

GESJOEMEL MET BODEMBEWEGING

Ir. Adriaan P.E.M. Houtenbos

Tot juli 2015 lid stuurgroep “Lange termijn bodemdaling”



Nov.
2015

Precisie en betrouwbaarheid uit metingen

Met de kennis van nu zijn bodemdalingsvoorspellingen niet meer dan een slag in de lucht.

Onacceptabele schade door delfstofwinning kan met de hand aan de kraan niet worden voorkomen.

De voorspellingsmethodiek is aan een grondige herziening toe.

SAMENVATTING

Al meer dan 15 jaar zijn delfstofproducenten, Staatstoezicht op de Mijnen (SodM), TNO en de Technische Commissie Bodemdaling (TCBB) zich bewust dat bodemdaling door gaswinning zich anders in ruimte en tijd ontwikkelt dan de theorie aangeeft. Bodemdalingskommen zijn dieper en steiler dan voorspeld. De bodemdaling komt trager op gang, ontwikkelt zich niet proportioneel met de drukdaling en stop niet als de kraan dicht gaat.

Om bodemdaling bij een geplande winning te voorspellen moet achtereenvolgens het drukverloop in het reservoir, de dikteafname van het reservoirgesteente en de maaiveldaling worden bepaald. Hierbij zijn een groot aantal parameters betrokken, die niet ter plekke gemeten kunnen worden. Doordat delfstofproducenten de details van hun prognosemethodiek tot dusverre niet hebben prijsgegeven, kan de betrouwbaarheid van prognoses alleen achteraf worden beoordeeld.

De invoerparameters voor voorspellingen blijken zo onzeker dat de bodemdaling ook een factor zes hoger of lager uit kan vallen. Deze marge is te groot om vooraf te kunnen bepalen of een voorgenomen winning maatschappelijk verantwoord uitgevoerd kan worden en de juiste schaal voor schade beperkende maatregelen te bepalen. Bovendien kan niet worden vastgesteld of onaanvaardbare ontwikkelingen met de hand aan de kraan tijdig kunnen worden gestopt. Delfstofproducenten wentelen zo de risico's van onjuiste voorspellingen af op milieu en omwonenden.

In 2012 stemde de minister van Economische Zaken in met verdubbeling van de gaswinning op het Wad op voorwaarde dat NAM vóór 1 juli 2015 een onderzoek naar de fysieke oorzaken van de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten daling zou voltooien. Ook dit onderzoek, geleid door de Waddenacademie, heeft geen inzicht gegeven in de manier waarop voorspellingen precies tot stand komen en twijfelachtige aannames daarin zijn niet geverifieerd. Het onderzoek is inmiddels zonder perspectief op betrouwbaarder bodemdalingsvoorspellingen opgeleverd.

Recente rapporten over de bodemdaling bij Franeker en de bevingen in Groningen lichtten een tipje van de sluier over de voorspellingsmethodiek op. Zij documenteren selectief gebruik van meetgegevens, onzuivere afleiding van de daling door gaswinning uit bodemdalingmetingen, dubieuze modelaannames, het gebruik van sjoemelfactoren om modellen beter in overeenstemming met metingen te doen lijken, gelegenheidsargumenten om vooronderstelde stellingen te bevestigen, maar geen toetsing op mogelijke andere verklaringen voor het waargenomen gedrag. De Groningen rapporten illustreren het effect van onzekerheden in de meest bepalende parameters. Verschillende modelhypotheses resulteren in 40 miljoen kubieke meter meer of minder bodemdaling in het Wadden kustgebied. In het Franeker rapport is de bodemdaling door gaswinning bepaald door ijking van het theoretische model aan de bodemdalingmetingen. De eerder direct uit metingen bepaalde bodemdaling door gaswinning is 40% hoger en beduidend meer betrouwbaar.

De conclusies zijn, dat met de kennis van nu bodemdalingsvoorspellingen niet meer dan een slag in de lucht zijn, dat winning met de hand aan de kraan onacceptabele

schade niet kan voorkomen en dat de voorspellingsmethodiek aan een grondige herziening toe is.

INHOUD

SAMENVATTING	1
INLEIDING	4
ONDERZOEK LANGE TERMIJN BODEMDALING (LTB).....	5
GEOMECHANISCHE MODELLERING IN DE PRAKTIJK	7
Waddenzee	7
Groningen	7
Franeker	9
DISCUSSIE	12
Voorgeschiedenis.....	12
Bodemdaling uit geomechanische modellering	16
Bodemdaling uit hoogteverschilmetingen	17
Ijking van gemodelleerde tegen gemeten bodemdaling	19
Compactie en bodemdaling	20
Aardbevingen	21
Schadepreventie met de Hand aan de Kraan	22
CONCLUSIES	23
AANBEVELINGEN.....	24
REFERENTIES	25

Gesjoemel met bodembeweging

INLEIDING

De mijnbouwwet gaat uit van de voorspelbaarheid van bodembeweging (bodemdaling en aardbevingen), en de eenduidigheid van bodemdalingsmetingen. Beide uitgangspunten blijken een illusie. Zonder deze voorspelbaarheid is, voor aanvang van de gaswinning, niet toetsbaar of deze binnen maatschappelijk aanvaardbare grenzen mogelijk is. Bovendien is gedurende de winning niet toetsbaar of de traag reagerende bodembeweging met de hand aan de kraan voldoende beheersbaar is. Dit is van belang om ook bij tegenvallende externe factoren, zoals versnelde zeespiegelstijging en vertraagde sedimentaanvoer, schade aan het milieu, woningen en dijken te voorkomen.

Zonder eenduidigheid van bodemdalingsmetingen zal de hand aan de kraan, die van gasproducenten en schatkist, niet die van de leefomgeving van omwonenden zijn. Ook blijft het dan mogelijk voor de industrie te ontkennen dat de ontstaande schade veroorzaakt is door gaswinning. .

Controles van Staatstoezicht op de mijnen (SodM), TNO en de Technische Commissie Bodembeweging (TCBB) ten spijt blijken voorspellingen van bodembeweging door gaswinning stelselmatig onvoldoende betrouwbaar te zijn.

De ontwikkelingen rond de Waddenzee zijn kenmerkend voor de problemen met bodemdalingsvoorspellingen in heel Nederland. In 2006 werden de milieueffecten van winning ingeschat op basis van de toen voorspelde bodemdaling (NAM, 2006) met een onzekerheidsmarge van 30%. Vijf jaar later bleken de belangrijkste bodemdalingbepalende parameters voor het gasveld Nes, in de oorspronkelijke voorspelling fors onderschat. De winbare gasreserves bleken veel groter te zijn en werden 242% naar boven bijgesteld en de dikteafname per eenheid druk, de zogenaamde compactiecoëfficiënt, met 85% . De bijstellingen van deze twee parameters alleen al impliceren, dat de voorspelling, die aan de milieueffect rapportage en het oorspronkelijke winningsplan ten grondslag lag, een **factor 6.3 te klein** was. Het is onbegrijpelijk dat fouten van zo'n grote magnitude aan de aandacht van de controlerende instanties, SodM, TNO en TCBB hebben kunnen ontsnappen. Deze fouten betekenen dat NAM instemming met het oorspronkelijke winningsplan veilig stelde met een veel te optimistische bodemdalingsprognose. Voor externe belanghebbenden was de maat vol. Het vertrouwen in bodemdalingsvoorspellingen voor aanvang van de winning en het vermogen om met de hand aan de kraan milieuschade te voorkomen was ernstige schade toegebracht. Dit was de aanleiding voor de minister van Economische Zaken om een onderzoek te doen naar de fysische wetmatigheden van de diepen ondergrond die tot betere voorspellingen op de lange termijn zou moeten leiden.

ONDERZOEK LANGE TERMIJN BODEMDALING (LTB)

In 2013 kreeg de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM) toestemming in totaal tweemaal zoveel aardgas te winnen uit de velden Ameland, Anjum, Nes, Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Inspelend op de maatschappelijke onrust over de waargenomen verschillen tussen voorspelde en gerealiseerde bodembeweging verbond de minister van Economische Zaken daar de voorwaarde aan dat NAM voor 1 juli 2015 ten genoegen van de Inspecteur Generaal der Mijnen (IGM) een nadere studie zou uitvoeren naar de fysische achtergronden van de waargenomen tijdsafhankelijke effecten in het bodemdalinggedrag en de mogelijk gevolgen daarvan voor de bodemdaling op lange termijn. Een internationale stuurgroep (SC) onder regie en voorzitterschap van de Waddenacademie zou een extra waarborg voor de kwaliteit en onafhankelijkheid van het onderzoek moeten vormen.

De regie van de Waddenacademie is alles behalve een waarborg voor kwaliteit en onafhankelijkheid gebleken. Het heeft de aansturing van het onderzoek feitelijk uit handen van de stuurgroep genomen en in die van NAM gelegd. Belangenverstrengeling tussen uitvoerders en beoordelaars van onderzoek en notulering van niet genomen besluiten zijn niet eigener beweging door de Waddenacademie opgemerkt en gecorrigeerd (Houtenbos A. , 2015). Het eindrapport van de Waddenacademie, dat eind juni 2015 naast de rapportage van NAM aan de IGM werd aangeboden, is geen objectieve samenvatting van de onderzoeksresultaten ten behoeve van het algemeen belang, maar een die het belang van de Waddenacademie dient. Het is bovendien niet goedgekeurd door de leden van de stuurgroep.

Zoals hiervoor beschreven veronderstelt de gangbare theorie een vaste verhouding tussen bodemdaling en drukdaling is het reservoir. In de praktijk blijkt deze verhouding op te lopen van nul bij aanvang van de winning tot oneindige na afloop van de winning. De bodemdaling komt traag op gang en stopt niet bij staking van de gaswinning. Deze klaarblijkelijk onjuiste theoretisch aanname ondermijnt beoordeling vooraf of maatschappelijk verantwoorde winning mogelijk is en de maatvoering van schadebeperkende maatregelen bij toegestane winning. Gedurende de winning leidt de onjuiste aanname tot stelselmatige onderschatting van toekomstige bodemdaling en een tot nul afnemende mogelijkheid om met de hand aan de kraan schade binnen de perken te houden.

Zonder analyse wat er nu precies, wanneer, waar en in welke mate afweek van de verwachting is het LTB onderzoek blijven steken op in het verleden al onsuccesvol bewandelde paden. Het onderzoek leverde niet de gewenste verbetering van de betrouwbaarheid van voorspellingen op en heeft ook de effecten van bodemdaling niet beter beheersbaar gemaakt.

