

Nedmag B.V.

Modellering van bodemdaling veroorzaakt door zoutwinning via squeezetechieken uit de winningsvergunning Veendam: history match 1993 – 2016 en prognose inclusief twee nieuwe putten

Vertaling uit het Engels

Oorspronkelijke titel: Modelling of subsidence induced by salt squeeze mining from the Veendam concession: History match 1993-2016 and forecast including two new wells

April 2018

DISCLAIMER

Dit rapport is opgesteld door SGS Nederland B.V. (hierna 'SGS') voor exclusief gebruik door Nedmag B.V. (hierna 'de Opdrachtgever').

SGS aanvaardt geen aansprakelijkheid tegenover derden (andere partijen of personen dan de Opdrachtgever) aan wie dit rapport zou worden getoond of in wiens handen het mag komen.

Dit rapport dient altijd in zijn geheel te worden gereproduceerd en de Opdrachtgever zal - voor zover redelijkerwijs mogelijk is - zorgen voor voldoende aanvullende (contextuele) informatie en zich inspannen om misverstanden omtrent de inhoud van dit rapport te voorkomen. SGS kan niet aansprakelijk worden gesteld voor de gevolgen van handelingen die in tegenspraak zijn met het voorgaande.

Voor de in dit rapport beschreven studie heeft SGS vertrouwd op de documentatie en informatie verstrekt door de Opdrachtgever en is ervan uitgegaan dat deze informatie volledig en correct was. Tenzij specifiek vermeld in dit rapport, heeft SGS de juistheid en volledigheid van de door de Opdrachtgever verstrekte gegevens en informatie niet onafhankelijk geverifieerd.

In overeenstemming met het bestek van de studie heeft SGS onder andere de verstrekte (voorbewerkte) peilmerkggegevens en de squeeze-volumes zonder verificatie gebruikt. Voor de bodemdalingsmodellering werd gebruik gemaakt van het Geertsma-Van Opstal-model met toepassing van een variabel rigide fundament, zoals voorgeschreven in het studiebestek. Het was buiten de opdracht van SGS om de validiteit van deze methode te onderzoeken of alternatieven te testen. Onzekerheidsmodellering viel eveneens buiten het bestek van deze studie, behalve waar specifiek vermeld in dit rapport.

SGS heeft evenwel alles in het werk gesteld om ervoor te zorgen dat de interpretaties, conclusies en aanbevelingen die in dit document worden gegeven in overeenstemming zijn met de standaard in de sector en haar eigen procedures voor kwaliteitsborging.

Getekend:



Richard Keen

Operations Manager

Datum: 6-3-19

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT DOOR
ZOUTWINNING VIA SQUEEZETECHNIEKEN UIT DE
WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH 1993 –
2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE PUTTEN

MANAGEMENTSAMENVATTING

Nedmag B.V. (Nedmag) veroorzaakt bodemdaling door zoutwinning via squeeze technieken uit de winningsvergunning Veendam, Groningen, in het noordoosten van Nederland. SGS Subsurface Consultancy (SGS) heeft een bodemdalingsmodelleringstudie uitgevoerd, die is gebaseerd op de gemeten bodemdaling over de periode 1993-2016, en een prognose geformuleerd voor de bodemdaling vanaf 2016 als gevolg van de productie uit bestaande putten en twee nieuwe putten, VE-5 en VE-6.

In overeenstemming met het bestek van deze studie werd een bodemdalingsmodellering uitgevoerd op basis van het Geertsma-Van Opstal model met een variabel rigide fundament. De belangrijkste inputgegevens die voor de modellering werden gebruikt, zijn de diepte en de locatie van de cavernes en de squeezevolumes. Gegevens over de waargenomen bodemdaling werden gebruikt om het model te ijken (door middel van history matching). Alle gegevens werden door Nedmag aan SGS geleverd.

De history match van een vereenvoudigd bodemdalingsmodel resulteerde in een redelijke overeenkomst tussen de gemodelleerde bodemdaling en de waargenomen bodemdalingwaarden op peilmerklocaties. Een gedetailleerde history match, waarin rekening werd gehouden met de toewijzing van productievolumes aan individuele putlocaties, resulteerde in een bodemdalingsmodel dat geschikt werd geacht voor het maken van een prognose van toekomstige bodemdaling.

Een prognose van de bodemdaling werd geformuleerd voor drie squeeze productiescenario's die door Nedmag werden geleverd. Het eerste scenario is enkel gebaseerd op de bestaande putten, waarbij al het toekomstige squeezevolume wordt toegewezen aan de TR-1 caveerne. In de twee andere scenario's is ook productie uit twee nieuwe putten, VE-5 en VE-6, opgenomen. Deze putten zouden ten westen van de bestaande putten worden geboord. In het tweede en derde scenario worden respectievelijk 40% en 20% van het totale squeezevolume geproduceerd door de nieuwe putten.

In het productiescenario met een squeezebijdrage enkel uit bestaande putten wordt de maximaal toegestane bodemdaling van 65 cm bij de locatie van de TR-1 put bereikt in 2031.

Wanneer de VE-5 en VE-6 putten worden geboord en 20 tot 40% van de totale squeezebijdrage aan deze putten wordt toegewezen, is een vertraging van twee tot vijf jaar voor het bereiken van de maximaal toelaatbare bodemdaling haalbaar. Hierdoor is de productie van 0,44 tot 1,1 miljoen m³ extra squeezevolume mogelijk in vergelijking met het scenario met een squeezebijdrage van enkel de bestaande putten.

Deze studie wordt beschouwd als een deterministische aanpak en geeft derhalve één mogelijke ontwikkeling weer van de bodemdaling als gevolg van zoutwinning door middel van squeeze technieken uit de winningsvergunning Veendam. Onzekerheidsmodellering en/of de beoordeling van onzekerheidsmarges gerelateerd aan de input data, vereenvoudigingen van de ondergrond, modelleringsaannames en methodologische beperkingen vielen buiten het bestek van deze studie.

INHOUDSOPGAVE

DISCLAIMER	I
MANAGEMENTSAMENVATTING	II
INHOUDSOPGAVE	1
1 INLEIDING	2
1.1 BODEMDALINGSMODELLERING.....	2
1.2 INPUT DATA	3
1.3 OVERZICHT VAN HET ONDERZOEK	4
2 HISTORY MATCH VAN HISTORISCHE BODEMDALING	5
2.1 VEREENVOUDIGDE HISTORY MATCH.....	5
2.2 GEDETAILLEERDE HISTORY MATCH	8
3 PROGNOSE VAN TOEKOMSTIGE BODEMDALING	12
4 BESPREKING VAN MODELLERINGSBEPERKINGEN	16
5 CONCLUSIES	17
6 AFKORTINGEN EN EENHEDENLIJST	18
7 REFERENTIES	19
APPENDIX A ILLUSTRATIE VAN HET RIGIDE FUNDAMENT	20
APPENDIX B PRODUCTIEDATA	21
APPENDIX C WAARGENOMEN BODEMDALING OP PEILMERKLOCATIES	23
APPENDIX D OPTIMALISATIERESULTATEN	25
APPENDIX E VOORBEELD VAN DE AFZONDERLIJKE TOEWIJZINGFRACTIES PER PUT	26
APPENDIX F BODEMDALINGSKAARTEN OP BASIS VAN VAN ALTERNATIEVE PARAMETERS VOOR HET RIGIDE FUNDAMENT	27

1 INLEIDING

Nedmag B.V. (Nedmag) wint magnesiumzout uit de winningsvergunning Veendam die zich bevindt in de provincie Groningen, in het noordoosten van Nederland (Figuur 1-1). Aanvankelijk werd gebruik gemaakt van conventionele mijnbouwtechnieken, waarbij cavernes werden gecreëerd die dicht bij de lithostatische druk werden gehouden. Sinds 1993 worden squeeze technieken toegepast, waarbij de druk in de cavernes die zijn gevormd door conventionele oplossingsmijnbouw geleidelijk wordt verlaagd tot 60-80 bar onder de lithostatische druk, waardoor kruip (squeeze) van de magnesiumzouten in de cavernes mogelijk wordt. Zoutwinning met de squeeze-methode resulteert in een geleidelijke verdunning van de zoutlaag en leidt daardoor vervolgens tot bodemdaling. De bodemdaling als gevolg van zoutwinning wordt gemonitord door (tweejaarlijkse meetonderzoeken op peilmerken. Alle metingen van de bodemdaling hebben het niveau van 1993 als referentie. Nedmag heeft een vergunning voor het door zoutwinning induceren van een maximale bodemdaling van 65 cm op peilmerklocaties, in vergelijking met het referentieniveau van 1993. In april 2016 bedroeg de maximale waargenomen bodemdaling 37,7 cm.

Magnesiumrijke zoutmineralen, vooral bischofiet ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), worden geproduceerd uit Zechstein afzettingen (Perm) die zich op een diepte tussen 1500 en 2000 m in de regio Veendam bevinden. De bischofietlaag in de Zechstein afzettingen vertoont aanzienlijke variaties in dikte, gaande van enkele meters tot 21 meter dik. Nedmag heeft de historische bodemdaling vanaf 1993 gemodelleerd met de Geertsma-Van Opstal methode. De waargenomen uitbreiding van de bodemdalingskom door de tijd heen werd in dat model geaccomodeerd door een toenemende reservoirradius. Een TNO-rapport over bodemdaling als gevolg van gaswinning (Muntendam et al., 2012 [1]) suggereert dat het gedrag van de bodemdalingskom door de tijd heen realistischer kan worden beschreven door het aannemen van een variabel rigide fundament in het Geertsma-Van Opstal model. Op basis hiervan wil Nedmag de huidige en toekomstige bodemdaling als gevolg van mijnbouw met de squeeze-methode nu ook gaan modelleren met het Geertsma-Van Opstal model met een variabel rigide fundament.

Nedmag is van plan om nieuwe putten te boren ten westen van de bestaande zoutputten en heeft hiervoor een raming nodig van de verwachte bodemdaling als gevolg van de toekomstige zoutwinning uit zowel de bestaande putten als de geplande putten. Nedmag heeft SGS Subsurface Consultancy (SGS) gevraagd om een studie over de bodemdalingsmodellering uit te voeren op basis van het Geertsma-Van Opstal model met variabel rigide fundament. De resultaten van die studie worden hier beschreven.

1.1 BODEMDALINGSMODELLERING

Op verzoek van Nedmag werd de bodemdaling als gevolg van Nedmags zoutproductie gemodelleerd op basis van het Geertsma-Van Opstal model (Van Opstal, 1974 [4] en Geertsma, 1966 [3]) met een variabele diepteparameter voor het rigide fundament ('variable rigid basement depth parameter'). Deze methode is met succes toegepast op modellen van door gaswinning geïnduceerde bodemdaling, bijv. door Muntendam et al. (2012) [1].

Het analytische Geertsma-Van Opstal model gaat uit van lineair en uniform elastisch gedrag van de formaties waarin het reservoir (of in dit geval de zoutcaverne) is ingebed. Het model gaat verder uit van een rigide fundament onder het reservoir. Op of onder dat fundament is de verplaatsing nul voor alle gesteente. De implicatie van deze aannames is dat de effecten van een niet-vlakke of lateraal variërende geometrie van de deklaag niet in aanmerking worden genomen. De analytische benadering die in dit model wordt gebruikt, is een vereenvoudigde weergave van de werkelijke ondergrond. De diepte van het rigide fundament bepaalt de vorm van de bodemdalingskom en volgt als zodanig het elastisch gedrag van de bovenliggende lagen. In tegenstelling tot wat de naam doet vermoeden, is het geen fysieke parameter die het geologische fundament ('basement') weergeeft. Een schematische voorstelling van de invloed van de diepte van het rigide fundament op de vorm van de bodemdalingskom wordt gegeven in Appendix A. In deze studie wordt een variabele diepte

van het rigide fundament gebruikt om de ontwikkeling van de vorm van de bodemdalingskom door de tijd heen te beschrijven. De bodemdaling kan worden berekend op ieder gewenst punt aan het oppervlak of op een dicht netwerk van oppervlaktelocaties.

De gemeten bodemdaling in het gebied van de winningsvergunning Veendam is niet enkel te wijten aan zoutwinning, maar ook deels aan gasproductie in de nabije omgeving (de gasvelden van Groningen, Annerveen en Kiel-Windeweer bevinden zich rond de zoutwinningslocatie in Veendam). Daarnaast kan de waargenomen bodemdaling ook een autonome bodemdalingscomponent bevatten (d.w.z. bodemdaling die het gevolg is van bewegingen/compactie in de ondiepe ondergrond). In deze studie wordt alleen de door zoutwinning geïnduceerde bodemdaling gemodelleerd.

