



Over de kwaliteit, frequentie en validatie van druksensorreeksen

(t.b.v. een optimale meetfrequentie en verwerkingsprotocol voor verdrogingsmeetnet Overijssel)

november 2010

Over de kwaliteit, frequentie en validatie van druksensorreeksen

(t.b.v. een optimale meetfrequentie en verwerkingsprotocol voor verdrogingsmeetnet Overijssel)

november 2010

© 2010 KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Colofon

Titel

Over de kwaliteit, frequentie en validatie van druksensorreeksen

Rapportnummer

KWR 2010.001

Projectnummer

A308399

Projectmanager

Jan Willem Kooiman

Opdrachtgever

Provincie Overijssel

Kwaliteitsborger

Kees Maas

Auteur

Jos von Asmuth

Met dank aan

Thomas de Meij, Francis de Graaf, Tom Grobbe, Rob van Dongen, Alex Kist, Joost Gooijer, Inke Leunk (voor het initiatief voor dit onderzoek, het aanleveren van ideeën, data en informatie, en allerhande regelwerk). Dank gaat uit naar Martijn Smit (Keller) en Ivar langedijk (Schlumberger Water Services) voor hun goede en gedetailleerde reactie op dit rapport.

Inhoud

Inhoud		2
1	Waarom dit onderzoek?	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	De huidige meet- en verwerkingspraktijk	4
2	De optimale meetfrequentie en meettijdstip	6
2.1	Meerwaarde versus meerkosten	6
2.2	Meerkosten van hoogfrequent meten	6
2.3	Meerwaarde van hoogfrequent meten en effect meettijdstip	7
3	Het effect van middelen en medianen	10
3.1	Middelen van grondwaterstandsmetingen (theorie)	10
3.2	Medianen van grondwaterstandsmetingen (theorie)	11
3.3	Tijdreeksanalyse en het effect van middelen	12
3.4	Aanlevering aan DINO	13
4	Fouten en afwijkingen in druksensorreeksen: theorie	16
4.1	Een ongeluk bij een ongeluk	16
4.2	Hulp van een sterke, oudere broer.....het KNMI	16
4.3	Verschillende typen fouten en afwijkingen	17
4.4	Fouten bij de omrekening van druk naar stand	18
4.5	Specificaties van verschillende fabrikanten	18
4.5.1	De digitale barometers van Vaisala	19
4.5.2	De LevelTROLL's van de firma In-Situ®Inc.	20
4.5.3	De DCX lijn van de firma KELLER AG für Druckmesstechnik	21
4.5.4	De Divers van Schlumberger Water Services (SWS)	22
5	Validatie en correctie van druksensorreeksen	24
5.1	Periodieke ijking of kalibratie van druksensoren	24
5.2	Validatie en correctie luchtdrukreeksen a.d.h.v. KNMI-gegevens	24
5.3	Validatie en correctie waterdrukreeksen a.d.h.v. handmetingen	25
5.4	Softwarematige implementatie en correctiemethoden	26
6	Fouten en afwijkingen in druksensorreeksen: praktijk	28
6.1	Gebrek aan goede en goed bewaarde gegevens	28
6.2	Bias, drift en ruis	28
6.3	Temperatuurgerelateerde afwijkingen	29
6.4	Outliers, haperingen en kortstondige afwijkingen	30

6.5	Hysteresis	31
6.6	Range bias of afwijkingen in het meetbereik	32
6.7	Fouten in de tijdsregistratie	32
7	Conclusies en adviezen	34
7.1	Meet nu! Voor later	34
7.2	Meetfrequentie, meettijdstip, middelen en medianen	34
7.3	Fouten en afwijkingen in druksensorreeksen	35
7.4	Valideren en corrigeren van druksensorreeksen	35
7.5	Te bewaren parameters en gegevens	35
7.6	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	36
	Literatuur	38
	Bijlage A: Afwijkingen in Keller luchtdrukreeksen	40
	Bijlage B: Afwijkingen in Diver luchtdrukreeksen	42
	Bijlage C: Afwijkingen in LevelTroll drukreeksen	44

1 Waarom dit onderzoek?

1.1 Aanleiding

Directe aanleiding voor dit onderzoek is het feit dat de provincie Overijssel met de Overijsselse waterschappen (Regge en Dinkel, Velt en Vecht, Rijn en IJssel en Groot-Salland) op het punt staat een gezamenlijk meetnet in te richten voor het monitoren van de verdroging in de Overijsselse (grondwaterafhankelijke) natuurgebieden. Elk van deze partijen heeft al meer of minder lang, een meer of minder uitgebreid grondwatermeetnet dat al dan niet deels geautomatiseerd is met behulp van druksensoren. De meetfrequentie, gebruikte apparatuur, software en manier van verwerken en valideren van deze gegevens verschilt echter (zie paragraaf 1.2).

Naast de genoemde verschillen zijn er ook overeenkomsten. Overkoepelend principe voor alle betrokkenen (en alle grondwaterbeheerders in Nederland) is dat de meetgegevens opgeslagen dienen te worden in (o.a.) de landelijke database DINO van TNO. De DINO-database laat op het moment van schrijven slechts het opslaan van één waarde per dag toe, en dat zonder tijdsaanduiding. Druksensoren kunnen echter zonder veel moeite op veel hogere frequenties meten. Uit beide principes volgt logischerwijze de vraag wat die ene dagwaarde in DINO nu eigenlijk is of zou moeten zijn. Is dat een daggemiddelde, of liever dagmediane stand? Of een meting op een bepaald tijdstip? En hoeveel maakt de middeling of het meettijdstip eigenlijk uit? Wat levert het op als je vaker dan dagelijks zou meten? En hoe bereken je eigenlijk precies de dag-nachtverschillen in een reeks grondwaterstandsmetingen? Ofwel, zo werd een onderzoek geboren.....

1.2 De huidige meet- en verwerkingspraktijk

Bij het onderzoek zijn zowel de provincie Overijssel als de Overijsselse waterschappen betrokken. In deze paragraaf volgt een tabel met uitgebreidere informatie en kentallen van de verschillende grondwatermeetnetten, en een korte kenschets van elk van de partijen:

Provincie Overijssel:

- | | |
|-------------------|--|
| <u>personen:</u> | - Thomas de Meij en Joost Gooijer |
| <u>kenschets:</u> | - Alleen Keller drukopnemers, geen eigen database, meetfrequentie is dagelijks, validatie na elke uitleesronde, correctie lineair. |

Waterschap Velt en Vecht:

- | | |
|-------------------|---|
| <u>personen:</u> | - Tom Grobbe, Evelyn Bohn |
| <u>kenschets:</u> | - Zowel Keller- als Schlumberger drukopnemers, uurlijkse metingen, verwerking in Dawaco, validatie nog niet |

Waterschap Regge & Dinkel:

- | | |
|-------------------|--|
| <u>personen:</u> | - Rob van Dongen, Alex Kist, Gerrit Velten, Jiska Waaijenberg |
| <u>kenschets:</u> | - Alleen Schlumberger drukopnemers + Vega (20) voor telemetrie, meetfrequentie 3 keer per uur, opslag in WISKI, validatie nog niet of ad hoc |

Waterschap Groot-Salland:

- | | |
|-------------------|--|
| <u>personen:</u> | - Francis de Graaf, Sjaak Bruggeman |
| <u>kenschets:</u> | - Alleen Schlumberger drukopnemers, meetfrequentie 12 per uur tot dagelijks, verwerking met Diver office, geen validatie |

Waterschap Rijn en IJssel:

- | | |
|-------------------|--|
| <u>personen:</u> | - Gert van den Houten, Michel Arendsen |
| <u>kenschets:</u> | - Kleinste meetnet, Schlumberger drukopnemers, meetfrequentie 4 per uur tot ½ dagelijks, verwerking met LDM, geen eigen database, correctie met constante. |

	Provincie	Velt en Vecht	Regge & Dinkel	Groot-Salland	Rijn en IJssel
Beginjaar:	2004	(1998) 2001	2003	1997	2002
Frequentie:					
- metingen	dagelijks	uurlijks	één tot 3 per uur	van elke 5 minuten tot dagelijks	één per kwartier, uur, ½ dag (stedelijk oppw, oppw, grondw)
- uitleesrondes (per jaar)	2	3	0 (telemetrie)	2	3 à 4
- handmeting	2	3	0 (alleen bij installatie)	2	3 à 4
Fabrikant:					
- absoluut (type)	Keller 4 (DCX22-SG)	Schlumberger Keller Eijkelkamp (20, e+WaterL) ± 200 (divers)	Schlumberger Vega Endress+ Hauser > 200 (divers)	Schlumberger 500	Schlumberger Eijkelkamp ± 50
- gecompens. (type)	448 (DCX22-AA)	± 150 (DCX22-AA)	19 (meest vegacell)	-	4 (e+WaterL)
- baro	-	13	ja	14	6
- vervangen	47 % (210)	weinig	0%	12 % (60)	± 10% (5)
Verwerking en opslag data:	Keller DCX (in IDC-files)	Dawaco	WISKI (implementatie bezig)	Diver office	LDM en Excel (handmatig)
Opslag van:					
- waterdruk	ja	ja	ja	ja	ja
- temperatuur	idc-files	-	-	-	mon-files
- luchtdruk	ja	ja	ja	-	ja
- luchttemp.	idc-files	-	-	-	mon-files
Validatie + hercalibratie:					
- maximale afw.	elke uitleesronde 5 cm p. ½ jaar	nog niet (data recent op orde) -	online metingen niet, Divers in Excel 10 a 15 cm	nee 2 cm	nauwkeurige metingen met e+WaterL 3 cm
- correctie	lineair	-	-	-	constante (via handmeting)

Tabel 1 Kentallen van de huidige meet- en verwerkingspraktijk van drukopnemersgegevens bij de betrokken Overijsselse partijen.

2 De optimale meetfrequentie en meettijdstip

2.1 Meerwaarde versus meerkosten

Wat 'optimaal' is, is een afweging van enerzijds het doel of de waarde van metingen versus de kosten die deze met zich meebrengen. Een klassieke wet uit de economie stelt dat het optimum (maximaal nut) bereikt wordt wanneer het nut of de meerwaarde van een extra meting gelijk is aan de meerkosten die dezelfde meting met zich meebrengt. Helaas zijn echter zowel de meerwaarde als de meerkosten van frequenter meten lastig te bepalen. We gaan in dit onderzoek uit van het uitgangspunt van het verdrogingsmeetnet Overijssel, dat er sowieso druksensoren ingezet gaan worden bij de grondwaterstandsmonitoring. De meerwaarde van hoogfrequent meten laat zich dan vertalen in de vraag wat de meerwaarde is van vaker dan dagelijks meten, aangezien dagelijks meten de huidige praktijk is en dus geen meerkosten met zich meebrengt (overigens zijn er ook nauwelijks minderkosten bij een eventuele reductie van de frequentie, zie paragraaf 2.2). 'Waarde' en 'kosten' kun je alleen vergelijken als je ze beide uitdrukt in dezelfde eenheid (e.g. euro), maar hoeveel euro is extra hydrologisch inzicht waard? We volstaan hier noodgedwongen met het beschrijven van de meerwaarde van hoogfrequente metingen in algemene termen (paragraaf 2.3), maar óók met de constatering dat de meerkosten sowieso laag zijn (paragraaf 2.2).

2.2 Meerkosten van hoogfrequent meten

Het grootste deel van de kosten van een (vaststaand) hydrologische meetnet zijn vast. Het meetnet moet:

- 1) ontworpen en ingericht worden
- 2) voorzien worden van druksensoren
- 3) de druksensoren moeten periodiek uitgelezen worden
- 4) de gegevens moeten periodiek verwerkt en opgeslagen worden

De laatste twee kostenposten hebben een mogelijk variabele component. Een hogere meetfrequentie zou bijvoorbeeld kunnen betekenen dat het geheugen van de drukopnemers eerder volloopt, waardoor de frequentie van de uitleesrondes omhoog zou moeten. In hun brochures geven Keller en Schlumberger aan dat in de DCX22-SG en de mini-Diver +/- 50.000 metingen kunnen worden opgeslagen. We kunnen de periode waarbinnen we de drukopnemer moeten uitlezen berekenen met:

$$\Delta t_{\text{uitlees}} = \frac{\text{geheugencapaciteit}}{\text{meetfrequentie} \cdot \text{uren per dag} \cdot \text{dagen per jaar} \cdot \text{aantal parameters}} \quad (1)$$

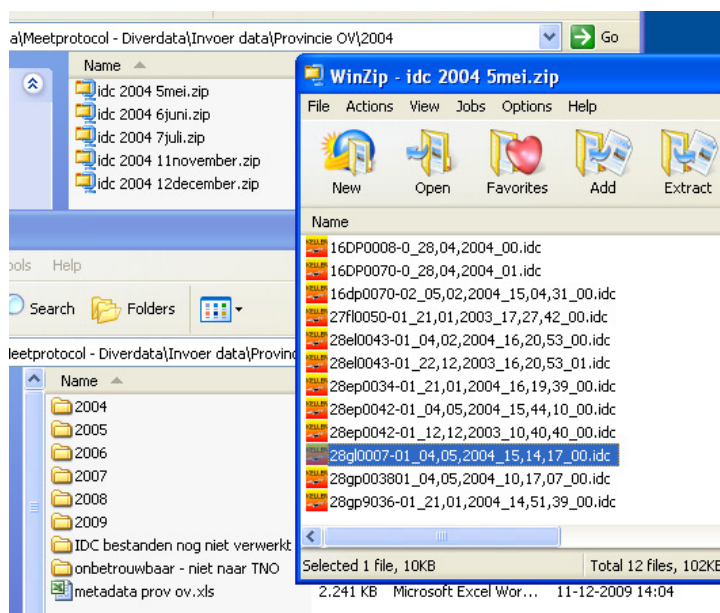
Stel dat we a) uurlijks meten, b) ook de temperatuur opslaan, dan komen we uit op een uitleesperiode van maximaal $50000 / (1 \cdot 24 \cdot 365,25 \cdot 2) = 2,9$ jaar. Ook bij de luchtdrukgecompenseerde DCX22-AA van Keller zou de maximale uitleesperiode nog 1,4 jaar zijn, indien we zowel van de waterdruk- als de luchtdruksensor de druk en temperatuur bewaren. Om diverse redenen (e.g. controle werking meetapparatuur, doen van handmetingen) wordt door alle partijen al een kleinere uitleesperiode aangehouden. Ofwel, op uurbasis meten leidt bij de huidige meetpraktijk op dit punt niet tot meerkosten.

Het tweede bezwaar dat geuit zou kunnen worden is dat het gebruikte databaseprogramma de grotere hoeveelheid gegevens niet aan kan. We plaatsen dit bezwaar in perspectief door voor te rekenen dat dataopslagcapaciteit an sich nagenoeg gratis is:

- Een externe harddisk met een opslagcapaciteit van 1 Terabyte (1e12 byte) kost d.d.: 12-12-2009 69 euro bij de Mediamarkt.

- 1 meting kost 32 bits ofwel 4 byte aan opslagruimte indien hij wordt opgeslagen als zogenaamd 'floating point' getal met double precision (het kan nog zuiniger...)
- 1 druksensor 1 jaar uurlijks druk en temperatuur laten meten kost daarmee $2 \times 24 \times 365.25 \times 4 / 1000 = 70$ kb geheugen
- Ofwel, voor 69 euro kun je 100 jaar lang van 142.500 druksensoren uurlijkse drukmetingen en temperaturen opslaan.

Natuurlijk moet niet alleen de opslag, maar ook de verwerking geen problemen opleveren. Sommige databaseprogramma's ondervinden naar het schijnt nu al problemen bij de huidige datastroom. Het is echter aannemelijk dat ofwel die problemen in de nabije toekomst verholpen zullen worden, ofwel dat database-programma's die niet goed toegerust zijn op dit soort data dan vervuld zijn voor betere. Er bestaat bovendien ook nu al programmatuur die deze data wel aankan, en er zijn allerlei goede en snelle (tussen)oplossingen mogelijk. Een makkelijk toepasbare optie is het simpelweg netjes opslaan van de originele drukopnemer-bestanden op een harde schijf. Dit is de gangbare praktijk bij de provincie Overijssel, die in feite daarmee nu al heel aardig voldoet (zie figuur 1). Doordat de manier van opslaan netjes en consequent is, en doordat in de naamgeving van de bestanden de peilbuiscode consequent terugkomt, kunnen de data van het hele meetnet van de provincie door een willekeurige programmeur zonder veel moeite worden ingelezen. Zo blijven alle gegevens van nu in ieder geval netjes bewaard voor de toekomst.

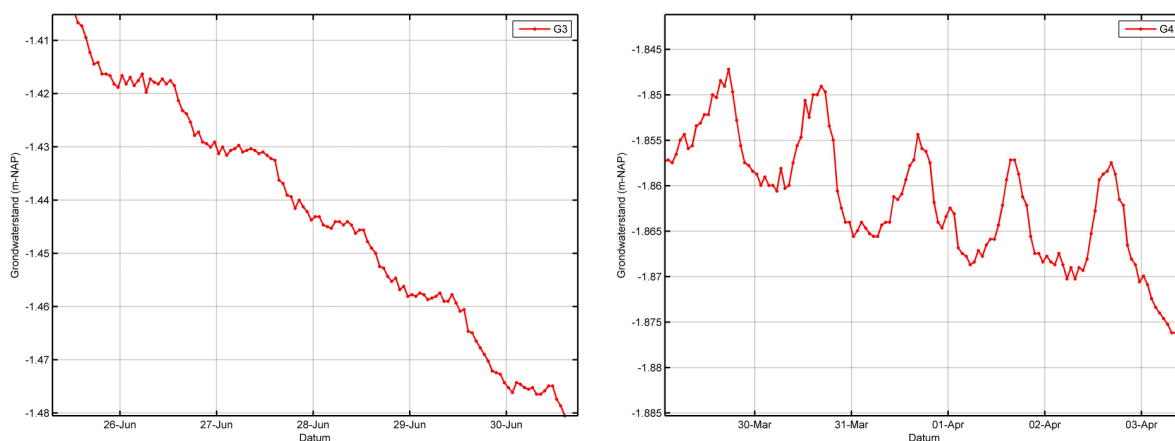


figuur 1: Opslagstructuur van drukopnemerbestanden bij de provincie Overijssel in mappen per jaar en zip-files per uitleesronde.