Tot de positieve resultaten van het onderzoek behoren:

- Erkenning dat alleen het verschil in bodemdaling tussen twee meetpunten meetbaar is. Absolute bodemdaling is dat niet.
- Erkenning van de noodzaak bij vergelijkingen tussen gemodelleerde en gemeten bodemdaling de volledige covariantiematrix van alle ruiselementen te verdisconteren.
- De bevinding dat reservoircompactie - anders dan algemeen aangenomen - voor zo'n 50% niet elastisch is.
- Ontdekking van een fout in de wiskundige grondslag (Geertsma, 1973) van bodemdalingsvoorspellingen.

Deze punten hebben (nog) geen uitwerking gekregen in geadviseerde voorspellingsprocedures.

De meest cruciale onderzoeksvragen zijn niet aan bod gekomen in de LTB studie:

- Wat is de precisie van de gemeten geomechanische parameters en daaruit afgeleide voorspellingen vóór aanvang van de winning, dus voordat het voorspellingsmodel tegen bodemdalingsmetingen geijkt kan worden?
- Hoe lang duurt het voordat een ingreep met de hand aan de kraan de dalingssnelheid halveert?
- Wat is de betrouwbaarheid van de voorspellingen? Zijn mogelijke alternatieve relaties tussen productie, druk, compactie en daling overtuigend in strijd met de metingen?
- Wat is het verschil in precisie en betrouwbaarheid, waarmee bodemdaling te gevolge van een individuele winning kan worden vastgesteld via de huidige standaard afleiding uit het verloop van peilmerkhoogtes en integrale 3D ontrafeling van hoogteverschilmetingen?
- Kan de waargenomen toename in de hoeveelheid bodemdaling per m³ geproduceerd gas afdoend worden verklaard door overkoepeling (*stress arching*) van de aanvankelijk sterk rond productieputten geconcentreerde, maar geleidelijk meer uniform over het reservoir verdeelde, drukdepletie?

Omdat de LTB studie de antwoorden schuldig bleef, moet de studie als mislukt en de ermee gemoeide 3 jaar als verloren tijd worden beschouwd. Feitelijk is daarmee niet voldaan aan de voorwaarden voor instemming met de in 2011 herziene winningsplannen voor de Ameland, Anjum, Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen velden en zou de daarmee gepaard gaande verdubbeling van de productie moeten worden teruggedraaid.

Samenvattend heeft de LTB studie wel enkele fysische oorzaken geïdentificeerd, die mogelijkerwijs een deel van het verschil tussen gemodelleerd en gemeten bodemdalingsgedrag kunnen verklaren, maar niet de oorzaak, die het hele verschil verklaard. Niet alle mogelijke oorzaken zijn onderzocht, De studie heeft bevestigd dat het hier niet gaat om een artefact van bodemdalingsmetingen.

GEOMECHANISCHE MODELLERING IN DE PRAKTIJK

Waddenzee

De ontwikkelingen rond de Waddenzee zijn kenmerkend gebleken voor de problemen met bodemdalingvoorspellingen in Noord Nederland.

Bij de herziening van het winningsplan voor het Nesveld in 2010 (NAM, 2011c) bleek de winbare reserve 242% groter, het depleterende reservoirvolume 56% kleiner en de compactiecoëfficiënt 85% groter dan in het oorspronkelijke winningsplan van 2005 (NAM, 2005c). Deze bijstellingen impliceren dat de voorspelling, die aan de milieueffect rapportage en het oorspronkelijke winningsplan ten grondslag lag, een factor 6.3 te klein was. Om inzicht te kunnen krijgen in het proces dat dergelijke grote fouten mogelijk maakte is door de LTB stuurgroep nadrukkelijk gevraagd om verklarende documentatie voor de prognosemethodiek. Hieraan is geen gehoor gegeven.

Samenvattend zijn in het Waddenzeedossier de onzekerheden veel te rooskleurig voorgesteld en zijn essentiële details, nodig voor onafhankelijke beoordeling van de prognosemethodiek binnenskamers gehouden.

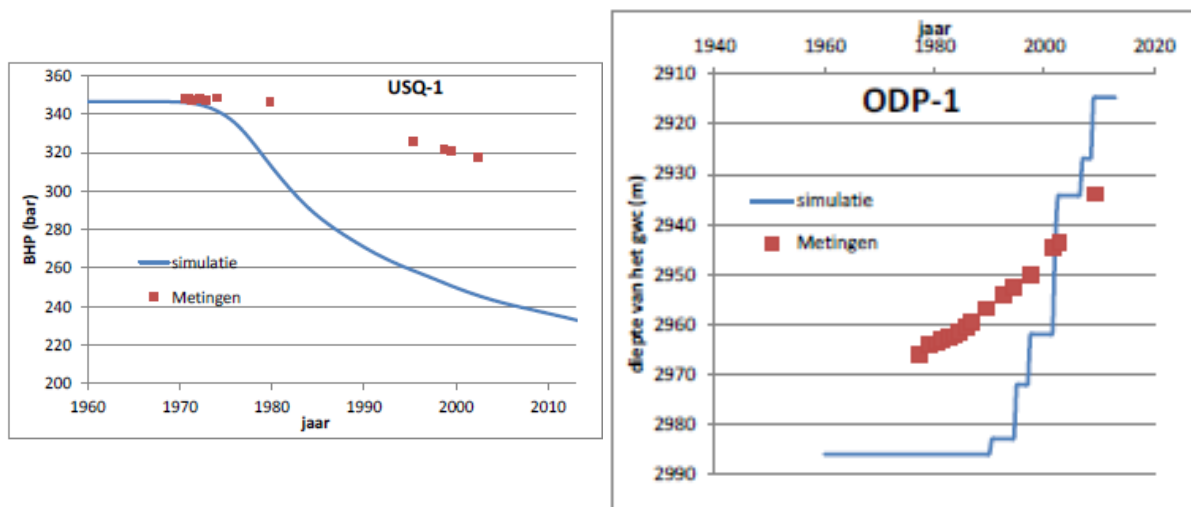
Groningen

Ook na 40 jaar serieuze gaswinning met de “Hand aan de Kraan” in Groningen is de kennis van de ondergrond onvoldoende gebleken om schadelijke effecten binnen maatschappelijk aanvaardbare grenzen te houden. De rapporten van TNO (TNO, 2013) en (TNO, 2015) lichten een tipje van de sluier over het prognose algoritme op. In de publieke versie van (TNO, 2013) is de naam van het gebruikte statisch model, ‘GFR2012’, weggelakt. Dit laat zich slechts op een manier duiden: NAM heeft iets te verbergen.

In opeenvolgende 5 jaarlijkse statusrapporten voor Groningen werden sterk wisselende, dan weer wel dan weer niet depleterende aquifermodellen met stelligheid (onzekerheidsmarge 10-25%) geponeerd. Ook in de 2012 prognose blijkt aquiferdepletie grote onzekerheid met zich mee te brengen. Ondanks discrepanties tussen gemeten en gemodelleerde waarden van 50 bar in druk (Figuur 1 links) en 30 meter in stijging van het gas/water contact (Figuur 1 rechts) zijn de uiteindelijk gemodelleerde compactie en bodemdaling niet verworpen. TNO rapporteerde:

“Voor het verkrijgen van een goede fit van de gemodelleerde druk aan de data, waren grote aanpassingen in het statisch model nodig bij de slecht doorlatende lagen (zogenaamde *heterolithics*) en met name de Ameland kleisteen. Voor deze laag werd over het gehele veld een **vermenigvuldigingsfactor van $1.5 \cdot 10^{-8}$** voor de verticale permeabiliteit gebruikt. Van de 9 analytische aquifers zijn de initiële schattingen van de eigenschappen aangepast in de *history match* op basis van de productie data. De NAM heeft vervolgens de aquifers in het noorden (Usquert, Bethlehem en Zeerijp) veel sterker gemaakt om de bodemdaling in het noordwesten te fitten. De gebruikte waarden voor de karakteristieke afmeting (van > 1000km) zijn echter **geologisch onmogelijk**. Ook zorgen de sterke aquifers voor een

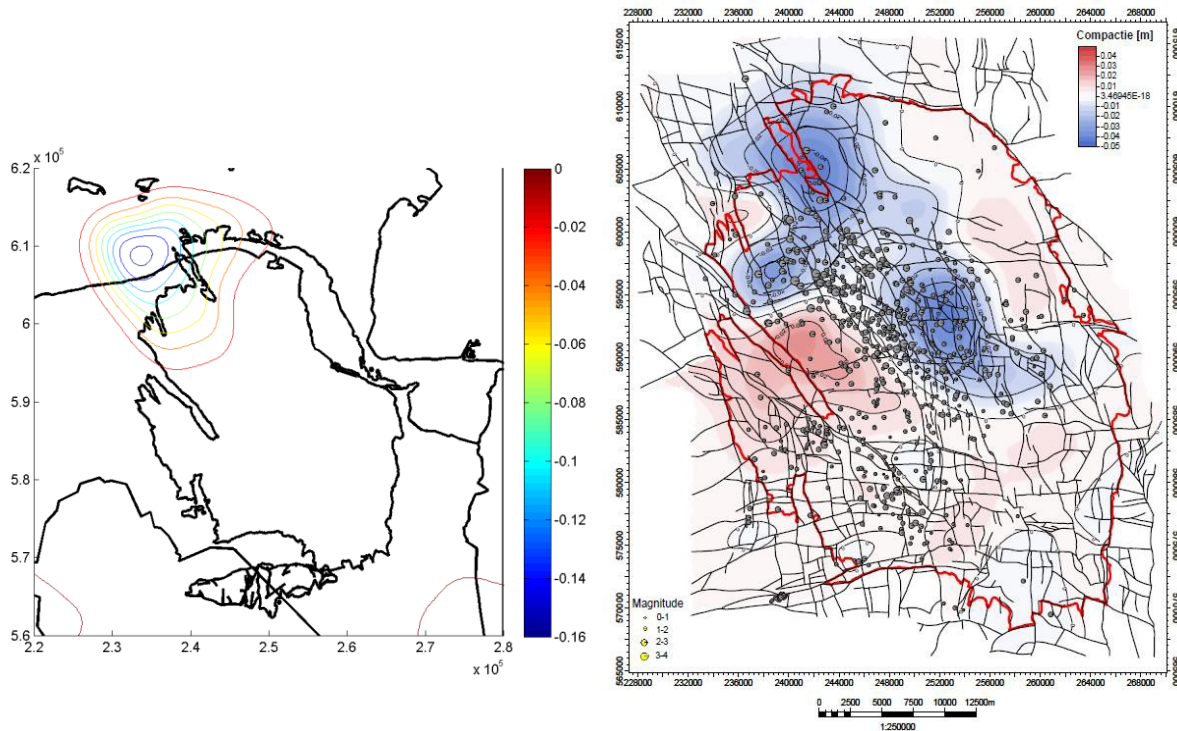
onrealistische stijging van het gas/water contact in de hele noordwest hoek van het model (zie o.a. ODP-1)”.
 Al bijna 2 decennia zijn er aan de noordrand van het Groningenveld systematische verschillen tussen gemodelleerde en gemeten bodemdaling geconstateerd. Een mogelijk verklaring daarvoor is een te vlakke elementaire bodemdaling per kubieke meter compactie. Het gesteente boven het reservoir gedraagt zich in werkelijkheid niet homogeen elastisch, zoals de gangbare theorie veronderstelt, maar goeddeels plastisch. Dit maakt een steilere elementaire bodemdaling tot een plausibele hypothese. Zolang niet is geverifieerd dat alle plausibele alternatieven slechter bij de metingen passen dan het gekozen model, kan dit model niet als betrouwbaar worden aangemerkt.