1.2 INPUT DATA

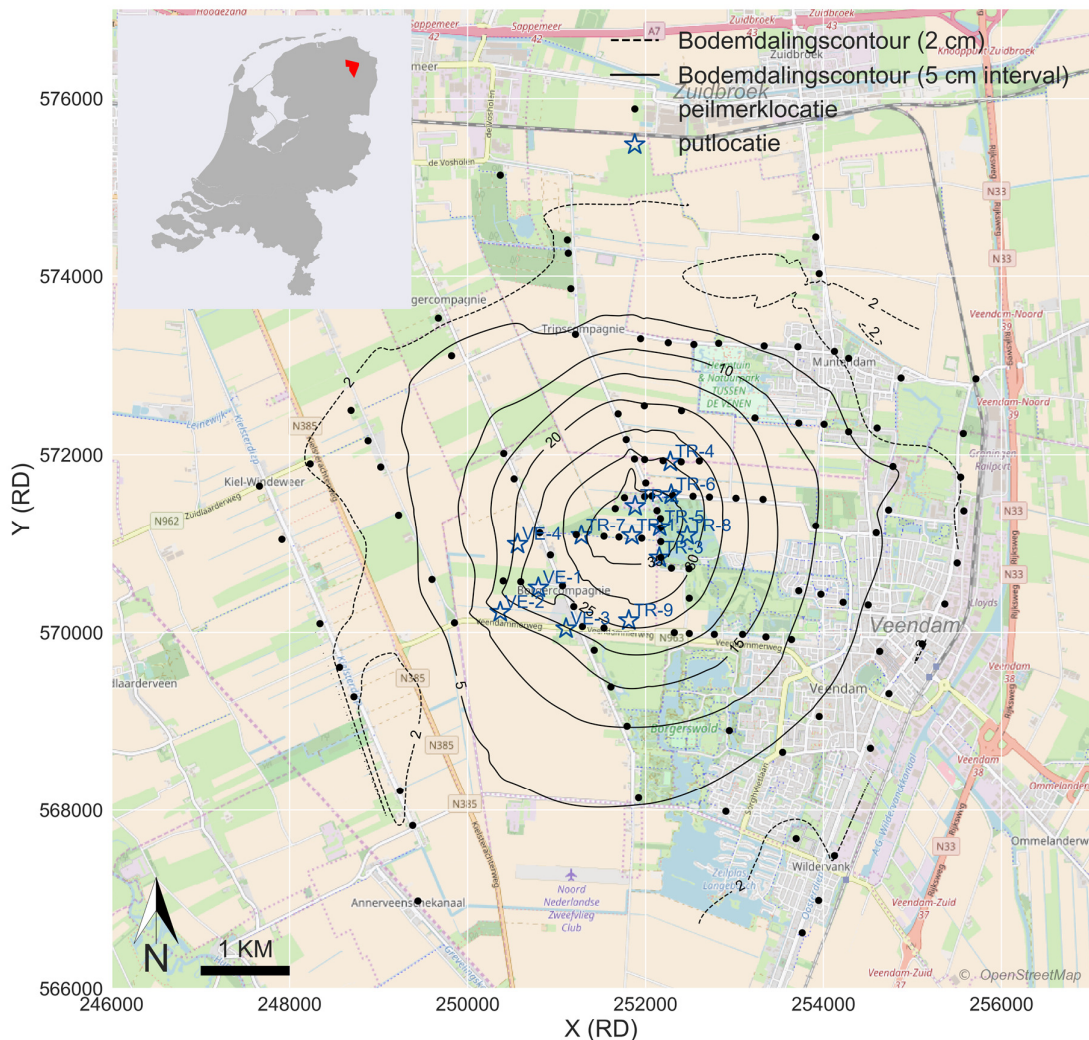
De volgende data werden door Nedmag aan SGS verstrekt en werden gebruikt als input voor deze studie:

- Locatie en diepte van cavernes (putten)
- Squeezevolumes (per afzonderlijke put tot het verbonden raken van cavernes, en daarna het volume per cluster)
- Tijdstippen van het verbonden raken van cavernes
- Bodemdaling op peilmerklocaties als gevolg van mijnbouw met de squeeze-methode in de periode van 1993 tot 2016 (afgeleid uit de oorspronkelijke gegevens via een 'objectpunt' analyse)

De studie heeft betrekking op de productie uit 13 bestaande putten (VE-1 tot 4 en TR-1 tot 9) en twee geplande putten (VE-5 en VE-6). De historische squeezevolumes werden geleverd door Nedmag, dat deze squeezevolumes bepaalde aan de hand van massabalansberekeningen op basis van geïnjecteerde watervolumes, kennis over de aard van de zoutlagen, zoutoplossingsprocessen en naar boven gehaalde pekervolumes. De input in de modelleringsstudie bestond uit één enkele deterministische set squeezevolumes. Zoutcavernes van verschillende putten raken naar verloop van tijd verbonden, mogelijk via preferentiële oplossingstrajecten of door mobilisatie van het bischofiet kristalwater als gevolg van drukverschillen tussen de cavernes. Op die manier worden clusters gevormd waaruit het zout wordt gewonnen. Wanneer zout wordt gewonnen uit een cluster kunnen de productiecijfers per afzonderlijke put niet nauwkeurig worden vastgesteld. Om die reden verstrekte Nedmag enkel squeezevolumes per cluster. Locaties van cavernes (putten), productiecijfers en de tijdstippen van het verbonden raken van cavernes zijn beschikbaar in Appendix A.

De bodemdalingsgegevens uit peilmerkmetingen die beschikbaar waren voor deze studie werden door de Antea Group en door Nedmag uit de oorspronkelijke gegevens afgeleid. De oorspronkelijke metingen van de bodemdaling hebben een 'objectpunt' analyse ondergaan om de bijdragen van verschillende bronnen te scheiden, met name om de door gaswinning geïnduceerde bodemdaling te scheiden van de door zoutwinning geïnduceerde bodemdaling. Voor deze studie werd alleen het deel van de gemeten bodemdaling dat wordt toegeschreven aan zoutwinning gebruikt als input data in het model. In dit rapport wordt hiernaar verwezen als 'bodemdaling' of 'waargenomen bodemdaling'. De input in de modelleringsstudie bestond uit één enkele set peilmerkgegevens zonder meet- en verwerkingsfoutbalken. Het netwerk van peilmerken in Veendam bevat 258 peilmerklocaties. Op 119 daarvan is bodemdaling gemeten sinds het begin van de studieperiode (1993); deze zijn gebruikt in dit onderzoek (Appendix C). In Figuur 1-1 wordt de bodemdalingskom weergegeven zoals die is waargenomen uit peilmerkmetingen in april 2016. Dit zijn de meest recente peilmerkmetingen die voor deze studie beschikbaar waren. In april 2016 bedroeg de maximale waargenomen bodemdaling door zoutwinning 37,7 cm. Die werd gemeten vlakbij put TR-1. Alle metingen samen tonen de aanwezigheid aan van een symmetrische, cirkelvormige bodemdalingskom rond dit punt.

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT
 DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZETECHNIKEN UIT DE
 WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH
 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE
 PUTTEN



Figuur 1-1 Cumulatieve waargenomen bodemdaling (in cm) op peilmerklocaties in april 2016 (kubische interpolatie). Vanwege het kleine aantal peilmerken worden de buitenste contouren onbetrouwbaar. De gegevens worden enkel geïnterpoleerd (d.w.z. geen extrapolatie), en om die reden stoppen de contouren bij de buitenrand van de data. In de inzet wordt de locatie van de winningsvergunning Veendam getoond

1.3 OVERZICHT VAN HET ONDERZOEK

Het onderzoek bestond uit twee fasen: een history match fase en een prognosefase. Eerst werd de waargenomen bodemdaling in de periode 1993-2016 ghistory-matched. Hieruit werden verschillende parameters voor de bodemdalingsmodellering afgeleid. Deze afgeleide parameters werden in de daaropvolgende fase gebruikt voor de prognose van bodemdaling ten gevolge van verschillende potentiële toekomstige putten en productiescenario's. Deze scenario's waren gebaseerd op bestaande putten en twee nieuwe putten: VE-5 en VE-6. Alle modellen werden uitgevoerd in Python.

2 HISTORY MATCH VAN HISTORISCHE BODEMDALING

De belangrijkste doelen van de history match fase waren het creëren van een wiskundig model dat is geijkt op basis van gegevens van de bodemdaling en het voorbereiden van het model voor de bodemdalingsprognose. Daarnaast werden squeezevolumes van de clusterproductie toegewezen aan specifieke putten.

Het model werd geijkt in twee stappen:

- Vereenvoudigde history match

Om de samenhang tussen de berekende squeezevolumes en de waargenomen bodemdaling te controleren, werd een vereenvoudigd bodemdalingsmodel uitgewerkt. Hierbij werd het squeezevolume van alle putten en clusters toegewezen aan één locatie: de TR-1 caveerne. Voor elke tijdsstap werden de diepte van het rigide fundament en het cumulatieve squeezevolume berekend via optimalisatie. De optimalisatie was gericht op het vinden van de kleinste mismatch tussen de gemodelleerde en de waargenomen bodemdaling op alle peilmerken.

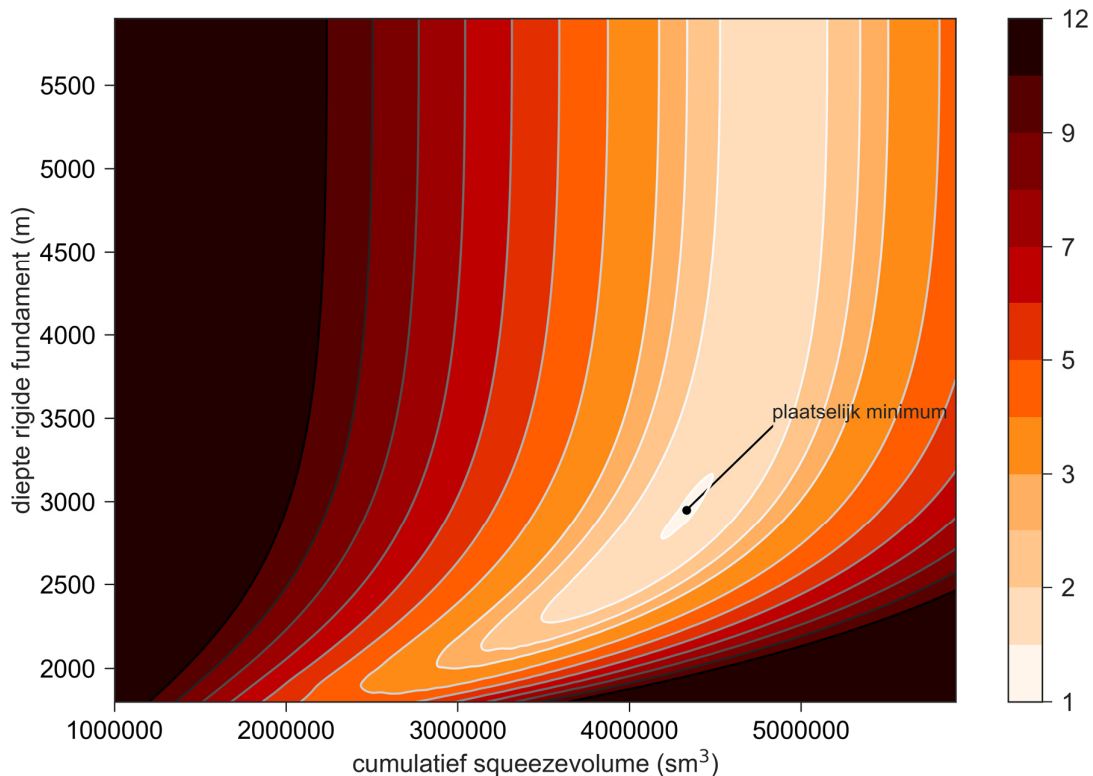
- Gedetailleerde history match

In de gedetailleerde history match werd een formule voor een variërend rigide fundament toegepast. De functieparameters daarvoor werden bepaald door middel van optimalisatie. De optimalisatie was opnieuw gericht op het vinden van de kleinste mismatch tussen het model en de waargenomen bodemdalingswaarden. Daarnaast werden de door Nedmag verstrekte squeezevolumes van de cluster gebruikt en mathematisch toegewezen aan verschillende putten om de match tussen de gemodelleerde en de waargenomen bodemdaling te verbeteren.

Tijdens de history match werd het model geoptimaliseerd op basis van de cumulatieve bodemdaling vanaf 1993. Daarom zijn alleen de 119 peilmerken waar sinds dat jaar de bodemdaling werd gemeten gebruikt in deze studie (Appendix C). Peilmerken die later werden toegevoegd aan het netwerk zijn niet gebruikt voor de optimalisatie van de modelleringsparameters. De samenvatting van de methode en de belangrijkste bevindingen van zowel de vereenvoudigde als de gedetailleerde history match worden hieronder gegeven.

2.1 VEREENVOUDIGDE HISTORY MATCH

In de vereenvoudigde history match werd het volledige historische squeezevolume toegewezen aan één enkele put - TR-1. De locatie van die put komt ongeveer overeen met het midden van de waargenomen bodemdalingskom (Figuur 1-1). Het model was erop gericht de cumulatieve bodemdaling op elk peilmerk te matchen door het minimaliseren van de standaardafwijking (RMSE - root mean square error). De RMSE is de wortel van het gemiddeld kwadratisch verschil tussen de gemodelleerde en de waargenomen bodemdaling, en is gebaseerd op alle peilmerken (opgesomd in Appendix C). Twee parameters werden gebruikt om het model te optimaliseren: het cumulatieve squeezevolume en de diepte van het rigide fundament. De optimalisatie werd uitgevoerd voor elk peilmerkonderzoek tussen januari 1999 en maart 2016. Eerdere onderzoeken, uitgevoerd tussen februari 1995 en januari 1998, werden niet gebruikt in de vereenvoudigde history match omdat de metingen van de bodemdaling uit die periode te veel spreiding bevatten om een betekenisvol optimum te vinden. De maximale bodemdaling in die eerste periode bedraagt minder dan 10 mm, dus het feit dat met die gegevens geen rekening werd gehouden, heeft geen significante invloed op de conclusies uit de vereenvoudigde history match. Voor elke combinatie van optimalisatieparameters (squeezevolume en diepte van het rigide fundament) werd de RMSE berekend, en de parameters die tot de kleinste fout leidden, werden geselecteerd als het optimum. Dit werd uitgevoerd voor elk peilmerkonderzoek. De resultaten van deze optimalisatie kunnen visueel worden voorgesteld in een fout-dichtheidskaart, waarvan een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 2-1. De combinatie van parameters die heeft geleid tot de minimale fout wordt aangeduid als "plaatselijk minimum".



