

Van Meting naar Daling

Bodemdaling door delfstofwinning

November 2009



Technische commissie bodembeweging

Samenvatting

Waarom

Het winnen van gas en zout uit de diepe ondergrond gebeurt op basis van een winningsplan waarmee de minister van Economische Zaken moet instemmen. In het winningsplan hoort een indicatie te worden opgenomen van de bodemdaling die door de delfstofwinning tijdens en na de winning wordt verwacht. Gedurende het proces van winning worden geodetische metingen verricht om de werkelijke bodemdaling te bepalen en zo te bewaken dat de voorspelling overeenkomt dan wel tijdens het proces bijstelling behoeft. In het geval van grote afwijkingen kan dat gevolgen hebben voor de vergunning. Het is een complicatie dat er meer oorzaken zijn voor bodemdaling aan de oppervlakte dan delfstofwinning. Daling ontstaat bijvoorbeeld ook door oxidatie van veen of door verandering van het peil van oppervlaktewater. Dan moet een scheiding naar oorzaken plaatsvinden. Het laat zich verstaan dat een betrouwbare scheiding heel belangrijk is uit oogpunt van het leggen van de verantwoordelijkheid bij de goede partij. Wettelijk hebben mijnbouwmaatschappij de taak de bodemdaling door één van die oorzaken, de delfstofwinning, op objectieve wijze te analyseren en uitkomsten goed te onderbouwen. Staatstoezicht op de Mijnen toetst de uitkomst van zulke analyses en kan ze aanvaarden of verwerpen.

De Technische Commissie Bodembeweging (Tcbb) heeft een adviserende rol bij het beoordelen van winningplannen en wordt betrokken bij situaties waarin verschil van inzicht bestaat over de interpretatie van bodemdalingmetingen. In het algemeen constateert de commissie een goede praktijk in Nederland ten aanzien van de bewaking van bodemdaling door delfstofwinning. Van de ruim honderd grote en kleine gasvelden in productie blijft discussie beperkt tot slechts enkele velden. In de enkele gevallen waarin wel discussie ontstaat, kunnen emoties hoog oplopen en is de media-aandacht groot. Doorgaans gaat de discussie over de geldigheid van metingen en de wijze waarop ze moeten worden geïnterpreteerd. Vanuit haar betrokkenheid heeft de commissie een werkgroep in het leven geroepen om over de materie een advies uit te brengen. De hoofdvraag is op welke wijze we eenduidig uit geodetische waarnemingen kunnen vaststellen welk deel van de bodemdaling aan de oppervlakte het gevolg is van delfstofwinning in de diepe ondergrond en welke mogelijke andere oorzaken er zijn.

De werkgroep heeft het advies in twee stappen uitgebracht. In november 2008 is een voorlopig advies aan de Tcbb aangeboden die dat heeft verspreid als 'groene versie'. Aan betrokkenen op mijnbouwgebied is gevraagd te reageren op dit voorlopige advies en deel te nemen aan een workshop in juni 2009. Op basis van de ontvangen terugmeldingen, de gehouden voordrachten in de workshop en de discussie daarover heeft de werkgroep zijn definitief advies aangeboden aan de Tcbb. Die heeft het advies overgenomen als haar eigen standpunt en brengt het door middel van deze publicatie uit aan de Minister van Economische Zaken.

Focus van de werkgroep

Bij het bewaken van de verwachte bodemdaling door delfstofwinning onderscheidt de werkgroep vijf fasen:

1. de mijnbouwmaatschappij stelt de te verwachten bodemdaling vast aan de aan de hand van modellen,
2. er wordt een meetnetwerk ingericht voor waarneming van de daling,
3. de geodetische waarnemingen worden geanalyseerd,

4. er vindt een confrontatie plaats van de gemeten bodemdaling met de verwachte daling,
5. de modellen en het meetnet worden eventueel aangepast, zodat de predictie van toekomstige daling betrouwbaar blijft.

De aandacht van de werkgroep is vooral uitgegaan naar de fasen (3) en (4), respectievelijk de meting en de analyse van de meetresultaten.

Drie methoden

In internationale kringen van geodeten worden twee geodetische categorieën van methoden onderscheiden, het werken met *beschrijvende* modellen en werken met *oorzaak-gevolg* modellen. In de Nederlandse situatie zijn vooral drie methoden relevant voor het onderwerp, twee met een beschrijvend model en één met een oorzaak-gevolg model. De methoden met beschrijvende modellen zijn van de toezichthouder Staatstoezicht op de Mijnen en van Houtenbos, een zelfstandig onderzoeker. De derde methode met het oorzaak-gevolg model is het product van samenwerking tussen de onderzoeksinstituten TNO en Deltares. Het karakter van de drie methoden is dus niet gelijk. De methoden van SodM en Houtenbos zijn puur geodetische methodieken die zich richten op de fasen (2) en (3), respectievelijk meten van de daling en analyse van de waarnemingen. Deze twee methoden sluiten principieel uit om bij het bepalen van de daling al facetten van de ondergrond te gebruiken die je juist wilt bewijzen.

In de methode SodM vindt steeds verwerking en interpretatie plaats van de laatst uitgevoerde geodetische meting. Vakgenoten noemen zo'n beschrijvend model *congruent*. Het levert een eenvoudige en inzichtelijke verwerkingsmethode van geodetische metingen en er kan standaard software worden gebruikt voor de vereffening van waterpasnetwerken en de analyse op bodemdaling. Het is een nadeel van de methode dat een hoge betrouwbaarheid van het meetnet, de peilmerken en het benodigde vaste referentiepunt nodig is. Het toetsen op waarnemingsfouten en afwijkend peilgedrag is namelijk beperkt en er is een voorkeur voor peilmerken die aanwezig zijn vanaf het begin van de winning.

De methode Houtenbos kan de ontwikkeling in de tijd verdisconteren door geodetische metingen van verschillende jaren tegelijk in de analyse te betrekken. Zo'n beschrijvend model heet *kinematisch*. Het model is state-of-the-art, neemt zowel peilmerken mee vanaf het begin van de winning als later bijgeplaatste, en kent omvangrijke toetsen, onder andere op meetfouten, verstoring van peilmerken en noodzakelijke uitbreidingen van het geïmplementeerde bodemdalingmodel. De methode heeft ook nadelen. Toepassen van het model vooronderstelt hoogwaardige theoretische kennis en de automatische cyclus van vereffenen-toetsen-aanpassen maakt controle op het verwerkingsproces moeilijk. Daarnaast wordt in het model een keuze gemaakt van kansverdelingen, en het is niet altijd duidelijk welk effect die keuze heeft op de uitkomst. Zeker bij slechte meetnetwerken kan het resultaat daardoor sterk beïnvloed worden.

Bij goed ontworpen meetnetten en met in achtname van de aanbevelingen zijn de methoden van SodM en Houtenbos even toepasbaar. De methode Houtenbos is in het voordeel als weinig peilmerken in het meetnetwerk voorkomen of deze ongelijkmatig verdeeld zijn over het beschouwde gebied. Bij alle methoden moeten we de uitkomst wantrouwen als het diepste punt van de dalingskom wordt berekend buiten het gebied van de beschikbare peilmerken.

Anders dan de methoden van SodM en Houtenbos spitst de methode van TNO-Deltares zich toe op fase (5) waarin het geomechanische model van de ondergrond wordt verbeterd op basis van verkregen betrouwbare geodetische informatie. Het is geen confrontatiemethode maar een integratiemethode, want in het TNO-Deltares model wordt juist optimaal gebruik gemaakt van gekoppelde geodetische en geomechanische informatie. Door het gebruik van resultaten van verschillende metingen, wordt de ontwikkeling in de tijd meegenomen. Zo'n oorzaak-gevolg model heet *dynamisch*. Door het geïntegreerd gebruik van alle beschikbare meetgegevens en fysische kennis van het dalingsproces is de methode bij uitstek geschikt voor de beschrijving van bodemgedrag ten gevolge van verschillende oorzaken. In de context van dit rapport past deze methode vooral bij fase 5 van het productieproces.

Advies

Het advies bestaat uit drie delen. De werkgroep nodigt uit tot nuancering, doet direct implementeerbare aanbevelingen, en stelt concrete vervolgstappen voor de nabije toekomst voor.

Nuancering

De inbreng van diverse stake-holders in de gehouden workshop leert dat een strenge bewaking van de voorspelde bewaking niet vrij is van eenzijdigheid. Verschillende gremia in de samenleving kunnen een ander belang hebben, en met een perfecte match van voorspelling en meting maken we nog niet iedereen gelukkig. Waterschappen zijn voor de toekomstige investeringen gebaat bij een voorspelling op een tijdschaal van decaden en denken meer in de orde van een decimeter dan in centimeters. De sector land- en tuinbouw daarentegen reageert gevoelig op peilveranderingen op centimeterschaal. Waterschappen kiezen een gemiddeld peil voor delen van de dalingschotel en realiseren dus niet een peilaanpassing die voor ieder perceel optimaal is. Bij een ideale confrontatie tussen geodetische metingen en geomechanische voorspellingen kan een tuinder of agrarisch ondernemer nog steeds met een probleem achterblijven.

In dit licht is het niet erg realistisch om bodemdaling te voorspellen in één centimetergetal en die daling streng te bewaken op dat verfijningniveau. Winningplannen die de verwachte bodemdaling opgeven als een bandbreedte zijn zich beter bewust van de relatieve nauwkeurigheid. De werkgroep bepleit dat alle actoren, in bedrijfsleven en overheid, blijf geven van het nodige relativerend vermogen, dat ze leren omgaan met onvermijdelijke onnauwkeurigheid, en dat ze niet inzoomen op één belang maar alle willen honoreren.

