

**Addendum Bodemdalingsmodellering & analyse
bij
Uitvoering beheerscyclus M&R protocol 'Barradeel II'
over het jaar 2015**



Vorbereiding: Well Engineering Partners B.V.,
Hoogeveen

Auteur:

Versie: 2 (definitief)

Publicatiedatum: 5 september 2017

Goedkeuring: , Frisia Zout B.V.



Inhoud

1	Inleiding.....	1
2	Verwerpingsprocedure van individuele peilmerken	2
3	Gaussische modellering met flexibele gamma-parameter	3
4	Conclusies	4
5	Vooruitblik nieuwe procedure met ingang van 2017	5
6	Referenties.....	5

1 Inleiding

Na bestudering van het rapport Uitvoering beheerscyclus over het jaar 2015 (ref.1) heeft Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) Frisia verzocht om 1) een nader onderzoek uit te voeren naar de toenemende systematische modelafwijkingen in de Gaussische iteratieve voorwaartse modellering van peilmerkbewegingen en 2) de autonome bodemdaling in het winningsgebied preciezer te bepalen.

In een eerste Addendum (ref.2) is punt 2 van het SodM-verzoek nader uitgewerkt. Anteagroup heeft lokale vereffeningen uitgevoerd in een beperkt lokaal meetnet van peilmerken rondom de drie GPS locaties met het doel meer inzicht te krijgen in de autonome peilmerkdaling ter plaatse.

Dit tweede Addendum gaat nader in op SodM-kanttelingen bij de Gaussische modellering van bodemdaling, die in de beheerscyclus is toegepast. Uit overleg met SodM (ref.3) zijn twee actiepunten aangaande de modellering voortgekomen (punten 2 en 3), die in dit Addendum aan bod komen. Actiepunt 2 betreft de verwerpingsprocedure van individuele peilmerken en de gemiddelde afwijking van peilmerkhogten in de modellering van bodemdaling. Actiepunt 3 gaat over modellering van de bodemdaling vanaf de start in 2008 van zoutproductie uit caverne BAS-4 met inschakeling van een flexibele komvorm-parameter gamma.

Frisia legt de nadruk op een precieze en betrouwbare vaststelling van bodemdaling boven cavernes BAS-3-O en BAS-4, in verband met de limietwaarde van 30 cm bodemdaling door zoutwinning, die bij de instemming met het winningsplan Barradeel II officieel is voorgeschreven.

2 Verwerpingsprocedure van individuele peilmerken

Dit hoofdstuk behandelt **Actiepunt 2**: WEP gaat betekenis van modelresultaat 'Gem.PM afwijking' en verwerpingsprocedure van individuele peilmerken opnieuw bestuderen.

Gaussische bodemdalingmodellering

De vorm en omvang $w(x,y)$ van de bodemdaling van een convergerende caveerne met de as van de caveerne op de positie (x_0, y_0) kan worden beschreven met een eenvoudig cirkelsymmetrisch Gaussisch model volgens:

$$w(x, y) = w_{\max} \exp(-\gamma r^\delta) :$$

In deze formule is w_{\max} de maximum bodemdaling in het centrum (x_0, y_0) van de dalingskom; γ (gamma) is een variabele, die de afvlakking van de kom bepaalt; δ (delta) is een variabele, die de steilheid van de kom bepaalt; r is de horizontale afstand van een willekeurige positie (x, y) tot het centrum van de kom.

Periodieke waterpasmetingen aan peilmerken leveren gegevens over de peilmerkhoogten (re NAP) op discrete tijdstippen (epochen). In de meetregisters worden differenties vermeld, die de voortgang van de peilmerkbewegingen (meestal daling) in de tijd ten opzichte van stabiele aansluitpunten quantificeren. In de analyse van de hoogtegegevens wordt het maximaal aantal beschikbare peilmerken zonder invloed van de nabijgelegen Vermilion gaswinning gebruikt om tot de beste passing ('best fit') te komen van de Gaussische komparameters met de dalingsgegevens van de peilmerken. De best fit is gebaseerd op de methode van de kleinste gemiddelde kwadraten (RMS-methode) van de verschillen tussen de gemeten en de berekende peilmerkdaling. Peilmerken waarvan de gemeten daling meer dan 13 mm afwijkt van de berekende best-fit komdaling worden uitgesloten.