FIGUUR 1: LINKS HISTORY MATCH VAN DE DRUK IN OBSERVATIEPUT USQ-01 MET GEMETEN EN GESIMULEERDE DRUKKEN, RECHTS GESIMULEERDE EN GEMETEN VERANDERINGEN IN HET GAS/WATER CONTACT IN ODP-1

Kennelijk laten exact dezelfde geomechanische en geodetische metingen over een periode van 40 jaar modellen toe, die **meer dan 40 miljoen kubieke meter** in bodemdalingvolume verschillen in het Waddenzee kustgebied van Noord Groningen (Figuur 2, links).

Figuur 2 rechts geeft een indicatie van de gebrekkige precisie van geomechanische modellering. Hierin toont TNO de verschillen tussen geomechanisch gemodelleerde en van bodemdalingmetingen afgeleide compactie. Voor een gasveld met de dimensies van Groningen zijn deze nagenoeg gelijk aan de verschillen tussen geomechanisch gemodelleerde en gemeten bodemdaling. Terwijl het dalingsverschil tussen 2 punten aan het oppervlak over 16 km met een standaard deviatie van 4 mm gewaterpast kan worden, belooft het compactie verschil over deze afstand het **20-voudige**: 8 cm.



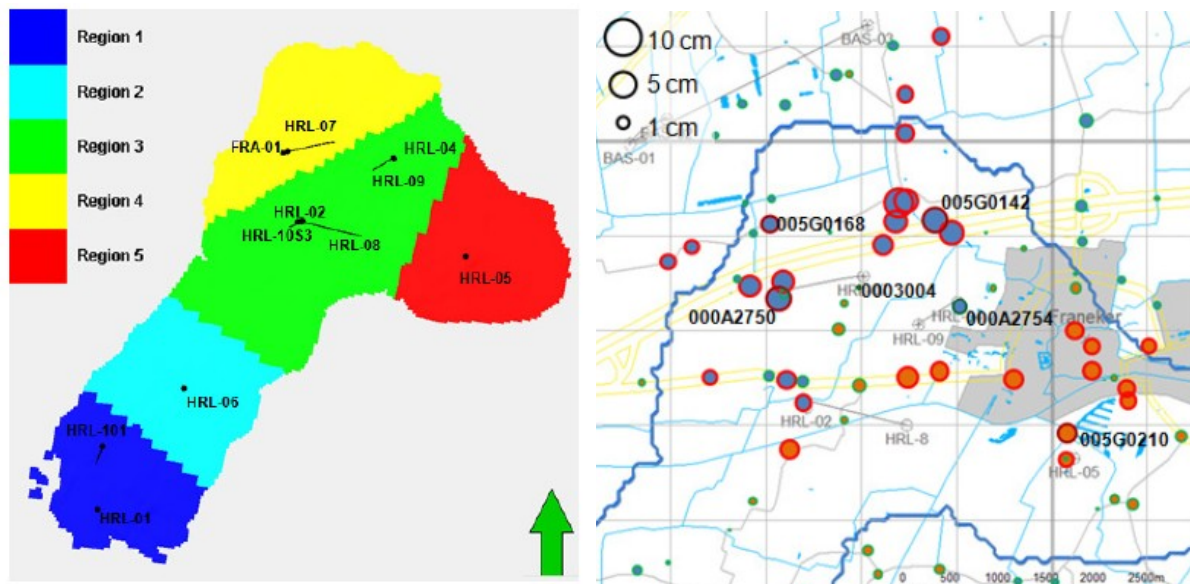
FIGUUR 2: LINKS HET VERSCHIL IN BEREKENDE BODEMDALING EIND 2012 TUSSEN HET STERKE AQUIFER SCENARIO EN HET ZWAKKE AQUIFER SCENARIO IN METERS. ER IS ONGEVEER 16 CM MEER DALING IN HET NOORDWESTEN IN HET ZWAKKE AQUIFER SCENARIO. RECHTS HET VERSCHIL TUSSEN DE COMPACTIE VAN (TNO, 2015) EN DE COMPACTIE UIT INVERSIE (M).

Samenvattend zijn door TNO in het Groningen dossier fundamentele problemen in de modellering van het gedrag van aquifers en in de ijking van modellen tegen metingen gesignaleerd. Prognoseverschillen van 40 miljoen m^2 bodemdaling zijn kennelijk mogelijk.

Franeker

Waar de TNO rapportage zich vooral richt op een kwalitatieve beschrijving van de geomechanische modellering van Groningen, gaat het door Vermilion, TNO en SodM begeleide rapport van SGS Horizon (SGS) over de modellering van bodemdaling door gaswinning uit het Harlingen veld bij Franeker (SGS, 2014) verder. Het geeft kwantitatieve details, waarmee het selectieve gebruik van gemeten parameter waarden en de toepassing van sjoemelfactoren, zonder fysieke onderbouwing om de modellering passend te krijgen op de metingen, inzichtelijk wordt.

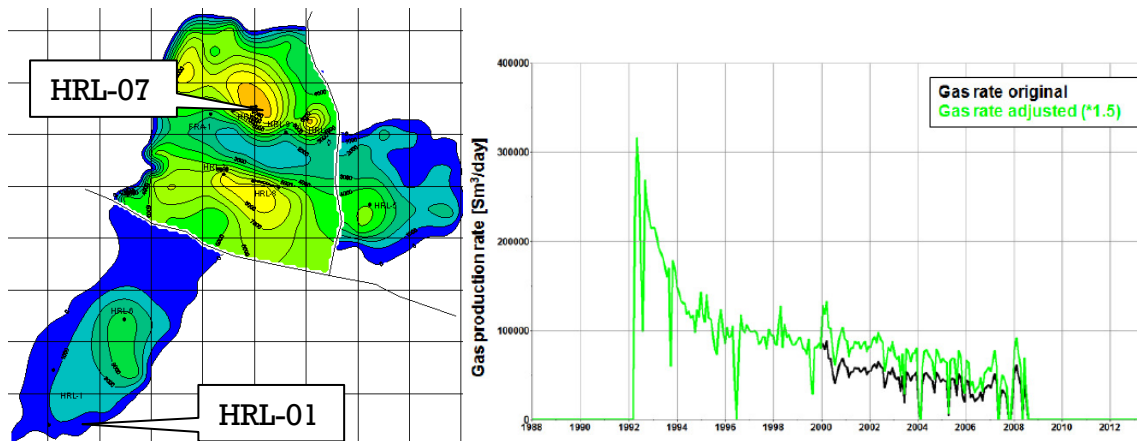
Het reservoir is langs niet bij de geologie (Figuur 3, links) aansluitende grenzen opgedeeld in 5 regionen, die elk apart tegen metingen zijn geijkt. Hierdoor moeten langs de grenzen abrupte sprongen in geomechanische eigenschappen en de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten bodemdaling (Figuur 3, rechts) zijn ontstaan.



FIGUUR 3: LINKS, DE NIET BIJ DE GEOLOGIE AANSLUITENDE OPDELING IN AFZONDERLIJK GEMODELLEERDE GEBIEDEN IN HET DYNAMISCH MODEL VAN 2014. RECHTS, HET VERSCHIL TUSSEN GEMODELLEERDE EN GEMETEN BODEMDALING IN 2008. BLAUW IS MEER GEMODELLEERD DAN GEMETEN, ORANJE IS MINDER. ABRUPTE SPRONGEN IN DE VERSCHILLEN TUSSEN GEMODELLEERDE EN GEMETEN BODEMDALING RECHTS, KOMEN OVEREEN MET GEKOZEN REGIO GRENZEN LINKS.

De mijnbouwsector wijt verschillen tussen gemeten en gemodelleerde daling standaard aan onstabiele meetpunten en niet nader gespecificeerde autonome bodemdaling niet aan onjuiste aannames in de geomechanische modellering. Vermilion deed dat in 2007 (Vermilion, 2007) ook nadrukkelijk. Vermilion en SodM zochten en vonden gelegenheidsargumenten voor uitsluiting van bodemdalingsmetingen. Het SGS rapport uit 2014 bevestigt de onjuistheid van de gronden waarop destijds tot uitsluiting van meetpunten werd besloten. Een conclusie die (Houtenbos A. , 2008) (Houtenbos A. , 2008) in 2008 al uit een integrale 3D analyse trok (Houtenbos A. , 2008). Het (Vermilion, 2007) rapport voorspelt ook dat de bodemdaling in 2016 12 tot 13 cm zou bedragen met een cumulatieve onzekerheidsmarge van +/- 20%. Het rapport van Houtenbos (Houtenbos A. , 2009)) destijds en het rapport van SGS nu zijn het eens dat de bodemdaling in 2008 al 26 cm bedroeg.

Kennelijke omdat de gemeten waarden niet pasten bij het gekozen geomechanische model is in deze analyse de in HRL-01 gemeten porositeit buiten beschouwing gelaten. Om het geheel vervolgens toch passend te maken is vervolgens de sinds 1 januari 2008 gerapporteerde productie uit HRL-07 met precies 50% verhoogd. Vooral deze laatste ingreep is opmerkelijk, omdat het de betrouwbaarheid van de meest basale meetgegevens, de productiecijfers, onderuit haalt. Argumenten voor afwijkende productiecijfers werden gezocht en gevonden (SGS, 2014, p. 67). Alhoewel slechts 1 bladzijde lang en cruciaal voor het vertrouwen in productiecijfers in het algemeen, werd het onderzoek waarop deze argumenten gebaseerd zijn niet in het SGS rapport opgenomen. Er is volstaan met een referentie aan een niet openbaar stuk: "Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V, 2014. Harlingen-7 Modified Offtake Rate".