2.3 Meerwaarde van hoogfrequent meten en effect meettijdstip

Als we, vanwege de huidige meetpraktijk, 'hoogfrequent' wederom vertalen in 'vaker dan eens per dag', dan wordt direct duidelijk dat we de meerwaarde van hoogfrequenter meten vooral moeten zoeken in de eventuele dagnacht-patronen die grondwaterstanden vertonen. Het belangrijkste verschil tussen dag en nacht is logischerwijze (hoe open kan een deur zijn?) het verschil in lichtintensiteit. Zonnestraling, en de daaraan gerelateerde temperatuur en luchtvochtigheid, is op haar beurt de belangrijkste drijvende kracht achter de potentiële verdamping. De potentiële verdamping leidt als laatste tot feitelijke of actuele verdamping, die tot uitdrukking kan komen in een verlaging van de grondwaterstand. Via deze eenvoudige gevolgtrekking komen we tot de interessante constatering dat het effect van de actuele verdamping een uniek dagelijks patroon vertoont. Dit leidt enerzijds mogelijk tot een goed aanknopingspunt om de actuele verdamping in te schatten op basis van druksensordata (wat op andere manieren veel moeilijker is), en anderzijds tot systematische verschillen in de grondwaterstand overdag en 's nachts en daarmee tot een systematisch effect van het meettijdstip.

Overigens zij hier gezegd dat er ook andere processen zijn die hoogfrequent gedrag vertonen, en waarvoor het dus nuttig kan zijn om hoogfrequent te meten. Denk bijvoorbeeld aan het getij of aan menselijk gedrag zoals het schakelen van pompputten of het beregenen van landbouwgewassen. Er zijn bovendien ook processen die weliswaar snelle effecten laten zien (bijvoorbeeld neerslag), maar waarvan het gedrag en het effect zich niet in belangrijke mate beperkt tot de hoge frequenties. Dit soort processen kan ook al goed in beeld gebracht worden met metingen op een lagere frequentie. Hoeveel en wat hoogfrequenter meten hier nog aan toevoegt, wordt in dit onderzoek niet nader uitgewerkt.



figuur 2: Details uit twee drukopnemerreeksen in de boswachterij Gieten. De verticale lijnen in het assen-grid staan telkens op de overgang van de ene naar de andere dag (dus op 24u00 's nachts). Reeks G3 laat een hydrologisch goed verklaarbaar patroon zien (een constante stand 's nachts, een dalende overdag). Bij reeks G4 lijken de hoogste grondwaterstanden zich echter juist voor te doen aan het eind van de middag.

Een belangrijke doelstelling van dit onderzoek was het kwantificeren van de verschillen tussen dag en nacht. Visuele inspectie van de reeksen, en de dagnacht-patronen daarin (zie *figuur 2*), leidde echter tot hydrologisch moeilijk verklaarbare patronen. Samen met het feit dat druksensoren temperatuurgerelateerde afwijking blijken te vertonen (zie hoofdstuk 4 en 5), leidt dit tot de conclusie dat de werkelijke dagnacht-patronen in de grondwaterstand vooralsnog helaas niet goed te kwantificeren zijn. De orde-grootte is echter wel aan te geven, wanneer je uitgaat van gegevens over de verdamping en bodemeigenschappen. De potentiële verdamping varieert van ongeveer 0.2 mm/dag gemiddeld in de winter tot gemiddeld 3 en maximaal 5 mm/dag in de zomer. Neem daarbij een freatische bergingscoëfficiënt van zand van +/- 0.2, en de maximale dagnacht-verschillen in de grondwaterstand komen uit op 2 à 3 centimeter (of navenant meer bij een kleinere bergingscoëfficiënt). Hoe groter echter de berging in de onverzadigde zone, des te meer de dagnacht-verschillen gedempt zullen worden. We verwachten dan ook vooral significante dagnacht-verschillen bij ondiepe grondwaterstanden.

3 Het effect van middelen en medianen

3.1 Middelen van grondwaterstandsmetingen (theorie)

Een van de opties om van hoger frequente naar dagelijkse grondwaterstandsmetingen te komen is het middelen van alle metingen die op een bepaalde dag genomen zijn. We illustreren hier het effect van middelen op een jaarlijkse fluctuatie, maar het principe is bij dagelijkse fluctuatie eender. Als we uitgaan van een set van n grondwaterstandsmetingen h , die op dag d genomen zijn met een vaste frequentie f [uur⁻¹], dan kun je de daggemiddelde grondwaterstand $\tilde{h}_d$ berekenen volgens:

$$\tilde{h}_d = \sum_{n=1}^{n=24/f} h_{d_n} \quad (2)$$

We demonstreren het effect dat het middelen van grondwaterstandsmetingen heeft, door dit toe te passen

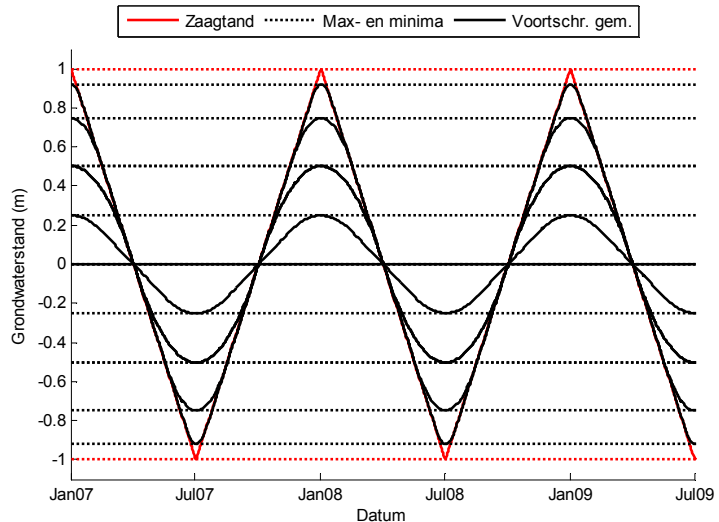
op een fictief grondwaterstandsverloop in de vorm van een zaagtand (zie figuur 3). We berekenen en tonen daarbij zogenaamde 'voortschrijdende' gemiddeldes, d.w.z. de periode waarover gemiddeld wordt, wordt telkens met een uur opgeschoven tot het einde van de reeks bereikt is. Om de effecten van middelen goed zichtbaar te maken middelen we bovendien over een steeds grotere periode, gaande van een dag tot aan een volledig jaar. We tonen hier het daggemiddelde niet in de figuur, omdat dat nagenoeg geheel zou overlappen met de originele zaagtand.

In figuur 3 is mooi te zien dat middeling de grondwaterstandsreeks 'afvlakt', ofwel de optredende maximale en minimale standen worden respectievelijk verlaagd en verhoogd. De max- en minima per reeks zijn geprojecteerd op de y-as, maar ook samengevat in tabel 2. Het afvlakken blijkt toe te nemen naar mate de middelingsperiode t_m de fluctuatieperiode van de zaagtand (t_h , een jaar) nadert, en wel volgens onderstaande regel:

$$\frac{\tilde{h}_{\max} - \tilde{h}_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} = \frac{t_h - t_m}{t_h} \quad (3)$$

De amplitude neemt overigens weer toe wanneer t_m groter wordt dan t_h .

De effecten van het berekenen van daggemiddelde grondwaterstanden zijn in dit voorbeeld klein (slechts 0,3% afvlakking). Afhankelijk van het type grondwatersysteem (e.g. klein / groot) zal het effect van dagmiddeling op echte grondwaterstandsmetingen



figuur 3: fictief grondwaterstandsverloop en daarvan afgeleide voortschrijdende gemiddeldes over (gaande van buiten naar binnen) een maand, een kwartaal, een half, driekwart en een heel jaar.

Periode	'Amplitude'	Afvlakking (%)
Dag	0.997	0.3
Maand	0.92	8
Kwartaal	0.75	25
Half jaar	0.5	50
Driekwart jaar	0.25	75
Jaar	0	100

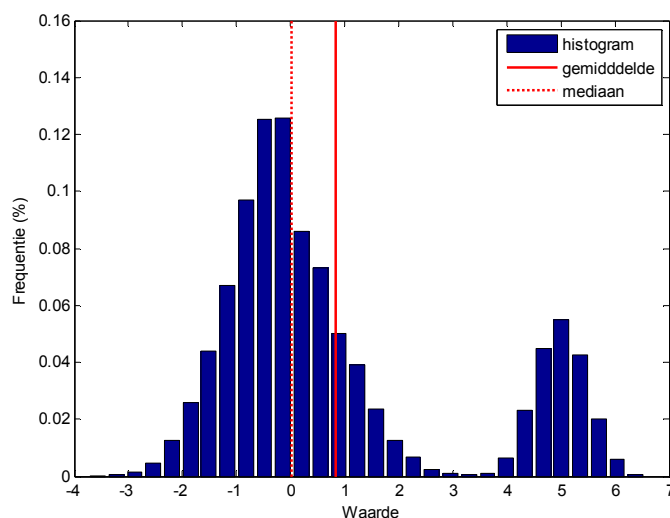
tabel 2: 'Amplitude' en afvlakking van de voortschrijdende gemiddeldes met toenemende middelingsperiode.

echter groter zijn, omdat daarin ook signalen met een veel kleinere periode voorkomen (e.g. kortstondige pieken t.g.v. regenbuien, de dag-nachtcyclus zelf).

3.2 Medianen van grondwaterstandsmetingen (theorie)

Een tweede optie om van hoger frequente naar dagelijkse grondwaterstandsmetingen te komen is het nemen van de mediaan van alle metingen die op een bepaalde dag genomen zijn. De mediaan van een set van metingen is die waarde waarbij 50% van de metingen groter is, en 50% kleiner dan dat. Bij variabelen met een symmetrische verdeling is de mediaan gelijk aan het gemiddelde. De mediaan kan dan gebruikt worden als zogenaamde 'robuuste schatter' voor het gemiddelde, omdat de mediaan niet gevoelig is voor uitschieters in de data.

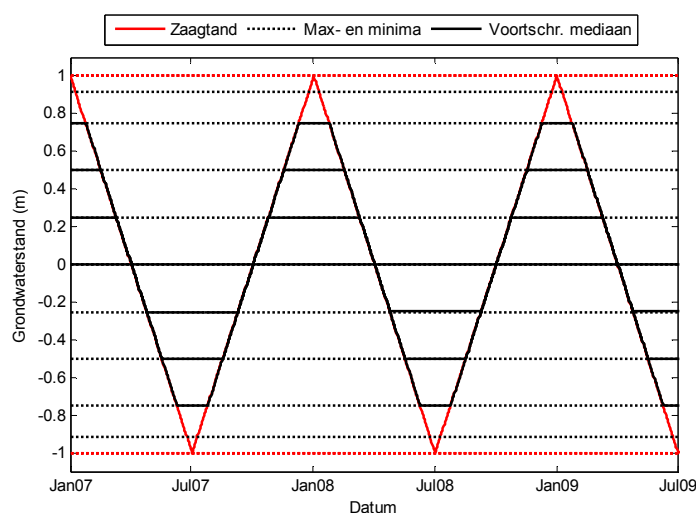
Om het verschil tussen gemiddelde en mediaan te illustreren toont figuur 4 het histogram van een fictieve random variabele met een (zeer) scheve verdeling. In de oorspronkelijke verdeling (normaal onafhankelijk verdeeld met gemiddelde nul en variantie 1, of $NID(0,1)$), zijn uitschieters geïntroduceerd $NID(5,0.25)$, op een zodanige manier dat desondanks 50% van de waarnemingen groter is dan nul. De mediaan is in dat geval (per definitie) gelijk aan nul, en wordt dus niet beïnvloed door de afwijkende 'metingen', wat ook de waarde er van is. Het gemiddelde daarentegen wordt wel hierdoor beïnvloed, en heeft nu als waarde 0.85.



figuur 4: Histogram, gemiddelde en mediaan van een random variabele met een scheve verdeling.

In figuur 5 is analoog aan figuur 3 het nemen van een voortschrijdende mediaan toegepast op een fictief grondwaterstandsverloop. Direct valt op dat enerzijds de afvlakking niet geleidelijk is maar abrupt, en anderzijds dat de afvlakking qua grootte gelijk is aan die van het midden. Bij dit laatste punt moet gelijk gezegd worden dat het een direct gevolg is van de zaagtandvorm. Omdat de mediaan ongevoelig is voor uitschieters zal een signaal dat juist wel uitschieters bevat en/of asymmetrischer is, ook sterker afvlakken.

Al met al is het feit dat de mediaan ongevoelig is voor de precieze waarde van een waarneming een eigenschap die nuttig kan zijn, maar die ook kan leiden tot informatieverlies. Pieken en uitschieters in grondwaterstandsreeksen ten gevolge van buien kunnen op die manier buiten beeld raken, terwijl juist die in werkelijkheid tot wateroverlast en schade kunnen leiden.



figuur 5: fictief grondwaterstandsverloop en daarvan afgeleide voortschrijdende medianen over (gaande van buiten naar binnen) een maand, een kwartaal, een half, driekwart en een heel jaar.

3.3 Tijdreeksanalyse en het effect van middelen

Het berekenen van een voortschrijdend gemiddelde is in feite equivalent aan het toepassen van een elementair tijdreeksmodel. Om daar te komen zetten we allereerst vergelijking (2) om naar continue tijd:

$$\tilde{h}_d = \int_{d,0u00}^{d,24u00} h(t)dt \quad (4)$$

met t in dagen. We zetten (4) om in een voortschrijdend gemiddelde door een weegfunctie $\theta_m(t)$ te introduceren die 1 is over de middelingsperiode (dus voor $-\frac{1}{2}t_m < t < \frac{1}{2}t_m$), en 0 daarbuiten:

$$\tilde{h}(t) = \int_{-\infty}^{t+\frac{1}{2}t_m} h(\tau)\theta_m(t-\tau)d\tau \quad (5)$$

De formule van een (continu) tijdreeksmodel van de grondwaterstand met als verklarende variabele de neerslag $p(t)$ is heel erg vergelijkbaar:

$$h(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta_p(t-\tau)d\tau \quad (6)$$

Wanneer we vervolgens (6) invullen in (5) levert dat de volgende dubbele convolutieintegraal op:

$$\tilde{h}(t) = \int_{-\infty}^{t+\frac{1}{2}t_m} \left(\int_{-\infty}^t p(\tau)\theta_p(t-\tau_p)d\tau_p \right) \theta_m(t-\tau_m)d\tau_m \quad (7)$$

Een van de prettige eigenschappen van convolutie is dat we verschillende onderdelen van (7) nu in willekeurige volgorde mogen evalueren. Zo kunnen we eerst $p(t)$ middelen, en dan de normale ‘tijdreeksanalyse’ convolutie uitvoeren:

$$\begin{aligned} \tilde{p}(t) &= \int_{-\infty}^{t+\frac{1}{2}t_m} p(\tau)\theta_m(t-\tau_m)d\tau_m, \\ \tilde{h}(t) &= \int_{-\infty}^t \tilde{p}(\tau)\theta_p(t-\tau)d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

waarmee we dus gewoon de normale systeemrespons θ_p vinden waar we meestal naar op zoek zijn.

Maar het is even goed mogelijk om θ_m en θ_p te combineren tot een totale responsfunctie, en daarmee de tijdreeksanalyse in te gaan:

$$\begin{aligned} \theta_{mp} &= \int_{-\infty}^t \theta_m(\tau)\theta_p(t-\tau)d\tau \\ \tilde{h}(t) &= \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta_{mp}(t-\tau)d\tau \end{aligned} \quad (9)$$

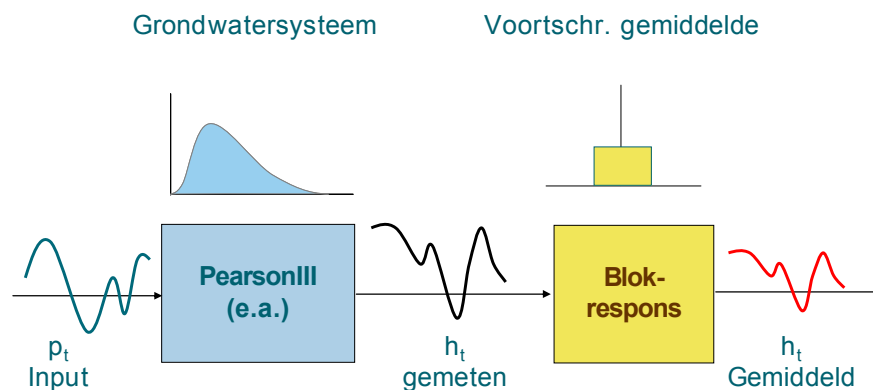
Weten we eenmaal θ_p , dan blijft het mogelijk $h(t)$ te reconstrueren, al zou slechts $\tilde{h}(t)$ bewaard zijn gebleven in de database.

In *figuur 6* is een en ander nog eens grafisch weergegeven. Een neerslagsignaal komt een grondwatersysteem binnen (blauw blok) en wordt daar getransformeerd tot grondwaterstand. De grondwaterstand wordt vervolgens door de databeheerder (beige blok) omgezet in een daggemiddelde waarde. De omzetting van neerslag in daggemiddelde waarde is in feite de omzetting van een signaal door twee in serie gekoppelde systemen, of samengenomen het 'grondwater-databeheerdersysteem'.

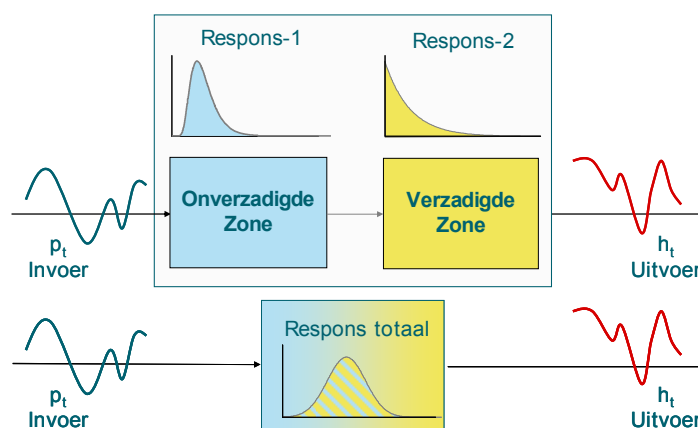
Een vergelijkbare transfer door gekoppelde systemen treedt in feite ook op bij regenwater dat eerst door de onverzadigde zone percoleert alvorens het via de verzadigde zone afgevoerd wordt (*figuur 7*). In de gangbare tijdreeksanalyse praktijk wordt slechts de totale respons van beide systemen ingeschat. Er is al eens onderzoek uitgevoerd naar de vraag of de respons van beide systemen niet te scheiden zou zijn (Kruithof, 2001).