Betekenis verwerpingscriterium van 13 mm

De drempelwaarde $D = 13$ mm is aanvankelijk gebaseerd op een maximale standaardafwijking van $\sigma = 3$ mm in een gemeten hoogte, waarbij $D = 3\sqrt{2} \sigma$ (99% overschrijdingskans, ref.4). De aanname van $\sigma = 3$ mm is zeer ruim, gezien het feit dat de peilmerkhoogten in alle Frisia meetregisters tot nu toe standaardafwijkingen van maximaal circa 2 mm te zien hebben gegeven.

Recent is het Eindrapport van het project DefoGuide (ref.5) gepubliceerd. Hierin is berekend dat bij een standaardafwijking van 2 mm in een hoogtewaarneming de grenswaarde bij verwaarlozing van de correlatie tussen de hoogtewaarnemingen 13,07 mm bedraagt (zie ref.5, § 3.7 Schranking). De grenswaarde heeft de volgende betekenis: indien de nulhypothese (= hoogten op tijdstippen t_2 en t_1 zijn gelijk) wordt verworpen op 1 promille significantieniveau, dat wil zeggen dat de deformatie is opgetreden op een kritieke waarde van $3.29 \times 2\sqrt{2} = 9,3$ mm, weet men bij een hoogteverschil van 13,07 mm met 80% zekerheid, dat een dergelijke significante deformatie gevonden wordt.

De grenswaarde-beschouwing kan aan het $D = 13$ mm drempelcriterium een nieuwe verklaring geven. Hiertoe wordt de nulhypothese geherformuleerd als volgt: in epoche 'oktober 2015' is op positie y de gemeten peilmerkhoogte h_{gem} gelijk aan de Gaussisch gemodelleerde komhoogte h_{mod} , die is bepaald met behulp van de hoogten van alle gebruikte peilmerken. Indien de gemeten hoogte h_{gem} meer dan 13 mm afwijkt van h_{mod} , is met 80% zekerheid aan te nemen dat de gemeten hoogte niet past bij de gemodelleerde kom. De correlatie tussen h_{gem} en h_{mod} wordt hierbij verwaarloosd.

Gemiddelde afwijking van de peilmerkhoogten

De modelleringsparameter Gem.PM-afw is een globale restwaarde, die aangeeft hoeveel de gemeten daling van de peilmerken (differenties) gemiddeld afwijkt van de gemodelleerde daling. Voor een optimale aanpassing van het model aan de peilmerkbewegingen dient de restwaarde

duidelijk kleiner te zijn dan de gemiddelde standaarddeviatie van de meting. In 2015 is de restwaarde van de modellering -1,5 mm en de standaarddeviatie varieert van 1.2 mm vlakbij het stabiele aansluitpunt tot 2 mm aan de randen van het meetnet. Deze getallen duiden erop dat de modellering waarschijnlijk niet optimaal is.

De restwaarde is een parameter voor modelleringskwaliteit, maar vormt geen indicatie voor de gemiddelde autonome daling van de peilmerken in het meetgebied. Dit is getalsmatig bevestigd in het eerste Addendum (ref.2), waarin de autonome daling van peilmerken in de buurt van de GPS-meetlocaties in kaart is gebracht. De autonome peilmerk daling varieert van 0,7 mm/jaar (BAS-4) tot 2,8 mm/jaar (BAS-3-O).

3 Gaussische modellering met flexibele gamma-parameter

Dit hoofdstuk richt zich op **Actiepunt 3**: WEP gaat vanaf 2008 (start BAS-4 productie) de meet-epochen opnieuw modelleren met een flexibele gamma, eventueel met vaste Gaussische deltawaarde ($\delta = 2$), indien stabilisatie van de parameterschattingen dit vergt.

Eerste verkennende resultaten

Hoewel de Gaussische komvorm in principe door twee vormparameters bepaald wordt, is aanvankelijk gebleken dat consistente en stabiele modellering van opeenvolgende meetepochen gebaat is bij een constante gamma-waarde, namelijk de optimale waarde $\gamma = 4,3 \cdot 10^{-7}$ (ref.4). Sinds 2011 blijkt echter dat de vorm van de gemodelleerde dalingskommen boven de cavernes toenemende systematische afwijkingen gaat vertonen ten opzichte van de peilmerkdifferenties.

Volgens SodM (ref.3) zijn de grootte van het restsignaal en de te geringe spitsvormigheid van de gemodelleerde dalingskommen in 2015 significant. Men vermoedt dat toepassing van een flexibele gamma-parameter tot een correctere modellering van de bodemdaling in het diepste punt van de dalingskommen zal leiden.