Figuur 2-1 Fout-dichtheidskaart als illustratie van de modelfout (RMSE in cm, gebaseerd op het verschil tussen de gemodelleerde en de waargenomen bodemdaling op alle peilmerklocaties) voor variërende combinaties van diepte van het rigide fundament en cumulatief squeezevolume voor het onderzoek van april 2016

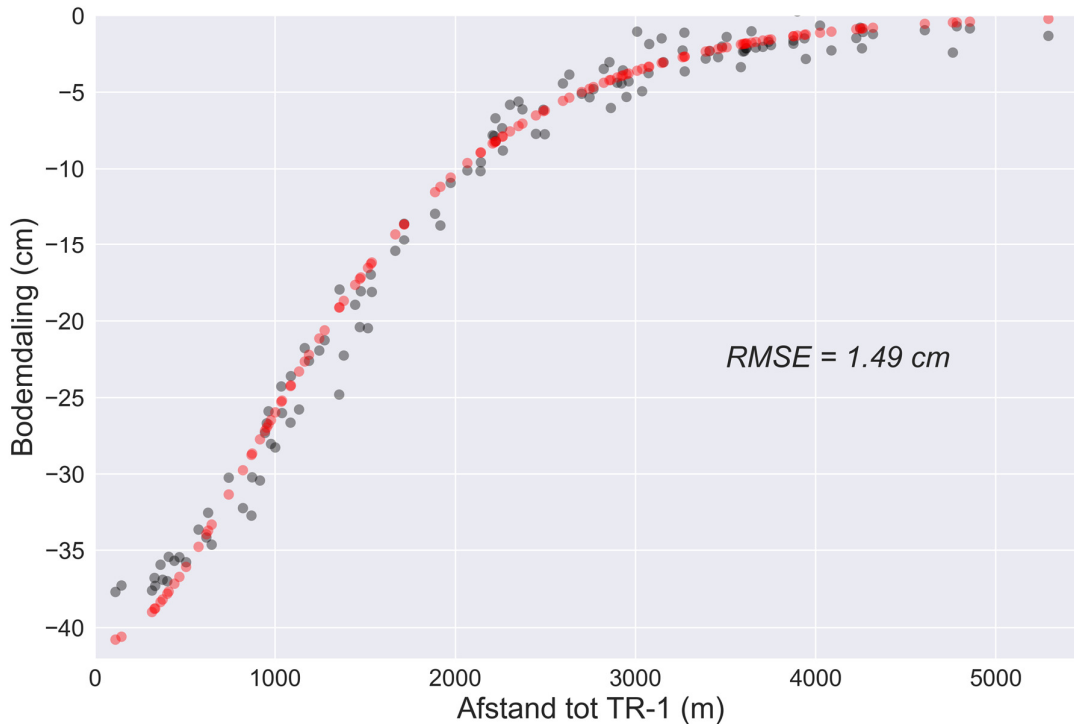
De optimale parameters voor elke peilmerkonderzoek zijn samengevat in Tabel 2-1. Zoals blijkt uit de tweede kolom varieert de parameter voor de rigide fundamendiepte tussen de 2834 en 3774 meter. De gemodelleerde optimale squeezevolumes (kolom 3,

Tabel 2-1) worden vergeleken met de cumulatieve volumes die door Nedmag zijn gerapporteerd in kolommen 4 en 5. De verschillen tussen de gemodelleerde en gerapporteerde squeezevolumes zijn relatief klein (<13%), wat aanvaardbaar wordt geacht om door te gaan met een gedetailleerde history match. In de vereenvoudigde history match zijn de gemodelleerde volumes consequent lager dan de volumes die door Nedmag zijn gerapporteerd. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de vereenvoudigde modelleringsaanpak waarbij alle productie wordt toegewezen aan één locatie, met één enkele bodemdalingskom als resultaat. Door het totale squeezevolume toe te wijzen aan de TR-1 locatie, wordt het model gedwongen om te focussen op het matchen van de belangrijkste bodemdalingskom, en om de bijdragen van andere productielocaties te negeren.

Tabel 2-1 Resultaten van de vereenvoudigde history match met de twee optimalisatieparameters diepte van het rigide fundament en squeezevolume. In de twee kolommen aan de rechterkant wordt het gemodelleerde squeezevolume vergeleken met de volumes die door Nedmag zijn gerapporteerd

Datum peilmerkonderzoek	Diepte rigide fundament (m)	Gemodelleerd squeezevolume (m ³)	Gerapporteerd squeezevolume (m ³)	Gemodelleerd / gerapporteerd (%)
jan 1999	3626	1194395	1237705	97%
jan 2000	3774	1443921	1456876	99%
jan 2002	3000	1667802	1853106	90%
jan 2004	3429	2156421	2297674	94%
jan 2006	2834	2353722	2724744	86%
jan 2008	3178	2848164	3122759	91%
jan 2010	2853	3038207	3505141	87%
maart 2012	3031	3639670	4095653	89%
feb 2014	3005	3989265	4503023	89%
apr 2016	2950	4331444	4925577	88%

In Figuur 2-2 wordt het bodemdalingsmodel voor april 2016 vergeleken met de waargenomen bodemdaling in een gestapelde cross plot van de afstand tot de TR-1 put (ongeveer het centrum van de bodemdalingskom) tegen de bodemdaling voor alle peilmerken. De figuur laat zien dat het model in staat is zowel de maximale waargenomen waarden als de algemene vorm van de bodemdalingskom te matchen, zelfs met de vereenvoudigde modelleringsaanpak. Ondanks deze overeenkomst van de algemene vorm, laat de figuur ook zien dat verbeteringen mogelijk zijn: het model overstijgt de waargenomen bodemdaling in het diepste deel (<500 m van het centrum) terwijl het achterblijft op de flanken tussen ~1000 en 2000 m van het centrum. Het bereiken van een nog betere match met de waargenomen bodemdaling is de belangrijkste doelstelling van de gedetailleerde history match die hieronder wordt besproken.



Figuur 2-2 Gemodelleerde (rode punten) en waargenomen (zwarte punten) bodemdaling (april 2016) in verhouding tot de afstand tot de locatie van de TR-1 put. Gemodelleerd cumulatief squeezevolume = 4331444 m³, gemodelleerde diepte van het rigide fundament = 2950 m. De modelleringsfout (RMSE) bedraagt 1,49 cm

2.2 GEDETAILLEERDE HISTORY MATCH

De gedetailleerde history match was gericht op een verdere verbetering van het bodemdalingsmodel, zodat die beter aansloot bij de waargenomen bodemdaling. Een tweede doelstelling was om de squeezevolumes die werden verstrekt per cluster (Appendix A) toe te wijzen aan afzonderlijke putten. Op basis van Nedmags verzoek aan SGS werden de volgende aannames in de gedetailleerde history match geïmplementeerd:

- Gerapporteerde squeezevolumes werden gebruikt als input in het model
- Alle bodemdalingsonderzoeken van mei 1993 tot maart 2016 werden gebruikt voor de ijking van het model
- De diepte van het rigide fundament werd gemodelleerd aan de hand van een formule die is afgeleid van Muntendam et al. (2012) [1]:

$$c/k(t) = c/k(0) - d(c/k) \left(1 - e^{-\frac{-(t-t_0)}{\tau_{zout}}} \right)$$

waarbij c de diepte van het reservoir is, k de diepte van het rigide fundament en $c/k(t)$ de verhouding tussen die twee door de tijd heen. De oorspronkelijke formule had een plusteken (+) na de eerste term ($c/k(0)$) en beschreef een reducerende diepte van het rigide fundament door de tijd heen. De gaswinning geïnduceerde bodemdalingskom in de studie van Muntendam et al. (2012) [1] werd

smaller en steiler als gevolg van zoutkruip in de deklaag van het reservoir. Dit effect werd gesimuleerd door een afname van de diepte van het rigide fundament. In de situatie zoals die zich voordoet in Veendam ligt het 'reservoir' in het zout en wordt de bodemdalingsskom breder. Om een breder wordende bodemdalingsskom te kunnen beschrijven, moest de formule voor deze studie worden aangepast. De diepte neemt toe vanuit een beginpositie $c/k(0)$ met een snelheid die wordt bepaald door een snelheidsparameter $d(c/k)$ en door de relaxatietijd van het zout (τ_{zout}). Deze drie parameters werden onderworpen aan optimalisatie in deze history match.

Voor de volumetoewijzing aan individuele putten en de optimalisatie van die toewijzing was een groot aantal parameters nodig, namelijk een volume-toewijzingsfractie voor elke put bij elke onderzoeksdatum van een peilmerk. Samen met de parameters voor het rigide fundament die hierboven zijn beschreven, resulteerde dit in meer dan 100 parameters waarvoor een optimalisatie nodig was. Als gevolg daarvan was de kans groot dat een plaatselijk minimum gevonden kon worden, met als mogelijk resultaat een suboptimale oplossing voor de optimalisatie-doelfunctie. Om dit probleem op te lossen en om de kans op het vinden van het echte globale minimum te verhogen, werd het optimalisatie-algoritme meerdere keren (25 runs) geïnitieerd, met willekeurige beginwaarden voor elke parameter in elke run. Uit de 25 runs werden twee minima gevonden, die zijn samengevat in Tabel 2-2 (individuele resultaten voor elk van de optimaliseringsruns worden gegeven in Appendix D). Binnen elk van deze minima is de totale modelfout relatief constant, maar tussen de twee is er een significant foutverschil. Alle runs die resulteerden in het minimum met de grotere fout hebben een gelijksoortig gedrag van het rigide fundament: een minimaal variërende diepte van het fundament (klein $d(c/k)$), dat begint bij 1000 maal de diepte van het reservoir ($c/k(0) = 0,001$). Tijdens de optimalisatie mocht parameter $c/k(0)$ variëren tussen 1 (rigide fundament gelijk aan reservoirdiepte) en 0,001 (rigide fundament 'oneindig' diep). Blijkbaar raakte het optimalisatieproces 'vast' bij de grenswaarde. Om die reden, en vanwege de grotere modelleringsfout, wordt dit minimum beschouwd als een plaatselijk minimum, terwijl het andere wordt beschouwd als een weergave van het globale minimum: de echte optimale oplossing van de optimalisatiefunctie.

Tabel 2-2 Samenvatting van de optimalisatieresultaten als onderdeel van de gedetailleerde history match: diepteparameters van het rigide fundament en modelleringsfout voor de twee geïdentificeerde minima (raadpleeg de tekst voor meer details). De modelleringsfout wordt weergegeven als de standaardafwijking (RMSE) voor alle peilmerken op alle beschikbare onderzoeksdata

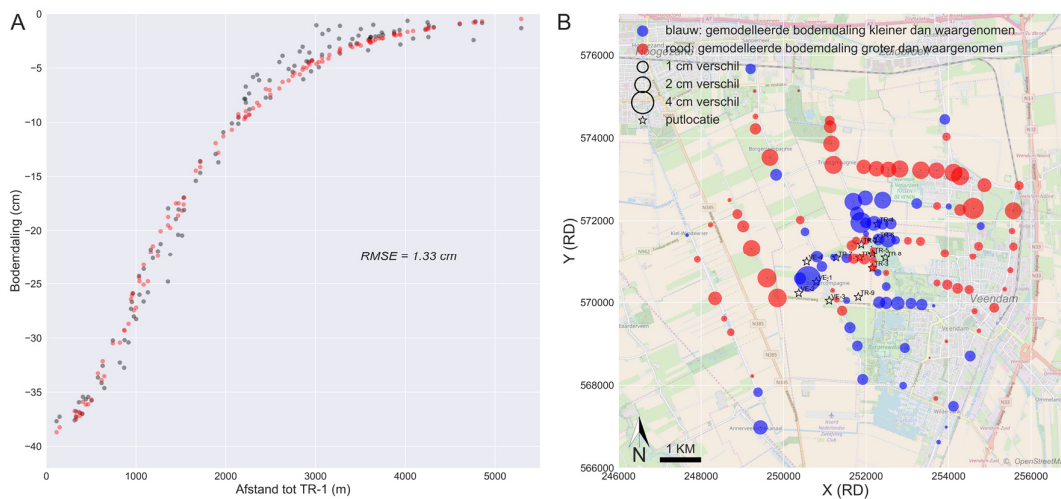
minimum	# runs	Gemiddelde parameters rigide fundament (\pm stdev)			Gemiddelde RMSE (cm)
		$c/k(0)$	$d(c/k)$	τ_{zout}	
globaal	16	0,704 (0,002)	0,695 (0,155)	50,1 (13,6)	0,7154
plaatselijk	9	0,001 (0)	0,005 (0,002)	53,8 (22,5)	0,9723

Voor de gedetailleerde history match werden cluster-productievolumes toegewezen aan individuele putten en deze toegewezen fracties maakten deel uit van de optimalisatie, waarbij de totale fout tussen de gemodelleerde en waargenomen bodemdaling werd geminimaliseerd (een typisch voorbeeld van de afzonderlijke fractionele toewijzing aan putten wordt gegeven in Appendix E). In alle simulatieruns vond het optimalisatie-algoritme een vergelijkbaar optimaal resultaat waarbij de maximale volumes worden toegewezen aan putten TR-1 en TR-2. Dit resultaat sluit aan bij de visuele inspectie van de waargenomen bodemdaling die een ronde kom rond deze putten weergeven (zie Figuur 1-1).

De gemodelleerde bodemdaling wordt vergeleken met de waargenomen bodemdaling op alle peilmerken voor april 2016 in Figuur 2-3. Vergelijking van Figuur 2-3A en Figuur 2-2 laat zien dat in

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT
DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZE TECHNIKEN UIT DE
WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH
1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE
PUTTEN

de gedetailleerde history match de tekortkomingen van de vereenvoudigde history match op het diepste punt en op de flanken van de bodemdalingsskom (zoals hierboven beschreven) zijn opgelost, wat resulteerde in een kleinere modelleringsfout (de RMSE is teruggebracht van 1,49 tot 1,33 cm). In de ondiepere delen van de kom echter, waar de bodemdaling tussen de ~2 en 10 cm ligt, overstijgt de gemodelleerde bodemdaling vaak de waargenomen bodemdaling. De kaart in Figuur 2-3B geeft voor elk peilmerk aan of de gemodelleerde bodemdaling groter (rode punten) of kleiner (blauwe punten) dan de waargenomen bodemdaling. Hoe groter de cirkel, hoe groter de relatieve mismatch tussen de gemodelleerde en waargenomen bodemdaling. Het model geeft zowel een over- als een onderschatting van de hoeveelheid bodemdaling aan, zowel in de buurt van het centrum van de bodemdalingsskom (d.w.z. nabij het centrum van de TR-1 caverne) als op de flanken. Omdat de grootte van de cirkels evenredig is met de mismatch, worden in deze weergave de punten waar het model goed overeenkomt met de waarnemingen onderbelicht.