FIGUUR 4: LINKS DE DRUK DEPLETIE IN 2006 UIT (VERMILION, 2007B) MET HRL-01 GEÏSOLEERD IN HET UITERSTE ZUIDEN. RECHTS, DE GASPRODUCTIE VOOR (ZWART) EN NA (GROEN) MET DE DUBIEUZE AANPASSING VAN PRECIES 50% PER 1-1-2000.

Geomechanische inzichten blijken in korte tijd fundamenteel te kunnen veranderen.

(SodM, 2003) verwachtte in 2003 nog dat de bodemdaling door gaswinning uit het Harlingenveld tot maximaal 6 cm beperkt zou blijven. In 2014 berekende Vermilion (SGS, 2014) 39 cm in 2050 (32 cm tot 2014 plus 7 cm over 2014-2050) als de winning niet in 2008 gestaakt zou zijn, **6.5 maal zoveel** dus.

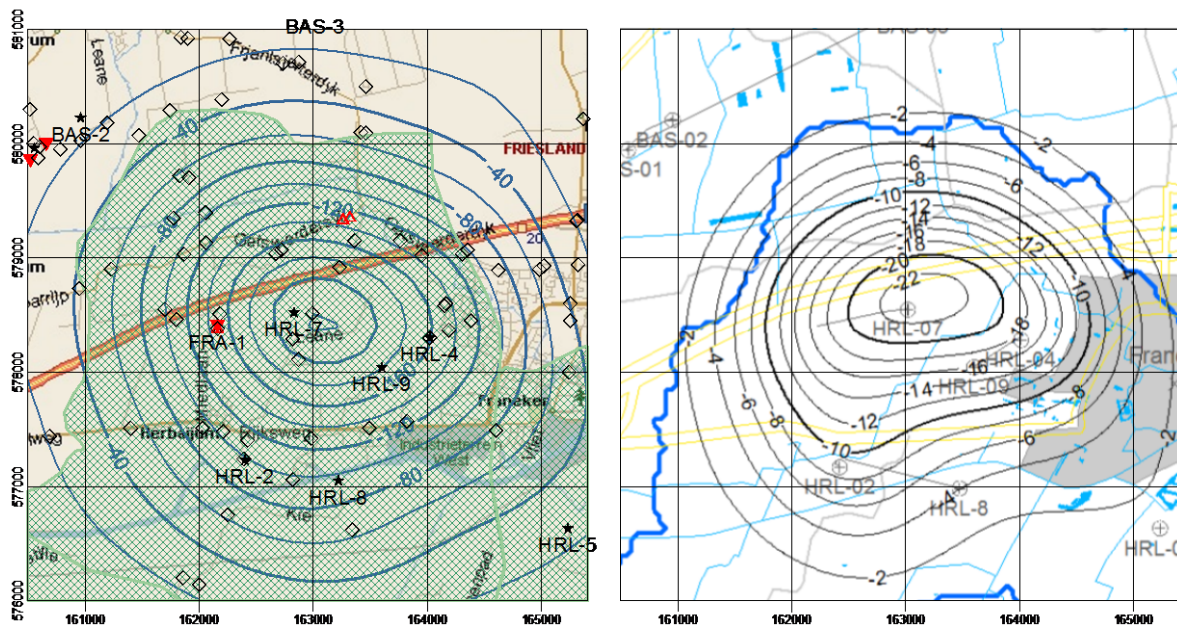
In 2007, na 19 jaar productie-ervaring schatte Vermilion de bij aanvang beschikbare hoeveelheid gas op 3704 miljoen Nm³ (3907 miljoen Sm³). 7 jaar later werd dit met 27% verhoogd tot 5000 miljoen Sm³. 27% meer gas betekent ruwweg ook 27% meer bodemdaling. Dit werd op een dermate laat tijdstip in de productieperiode geconstateerd, dat van effectbeheersing met de hand aan de kraan geen sprake meer kon zijn.

SGS en Norwegian Geotechnical Institute (NGI) in (SGS, 2014) beschouwen ineenstorting van het kalkgesteente (met een gemiddelde porositeit van 29%) als de belangrijkste zo niet de enige oorzaak van de hoger dan verwachte compactie en bodemdaling. Dit is opmerkelijk aangezien in 2007 dit zelfde instituut op grond van laboratoriumonderzoek (NGI, 2007) stelde dat ineenstorting van het kalkgesteente (met een porositeit onder 31%) onwaarschijnlijk is..

Alhoewel dit in laboratorium tests onwaarschijnlijk leek is in dit rapport aangenomen dat ineenstorting van het gesteenteskelet de oorzaak van de versnelde daling was. Er is niet gezocht naar mogelijke andere verklaringen voor de verschillen tussen het theoretische en het waargenomen gedrag. Omdat de ontwikkeling van deze verschillen in ruimte en tijd in het Harlingenveld sterk lijkt op die in alle andere gasvelden, zou onderzoek naar een gemeenschappelijke oorzaak voor de hand hebben gelegen. Zonder een dergelijk onderzoek en verificatie dat alle andere plausibele modellen minder goed bij de metingen passen dan het uiteindelijk gekozen model, is de in (SGS, 2014) gegeven verklaring voor het afwijkende gedrag niet betrouwbaar.

Via geomechanisch modellering stelde SGS, begeleid door Vermilion, TNO en SodM, achteraf vast wat de bodemdaling in 2008 was. Deze week fors af van de gemeten

daling door gaswinning tot dat tijdstip. Over het hele gebied werd 36% meer bodemdaling gemeten dan gemodelleerd, beperkt tot de bebouwde kom van Franeker liep de overschrijding op tot **meer dan 40%** (Figuur 5). Deze verschillen tussen gemodelleerde en gemeten daling ten gevolge de gaswinning uit het Harlingenveld zijn niet uitsluitend toe te schrijven aan fouten in de modellering. Ook fouten in de manier waarop SGS de gemeten bodemdaling door gaswinning uit het Harlingenveld afleidt uit oorspronkelijk hoogteverschilmetingen tussen peilmerken speelt een belangrijke rol. Daarbij is geen zuivere scheiding aangebracht tussen effecten van de gaswinning enerzijds en die van naburige zoutwinning, ondiepe klink, peilmerkzetting en meetruis anderzijds.



FIGUUR 5: BODEMDALING DIRECT UIT INTEGRALE 3D ANALYSE VAN BODEMDALINGSMETINGEN (LINKS) EN VIA GEOMECHANISCHE MODELLERING (RECHTS).

Samenvattend is het Franeker dossier illustratief voor de manier waarop selectief gebruik van metingen, gelegenheidsargumenten en sjoemelfactoren worden ingezet ter bevestiging van een enkele oorzakelijke hypothese. Over andere mogelijke oorzakelijke verklaringen voor het waargenomen gedrag is eenvoudigweg niet nagedacht. De bodemdaling door gaswinning in de bebouwde kom van Franeker is 40% te laag vastgesteld.

DISCUSSIE

Voorgeschiedenis

Al bijna twee decennia zijn experts bij NAM en SodM zich bewust dat bodemdaling door gaswinning zich anders in ruimte en tijd ontwikkelt dan de theorie aangeeft. Bodemdalingskommen zijn dieper en steiler dan voorspeld. De bodemdaling komt trager op gang, ontwikkelt zich niet proportioneel met de drukdaling en stopt niet als de kraan dicht gaat.

SodM en NAM bleven al die tijd meer gericht op het voorkomen van reputatieschade en aansprakelijkheid dan op verbetering van de betrouwbaarheid van bodemdalingsvoorspellingen in het algemene belang. Voor zover er onderzoek is geweest naar deze discrepanties, is dit vooroordeel bevestigend geweest. Het feit dat NAM bij twijfel over de oorzaak van schade geen compensatie verschuldigd is, gaf een perverse prikkel om onzekerheden in het relatie tussen gaswinning en bodembeweging (bodemdaling en aardbevingen) juist niet te reduceren. Fundamenteel open onderzoek naar de oorsprong van de systematiek in de discrepanties is consequent tegengewerkt.

In de zoektocht naar de fysische oorzaken van het waargenomen bodemdalingsgedrag horen sjoemelfactoren zonder fysische betekenis niet thuis. Cruciaal voor de bepaling van aard en ernst van de discrepanties tussen theoretisch gemodelleerde en werkelijk gemeten bodemdaling zijn:

1. een geomechanisch correcte modellering van bodemdaling uit de seismisch gemeten opbouw van de ondergrond en in boorgaten gemeten druk, porositeit, permeabiliteit en samendrukbaarheid,
2. een geodetisch correcte afleiding van 'gemeten' bodemdaling door elke oorzaak afzonderlijk uit aan het maaiveld gemeten hoogteverschillen tussen peilmerken en tenslotte
3. een statistisch correcte toetsing van verschillen tussen gemodelleerde en gemeten bodemdaling in ruimte en tijd tegen marges bepaald door de ruis in de geodetische en de geomechanische metingen.

De gangbare geomechanische modellering gaat uit van discutabele aannames in de samenhang tussen, in het boorgat gemeten, productie en druk op een willekeurige plaats in het reservoir, tussen deze druk en compactie en tenslotte tussen compactie en bodemdaling op een willekeurige plaats aan het maaiveld. Tot die fysisch, discutabele aannames behoren:

1. de elasticiteit van reservoirgesteente en van het gesteente tussen reservoir en maaiveld, met het zout als mogelijke uitzondering,
2. de afwezigheid van diffusie verschijnselen in de relatie tussen compactie en bodemdaling (Geertsma, 1973),
3. de mogelijkheid dat het gesteente onder kleinere gasreservoirs tegen de zwaartekracht, uitgeoefend door het gewicht van bovenliggend gesteente, in, omhoog komt,
4. de harde overgang van samendrukbaar naar onsamendrukbaar gesteente vlak onder het gasreservoir (Opstal, 1973),
5. een mogelijk te vlakke drukgradiënt rond producerende putten en
6. het helemaal niet of juist wel, maar dan zonder vertraging, mee depleteren van watervoerend gesteente in drukcontact met depleterend gasvoerend gesteente.

Ter identificatie van het best passende alternatief zal het bodemdalingsgedrag onder de standaard oorzakelijke hypothese en onder elk van de alternatieven geomechanisch gemodelleerd moeten worden zonder gebruik te maken van bodemdalingsmetingen of sjoemelfactoren.