3.4 Aanlevering aan DINO

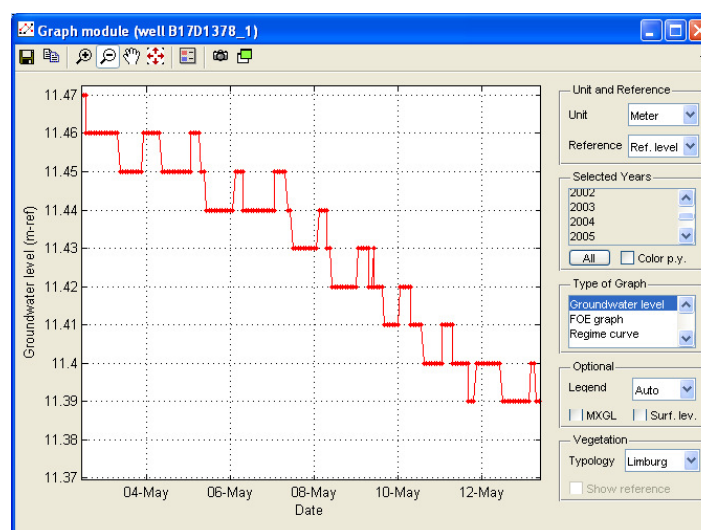
De voorgaande paragrafen kwamen voort uit de vraag hoe de dagwaarde, die in de landelijke database DINO te vinden is, samengesteld zou moeten worden indien voor een hogere dan de dagfrequentie gekozen zou worden. Zou dit het gemiddelde, de mediaan, of de daadwerkelijke stand op een bepaald tijdstip moeten zijn? En wat is het effect van die keuze, en kan er eventueel een onderbouwde optimale keuze gemaakt worden? Navraag bij de helpdesk van DINO leert echter dat de gangbare praktijk bij TNO is, dat uit aangeleverde hoogfrequente data telkens die stand geselecteerd wordt die het dichtst bij 12u00 a.m. ligt. Hoewel deze gegevens niet extern beschikbaar zijn, zouden zowel het



figuur 6: illustratie van een losse transformatie van neerslag tot grondwater (blauwe respons) en middelingsexercitie (beige blokrespons).



figuur 7: illustratie van de gecombineerde respons van de onverzadigde (blauwe respons) en verzadigde (beige blokrespons) zone.



figuur 8: Voorbeeld van 'verminkte' dagnacht-patternen wanneer de data zijn omgezet naar centimeterresolutie.

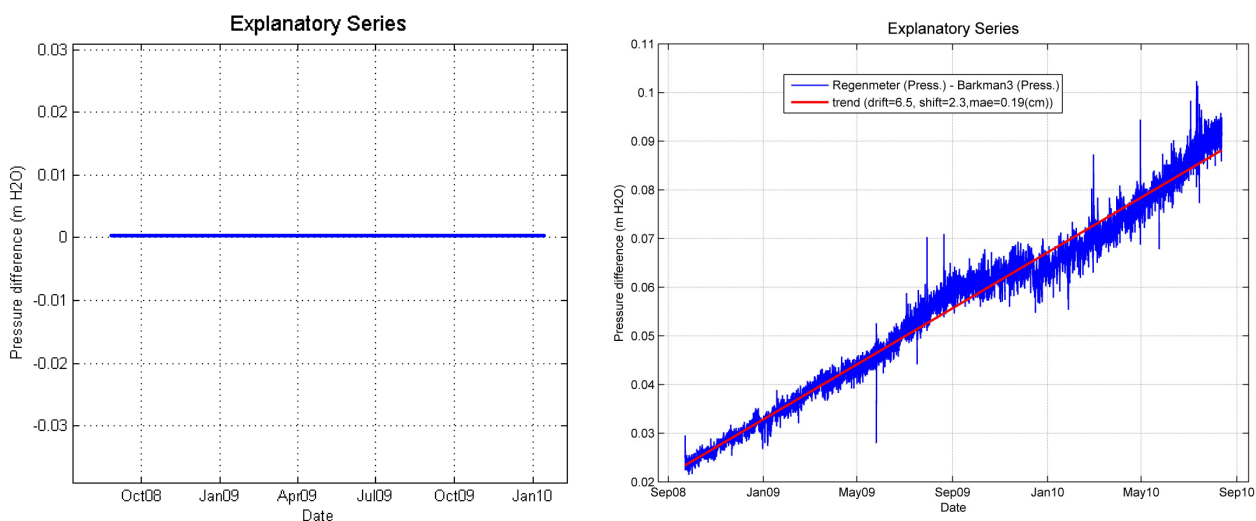
tijdstip van de metingen als alle hoogfrequente metingen zelf in DINO bewaard blijven. Vanwege de uniformiteit lijkt het verstandig dat individuele databeheerders geen eigen weg hierin varen, maar aansluiten bij de keuze van TNO en eenvoudigweg hun hele dataset aanleveren.

Er zij hier opgemerkt dat DINO, maar ook andere databaseprogramma's als Dawaco, weliswaar de millimeterresolutie die de gangbare drukopnemers hanteren omzet in centimeterresolutie. Patronen die in de orde van centimeters liggen (zoals de dagnacht-cyclus, zie paragraaf 2.3) gaan hierdoor in belangrijke mate verloren (zie *figuur 8*).

4 Fouten en afwijkingen in druksensorreeksen: theorie

4.1 Een ongeluk bij een ongeluk

Soms heb je geluk bij een ongeluk, een andere keer lijkt het alsof je alleen maar dieper wegzakt in het moeras. In dit geval begint het verhaal bij een kleine persoonlijke dwaling, namelijk het feit dat één van de druksensoren in het eigen (OBN-)meetnet in het Dwingelerveld abusievelijk droog is komen te hangen. Ter barometrische compensatie van alle drukopnemers was de druksensor in de regenmeter op zo'n 10 meter afstand bedoeld, dus de beschreven dwaling resulteerde in twee luchtdruksensoren vlak bij elkaar. De 'droge' druksensorreeks BM3 ging weliswaar gewoon mee in de daaropvolgende ronde van barometrische compensatie..... maar helaas, de gemaakte rekensom (luchtdruk min luchtdruk) leverde niet de verwachte ideale nullijn op met eventueel wat ruis. Er bleek sprake van een lineair oplopende afwijking, die na +/- 2 jaar is opgelopen tot 6.5 cm, met een constante verschuiving van 2.3 cm (figuur 9).



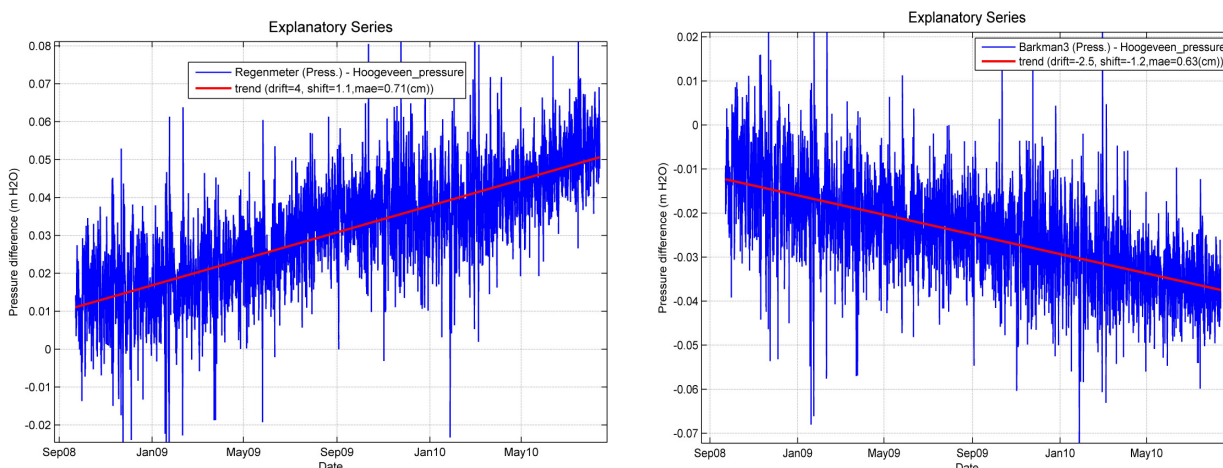
figuur 9: a) verschil tussen luchtdruk en luchtdruk van twee ideale, lokale druksensoren en b) zoals gemeten in een drooghangende drukopnemer en lokale regenmeter in het Dwingelerveld.

4.2 Hulp van een sterke, oudere broer.....het KNMI

Als jongste uit een gezin van vijf weet ik uit eigen ervaring hoe goed het kan zijn om een sterke, oudere broer achter de hand te hebben. Het toeval wilde dat vlak na het hierboven beschreven voorval, 'plots' de luchtdrukgegevens van alle KNMI-hoofdstations vrij beschikbaar kwamen op internet. Dit allereerst op dagbasis, maar ruim een jaar later ook op uurbasis. Zonder al te diep in de meettechniek te duiken mag verwacht worden dat het KNMI langer ervaring heeft met het meten van luchtdrukken, en duurdere en betere instrumenten gebruikt. Op de KNMI-site zijn voor al haar stations lijsten te vinden waarop vermeld staat van wanneer tot wanneer welk type meetinstrument ter plekke gebruikt is. In het verleden ging het daarbij meestal om verschillende typen barografen en kwikbarometers, van meer recente datum is het gebruik van digitale, aneroïde barometers (waarbij de meting berust op het indrukken van een vacuüm metalen doosje). Voor de meest recente reeksen (vanaf begin jaren negentig) is slechts te vinden dat de luchtdrukgegevens berusten op een 'elektrische meting'. Overigens is op de website bovendien te vinden dat het KNMI ook beschikt over zogenaamde microbarometers, die in een array worden geplaatst en waarmee zelfs de oorsprong en oorzaak van minieme drukveranderingen opgespoord kunnen worden (e.g. kernproeven).

Het KNMI geeft op haar site als tip dat 'amateurs' de eigen, goedkopere barometer kunnen ijken aan die van hen, en dat is precies de strategie die gevolgd is om uit te zoeken welk van de twee druksensoren uit

figuur 9 verantwoordelijk is voor de daar getoonde lineair oplopende afwijking. Het resultaat van een vergelijking tussen beide sensoren en die van het dichtstbijzijnde KNMI-station Hoogeveen is te zien in figuur 10. Helaas leidt deze exercitie tot de conclusie dat niet één, maar beide druksensoren een trendmatige afwijking hebben, en wel in tegengestelde richting. Helaas leidde deze exercitie tot de conclusie dat niet één, maar beide druksensoren een afwijking hebben, en wel een die in tegengestelde richting verloopt in de tijd. De op deze manier geconstateerde individuele drifts van resp. 4 en 2.5 cm tellen bovendien perfect op tot de geconstateerde drift van 6.5 cm in beide druksensoren ten opzichte van elkaar, en hetzelfde geldt voor de geconstateerde nulpuntsverschuiving of shift. Overigens is door het vergelijken van figuur 9 en figuur 10 ook goed te zien dat de 'ruis' ofwel 'korte termijn verschillen' tussen de lokale drukreeksen en die van het KNMI-station op 14 kilometer afstand, veel groter zijn ($MAE = 0.71$ en 0.63 cm) dan die tussen de lokale metingen onderling ($MAE = 0.19$ cm). Eén en ander laat zien dat de fouten en afwijkingen waarmee druksensoren behept zijn goed in beeld te brengen zijn door vergelijking met KNMI-data.



figuur 10: De luchtdrukmetingen van de regenmeter en de droge drukopnemer vergeleken met die van het dichtstbijzijnde KNMI-station (Hoogeveen, 14 km afstand), op uurbasis. De geconstateerde drifts van resp. 4 en 2.5 cm tellen perfect op tot de geconstateerde drift van 6.5 cm uit figuur 9. Hetzelfde geldt voor de geconstateerde nulpuntsverschuiving of shift.

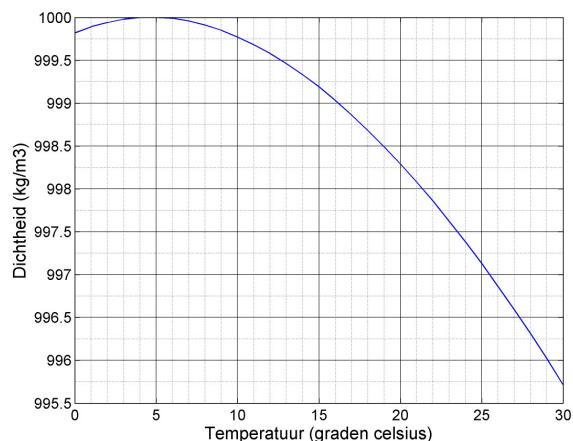
4.3 Verschillende typen fouten en afwijkingen

Vergissen is menselijk, maar niet alleen menselijk. Ook apparaten kunnen zich 'vergiszen'. Ze wijzen de verkeerde tijd, druk of temperatuur aan, en dat om uiteenlopende redenen en in verschillende verschijningsvormen. Door het systematisch vergelijken van de patronen in verschilreeksen tussen lokale drukmetingen en die van het KNMI, maar ook dankzij de uitgebreide specificaties over nauwkeurigheden van met name Vaisala (zie paragraaf 4.4), kunnen we constateren dat druksensoren behept zijn met maar liefst acht verschillende typen afwijkingen en fouten:

1. **Bias** - een constante verschuiving van het nulpunt van de sensor. Eventuele bias wordt gecorrigeerd wanneer de inhangdiepte m.b.v. een handmeting bepaald wordt.
2. **Drift** - een in de tijd oplopende verschuiving van het nulpunt van de sensor. De drift blijkt in veel gevallen ongeveer lineair te verlopen, maar kan ook plots veel groter worden.
3. **Meetruis** - random variatie van de gemeten waarde rond de werkelijke waarde.
4. **Range bias** - een verschil tussen het meetbereik van de sensor en die van de werkelijke waarden. Ook een niet-lineaire relatie tussen druk en indrukking van het membraan scharen we hieronder.
5. **Hysteresis** - Verschil in de relatie tussen druk en indrukking bij oplopende en afnemende druk.
6. **Temperatuur afhankelijkheid** - afwijkingen die samenhangen met de temperatuur. Het kan hierbij ofwel om een niet afdoende correctie van de temperatuurgevoeligheid van de sensor gaan, of om fouten in de temperatuurmeting zelf.
7. **Outliers** - incidentele of kortstondige afwijkingen. Een van de oorzaken die genoemd wordt is de aanwezigheid van condens c.q. waterdruppeltjes of juist luchtbelletjes op het meetmembraan.
8. **Tijdsverschuiving** - het voor- of achterlopen van de klok van de drukopnemer.

4.4 Fouten bij de omrekening van druk naar stand

Fouten van een heel andere orde, die niet zozeer aan het meten liggen, zijn diegene die gemaakt worden of kunnen worden bij het omrekenen van druk naar (grond)waterstand. Bij de omzetting van druk naar stand wordt de gemeten druk gedeeld door de dichtheid van water en de gravitatiekracht. De software van Keller (LoggerDCX4-10_KELLER.exe) biedt de mogelijkheid om een gemiddelde dichtheid van water op te geven. De defaultwaarde die het programma hanteert is 998.2 kg/m^3 , wat correspondeert met een temperatuur van 20° Celsius (figuur 11). De normale temperatuursrange voor grondwater ligt echter ruwweg tussen de 4 en 15° Celsius . Een gebruiker die hier niet alert op is en deze waarde gedachteloos accepteert, veroorzaakt daarmee een fout die kan oplopen tot 1.8 mm per meter waterkolom. Bij ondiepe grondwaterstanden en oppervlaktewater zijn de temperatuurschommelingen bovendien groter, waardoor het hanteren van een gemiddelde dichtheid ook dergelijke afwijkingen veroorzaakt tussen zomer en winterstanden. Hier zij bovendien opgemerkt dat de dichtheid van brak of zout water weer anders is dan die van zoet water. De software van Keller kent verder geen mogelijkheid om de gravitatieversnelling op te geven. In de Operating Manual van de Logger DCX 4.0 (Anonymous, 2004) is te vinden:



figuur 11: Dichtheid van water als functie van de temperatuur.

“All conversions into water level values are made with a constant value for gravity:
 $g = 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}.$ ”

De gravitatieversnelling in Nederland varieert echter van 9.81350 tot 9.81100 m/s^2 gaande van Groningen tot Limburg. Vanwege haar Zwitserse oorsprong komt de door de firma Keller gehanteerde waarde wellicht overeen met de gravitatieversnelling ergens in Zwitserland. De fout die hierdoor gemaakt wordt loopt op tot 0.7 mm per meter waterkolom. DCX22-AA drukopnemers hebben in principe een vaste kabel voor stroom en datatransport tussen beide sensoren. Wanneer de kabel niet opgelust of op maat gemaakt wordt, kan de sensor dieper hangen dan strikt noodzakelijk is. Bij 5 meter waterkolom is de totale omrekenfout al met al maximaal 1.25 cm ($5 * (0.7+1.8) \text{ mm}$), en kan dus significant bijdragen aan de totale fout. We benadrukken hier echter nogmaals dat meetnetbeheerders zelf zorg kunnen en moeten dragen voor het niet nodeloos diep hangen van de sensoren en het hanteren van een juiste, gemiddelde dichtheid van water.

De software van Schlumberger, Diver Office (versie 2.0.1.2), kent geen mogelijkheden om de gravitatieversnelling en dichtheid van water op te geven. De waarden die in de Diver Product Manual (Anonymous, 2010a) te vinden zijn (resp. 9.81 m/s^2 en 1000 kg/m^3), liggen wel dichterbij de in Nederland en voor grondwater gangbare waarden. Hierdoor zullen juist bij gebruik in het buitenland, of bij hogere watertemperaturen grotere afwijkingen optreden. In een reactie laat Schlumberger weten dat in Diver-Office Premium, de niet gratis variant van Diver Office, beide waarden wel aan te passen zijn.

4.5 Specificaties van verschillende fabrikanten

De hiervoor beschreven typen afwijkingen zijn weliswaar goed terug te zien in de gemaakte vergelijking met KNMI-data, maar het helpt als je weet waar je op moet letten. Een belangrijke factor daarbij waren de specificaties die verschillende fabrikanten opgeven over de nauwkeurigheid van hun druksensoren. We behandelen hieronder de informatie van de meeste gangbare fabrikanten, te weten In-Situ (LevelTROLL®), KELLER (DCX) en Schlumberger Water Services (Diver®). Daarnaast behandelen we de specificaties van Vaisala, dat zogenaamde digitale barometers produceert waarin een duurder type druksensor te vinden is. Dit omdat deze fabrikant uitgebreide specificaties geeft die zeer behulpzaam zijn bij het leren kennen van de problematiek.

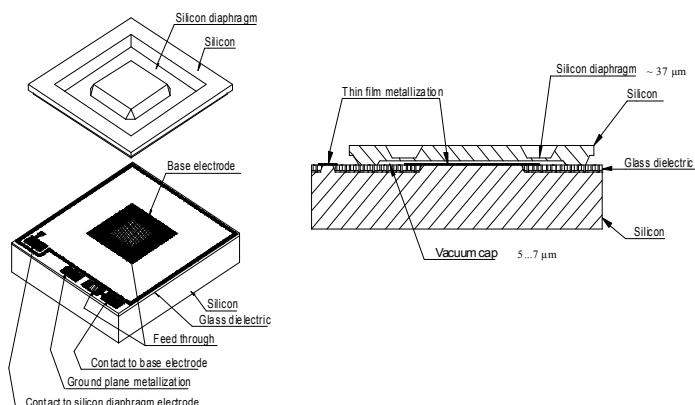
4.5.1 De digitale barometers van Vaisala

Vaisala is een grote, van oorsprong Finse fabrikant van meetapparatuur voor industrie, professionele meteorology en luchtvaart.