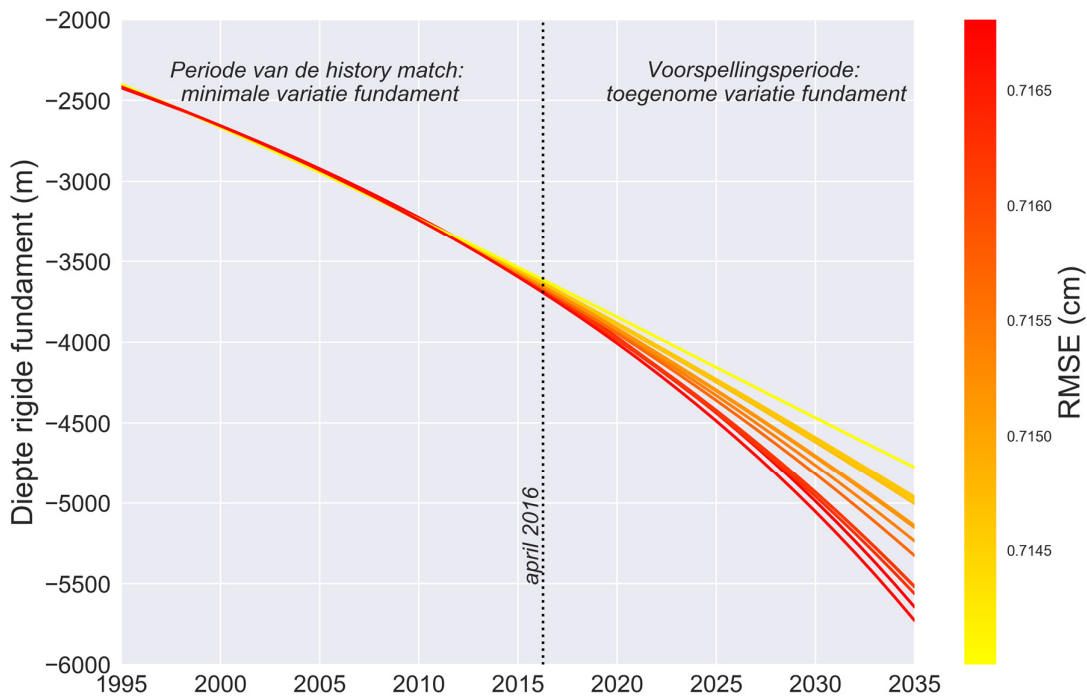
Figuur 2-3 Gedetailleerde history match QC (april 2016, gebaseerd op de beste optimalisatie). A: Gemodelleerde (rood) en waargenomen (zwart) bodemdaling in relatie tot de afstand tot put TR-1 (vergelijk met Figuur 2-2). De standaardafwijking (RMSE) voor het onderzoek van april 2016 alleen bedraagt 1,33 cm. B: Verschil tussen de gemodelleerde en waargenomen bodemdaling (de grootte van de cirkels is evenredig aan de hoeveelheid mismatch, de kleur geeft over- of onderschatting weer)

De mismatch tussen gemodelleerde en waargenomen daling zoals weergegeven in Figuur 2-3B zou onder meer het gevolg kunnen zijn van vereenvoudigingen in het model en/of onzekerheden bij de toewijzing van bodemdalingbijdragen tijdens objectpunt analyse. Het Geertsma-Van Opstal model gaat er bijvoorbeeld van uit dat het reservoir is ingebed in een uniform medium. Om die reden kan het model geen rekening houden met variaties in de geometrie van de deklaag die de symmetrie van de bodemdalingsskom kunnen beïnvloeden. Daarnaast kunnen bodemdalingmetingen bijdragen bevatten waarmee in het model geen rekening wordt gehouden, bijv. plaatselijk variërende compactie van de ondiepe ondergrond (autonome bodemdaling) of een mogelijk niet volledig accurate verdeling tussen door zoutwinning en door gaswinning geïnduceerde bijdragen aan de bodemdaling. Ondanks de waargenomen verschillen is het model duidelijk in staat om het diepste deel en de algemene vorm van de waargenomen bodemdalingsskom te matchen (Figuur 2-3A). Het matchen van het diepste deel van de bodemdaling is uiterst belangrijk, omdat de door zoutwinning geïnduceerde bodemdaling niet groter mag zijn dan 65 cm op enig peilmerkpunt in de winningsvergunning Veendam. Op basis van deze overweging wordt het bodemdalingssmodel dat

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT
 DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZETECHNIEN UIT DE
 WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH
 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE
 PUTTEN

gebruik maakt van de geoptimaliseerde parameters uit de gedetailleerde history match aanvaardbaar geacht, en wordt het gebruikt voor de prognoseberekningen.

Voor alle 16 optimalisatieruns die eindigden in het globale minimum (Appendix D) zijn de verschillen in het gedrag van het rigide fundament tijdens de periode van de history match minimaal. De initiële diepte van het rigide fundament, die is gedefinieerd door parameter $c/k(0)$, is zeer vergelijkbaar, en ondanks variaties in de snelheidsparameter $d(c/k)$ en de relaxatietijd van het zout (τ_{zout}) is er amper onderscheid vast te stellen tussen de curves voor de diepte van het rigide fundament voor de periode tot april 2016. Dit wordt weergegeven in Figuur 2-4. Wanneer de parameters echter worden gebruikt om de diepte van het rigide fundament te voorspellen, worden de verschillen groter (Figuur 2-4), wat resulteert in verschillende bodemdalingsprognoses. Er kan een duidelijke trend worden waargenomen tussen de modelleringsfout en de toekomstige diepte van het fundament.

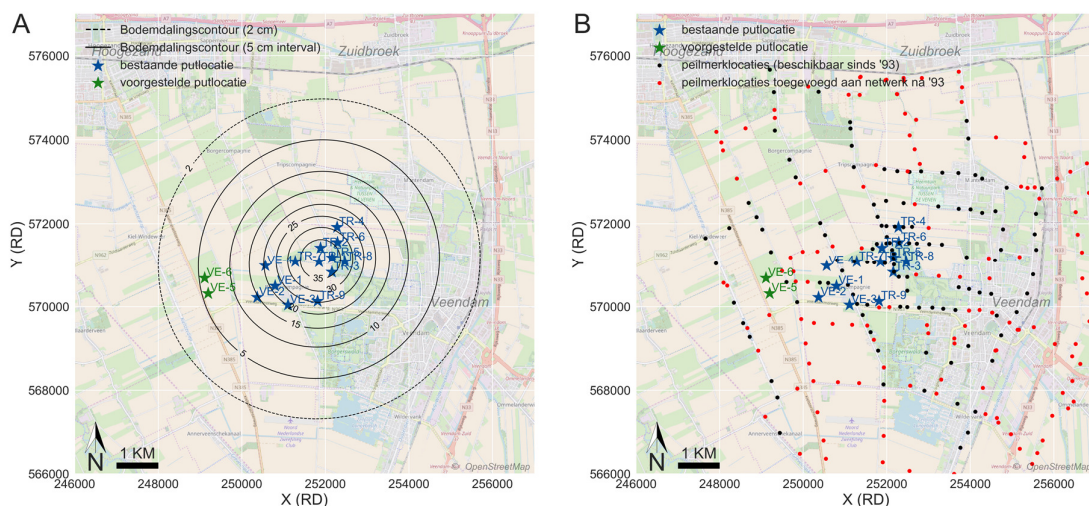


Figuur 2-4 Dieptegedrag van het rigide fundament voor alle 16 globale minimumruns waarin werd uitgegaan van een reservoirdiepte van 1700 m. Inkleuring naar grootte van de RMSE modelleringsfout

3 PROGNOSE VAN TOEKOMSTIGE BODEMDALING

Voor de toekomstige zoutwinning uit de winningsvergunning Veendam plant Nedmag een jaarlijkse squeezebijdrage van 220.000 m³ tot de toegestane maximale bodemdaling is bereikt. Nedmag overweegt ook het boren van twee extra putten (VE-5 en VE-6) op ~2700 meter ten westen van de locatie van de TR-1 put (zie Figuur 3-1). De locaties van de geplande VE-5 en VE-6 putten bevinden zich in de buurt van de westelijke rand van de huidige bodemdalingskom (zie Figuur 3-1A). Nedmag heeft SGS gevraagd de impact van deze nieuwe putten op de toekomstige ontwikkeling van de bodemdaling in deze regio te modelleren.

Hierbij moet worden opgemerkt dat het huidige peilmerkn netwerk in de regio niet dicht genoeg is om een effectief zicht te krijgen op de toekomstige bodemdaling in het VE-5 en VE-6 gebied, zelfs wanneer rekening wordt gehouden met extra peilmerken die na 1993 aan het netwerk zijn toegevoegd (Figuur 3-1B).



Figuur 3-1 A: Gemodelleerde bodemdaling (in cm) voor april 2016 met de voorgestelde locatie van de VE-5 en VE-6 putten (groen). B: Dekking van het peilmerkn netwerk ten opzichte van de bestaande en nieuwe putlocaties

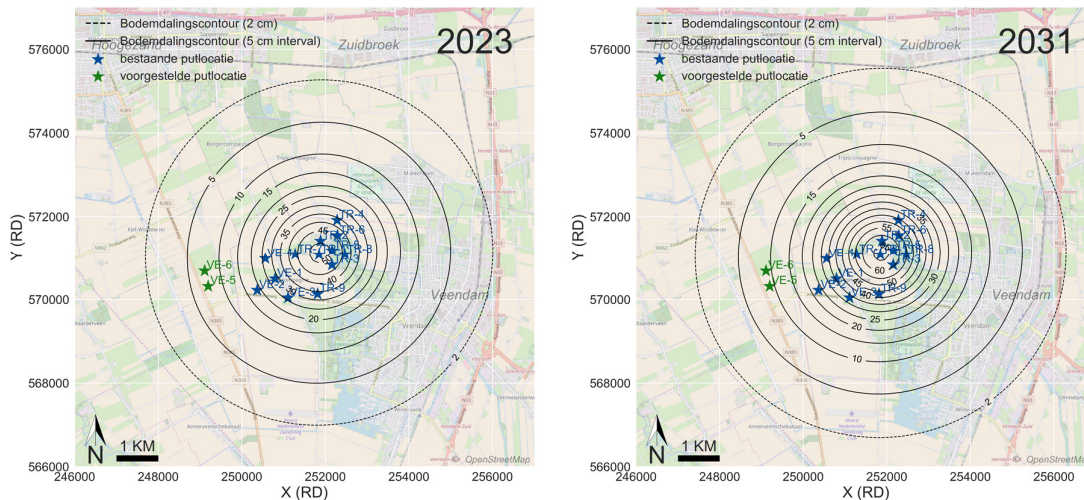
De prognoses voor de bodemdaling zijn gebaseerd op het bodemdalingsmodel uit de gedetailleerde history match die is beschreven in hoofdstuk 2. De parameters van de run met de kleinste fout (RMSE = 0,7140 cm, Appendix D) worden overgenomen in één enkel deterministisch bodemdalingsmodel. Ondanks het feit dat in deze studie geen onzekerheidsmodellering behelst, wordt de gevoeligheid van het bodemdalingsmodel voor de definitie van het rigide fundament geïllustreerd door alle prognoses scenario's een tweede keer uit te voeren, dit keer met de parameters van de run met de grootste fout (RMSE = 0,7168 cm, Appendix D). Deze gegevens zijn beschikbaar in Appendix E.

Een prognose van de bodemdaling werd berekend voor drie squeeze productiescenario's die door Nedmag werden geleverd. Het eerste scenario is enkel gebaseerd op de bestaande putten: al het geplande squeezevolume wordt toegewezen aan de TR-1 caveerne. De twee andere scenario's omvatten productie uit de VE-5 en VE-6 putten, waarbij ofwel 40% (scenario 2) ofwel 20% (scenario 3) van het totale squeezevolume wordt geproduceerd uit de nieuwe putten. Een overzicht van alle input parameters voor de modellering wordt weergegeven in Tabel 3-1.