Van een geodetisch correcte afleiding van bodemdaling is tot op heden geen sprake. Bij de afleiding van bodemdaling ten gevolge van een afzonderlijke winning:

1. wordt ten onrechte verondersteld, dat hoogtes, geen hoogteverschillen, gemeten zijn,
2. is de ruis door peilmerkspecifieke zetting incorrect gemodelleerd,
3. wordt de gemiddelde zetting ten onrechte als autonome daling in mindering gebracht op gemeten verschillen in peilmerkdaling,
4. worden meetpunten op subjectieve gronden onstabiel verklaard en
5. worden te veel meetpunten in de periferie, essentieel voor voldoende bemonstering van bodemdalingsverschillen, buiten beschouwing gelaten,

Voor de identificatie van de juiste oorzakelijke hypothese zijn tests met maximum onderscheidend vermogen en “gemeten” bodemdaling met de hoogste precisie nodig. De gangbare afleiding van bodemdaling door gaswinning uit hoogteverschilmetingen is veel te onnauwkeurig om de subtiele verschillen tussen het bodemdalingsgedrag in ruimte en tijd onder verschillende oorzakelijke hypothesen significant te kunnen onderscheiden. Voor de afleiding van gemeten bodemdaling met voldoende precisie en betrouwbaarheid zal een integrale 3D methodiek als beschreven in Figuur 6 nodig zijn.

Ook van een statistische correcte toetsing van verschillen tussen gemeten en gemodelleerde bodemdaling is geen sprake. De gangbare statistische toetsing:

1. toetst sterk van het gekozen referentiepunt afhankelijke absolute bodemdaling, geen referentieonafhankelijke ruimtelijke verschillen in bodemdaling,
2. heeft onvoldoende onderscheidend vermogen door een onrealistisch hoge variantie en een onrealistisch lage covariantie,
3. negeert de reductie van het aantal vrijheidsgraden door het gebruik van sjoemelfactoren en
4. toetst niet op meetfouten, onregelmatig peilmerkgedrag en onjuiste oorzakelijke aannames

Voor toetsing met voldoende discriminerend vermogen tegen onjuiste oorzakelijke hypothesen zal een integrale toetsingsprocedure nodig zijn, als beschreven in (Kenselaar & Martens, 1999).

Pogingen om voorspellingen van buitenaf scherper en robuuster te maken zijn stelselmatig gefrustreerd. Voorbeelden daarvan zijn de verwerping van het Rate Type Compaction Model (de Waal, 1986) in 1990 door het Massachusetts Institute of Technology (Toksöz & Walsh, 1990), het opblazen van de multidisciplinaire KNAW/NCG subcommissie “Bodembeweging en Zeespiegelvariatie” door SodM (SodM, 2007), de weigering van de Minister van Economische Zaken onafhankelijk onderzoek te laten uitvoeren naar de historische trefzekerheid van bodemdalingvoorspellingen (Min. van EZ, 2008) en het gebrek aan steun van de TCBB voor een veel betrouwbaardere methode om bodemdaling door één afzonderlijke winning af te leiden uit geodetische metingen (TCBB, 2009).

Vooraf de door minister van der Hoeven aangevoerde redenen om onderzoek naar de trefzekerheid van bodemdalingsvoorspellingen te weigeren zijn opmerkelijk:

“Tenslotte beveelt de heer Houtenbos aan om een onafhankelijk onderzoek te laten uitvoeren naar de historische trefzekerheid van bodemdalingsvoorspellingen. Het doel van deze aanbeveling is mij niet duidelijk. Een onderzoek naar de historische trefzekerheid van bodemdalingsvoorspellingen heeft geen waarde voor de toekomst. Immers, als zou blijken dat voorspellingen in het verleden niet erg trefzeker waren, dan wil dat niet zeggen dat ze dan ook niet bruikbaar zijn in de toekomst. Andersom, als ze in het verleden wel trefzeker waren, dan wil dat nog niet zeggen dat ze dat in de toekomst ook zijn. Aan voorspellingen kleven nu eenmaal onzekerheden. Ze moeten telkens worden vergeleken met de metingen. In de loop der jaren hebben de delfstofproducenten in Nederland een unieke kennis opgebouwd over de gevolgen van delfstofwinning op de daling van de bodem.”

Zij stelt het voorspellen van bodemdaling voor als het werpen van een dobbelsteen, waarbij er geen correlatie is tussen de uitkomsten van afzonderlijke worpen, en negeert daarmee het feit dat bodemdalingsvoorspellingen al twintig jaar op de zelfde manier in de fout gaan. Delfstofproducenten mogen een unieke kennis over de gevolgen van delfstofwinning hebben opgebouwd, die kennis is en blijft onvoldoende om met de hand aan de kraan schade binnen aanvaardbare grenzen te houden. Dit blijkt o.a. uit opdracht van Minister Kamp in 2013 om de fysieke oorzaken van de verschillen tussen gemodelleerd en werkelijk gedrag alsnog te onderzoeken en uit de onzekerheid over de effectiviteit van maatregelen om schade door aardbevingen in Groningen te beperken.

Na het mislukken van het LTB onderzoek is door enkele vertegenwoordigers van SodM, NAM en de Waddenvereniging een poging gedaan een vervolg te definiëren, waarin de, voor de betrouwbaarheid van bodemdalingsvoorspellingen meest relevante onderzoeksvragen alsnog aan de orde zouden komen. Deze poging strandde in het zicht van de haven, toen bleek dat NAM en SodM nieuwe inzichten, omarmd in de context van het LTB onderzoek, elders totaal negeerden.

Bodemdalingsvoorspellingen zijn tot dusverre het nagenoeg exclusieve domein van geomechanici geweest. Geodeten leverden hoogtemetingen tussen meetpunten, maar hun deskundigheid in de afleiding van bodemdaling door één specifieke oorzaak uit deze metingen en in de statistische toetsing van verschillende hypothesen tegen deze metingen bleef ongebruikt. De mijnbouwsector heeft zich in de voorbije jaren steeds verder teruggetrokken uit open fora, als de NCG commissie “Bodemdaling en Zeespiegelvariatie” en in technische commissies, waarin het monitoren van bodembeweging geregeld wordt zonder dat externe belanghebbenden daarbij vertegenwoordigd zijn. Om uit de tunnelvisie te kunnen breken en het vertrouwen van de maatschappij terug te kunnen winnen is een open dialoog met op het algemeen belang georiënteerde externe deskundigen essentieel. De blauwdruk voor verbetering van de betrouwbaarheid van bodemdalingsvoorspellingen ligt besloten in de geschiedenis van het totaal aan winningen tot dus verre. Een scherpe analyse van wat, waar, wanneer, in welke mate afweek van de theoretische verwachtingen wijst de weg naar een plausibele allesomvattende verklaring voor de verschillen tussen theorie en praktijk. Alleen de scherp mogelijke integrale toetsing van plausibele oorzakelijke hypothesen tegen het totaal aan bodemdalingsmetingen in ruimte en tijd zal het lek boven krijgen.

Bodemdaling uit geomechanische modellering

Betrouwbare bodembewegingsvoorspellingen zijn van cruciaal belang voor de beoordeling van de maatschappelijke inpasbaarheid van een voorgenomen winning en voor de bepaling van de omvang van schadebeperkende maatregelen. Controles van SodM, TNO en de TCBB ten spijt blijken voorspellingen van bodembeweging door gaswinning en de daarbij opgegeven onzekerheidsmarges de laatste decennia stelselmatig te laag te zijn. In de woorden van NAM (Shell/NAM, 2012):

“The laboratory measurements show no sign of bilinear compaction behaviour. The scaling parameters have little support and the calibration factors are little more than 'fudge factors'. We lost predictive power by adding degrees of freedom in that attempt to fit the data. We needed to take a step back, take a look at the physics and only introduce parameters where absolutely needed and only when there's a clear physical reason.”

Bij beschouwingen over onzekerheden moet onderscheid worden gemaakt tussen precisie en betrouwbaarheid. Precisie is een maat voor de spreiding rond het gemiddelde, terwijl betrouwbaarheid staat voor het vermogen om onjuiste aannames te detecteren, die de verdeling van mogelijke uitkomsten als geheel verschuiven. De gangbare geomechanische modellering maakt gebruik van tal van discutabele aannames over de relatie tussen in het boorgat gemeten productie en de druk op elke plaats in het reservoir, tussen deze druk en compactie en tenslotte tussen compactie en bodemdaling op elke plaats aan het maaiveld. Zolang plausibele alternatieve relaties in vergelijkbare situaties niet overtuigend in strijd met de metingen zijn bevonden, is het model op basis van de aangenomen relaties niet betrouwbaar.

Vóór winning zijn er nog geen bodemdalingmetingen voorhanden, waarmee de voor modellering noodzakelijke parameters geïjkt kunnen worden. Uitgaande van de geplande productie moet eerst de verwachte drukdaling op het punt waar het gas de put in stroomt worden berekend. Vervolgens moet daaruit voor elke plaats in met gas en water gevulde reservoirdelen het drukverloop worden bepaald. Het drukverschil per strekkende meter zal omgekeerd evenredig afnemen met de afstand tot het extractiepunt en onmiddellijk rond het extractiepunt extreme waarden bereiken. Tenslotte moet worden berekend, wat het effect is van het drukverloop in elk punt van het reservoir op de vervorming van het omliggende gesteente en het maaiveld. Er zijn oneindig veel verschillende drukverdelingen in het reservoir mogelijk, die allemaal consistent zijn met het zelfde voorgenomen productieprofiel, maar resulteren in een andere verdeling van de bodemdaling aan het oppervlak.

Buiten het boorgat zijn parameters als druk, porositeit, compactiecoëfficiënt en permeabiliteit niet meetbaar. Extrapolatie van in putten gemeten waarden naar een willekeurige plaats in het reservoir op een willekeurig tijdstip gaat gepaard met onzekerheden oplopend tot 25 bar, 15%, 50% en 3 ordes van grootte respectievelijk voor druk, porositeit, compactiecoëfficiënt en permeabiliteit. De omvang van de gasvoorraad laat zich kennelijk ook niet vooraf bepalen met een nauwkeurigheid beter dan een factor 3. Uit de eerder aangehaalde literatuur in dit rapport blijkt dat

de bandbreedte van geëxtrapoleerde parameterwaarden veel groter is dan de opgegeven marges van zo'n 30% aangeven.