(Lucht)druksensoren zijn een belangrijk product voor Vaisala, en te vinden in de zogenaamde digitale barometers die het bedrijf produceert. Waar veel andere fabrikanten (naar verluidt) de druksensoren niet zelf ontwerpen en produceren maar extern betrekken, doet Vaisala dit nadrukkelijk wel. Het bedrijf geeft daarbij ook inzicht in de opbouw van hun sensoren (zie *figuur 12*).

Druksensoren bestaan in feite uit een plat vacuüm doosje met een (in dit geval siliconen) dekseltje of diafragma.

Het diafragma wordt daarbij verder ingedrukt naarmate de (lucht)druk erboven toeneemt. Een elektrode registreert op zijn beurt de mate van indrukking, die weer wordt omgerekend naar een (lucht)druk. Het gaat bij de sensoren van Vaisala zoals gezegd om een duurder type, met uitgebreide specificaties van de fouten en afwijkingen die deze vertonen (zie *figuur 13*). Men kan zich ook goed voorstellen dat het gebruik ervan in de luchtvaart t.b.v. de hoogtemeting van het vliegtuig strenge eisen stelt aan de betrouwbaarheid ervan (navigatie op basis van GPS is nog niet algemeen doorgevoerd). Hoewel de



figuur 12: Opbouw van de Vaisala BAROCAP® sensor.

Technical Data

Performance

Barometric pressure range 500 ... 1100 hPa

	Class A	Class B
Linearity*	±0.05 hPa	±0.10 hPa
Hysteresis*	±0.03 hPa	±0.03 hPa
Repeatability*	±0.03 hPa	±0.03 hPa
Calibration uncertainty**	±0.07 hPa	±0.15 hPa
Accuracy at +20 °C (+68 °F) ***	±0.10 hPa	±0.20 hPa

Barometric pressure range 50 ... 1100 hPa

	Class B
Linearity*	±0.20 hPa
Hysteresis*	±0.08 hPa
Repeatability*	±0.08 hPa
Calibration uncertainty**	±0.15 hPa
Accuracy at +20 °C ***	±0.20 hPa

Temperature dependence****

500 ... 1100 hPa	±0.1 hPa
50 ... 1100 hPa	±0.3 hPa

Total accuracy -40 ... +60 °C (-40 ... +140 °F)

	Class A	Class B
500 ... 1100 hPa	±0.15 hPa	±0.25 hPa
50 ... 1100 hPa		±0.45 hPa

Long-term stability

500 ... 1100 hPa	±0.1 hPa/year
50 ... 1100 hPa	±0.2 hPa/year

* Defined as ±2 standard deviation limits of endpoint non-linearity, hysteresis or repeatability error.

** Defined as ±2 standard deviation limits of inaccuracy of the working standard including traceability to NIST.

*** Defined as the root sum of the squares (RSS) of endpoint non-linearity, hysteresis error, repeatability error and calibration uncertainty at room temperature.

**** Defined as ±2 standard deviation limits of temperature dependence over the operating temperature range.

Pressure fitting	barbed fitting for 1/8" I.D. tubing or quick connector with shutoff valve for 1/8" hose
Maximum pressure limit	5000 hPa abs.
Compliance	EMC standard EN61326-1:1997+ Am1:1998 + Am2:2001: Industrial Environment

Mechanics

Housing material	G AlSi10 Mg (DIN 1725)
Housing classification	IP65
Weight	1 - 1.5 kg

Analog output (optional)

Current output	0 ... 20 mA, 4 ... 20 mA
Voltage output	0 ... 1 V, 0 ... 5 V, 0 ... 10 V
Accuracy at pressure range	500 ... 1100 hPa 50 ... 1100 hPa
at +20 °C	±0.30 hPa ±0.40 hPa
at -40 ... +60 °C	±0.60 hPa ±0.75 hPa

Accessories

Serial interface cable	19446ZZ
RS-485 serial connection cable	219685
Software interface kit	215005
Wall mounting kit	214829
Outdoor installation kit (weather shield)	215109
Installation kit for pole or pipeline	215108
Power supply module	POWER-1
Temperature compensated analog output module	AOUT-1T
Isolated RS-485 module	RS485-1

Dimensions

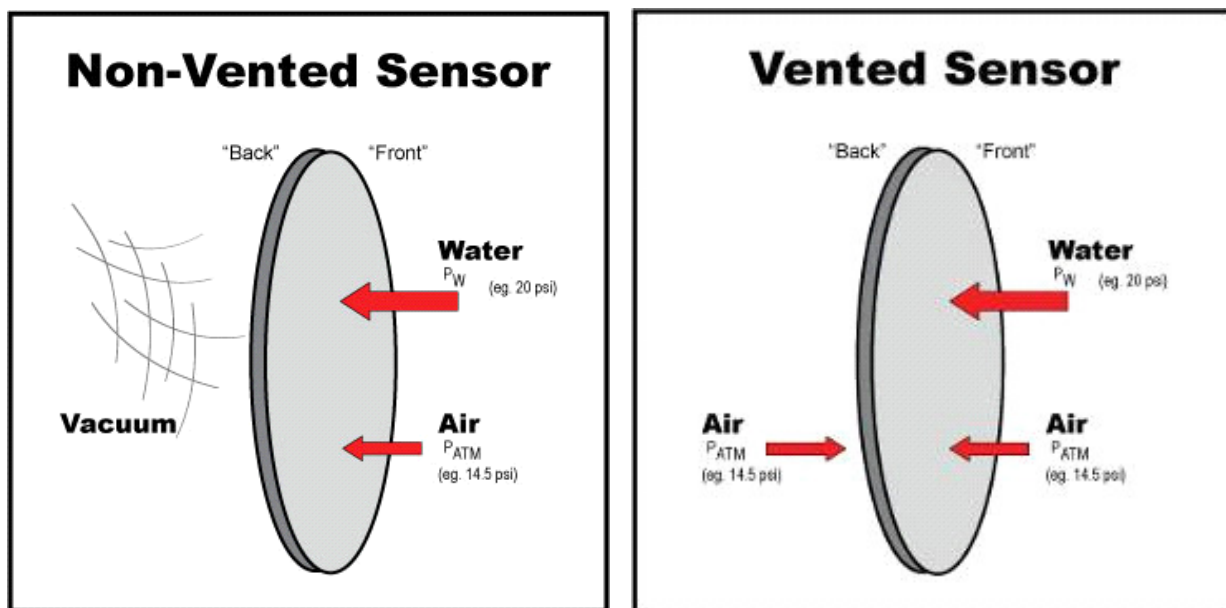
figuur 13: Specificaties van de nauwkeurigheid van de PTB330 Digitale Barometer van Vaisala (Anonymous, 2009b).

terminologie verschilt specificceert Vaisala alle fouten die in paragraaf 4.3 genoemd zijn (uitgezonderd outliers en fouten in de tijdsregistratie) en (belangrijk!) het vermeldt bovendien hoe de getallen gedefinieerd zijn. Naast de specificaties vallen nog een paar andere punten op in de brochure van Vaisala:

- De range van temperaturen waarbinnen de specificaties gelden, begint bij -40 graden Celsius.
- Er kunnen tot drie sensoren in één barometer geplaatst worden om de betrouwbaarheid van de uiteindelijke meting verder te verhogen.
- Via deze redundantie kan het apparaat zelf aangeven wanneer de afwijkingen te groot zijn geworden en het opnieuw gekalibreerd dient te worden.

De prijs van een kale PTB 330 barometer bedroeg € 1.477 ten tijde van het schrijven van dit rapport.

4.5.2 De LevelTROLL's van de firma In-Situ® Inc.



figuur 14: Verschil tussen standaard 'non-vented' sensoren en de 'vented' sensoren van In-Situ® Inc.

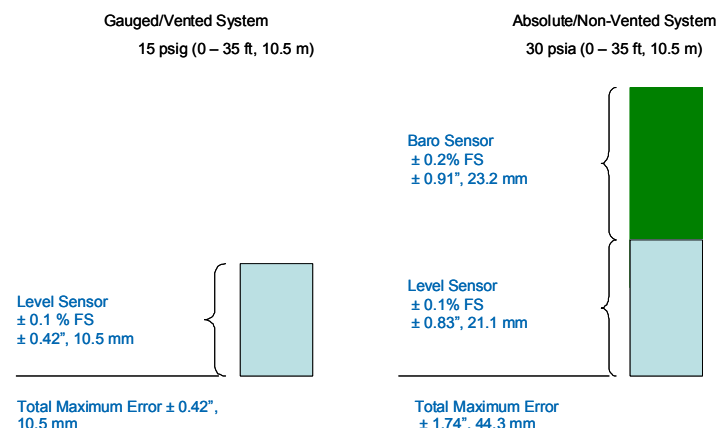
In-Situ is een van oorsprong Amerikaanse fabrikant van apparatuur voor het monitoren van waterkwaliteit en -kwantiteit. In Nederland heeft In-Situ een relatief klein marktaandeel. We gaan hier in op hun druksensoren, omdat deze een bijzondere oplossing hebben voor de luchtdrukcompensatie die bij de andere typen druksensoren achteraf gebeurt (figuur 14). In principe zijn er twee factoren die druk uitoefenen op de sensor van een 'normale' absolute drukopnemer:

- 1) De luchtkolom boven de sensor
- 2) De waterkolom boven de sensor

Omdat hydrologen meestal alleen in de druk c.q. de hoogte van de waterkolom geïnteresseerd zijn, wordt de luchtdruk doorgaans met een aparte sensor of drukopnemer gemeten en in mindering gebracht op de gemeten totale druk. In-Situ wijst er terecht op dat vanwege deze praktijk, de uiteindelijke fout in de waterhoogte om twee redenen toeneemt (figuur 15):

- 1) Een statistische wet zegt dat de variantie van het verschil van twee variabelen, de som is van de varianties van beide variabelen afzonderlijk.
- 2) De fouten van druksensoren zijn om fysische redenen over het algemeen een percentage van het drukbereik (FS of Full Scale in de figuur). Wanneer totale druk i.p.v. alleen waterdruk gemeten wordt moet het meetbereik groter zijn en neemt de fout dus ook navenant toe.

De optelsom die in *figuur 15* gemaakt wordt klopt overigens niet, want het zijn niet de fouten in millimeter c.q. de standaarddeviaties die je mag sommeren, maar de varianties in millimeter-kwadraat. In-Situ maakt bij haar ‘vented’ sensoren echter gebruik van een andere oplossing. In plaats van de luchtdruk te meten wordt via een luchtslang de lucht naar de binnenkant van de sensor gevoerd, om daar fysiek tegendruk uit te oefenen op het membraan van de sensor. Omdat op deze manier de luchtdrukmeting feitelijk vervalt, worden ook de waterstandsmetingen niet ‘besmet’ met de eventuele luchtdrukmeetfouten. Ander voordeel is dat hierdoor ook het bereik en dus fout van de sensor kleiner kan zijn. Voor een goede meting moet in het luchtkanaal weliswaar geen knik of andere weerstand aanwezig zijn. Verder valt in de brochure van In-Situ op (Anonymous, 2009), overigens net als bij Keller en SWS, dat de range van temperaturen waarbinnen de specificaties gelden begint bij 0 graden Celsius.



figuur 15: De variantie van de fout in de waterhoogte is bij ‘non-vented’ sensoren de som van die van de luchtdruk- en die van de totale druksensor (figuur In-Situ® Inc.).

De prijs van een ‘vented’ LevelTROLL500 bedroeg €900 ten tijde van het schrijven van dit rapport.

4.5.3 De DCX lijn van de firma KELLER AG für Druckmesstechnik

KELLER is een van oorsprong Zwitserse firma die, zoals de naam al aangeeft, gespecialiseerd is in drukmeettechniek. Het is naast Schlumberger Water Services een van de twee grote spelers op de Nederlandse markt van grondwaterdruksensoren, en heeft ook een (kleine) eigen Nederlandse vestiging. KELLER biedt net als In-Situ een drukopnemer (de DCX22-AA) die direct luchtdrukgecompenseerde waterstanden kan leveren. Dit gebeurt alleen niet zoals bij In-Situ door fysieke compensatie, maar door dit type drukopnemer standaard uit te rusten met twee sensoren die gezamenlijk aangestuurd worden en waarvan het verschil direct de waterdruk aangeeft. Daarnaast biedt KELLER, wederom net als In-Situ, ook een absolute drukopnemer (de DCX22-SG).

KELLER geeft in haar brochure slechts beperkte specificaties van de nauwkeurigheid van haar sensoren (*figuur 16*). De nauwkeurigheid zou volgens de brochures altijd 0,5 cm waterkolom ‘all-inn’ bedragen, los van het meetbereik en los van de vraag of het om de DCX22-AA (luchtdrukgecompenseerd, dus verschil van twee metingen) of om de DCX22-SG (absoluut, dus één meting) gaat. Dit is in tegenspraak met hetgeen onder 4.5.2 besproken is, en kan dus niet correct zijn. Verder wordt niet gespecificeerd hoe deze 0,5 cm nauwkeurigheid precies gedefinieerd of bepaald is. Mondelinge navraag bij KELLER leert dat het hierbij om de ‘typische’ nauwkeurigheid zou gaan, en dat de ‘maximale’ nauwkeurigheid één centimeter is. Verder zou de drift die de sensoren vertonen buiten deze specificaties vallen, en is een jaarlijkse kalibratie van de druksensoren noodzakelijk om de specificaties te halen. Uitgebreidere

Specificaties DCX22-SG	
Meting	piëzo-resistief, temperatuur gecompenseerd
Temperatuur compensatie	0..50°C
Bereiken	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50mWK
Nauwkeurigheid	0,5 cmWK all-inn typ., resolutie 15 bits
Intervaltijd	vast : 1 sec .. 14 dagen
Specificaties DCX22-AA	
Meting	piëzo-resistief, temperatuur gecompenseerd
Temperatuur compensatie	0..50°C
Bereiken	2*, 5, 10, 15, 20mWK
Nauwkeurigheid	0,5cmWK all-inn typ., resolutie 15 bits
Intervaltijd	vast : 1 sec .. 14 dagen

figuur 16: Nauwkeurigheidsspecificaties van de DCX22-SG en DCX22-AA van KELLER (Anonymous, 2010b)

specificaties of testresultaten zijn niet beschikbaar. Tenslotte valt in de brochure van Keller op, net als bij In-Situ en SWS, dat de range van temperaturen waarbinnen de specificaties gelden, begint bij 0 graden Celsius. In een reactie op een concept van dit rapport laat Keller weten dat de specificaties in de brochure inderdaad onjuist zijn weergegeven. De juiste opgave zou zijn 0.1%FS (Full Scale, dus een percentage van het meetbereik), incl. hysteresis, long term stability, temperatuurfout en lineariteit. De brochures van Keller zullen hier op korte termijn op worden aangepast. Verder blijkt Keller ook een geventileerde, fysisch gecompenseerde drukopnemer beschikbaar te hebben, de DCX22-VG (Vented Gauge).

De prijs van zowel een DCX22-AA als een DCX22-SG bedroeg €495 ten tijde van het schrijven van dit rapport.

4.5.4 De Divers van Schlumberger Water Services (SWS)

Schlumberger Water Services is de watertak van een van oorsprong Frans bedrijf uit de olie- en gasindustrie. Naast Keller is het een van de twee grote spelers op de Nederlandse markt van waterdruksensoren. Het heeft een eigen Nederlandse vestiging, dat voortkomt uit het voormalige Nederlandse Van Essen Instruments. SWS houdt zich naast de verkoop van drukopnemers ook bezig met projecten en vraagstukken daaromheen (beheer en verwerking van data en grondwatermeetnetten, advisering, software). SWS biedt verschillende typen Divers aan, die echter allemaal absoluut zijn en waarvan de metingen dus achteraf luchtdrukgecompenseerd moeten worden.

SWS geeft in haar brochure beknopte, en in de Diver Product Manual uitgebreidere, specificaties van de nauwkeurigheid van haar sensoren (figuur 17). De fouten nemen bij SWS in ieder geval correct toe met het meetbereik en ook de lange termijn fout en de definitie van de getallen wordt gegeven. In tegenstelling tot Vaisala specificeert SWS echter geen temperatuurafhankelijke meetfout in de druk, maar het stelt wel dat de fout in de tijdsregistratie temperatuurafhankelijk is. Bovendien zou de drift bij SWS niet toenemen met de tijd zoals bij Vaisala, maar cyclisch zijn en ook op lange termijn binnen de 0.2% FS blijven. Dit lijkt echter in tegenspraak met de verwachting, en met de patronen die in bijlage B te zien zijn. Verder valt in de brochure van SWS op, net als bij In-Situ en Keller, dat de range van temperaturen waarbinnen de specificaties gelden begint bij 0 graden Celsius.

De prijs van een Mini-Diver bedroeg €495 ten tijde van het schrijven van dit rapport.

Pressure

The specifications for atmospheric and water pressure measurements vary by type of Diver. The specifications below apply at a temperature range of 0 °C to 50 °C.

Mini-Diver

	DI501	DI502
		
Range	10 mH ₂ O	20 mH ₂ O
Accuracy	± 0.25% FS	± 0.25% FS
Typical	± 0.05% FS	± 0.05% FS
Long-term stability	± 0.2% FS	± 0.2% FS
Resolution	0.2 cmH ₂ O	0.4 cmH ₂ O
Maximum pressure	15 mH ₂ O	30 mH ₂ O

figuur 17: Nauwkeurigheidsspecificaties van de Mini-Diver in de Product Manual van SWS (Anonymous, 2010a).

5 Validatie en correctie van druksensorreeksen

5.1 Periodieke ijking of kalibratie van druksensoren

Precisie meetinstrumenten als druksensoren varen wel bij periodieke kalibratie. Onder kalibratie of ijking verstaan we het matchen van de metingen van het instrument aan andere, onafhankelijke waarnemingen met een hogere nauwkeurigheid. Systematische afwijkingen van het meetinstrument kunnen vervolgens gecompenseerd worden door ofwel instellingen van het apparaat daarop aan te passen, ofwel door de systematische afwijkingen in kaart te brengen en de meetgegevens daarvoor te corrigeren. De firma Keller raadt een jaarlijkse kalibratie aan voor haar druksensoren, maar houdt het daarbij wel alleen op handmetingen en correctie van de constante verschuiving of bias (zie paragraaf 4.5.3). De digitale barometers van Vaisala daarentegen zijn uitgerust met een mechanisme dat waarschuwt wanneer herkalibratie nodig is. Herkalibratie kan door de fabrikant gebeuren, waarna de drukopnemer teruggeplaatst kan worden en zijn meetwerk kan vervolgen. De nieuwe metingen die verzameld worden zullen vanaf dat moment weer nauwkeurig zijn, maar de geconstateerde afwijkingen c.q. ijkingsresultaten zeggen met terugwerkende kracht ook iets over de afwijkingen van het (nabije) verleden. De beste resultaten zijn te verkrijgen door met enige regelmaat de druksensor te ijken aan onafhankelijke waarnemingen, en op die manier het verloop van de afwijking in de tijd te volgen en corrigeren. Dat is mogelijk door luchtdrukreeksen te matchen met onafhankelijk daarvan door het KNMI waargenomen luchtdrukken, en door waterdrukreeksen te matchen aan onafhankelijke, periodieke handmetingen van het waterpeil.

