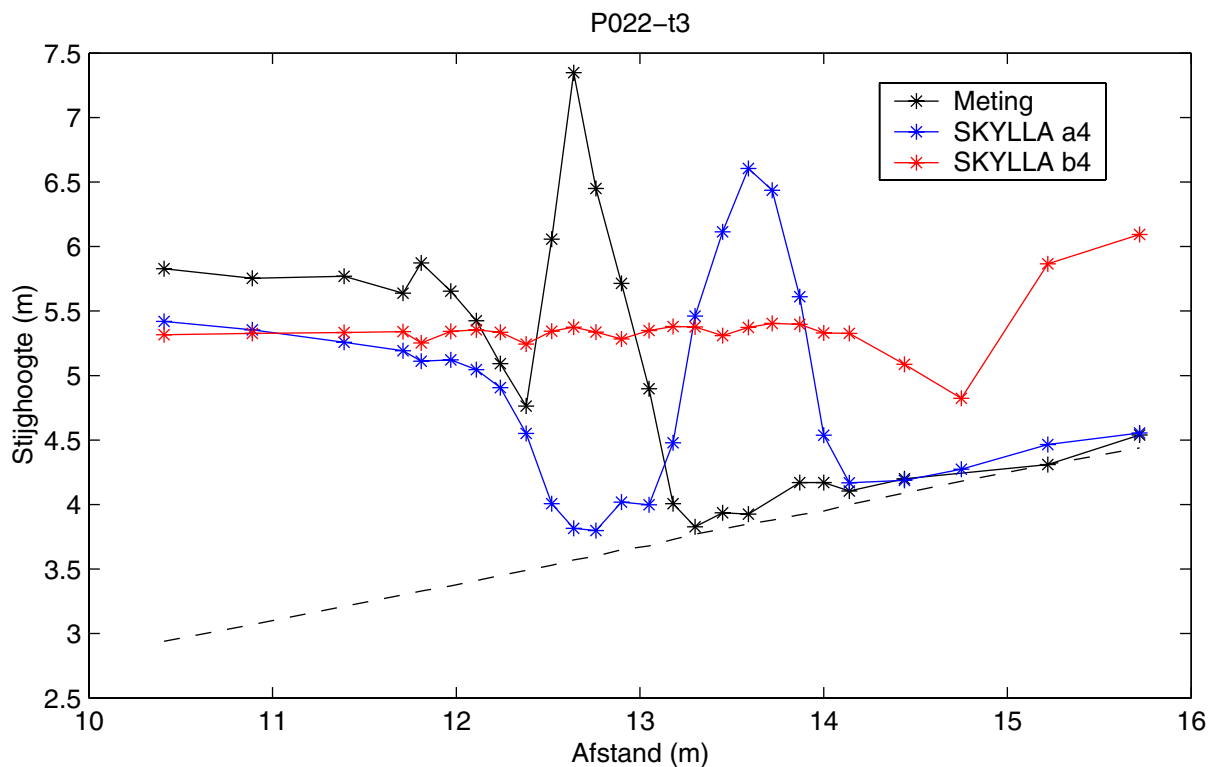
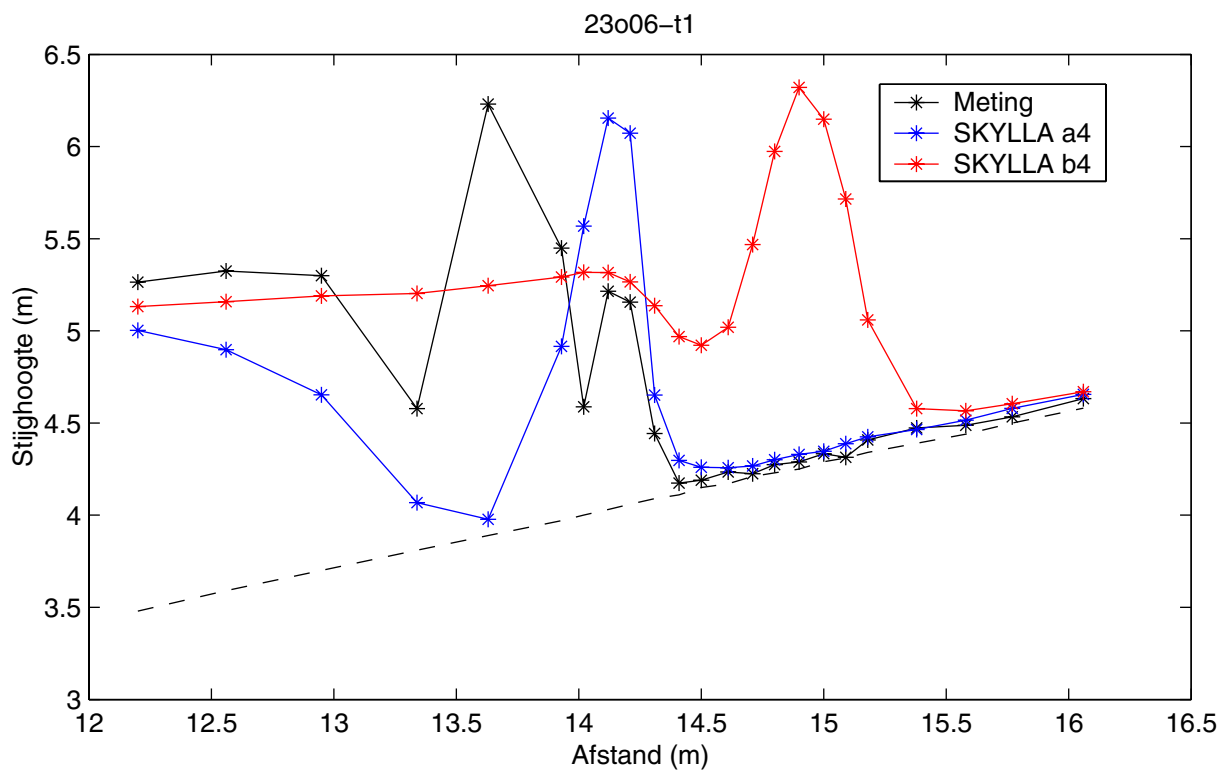