De werkgroep adviseert om ruimte te laten voor verschillende methoden. Voor de Nederlandse praktijk is niet steeds dezelfde perfectie nodig. Voor de controle of bodemdaling de verwachting van het winningplan volgt zijn de eenvoudige methode van SodM en de gecompliceerde van Houtenbos bij in achtname van de aanbevelingen beide geschikt. Vaak zal de eenvoudige al voldoen, zeker bij goed ingerichte meetnetten. Alleen als er reden is om autonome daling door andere bodemeffecten te veronderstellen of als er discussie blijft tussen partijen over het scheiden naar oorzaak komt de TNO-Deltares aanpak met voordeel in beeld. Ook voor grotere mijnbouwondernemingen is deze geïntegreerde aanpak lonend, omdat de voorspelkracht van dit type modellen groot is.

Aanbevelingen

Belangrijke aanbevelingen zijn:

- Er worden regels gesteld voor het inrichten van meetnetten en de frequentie van metingen voor de bepaling van bodemdaling door delfstofwinning. Deze regels waarborgen, dat er robuuste meetnetten ontstaan van goede kwaliteit en dat er voldoende metingen in ruimte en tijd worden uitgevoerd om het verloop van de bodemdaling, zoals vastgelegd in het winningplan, te kunnen volgen. De werkgroep geeft een aanzet tot regels.
- Als peilmerken worden uitgesloten moet dit gebeuren op een objectieve wijze. De aangewezen aanpak is om op basis van een methode met statistische toetsen onbetrouwbare peilmerken te indiceren. In tweede instantie komen overwegingen van fysische aard in beeld. Er kan een visuele inspectie volgen van die peilmerken, die als kandidaat voor uitsluiting uit de statistische test volgen.
- De werkgroep adviseert een aanpak in drie gescheiden stappen: (a) toetsen van geodetische metingen en analyse op fouten, (b) berekening van (verschillen in) hoogteveranderingen in de peilmerken, (c) confrontatie van het geomechanisch model met de uit meting bepaalde hoogteveranderingen.
- In de drie-stappen procedure heeft het scheiden naar oorzaak, waar relevant, een plaats in de derde stap. Het behoort tot de wettelijke verantwoordelijkheid van de mijnbouwonderneming. Deze beoordeelt de correlatie tussen het geomechanisch model en de interpretatie van de hoogtemetingen en biedt een verklaring voor afwijkingen tussen geomechanische simulatie en hoogtemetingenuitwerking, die veroorzaakt kunnen zijn door natuurlijke processen en andere menselijke activiteiten dan delfstofwinning, zoals waterpeilaanpassing en (grond)werken. SodM heeft een toezichhoudende rol en kan het scheidingsresultaat accepteren of verwerpen. Er is behoefte aan een wetenschappelijke uitspraak als een maatschappelijke partij het resultaat van scheiding aanvecht.

Betrouwbare voorspellingen kunnen niet worden gemaakt puur op basis van de analyse van de geodetische waarnemingen. Hiervoor is een geomechanisch model nodig. Voorwaarde is wel dat het geomechanische model is gekalibreerd aan de hand van uit geodetische metingen afgeleide relatieve bodemdaling. Het dynamische TNO-Deltares model integreert de geodetische waarnemingen in het fysische model van de ondergrond en is daarmee een goed voorbeeld van grondige kalibratie en grote voorspelkracht.

Vervolgstappen

De werkgroep stelt vier vervolgstappen voor. De trefwoorden zijn: (i) Kenniscentrum Bodemdaling, (ii) Nadere regels, (iii) Industrieleidraad, (iv) Benchmarking.

Het Kenniscentrum bedoelt een bundeling van verworven en te ontwikkelen kennis op het gebied van bodemdalingvraagstukken. De werkgroep zou dit willen onderbrengen bij een bestaand en aan de materie gerelateerd kenniscentrum of instituut en sluit zich aan bij het advies voor een centraal coördinerend overheidsorgaan voor de strategie van de monitoring van bodembeweging in Nederland dat de Raad voor Aarde en Klimaat in samenwerking met de Nederlandse Commissie voor Geodesie, KNAW, heeft uitgebracht..

De werkgroep stelt voor om de inrichting van meetnetten, het verwerven van gegevens en het rapporteren van de bodemdaling door delfstofwinning te formaliseren in nadere regels. De wijze van verwerking (toetsing, analyse, ontwikkeling van software) zou uitgewerkt kunnen

worden in een richtlijn (industrieleidraad) die de delfstofbranche zelf uitwerkt onder toezicht van de overheid. De werkgroep doet een voorstel voor de inhoud van de leidraad, de bekostiging en de organisatie.

Het voorstel voor een Benchmarking van methoden is bedoeld om het advies nog meer aan overtuigingskracht te laten winnen. De gedachte is om binnen het te vormen Kenniscentrum een aantal synthetische data sets te ontwerpen voor theoretische winningen, geordend naar toenemende complexiteit, om daarmee huidige en toekomstige methoden op betrouwbaarheid te toetsen. De werkgroep formuleert een aanzet voor het ontwikkelen van zulke data sets.

Inhoud

1	Inleiding.....	1
2	Probleemstelling en werkwijze.....	3
2.1	Probleemstelling.....	3
2.2	Werkwijze.....	4
3	Proces en modellen.....	7
3.1	Het proces.....	7
3.1.1	Vaststellen van de te verwachten bodemdaling.....	7
3.1.2	Inrichten van een meetnetwerk voor bodemdalingwaarneming.....	7
3.1.3	Analyse van de geodetische metingen.....	8
3.1.4	Confrontatie van de geodetisch bepaalde bodemdaling met de verwachte geomechanisch bepaalde bodemdaling.....	8
3.1.5	Aanpassing van de modellen.....	9
3.2	Modellen.....	9
3.2.1	Reservoir-model.....	9
3.2.2	Geomechanisch model.....	9
3.2.3	Geodetisch model.....	11
4	Methodieken.....	15
4.1	Methode SodM (Staatstoezicht op de Mijnen).....	15
4.1.1	SodM-methode.....	15
4.1.2	SodM-toets.....	16
4.1.3	Beoordeling van de SodM-methode en -toets door de werkgroep.....	16
4.2	Methode Houtenbos.....	18
4.2.1	Beschrijving van de methode.....	18
4.2.2	Beoordeling van de methode Houtenbos door de werkgroep.....	20
4.2.3	Conclusie van de werkgroep.....	21
4.3	Methode TNO-Deltares.....	22
4.3.1	Beschrijving van de methode.....	22
4.3.2	Toets.....	23
4.3.3	Beoordeling van de methode TNO-Deltares door de werkgroep.....	24
5	Ervaring van NAM met methodes van bodemdalingmetingen.....	25
5.1	Criteria.....	25
5.2	Scheiden naar oorzaak.....	25
5.3	Visualisatie.....	25
5.4	Plaats van modelimplementaties in FIG-categorieën.....	26
5.5	Invloed van keuzes.....	26
5.6	Vergelijking van methoden.....	26
5.7	Dynamic modelling proces.....	27
5.8	Wens van NAM ten aanzien van werkwijze.....	27
5.9	Voorwaarde voor werkbaarheid.....	27
6	Advies.....	29
6.1	Overwegingen voor nuancering.....	29
6.2	Aanbevelingen.....	30
6.3	Voorstel voor vervolgstappen.....	33
6.3.1	Kenniscentrum.....	33
6.3.2	Nadere regels.....	33
6.3.3	Industrieleidraad.....	34
6.3.4	Benchmarking van Methodes.....	34
	Bijlage A Workshop	
	Bijlage B Bijdrage van SodM	
	Bijlage C Bijdrage van Houtenbos	
	Bijlage D Aandachtspunten voor de inrichting van meetnetten	
	Bijlage E Opzet voor industrieleidraad	
	Bijlage F Relevante aspecten voor benchmarking	

1 Inleiding

Bij het verlenen van vergunningen voor winning van delfstoffen is de verwachte daling van de bodem een belangrijk aspect. In de winningplannen wordt aangegeven welke maximale daling wordt verwacht en (bij voorkeur) hoe deze daling zich in de tijd ontwikkelt. In de exploitatiefase vindt op gezette tijden monitoring plaats ter bewaking van de werkelijk opgetreden bodemdaling. Bij die monitoring worden relatieve hoogtemetingen uitgevoerd en vervolgens geïnterpreteerd. Er zijn de laatste jaren verschillende technieken beschikbaar voor dergelijke metingen, zoals waterpassen, GPS en InSAR. Daarnaast zijn in het verleden verschillende methoden ontwikkeld voor de verwerking van deze meetgegevens.

Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) oefent in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken (EZ) de controletaak uit op het optreden van bodemdaling. Deze dienst heeft hiervoor een toetsingprocedure geformuleerd waaraan mijnbouwondernemingen gehouden zijn. Belanghebbenden in gebieden met bodemdaling kunnen uit eigen beweging ook een oordeel vormen over de verwerking van hoogtemetingen. In dit verband wordt naar onderzoek van ir. A.P.E.M. Houtenbos verwezen. Daarnaast is sprake van wetenschappelijke ontwikkelingen in de researchomgeving van de TU Delft, TNO en Deltares.

De Technische Commissie voor Bodembeweging (Tcbb), ingesteld door de minister van Economische Zaken, is betrokken bij de advisering over winningplannen en speelt uit dien hoofde een rol bij het beoordelen van resultaten van bodemdalinganalyses. Zij ondervindt bij haar functioneren dat er geen eensluidende opvatting bestaat ten aanzien van de methodiek voor het verwerken van hoogtemetingen om bodemdaling door delfstofwinning eenduidig vast te stellen. Over de toepassing van verschillende technieken, die onderling afwijkende resultaten kunnen opleveren, zijn bij experts meningsverschillen en bij gebruikers vragen gerezen. Verschillen in visie op de problematiek en het hanteren van andere uitgangspunten leiden tot verschillende uitkomsten voor de bodemdaling door delfstofwinning.

Aangezien inzicht in het bodembewegingsgedrag essentieel is bij de beoordeling van effecten die worden of kunnen worden veroorzaakt door menselijke activiteiten, zoals gas-, olie- en zoutwinning, is een breedgedragen en wetenschappelijk gefundeerde mening over de toepasbaarheid van verschillende methodieken onmisbaar. Met de bedoeling om meer duidelijkheid en zo mogelijk meer eenheid te bereiken en ter zake een onafhankelijk advies te kunnen uitbrengen aan de minister heeft de Tcbb een werkgroep 'Methodiek verwerking hoogtemeting' ingesteld.