5.2 Validatie en correctie luchtdrukreeksen a.d.h.v. KNMI-gegevens

Zoals in paragraaf 4.2 al aan de orde gekomen is, zijn de luchtdrukreeksen van het KNMI een goed hulpmiddel om de eigen, lokale luchtdruksensoren aan te ijken. Deze en andere KNMI-gegevens zijn tegenwoordig eenvoudig en kosteloos op te vragen via internet. Een nadere beschrijving van de methoden, apparatuur en opstelling waarmee de KNMI-luchtdrukreeksen verzameld zijn is te vinden in (Anonymous, 2000). De KNMI-luchtdrukreeksen vormen een onafhankelijke gegevensset én hebben een hogere nauwkeurigheid dan de gangbare, door hydrologen gebruikte druksensoren. Dit maakt de KNMI-gegevens in principe goed bruikbaar voor ijking van de eigen, lokale drukreeksen. Een complicerende factor is echter dat er in de praktijk een meer of minder grote afstand zal bestaan tussen de barometers van het KNMI en de eigen druksensoren. Het KNMI rekent bovendien haar metingen standaard om naar een luchtdruk op 0 meter NAP, dus ook de hoogte komt niet overeen. Laterale verschillen in luchtdruk zijn echter doorgaans niet erg groot (zie tabel 1).

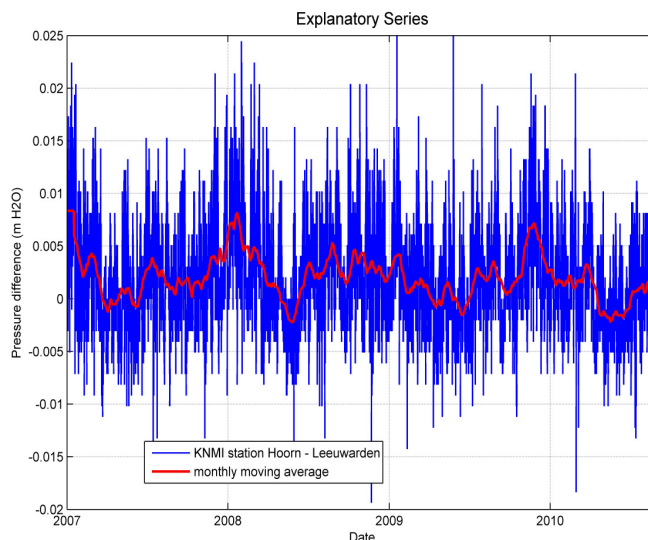
Tabel 1. Luchtdrukverschillen in cm waterdruk tussen KNMI-station Hoorn (Terschelling) en vijf zuidelijker gelegen stations. De cijfers zijn gebaseerd op een vergelijking van uurwaarden over een periode van tien jaar (bron: www.knmi.nl).

	Leeuwarden	Lelystad	Deelen	Volkel	Eindhoven	Maastricht
Afstand (km)	35	112	153	196	218	278
Gemiddelde (cm)	0.2	0.6	0.8	1.0	1.1	1.4
2 sigma (95% interval, cm)	+/- 0.9	+/- 2.8	+/- 4.0	+/- 5.0	+/- 5.5	+/- 6.9
Min en max (cm)	-2.2 tot 3.1	-4.2 tot 8.2	-5.8 tot 10.2	-12 tot 12.6	-7.5 tot 13.9	-9.4 tot 17.1

Belangrijker nog is dat het patroon in de verschillen tussen KNMI- en lokaal gemeten luchtdrukken niet systematisch is. Dit principe maakt het opsporen en corrigeren van systematische verschillen in de eigen metingen mogelijk. In een reactie op de presentatie die april 2010 door de auteur gehouden is over deze materie bij de voorjaarsbijeenkomst van de Nederlandse Hydrologische Vereniging (zie <http://www.nhv.nu/voorjaarsbijeenkomst-en-alv-2010>), stellen Schlumberger en Keller dat de vergelijking met KNMI-gegevens niet op zou gaan vanwege, respectievelijk:

1. Seizoensafhankelijke patronen in de windrichting en dus in luchtdruk
2. Systematische verschillen in de luchtdruk binnen en buiten een peilbuis

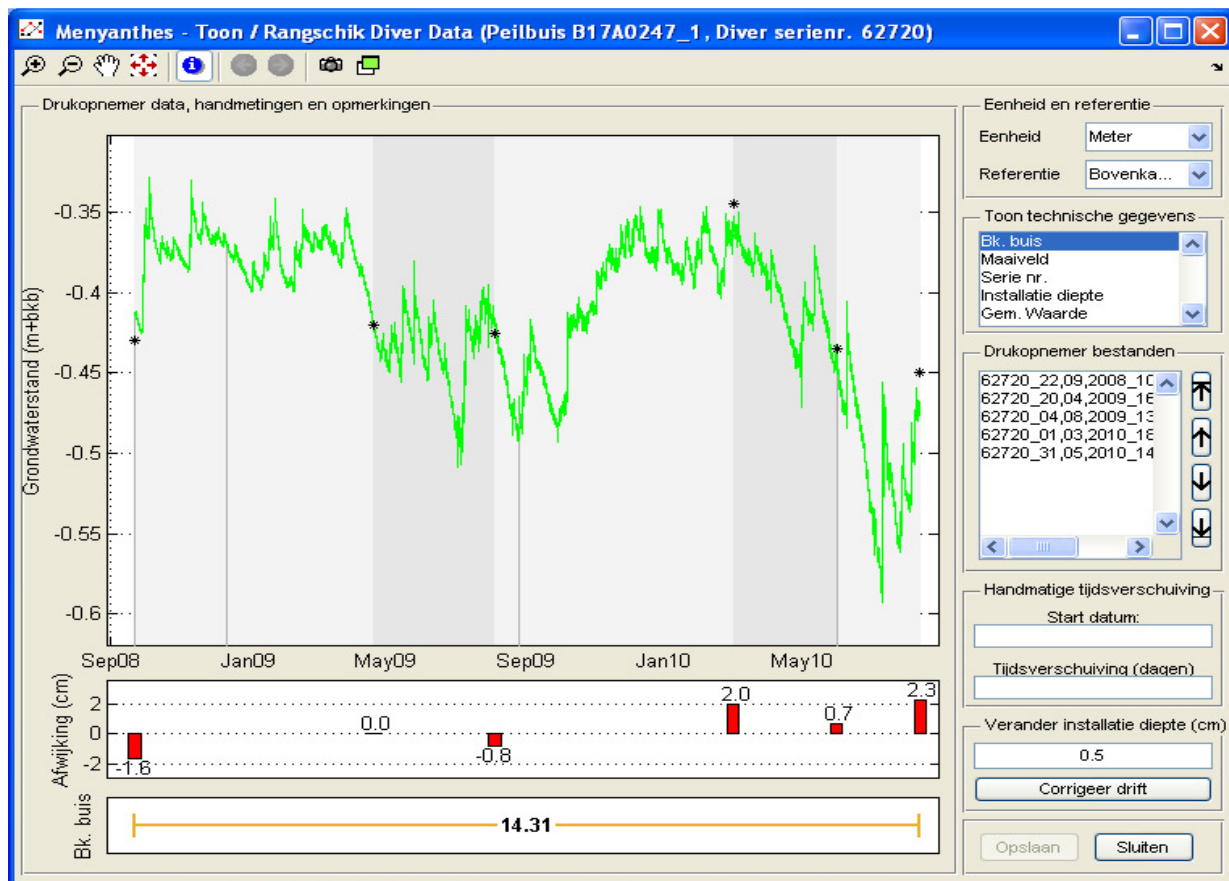
Het eerste punt van kritiek kan weerlegd worden door erop te wijzen dat dergelijke seizoenspatronen weliswaar bestaan, maar dat deze van een andere orde grootte zijn (± 0.5 cm) dan de geconstateerde afwijkingen in de druksensoren zelf (figuur 18). In de eerder gemaakte vergelijking tussen KNMI- en lokaal gemeten luchtdrukken zonder temperatuur- of seizoensafwijking (figuur 10) vallen deze patronen dan ook niet of nauwelijks op. Daarnaast lijkt een drift of trend, die bij de druksensoren een belangrijke afwijking vormt, in de KNMI-gegevens nagenoeg afwezig. Wanneer het tweede kritiekpunt van de firma Keller op zou gaan, zou dat ook het gebruik van haar absolute drukopnemers in een peilbuis, en luchtdrukcompensatie met een barosensor daarbuiten, in feite onmogelijk maken. De gemaakte vergelijking in figuur 9 tussen gemeten luchtdrukken binnen (droge drukopnemer) en buiten een peilbuis (regenmeter) laat dergelijke verschillen ook niet zien, en wanneer lucht vrijelijk toegang kan krijgen tot een peilbuis zijn ze ook niet te verwachten. In een vervolgonderzoek dient gekeken te worden of seizoensafhankelijke patronen in de werkelijke luchtdruk op verschillende locaties gecorrigeerd kunnen worden, evenals de hoogteverschillen tussen de sensoren (zie paragraaf 7.6).



figuur 18: Verschillen tussen de door het KNMI gemeten luchtdruk te Hoorn en Leeuwarden, en het maandelijks lopend gemiddelde daarvan.

5.3 Validatie en correctie waterdrukreeksen a.d.h.v. handmetingen

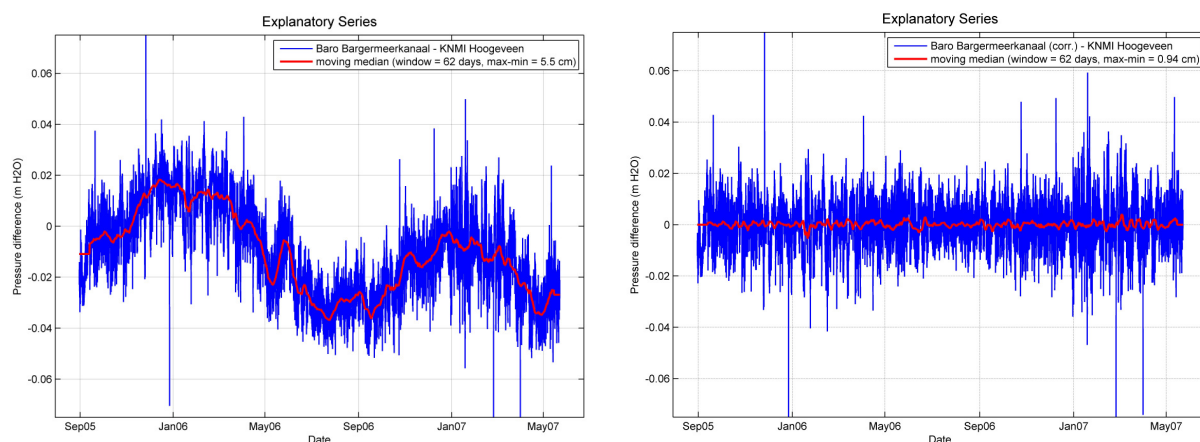
Een gangbare praktijk voor het controleren van waterdrukreeksen is het periodiek verzamelen van handmetingen van het waterpeil. De hand- en waterdrukmeting kunnen vervolgens vergeleken worden na omrekening van de laatste naar een stand ten opzichte van bovenkant buis. Een belangrijk verschil tussen luchtdruk- en waterdrukreeksen is dat bij de laatste zowel het water als de omringende bodem de variaties van de luchttemperatuur aan maaiveld temperen. Bij luchtdruksensoren die zich in een schutkoker, regenmeter of andere kleine afgesloten ruimte bevinden, kan de daarop vallende zonnestraling juist zorgen voor grotere temperatuurvariaties dan die van de lucht. Bij lucht- en waterdruksensoren gaat het de facto om hetzelfde type sensor, hoewel SWS om markttechnische redenen onderscheid maakt en een aparte Barodiver aanbiedt. Het lijkt dan ook logisch dat ook waterdruksensoren behept kunnen zijn met dezelfde temperatuursafwijkingen. Vanwege het feit dat de temperatuurfluctuaties zeker in grondwater kleiner zullen zijn, zullen temperatuurgerelateerde afwijkingen bij waterdrukreeksen echter vanzelf ook minder groot. Handmetingen worden vaak maar één of een paar keer per jaar gedaan (of zelfs geheel achterwege gelaten!), en vormen aldus een gegevensset van beperkte omvang. Wanneer echter luchtdrukcompensatie met een goede, voor temperatuursafwijkingen gecorrigeerde luchtdrukreeks is gebeurd, blijkt de in de waterdrukreeks resterende drift, als belangrijkste afwijking, vaak goed in beeld te brengen met behulp van periodieke handmetingen.



figuur 20: Controle en ijking van een grondwaterdrukreeks (groene lijn, na compensatie met een goede, voor temperatuursafwijkingen gecorrigeerde luchtdrukreeks) aan handmetingen (zwarte stippen). De verschillen (rode balkjes,) wijzen op een drift van 3 tot 4 cm in de waterdruksensor.

5.4 Softwarematige implementatie en correctiemethoden

Hoewel het niet het eigenlijke doel van dit onderzoek was, is toch getracht om in de loop ervan ook verschillende aanpassingen en uitbreidingen van het programma *Menyanthes* (voor het beheren, visualiseren en analyseren van (grond)waterstandsreeksen) te realiseren. Omdat de meeste water- en natuurbeherende organisaties en ingenieursbureaus de facto al gebruiker zijn van het programma, komt de toegevoegde functionaliteit daarmee ook direct voor hen beschikbaar. Hiermee wordt het ook voor anderen mogelijk om de in dit onderzoek toegepaste methoden snel en eenvoudig toe te kunnen passen op de eigen gegevens, om op die manier de methodiek ook zelf te kunnen toetsen. De aan *Menyanthes*

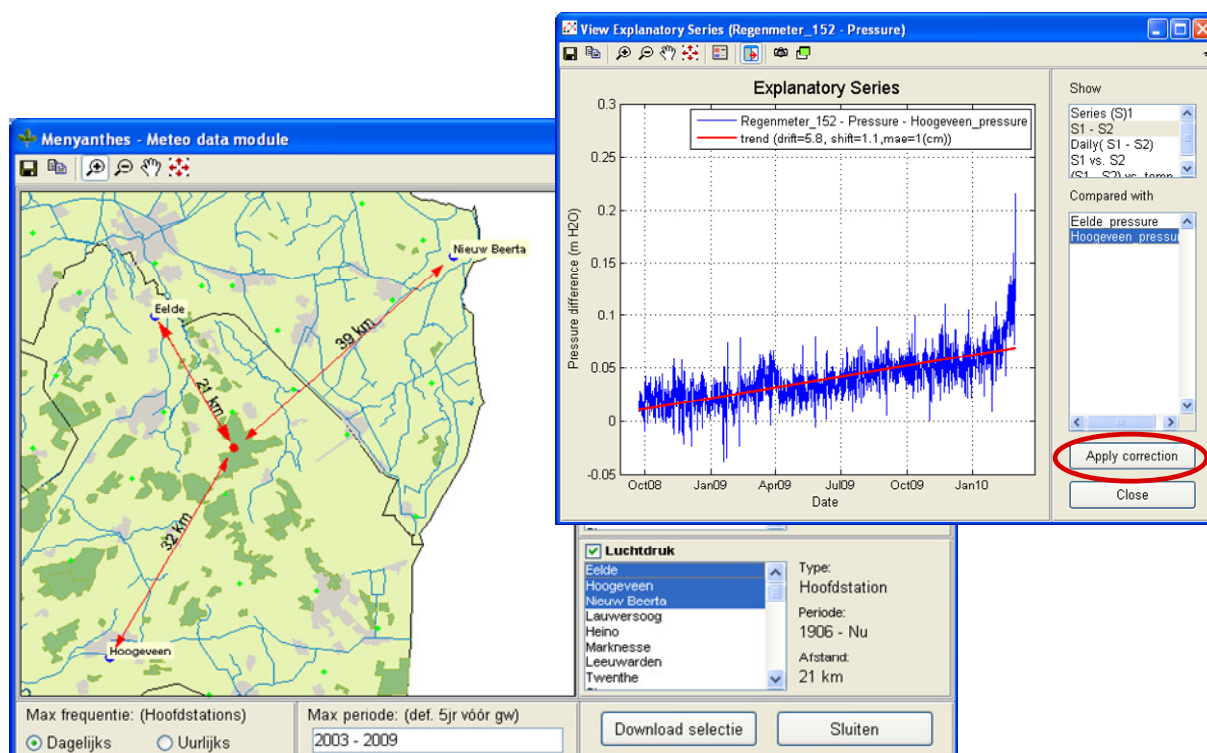


figuur 19: Toepassing van een lopende mediaan om verschillen tussen lokaal gemeten luchtdrukken (Baro Bargermeerkanaal) en die van KNMI-station Hoogetveen te corrigeren. Links de verschillen voor correctie, en rechts die erna.

toegevoegde functionaliteiten zijn in concreto (zie ook *figuur 21*):

- **Meteo Data module** - nieuwe module waarmee direct de dichtstbijzijnde, dagelijkse of uurlijkse luchtdrukgegevens van het KNMI gedownload kunnen worden.
- **View Explanatory series module** - nieuwe tools waarmee verschillen tussen reeksen in beeld gebracht en eventueel gecorrigeerd kunnen worden.
- **Edit Diver Series module** - nieuwe mogelijkheid om reeksen lineair te kunnen corrigeren.
- **Diver Data module** - nieuwe knop waarmee verschillen tussen handmetingen (drift) lineair gecorrigeerd kunnen worden.
- **Import module** - *Menyanthes* houdt bij het omrekenen van waterdruk naar waterstand nu rekening met variaties in de dichtheid van water als gevolg van temperatuurvariaties, indien ook een temperatuursreeks beschikbaar is.

Delen van deze functionaliteit (bijvoorbeeld de tools onder de 'View Explanatory series module') zijn overigens op dit moment nog niet uitontwikkeld, en reacties en feedback zijn dan ook (en eigenlijk altijd) welkom. Als correctiemethode voor seizoensafhankelijke patronen en drift is nu een lopende mediaan geïmplementeerd (zie *figuur 19*). We bevelen aan om de correctiemethoden verder uit te werken en te verbeteren (zie paragraaf 7.6).