De grote onzekerheden in de parameterwaarden en de systematische fouten door fysisch onjuiste aannames resulteren in voorspellingen, waarvan de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid bij lange na niet voldoende zijn voor de beoordeling van de maatschappelijke inpasbaarheid van voorgenomen winningen, die de wet eist. Rechters en bestuurders zonder technisch inhoudelijke kennis kiezen bij geschillen begrijpelijkerwijs, maar ten onrechte, veelal de kant van SodM, TNO, TCBB en delfstofproducenten. Meer dan eens zijn stellingen van derden in de aanloop van een juridisch geschil fel bestreden om pas na beslechting daarvan in het voordeel van de delfstofproducent, serieus bestudeerd en alsnog geadopteerd te worden.

Zo kreeg de integrale 3D analyse methodiek voor bodemdaling (Houtenbos A. , 2004a) nooit de formele erkenning van SodM, TNO, TCBB en delfstofproducenten, als meest betrouwbare optie voor de afleiding van bodemdaling door een specifieke delfstofwinning, maar werd het wel als zodanig gebruikt onder meer voor de ontrafeling van bodemdaling rond Bergermeer (Panterra, 2010) en Franeker (SGS, 2014).

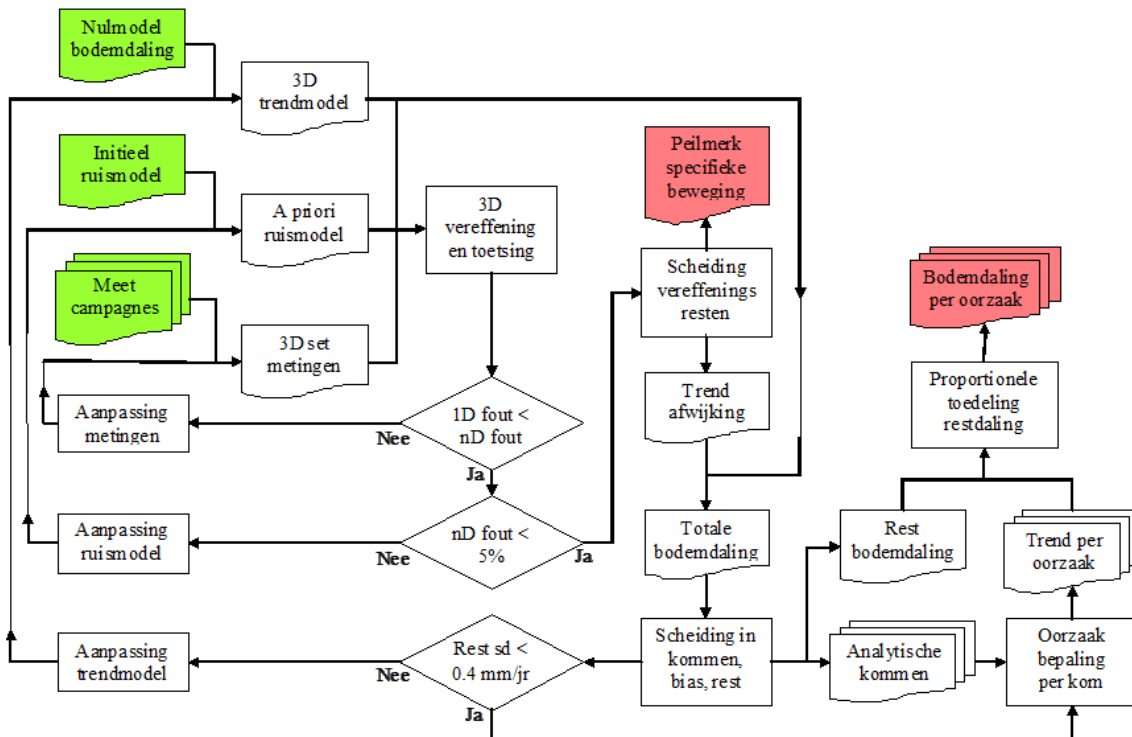
In januari 2007 werd het *'time decay'* model voor de modellering van tijdseffecten in de bodemdaling door gaswinning (Houtenbos A. , 2007a) gepubliceerd. Voorafgaande aan de behandeling van het winningsplan voor de Waddenvelden in 2007 door de Raad van State bestreed NAM het model en de consequenties ervan voor de effectiviteit van productie met de hand aan de kraan. Vier jaar later gebruikte NAM het model in de winningsplannen voor de Waddenvelden (NAM, 2011c), Anjum (NAM, 2011b) en Ameland (NAM, 2011a).

Het wettelijke vereiste, om vooraf vast te stellen of een voorgenomen winning maatschappelijk verantwoord is, is in de laatste 10 jaar uitgehold door productie met de hand aan de kraan. Het stevig wettelijk verankerde voorzorg principe is verworpen tot een nauwelijks afdwingbare nazorg verplichting om puin te ruimen als zich toch onacceptabele gevolgen voordoen. Delfstof producenten wentelen op deze manier risico's van onjuiste voorspellingen af op omwonenden.

Bodemdaling uit hoogteverschilmetingen

Om de werkelijk opgetreden bodemdaling te kunnen bepalen schrijft het mijnbouwbesluit regelmatige metingen voor. Bodemdalingsmetingen weerspiegelen naast de effecten van de specifiek onderzochte winning, die van andere gas, olie, zout en waterwinningen, die van klink en veenoxidatie door aanpassing van het polderpeil en – in niet of nauwelijks detecteerbare mate – ook door natuurlijke oorzaken, die van zetting, thermische rek en krimp van de fundering van individuele meetpunten en tenslotte die van meetruis. De mate waarin elk van deze fenomenen bijdraagt aan de gemeten hoogteverschillen tussen meetpunten kan op grond van de verschillen in de wijze, waarop deze verschijnselen in ruimte en in tijd correleren worden ontrafeld. De sectie Mathematische Geodesie en Puntbepaling van de TUDelft legde eind negentiger jaren de grondslag voor zo'n integrale 3D bodemdalingsanalyse (Kenselaar & Martens, 1999). Nadat deze sectie was weg bezuinigd, is de methode (Figuur 6) tussen 2004 en 2007 buiten de TUDelft verder verfijnd (Houtenbos A. , 2007). Door de integrale toetsing op meetfouten en

onregelmatig meetpuntgedrag is de betrouwbaarheid van op deze manier afgeleide bodemdaling veel hoger dan die van conventioneel afgeleide bodemdaling. Deze toetsing op geodetische meetfouten laat zich eenvoudig uitbreiden tot toetsing op geomechanische modelfouten

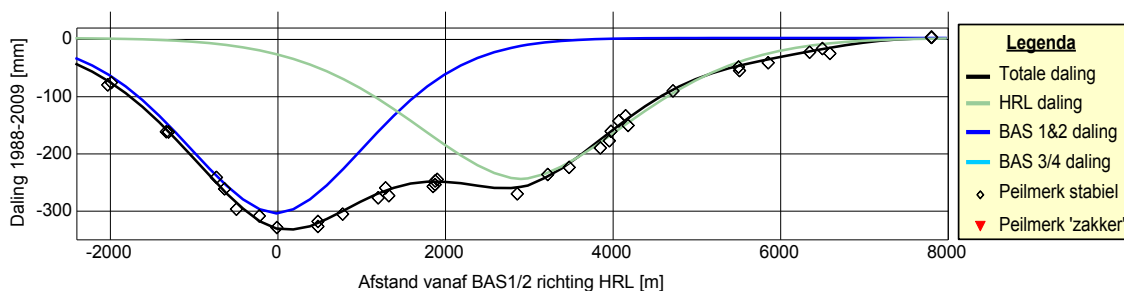


FIGUUR 6: STROOMDIAGRAM SURE INTEGRALE BODEMDALINGSANALYSE

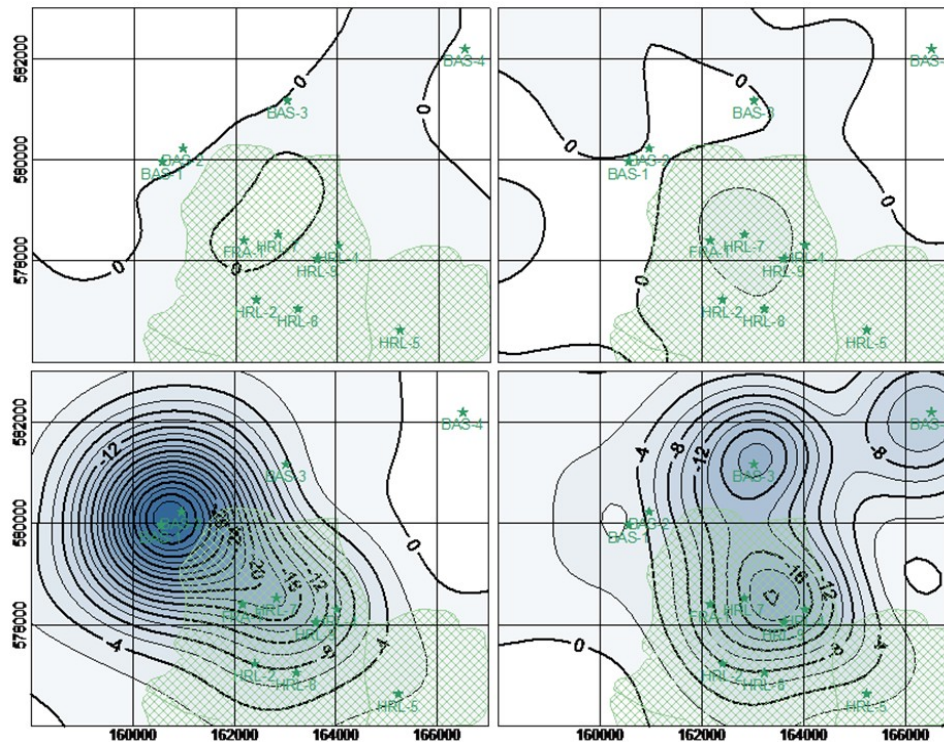
Anders dan aangegeven in (SGS, 2014) zijn de bodemdalingsresultaten niet afhankelijk van het model, waarmee de iteratieve berekening wordt gestart.

De methodiek is van doorslaggevend belang geweest in de vroege ontdekking van 'pore collapse' in het Harlingenveld (Houtenbos A. , 2004), de fout in de Barradeel nulmeting, die resulteerde in de onjuiste 'rebound' prognose na staking van de zoutwinning en het 'time decay' gedrag in Nederlandse (o.a. Ameland) en Italiaanse (o.a. Angela-Angelina) gasvelden.

Deze methodiek voorziet in de behoefte tot objectieve ontleding van bodemdaling in de bijdrage van verschillende gas, olie, zout en waterwinningen (Figuur 7), autonome bodemdaling (Figuur 8) en zetting van individuele peilmerken.