De werkgroep heeft als doel de toepasbaarheid van verschillende dataverwerkingsmethoden voor de beoordeling van effecten van menselijke activiteiten die bodembeweging veroorzaken, vast te stellen. Het uitvoeren van de relatieve hoogtemetingen zelf levert geen discussie op en kan buiten beschouwing gelaten worden. De deskundigheid daarvan is erkend en wordt breed gedeeld. De werkgroep heeft zich in haar studie en beoordeling primair gericht op de verwerking van relatieve hoogtemetingen.

De samenstelling van de werkgroep is:

Prof. dr. ir. F.B.J. Barends, lid Tcbb

Prof.dr.ir. J. Blaauwendraad, lid Tcbb

Ir. F. Kenselaar, Gemeentewerken Rotterdam

Prof. ir. C. Kenter, NTNU Trondheim en voormalig medewerker Shell

Prof. Dr.-Ing. habil. R. Klees, TU Delft

Prof. Blaauwendraad is opgetreden als voorzitter van de werkgroep en mw. ir. M. Hounjet van Deltares als secretaris. Aan J.M. van Herk van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is de gelegenheid geboden om de vergaderingen als waarnemer bij te wonen.

2 Probleemstelling en werkwijze

2.1 Probleemstelling

De verschillen bij bodemdalinganalyses betreffen zaken als het wel of niet willen betrekken van later bijgeplaatste peilmerken, het benutten van à priori informatie, het wel of niet gebruiken van een of meer vaste peilmerken en de claim om een gemeten hoogteverandering te kunnen scheiden in delen naar verschillende oorzaak. De werkgroep heeft zich tot probleem gesteld hoe we in Nederland kunnen komen tot een eensluidende aanpak voor het eenduidig vaststellen van bodemdaling door delfstofwinning.

In het algemeen kan bodemdaling meer dan één oorzaak hebben. Delfstofwinning in de diepe ondergrond en daardoor compactie van diepgelegen lagen is er daarvan slechts één. Daling van de bodem aan het oppervlak treedt ook op door veenoxidatie en/of bij aanpassing van het peil van oppervlaktewater. Daling van de bodem aan het oppervlak kan ook het gezamenlijke resultaat zijn van twee verschillende interfererende velden voor delfstofwinning. De beoogde eenduidige aanpak moet in staat zijn het aandeel van diverse oorzaken op objectieve wijze, dat wil zeggen transparant en reproduceerbaar, te scheiden.

Een onderwerp dat in dit rapport op een aantal plaatsen zal terugkomen is het onderscheid tussen geomechanische modellen en geodetische metingen. Een geomechanisch model wordt gemaakt door de mijnbouwonderneming op basis van de gesteldheid van de diepe en ondiepe ondergrond en verandering van druk in de diepe ondergrond door delfstofwinning. Geodetische metingen zijn observaties aan het bodemoppervlak om veranderingen in de hoogteligging vast te stellen. De werkgroep moest ook de vraag onder ogen zien wat het meest wenselijk is: moeten we geodesie en geomechanica streng van elkaar gescheiden houden of juist integreren.

Geodetische metingen leveren met een hoge nauwkeurigheid informatie over de werkelijk opgetreden bodemdalingverschillen tussen meetpunten. Deze informatie wordt op twee verschillende manieren gebruikt. Dat gebeurt ten eerste ter controle van de verwachte bodemdaling zoals opgenomen in het winningplan en ten tweede ter verbetering van het geomechanisch model dat is gebruikt voor het voorspellen van de verwachte bodemdaling. Voor de werkgroep heeft het accent gelegen op de controle van verwachte bodemdaling. De werkgroep heeft het niet tot haar taak gerekend om de geomechanische voorspelmethode te beoordelen.

Het maakt verschil uit wie metingen verwerkt en interpreteert, of een mijnbouwonderneming dat doet, een waterschap, of tuinders en landbouwers. Mijnbouwondernemingen moeten volgens de Mijnbouwwet verantwoording afleggen van de bodemdaling door delfstofwinning. Hun focus is dus op de bodemdaling aan het oppervlak door diepe en ondiepe effecten. Het belang van waterschappen is anders. Deze organisaties moeten met een tijdshorizon van decaden aanpassingen voor het waterbeheer plannen. Voor hen is juist de bodemdaling aan het maaiveld belangrijk, en vooral de verwachting hoe die zich in de tijd zal ontwikkelen. Voor land- en tuinbouw is de aandacht vooral gericht op het actuele grondwaterpeil en de waterkwaliteit. Individuele burgers kunnen worden geconfronteerd met ongelijkmatige zettingen van gebouwen door het veranderen van de grondwaterstand, waardoor

gebouwschade kan optreden. De werkgroep geeft zich rekenschap van de verschillende invalshoeken; zij rekent het primair tot haar taak om de daling van de diepe ondergrond eenduidig vast te stellen, maar heeft de vragen vanuit andere belangen niet uit de weg willen gaan.

Bij de uitvoering van haar werkzaamheden heeft de werkgroep zich afgevraagd wat de omvang van de problematiek is. Op enige honderden velden voor actieve delfstofwinning in Nederland zijn slechts enkele in discussie. We mogen voor ogen houden dat de gang van zaken en de wijze van interpretatie doorgaans tot grote tevredenheid is geregeld; slechts incidenteel is er sprake van verschillen in interpretatie, wat dan grote mediaaandacht kan krijgen. Uiteraard is dat voor betrokkenen ter plekke van grote betekenis, maar landelijk gezien is er grosso modo niet sprake van een uit de hand gelopen situatie.

Niet helemaal hetzelfde als frequentie, maar er wel aan gekoppeld, is de notie van betrouwbaarheid. Winningplannen moeten een verwachting bevatten ten aanzien van de ontwikkeling van de bodemdaling door delfstofwinning in de tijd. Met de productie zijn decaden gemoeid; in de loop van de tijd vindt calibratie van het model plaats en kan het productieschema wijzigen. De vraag blijft open hoe belangrijk het is om strikt vast te houden aan de oorspronkelijk verwachte bodemdaling. Die wordt in centimeters nauwkeurig geformuleerd op basis van een 'best guess' van het geomechanisch model voor het betrokken veld en op basis van een planning voor de productie. Een zo geformuleerde bodemdaling kan ten onrechte grote betrouwbaarheid worden toegedacht. En het model heet snel onbetrouwbaar als in de loop van tijd afwijkingen optreden. De vraag kan worden gesteld of dit recht doet aan de verwachting voor bodemdaling. Voor waterschappen is aan de eis van betrouwbaarheid sneller voldaan dan voor ondernemers in land- en tuinbouw. Voor de laatste zijn centimeters verschil bepalend voor goede of slechte oogsten. De vraag is of zij wel gebaat zijn bij een nauwkeurige voorspelling van de bodemdaling. Is voor hen niet veel belangrijker hoe adaptief het waterschap de optredende bodemdaling kan volgen? Als fijnregeling te wensen overlaat, heeft de land- en tuinbouw nog steeds een probleem, ook als de bodemdaling volgens verwachting verloopt. In die zin kunnen we het belang van betrouwbaarheid van modellen nuanceren. Moeten we niet leren om realistischer om te gaan met onnauwkeurigheden?

2.2 Werkwijze

De werkgroep heeft gesprekken gevoerd met direct betrokken methode-ontwikkellende deskundigen van SodM en TNO-Deltares, alsmede met Houtenbos. Daarnaast is gesproken met toepassingsdeskundigen van de NAM. De ontwikkelingsdeskundigen hebben de wetenschappelijke hoofdkeuzes in de eigen methode uiteengezet. De bijeenkomst met de NAM is meer toegespitst geweest op ervaring in het gebruik van de verschillende methoden, op de noodzaak van subjectieve onderstellingen bij het toepassen en op wensen van de kant van de mijnbouwonderneming.

De werkgroep heeft in oktober 2008 een eerste rapport uitgebracht aan de Tccb, die dat in haar vergadering van 13 november 2008 heeft vastgesteld. De Tccb heeft besloten het rapport uit te brengen als 'groene versie' en te verspreiden onder betrokken partijen met de uitnodiging erop te reageren. De Tccb heeft op 19 juni 2009 een workshop georganiseerd waarin hoofdpunten uit het commentaar op de 'groene versie' zijn gemeld en waaraan sprekers op uitnodiging een presentatie verzorgden. De dagindeling en de lijst van genodigde deelnemers is opgenomen als Bijlage A. De werkgroep heeft op basis van de voordrachten

en de discussie de 'groene versie' van haar rapport bewerkt tot een definitief rapport en heeft dat uitgebracht aan de Tcbb. Deze heeft er op 5 november 2009 instemming mee betuigd en heeft het advies aangeboden aan de minister van Economische Zaken.

3 Proces en modellen

Bij het verlenen van een vergunning voor delfstofwinning speelt de verwachte daling van de bodem een belangrijke rol. Deze verwachting komt voort uit een reservoirmodel in combinatie met een geomechanisch model. Tijdens het productieproces worden geodetische metingen uitgevoerd met als taak de daadwerkelijk aan de delfstofwinning toe te kennen bodemdaling te bewaken.

In dit hoofdstuk worden vijf afzonderlijke fasen in het bewakingsproces van de door delfstofwinning geïnduceerde bodemdaling beschouwd. Ook wordt ingegaan op de drie typen modellen die hierbij worden gebruikt: reservoirmodel, geomechanisch model en geodetisch model.

3.1 Het proces

Tijdens het productieproces worden de volgende fasen onderscheiden:

1. vaststellen van de te verwachten bodemdaling door delfstofwinning (geomechanisch bepaald);
2. inrichten van een meetnetwerk voor bodemdalingwaarneming;
3. analyse van de geodetische metingen (geodetisch bepaald);
4. confrontatie van de geodetisch bepaalde bodemdaling met de verwachte geomechanisch bepaalde bodemdaling;
5. aanpassing van de modellen en meetnet.