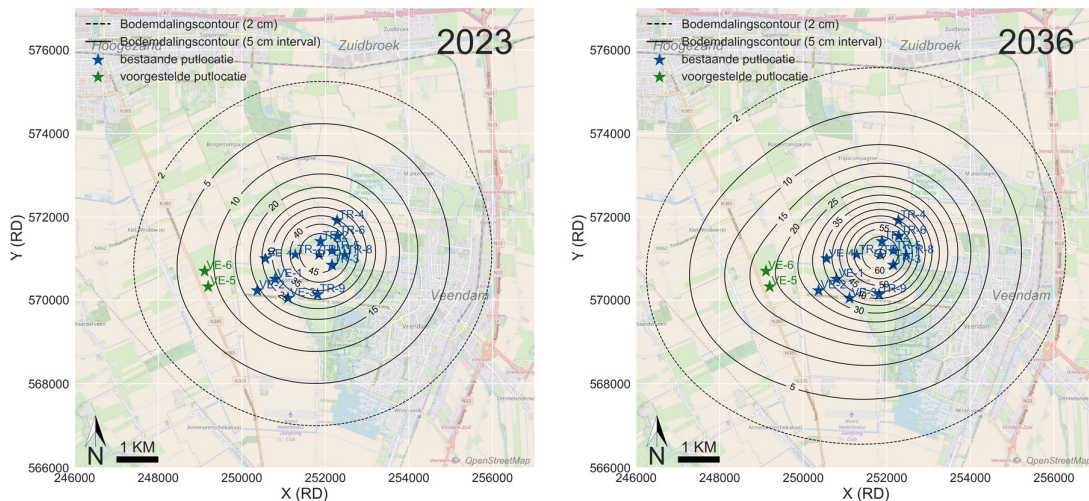
Tabel 3-1 Model input voor prognoses scenario's voor de bodemdaling

Scenario	Jaarlijks toegewezen squeezevolume (220.000 m ³)	Totale squeezevolume fractie		Diepteparameters rigide fundament		
		TR-1	VE-5&6	c/k(0)	D(c/k)	τ_{zout}
1	Het volledige toekomstige squeezevolume wordt toegewezen aan de TR-1 caverne	1	0	0,707	0,502	33,3
2	Toewijzing squeezevolume: TR1 (60%) + VE-5&6 (40%)	0,6	0,4			
3	Toewijzing squeezevolume: TR1 (80%) + VE-5&6 (20%)	0,8	0,2			

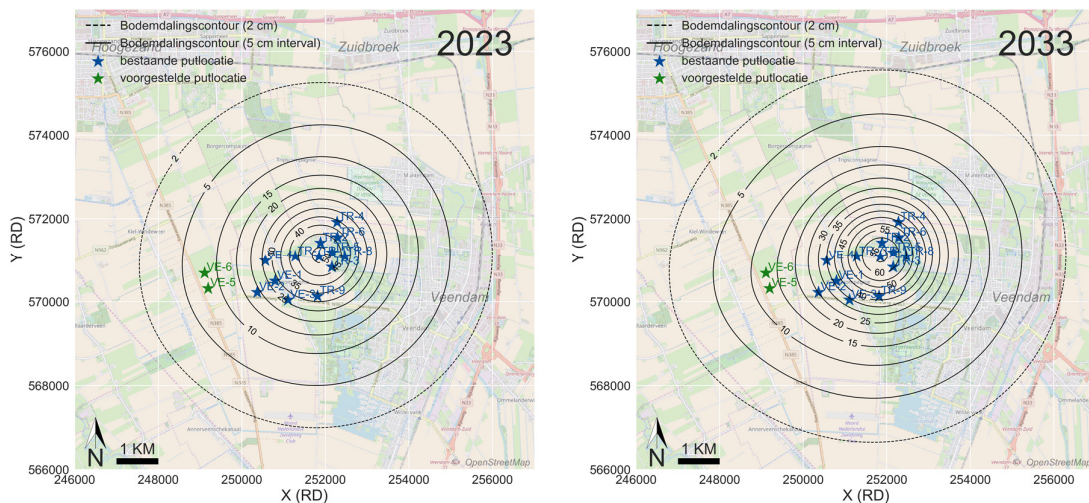
Voor elk scenario wordt de voorspelde bodemdaling tweemaal weergegeven: eenmaal voor 2023, wanneer een maximale bodemdaling van ongeveer 50 cm wordt bereikt, en eenmaal voor het jaar waarin de gemodelleerde bodemdaling de maximaal toegestane waarde van 65 cm bereikt op een peilmerklocatie. Dat moment varieert voor de verschillende scenario's, zoals blijkt uit de resulterende bodemdalingkaarten in Figuur 3-2 tot Figuur 3-4.


Figuur 3-2 Prognose van de bodemdaling (in cm) voor 2023 (links) en 2031 (rechts) gebaseerd op productiescenario 1

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZE TECHNIEKEN UIT DE WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE PUTTEN



Figuur 3-3 Prognose van de bodemdaling (in cm) voor 2023 (links) en 2036 (rechts) gebaseerd op productiescenario 2



Figuur 3-4 Prognose van de bodemdaling (in cm) voor 2023 (links) en 2033 (rechts) gebaseerd op productiescenario 3

De prognoseresultaten zijn samengevat in Tabel 3-2. Hierin wordt het jaar aangegeven waarin de maximaal toegestane, door zoutwinning geïnduceerde bodemdaling van 65 cm op een peilmerk wordt bereikt, alsmede het cumulatieve squeezevolume op dat moment. Volgens deze resultaten heeft het toewijzen van een deel van de geplande productie aan twee extra putten (VE-5 en VE-6) een duidelijke invloed op de ontwikkeling van de bodemdaling (Figuur 3-2 tot Figuur 3-4). Door de extractie van het squeezevolume over de regio te verdelen door middel van de productie uit extra putten, kan het tijdstip waarop de maximaal toegestane bodemdaling wordt bereikt, worden uitgesteld. Wanneer voor de productie enkel de bestaande putten worden gebruikt, wordt de maximaal toegestane bodemdaling bereikt in 2031. Op dat ogenblik zou een totaal cumulatief squeezevolume van 8,22 miljoen m³ zijn gerealiseerd. In scenario 2 wordt het jaar waarin de maximaal toegestane bodemdaling wordt bereikt met 5 jaar vertraagd, tot 2036. Tegen die tijd zal

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT
 DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZETECHNIKEN UIT DE
 WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH
 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE
 PUTTEN

een cumulatief squeezevolume 9,32 miljoen m³ zijn gerealiseerd, 1,1 miljoen m³ meer dan in scenario 1, waar al het nieuwe squeezevolume wordt toegewezen aan de bestaande TR-1 put. In scenario 3 wordt een kleiner deel van de geplande productie toegewezen aan de nieuwe putten, wat resulteert in een vertraging van 2 jaar vóór het bereiken van de maximaal toegestane bodemdaling en een hogere cumulatieve productie van 0,44 miljoen m³ in vergelijking met scenario 1.

Tabel 3-2 Samenvatting van prognoseresultaten

Scenario	Toewijzing productie squeezevolume:	Toegestane bodemdaling (65 cm) bereikt in/bij	
		Jaar	Cumulatief squeezevolume (miljoen m ³)
1	100% van TR-1	2031	8,22
2	60% van TR-1 40% van VE-5&6	2036	9,32
3	80% van TR-1 20% van VE-5&6	2033	8,66

4 BESPREKING VAN MODELLERINGSBEPERKINGEN

Het hierboven beschreven bodemdalingsmodel geeft een mogelijke ontwikkeling weer van de bodemdaling als gevolg van zoutwinning door Nedmag met behulp van squeeze technieken op de productielocatie van Veendam. Onzekerheidsmodellering en/of de beoordeling van onzekerheidsmarges in verband met de input data, vereenvoudigingen van de ondergrond, modelleringsaannames en methodologische beperkingen vielen buiten het bestek van deze studie. De enige onzekerheid waar in deze studie rekening mee werd gehouden, is de gevoeligheid van het model voor de diepteparameters van het rigide fundament, die wordt geïllustreerd door het alternatieve scenario in Appendix E. Aangezien slechts één parameter variatie is opgenomen in de prognose (met een statistisch onvoldoende aantal runs om de volledige oplossingsruimte op betrouwbare manier te kunnen definiëren), moeten de resultaten van deze studie worden beschouwd als één enkele, deterministische casus die een indicatie geeft van mogelijke bodemdaling, ten gevolge van toekomstige zoutwinning door squeeze technieken.

Input data waarvan wordt aangenomen dat ze een potentieel significant onzekerheidsbereik hebben, die tot een breder scala aan prognoseresultaten zou kunnen leiden, zijn de berekende squeeze volumes en de waargenomen bodemdaling. Er zijn bijvoorbeeld significante onzekerheden verbonden aan de berekeningen van het squeeze volume. Aan metingen van de bodemdaling zijn zowel meetonzekerheden als onzekerheden door objectpunt analyse verbonden.

Andere mogelijke bijdragen aan de modelonzekerheid en de daaruit volgende prognose hebben betrekking op de methodologische keuzes en beperkingen. Eén voorbeeld hiervan is het vereenvoudigd geomechanisch gedrag van het reservoir en de deklaag. Het Geertsma-Van Opstal model gaat uit van een homogene halve ruimte waarin het reservoir is ingebed, wat resulteert in een intrinsiek symmetrische bodemdalingskom aan de oppervlakte. In werkelijkheid kan de deklaag hellende lagen met variërende geomechanische eigenschappen bevatten, die de vorm van de bodemdalingskom zouden kunnen beïnvloeden.

Het modelleren van kruipeffecten ten gevolge van de productie, die zouden kunnen leiden tot verdere bodemdaling na afloop van de productie, of juist lokale stijging door een 'terugkaatsingseffect' ('rebound effect'; zoals gesuggereerd door Fokker, 2011 [2]) vielen ook buiten het bereik van dit onderzoek.

5 CONCLUSIES

De huidige en toekomstige bodemdaling als gevolg van zoutwinning door squeeze technieken uit de winningsvergunning Veendam werden gemodelleerd volgens de Geertsma-Van Opstal methode met een variabel rigide fundament. De history match van een vereenvoudigd bodemdalingsmodel resulteerde in een redelijke overeenkomst tussen de gemodelleerde bodemdalingen en de waargenomen bodemdalingen op peilmerklocaties.

De gedetailleerde history match, waarbij productievolumes werden toegewezen aan individuele putlocaties, resulteerde in een bodemdalingsmodel dat geschikt werd geacht voor het maken van een prognose van de toekomstige bodemdaling. In de prognose werd een parameter variatie voor het rigide fundament opgenomen als een onzekerheid. Aangezien verdere onzekerheidsmodellering zich buiten het bestek van deze studie bevond, kan het prognoseresultaat feitelijk worden beschouwd als een deterministische casus die een indicatie geeft van de mogelijke bodemdaling als gevolg van toekomstige zoutwinning door squeeze technieken.

In het productiescenario met een squeeze bijdrage enkel uit bestaande putten wordt de maximaal toegestane bodemdaling van 65 cm in 2031 bereikt bij de TR-1 put.

Een vertraging van twee tot vijf jaar voor het bereiken van de maximaal toelaatbare bodemdaling is haalbaar wanneer de VE-5 en VE-6 putten worden geboord en 20 tot 40% van de totale squeeze bijdrage aan deze putten wordt toegewezen. Hierdoor is de productie van 0,44 tot 1,1 miljoen m³ extra squeeze volume mogelijk, in vergelijking met het scenario met een squeeze bijdrage van enkel de bestaande putten.

De belangrijkste factor in deze scenario's is de productiviteit van de nieuwe putten (maximale squeeze snelheid). Hoe groter de productiesnelheid in de nieuwe putten, hoe kleiner de squeeze snelheid in de bestaande putten, en hoe later daardoor de toegestane bodemdaling wordt bereikt.

Het huidige netwerk van peilmerken is niet dicht genoeg ten westen van VE-5 en VE-6 om de mogelijke toekomstige bodemdaling als gevolg van die nieuwe putten adequaat te monitoren.

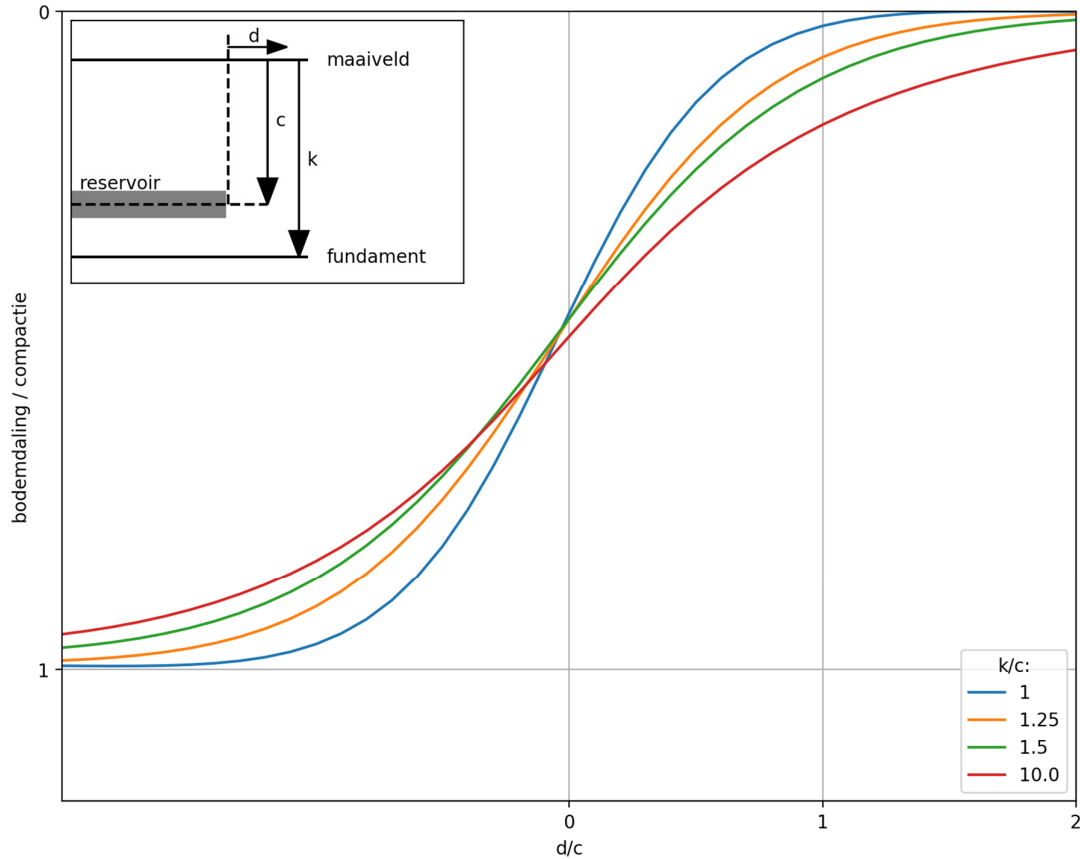
6 AFKORTINGEN EN EENHEDENLIJST

Nedmag	Nedmag B.V.
SGS	SGS Subsurface Consultancy, SGS Nederland B.V.
TNO-AGE	TNO Advisory Group for Economic affairs
Antea	Antea Group Nederland
m	meter (lengte-eenheid)
cm	centimeter (lengte-eenheid)
m ³	kubieke meter
(k)ton	(kilo)ton = (10 ³)10 ³ kg (gewichtseenheid)
RMSE	standaard afwijking

7 REFERENTIES

- [1] Muntendam-Bos, A. et al., 2012. Toetsing van de belasting op de gebruiksruimte in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag door bodemdaling ten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee. TNO-060-UT-2011-02035/C I Eindrapport. 106 pp.
- [2] Fokker, P.A., 2011. Nedmag Veendam Studie Inversie van bodemdalingmetingen. TNO-060-UT-2011-00687. 39 pp.
- [3] Geertsma, J., 1966. Problems of Rock Mechanics in Petroleum Production Engineering. Proceedings 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon, I, 585.
- [4] Van Opstal, G.H.C., 1974. The effect of base-rock rigidity on subsidence due to reservoir compaction. Proc. 3rd Congress of the Int. Soc. of Rock Mech., Denver, II, Part B, p.1102-1111.