*figuur 21: Voorbeelden van nieuwe modules in Menyanthes. Met behulp van de 'Meteodata module' linksonder kunnen direct de dichtstbijzijnde, dagelijkse of uurlijkse luchtdrukgegevens van het KNMI gedownload worden. De 'View module' in het verklarende reeksen kwadrant (in het hoofdscherm van Menyanthes) is nu uitgebreid met een optie die de verschillen tussen reeksen in beeld brengt en eventueel corrigeert. Ook in de "Diver Data module" uit *figuur 20* is nu een knop aangebracht waarmee verschillen (hier drift) gecorrigeerd kunnen worden.*

6 Fouten en afwijkingen in druksensorreeksen: praktijk

6.1 Gebrek aan goede en goed bewaarde gegevens

Om de fouten en afwijkingen die bij druksensoren in de praktijk optreden in kaart te brengen, zijn goede en goed bewaarde gegevens nodig. Omdat de temperatuur een belangrijke rol speelt in de mogelijke afwijkingen, dienen idealiter zowel de originele luchtdruk-, waterdruk- als temperatuursreeksen bewaard en beschikbaar te zijn, naast de handmetingen en fysieke veranderingen zoals een wijziging van de inhangdiepte of vervanging van een drukopnemer. Dit blijkt helaas in de meeste gevallen teveel gevraagd. Dit soort gegevens wordt allereerst doorgaans niet systematisch opgeslagen. Een potentieel belangrijke gegevensbron voor dit onderzoek werd gevormd door de dataset van waterschap Velt en Vecht, dat al geruime tijd van druksensoren gebruik maakt bij haar waterkwantiteitsmonitoring. Naast het feit dat de originele gegevens van het waterschap niet allemaal bewaard zijn gebleven, stuitte we in dit onderzoek op twee andere problemen:

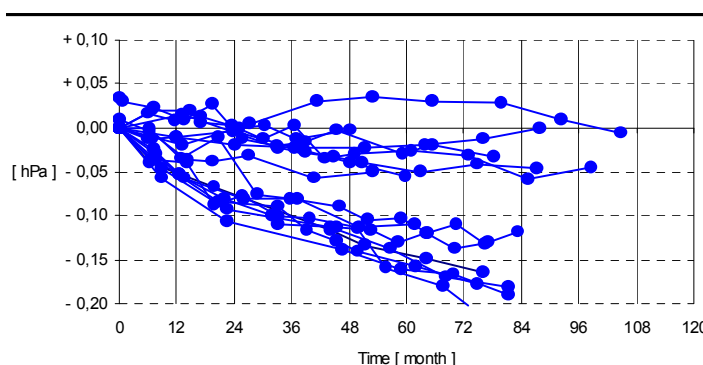
- Databases, zoals het door het waterschap gebruikte Dawaco, hebben doorgaans wel goede exportmogelijkheden voor definitieve, gevalideerde gegevens, maar niet voor originele data, handmetingen en beheersgegevens.
- Het door het waterschap gebruikte Dawaco bleek de gegevens niet op millimeter- maar op centimeterresolutie op te slaan. Bij een onderzoek naar afwijkingen en dag-nachtpatronen die in de ordegrootte van centimeters liggen, is millimeterresolutie essentieel (zie ook paragraaf 3.4).

Het onderzoek heeft zich daarom vooral gericht op luchtdrukreeksen, waarvan de originele drukopnemerbestanden nog voorhanden waren. Omdat het bij lucht- en waterdruksensoren feitelijk om hetzelfde type sensor gaat, veronderstellen we dat de fouten en afwijkingen die in luchtdrukreeksen terug te vinden zijn, ook in waterdrukreeksen zullen voorkomen. Hierbij benadrukken we echter nogmaals dat waterdruksensoren qua temperatuur wel een stabielere omgeving kennen. Een overzicht van de in dit onderzoek bekeken luchtdrukreeksen is te vinden in bijlagen A, B en C.

Van de provincie Overijssel zijn de originele gegevens met relatief eenvoudige middelen wel goed bewaard gebleven (zie ook paragraaf 2.2). Van deze gegevensset waren echter de handmetingen nog niet gedigitaliseerd. Dit is in een later stadium van dit project wel gebeurd. We doen hier de aanbeveling om in een vervolgonderzoek de aldus ontstane, complete en unieke dataset goed door te lichten om zo echt alle fouten goed en integraal in beeld te brengen.

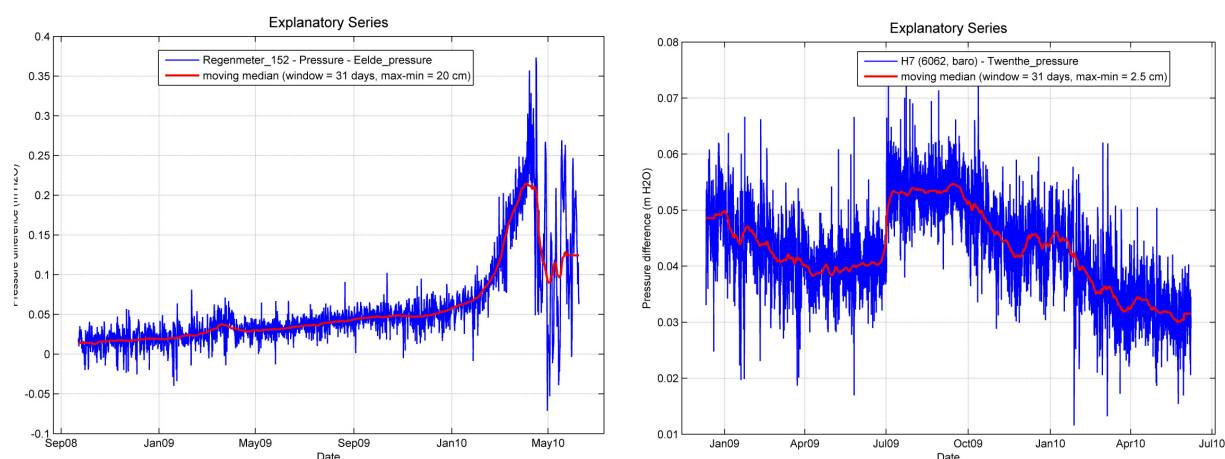
6.2 Bias, drift en ruis

In paragraaf 4.3 hebben we drift gedefinieerd als een in de tijd oplopende verschuiving van het nulpunt van een druksensor. Bias is, als constante verschuiving van dat zelfde nulpunt, op te vatten als de drift op $t = 0$. Bias en drift kunnen goed samen in beeld gebracht worden door lokale luchtdrukreeksen te vergelijken met KNMI-reeksen, waarvan we aannemen dat die nauwelijks of in ieder geval veel minder drift vertonen. De firma Vaisala geeft als enige inzicht in concrete kalibratieresultaten van haar druksensoren (figuur 22). Hieruit blijkt dat de drift bij haar sensoren na 8 jaar op maximaal ± 2 mm waterkolom zit, wat inderdaad een factor 50



figuur 22: Drift berekend uit kalibratieresultaten van 15 PTB 220 Barometers van Vaisala. 1 hectoPascal komt ongeveer overeen met 1 centimeter waterkolom (bron: Vaisala).

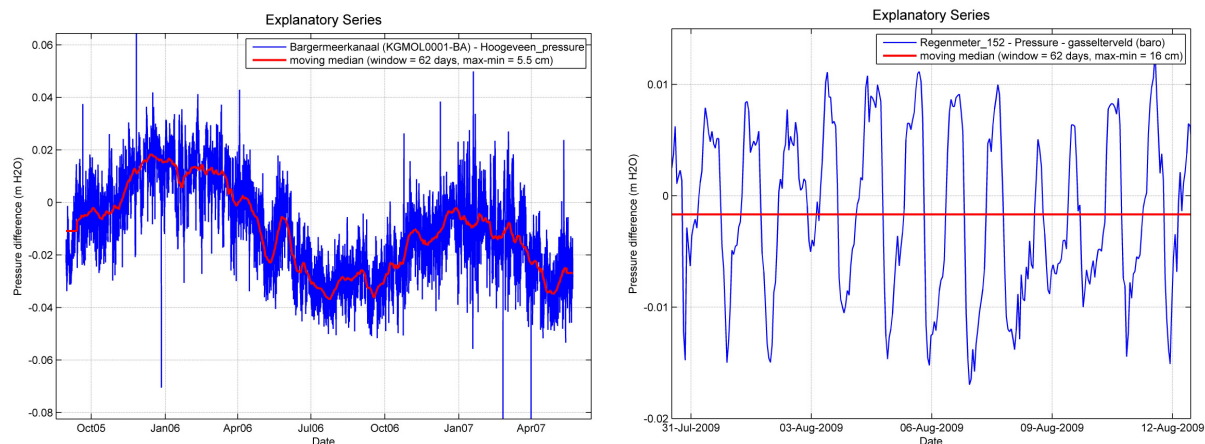
lager ligt dan de eerder geconstateerde drift in de druksensor bij buis Barkman 3 (2.5 cm na 2 jaar, *figuur 10*). In die figuur en die twee drukopnemers bleek de drift nagenoeg lineair op te lopen, en bleken andere c.q. temperatuurgerelateerde afwijkingen een minder grote rol te spelen. De afwijking van het nulpunt van een druksensor blijkt echter ook plotseling veel sterker op te kunnen lopen, of plotseling, bijvoorbeeld na uitlezing, een sprong te kunnen vertonen (*figuur 23*). De korte termijn verschillen die te zien zijn in *figuur 10* en *figuur 23* kunnen niet (of niet volledig) aan meetruis toegeschreven worden, omdat het hierbij om verschillen gaat tussen luchtdrukreeksen op verschillende xy-coördinaten en NAP-hoogtes. Bij de korte termijn verschillen in *figuur 9b* gaat het wel om verschillen tussen twee lokale druksensoren op dezelfde locatie, en dus om de meetruis van die sensoren. De gemiddelde absolute afwijking ten gevolge van deze meetruis lijkt hier op 1.9 mm te liggen, maar lijkt ook toe te nemen in de tijd. Dit laatste zou ook goed het gevolg kunnen zijn van afwijkingen in de tijdsregistratie, zodat de werkelijke meetruis (nog) lager ligt (met dank aan Klaas van der Meulen, Verbelco, voor de attendering hierop).



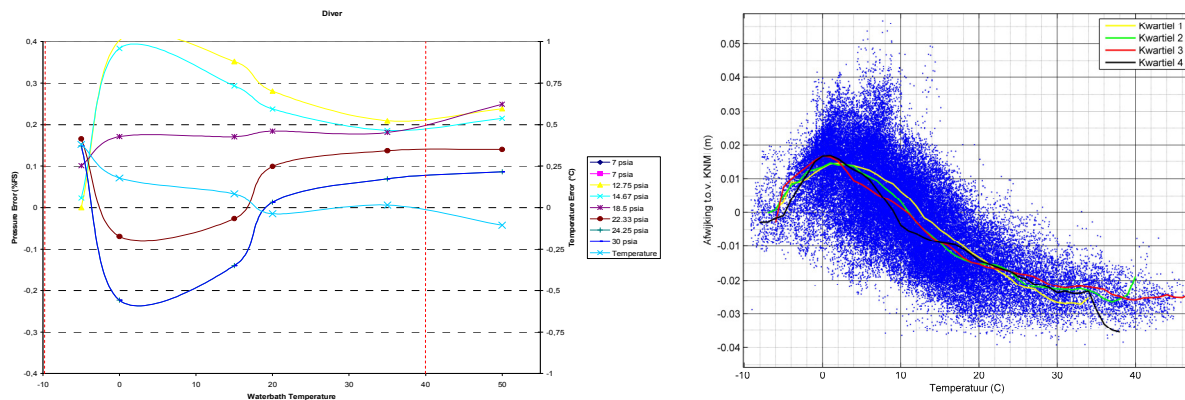
figuur 23: Twee andere voorbeelden van patronen in de drift. De nulpuntverschuiving lijkt in de linkerfiguur tot januari 2010 lineair te verlopen, maar neemt daarna plots sterk toe (Keller sensor). Het patroon vanaf april 2010 is ontstaan doordat op dat moment de drukopnemer tijdelijk stil is gevallen, waarna de tijdsregistratie verknoeid is geraakt. De druksensor in de rechter figuur (SWS sensor) vertoont naast een temperatuurgerelateerde afwijking, een plotselinge sprong na uitlezing in juli 2009.

6.3 Temperatuurgerelateerde afwijkingen

Zonder de ins and outs van temperatuurgerelateerde afwijkingen te kennen kan men zich voorstellen dat de 'stugheid' van een sensor, ofwel de druk die nodig is om een bepaalde indrukking te bewerkstelligen, afhangt van de temperatuur. Dit is zelfs in zo sterke mate het geval, dat alle fabrikanten naast druk- ook temperatuursensoren opnemen in hun drukopnemers en de drukreeksen in principe zo goed mogelijk corrigeren voor temperatuurgerelateerde afwijkingen. Terloops merken we hier op dat dit



figuur 24: Voorbeelden van temperatuurgerelateerde afwijkingen. a) fluctuatie met jaarfrequentie (linker figuur, inclusief drift) en b) fluctuatie met dagfrequentie (rechter figuur)



figuur 25: *Temperatuur versus afwijking bij verschillende drukken. a) via kalibratie van de Diver onder laboratoriumomstandigheden (bron: InSitu (dus niet onafhankelijk)). Psia staat voor ‘pounds per square inch absolute’, waarbij 14.67 psia (lichtblauwe lijn) ongeveer overeenkomt met een gemiddelde luchtdruk. b) via vergelijking met KNMI-station Hooogeveen. De kwartielen in figuur b) betreffen de kwartielen van de luchtdruk zoals die door de Diver gemeten zijn.*

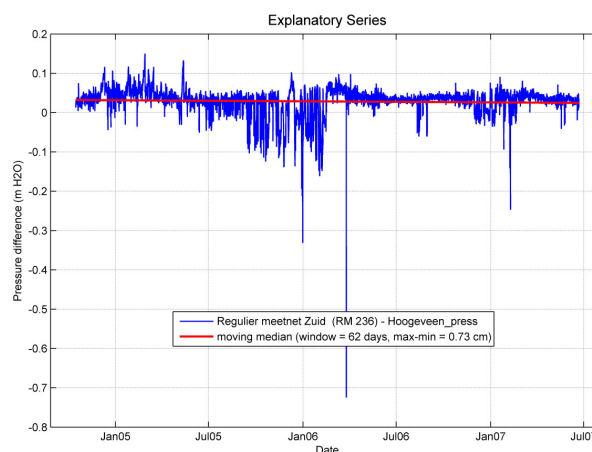
in de eerste generatie drukopnemers nog niet het geval was, waardoor dergelijke drukreeksen sowieso grote temperatuurgerelateerde afwijkingen vertonen. Omdat de luchttemperatuur samenhangt met de stand en draaiing van de aarde ten opzichte van de zon, zijn temperatuurgerelateerde afwijkingen terug te vinden als harmonische fluctuaties met een jaar- en dagfrequentie (figuur 25). De Keller DCX-22SG loggers die in dit onderzoek zijn bekeken bleken slechts relatief kleine temperatuurgerelateerde afwijkingen te vertonen (bijlage A), terwijl dergelijke afwijkingen bij de onderzochte SWS drukopnemers doorgaans meerdere centimeters besloegen (bijlage B). Samen met drift en plotseling falen lijken temperatuurgerelateerde afwijkingen tot de belangrijkste foutenbronnen in druksensorreeksen te behoren. Dat geldt niet alleen in kwantitatieve zin, maar ook vanwege het feit dat drift interfereert met feitelijke, langjarige veranderingen in de waterstanden waar de interesse doorgaans naar uit gaat, en afwijkingen met jaar- en dagfrequentie met de werkelijke jaarfluctuatie (GxG-statistieken) en dag-nachtpatronen (verdamping). Uit informatie die de firma InSitu heeft aangeleverd ten behoeve van dit onderzoek, blijkt dat de relatie tussen temperatuur en afwijking niet constant is maar ook afhankelijk is van de druk (figuur 25a). Hierbij zij wel opgemerkt dat deze informatie concurrentiegevoelig is, en niet door een onafhankelijk instituut is vastgesteld. Wanneer we de verschillen tussen de lokaal gemeten luchtdruk en die van het dichtstbijzijnde KNMI-station Hooogeveen uitzetten tegenover de temperatuur, vinden we een relatie met een vergelijkbare vorm (figuur 25b). Alhoewel de drukverschillen in deze figuur minder groot zijn dan degene die in het laboratorium zijn uitgeoefend, laat een vergelijking van de lopende mediaan van de afwijking, wanneer de luchtdrukken vooraf zijn verdeeld in vier kwartielen, zien dat er ook hier een relatie bestaat met de druk, zij het minder duidelijk. De relatie tussen afwijking, temperatuur en druk kan op deze manier in beeld worden gebracht, op basis waarvan de metingen in principe ook gecorrigeerd kunnen worden. Een dergelijke correctie blijkt echter de dag-nachtpatronen in de afwijking niet goed te verwijderen (niet gepubliceerd materiaal), zodat nader onderzoek naar een betere correctiemethode aan te bevelen is.

We merken hier ook op dat niet alleen de temperatuurafhankelijkheid van de druksensor, maar ook fouten in de temperatuurregistratie voor een niet afdoende temperatuurcorrectie kunnen zorgen. Dat geldt ook voor systematische verschillen (bijvoorbeeld vertraging) tussen de temperatuur van de temperatuursensor, en die van de druksensor, die om constructietechnische redenen kunnen bestaan.