Vergelijking gemeten en berekende druksignalen voor  
 proef P022 op tijdstip t3

P022

t3



Golfklap voor tijdserie 23o06-t1 en P022-t3  
 Invloed van de wrijvingscoëfficiënt in SKYLLA op de golfklap

## **B Beschrijving SKYLLA**

## Beschrijving SKYLLA

### Algemene opbouw van het model

SKYLLA is een twee-dimensionaal (2DV) model dat speciaal geschikt is voor het modelleren van de golfbeweging rond constructies en de interactie van de golven met de constructie. De modellering van de stroming is gebaseerd op de incompressibele Navier-Stokes vergelijkingen, welke worden opgelost middels een zogenaamde Volume-of-Fluid (VOF) methode. Het model van Hirt and Nichols (1981) is gebruikt als basis voor verdere ontwikkeling. Het model is in staat om de gedetailleerde modellering van de oppervlaktegolven te combineren met stroming door poreuze media.

Omdat de rekencellen gedeeltelijk gevuld kunnen zijn, al dan niet in combinatie met ondoorlatend materiaal, kunnen constructies in detail gespecificeerd worden. Binnen de constructie kunnen gebieden met verschillende porositeit en doorlatendheid gespecificeerd worden. Zowel ondoorlatende taluds als combinaties van ondoorlatende taluds met doorlatende delen kunnen worden gemodelleerd. Hierdoor is het model in staat de golfbeweging rond een breed scala aan constructies te berekenen. Omdat in het huidige project alleen gebruik is gemaakt van volledig ondoorlatende constructies beperkt de verdere beschrijving van het model zich tot volledig ondoorlatende constructies.

Het rekengrid kan zodanig gekozen worden dat er gerekend wordt met kleine rekencellen in gebieden waar de stroming relatief complex is – te denken valt aan gebieden waar de grootste golfklappen optreden – terwijl in de gebieden met een relatief eenvoudig stroombeeld volstaan kan worden met grotere rekencellen. Deze mogelijkheid reduceert de benodigde rekentijd aanzienlijk.

### Vergelijkingen

De heersende vergelijkingen voor de externe stroming (vrije-oppervlakstroming) zijn:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial u w}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x = 0$$
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u w}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \nu_t \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z = 0$$

(B.1)

waar  $u$  en  $w$  de snelheden in de  $x$  and  $z$  richting zijn en  $\nu_t$  de turbulente viscositeit. Deze laatste wordt constant verondersteld. Het grid is te grof om turbulentie direct te modelleren. Dit impliceert dat de vergelijkingen de gemiddelde stroming beschrijven zonder de turbulente componenten mee te nemen.

Aan de voorwaarde van behoud van massa,  $\partial u / \partial x + \partial w / \partial z = 0$ , wordt voldaan, zowel in het gebied waar het vrije wateroppervlak wordt gemodelleerd als in de doorlatende gebieden.