FIGUUR 7: OORZAKELIJKE ONTRAFELING LANGS DE LIJN BAS1/2(ZOUTWINNING)-HRL(GASWINNING)



FIGUUR 8: BODEMDALINGSNELHEID IN MM/JAAR, 1976-1988 (AUTONOM), 1988-1996 (GAS), 1996-2004 (GAS+ZOUT1), 2004-2009 (GAS+ZOUT23)

De precisie en betrouwbaarheid van op deze manier afgeleide bodemdaling per afzonderlijke oorzaak laat zich in de praktijk niet verbeteren door toevoeging van geomechanische relaties en gegevens. Voornoemde onrealistisch gegeneraliseerde aannames voor de modellering zijn daar de oorzaak van.

Ten onrechte wordt op voorspraak van SodM en TCBB in de dagelijkse praktijk standaard de gemiddelde daling van meetpunten als autonome daling in mindering gebracht op de aan de delfstofwinning toe te rekenen bodemdaling. Bodemdaling, die pas begint na aanvang van de winning en in sterkte afneemt met de afstand tot het centrum van de winning is hoogst waarschijnlijk veroorzaakt door die winning, niet door niet nader gespecificeerde autonome daling.

Ijking van gemodelleerde tegen gemeten bodemdaling

Geomechanische modellering voegt niets toe aan de vaststelling van gerealiseerde bodemdaling. Andersom is verificatie van veronderstelde geomechanische modellen en ijking van bijbehorende parameters tegen bodemdalingmetingen een noodzakelijke (maar niet voldoende) voorwaarde voor geomechanische modellering van bodemdaling met bruikbare precisie en betrouwbaarheid. Bij de ijking wordt gebruikt gemaakt van *fudge factors*, letterlijk vertaald: sjoemelfactoren. Dit zijn factoren zonder enige fysische betekenis, die de modellering passend maken op de metingen). In de modellering van het Harlingenveld bij Franeker (SGS, 2014) werden er 24 gebruikt. Achter gesloten deuren heeft NAM toegegeven er zelfs meer te gebruiken dan er metingen zijn. De bandbreedte van deze sjoemelfactoren (Tabel 1) maakt het mogelijk een breed spectrum van onjuiste geomechanische modellen passend te krijgen bij de gemeten productie, geomechanische parameters en bodemdaling. De mogelijkheid van totaal verschillende modellen, die beide

verenigbaar zijn met de gemeten bodemdaling wordt treffend geïllustreerd door de Groningen analyse (TNO, 2013), (Figuur 1) en (Figuur 2)

Parameter	Minimum Factor	Maximum Factor
Winbare gasvoorraad	0.70	3.42
Porositeit	0.88	1.12
Compactie coëfficiënt	0.50	2.00
Horizontale permeabiliteit	0.50	5.00

TABEL 1: BANDBREEDTE BELANGRIJKSTE SJOEMELFACTOREN

Door onjuiste modellering van de covariantie van meetruis, meetpunt specifieke funderingskarakteristieken en ‘autonome’ daling wordt het spectrum van passend te maken modellen verder verbreed. De combinatie van waarschijnlijk deels onjuiste modelaannames en sjoemelfactoren berooft geomechanische bodemdaling-modellering van elke vorm van betrouwbaarheid. Zoals uit de Franeker analyse blijkt, kan geomechanische modellering tot 40% onderschatting van het bodemdalingsvolume leiden. Voor de validatie van geomechanische modellen is het cruciaal om het daaruit zonder sjoemelfactoren afgeleide 3D bodemdalingpatroon te vergelijken met het uit geodetische metingen afgeleide patroon. Hiervoor dient de bodemdaling ten gevolge van de onderzochte winning via integrale 3D analyse van de oorspronkelijke hoogteverschilmetingen zuiver van andere invloeden te worden gescheiden en het verschil tussen de beide patronen te worden getoetst tegen een statistisch criterium, waarin alle varianties van en covarianties tussen geomechanische en geodetische metingen zijn verdisconteerd. Doordat elke onjuistheid of versimpeling in de geomechanische modellering systematische fouten in de gemodelleerde bodemdaling introduceert, kan deze nooit zo goed zijn als rechtstreekse uit de metingen afgeleide bodemdaling. Dit verklaart waarom bodemdalingvoorspellingen bij ongewijzigde productie via extrapolatie van het gemeten bodemdalingpatroon systematisch doeltreffender gebleken zijn dan geomechanische modellering. Geomechanische modellering is essentieel voor optimalisatie van productie, maar overbodig en zelfs schadelijk, waar zij wordt gebruikt ter voorspelling van bodembeweging, voordat de onderliggende aannames afdoende in de praktijk zijn geverifieerd.

Compactie en bodemdaling

De spanning in het gesteenteskelet en de druk in de poriën van het reservoirgesteente dragen samen het gewicht van het bovenliggende gesteente. Extractie van gas verlaagt de poriëndruk, waardoor het gesteenteskelet een groter en de poriëndruk een kleiner deel van het gewicht van het bovenliggend gesteente moet dragen. Het verminderde draagvermogen van het in druk verlaagde reservoir resulteert tegelijkertijd in compactie van het reservoirgesteente en daling van het maaveld.

Door de beperkte doorlaatbaarheid van het reservoirgesteente zal de drukverlaging in het reservoir aanvankelijk sterk geconcentreerd zijn rond de producerende putten. Zolang het gebied met significante drukverlaging veel kleiner is dan de diepte, zullen de stijve bovenliggende gesteentelagen niet doorzakken en zal er

geen compactie en bodemdaling optreden. Deze zogenaamde '*stress arching*' kan ook volgens (Fjaer, Holt, Horsrud, Raaen, & Risnes, 2008) blz. 402, mogelijk verklaren, waarom de bodemdaling trager op gang komt dan op grond van de huidige elastische theorie wordt verwacht.

Als de productie vordert zal de drukdaling zich over een steeds breder reservoirdeel voordoen. Naarmate het gebied met significante drukverlaging groter wordt, neemt het effect van *stress arching* af en beginnen de overspannende gesteentelagen door zakken te verder. Tegelijkertijd begint het reservoirgesteente te compacteren en het maaiveld te dalen.

Gas zal alleen naar een producerende put stromen, als de druk in de richting van de put afneemt. Na staking van de productie zullen de resterende drukverschillen uitvlakken. De druk rond een niet meer producerende put wordt hoger en die aan de randen van reservoir lager. Omdat, anders dan veelal verondersteld, reservoircompactie ten minste deels niet elastisch is, zal de drukverhoging rond de put veel minder bodemstijging opleveren dan de drukverlaging aan de randen bodemdaling oplevert. Dit zou kunnen verklaren waarom het bodemdalingsvolume ook na staking van de productie nog steeds toeneemt.

Een bijkomende verklaring kan mogelijk worden gevonden door laboratorium experimenten bevestigde *Rate Type Compaction* (RTCM) gedrag (de Waal, 1986). Volgens dit model verloopt de compactie (en dus ook de bodemdaling) sneller naarmate de drukdaling trager gaat. Dit resulteert in meer compactie en bodemdaling per eenheid drukdaling, voor een veld met exponentieel afnemende productiesnelheid. Dit effect wordt nog versterkt doordat voortschrijdende compactie de porositeit en permeabiliteit verlaagt. Hierdoor stroomt het gas steeds trager door de poriën, daalt de druk steeds langzamer en neemt de compactie per eenheid drukdaling – volgens het RTCM model - verder toe.

Compactie kan mogelijk worden tegengegaan door handhaving van de oorspronkelijke druk. Dit zou kunnen door gelijktijdig met de extractie van gas boven uit het reservoir, water onder het gas/water contact in het reservoir te laten lopen. Zonder drukverlaging geen compactie, geen bodemdaling en geen aardbevingen.

Aardbevingen

Verschillende analyses van het aardbevingsrisico in Groningen relateren het aardbevingsrisico aan cumulatieve compactie. Deze relatie lijkt weinig plausibel.

Een oorzakelijk verband tussen aardbevingen en drukverschillen aan beide zijden van een breuk ligt meer voor de hand. Als de druk aan beide zijden even snel daalt, zal de compactie aan beide zijden ook even snel en zonder frictie op het breukvlak verlopen. Er is dan wel compactie proportioneel met de drukdaling, maar geen bevingsrisico. Als de druk daarentegen aan de ene kant sneller daalt dan aan de andere, dan zal dat gepaard gaan met verschillen in compactiesnelheid en verhoging van de spanning op het breukvlak proportioneel met het verschil in snelheid van drukdaling en compactie. Zodra de som van de vóór winning al aanwezige

tektonische spanning en de door differentiële depletie toegevoegde spanning een kritieke waarde bereikt, zal die spanning abrupt ontladen in de vorm van een aardbeving.

Een oorzakelijk verband met drukverschillen in plaats van cumulatieve compactie zou de concentratie van bevingen in gebieden met grote breukdichtheid en de correlatie in tijd tussen perioden met verhoogde productie en perioden met verhoogde bevingfrequentie kunnen verklaren.

Binnen een drukdelend systeem als een gasreservoir zullen drukverschillen, ook die aan weerszijden van een breuk, continue uitvlakken, zolang de productiesnelheid niet wordt verhoogd. De veel gehoorde stelling, dat productieverlaging geen zin heeft, omdat het seismische risico bepaald zou worden door cumulatieve compactie, ontbeert een wetenschappelijke grondslag. Verlaging van de productiesnelheid versnelt de vereffening van drukverschillen aan weerszijden van breuken en reduceert daarmee het aardbevingsrisico.

Schadepreventie met de Hand aan de Kraan

De mogelijkheden om schade door gaswinning effectief te kunnen beheersen zijn kritiek afhankelijk van de juistheid van de veronderstelde oorzakelijke relaties.

Ervaringen over de laatste decennia hebben overtuigend aangetoond dat bodembeweging door gaswinning zich stelselmatig anders ontwikkelt in ruimte en tijd dan de veronderstelde oorzakelijke relaties aangeven. Het LTB onderzoek heeft daar, anders dan gehoopt en verwacht, geen verandering in gebracht.

Productie-installaties hebben altijd afsluiters gehad. Er is dan ook nooit anders dan met de hand aan de kraan geproduceerd. Dit heeft schade door gaswinning bij Franeker en in Groningen niet kunnen voorkomen. Met de hand aan de kraan zijn de onmiddellijke effecten van gaswinning wellicht beheersbaar, maar niet de effecten van onbekende mechanismes, die pas optreden nadat de cumulatieve verstoring van de ondergrond een bepaalde kritieke waarde heeft bereikt. Zonder kennis van het juiste oorzakelijke mechanisme is het niet mogelijk de bandbreedte van toekomstig gedrag met enige betrouwbaarheid te voorspellen. De suggestie dat met de gebrekkig gebleken kennis van vandaag deze bandbreedte wel bepaald kan worden is bewuste misleiding. Naast het stil leggen van de productie biedt alleen strak gestructureerd en experimenteel geverifieerd onderzoek naar de fysieke oorzaken van de afwijkende bodembeweging enig perspectief op verbetering van de effectiviteit van productie met de hand aan de kraan.