Conform de opdracht wordt in dit rapport voornamelijk ingegaan op de geodetische analyse en de confrontatie van de geodetisch bepaalde bodemdaling met de verwachte (geomechanisch bepaalde) bodemdaling. De inrichting van een meetnetwerk kan hier niet los van worden gezien en daarom worden in het rapport ook aanbevelingen gedaan voor het inrichten van het geodetisch meetnetwerk.

3.1.1 Vaststellen van de te verwachten bodemdaling

Op basis van geologische onderzoeken en geomechanische gegevens worden verwachtingen van geïnduceerde bodembeweging als welomschreven scenario's gedefinieerd (productieplan, reservoir- en geomechanisch model). De beschikbare gegevens zijn afkomstig van exploraties en verkenningen uitgevoerd door de betreffende winningsmaatschappij(en) en van ervaringen in de regio. De scenario's, vastgesteld in overleg met SodM en lokale betrokkenen, geven een voorlopig beeld van mogelijke bodembewegingen (geomechanisch bepaalde bodemdaling) die bij verschillende delfstofwinningsstrategieën kunnen worden geïnduceerd.

3.1.2 Inrichten van een meetnetwerk voor bodemdalingwaarneming

Bij de inrichting van een passen meetnetwerk gaat het om de keuze van het aantal en de ligging van peilmerken, de fundering van de peilmerken en de manier hoe de metingen op of tussen de peilmerken worden uitgevoerd. Hierbij moet met een aantal factoren rekening worden gehouden zoals een voldoende overtaligheid en de verwachte bodemdaling, die volgt uit het reservoir-geomechanisch model. Van cruciaal belang voor de geodetische analyse is dat de peilmerken zodanig worden ingericht dat de gevoeligheid voor maaiveld dalingen of

andere effecten op de verticale positie, die niets te maken hebben met de bodemdaling door delfstofwinning, geminimaliseerd worden.

3.1.3 Analyse van de geodetische metingen

Bij de geodetische analyse, ook wel geometrische analyse genoemd, gaat het om het schatten van de door delfstofwinning veroorzaakte bodemdaling uit de geodetische meetgegevens. Voor zover hiervoor waterpassen of InSAR wordt gebruikt dient men er rekening mee te houden dat deze metingen zonder additionele aannames geen uitslag kunnen geven over de bodemdaling op een punt, maar slechts kunnen aangeven hoe een punt ten opzichte van een andere punt is gedaald. Anders gezegd, uit waterpassen of InSAR kan het verschil in bodemdaling tussen twee punten van het meetnetwerk worden bepaald. Dit verschil wordt in dit rapport 'relatieve bodemdaling' genoemd. Met een keuze van een referentie kan een absolute bodemdaling ten opzichte van de referentie worden verkregen, die van belang is voor de beoordeling van mogelijke omgevingseffecten (waterhuishouding, zakkingschade). De gekozen referentie kan een stabiele meetbout zijn of een berekend niveau (nulmeting), waarbij het van belang is om effecten van autonome of natuurlijke zakking, bijvoorbeeld door bodemklink of -kruip, uit te sluiten. De analyse van de meetgegevens voor een bepaald gebied kan geschieden voor een specifieke meetcampagne (epoche) of voor een serie meetcampagnes. In het laatste geval worden aannames gedaan over de samenhang in ruimte en tijd.

Tijdens de geodetische analyse dient men rekening te houden met verschillende aspecten zoals de keuze van het functiemodel (wiskundig verband tussen meting en bodemdaling), de keuze van het stochastisch model (o.a. waarnemingsruis), de keuze van een model voor mogelijke bewegingen van meetpunten ten opzichte van de bodem (meetpuntspecifieke beweging), het schatten van parameters van het stochastisch model (schatten van o.a. de meetruis), en mogelijke onregelmatigheden in de metingen zoals grove meetfouten, uitschieters, puntidentificatiefouten etc.

Het resultaat van de analyse is een geodetisch bepaalde bodemdaling (bij gebruik van GPS) of relatieve bodemdaling (bij gebruik van waterpassen of InSAR). De presentatie van dit beeld is gewoonlijk in de vorm van geïnterpoleerde hoogtelijnen over het beschouwde gebied of per peilmerk in de tijd.

3.1.4 Confrontatie van de geodetisch bepaalde bodemdaling met de verwachte geomechanisch bepaalde bodemdaling

De confrontatie van de verwachte (geomechanisch bepaalde) bodemdaling met de geodetisch bepaalde bodemdaling, kan antwoord geven op de vraag of de geomechanisch bepaalde bodemdaling significant afwijkt van de geodetisch bepaalde bodemdaling. Alhoewel bij een zorgvuldig aangelegd meetnetwerk, de geodetisch bepaalde bodemdaling veel nauwkeuriger is dan de geomechanisch bepaalde bodemdaling, kan deze vraag niet absoluut worden beantwoord ('ja/nee') maar slechts probabilistisch (met procentuele waarschijnlijkheid), omdat een geodetisch bepaalde bodemdaling niet vrij is van onzekerheden. Bijvoorbeeld kan het meetnet onvolkomenheden bevatten (inhomogeniteit, gecorreleerde autonome bodemdaling) en worden bij de geodetische analyse van de metingen aannames gedaan, die invloed hebben op het resultaat. Zeker in het beginstadium van de geodetische metingen kan de onzekerheid van de geodetisch bepaalde bodemdaling wat groter zijn dan na een aantal jaren. De onvolkomenheden van de geodetisch bepaalde bodemdaling impliceren de toepassing van statistische toetsmethodes, onder in acht neming

van de onnauwkeurigheid van de geodetisch bepaalde bodemdaling. Afhankelijk van de situatie beperkt de confrontatie zich tot de maximale bodemdaling.

3.1.5. Aanpassing van de modellen

Indien de conclusie is dat de geodetisch bepaalde bodemdaling significant afwijkt (in grootte en/of vorm) van de geomechanisch bepaalde bodemdaling, dient het reservoirmodel (vorm, grootte, drukverdeling) en/of het geomechanisch model (gedrag van de aanliggende grondlagen) te worden bijgesteld. Daarbij verdient het aanbeveling de geodetische waarnemingen mee te nemen en de modellen zodanig aan te passen totdat er voldoende consistentie is tussen de geomechanisch bepaalde bodemdaling en de geodetisch bepaalde bodemdaling. De verwachting van de toekomstige bodemdaling kan vervolgens worden herzien en toekomstige meetcampagnes kunnen die vervolgens staven, eventueel met een verbeterd meetnet. Het is verstandig aanpassingen in goed overleg tussen betrokkenen vast te stellen.

3.2 Modellen

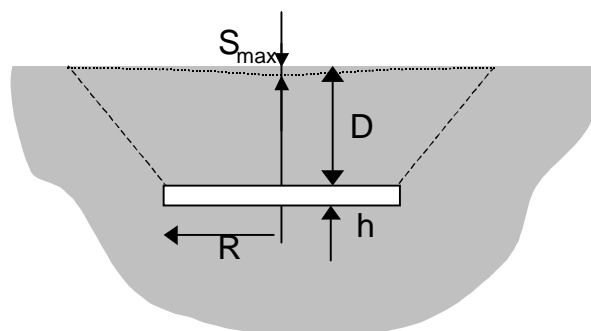
Bij het bodembewegingsmonitoren zijn drie categorieën modellen in gebruik: het reservoirmodel, het geomechanisch model en het geodetisch model.

3.2.1 Reservoir-model

Op basis van seismische en geologische gegevens wordt een statisch geologisch en petrofysisch ondergrondmodel gemaakt, dat naast het reservoir soms ook de aanliggende watervoerende lagen omvat voor zover die interfereren met transportprocessen in het reservoir (druk, temperatuur, water). De overige omgeving wordt niet in het reservoir-model opgenomen. In dit model wordt het dynamisch gedrag (drukveranderingen en stroming) van de te winnen delfstof bestudeerd om de capaciteit voor productiedoeleinden vast te stellen.

Bij voldoende resultaat wordt een proefboring uitgevoerd en met behulp van injectie en extractie worden de eigenschappen van het reservoir preciezer vastgesteld. Bij exploitatie van het veld wordt het reservoirmodel gebruikt voor verbetering van de productievoorspelling en bij aanpassingen van het productiescenario. De drukverdeling en de samendrukking (compactiegedrag via laboratoriumproeven uit boorkernen) van het reservoir worden als randvoorwaarde gebruikt in het geomechanisch model. Afhankelijk van de complexiteit van het reservoir (breuken, gelaagdheid, verzadigingsgraad, aansluitende watervoerende lagen) is vooral in de aanvang van de exploitatie de onzekerheid in de drukverdeling en compactiegedrag relatief groot.

3.2.2 Geomechanisch model



Het geomechanisch model simuleert het vervormingsgedrag van de grond rondom het reservoir ten gevolge van druk- en vormveranderingen die bij delfstofwinning worden veroorzaakt. Het belangrijkste omgevingseffect, de bodemdalingsschotel gekenmerkt door de maximale zakking S_{max} en de schotelvorm en -omvang (straal is orde $R+D$), wordt bepaald door de mechanische bodemeigenschappen, de geïnduceerde drukverdeling in het reservoir en de daarmee samenhangende reservoir-compactie en de omvang en diepteligging van het reservoir. Ook spelen soms aanliggende watervoerende grondlagen een rol, als de lokale waterdruk daar beïnvloed wordt door de delfstofwinning.

In de praktijk van geomechanische modellering van bodemdaling door delfstofwinning (olie- of gasvelden) worden verschillende niveaus van complexiteit gehanteerd. De eenvoudigste is het Geertsma model dat de maximale bodemdaling S_{max} relateert aan de reservoir-karakteristieken, zoals drukdaling, reservoirdikte en effectieve reservoir-compressibiliteit (compactiecoëfficiënt).