APPENDIX A ILLUSTRATIE VAN HET RIGIDE FUNDAMENT



Figuur 7-1 Effect van het rigide fundament op de vorm van de bodemdalingskom voor een eenvoudig model (geometrie geïllustreerd in de inzet)

De diepte van het rigide fundament beïnvloedt de vorm van de bodemdalingskom, zoals is weergegeven in bovenstaande afbeelding. De bodemdaling wordt weergegeven langs een lijn over een rechthoekig reservoir met uniforme compactie. De verticale as geeft de hoeveelheid bodemdaling weer, in verhouding tot de hoeveelheid compactie in het reservoir. De horizontale as geeft de mate weer waarin de kom voorbij de rand van het reservoir (d) reikt als een factor van de reservoirdiepte (c). De diepste en steilste kom wordt bereikt met een diepte van het rigide fundament (k) die gelijk is aan de diepte van het reservoir ($k/c = 1$). In deze situatie is de afstand voorbij de rand van het reservoir tot waar bodemdaling waargenomen wordt ongeveer gelijk aan de diepte van het reservoir.

APPENDIX B PRODUCTIEDATA
Tabel 7-1 Lijst van cavernes (putten) en hun coördinaten (RD)

Put	X	Y
VE-1	250795,00	570500,00
VE-2	250366,95	570226,79
VE-3	251106,26	570042,89
VE-4	250561,51	570990,30
VE-5	249195,00	570319,00
VE-6	249109,00	570691,00
TR-1	251846,61	571088,29
TR-2	251882,99	571423,42
TR-3	252154,63	570836,10
TR-4	252278,26	571920,98
TR-5	252159,32	571185,27
TR-6	252287,92	571553,39
TR-7	251278,28	571089,19
TR-8	252467,39	571089,43
TR-9	251811,62	570133,51

Tabel 7-2 Tijdstippen van caverneverbinding: putten met dezelfde kleur vormen een cluster en produceren uit dezelfde caverne

Put	VE-1	VE-2	VE-3	VE-4	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5	TR-6	TR-7	TR-8	TR-9
okt 82													
nov 96													
jul 97													
jan 98													
jul 99													
nov 99													
mrt 01													
okt 02													
nov 06													
sep 09													

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT
 DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZETECHNIEN UIT DE
 WINNINGVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH
 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE
 PUTTEN

Tabel 7-3 Cumulatieve squeezevolumes van afzonderlijke putten en clusters op het moment van de meting van de bodemdaling

Status in	TR-1&-2 m ³	TR-3 m ³	TR-4 m ³	TR-5 m ³	TR-6 m ³	TR-7 m ³	TR-8 m ³	TR-9 m ³	VE-1 m ³	VE-2 m ³	VE-3 m ³	VE-4 m ³	Totaal (putten) m ³	Bijdrage van clusters		Totaal m ³
														m ³	putten in clusters	
mei-93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
feb-95	5,970	1,036	163,041	11,214	31,286	10,542	9,794	0	0	3,302	-9,567	1,594	228,211	0	0	228,211
jul-95	9,499	1,549	189,917	17,265	80,786	14,142	11,912	0	0	4,458	-8,275	2,815	324,007	0	0	324,007
jan-96	36,716	17,643	199,577	41,413	98,361	38,781	29,290	0	0	8,813	-6,430	1,253	465,417	0	0	465,417
jan-97	52,863	29,229	223,822	100,950	104,965	73,708	76,862	0	0	19,554	-2,954	4,233	683,221	17,423	TR-1, 2 & 5	700,644
jan-98	52,863	48,241	241,578	100,950	121,979	121,269	113,322	0	0	52,481	1,514	11,053	865,250	96,322	TR-1, 2 & 5	961,571
jan-99	52,863	65,567	241,578	100,950	121,979	129,661	147,682	0	0	104,317	3,623	29,910	998,130	239,574	TR-1, 2, 5 & 4 & 6	1,237,705
jan-00	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	181,362	0	0	104,317	39,140	34,816	1,107,979	348,897	TR-1, 2, 3, 5, 7 & 4 & 6	1,456,876
jan-02	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	0	12,597	104,317	73,845	42,219	1,193,405	659,700	TR-1, 2, 3, 5, 7, 8 & 4 & 6	1,853,106
jan-04	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	0	12,597	104,317	78,467	53,122	1,208,931	1,088,743	TR-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	2,297,674
jan-06	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	0	12,597	104,317	80,856	70,524	1,228,721	1,496,023	TR-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	2,724,744
jan-08	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	0	12,597	104,317	84,983	86,242	1,248,566	1,874,192	TR-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 & VE-2 & 3	3,122,759
jan-10	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	0	12,597	104,317	84,983	86,107	1,248,431	2,256,710	TR-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, VE-4 & VE-2 & 3	3,505,141
mrt-12	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	0	12,597	104,317	84,983	86,107	1,248,431	2,847,222	TR-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, VE-4 & VE-2 & 3	4,095,653
feb-14	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	8,367	12,597	104,317	84,983	86,107	1,256,798	3,246,225	TR-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, VE-4 & VE-2 & 3	4,503,023
apr-16	52,863	108,941	241,578	100,950	121,979	122,033	212,084	52,147	12,597	104,317	84,983	86,107	1,300,578	3,624,999	TR-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, VE-4 & VE-2 & 3	4,925,577

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZETECHNIEN UIT DE WINNINGVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE PUTTEN

APPENDIX C WAARGENOMEN BODEMDALING OP PEILMERKLOCATIES

Tabel 7-4 In de volgende tabellen worden de gegevens over peilmerkpunten gegeven die voor deze studie beschikbaar waren: peilmerknnummer, coördinaten en door zoutwinning geïnduceerde, waargenomen bodemdaling tussen 1993 en 2016

Punt	X	Y	mei-93	feb-95	jul-95	jan-96	jan-97	jan-98	jan-99	jan-00	jan-02	jan-04	jan-06	jan-08	jan-10	mtt-12	feb-14	apr-16
1	251,988	571,949	0,000	-0,022	-0,025	-0,038	-0,069	-0,081	-0,084	-0,110	-0,135	-0,138	-0,162	-0,187	-0,213	-0,250	-0,277	-0,302
3	252,194	571,936	0,000	-0,024	-0,028	-0,044	-0,062	-0,074	-0,085	-0,113	-0,138	-0,148	-0,168	-0,192	-0,218	-0,254	-0,280	-0,304
5	252,398	571,923	0,000	-0,024	-0,027	-0,040	-0,056	-0,069	-0,079	-0,092	-0,105	-0,128	-0,155	-0,178	-0,201	-0,236	-0,260	-0,282
7	252,602	571,931	0,000	-0,024	-0,027	-0,037	-0,054	-0,066	-0,076	-0,088	-0,099	-0,119	-0,143	-0,163	-0,185	-0,216	-0,237	-0,258
10	252,302	571,548	0,000	-0,023	-0,028	-0,044	-0,069	-0,082	-0,098	-0,112	-0,132	-0,148	-0,168	-0,199	-0,226	-0,253	-0,281	-0,306
12	252,533	571,537	0,000	-0,035	-0,040	-0,055	-0,074	-0,089	-0,103	-0,135	-0,162	-0,173	-0,199	-0,223	-0,238	-0,274	-0,298	-0,323
14	252,717	571,528	0,000	-0,021	-0,026	-0,038	-0,055	-0,069	-0,081	-0,084	-0,112	-0,136	-0,161	-0,181	-0,205	-0,236	-0,258	-0,280
15	252,126	571,374	0,000	-0,019	-0,024	-0,042	-0,071	-0,086	-0,103	-0,119	-0,144	-0,178	-0,211	-0,240	-0,268	-0,310	-0,340	-0,370
16	252,166	571,285	0,000	-0,017	-0,023	-0,040	-0,067	-0,084	-0,102	-0,118	-0,144	-0,177	-0,210	-0,239	-0,267	-0,309	-0,339	-0,369
17	252,167	571,178	0,000	-0,016	-0,022	-0,040	-0,070	-0,085	-0,102	-0,120	-0,148	-0,181	-0,214	-0,243	-0,271	-0,312	-0,342	-0,373
19	252,169	571,019	0,000	-0,015	-0,020	-0,037	-0,062	-0,082	-0,099	-0,110	-0,146	-0,179	-0,212	-0,240	-0,267	-0,307	-0,336	-0,368
28	252,169	570,839	0,000	-0,012	-0,016	-0,032	-0,055	-0,076	-0,091	-0,110	-0,139	-0,173	-0,203	-0,230	-0,256	-0,295	-0,323	-0,354
34	252,288	570,720	0,000	-0,010	-0,013	-0,028	-0,049	-0,067	-0,083	-0,101	-0,132	-0,162	-0,190	-0,215	-0,240	-0,275	-0,306	-0,336
36	252,487	570,714	0,000	-0,010	-0,013	-0,027	-0,045	-0,063	-0,077	-0,094	-0,119	-0,145	-0,172	-0,195	-0,218	-0,251	-0,274	-0,302
44	251,780	572,170	0,000	-0,018	-0,022	-0,032	-0,049	-0,066	-0,087	-0,114	-0,138	-0,164	-0,199	-0,228	-0,255	-0,297	-0,325	-0,354
54	251,989	571,533	0,000	-0,019	-0,024	-0,041	-0,068	-0,092	-0,113	-0,135	-0,166	-0,197	-0,228	-0,255	-0,297	-0,325	-0,354	-0,384
69	251,780	571,520	0,000	-0,015	-0,019	-0,036	-0,058	-0,078	-0,093	-0,109	-0,133	-0,164	-0,197	-0,227	-0,254	-0,296	-0,324	-0,357
79	252,000	571,685	0,000	-0,022	-0,027	-0,043	-0,064	-0,080	-0,094	-0,109	-0,128	-0,159	-0,190	-0,217	-0,246	-0,286	-0,314	-0,342
81	251,874	571,955	0,000	-0,023	-0,027	-0,041	-0,059	-0,074	-0,087	-0,100	-0,118	-0,144	-0,174	-0,200	-0,236	-0,274	-0,301	-0,327
87	251,984	572,550	0,000	-0,018	-0,020	-0,027	-0,037	-0,045	-0,049	-0,061	-0,069	-0,085	-0,103	-0,121	-0,140	-0,166	-0,186	-0,204
89	252,402	572,496	0,000	-0,029	-0,032	-0,038	-0,046	-0,053	-0,058	-0,069	-0,076	-0,092	-0,109	-0,126	-0,144	-0,169	-0,188	-0,205
93	253,229	572,416	0,000	-0,016	-0,019	-0,023	-0,030	-0,035	-0,037	-0,046	-0,052	-0,062	-0,073	-0,086	-0,097	-0,114	-0,126	-0,137
95	253,721	572,336	0,000	-0,008	-0,010	-0,013	-0,018	-0,022	-0,021	-0,030	-0,034	-0,042	-0,048	-0,054	-0,061	-0,072	-0,081	-0,088
96	254,004	572,344	0,000	-0,009	-0,011	-0,014	-0,019	-0,021	-0,020	-0,027	-0,032	-0,038	-0,043	-0,050	-0,054	-0,064	-0,072	-0,077
97	253,911	571,199	0,000	-0,007	-0,010	-0,012	-0,016	-0,023	-0,027	-0,033	-0,041	-0,048	-0,056	-0,063	-0,072	-0,084	-0,093	-0,101
100	253,320	571,500	0,000	-0,012	-0,015	-0,021	-0,032	-0,039	-0,046	-0,055	-0,066	-0,079	-0,094	-0,106	-0,122	-0,142	-0,156	-0,170
102	253,015	571,514	0,000	-0,015	-0,020	-0,029	-0,043	-0,052	-0,061	-0,073	-0,085	-0,104	-0,123	-0,139	-0,156	-0,184	-0,202	-0,219
108	252,490	569,990	0,000	-0,004	-0,006	-0,013	-0,023	-0,030	-0,034	-0,039	-0,049	-0,058	-0,070	-0,082	-0,095	-0,114	-0,126	-0,137
110	252,489	570,385	0,000	-0,007	-0,010	-0,020	-0,035	-0,051	-0,064	-0,080	-0,104	-0,127	-0,150	-0,171	-0,192	-0,219	-0,241	-0,267
113	251,220	571,097	0,000	-0,007	-0,008	-0,023	-0,045	-0,062	-0,076	-0,093	-0,124	-0,151	-0,180	-0,206	-0,231	-0,269	-0,296	-0,326
115	251,532	571,080	0,000	-0,021	-0,024	-0,041	-0,065	-0,086	-0,102	-0,120	-0,152	-0,185	-0,216	-0,246	-0,272	-0,314	-0,343	-0,376
116	251,659	571,399	0,000	-0,011	-0,015	-0,032	-0,056	-0,077	-0,092	-0,108	-0,136	-0,167	-0,199	-0,230	-0,257	-0,299	-0,328	-0,359
118	251,701	571,070	0,000	-0,006	-0,009	-0,028	-0,053	-0,075	-0,091	-0,110	-0,143	-0,176	-0,209	-0,239	-0,267	-0,309	-0,339	-0,373
121	251,955	571,057	0,000	-0,009	-0,013	-0,032	-0,060	-0,079	-0,095	-0,115	-0,146	-0,180	-0,213	-0,243	-0,273	-0,313	-0,344	-0,377
136	253,350	569,950	0,000	-0,002	-0,003	-0,007	-0,014	-0,021	-0,028	-0,036	-0,049	-0,059	-0,072	-0,086	-0,093	-0,106	-0,116	-0,129
137	252,770	569,980	0,000	-0,002	-0,004	-0,011	-0,020	-0,030	-0,041	-0,052	-0,069	-0,087	-0,103	-0,118	-0,134	-0,154	-0,170	-0,189
140	251,530	570,090	0,000	-0,004	-0,004	-0,010	-0,021	-0,035	-0,048	-0,063	-0,088	-0,109	-0,128	-0,145	-0,165	-0,190	-0,210	-0,236
141	251,420	569,800	0,000	-0,001	-0,003	-0,007	-0,013	-0,026	-0,036	-0,048	-0,068	-0,092	-0,110	-0,124	-0,143	-0,162	-0,179	-0,199
143	255,360	570,320	0,000	-0,003	-0,004	-0,006	-0,008	-0,009	-0,011	-0,014	-0,016	-0,018	-0,019	-0,022	-0,023	-0,023	-0,023	-0,023
144	254,500	570,310	0,000	-0,003	-0,004	-0,006	-0,009	-0,012	-0,015	-0,018	-0,021	-0,026	-0,029	-0,033	-0,037	-0,042	-0,046	-0,048
145	254,220	570,340	0,000	-0,002	-0,004	-0,005	-0,009	-0,014	-0,017	-0,021	-0,025	-0,030	-0,036	-0,040	-0,046	-0,052	-0,058	-0,061
146	253,970	570,430	0,000	-0,001	-0,003	-0,006	-0,009	-0,015	-0,020	-0,025	-0,031	-0,038	-0,045	-0,051	-0,059	-0,068	-0,076	-0,082
147	253,720	570,470	0,000	-0,001	-0,002	-0,004	-0,008	-0,014	-0,021	-0,028	-0,036	-0,044	-0,050	-0,060	-0,068	-0,078	-0,091	-0,101
156	255,574	571,373	0,000	-0,003	-0,003	-0,004	-0,005	-0,007	-0,008	-0,009	-0,010	-0,012	-0,013	-0,014	-0,015	-0,016	-0,018	-0,017
160	254,780	571,870	0,000	-0,002	-0,003	-0,004	-0,007	-0,013	-0,014	-0,017	-0,020	-0,023	-0,026	-0,030	-0,034	-0,041	-0,046	-0,049
161	254,280	572,260	0,000	-0,002	-0,003	-0,005	-0,009	-0,013	-0,013	-0,015	-0,019	-0,023	-0,027	-0,032	-0,035	-0,042	-0,047	-0,051
175	250,405	572,016	0,000	-0,001	-0,003	-0,005	-0,012	-0,018	-0,024	-0,031	-0,040	-0,050	-0,063	-0,075	-0,089	-0,106	-0,121	-0,136
176	250,520	571,730	0,000	-0,002	-0,004	-0,009	-0,017	-0,026	-0,034	-0,043	-0,057	-0,070	-0,087	-0,103	-0,120	-0,143	-0,162	-0,180
177	250,810	571,120	0,000	-0,002	-0,004	-0,013	-0,026	-0,042	-0,055	-0,068	-0,094	-0,116	-0,139	-0,160	-0,180	-0,213	-0,235	-0,260
187	249,021	571,864	0,000	0,000	0,000	-0,002	-0,003	-0,005	-0,007	-0,010	-0,011	-0,014	-0,017	-0,020	-0,023	-0,026	-0,031	-0,036
188	249,224	571,322	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,003	-0,006	-0,008	-0,012	-0,014	-0,016	-0,019	-0,022	-0,025	-0,029	-0,034	-0,039
190	249,597	570,594	0,000	-0,001	-0,001	-0,004	-0,005	-0,010	-0,015	-0,020	-0,025	-0,028	-0,032	-0,035	-0,039	-0,046	-0,052	-0,058
194	248,880	572,160	0,000	-0,002	-0,002	-0,004	-0,005	-0,007	-0,009	-0,012	-0,014	-0,014	-0,016	-0,018	-0,020	-0,023	-0,026	-0,030
199	249,852	570,110	0,000	0,000	0,001	-0,002	-0,004	-0,012	-0,018	-0,024	-0,031	-0,033	-0,037	-0,042	-0,046	-0,054	-0,059	-0,067
211	250,595	570,570	0,000	-0,003	-0,003	-0,011	-0,020	-0,045	-0,059	-0,072	-0,102	-0,120	-0,135	-0,151	-0,168	-0,196	-0,221	-0,248
306	251,190	570,290	0,000	-0,003	-0,005	-0,012	-0,023	-0,039	-0,053	-0,066	-0,094	-0,114	-0,132	-0,152	-0,170	-0,197	-0,221	-0,243
308	250,930	570,870	0,000	-0,003	-0,005	-0,015	-0,028	-0,045	-0,059	-0,073	-0,102	-0,120	-0,148	-0,170	-0,191	-0,224	-0,246	-0,273
1215	250,398	570,580	0,000	-0,002	-0,002	-0,008	-0,014	-0,028	-0,041	-0,053	-0,073	-0,086	-0,100	-0,111	-0,126	-0,146	-0,161	-0,181
1219	251,287	570,067	0,000	-0,002	-0,005	-0,009	-0,019	-0,034	-0,046	-0,059	-0,083	-0,102	-0,119	-0,135	-0,152	-0,176	-0,194	-0,218