CONCLUSIES

1. Bodemdalingsvoorspellingen zijn volstrekt onbetrouwbaar. De werkelijke bodemdaling blijkt tot meer dan het zesvoudige te kunnen oplopen. Daarmee is vooraf niet te bepalen of een voorgenomen winning maatschappelijk verantwoord uitgevoerd kan worden. Vooralsnog is de kennis van het gedrag van de ondergrond ook niet voldoende om te kunnen garanderen dat schade met de hand aan de kraan beheerst kan worden.
2. Direct uit hoogteverschilmetingen afgeleide bodemdaling kan 40% hoger zijn dan achteraf geomechanisch gereconstrueerde. Desondanks accepteert SodM de laatste als enig juiste.
3. De huidige methodieken voor afleiding van bodemdaling uit hoogteverschilmetingen en toetsing van gemodelleerde tegen gemeten daling zijn te zwak om oorzaken van afwijkende bodemdaling betrouwbaar te kunnen detecteren.
4. Geomechanische modellering is essentieel voor optimalisatie van productie, maar overbodig en zelfs schadelijk, waar zij wordt gebruikt ter voorspelling van bodembeweging, voordat de onderliggende aannames afdoende in de praktijk zijn geverifieerd.
5. Niet de incidentele onzekerheden van geomechanische parameters, maar fouten in de veronderstelde relaties tussen productie, druk, compactie en bodembeweging zijn de bron van de waargenomen systematische verschillen tussen gemodelleerde en gemeten bodembeweging.
6. Met sjoemelfactoren zonder fysische betekenis wordt onjuist gemodelleerde bodemdaling aangepast aan de gemeten daling. Deze sjoemelfactoren zijn het mijnbouw equivalent van de frauduleuze VW's dieselmotor software. Beide misleiden door in de praktijk ondermaats presterende systemen te voorzien van aanvaardbare testresultaten.
7. NAM heeft niet voldaan aan de door SodM bij maatschappelijke organisaties gewekte verwachtingen, t.a.v. het "Lange termijn bodemdaling" onderzoek.
8. Zonder hulp en druk van buitenaf zullen delfstofproducenten ook in de toekomst niet in staat zijn de betrouwbaarheid van voorspellingen te verbeteren en zullen de risico's van onjuiste voorspellingen worden afgewenteld op de leefomgeving.
9. Achter de weigering details van de voorspellingsmethodiek openbaar te maken en gegevens te leveren voor onafhankelijke verificatie gaan selectief gebruik van data en dubieuze modelkeuzes schuil. Het beroep op bedrijfsvertrouwelijkheid dient geen ander bedrijfsbelang dan het ontlopen van aansprakelijkheid voor onjuiste voorspellingen.
10. De mijnbouwsector heeft zich het nagenoeg exclusieve recht toegeëigend om de eigen industriële belangen bij delfstofwinning tegen het algemene maatschappelijke belang af te wegen. SodM heeft haar verantwoordelijkheid voor maatschappelijk verantwoorde winning in handen gelegd van de mijnbouwsector zelf. Deze beslist over regelgeving t.a.v. het voorspellen en meten van bodembeweging en weert daarbij meer op de belangen van externe *stakeholders* georiënteerde deskundigen.

AANBEVELINGEN

1. Geodeten en geomechanici:
 1. Leid de bodemdaling ten gevolge van een individuele oorzaak af van de gemeten hoogteverschillen tussen meetpunten op grond van de manier, waarop deze bodembeweging in ruimte en tijd correleert met locatie waarop en periode waarin die oorzaak zich manifesteert.
 2. Voorspel verdere ontwikkeling van bodembeweging door extrapolatie van de gemeten relatie tussen productie en bodembeweging in tijd.
 3. Toets veronderstelde geomechanische relaties tussen productie, drukdaling, compactie en bodembeweging en mogelijke alternatieven tegen *state of the art* afgeleide ontwikkeling van bodembeweging in ruimte en tijd en publiceer de bevindingen.
 4. Baseer bodembewegingsvoorstellingen voor nieuwe winningen op inzichten, die tegen metingen in soortgelijke situaties geverifieerd zijn.
2. SodM:
 1. Neem verantwoordelijkheid voor de kwaliteit (betrouwbaarheid en transparantie) van gerapporteerde bodemdaling door delfstofwinning
 2. Neem de scheiding van gemeten bodemdaling, in afzonderlijk delen door verschillende oorzaken, zoals de eigen gas of zoutwinning, de gas of zoutwinning van anderen, polderpeilverlaging, natuurlijke klink etc. uit handen van individuele mijnbouwers en leg ze in handen van een onafhankelijke professionele geodetische instelling.
3. SodM en delfstofproducenten:
 1. Luidt de door alle partijen gewenste omslag naar duurzame samenwerking in, met de publieke erkenning, dat externe kritiek in het verleden veelal niet de aandacht kreeg, die het verdiende. Moedig onafhankelijke innovatie aan.
 2. Zeg publiekelijk toe, dat suggesties van de stuurgroep “lange termijn bodemdaling”, die zijn blijven liggen, binnen een jaar open en onafhankelijk op verbetering van de betrouwbaarheid zullen worden getoetst en dat partijen zich zullen inzetten voor implementatie en handhaving van daaruit voortvloeiende verbeteringen in de Nederlandse mijnbouwsector.
 3. Verschaf vrije toegang tot alle informatie, die nodig is voor onafhankelijke beoordeling van de effecten van delfstofwinning op de leefomgeving.
4. Organisaties, afhankelijk van betrouwbare bodembewegingsvoorspellingen:
 1. Maak Uw oordeel over de effecten van bodemdaling niet afhankelijk van het oordeel van SodM, TNO, TCBB en delfstofproducenten. Eis een “*second opinion*” van een onafhankelijke instantie.
 2. Voorkom stilzwijgende afwenteling van het risico van onjuiste voorspellingen op uw organisatie.

REFERENTIES

- Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M., & Risnes, R. (2008). *Petroleum related rock mechanics, 2nd edition*. Elsevier.
- Geertsma, J. (1973). *A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogenous case*. Verhandelingen van het Koninklijk Nederlands geologisch mijnbouwkundig Genootschap, Deel 28, pp. 43-62.
- Houtenbos, A. (2004). *E-mail verkeer Oranjewoud/SodM/TNO okt 2004*.
- Houtenbos, A. (2004a). *Subsidence residuals modelling. SuRe users manual (Draft version)*.
- Houtenbos, A. (2007). *Subsidence residuals modelling. SuRe users manual - Version 1*.
- Houtenbos, A. (2007a). *Subsidence and gas production: an empirical relation*. www.novativ.nl/uploaded/FILES/Bijlage%20Rapport%20Houtenbos.doc.
- Houtenbos, A. (2007b). *Bodemdalingsanalyse: Ameland 1986-2007*. www.waddenzee.nl/fileadmin/content/Bodemdaling/2007/AML07.pdf.
- Houtenbos, A. (2008). *Bodemdalingsanalyse NW-Friesland 1982-2006*. www.waddenzee.nl/fileadmin/content/Dossiers/Energie/pdf/NWFR06Sum.
- Houtenbos, A. (2009). *Bodemdaling NW-Friesland 1976-2009*. www.waddenzee.nl/fileadmin/content/Dossiers/Energie/pdf/NWFR09.pdf.
- Houtenbos, A. (2015). Beyond the minutes. Geanonimiseerd beschikbaar voor onderzoeksdoeleinden.
- Kenselaar, F., & Martens, M. (1999). *Modellering van bodemdaling met een tijd-plaats-model*. Mathematische Geodesie en Puntbepaling, TU-Delft.
- Min. van EZ. (2008). *Reactie betreffende de visie van de heer Houtenbos met betrekking tot bodemdaling*. Rijksoverheid. Kamerstuk 31349, nr. 3, kenmerk ET/EM 8135188.
- NAM. (2005c). *Winningsplan Moddergat Lauwersoog en Vierhuizen 31/12/2005*.
- NAM. (2011a). *Winningsplan Ameland 30/09/2011*. www.nlog.nl.
- NAM. (2011b). *Winningsplan Anjum 30/09/2011*. www.nlog.nl.
- NAM. (2011c). *Winningsplan Moddergat Lauwersoog en Vierhuizen 30/09/2011*. www.nlog.nl.
- NGI. (2007). *Uniaxial Compaction Coefficient of Chalk*.
- Opstal, G. v. (1973). *The effect of base-rock rigidity on subsidence due to reservoir compaction*. Denver: Proceedings Third Congress of the International Society of Rock Mechanics.

- Panterra. (2010). *Bergen Concession Subsidence Study*.
- SGS. (2014). *Vermilion, Harlingen Subsidence Study*. SGS Horizon B.V.
- Shell/NAM. (2012). *Subsidence Delay Is Consistent With Pressure Diffusion In Heterogeneous Reservoirs*. Presentatie Antony Mossop, Nederlands Aardwetenschappelijk Congress 11, 30-03-2012.
- SodM. (2007). *E-mail Opschorting SodM deelname aan NCG subcommissie BB&ZV*. Geanonimiseerd beschikbaar voor onderzoeksdoeleinden.
- SodM. (2003). *Sakjen fan 'e Boaiem yn Fryslan*. Minisymposium Delfstofwinning in Fryslan 2004-2014. Leeuwarden.
- TCBB. (2009). *Van meting naar daling (Finale versie)*. Technische Commissie Bodembeweging. www.tcbb.nl.
- TNO. (2013). *Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld*. TNO.
- TNO. (2015). *Recent developments on the seismicity of the Groningen field in 2015*.
- Toksöz, M., & Walsh, J. (1990). *Subsidence at the Groningen Gasfield. An evaluation of the subsidence program directed by NAM*.
- Vermilion. (2007). *Subsidence Study - Harlingen Upper Cretaceous (Chalk) Reservoir*. Vermilion Oil & Gas Netherlands BV.
- Vermilion. (2007b). *Powerpoint Presentation: Upper Cretaceous Subsidence, March 12, 2007*.
- Waal, J. de. (1986). *On the rate type compaction behaviour of sandstone reservoir rock*.