Is er ook sprake van na-ijling door kruip, nabije watervoerende lagen of kleilagen in het reservoir dan kan die worden meegenomen met een extra tijdsafhankelijk effect. Observatie in kleine gasreservoirs (Rotliegendes) toont een retardatietijd van minder dan 1 jaar. Het Amelandveld geeft een retardatietijd van ruim 3 jaar.

De nauwkeurigheid van de berekende bodemdaling hangt samen met de nauwkeurigheid van de samenstellende factoren, waarbij de effectieve compactiecoëfficiënt het slechtst bekend is (zeker bij de aanvang van de winning is een afwijking van 100% niet ongebruikelijk). De retardatietijd is belangrijk waar de kruip samenhangt met skelet collapse of aanliggende actieve watervoerende lagen een rol spelen. In het laatste geval is de drukval minder maar de dalingskom groter.

Voor kleine reservoirs (dat wil zeggen klein ten opzichte van hun diepte) volstaat het Geertsma model. Voor grotere reservoirs kan die ook gebruikt worden per reservoirzone. Het totaaleffect wordt dan via superpositie samengesteld. Voor grote reservoirs die aanmerkelijke bodemdaling veroorzaken zijn bovenstaande formules onvoldoende nauwkeurig en gebruikt men geavanceerde numerieke rekenmodellen waarin het proces van drukverlaging en het effect ervan op de omgeving op basis van fysische wetten wordt gesimuleerd (differentiaalmodellen en gedragsmodellen). Hierbij is meer mogelijk maar is ook meer informatie vereist, die gewoonlijk beschikbaar komt na observatie en interpretatie, in de loop van het exploitatieproces. De onzekerheid van parameters die de bodemdaling bepalen neemt af met het verloop van het productieproces.

Bij de geomechanische modellering van bodemdaling door zoutwinning (Halite winning) is het gedrag van het zout de complicerende factor. Er wordt een specifiek geomechanisch model gebruikt, dat gekalibreerd wordt aan de gemeten deformaties. De cavernegeometrie kan in het algemeen worden bepaald met akoestische technieken, terwijl (uniforme) druk en temperatuur in de caveerne relatief nauwkeurig bekend zijn.

De ervaring leert dat de diepe compactie zich gewoonlijk geleidelijk verspreidt tot een vloeiende bodemdalingkom aan het maaiveld, waarvan de omvang groter is dan het onderliggende winningveld. Deze kom vormt de basis van de ruimtelijke correlatie tussen de geïndiceerde dalingen in de meetpunten. Bij zoutcavernes zal zich, als het dak bezwaken is meer een schoorsteenvormige zakking voordoen aan het maaiveld. Bij winning is er sprake

van daling en bij gasopslag van stijging van de peilmerken. Bij convergerende zoutcavernes kan op enige afstand geringe bodemstijging optreden. De bodemdaling die wordt geïnduceerd door delfstofwinning is gewoonlijk monotoon in de tijd waarbij naijling kan optreden door kruip of effecten van aanliggende diepe watervoerende lagen.

Bij de geomechanische modellering van bodemdaling ten gevolge van gaswinning zijn de invoergegevens, met name de stijfheidsgegevens van de overburden en de stijfheid van het reservoirgesteente, het meest onzeker; de reservoirgeometrie en drukveranderingen in het reservoir zijn meestal beter bekend. Bij reservoirs in een breukgebied is dit minder stellig. De bodemdaling is echter het minst afhankelijk van de stijfheid van de overburden, zodat de grote onzekerheid hierin minder uitmaakt. De bodemdaling aan het maaiveld is dan het geïntegreerde effect van de compactie in meerdere relevante reservoircompartimenten, zodat de precieze druk- en stijfheidsverdeling in het reservoir en de reservoirgeometrie minder relevant zijn. Wel is de absolute effectieve stijfheidswaarde (compactiecoëfficiënt) van het reservoir van belang en deze blijkt met labproeven op boorkernen niet voldoende betrouwbaar te kunnen worden bepaald. Daarom is te allen tijde calibratie aan de gemeten bodemdaling noodzakelijk, bijvoorbeeld via stochastische inverse methoden, waarbij, uitgaande van een eerste beste schatting, gezocht wordt naar een best passende oplossing binnen de bandbreedte van zowel de gemeten bodemdaling als de geomechanische modelparameters.

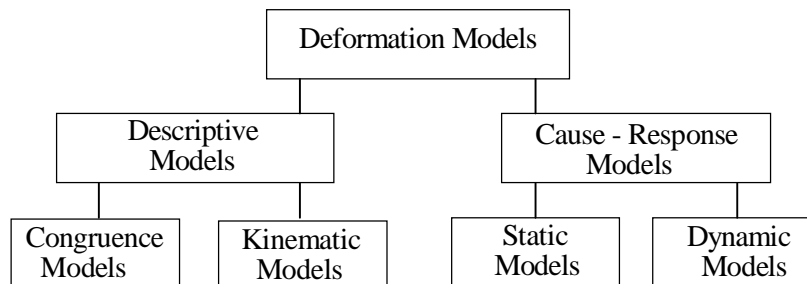
Met behulp van resultaten van de geodetische analyse worden geomechanische modellen gekalibreerd en vervolgens gebruikt voor ruimtelijke inter- en extrapolatie (contourlijnenkaarten) en voor extrapolatie in de tijd (voorspellingen), waarbij rekening wordt gehouden met het vigerende productiescenario en relevante geomechanische invloeden.

3.2.3 Geodetisch model

Binnen FIG (International Federation of Surveyors) is een visie ontwikkeld ten aanzien van modellen en terminologie voor de analyse van geodetische metingen. In de jaren zeventig en tachtig van de 20^e eeuw was het hoofdprobleem de identificatie van onstabiele referentiepunten en het ontwikkelen van een uniforme theorie voor de geometrische analyse van deformatiemetingen. Parallel in de jaren tachtig is werk geïnitieerd om de deformatieanalyse uit te breiden naar de fysische interpretatie en het modelleren van de relatie tussen oorzaak en de resulterende deformaties. Het gaat om een dieper en breder begrip van deformatiefenomenen, die in feite het resultaat zijn van dynamische processen. Deformatieanalyse moet in wezen gezien worden vanuit een interdisciplinair gezichtspunt. Disciplines als civiele techniek, geotechniek, filter- en regeltechniek, systeemtheorie en signaalverwerking komen in beeld. Tegelijk groeide de behoefte om een heldere en eenduidige terminologie te hanteren.

Traditioneel is het doel van deformatiemetingen het vaststellen van bewegingen (verplaatsingen) van een object in plaats en tijd. Nu is het doel van geodetische deformatieanalyse om verder te gaan: van een zuiver fenomenologische beschrijving van de deformatie naar een analyse van het proces dat aan de deformatie ten grondslag ligt, d.w.z. het incorporeren van de aandrijvende kracht van de deformatie (oorzaken) en de fysische eigenschappen van het beschouwde object of gebied. Het object, de krachten die erop werken en de resulterende deformaties worden samen beschouwd als een dynamisch systeem. 'Geodetische deformatieanalyse' is dus 'Geodetische analyse van dynamische processen'.

De consequentie hiervan is dat bij het doen van technische metingen, tot op zekere hoogte, de dynamica van de onderliggende processen begrepen moet worden. Daarom zijn de meest algemene en allesomvattende modellen dynamisch. Met het invoeren van vereenvoudigingen kunnen hiervan congruente, kinematische en statische modellen worden afgeleid. Zo onderscheidt FIG vier categorieën, waarvan twee 'descriptive models' (beschrijvende modellen: congruent en kinematisch) en twee 'cause-response models' (oorzaak-gevolg modellen: statisch en dynamisch). Onderstaand schema toont de vier categorieën.



De kenmerken van de vier genoemde categorieën zijn:

Beschrijvende modellen

- Congruent model
 - tijd zit niet in het model
 - geen oorzaak beschouwd
 - geen verandering in de tijd
- Kinematisch model
 - bewegingen als functie van tijd
 - geen oorzaak beschouwd
 - permanent in beweging

Oorzaak-gevolg modellen

- Statisch model
 - tijd zit niet in het model
 - verplaatsingen als functie van (fysische) oorzaken
 - geen verandering in de tijd
- Dynamisch model
 - bewegingen als functie van tijd en (fysische) oorzaken
 - permanent in beweging

De eerste twee categorieën zijn puur beschrijvend en de laatste twee betrekken de fysische oorzaak in het model. In de volgende paragrafen beschrijven we drie methoden: de methode SodM, de methode Houtenbos en de methode TNO-Deltares. De methoden SodM en Houtenbos laten zich beide inpassen in de rubriek beschrijvende modellen. De SodM methode past in de rubriek congruent model en de methode Houtenbos behoort tot de categorie kinematisch model. Beide methoden gaan bewust uit van een scherpe scheiding tussen geodesie en fysica. De TNO-Deltares methode past geheel in de rubriek dynamisch model. In dat model wordt bewust een integratie van geodesie en geomechanica nagestreefd.

De werkgroep vertaalt de FIG-filosofie als volgt: Beschrijvende modellen zijn geschikt voor de confrontatie van de geomechanisch bepaalde bodemdaling met de geodetisch bepaalde bodemdaling. Indien afwijkingen tussen geomechanisch en geodetisch bepaalde

bodemdaling statistisch significant zijn, worden de oorzaken hiervan onderzocht en wordt op basis daarvan een nieuwe schatting gemaakt voor de in de toekomst te verwachten bodemdaling. Daarbij wordt een dynamische methode toegepast, om optimaal gebruik te maken van alle beschikbare informatie (geodetische waarnemingen en kennis over het bodemdalingproces).

4 Methodieken

De werkgroep heeft drie methodieken voor de verwerking van hoogtemetingen beschouwd, namelijk de aanpak van SodM, de aanpak van Houtenbos en de aanpak van TNO-Deltares. Deze methodieken worden in dit hoofdstuk kort beschreven en beoordeeld met betrekking tot de plaats ervan in het totale proces van bodembeweging door delfstofwinning.