In november 2016 heeft WEP een eerste verkennende studie met variabele gamma verricht voor de meetepoche oktober 2015. Dat heeft onderstaande voorlopige resultaatentabel opgeleverd. Hierin zijn de nieuwe resultaten, verkregen met WEP rekenversie 2.1, vergeleken met resultaten uit rekenversie 1.3, die eerder gepubliceerd zijn in ref.1:

	RMS	Gem.PM afw.	B1/2 max	Kom/conv. vol	B3 max	Kom/conv. vol	B4 max	Kom/conv. vol
v.1.3	5,04 mm	-1,53 mm	-340,5 mm	102,3 %	-171,4 mm	83,7 %	-240,0 mm	82,2 %
v.2.1	4,56 mm	-1,05 mm	-347,3 mm	103,5 %	-175,9 mm	87,8 %	-243,1 mm	83,0 %

De nieuwe modelleringsresultaten in termen van RMS en Gem.PM-afw zijn inderdaad verbeterd. Dat is echter ten koste gegaan van een toegenomen maximum daling in de respectievelijke dalingskommen. In de winningsvergunning Barradeel II is de maximaal toegestane bodemdaling boven de cavernes BAS-3, BAS-3-O en BAS-4 gelimiteerd tot 30 cm.

Bodemdalingsmodellering met variabele gamma en delta parameters

Ter voldoening aan actiepunt 3 heeft WEP de Gaussische bodemdalingmodellering voor de periode 2000 – 2015 uitgevoerd met een optimalisatieprogramma met flexibele gamma (versie 2.2, all variable gamma, January 2017).

Als voorbeeld van een rekenresultaat valt over epoche 'oktober 2015' het volgende te melden: RMS 4,74 mm; Gem.PM-afw -0.31 mm; B4-max -256,6 mm; Kom/conv.vol 92,6%. Dit lijken mooie resultaten, ware het niet dat B4-max abnormaal negatief uitvalt. Volgens de nu gemodelleerde BAS-4 dalingskom zou ter plaatse van de GPS-antenne een daling van 255 mm zijn opgetreden, terwijl de continue GPS meting een daling van 233 mm aangeeft, oftewel een verschil van 22 mm ten nadele van de resterende marge voor bodemdaling door zoutwinning.

Men dient vanuit Frisia's bedrijfsvoering in het oog te houden, dat het vooral cruciaal is dat de bodemdaling in het diepste punt consistent en betrouwbaar wordt vastgesteld. Meetresultaten zijn in dit opzicht belangrijker dan een preciezere Gaussische modellering, uitgedrukt in kleinere waarden voor de modelleringsparameters RMS en Gem.PM-afw.

Directe waarnemingen van bodemdaling boven caveerne BAS-4

Op verzoek van SodM (email 26 juli 2017 aan Frisia) wordt de opgetreden bodemdaling in 2015 boven caveerne BAS-4 aan een nadere analyse onderworpen. Dit gebeurt op conventionele wijze (zonder Gaussische modellering), namelijk door het lokaal in kaart brengen van de met waterpassingen gemeten bodemdaling, gecorrigeerd voor autonome effecten van peilmerk daling. Bovendien wil SodM het resultaat van de continue GPS-metingen bij caveerne BAS-4 gecalibreerd zien aan de waterpasresultaten.

De GPS-antenne ligt vrijwel recht boven caveerne BAS-4 en is bevestigd aan een diepgefundeerd object. De GPS dalingscurve vangt aan eind september 2007 (week 40). Op dat tijdstip bedraagt de met waterpassingen gemeten daling vanaf start van de zoutwinning uit caveerne BAS-4 circa 10 mm. In oktober 2015, na 8 jaar continu meten, geeft de GPS curve een relatieve daling van 223 mm te zien. Gerelateerd aan de met waterpassingen gemeten daling van 10 mm in week 40 van 2007, leidt dit ter plaatse van de GPS-antenne tot een cumulatieve bodemdaling door zoutwinning van 233 mm, gerekend vanaf productiestart tot oktober 2015.

In het eerste Addendum (ref.2) zijn op basis van de meetregisters van de waterpassingen van 2007 en 2015 differenties gerapporteerd van de lokale peilmerken boven caveerne BAS-4, waarbij aangesloten is op een lokaal stabiel peilmerk 5G0117. De herberekeningstabel is hieronder getoond voor slechts die peilmerken, die in een straal van 500 m rond caveerne BAS-4 gelegen zijn en ook al in 2007 zijn gemeten.