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT
DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZETECHNIEN UIT DE
WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH
1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE
PUTTEN

Punt	X	Y	met-93	feb-95	jul-95	jan-96	jan-97	jan-98	jan-99	jan-00	jan-02	jan-04	jan-06	jan-08	jan-10	mr-12	feb-14	apr-16
1220	251,066	570,525	0,000	-0,003	-0,002	-0,004	-0,026	-0,043	-0,057	-0,071	-0,100	-0,122	-0,142	-0,162	-0,182	-0,211	-0,233	-0,259
12E038	249,820	573,110	0,000	-0,001	-0,002	-0,004	-0,014	-0,010	-0,011	-0,016	-0,019	-0,023	-0,028	-0,033	-0,039	-0,046	-0,054	-0,060
12E147	248,890	572,500	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,004	-0,006	-0,007	-0,009	-0,011	-0,013	-0,015	-0,017	-0,018	-0,020	-0,023	-0,027
12E149	248,230	571,900	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,005	-0,006	-0,008	-0,009	-0,011	-0,011	-0,013	-0,014	-0,017	-0,018	-0,020
12E171	247,911	571,045	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,002	-0,004	-0,005	-0,006	-0,008	-0,009	-0,011	-0,012	-0,013	-0,014	-0,015	-0,015
12E183	248,340	570,100	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	-0,004	-0,006	-0,008	-0,009	-0,010	-0,011	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010
12E196	247,660	571,650	0,000	-0,002	-0,002	-0,003	-0,005	-0,006	-0,007	-0,008	-0,010	-0,011	-0,011	-0,011	-0,012	-0,012	-0,013	-0,015
12F042	255,106	569,872	0,000	-0,002	-0,003	-0,004	-0,006	-0,007	-0,008	-0,010	-0,011	-0,013	-0,015	-0,017	-0,018	-0,019	-0,020	-0,020
12F051	255,500	570,780	0,000	-0,003	-0,004	-0,005	-0,006	-0,009	-0,010	-0,012	-0,013	-0,015	-0,017	-0,018	-0,019	-0,020	-0,021	-0,021
12F055	252,070	571,540	0,000	-0,022	-0,027	-0,044	-0,067	-0,085	-0,100	-0,115	-0,137	-0,169	-0,201	-0,230	-0,258	-0,300	-0,329	-0,358
12F058	254,590	571,120	0,000	-0,004	-0,007	-0,007	-0,011	-0,014	-0,016	-0,019	-0,023	-0,027	-0,031	-0,036	-0,040	-0,046	-0,050	-0,053
12F059	255,540	571,750	0,000	-0,002	-0,003	-0,003	-0,005	-0,006	-0,008	-0,009	-0,010	-0,012	-0,014	-0,015	-0,016	-0,017	-0,020	-0,019
12F089	254,630	569,790	0,000	-0,002	-0,002	-0,004	-0,006	-0,009	-0,012	-0,014	-0,018	-0,021	-0,024	-0,027	-0,030	-0,034	-0,035	-0,038
12F090	253,640	569,920	0,000	-0,002	-0,003	-0,003	-0,006	-0,011	-0,016	-0,022	-0,037	-0,044	-0,052	-0,060	-0,069	-0,078	-0,087	-0,096
12F091	252,320	570,000	0,000	-0,004	-0,006	-0,014	-0,025	-0,037	-0,049	-0,063	-0,084	-0,104	-0,123	-0,141	-0,159	-0,182	-0,201	-0,226
12F100	253,090	569,980	0,000	-0,002	-0,004	-0,009	-0,017	-0,026	-0,034	-0,044	-0,057	-0,070	-0,083	-0,096	-0,109	-0,125	-0,138	-0,154
12F113	251,690	572,460	0,000	-0,016	-0,019	-0,026	-0,038	-0,047	-0,053	-0,062	-0,074	-0,091	-0,112	-0,132	-0,152	-0,181	-0,203	-0,223
12F116	254,735	569,315	0,000	-0,002	-0,003	-0,005	-0,006	-0,009	-0,011	-0,013	-0,015	-0,017	-0,019	-0,022	-0,024	-0,026	-0,026	-0,028
12F180	254,730	571,380	0,000	-0,004	-0,006	-0,006	-0,009	-0,012	-0,013	-0,016	-0,020	-0,023	-0,026	-0,030	-0,033	-0,038	-0,042	-0,044
105	251,944	573,302	0,000	-0,012	-0,015	-0,017	-0,022	-0,024	-0,029	-0,031	-0,038	-0,043	-0,043	-0,050	-0,059	-0,068	-0,074	-0,079
106	252,252	573,256	0,000	-0,013	-0,016	-0,017	-0,023	-0,023	-0,025	-0,029	-0,032	-0,038	-0,043	-0,050	-0,059	-0,068	-0,074	-0,078
107	252,543	573,238	0,000	-0,009	-0,012	-0,014	-0,019	-0,020	-0,021	-0,026	-0,029	-0,035	-0,040	-0,047	-0,055	-0,063	-0,070	-0,073
157	255,570	572,240	0,000	-0,003	-0,004	-0,004	-0,004	-0,003	-0,005	-0,007	-0,006	-0,006	-0,005	-0,004	-0,004	-0,004	-0,002	0,003
162	253,330	573,220	0,000	-0,004	-0,008	-0,009	-0,013	-0,012	-0,013	-0,017	-0,018	-0,024	-0,026	-0,030	-0,035	-0,040	-0,043	-0,044
164	253,910	574,450	0,000	-0,004	-0,004	-0,005	-0,007	-0,009	-0,011	-0,012	-0,013	-0,015	-0,019	-0,022	-0,024	-0,026	-0,028	-0,028
169	251,160	573,860	0,000	-0,002	-0,004	-0,004	-0,007	-0,007	-0,007	-0,008	-0,010	-0,014	-0,015	-0,018	-0,022	-0,026	-0,028	-0,030
170	251,130	574,270	0,000	-0,002	-0,004	-0,004	-0,003	-0,006	-0,006	-0,007	-0,008	-0,012	-0,012	-0,014	-0,016	-0,021	-0,021	-0,023
178	249,670	573,530	0,000	-0,002	-0,005	-0,005	-0,007	-0,008	-0,008	-0,007	-0,008	-0,009	-0,009	-0,011	-0,012	-0,013	-0,013	-0,011
183	254,120	573,160	0,000	-0,003	-0,005	-0,005	-0,008	-0,008	-0,010	-0,010	-0,011	-0,013	-0,013	-0,016	-0,018	-0,019	-0,018	-0,018
311	249,320	574,520	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	-0,005	-0,005	-0,006	-0,007	-0,008	-0,009	-0,010	-0,011	-0,011	-0,011
382	254,870	572,860	0,000	-0,004	-0,004	-0,007	-0,007	-0,008	-0,009	-0,011	-0,012	-0,014	-0,014	-0,014	-0,016	-0,018	-0,018	-0,014
12E157	249,320	574,220	0,000	-0,001	-0,003	-0,002	-0,003	-0,004	-0,004	-0,004	-0,005	-0,006	-0,007	-0,008	-0,008	-0,009	-0,008	-0,006
12F080	253,950	574,030	0,000	-0,004	-0,004	-0,006	-0,008	-0,009	-0,010	-0,011	-0,012	-0,014	-0,016	-0,018	-0,019	-0,020	-0,022	-0,021
12F103	255,710	572,850	0,000	-0,003	-0,004	-0,004	-0,005	-0,006	-0,007	-0,008	-0,009	-0,010	-0,011	-0,012	-0,012	-0,013	-0,012	-0,008
12F129	254,690	572,300	0,000	-0,004	-0,004	-0,006	-0,006	-0,007	-0,008	-0,009	-0,010	-0,011	-0,011	-0,011	-0,013	-0,014	-0,014	-0,010
12F130	251,120	574,420	0,000	-0,002	-0,003	-0,002	-0,006	-0,007	-0,007	-0,007	-0,009	-0,011	-0,013	-0,014	-0,017	-0,020	-0,022	-0,023
12F131	252,820	573,250	0,000	-0,007	-0,010	-0,012	-0,016	-0,016	-0,018	-0,022	-0,023	-0,030	-0,034	-0,039	-0,045	-0,052	-0,058	-0,061
12F133	253,710	573,210	0,000	-0,005	-0,007	-0,009	-0,012	-0,012	-0,013	-0,015	-0,016	-0,021	-0,022	-0,025	-0,029	-0,032	-0,034	-0,035
12F186	254,280	573,080	0,000	-0,004	-0,005	-0,007	-0,008	-0,008	-0,009	-0,010	-0,010	-0,013	-0,013	-0,015	-0,016	-0,017	-0,017	-0,015
12F191	251,210	573,350	0,000	-0,004	-0,007	-0,007	-0,011	-0,012	-0,013	-0,015	-0,019	-0,024	-0,028	-0,033	-0,039	-0,048	-0,053	-0,056
7G191	249,200	575,670	0,000	-0,002	-0,002	-0,005	-0,005	-0,004	-0,005	-0,008	-0,008	-0,009	-0,009	-0,012	-0,013	-0,013	-0,013	-0,013
7G221	249,298	575,135	0,000	-0,001	-0,002	-0,002	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,008	-0,008	-0,007	-0,007
7H223	250,367	575,144	0,000	-0,002	-0,003	-0,003	-0,004	-0,005	-0,006	-0,006	-0,007	-0,008	-0,009	-0,010	-0,011	-0,011	-0,011	-0,012
132	253,943	566,988	0,000	-0,002	-0,001	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,009
133	254,120	567,490	0,000	-0,002	-0,002	-0,005	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,005	-0,014	-0,007	-0,007	-0,007	-0,009	-0,009	-0,009
142	251,610	569,390	0,000	-0,001	-0,002	-0,004	-0,008	-0,019	-0,022	-0,036	-0,042	-0,064	-0,065	-0,089	-0,086	-0,115	-0,129	-0,147
12E020	249,380	567,830	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,006	-0,001	-0,009	-0,002	-0,013	-0,004	-0,004	-0,004	-0,019	-0,021	-0,023
12E026	248,580	569,610	0,000	0,000	-0,001	-0,001	-0,004	-0,006	-0,006	-0,009	-0,001	-0,014	-0,015	-0,017	-0,018	-0,020	-0,022	-0,023
12E160	249,440	566,980	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,010	-0,004	-0,014	-0,005	-0,018	-0,019	-0,020	-0,023	-0,024
12E172	248,720	569,280	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,004	-0,005	-0,008	-0,010	-0,014	-0,014	-0,015	-0,016	-0,018	-0,019	-0,020	-0,021
12E173	249,240	569,220	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,006	-0,006	-0,008	-0,011	-0,012	-0,012	-0,014	-0,015	-0,017	-0,018	-0,018
12F016	253,759	566,626	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,004	-0,001	-0,005	-0,004	-0,007	-0,007	-0,008	-0,001	-0,008	-0,009	-0,008
12F028	251,920	568,140	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,009	-0,007	-0,015	-0,014	-0,024	-0,022	-0,035	-0,028	-0,044	-0,053	-0,053
12F030	254,525	568,705	0,000	-0,001	-0,002	-0,004	-0,003	-0,007	-0,006	-0,011	-0,006	-0,017	-0,011	-0,024	-0,013	-0,028	-0,030	-0,033
12F127	252,900	567,990	0,000	-0,001	-0,002	-0,003	-0,003	-0,008	-0,008	-0,011	-0,009	-0,020	-0,012	-0,024	-0,015	-0,030	-0,033	-0,036
12F137	251,790	566,950	0,000	-0,001	-0,002	-0,003	-0,005	-0,014	-0,014	-0,024	-0,028	-0,044	-0,043	-0,062	-0,056	-0,079	-0,089	-0,101
12F139	253,680	567,680	0,000	-0,002	-0,001	-0,003	-0,001	-0,005	-0,001	-0,008	-0,010	-0,010	-0,011	-0,011	-0,014	-0,014	-0,015	-0,016
12F167	253,950	569,060	0,000	-0,001	-0,002	-0,004	-0,002	-0,007	-0,006	-0,014	-0,009	-0,021	-0,015	-0,028	-0,019	-0,035	-0,039	-0,044
12F168	253,540	568,660	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,007	-0,004	-0,011	-0,009	-0,021	-0,014	-0,028	-0,018	-0,034	-0,038	-0,043
12F171	252,940	568,900	0,000	-0,002	-0,002	-0,005	-0,005	-0,012	-0,011	-0,020	-0,018	-0,034	-0,					