4.1 Methode SodM (Staatstoezicht op de Mijnen)

SodM heeft in 2007 een toetsingsprocedure ontwikkeld op basis van 'iteratieve voorwaartse modellering'. In de SodM toetsingsprocedure worden de SodM-methode en de SodM-toets onderscheiden, waarbij de laatste algemene geldigheid heeft, ook voor andere methoden. De werkgroep heeft kennis over de methode verworven door een presentatie en een in Bijlage B opgenomen bijdrage van SodM waarin de toezichthouder zelf de belangrijkste zaken van de methode en toets heeft geformuleerd.

4.1.1 SodM-methode

De SodM-methode gaat uit van berekening van de waterpasmetingen per epoche (per meetcampagne) onder aanname van één stabiel referentiepunt. De resulterende differentiestaat bevat per peilmerk verschillen met de hoogte uit de nulmeting voor delfstofwinning. De voorspelde bodembeweging op basis van geomechanische modellering wordt vervolgens geconfronteerd met de geconstateerde peilmerk-hoogteveranderingen op basis van de waterpasmetingen.

Vereffening

Uit de gewaterpaste hoogteverschillen tussen peilmerken worden hoogten berekend ten opzichte van de aangenomen hoogte van één referentiepeilmerk. Voor deze 'vrije-net vereffening' per epoche wordt gebruik gemaakt van het standaard landmeetkundig softwarepakket Move3. Indien het meetnet in alle epochen kan worden aangesloten op hetzelfde, stabiele referentiepunt resulteert per peilmerk een serie hoogten in de tijd. Per peilmerk kunnen hoogteveranderingen in de tijd dan eenvoudig worden bepaald door van elke hoogte de hoogte van de eerste epoche (de nulmeting) af te trekken.

De resulterende tabel met hoogteveranderingen voor alle peilmerken (differentiestaat) vormt de basis voor de confrontatie met de geomechanische predictie van de bodemdaling. De differentiestaat bevat discrete waarden voor de geconstateerde bodembeweging in plaats (per peilmerk) en tijd (per epoche). De voorspelde bodemdaling door delfstofwinning resulteert in continue tijd- en plaatsafhankelijke bodemdalingwaarden, die de mijnbouwondernemingen baseren op een ondergrondse modellering van de effecten van delfstofwinning aan maaiveld. De gegevens uit deze twee informatiebronnen worden met elkaar vergeleken en getoetst.

Toetsing

Controle op meetfouten vindt plaats door middel van standaard geodetisch-statistische toetsing met Move3. Omdat deze toetsing per meetnetwerk (epoche) plaatsvindt is op dat moment geen toetsing mogelijk op afwijkend gedrag in de tijd van peilmerken of instabiliteit van het referentiepunt.

Meetmethode

Omdat toetsing op meetfouten slechts plaatsvindt op basis van het meetnet per epoche is het noodzakelijk dat de individuele meetnetten voldoende betrouwbaar zijn, dus een ruime overtaligheid aan metingen bevatten. Ook het waterpastraject naar het referentiepunt moet zo zijn opgezet dat controle op meetfouten mogelijk is.

Het referentiepunt dient zorgvuldig te worden gekozen zodat het naar verwachting over de hele periode stabiel is. Het punt dient tegelijkertijd bij voorkeur nabij het te analyseren gebied te liggen. Een lang traject van waterpasmetingen tot een verafgelegen referentiepunt leidt tot een lage nauwkeurigheid van de berekende hoogten en hoogteveranderingen, en zou daarmee een scherpe vergelijking tussen voorspelde en gemeten bodemdaling onmogelijk maken.

Omdat de differentiestaat hoogteveranderingen sinds de nulmeting bevat komen voor de analyse in eerste instantie alleen de peilmerken in aanmerking die vóór aanvang van de winning al deel uitmaakten van het netwerk (de zogenaamde 'primaire' peilmerkenset).

4.1.2 SodM-toets

Alle gemeten peilmerk-hoogteveranderingen (in de differentiestaat) worden vergeleken met de uit geomechanische modellering voorspelde bodemdaling ter plaatse. Voor de verschillen wordt een vaste drempel van 13 mm gehanteerd. Daarnaast wordt de Root-Mean-Square (RMS) berekend van de verschillen voor alle beschouwde peilmerken. Deze mag niet groter worden dan de helft van de vaste drempel. De waarde 13 mm is afgeleid uit een gemiddelde standaardafwijking van de berekende hoogten. Daarbij wordt geen rekening gehouden met de beperkte nauwkeurigheid van de geomechanische modellering. In de SodM toetsprocedure wordt de voorspelde bodemdaling op basis van geomechanische berekeningen als één mogelijk scenario (zonder kansverdeling) van wellicht vele mogelijke scenario's beschouwd.

De hoogteverschillen (in de differentiestaat) en de modelberekeningen, die wederzijds de toetsing niet doorstaan hebben, worden nader onderzocht en mogelijk gecorrigeerd. In geval van niet-geaccepteerde hoogteverschillen wordt onderzocht of dit een peilmerkspecifiek gedrag is door bijvoorbeeld een veldinspectie naar de status van de peilmerken uit te voeren. Naar bevind van zaken kan het nodig zijn bepaalde peilmerken als ondeugdelijk en onbetrouwbaar te verwerpen.

Systematisch verworpen modelberekeningen (in plaats en/of tijd) verlangen een nadere analyse en bijstelling van het geologische model, het reservoirmodel, het geomechanische model of een combinatie hiervan om een betere verklaring te krijgen van de gemeten peilmerkdalingen. In principe gaat het aanpassingsproces door totdat alle verschillen in plaats en tijd tussen de hoogteverschillen en de modelberekeningen onder de kritische toetsdrempel liggen.

4.1.3 Beoordeling van de SodM-methode en -toets door de werkgroep

SodM-methode

De verwerkingsmethode is eenvoudig en inzichtelijk. De berekening van hoogten per epoche kan met standaard geodetische software als Move3 plaatsvinden. Analyse van de hoogtevariëaties in de differentiestaat kan bijvoorbeeld met Microsoft Excel plaatsvinden. Bovendien veronderstelt de methode geen enkele aanname over de oorzaak van de bodembeweging bij de verwerking van de meetgegevens. Confrontatie met geomechanische modellen en productiegegevens vindt pas na verwerking van de meetgegevens plaats.

De SodM-methode is een breuk met het verleden waarin het waterpasnetwerk werd aangesloten op meerdere, stabiel veronderstelde NAP-referentiepunten. In feite wordt niet meer de absolute bodemdaling t.o.v. NAP bepaald, doch slechts de relatieve beweging van de peilmerken onderling. Voordeel daarvan is dat het netwerk zich niet uit hoeft te strekken tot ver buiten de invloedssfeer van bodemdaling. Zeker in het noorden en westen van Nederland zijn stabiele referentiepunten schaars. Voorheen was de analyse op stabiliteit van de referentiepunten dan ook een belangrijk en lastig deel van de dataverwerking. Voor de methode is echter nog steeds één stabiel referentiepunt noodzakelijk en dat moet daarom aan strenge voorwaarden voldoen. Het referentiepunt moet zowel stabiel zijn over een lange periode als nabij het bodemdalinggebied liggen. Eventuele instabiliteit van het referentiepunt leidt tot schijnbare daling of stijging van peilmerken en kan lastig worden gecontroleerd.

Waterpasnetwerken hebben in de regel een lage overtaligheid. Ze bestaan veelal uit grote kringen, terwijl de referentiepunten soms in een 'losse poot' zijn opgenomen. Op basis van een berekening per epoche is dus slechts een beperkte controle op meetfouten mogelijk, terwijl niet ontdekte meetfouten invloed hebben op de berekende hoogten en hoogteverschillen van meerdere peilmerken. De methode verlangt daardoor dat strenge eisen worden gesteld aan het ontwerp van het waterpasnetwerk.

De oorspronkelijke gewaterpaste hoogteverschillen zijn ongecorrigeerd. De vereffende peilmerkhogten per epoche zijn echter ruimtelijk gecorrigeerd en bovendien neemt hun nauwkeurigheid af met de afstand in het netwerk t.o.v. het referentiepunt. De methode houdt hier geen rekening mee maar hanteert een gemiddelde standaardafwijking van 3 millimeter voor alle hoogten. Deze vereenvoudiging kan van grote invloed zijn op de resultaten van de toetsing en is onnodig omdat een volledige beschrijving van de nauwkeurigheid van de hoogten beschikbaar is na berekening met bijvoorbeeld Move3.

Op invloed van resterende meetfouten of een instabiel referentiepunt wordt niet getoetst. De methode vereist daarom een hoge kwaliteit van de meetnetten, peilmerken en het referentiepunt. Er zou meer gebruik kunnen worden gemaakt van de al ontwikkelde toetsingsstrategieën waarbij uit een groot aantal alternatieven naar de meest waarschijnlijke hypothese wordt gezocht. Juist omdat bodemdaling in Nederland een complex verschijnsel is, zijn in het recente verleden uitgebreide toetsingsprocedures ontwikkeld.

De terminologie m.b.t. primaire en secundaire peilmerkensets roept verwarring op met de door het NAP gehanteerde primaire en secundaire waterpassingen en peilmerken en kan beter worden vermeden. Het uitgangspunt dat alleen (primaire) peilmerken in de toetsing worden betrokken die al aanwezig waren in de nulmeting is een onnodige beperking van de methode. Ook van peilmerken die later in de meting worden betrokken dragen de hoogteveranderingen immers bij aan de beschrijving van de opgetreden bodemdaling en de validatie van het geomechanisch model. Zeker boven oudere productievelden kunnen in de loop van tijd zoveel oorspronkelijke peilmerken zijn verdwenen of verstoord dat daarmee nauwelijks nog een zinvolle analyse mogelijk is.