6.4 Outliers, haperingen en kortstondige afwijkingen

Op het gevaar af een vergaarbak te creëren voor allerlei typen afwijkingen, behandelen we hier toch outliers, haperingen en andere kortstondige afwijkingen in één paragraaf. De hier behandelde afwijkingen hebben gemeen dat ze a) kort duren en b) dat de meetreeks zich na de kortstondige afwijking weer herstelt. De in figuur 23 getoonde afwijkingen zouden ook als een soort ‘hapering’ kunnen worden opgevat, maar deze heeft hier permanente gevolgen. Volgens de firma Keller zouden haperingen veroorzaakt worden door falen van de zogenaamde O-ring (afdichting) van de sensor. Van de hier behandelde afwijkingen zijn outliers of uitbijters in feite het best te definiëren, omdat het daarbij

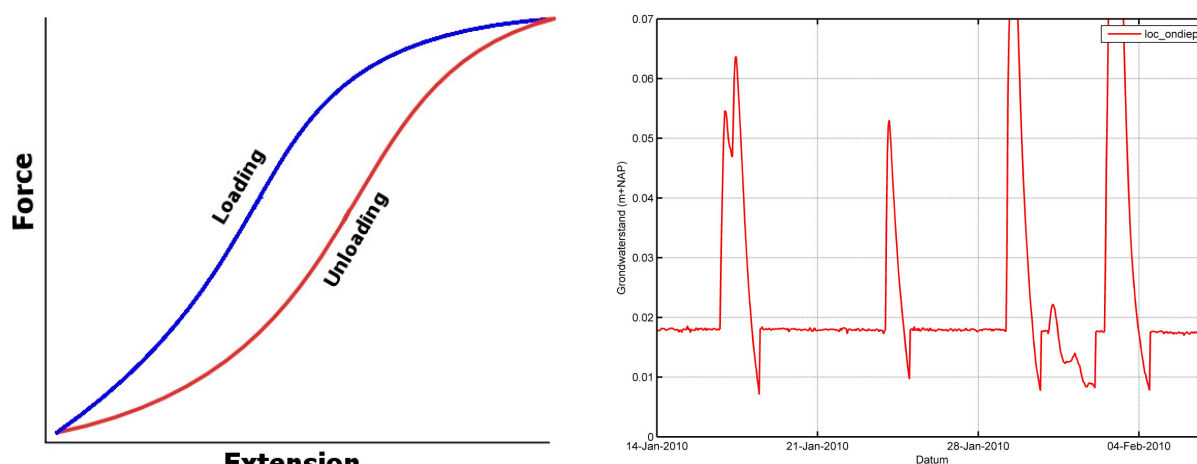
om losse, sterk afwijkende metingen handelt. Een van de mogelijk oorzaken van uitbijters die genoemd worden is de aanwezigheid van condens c.q. waterdruppeltjes of juist luchtbelletjes op het meetmembraan. In de afwijkingen die *figuur 26* toont is in ieder geval één duidelijke uitbijter van meer dan 70 centimeter te zien. Uit de figuur blijkt ook dat er sowieso periodes zijn waarin deze druksensor meer ‘hapert’ dan in andere, waarbij met name de winterperiode (rond januari 2006 en 2007) opvalt. In die zin lijken hier en ook elders de haperingen weer temperatuur of vorst gerelateerd, waarbij we nog eens benadrukken dat vorst volgens de specificaties buiten de temperatuursrange van de drukopnemers valt. Al met al wordt ook duidelijk dat periodiek of permanent haperen tot de grootste afwijkingen in druksensorreeksen behoren. Permanente hapering c.q. een sterk opgelopen drift is echter met handmetingen goed vast te stellen, en leidt doorgaans tot vervanging van de drukopnemer (zie bijvoorbeeld bijlage B). In dergelijke gevallen zal de meetreeks echter ook al in de periode vóór het afwijzen en verwijderen van de drukopnemer grotere afwijkingen vertonen.



figuur 26: Haperingen c.q. afwijkingen van baroreeks RM 236 t.o.v. KNMI-station Hoogeveen.

6.5 Hysteresis

Met hysteresis doelen we hier op een verschil in de relatie tussen werkelijke druk en drukmeting bij oplopende en afnemende druk. Het principe van elastische hysteresis wordt geïllustreerd in *figuur 27a*, waarin twee verschillende relaties tussen kracht en uitrekking of indrukking van een veer te zien zijn, de een bij oplopende, de ander bij afnemende druk. In *figuur 27b* is een drukreeks te zien afkomstig van een LevelTroll drukopnemer van de firma InSitu die ondiep hangt en regelmatig droogvalt. De horizontale lijn iets onder 0.02 meter is het stabiele droogvalniveau (waarmee direct de bias van deze sensor zichtbaar wordt). Bij een neerwaartse beweging van de grondwaterstand blijkt de meetreeks consequent onder dit droogvalniveau te schieten. Omdat droger dan droog niet mogelijk is, moet dit effect wel veroorzaakt worden door hysteresis. Daarmee wordt direct ook zichtbaar dat de afwijking ten gevolge van hysteresis bij deze drukopnemer ongeveer een centimeter is, en dus zeker niet verwaarloosbaar is. Wat opvalt aan deze, maar ook aan ander reeksen van LevelTroll drukopnemers, is het uitermate ‘gladde’ karakter van de reeks, ofwel de uiterst kleine meetruis. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door het feit dat in deze drukopnemers fysieke luchtdrukcompensatie is ingebouwd, waardoor de variantie van de ‘meetfout’ in de grondwaterstand sowieso de helft is van die van waterstandreeksen die

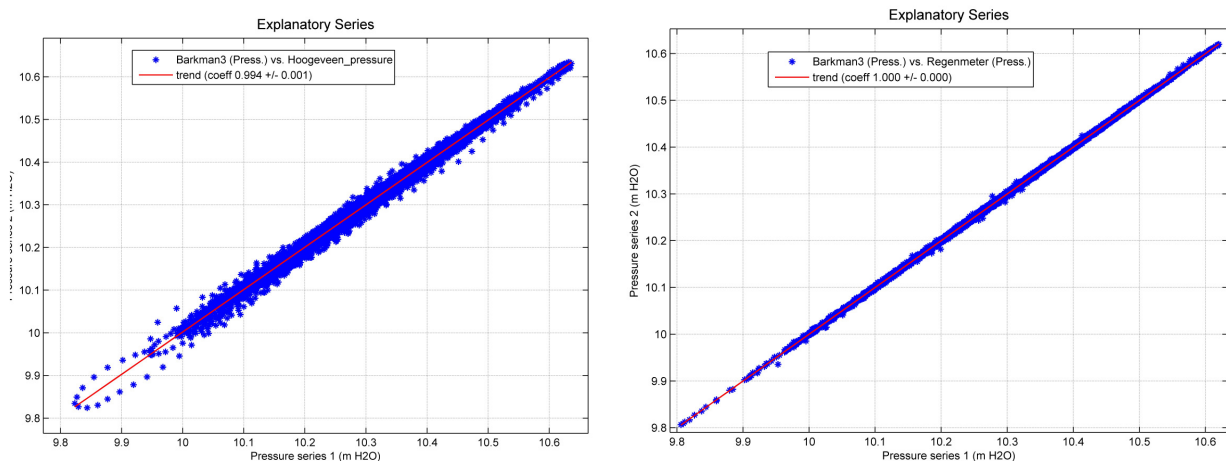


figuur 27: Voorbeelden van elastische hysteresis. a) principe c.q. relatie tussen druk en uitrekking bij oplopende en afnemende kracht (bron: wikipedia) en b) effect zoals te zien in een reeks afkomstig van een LevelTroll druksensor.

verkregen worden na compensatie met een luchtdrukreeks van een tweede sensor (zie paragraaf 4.5.2). De meetruis lijkt hier echter nog veel kleiner dan dat te zijn. Dit punt én de relatief grote hysteresis die LevelTroll drukopnemers lijken te hebben, kan er op wijzen dat deze sensoren stugger zijn dan die van andere fabrikanten. Deze stugheid of traagheid zal meetruis ‘fysiek wegfilteren’, en daarmee voor het gladde uiterlijk van de reeksen zorgen.

6.6 Range bias of afwijkingen in het meetbereik

Naast afwijkingen van het nulpunt van de sensor, kunnen er ook afwijkingen zijn van het meetbereik. Een weegschaal kan bijvoorbeeld bij nul kilo correct de nul weergeven, maar bij zestig kilo slechts achtenvijftig. De relatie tussen druk en meetwaarde kan bovendien niet netjes lineair zijn, zoals zou moeten (vergelijking de term ‘linearity’ in de specificaties van Vaisala). Om de eigen druksensorreeksen te toetsen op afwijkingen in het meetbereik, kunnen ze worden uitgezet tegen die van het KNMI-station op het zelfde tijdstip (*figuur 28*). De richtingscoëfficiënt van de trendlijn lijkt hier te wijzen op een kleine afwijking van het meetbereik van de lokale sensor. Te zien is verder dat de metingen bij hoge druk meer overeenkomen dan bij lage druk, wat te maken zal hebben met het verschil in locatie en de grotere dynamiek in de atmosfeer bij lage druk. De ‘lussen’ die bij lage druk te zien zijn, lijken dan ook toe te schrijven aan het overtrekken van een lagedrukgebied. Wanneer het meetbereik van twee lokale luchtdrucksensoren tegen elkaar uit gezet wordt, is de richtingscoëfficiënt keurig 1, en is er geen verschil te zien tussen lage en hoge druk. Range bias lijkt al met al geen factor van belang te zijn bij de onderzochte druksensoren.



figuur 28: Luchtdrukmetingen in buis Barkman3 uitgezet tegen a) die van KNMI-station Hoozeveen (linker figuur) en b) de regenmeter vlakbij (rechter figuur).

6.7 Fouten in de tijdsregistratie

Omdat hiervoor de gegevens ontbraken, is geen systematisch onderzoek gedaan naar fouten die optreden bij de tijdsregistratie. Uit controle van de log-bestanden van de eigen Keller-drukopnemers bleek echter dat afwijkingen van een half uur tot een uur, na een meetperiode van twee jaar, eerder regel dan uitzondering zijn. Omdat grondwaterstanden doorgaans traag fluctueren, vormt dit meestal voor de grondwaterstand zelf geen groot probleem (uitgezonderd snel fluctuerende systemen, die bijvoorbeeld onder invloed van getij staan). De luchtdruk kan op deze tijdschaal echter wel significante verschillen vertonen, zodat deze fouten wel een probleem kunnen vormen voor de luchtdrukcompensatie. De toename van de ‘meetruis’ in de twee lokale luchtdrukreeksen uit *figuur 9b* zou aldus verklaard kunnen worden uit fouten in de tijdsregistratie.

7 Conclusies en adviezen

7.1 Meet nu! Voor later

We beginnen dit hoofdstuk met bovenstaande oproep en principe, dat als een rode draad door het onderzoek loopt. Natuurlijk trappen we een grote open deur in als we stellen dat we later niet meer aan de situatie van nu kunnen meten. Toch is het van belang, omdat we daarmee het referentiekader aangeven op basis waarvan we tot adviezen komen over de huidige meet- en verwerkingspraktijk. Het is vanuit dit toekomstperspectief en voorzorgsprincipe niet zozeer van belang of bepaalde gegevens nu al gebruikt worden in de huidige (eco)hydrologische praktijk. Het is wel relevant of deze gegevens, of een andere verwerkingspraktijk, in principe meer of betere informatie opleveren. Daarnaast moet een voorgestelde meet- of verwerkingspraktijk natuurlijk wel zonder veel bezwaren praktisch realiseerbaar zijn.

7.2 Meetfrequentie, meettijdstip, middelen en medianen

Om tot een optimale meetfrequentie te komen, zijn in hoofdstuk 2 de meerkosten en meerwaarde van hoogfrequente metingen zo goed mogelijk in beeld gebracht en naast elkaar gezet. Uit de gedane exercitie blijkt allereerst dat metingen op uurbasis een duidelijke meerwaarde hebben ten opzichte van dagelijkse metingen. Met name in reeksen van ondiepe grondwaterstanden zijn dag-nachtpatronen aanwezig, die gestuurd worden door dag-nachtpatronen in de verdamping. Vaker dan dagelijks meten levert aldus aanvullende informatie hierover. Deze informatie heeft ook echt waarde omdat informatie over de actuele verdamping slechts met moeite en/of slechts indirect met andere methoden verkregen kan worden. Dergelijke verdampingsgestuurde dag-nachtpatronen liggen overigens in de ordegrrootte van centimeters, zodat het voor een betrouwbare kwantificering ervan nodig is om:

- a) temperatuurgerelateerde afwijkingen in druksensorreeksen afdoende te corrigeren.
- b) de verkregen grondwaterstandsreeksen op te slaan met millimeterresolutie.

Waarde en kosten zijn in principe alleen te vergelijken als je ze kunt uitdrukken in dezelfde eenheid (euro). We hebben hier echter kunnen volstaan met de constatering dat meerkosten bij een uurlijkse frequentie nagenoeg afwezig zijn, omdat:

- a) de huidige drukopnemers dan nog steeds maar minimaal 1 keer per 1.4 jaar uitgelezen hoeven te worden.
- b) de kosten van opslagcapaciteit c.q. harde schijfruimte nagenoeg verwaarloosbaar zijn.

In sommige gevallen zijn problemen te verwachten wanneer de huidige, gebruikte database deze grotere hoeveelheid gegevens moet opslaan en verwerken. In dat geval adviseren we om de originele gegevens slechts op harde schijf te bewaren, vergelijkbaar met hoe de provincie Overijssel dat al doet, en een selectie daarvan op te nemen in de database. We adviseren op dit punt al met al om:

- de druksensoren van het verdrogingsmeetnet in te stellen op een uurlijkse frequentie.

Ten aanzien van de vraag welke gegevens aan te leveren aan de database DINO, kunnen we concluderen dat zowel middelen als medianen de feitelijke grondwaterstanden vervormt. Navraag leert dat, wanneer hoogfrequente metingen worden aangeleverd, TNO automatisch de meting die het dichtst bij 12:00 uur ligt zal selecteren. De hoogfrequente gegevens worden bovendien integraal opgenomen in DINO, maar om applicatietechnische redenen niet uitgegeven. We adviseren hier om:

- de feitelijke, uurlijkse grondwaterstandsmetingen aan te leveren aan DINO.
- via wensen@dinoloket.nl bij TNO het verzoek neer te leggen om alle aangeleverde gegevens (inclusief tijdsaanduiding) via DINOloket beschikbaar te stellen aan derden. Een dergelijke wens zal in de DINO-gebruikersraad worden besproken en geprioriteerd.

7.3 Fouten en afwijkingen in druksensorreeksen

Uit het onderzoek aan de luchtdrukreeksen is gebleken dat druksensoren significante afwijkingen kunnen vertonen. De afwijkingen liggen in de regel in de orde grootte van centimeters, maar kunnen ook decimeters beslaan. De belangrijkste typen afwijkingen zijn:

- **Drift** – ofwel een in de tijd oplopende verschuiving van het nulpunt van de sensor. Deze loopt over het algemeen op met een of meerdere centimeters per jaar, en kan dus na enige tijd decimeters beslaan.
- **Temperatuurgerelateerde afwijking** – de temperatuur beïnvloedt vermoedelijk de stugheid van het diafragma van de sensor, en daarmee de meting. De afwijking kan vooral bij SWS sensoren centimeters beslaan, en is zeker in het licht van de hier bekeken dag-nachtpatronen een storende factor van betekenis.
- **Haperingen of falen van de sensor** – om uiteenlopende redenen kunnen sensoren opeens grote afwijkingen gaan vertonen. Dit is meestal reden om de drukopnemer te vervangen (wat bij zowel de provincie Overijssel als bij Vitens bij ongeveer 50% van de drukopnemers gebeurd is). De afwijking die reden is om een drukopnemer te vervangen zal echter in meer of mindere mate ook in de meetreeks voorafgaand aan vervanging aanwezig zijn.

7.4 Valideren en corrigeren van druksensorreeksen

Ten aanzien van het valideren en corrigeren van de afwijkingen in druksensorreeksen adviseren we om:

- **Luchtdrukreeksen te valideren en corrigeren a.d.h.v. KNMI-gegevens** – deze actie is in principe terug te brengen tot een administratieve handeling, en vergt dan nauwelijks meerwerk.
- **Waterdrukreeksen te valideren en corrigeren a.d.h.v. handmetingen** – hiervoor moet een of meerdere keren per jaar wel een handmeting van het waterpeil gedaan worden. Uit het onderzoek volgt echter dat, wanneer de luchtdrukreeks afdoende gecorrigeerd is, de afwijkingen in de waterdrukreeks meevallen, en voornamelijk de eenvoudig te corrigeren drift betreffen.
- **De instellingen c.q. inhangdiepte in de drukopnemer zelf niet te wijzigen** – de afwijkingen van een drukopnemer komen pas goed in beeld wanneer ze met verschillende handmetingen in samenhang kunnen worden bekeken. Wijzigingen in het veld zijn veel lastiger te administreren. Wijzigen van de inhangdiepte in de drukopnemer zelf is overigens bij SWS drukopnemers ook niet mogelijk.

Dit advies is in feite een verbijzondering van het eerder door de STOWA uitgegeven 'Validatieplan waterkwantiteitsmetingen' (Versteeg & De graaff, 2009), waarin de specifieke problematiek van druksensoren niet of nauwelijks aan de orde komt.

7.5 Te bewaren parameters en gegevens

Wanneer grondwaterstanden worden gemonitord met behulp van drukopnemers, worden in principe de volgende gegevens geregistreerd en/of zijn van belang:

- Luchtdruk en -temperatuur
- Waterdruk en -temperatuur
- Handmetingen van het waterpeil
- Fysieke wijziging van de inhangdiepte of bovenkant buis
- Identificatie van de drukopnemer per peilbuis

Omdat er in de praktijk nogal wat problemen blijken te zijn met drukopnemerreeksen (met naast de hier behandelde afwijkingen, ook administratieve fouten) adviseren we om al deze gegevens in originele vorm te bewaren. Zoals gezegd zijn de kosten van de benodigde opslagcapaciteit nagenoeg te verwaarlozen, zeker wanneer ze gewoon op harde schijf worden opgeslagen en niet in een databaseprogramma dat daarvoor (nog) niet geschikt is. Door de originele gegevens te bewaren kan ook achteraf nog de kwaliteit en betrouwbaarheid ervan worden vastgesteld, of kan een betere correctie worden doorgevoerd indien beschikbaar. De temperatuur van het grondwater is bovendien ook op

zichzelf een hydrologisch relevant signaal, en dient ook daarom te worden bewaard (en liefst gecontroleerd).

7.6 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Er is een aantal punten dat na dit onderzoek nog nadere aandacht verdient:

- **Dataset provincie Overijssel** – een gegevensset zoals bedoeld onder paragraaf 7.4 is niet alleen vanuit beheersmatig oogpunt, maar ook wetenschappelijk van belang. Ten tijde van dit onderzoek bleek alleen de dataset van de provincie Overijssel hieraan te voldoen, met dien verstande dat de handmetingen ervan niet digitaal beschikbaar waren. Dit euvel is inmiddels verholpen, waarmee een vooralsnog unieke dataset is gecreëerd. Aan de hand daarvan kunnen niet alleen verdere correcties worden uitgetest en doorgevoerd, maar kunnen ook alle fouten bij zowel hand- als druksensormetingen integraal in beeld worden gebracht.
- **Correctie a.d.h.v. KNMI-gegevens** – de voorgestelde validatie- en correctiemethode van luchtdrukreeksen aan de hand van KNMI-gegevens is weliswaar doeltreffend voor het verwijderen van de grootste afwijkingen uit luchtdrukreeksen, maar is nog niet optimaal. Zo kan (afhankelijk van afstand en richting) de methode op zichzelf een seizoensafwijking veroorzaken van rond de halve centimeter (paragraaf 5.2). We adviseren de methode op het punt van de hoogte- en locatieverschillen verder uit te werken en te verbeteren.
- **Correctie temperatuurafwijking** – in paragraaf 6.3 zijn temperatuurgerelateerde afwijkingen onder de loep genomen, zonder dat de relatie tussen afwijking, temperatuur en druk echt goed opgehelderd is. Het seizoenspatroon in de temperatuurgerelateerde afwijkingen kan gecorrigeerd worden met behulp van een lopende mediaan, maar dit biedt nog geen verbetering voor dag-nachtpatronen in temperatuurgerelateerde afwijkingen. We adviseren de methode op dit punt verder uit te werken en te verbeteren.
- **Automatische foutendetectie** – beschrijvende statistiek kan ingezet worden om automatisch fouten in meetreeksen te detecteren, en eventueel te (laten) corrigeren. Omdat tijdreeksanalyse een betere beschrijving geeft van de eigenschappen van meetreeksen dan pure, univariate beschrijvende statistiek, leent tijdreeksanalyse zich in principe ook heel goed voor automatische foutendetectie. We adviseren een onderzoek waarin een methode voor automatische foutendetectie met behulp van tijdreeksanalyse wordt uitgewerkt en uitgetest. Ook andersoortige fouten zoals filterverwisselingen dienen in een dergelijk onderzoek aan bod te komen.