Dit wordt bereikt door de Poissonvergelijking voor de druk op te lossen, hetgeen resulteert in een drukveld voor een gegeven snelheidsveld op ieder tijdstip.

SKYLLA is een randgedreven programma. Dit betekent dat er randvoorwaarden moeten worden opgelegd om de ontbrekende informatie (in dit geval de snelheden) aan de randen op te lossen. De linker- en rechterrاند van het model kunnen open of gesloten worden gekozen. In het eerstgenoemde geval kunnen zowel regelmatige/monochromatische als onregelmatige/random golven worden opgelegd aan de rand. Voor gereflecteerde golven gedraagt deze rand zich als een zwak doorlatende rand. Dat wil zeggen dat de rand gereflecteerde golven voor het grootste gedeelte door laat en dat slechts een klein deel wordt teruggekaatst. Indien een rand wordt gemodelleerd als een gesloten rand worden alle golven volledig teruggekaatst. Aan de bodem kan een no-slip, een free-slip of een partial-slip randvoorwaarde opgelegd worden.

### **Volume-of-Fluid (VOF) methode**

Het oplossen van de Navier-Stokes vergelijkingen resulteert in een snelheidsveld op een gegeven tijdstip. Wanneer dit wordt toegepast op de golfvoortplanting resulteert dit veranderde snelheidsveld in een verandering van het vrije wateroppervlak. Complexe stromingen, zoals deze optreden bij zogenaamde overslaande golven, laten zich moeilijk beschrijven aan de hand van differentiaalvergelijkingen die de positie van het vrije wateroppervlak beschrijven ('*surface tracking methods*'). Dit probleem doet zich niet voor indien gebruik wordt gemaakt van een zogenaamde '*surface capturing method*' zoals bijvoorbeeld de VOF-methode van Hirt en Nichols (1981). Bij deze methode kan het stromingsdomein aangepast worden zonder een beschrijving te geven van de positie van het vrije wateroppervlak. Hierdoor kunnen zeer complexe stromingen en vrije wateroppervlakken gemodelleerd worden. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan de meervoudig verbonden vrije wateroppervlakken die optreden bij brekende golven wanneer deze het onderliggende wateroppervlak raken.

De VOF-methode maakt gebruik van vloeistoffracties, dat wil zeggen, de relatieve hoeveelheid vloeistof in een cel. Deze vloeistoffractie ( $F$ ) kan variëren tussen 0 (leeg) en 1 (volledig gevuld). Het transport van deze vloeistoffractie naar de naburige cellen kan berekend worden met behulp van de Navier-Stokes vergelijkingen.