SodM toets

De toetsingsprocedure komt erop neer dat elke door waterpassing verkregen peilmerkhogteverandering uit de differentiestaat wordt vergeleken met de voorspelde bodembeweging volgens het geomechanisch predictiemodel. De daarbij gehanteerde tolerantie van 13 mm is een grove vereenvoudiging van de daadwerkelijke onnauwkeurigheid

van de geodetisch bepaalde bodemdaling. De RMS-toets zou beter vervangen kunnen worden door een statistische toets die toegesneden is op de inhoud van het winningsplan. Zolang niet alle uit meting verkregen peilmerk-hoogteveranderingen binnen de tolerantie overeenkomen met de geomechanische predictie wordt de toetsing niet geaccepteerd. De methode laat daarbij de keuze tussen 'ondeugdelijk peilmerk' en 'ondeugdelijk geomechanisch model' over aan de analist op basis van bijvoorbeeld een visuele inspectie van het peilmerk. Het is daarom noodzakelijk dat deze beslissingen transparant en verifieerbaar worden beschreven.

Conclusie van de werkgroep

De methode SodM is eenvoudig en inzichtelijk. Als verwerkingsmethode van geodetische waarnemingen kent ze echter beperkingen. Samenvattend zijn de belangrijkste voor- en nadelen van de methode:

- + Eenvoudige en inzichtelijke verwerkingsmethode van geodetische metingen.
- + Voor de vereffening van waterpasnetwerken wordt standaard software (Move3) gebruikt.
- + Eenvoudige software (bijvoorbeeld Microsoft Excel) volstaat voor de analyse op bodemdaling.
- + Voor de verwerking van de geodetische metingen zijn geen aannamen m.b.t. de oorzaak van de bodembeweging nodig.

- Instabiliteit van het referentiepunt is slecht toetsbaar en van invloed op de analyse.
- Voor een goede werking van methode is een hoge betrouwbaarheid van meetnet, peilmerken en referentiepunt noodzakelijk.
- Voorkeur voor peilmerken die gemeten zijn voor aanvang van de bodemdaling.
- Statistische toetsing op waarnemingsfouten en afwijkend peilmerkgedrag is beperkt.
- Aanname van gelijke nauwkeurigheid en tolerantie voor alle peilmerken is een onnodige vereenvoudiging.

4.2 Methode Houtenbos

De werkgroep heeft kennis van de methode Houtenbos verworven door een presentatie van de methode en de in Bijlage C opgenomen bijdrage waarin de ontwikkelaar de belangrijkste zaken zelf heeft geformuleerd.

4.2.1 Beschrijving van de methode

De methode Houtenbos gaat uit van een integrale vereffening van alle waterpasmetingen, die in de loop der tijd zijn uitgevoerd. In plaats van één stabiel referentiepunt wordt de hoogte van één punt op het tijdstip van een referentiedatum vastgehouden. De vereffening levert uiteindelijk de hoogtes van alle punten op de referentiedatum en parameters van een continu tijd-plaats model van de bodemdaling. Een aantal statistische toetsen wordt uitgevoerd op specifieke onregelmatigheden in de metingen en fouten in diverse a-priori gekozen parameters. Indien nodig worden metingen verwijderd en/of parameters aangepast. De hele cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen gebeurt iteratief totdat een globale statistische toets aangeeft dat metingen en wiskundig model statistisch gezien overeenstemmen.

Vereffening

Elk gemeten hoogteverschil (uit waterpassing, InSAR en/of GPS) tussen twee punten wordt geschreven als de som van het hoogteverschil op de referentiedatum (referentiehoogteverschil), het bodemdalingverschil en het verschil in autonome beweging. Voor de meetfouten in het gewaterpast hoogteverschil wordt een normale verdeling aangenomen met middelwaarde nul en een standaardafwijking die toeneemt met de afstand tussen de meetpunten.

De bodemdaling wordt als som van een modeldaling (bodemdalingmodel) en een modelafwijking geschreven. Voor de modelafwijking wordt een normale verdeling aangenomen met een onbekende middelwaarde en een standaardafwijking die toeneemt met een zekere macht van de tijd verstreken sinds de referentiedatum. Bovendien wordt aangenomen dat de modelafwijking in de ruimte gecorreleerd is, waarbij de correlatie met toenemende afstand tussen twee meetpunten exponentieel afneemt.

Voor de autonome beweging van een meetpunt wordt een normale verdeling aangenomen met onbekende middelwaarde en een standaardafwijking, die met een zekere macht van de tijd verstreken sinds de referentiedatum toeneemt. Voor alle meetpunten wordt dezelfde (onbekende) middelwaarde aangenomen.

De middelwaarde van de modelafwijking en van de autonome beweging kunnen niet uit de gemeten hoogteverschillen tussen twee punten worden bepaald.

De hoogteverschillen op de referentiedatum en de parameters van de modeldaling worden door een integrale vereffening van alle metingen, ongeacht het tijdstip van meten, tegelijk vereffend. Na de vereffening worden diverse statistische toetsten uitgevoerd. Indien dit leidt tot aanpassing van a-priori gekozen parameters of het verwijderen van metingen en/of punten wordt de vereffening herhaald en opnieuw getoetst.

Nadat de cyclus van vereffenen, toetsten en aanpassen beëindigd is, levert de optelling van de modeldaling en de modelafwijkingen de totale relatieve bodemdaling tussen alle meetpunten op. De bodemdaling in absolute zin blijft onbekend omdat de gemeten hoogteverschillen in ruimte en tijd hierover geen informatie bevatten.

Toetsingsprocedure

Waterpasnetwerken hebben in de regel een lage overtaligheid. Daardoor is slechts een beperkte toetsing mogelijk, bijvoorbeeld op meetfouten. Door de invoering van modellen voor bodemdaling, modelafwijking en autonome beweging in één integrale vereffening van alle meetgegevens neemt de overtaligheid van het meetnetwerk sterk toe en kunnen diverse toetsen worden uitgevoerd, onder andere op fouten in de gemeten hoogteverschillen (meetfouten), peilmerkmisidentificatie, peilmerkverstoring, abnormale peilmerkspecifieke bewegingssnelheid (autonome beweging), onjuist a-priori ruisniveau, significantie van geschatte modelparameters en noodzakelijke uitbreidingen van het bodemdalingmodel.

Na de eerste vereffening wordt getoetst op onregelmatigheden in de metingen en onzuiverheden in de veronderstelde parameters voor de kansverdelingen van meetafwijkingen, autonome beweging en modelafwijkingen. Er wordt gecontroleerd op meetfouten in individuele metingen, op geïsoleerde uitschieters en sprongen in het gedrag van individuele peilmerken en op significantie van omringende peilmerken met afwijkende bewegingssnelheden. Dit kan leiden tot bijvoorbeeld het elimineren van metingen en/of punten, het aanpassen van de standaardafwijkingen voor autonome beweging, modelafwijkingen en meetafwijkingen en het aanpassen van de parameters voor de geleidelijkheid waarmee de autonome beweging en de bodemdaling zich ontwikkelen in de tijd en de ruimtelijke correlatielengte voor bodemdaling.

Elke aanpassing betreft steeds één parameter, namelijk degene die met de hoogste waarschijnlijkheid aangepast hoeft te worden. Daarna wordt opnieuw vereffend, getoetst en aangepast. De hele cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen wordt automatisch doorlopen totdat een globale statistische toets op een gekozen significantieniveau wordt geaccepteerd.

Meetmethode

De methode van Houtenbos werkt zonder aanname over één stabiel referentiepunt. Bovendien maakt de methode geen verschil tussen peilmerken, die vanaf het begin van de metingen onderdeel van het netwerk zijn en peilmerken, die later in de meting worden betrokken. Beiden dragen bij aan de beschrijving van de opgetreden bodemdaling. Tenslotte kunnen gewaterpaste hoogteverschillen samen met GPS- en InSAR-hoogteverschillen worden vereffend.

4.2.2 Beoordeling van de methode Houtenbos door de werkgroep

De methode

De methode is in wetenschappelijk opzicht up-to-date, maar vereist goede kennis van de gebruiker op het gebied van statistische methoden, vereffeningstheorie en toetsingstheorie. Het beschouwen van alle metingen in één integrale analyse maakt ook het toetsen op allerlei fouttypen mogelijk. De werkgroep beoordeelt dat positief. Het is een voordeel dat niet wordt gewerkt met een vast referentiepeilmerk, waardoor problematiek van een eventueel instabiel referentiepeilmerk wordt vermeden. Dat geldt ook voor de gelijke waardering van primaire en secundaire meetpunten, wat een voordeel is als het aantal meetpunten in de loop der jaren al behoorlijk is uitgedund.

De methode werkt met modellen voor signaal en ruis, die wederom een aantal parameters kennen, die de gebruiker aan het begin moet kiezen. Wel kan de keuze van de parameters (niet van het model!) achteraf worden getoetst, maar het blijft onduidelijk wat de kracht van deze toetsen daadwerkelijk is en welke invloed de gemaakte keuze voor een parameter heeft op de toetsing van de overige parameters.

De totale relatieve bodembeweging tussen twee plaatsen lijkt (volgens Houtenbos) nauwelijks afhankelijk te zijn van het gekozen bodemdalingmodel. Aan de andere kant worden tijdens de iteratieve vereffening nog diverse andere parameters aangepast; de keuze van het bodemdalingmodel heeft wel een significante invloed op een aantal van deze parameters. Immers is de ruime overtaligheid voor een groot deel te danken aan de introductie van het bodemdalingmodel. De methode Houtenbos bevat een cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen. Deze cyclus is volledig geautomatiseerd. Daardoor loopt de gebruiker het gevaar enigszins de controle te verliezen over het hele proces.

De complexiteit van de analysemethode en het risico voor foutief gebruik maken de methode Houtenbos primair toepasbaar voor bedrijven, die over uitgebreide geodetische expertise beschikken zoals de NAM; voor kleinere bedrijven is dit niet werkbaar en bovendien gevaarlijk in verband met de keuzes die tijdens de cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen gemaakt moeten worden. Voor deze bedrijven is een eenvoudiger aanpak geschikter.