Gegevens uit Meetregister 2015				Resultaten lokale berekening gewogen	Vershil meetregister – lokale berekening
Peilmerk	2007	2015	Diff (mm)	Diff (mm)	(mm)
			07_15		
0000076	-0.2277	-0.4411	-213.4	-208.8	-4.6
0000101	0.2528	0.0258	-227.0	-222.5	-4.5
0000102	0.3907	0.1615	-229.2	-224.6	-4.6
0000103	0.3564	0.1278	-228.6	-224.1	-4.5
005G0117	1.5241	1.5184	-5.7	0.0	-5.7
005G0246	0.6768	0.455	-221.8	-217.6	-4.2

Uit de heraansluiting blijkt dat de autonome daling van peilmerken rondom de GPS-locatie van BAS-4 circa 4,5 mm bedraagt over de periode dat de GPS-antenne operationeel is (8 jaar). De gemiddelde voor autonome effecten gecorrigeerde daling van de peilmerken bedraagt circa 220 mm. Dit getal is praktisch identiek aan de met GPS gemeten daling van 223 mm. Het geringe verschil (3 mm minder daling) is te verwachten, omdat niet alle peilmerken vlak boven de caveerne liggen zoals met de GPS-antenne wel het geval is.

4 Conclusies

- In de context van het Meet- en regelprotocol winningsplan 'Barradeel II' schaft Frisia vanwege systematische complicaties de Gaussische iteratieve voorwaartse modellering van peilmerkbewegingen met ingang van de geplande meetepoche 'oktober 2017' af.
- Onder toepassing van vaste gamma en delta komparameters kan de Gaussische komvorm nog wel bruikbaar zijn voor het maken van globale bodemdalingprognoses, waarbij de inhoud van

de dalingskom als functie van de aan de ondergrond onttrokken zoutvolumes belangrijker is dan de precieze komvormontwikkeling in de loop van de zoutproductie.

- De calibratie van de continue GPS-meetresultaten kan effectief worden uitgevoerd door het GPS meetresultaat te vergelijken met de opgeschoonde lokale bodemdaling rondom de GPS-antenne. De opgeschoonde daling wordt verkregen uit waterpasmetingen aan peilmerken na cumulatieve correctie voor autonome peilmerk daling, gerekend vanaf de start van de GPS-metingen.

5 Vooruitblik nieuwe procedure met ingang van 2017

In september/oktober 2017, wordt de volgende vlakdekkende waterpassing aan peilmerken in het winningsgebied van Frisia uitgevoerd. Na vaststelling van het meetregister van die meting wordt de derde beheerscyclus M&R protocol Barradeel II doorlopen. Frisia stapt hierbij over op een enigszins gemodificeerde geodetische methode voor de bepaling van de totale bodemdaling uit peilmerkbewegingen, zonder enige vorm van aanvullende analytische modellering.

Uit de totale bodemdaling wordt de bodemdaling door zoutwinning gefilterd, met toepassing van correcties voor lokale autonome peilmerkbewegingen en met uitschakeling van het dalingsgebied dat significant door gaswinning van Vermilion is beïnvloed. Als laatste fase wordt een kaart met bodemdalingscontouren samengesteld, die representatief is voor het effect aan maaiveld van alleen de zoutwinning van Frisia.

De precieze procedure wordt momenteel nader uitgewerkt in een Engelstalig technisch rapport (ref.6). In overleg met de gebruikelijke leverancier van de waterpasmetingen en het officiële meetregister zal de beschreven nieuwe methodiek in praktijk gebracht worden.

Zodra het genoemde technische rapport in definitieve vorm beschikbaar is, biedt Frisia het voor instemming aan SodM aan. De nieuwe methode wordt na instemming ingevoerd in de Technische Bijlage bij het Meet- en regelprotocol winningsplan 'Barradeel II' (ref.4).

6 Referenties

1. Uitvoering beheerscyclus van meet- en regelprotocol 'Barradeel II' over het jaar 2015, v.4 (final), esco/Frisia Zout B.V., 27 juli 2016.
2. Addendum autonome bodemdaling bij Uitvoering beheerscyclus M&R protocol 'Barradeel II' over het jaar 2015, v.1.def, esco/Frisia Zout B.V., 26 mei 2017.
3. Verslag van het Overleg SodM-Frisia-WEP m.b.t. geodetische onderwerpen, Harlingen, 7 november 2016.
4. Meet- en regelprotocol winningsplan 'Barradeel II', v.4.def, esco/Frisia Zout B.V., 6 november 2014.
5. Eindrapport van het project DefoGuide: Guidelines for geodetic deformation monitoring, Hogeschool Utrecht, 19 mei 2016.
6. Procedures review of subsidence 1995-2015 & Proposal to new procedure 2017, esco/Frisia Zout B.V., v.1 (concept), 4 September 2017.