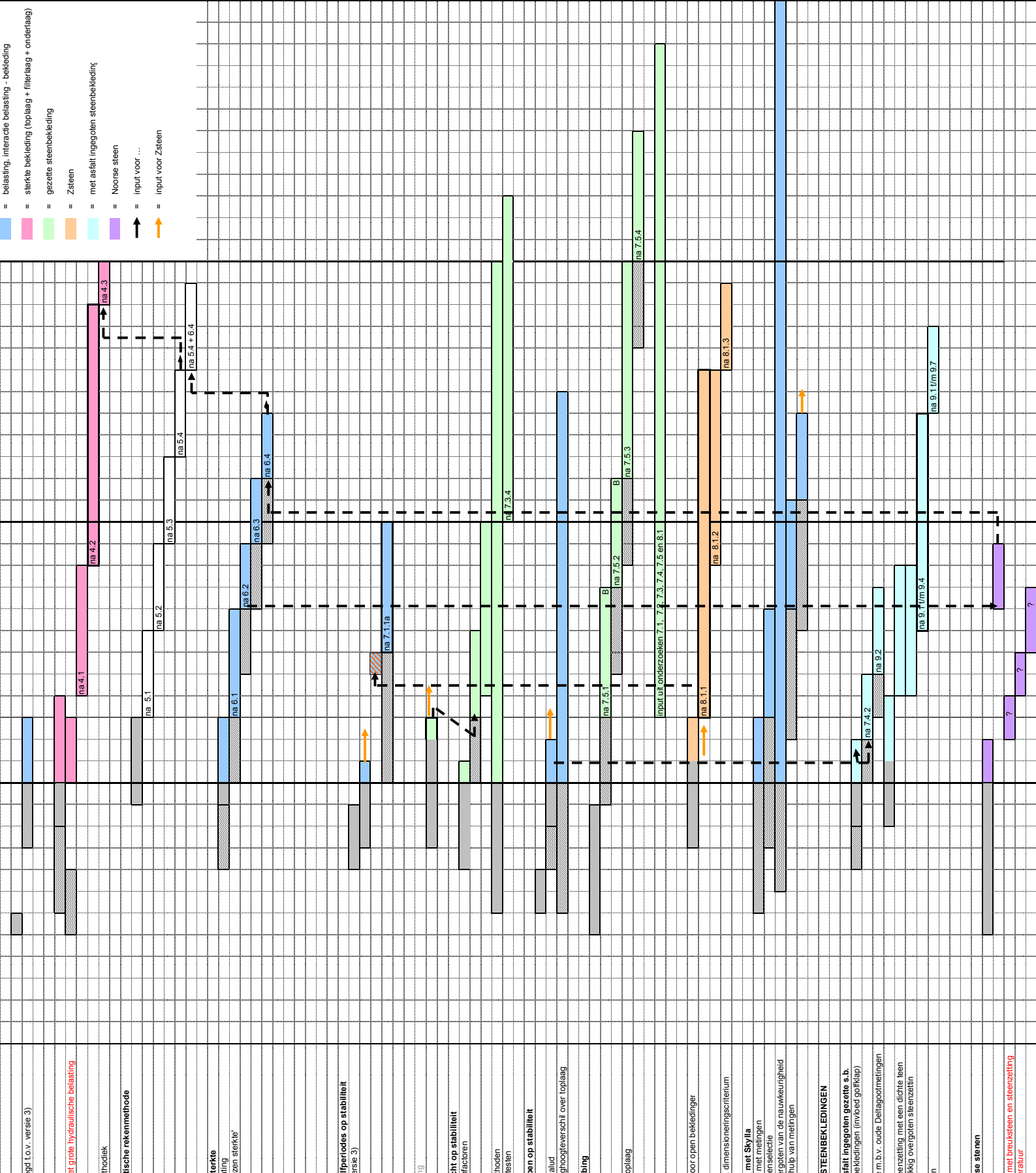
De hoeveelheid vloeistof die getransporteerd wordt hangt af van de reconstructie van het vrije wateroppervlak. Deze reconstructie is gebaseerd op de vloeistoffracties. Het model SKYLLA maakt geen gebruik van de oorspronkelijke VOF-reconstruictiemethode van Hirt en Nichols (1981) maar gebruikt een verbeterde methode die gedeeltelijk is gebaseerd op het werk van Ashgriz and Poo (1991). Deze laatste bleek onvoldoende nauwkeurig te zijn voor brekende golven. Daarom is gekozen om in de huidige versie van SKYLLA de VOF-methode te gebruiken die is gebaseerd op de techniek van Ubbink (1997). Deze methode bleek aanzienlijk betere resultaten te geven.

### **Validatie**

Het numerieke model is gevalideerd aan de hand van analytische oplossingen van Rienecker en Fenton (1981) voor golven over een horizontale bodem en diverse analytische

oplossingen voor situaties met stroming door poreuze materialen. Laboratoriummetingen met brekende golven op een ondiepte met een 1:20 talud, zijn gebruikt voor de validatie van de oppervlakte-uitwijkingen. Naast oppervlakte-uitwijkingen zijn ook gemeten snelheden, drukken en golfoplooptniveaus vergeleken met metingen (zie hiervoor bijvoorbeeld Van Gent (1995), Doorn (2001) en Doorn en Van Gent (2003)).

**C    Onderzoeksprogramma Kennisleemtes  
Steenbekledingen**



- = belasting, interactie belasting - bekleding
- = sterkte bekleding (toplaag + fillerslaag + onderlaag)
- = gezeite steenbekleding
- = Zaaien
- = met asfalt ingegoten steenbekleding
- = Noorse steen
- = input voor ...
- = input voor Zaaien

gd (o.v. versie 3)

et grote hydraulische belasting

hiediek

fische rekenmethode

terkte  
ting  
zen sterkte'

iperiodes op stabiliteit  
isie 3)

ht op stabiliteit  
factoren

hoden  
tesien

en op stabiliteit

alud

ing

oplaag

oor open bekleding

dimensioneeringscriterium

met Skylla  
met meelingen  
enselectie  
ingegoten van de nauwkeurigheid  
hulp van meelingen

STEENBEKLEDINGEN

afrit ingegoten gezeite s.b.  
bekledingen (invloed goitkap)

m.b.v. oude Deltapoommeingen  
enzetting met een dichte teen  
klig overgoten steenzetin

n

se stenen

met breuksteen en steenzetting  
trabuur