APPENDIX D OPTIMALISATIERESULTATEN

Tabel 7-5 Samenvatting van de resultaten van de gedetailleerde history match, met weergave van de drie parameters voor het rigide fundament die werden onderworpen aan de optimalisatieprocedure en de daaruit volgende modelleringsfout. De runs worden gekleurd weergegeven om de twee geïdentificeerde minima aan te duiden.

optimalisatierun	Diepteparameters rigide fundament			RMSE (cm)	plaatselijk/globaal minimum
	c/k(0)	d(c/k)	τ_{zout}		
0	0,704	0,675	48,3	0,7154	globaal
1	0,001	0,003	30,4	0,9723	plaatselijk
2	0,701	1	78,2	0,7168	globaal
3	0,706	0,566	38,8	0,7146	globaal
4	0,001	0,006	59,4	0,9723	plaatselijk
5	0,706	0,565	38,7	0,7146	globaal
6	0,001	0,007	69,1	0,9723	plaatselijk
7	0,705	0,578	39,9	0,7147	globaal
8	0,705	0,632	44,6	0,7151	globaal
9	0,001	0,001	56,3	0,9723	plaatselijk
10	0,001	0,003	26	0,9723	plaatselijk
11	0,703	0,852	63,6	0,7163	globaal
12	0,703	0,826	61,3	0,7162	globaal
13	0,705	0,634	44,7	0,7151	globaal
14	0,703	0,83	61,7	0,7162	globaal
15	0,704	0,72	52,2	0,7157	globaal
16	0,001	0,006	58,8	0,9723	plaatselijk
17	0,001	0,003	22,8	0,9723	plaatselijk
18	0,706	0,569	39,1	0,7146	globaal
19	0,705	0,636	44,8	0,7152	globaal
20	0,001	0,008	84,1	0,9723	plaatselijk
21	0,706	0,568	39	0,7146	globaal
22	0,707	0,502	33,3	0,7140	globaal
23	0,001	0,007	77,6	0,9723	plaatselijk
24	0,702	0,972	74	0,7167	globaal

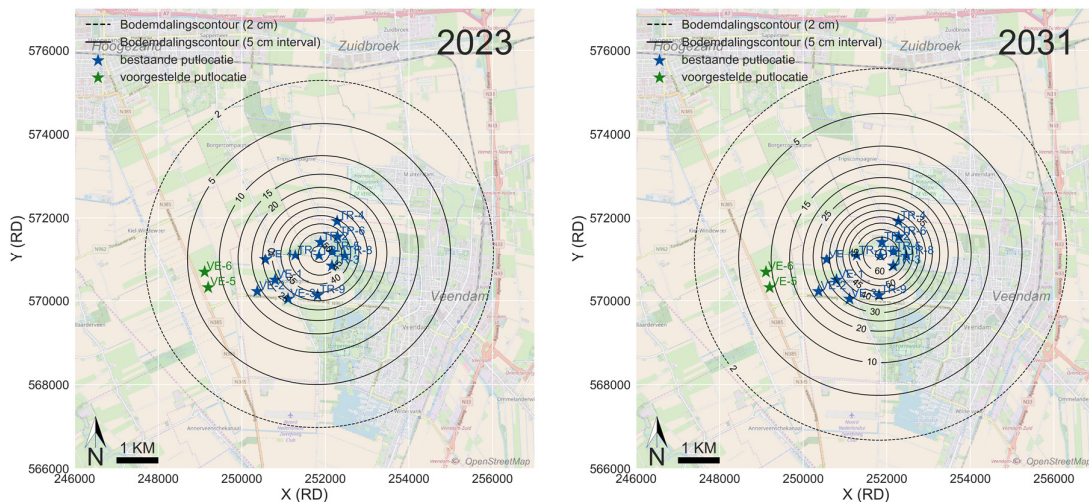
APPENDIX E VOORBEELD VAN DE AFZONDERLIJKE TOEWIJZINGFRACTIES PER PUT

Tabel 7-6 Een typisch voorbeeld van toewijzingsfracties van het squeezevolume na optimalisatie. De getallen zijn de fracties van het totale cumulatieve volume dat tot die datum was geproduceerd.

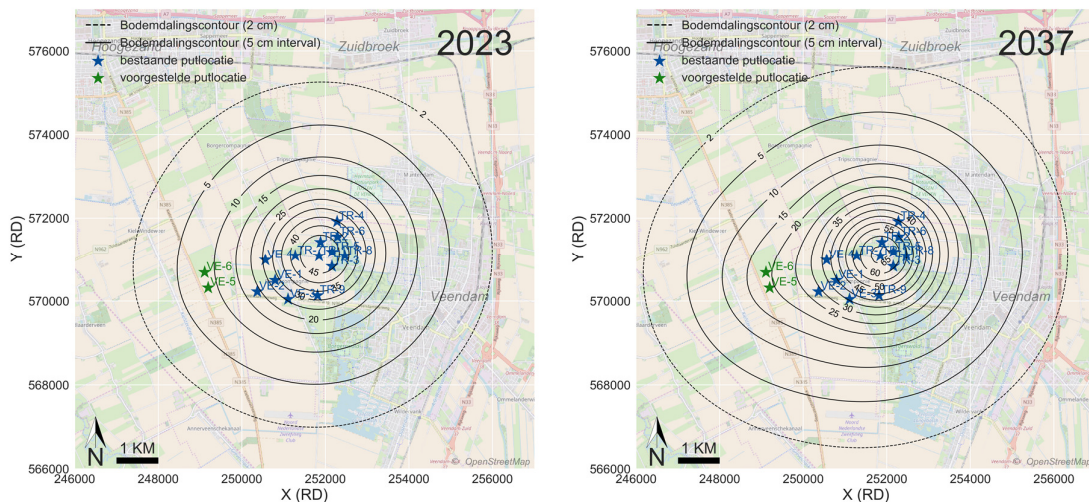
Datum	Toewijzing putfractie												
	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5	TR-6	TR-7	TR-8	TR-9	VE-1	VE-2	VE-3	VE-4
feb 95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
jul 95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
jan 96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
jan 97	0	1	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
jan 98	0	0,19	-	-	0,81	-	-	-	-	-	-	-	-
jan 99	0	0	-	0	1	0	-	-	-	-	-	-	-
jan 00	1	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
jan 02	0,94	0	0,06	0	0	0	0,01	0	-	-	-	-	-
jan 04	0,74	0	0,26	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
jan 06	0,58	0,42	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
jan 08	0,84	0,16	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	-
jan 10	0,38	0,62	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
maart 12	0,66	0,34	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
feb 14	1	0	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
apr 16	1	0	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZE TECHNIEKEN UIT DE WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE PUTTEN

APPENDIX F BODEMDALINGSKAARTEN OP BASIS VAN ALTERNATIEVE PARAMETERS VOOR HET RIGIDE FUNDAMENT

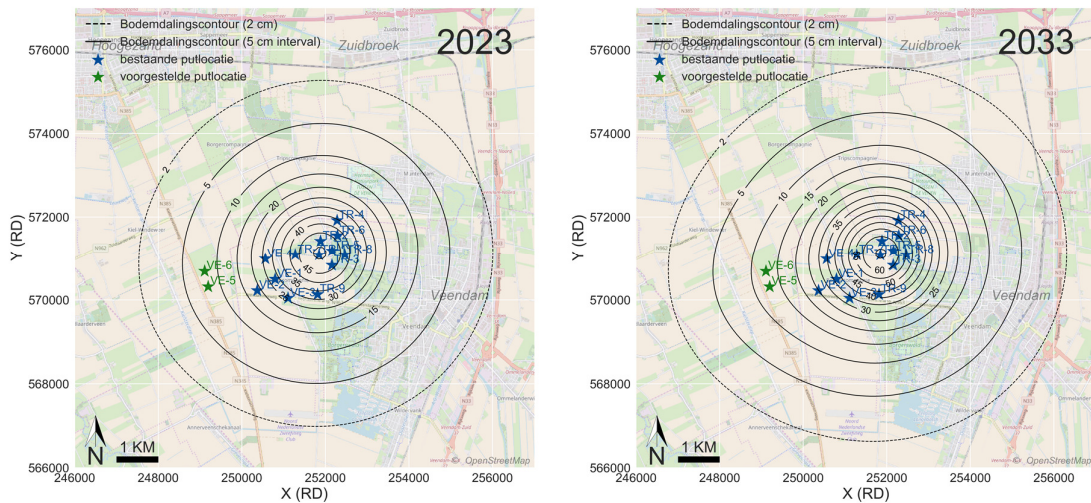


Figuur 7-2 Prognose van de bodemdaling (in cm) voor 2023 (links) en 2031 (rechts), gebaseerd op productiescenario 1, met gebruikmaking van de parameters voor het rigide fundament voor het globale minimum dat resulteerde in de grootste modelleringsfout, zie Appendix D. 2031 is het jaar waarin de bodemdaling op een peilmerk de maximaal toegestane waarde van 65 cm heeft bereikt.



Figuur 7-3 Prognose van de bodemdaling (in cm) voor 2023 (links) en 2037 (rechts) gebaseerd op productiescenario 2, met gebruikmaking van de alternatieve parameters voor het rigide fundament. Als gevolg van het toepassen van de alternatieve parameters op scenario 2 wordt de maximaal toegestane bodemdaling op een peilmerk bereikt in 2037, één jaar later dan de prognose die is beschreven in hoofdstuk 3.

MODELLERING VAN BODEMDALING VEROORZAAKT DOOR ZOUTWINNING VIA SQUEEZE TECHNIKEN UIT DE WINNINGSVERGUNNING VEENDAM: HISTORY MATCH 1993 – 2016 EN PROGNOSE INCLUSIEF TWEE NIEUWE PUTTEN



Figuur 7-4 Prognose van de bodemdaling (in cm) voor 2023 (links) en 2033 (rechts) gebaseerd op productiescenario 3, met gebruikmaking van de alternatieve parameters voor het rigide fundament.