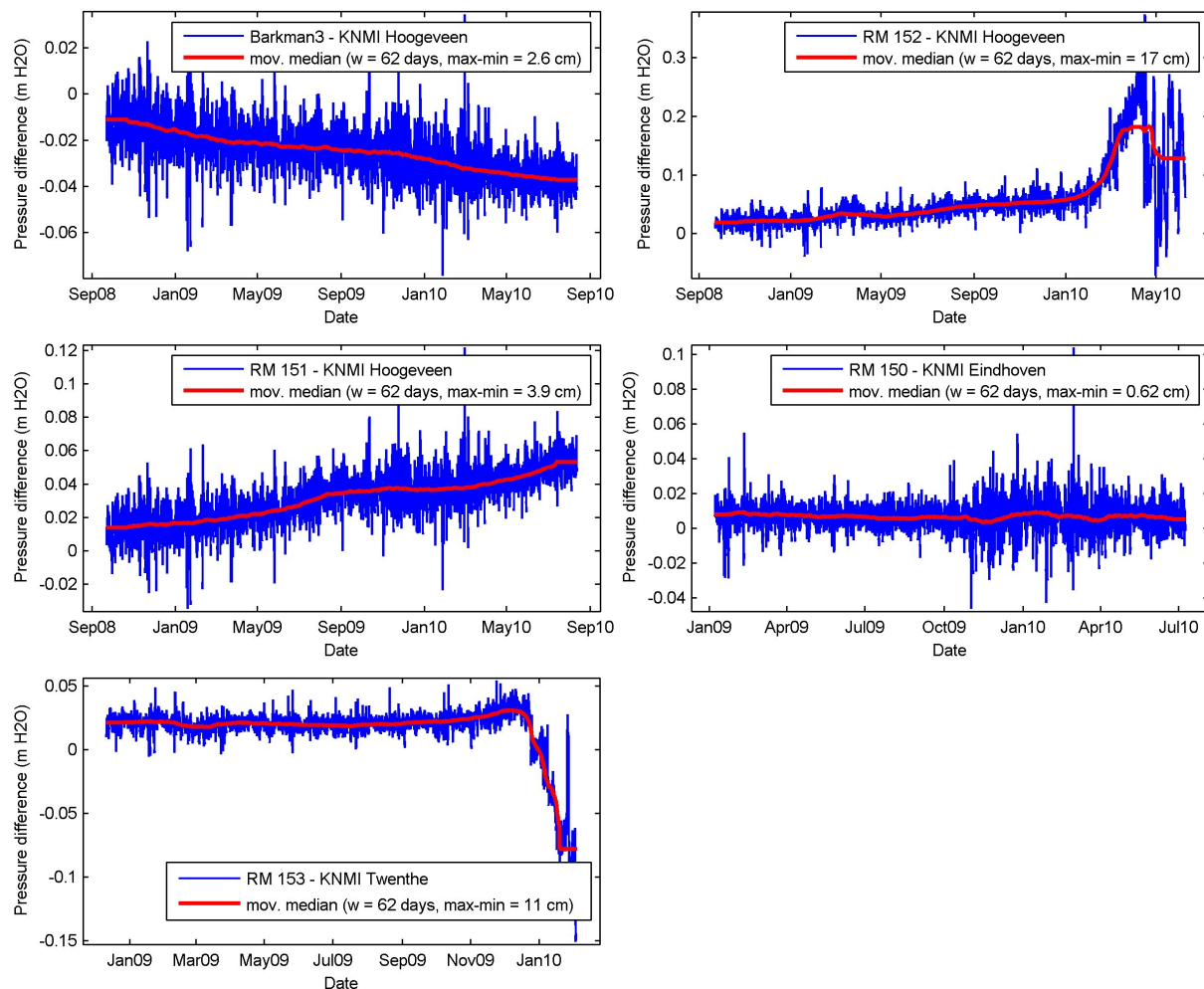
Literatuur

- Anonymous (2000)** Handboek Waarnemingen; KNMI, De Bilt.
- Anonymous (2004)** Operating Manual for Logger DCX 4.0; Keller AG, Winterthur.
- Anonymous (2009a)** LevelTROLL Family Brochure; In-Situ inc., Fort Collins, USA.
- Anonymous (2009b)** PTB330 Digital Barometer for Professional Meteorology, Aviation, and Industrial Users; Vaisala Instruments Catalog, Helsinki, Finland.
- Anonymous (2010a)** Diver Product Manual; Schlumberger Water Services, Delft, Nederland.
- Anonymous (2010b)** Maak kennis met de nieuwe KELLER DCX niveau-, overstort- en neerslag dataloggers; Brochure KELLER Meettechniek BV, Reeuwijk, Nederland.
- Kruithof, A.J. (2001)** De impuls-responsfunctie van de grondwater spiegel. Scheiden van de invloed van de onverzadigde en de verzadigde zone.; Master's Thesis, TU Delft, BTO no. 2001.163(s) Kiwa Water Research, Delft, Nieuwegein.
- Versteeg, R. & De Graaff, B. (2009)** Validatieplan waterkwantiteitsmetingen; rapportnummer 2009-20, Stowa, Utrecht.

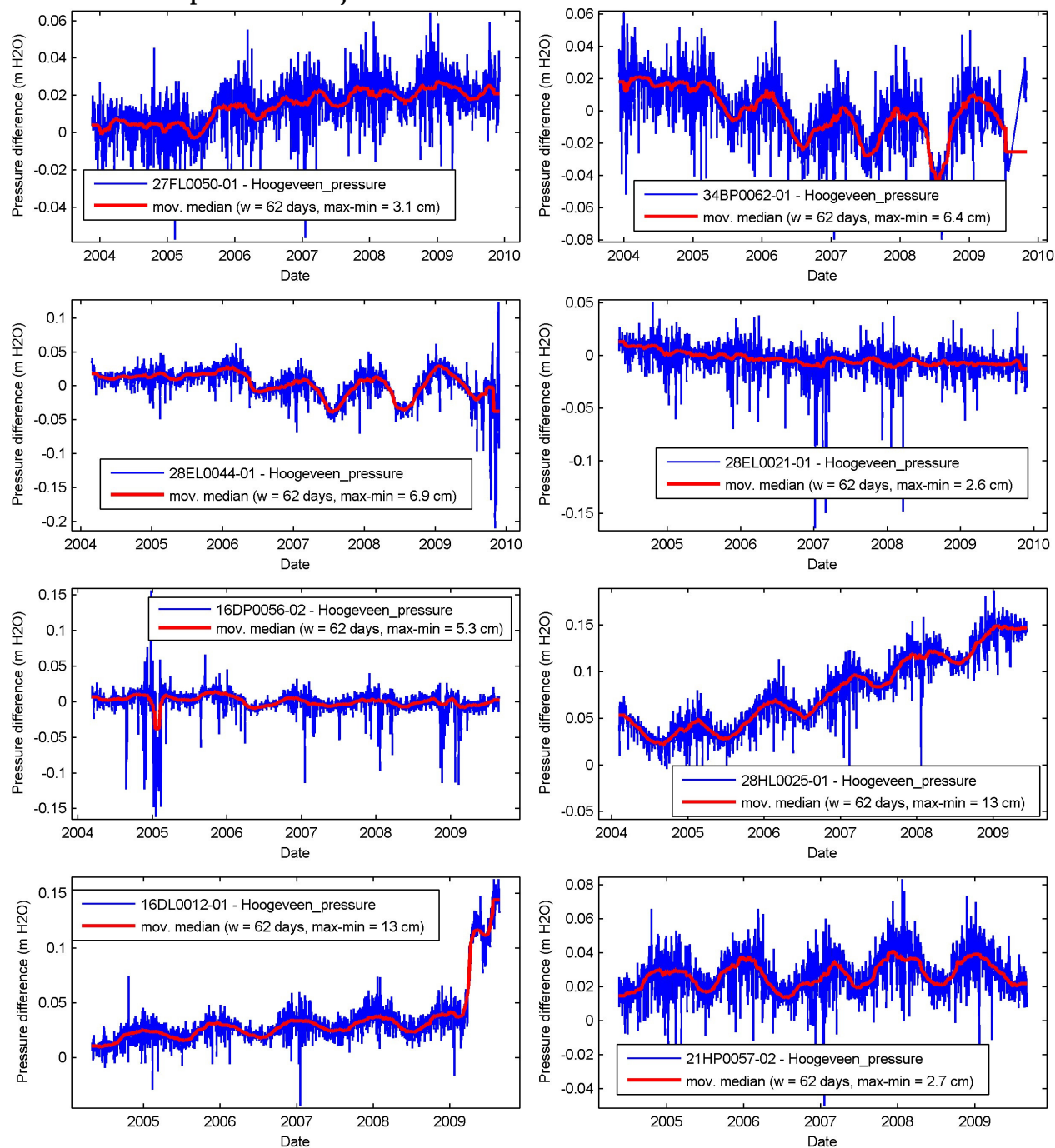
Bijlage A: Afwijkingen in Keller luchtdrukreeksen

Bij de in deze bijlage opgenomen luchtdrukreeksen gaat het om alle luchtdrukreeksen van Keller DCX-22SG drukopnemers en regenmeters uit het OBN-meetnet van de auteur, en om een selectie van de 486 luchtdrukreeksen uit Keller DCX-22AA drukopnemers van de provincie Overijssel. Die laatste selectie is niet noodzakelijkerwijs representatief.

Regenmeters en DCX-22SG drukopnemers OBN-meetnet

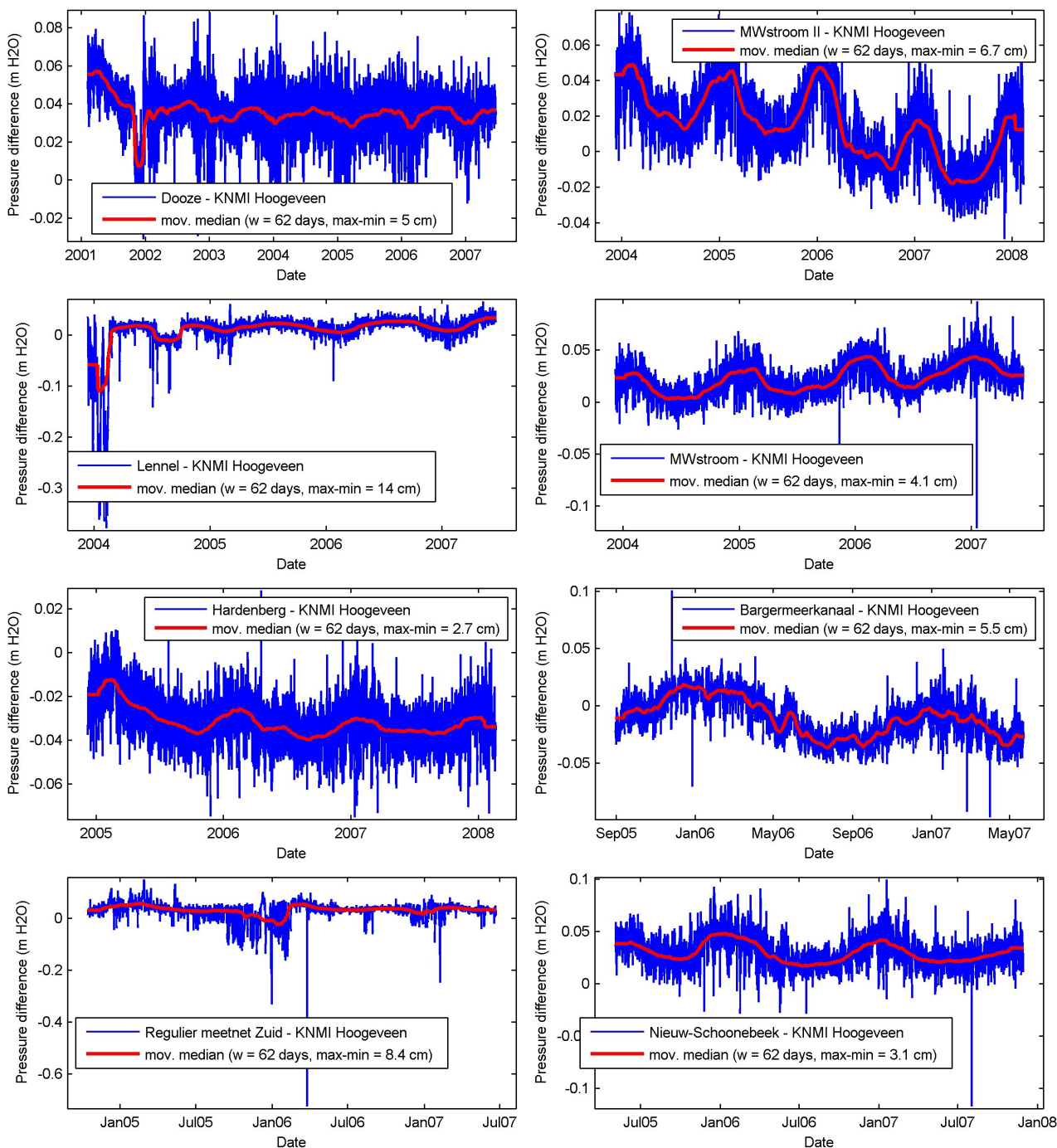


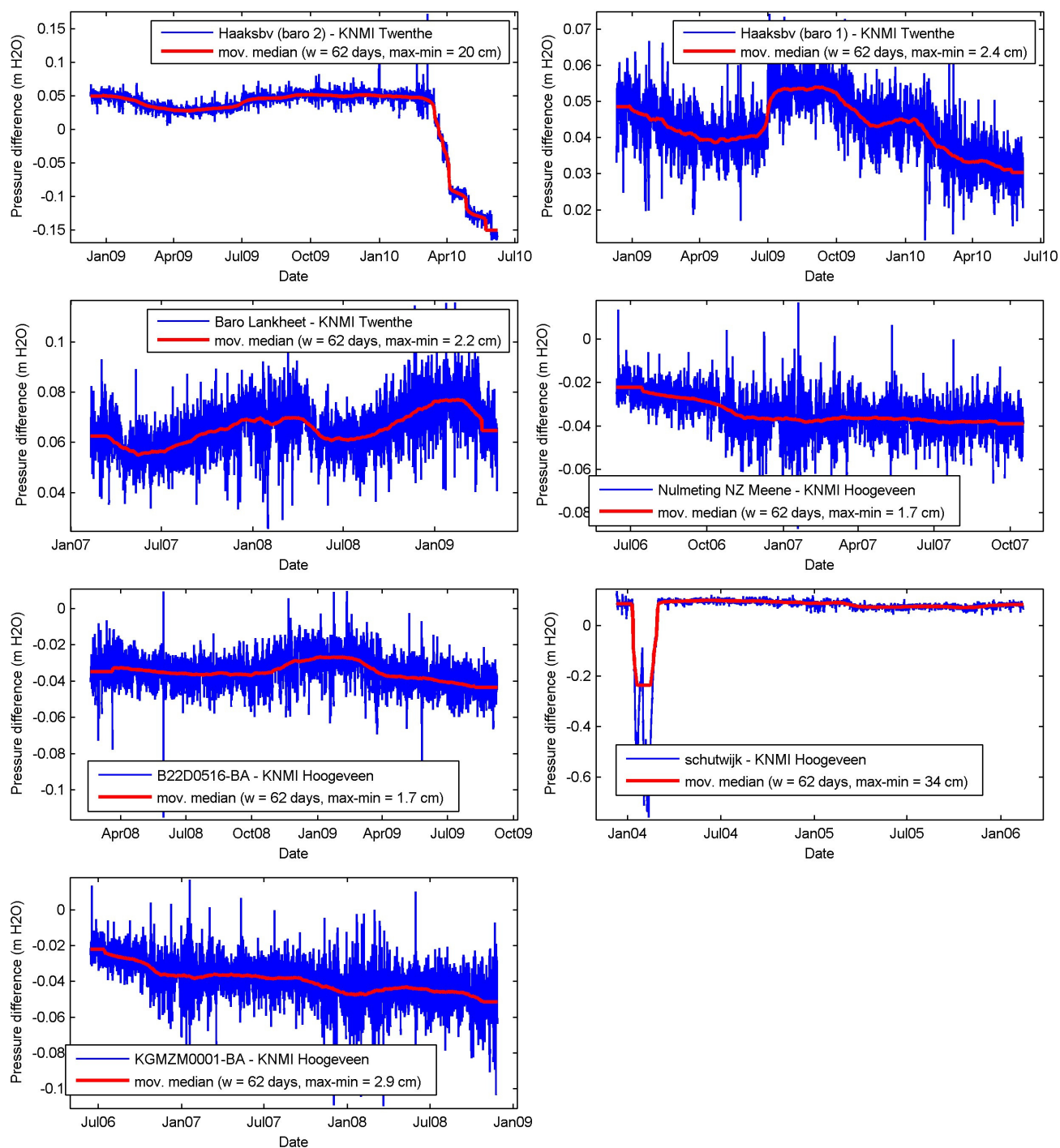
DCX-22AA drukopnemers Overijssel



Bijlage B: Afwijkingen in Diver luchtdrukreeksen

Bij de in deze bijlage opgenomen luchtdrukreeksen gaat het om alle luchtdrukreeksen van SWS drukopnemers zoals die door waterschap Velt en Vecht en anderen zijn aangeleverd.





Bijlage C: Afwijkingen in LevelTroll drukreeksen

Bij de in deze bijlage opgenomen reeksen gaat het niet om luchtdrukreeksen, maar om een paar reeksen van LevelTroll drukopnemers van de provincie Zeeland die periodiek droogvallen. LevelTroll drukopnemers zijn in principe fysiek luchtdrukgecompenseerd. In de periode dat de sensor droog hangt zijn echter wel drift, hysteresis, temperatuurgerelateerde en/of andere afwijkingen te zien. Vandaar dat deze reeksen dus opgenomen zijn.