Het primaire resultaat van de analyse is een schatting van de totale relatieve bodembeweging ongeacht de oorzaak. Daarnaast is het mogelijk de bodemdaling door afzonderlijke oorzaken

vast te stellen. Hiervoor moet een wiskundig model worden gekozen voor de bodemdaling per oorzaak en moeten de modelparameters uit de vereffende relatieve bodembeweging worden geschat. Deze stap vereist kennis over het reservoir en de geomechanische gesteldheid van de ondergrond wil men keuzes voorkomen, die fysisch onrealistisch zijn. Indien geomechanische informatie gebruikt wordt voor het opstellen van het bodemdalingmodel, wordt het resultaat afhankelijk van het geomechanisch model en kan niet meer als onafhankelijke controle worden beschouwd.

Een van de belangrijkste redenen voor het invoeren van een bodemdalingmodel is het gebrek aan meetpunten en de lage overtaligheid in meetnetwerken. Juist onder deze omstandigheden haalt de methode Houtenbos het optimale uit de beschikbare gegevens. Het is echter een vergissing om hieruit te concluderen dat de methode Houtenbos de oplossing is voor gebrekkige meetnetwerken. Toekomstige meetopzetten moeten zodanig worden gekozen, dat over de hele meetperiode voldoende meetpunten beschikbaar blijven. Hoe langer een reservoir gemeten wordt hoe meer meetpunten in de loop der jaren zullen verdwijnen. Daarnaast moet de meetopzet zodanig worden gekozen, dat een voldoende overtaligheid gewaarborgd is. Pas dan kunnen de geodetische waarnemingen op fouten worden getoetst zonder teveel a priori aannames te moeten maken over signaal en ruis.

In het kansmodel worden factoren opgenomen voor de meetprecisie, de peilmerkruis (stochastische beweging van peilmerken) en de modelruis (beperkte exactheid van het bodemdalingmodel). Daardoor ontstaat een volle variantie-covariantie matrix, die in de vereffening moet worden meegenomen. De vraag is of het kansmodel voor zowel punt- als modelruis correct is. Beide componenten zijn slecht te scheiden. Daarbij speelt de veronderstelde ruimtelijke correlatie in het kansmodel voor de bodembeweging een belangrijke rol, omdat het kansmodel voor peilmerkruis een soortgelijke correlatie niet kent. Naar mate de correlatielengte korter wordt gekozen, is een scheiding moeilijker.

De methode Houtenbos voorziet ook de mogelijkheid om voorspellingen te doen, puur op basis van de analyse van de geodetische waarnemingen. Of hiervan gebruik wordt gemaakt hangt af van de situatie. Indien de geodetische waarnemingen en het geomechanisch model consistent zijn, is niet een beschrijvende methode de meeste aangewezen, maar verdient een dynamische methode voor het maken van voorspellingen de voorkeur omdat dan optimaal gebruik wordt gemaakt van alle beschikbare informatie, zowel geometrische als fysische.

4.2.3 Conclusie van de werkgroep

De methode Houtenbos is een moderne, geavanceerde en complexe methode voor de verwerking van geodetische metingen. Samenvattend zijn de belangrijkste voor- en nadelen van de methode:

- + State-of-the-art.
- + Kent geen referentiepunt problematiek.
- + Kan verschillende waarnemingstypes verwerken, zoals waterpasgegevens, GPS metingen en InSAR-metingen.
- + Kent geen verschil tussen primaire en secundaire meetpunten.
- + Omvangrijke statistische toetsen op meetfouten, peilmerk misidentificatie, peilmerkverstoring, abnormale peilmerkspecifieke bewegingssnelheid (autonome

beweging), onjuist a-priori ruisniveau, significantie van geschatte modelparameters en noodzakelijke uitbreidingen van het bodemdalingmodel.

- Alleen geschikt voor gebruikers met een zeer goede kennis op het gebied van statistische methoden, vereffeningstheorie en toetsingstheorie.
- Automatische cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen maakt controle op het verwerkingsproces moeilijk.
- Het is niet altijd duidelijk welk effect de keuze van de kansverdelingen voor modelafwijking en autonome beweging hebben op de vereffende totale relatieve bodembeweging.
- In het geval van slechte meetnetwerken wordt het resultaat sterk beïnvloed door de aannames m.b.t. de kansverdelingen voor modelafwijking en autonome beweging en de keuze van het bodemdalingmodel.

4.3 Methode TNO-Deltares

4.3.1 Beschrijving van de methode

TNO en Deltares passen een geïntegreerde aanpak toe van geodetische data en informatie (data en proceskennis) over de ondergrondse oorzaken van daling. Dit optimaliseert de kwaliteit van de interpretatie. Deze paragraaf beschrijft de aanpak, die begint met de behandeling van de data, vervolgens de interpretatie ervan om de oorzaken te kwantificeren, en daarna kort over dalingsvoorspellingen voor beleidsscenario's.

Visualisatie van daling

Bij de visualisatie van bodemdaling blijven TNO en Deltares zo ver mogelijk weg van het gebruik van ondergrondse kennis. Daarbij streven zij naar transparantie over de gedane aannames, bijvoorbeeld in de interpolatiemethode. Dit betekent in de praktijk dat de differentiëring worden omgezet naar waarden voor de bodemdaling door te vereffenen met behulp van een gemiddeld referentieniveau, en dat met de metingen geen statistiek wordt bedreven. Om een bodemdalingkaart te maken wordt een interpolatiemethode gebruikt, waarbij standaard ook de onzekerheid wordt bepaald op grond van de onzekerheden in de meetwaarden.

Bij twijfel aan de betrouwbaarheid van een meetpunt kan de onzekerheid in het meetresultaat worden verruimd. Op grond van een helder criterium kan men kiezen een meetpunt niet mee te nemen in de visualisatie of interpretatie. Zie hiervoor ook onder het kopje "toets".

Ondergrondse oorzaken van daling – van meten tot weten

Het spectrum van beschikbare methoden om de bodemdaling en haar oorzaken te bepalen is breed. TNO en Deltares gebruiken een aanpak die in het FIG schema valt onder de categorie dynamisch modelleren. De achtergrond van deze keus is dat een zuivere ont koppeling onmogelijk is. Ook bij eenvoudige interpolatie wordt (meestal impliciet) al "iets" aangenomen over de onderliggende processen. In praktijksituaties kan eventueel, afhankelijk van de belangen die met eventuele daling zijn gemoeid, uit kosten oogpunt worden gekozen voor een minder geavanceerde aanpak. Deze keuze dient goed onderbouwd en transparant te zijn. Het is zinvol om hiervoor criteria uit te werken.

Bepaling van de daling van de bodem tengevolge van verschillende oorzaken (waaronder delfstofwinning) vereist specialistische kennis, tenzij overvloedige metingen beschikbaar zijn uit geodetische meetmethodes, die zuiver de beweging meten ten gevolge van de oorzaak

waarin men geïnteresseerd is. TNO en Deltares passen een geïntegreerde aanpak toe van geodetische data en informatie (data en proceskennis) over de ondergrondse oorzaken van daling. Dit optimaliseert de kwaliteit van de interpretatie en minimaliseert de onzekerheid. De afgelopen jaren is een dalingsinversie methode ontwikkeld, waarbij zoveel mogelijk beschikbare geodetische en ondergrondkennis kan worden gebruikt. Een a priori geomechanisch model is een belangrijke eerste stap, maar blijkt in zichzelf onvoldoende. Het is cruciaal om ook de onzekerheid van dit model mee te nemen, en, minstens zo belangrijk, de correlaties in ruimte en tijd erin.

Onderzoek bij TNO en Deltares heeft aangetoond dat het de correlaties zijn die het mogelijk maken om verschillende oorzaken uiteen te rafelen. Dit is zelfs het geval bij metingen die in aantal minder zijn dan het aantal ondergrondse vrijheidsgraden (i.e. een slecht gesteld invers probleem), of bij een bodemdalingsprofiel dat niet gevoelig is voor de precieze verdeling van zijn oorzaken (i.e. een slecht geconditioneerd invers probleem). De correlaties, in de vorm van de covariantie, zorgen voor een efficiënte regularisatie.

Een kwalitatieve onderbouwing is als volgt: als twee naburige cellen in een reservoir compacteren, zal hun signaal in de vorm van het resulterende bodemdalingsprofiel vrijwel identiek zijn. De geologische correlatie echter dicteert de verhouding van de drukdaling en de compactie tussen deze twee cellen, waardoor de onderlinge speelruimte wordt beperkt. Om de a-priori modellen met de bijbehorende onzekerheden en correlaties te creëren zijn simulaties nodig waarin zorgvuldig de geologische en andere onzekerheden worden meegenomen. Ook de data dienen zo zuiver mogelijk te worden ingevoerd: voor peilmerkmetingen zijn dit bij voorkeur de double differences in plaats en tijd, zoals die in het veld zijn gemeten. Dit omzeilt diverse aannames en mogelijke fouten bij het vereffenen van de data. TNO en Deltares bevelen aan om de dynamische modelleer aanpak te gebruiken, tenzij kan worden aangetoond dat een eenvoudiger aanpak adequaat is. Dit sluit goed aan bij de visie van de FIG. Voor praktijksituaties zouden hiervoor criteria moeten worden uitgewerkt.

Modelcalibratie en prognoses – voorspellen met modellen

TNO en Deltares doen voorspellingen van bodemdaling door middel van voorwaartse fysische modellering van de onderliggende processen. Bij gaswinning bijvoorbeeld is een dergelijke modellering gebaseerd op geologische inzichten, reservoir simulaties, en geomechanica. De parameters in de voorwaartse modellen, inclusief onzekerheid, worden zo goed mogelijk bepaald. Bodemdalingsmetingen maken het mogelijk om door middel van inversie van een algemeen geomechanisch model tot een gecalibreerd model te komen. Een gecalibreerd fysisch model kan worden ingezet om verschillende scenario's door te rekenen op hun toekomstige effect op de bodemdaling.

4.3.2 Toets

In de TNO – Deltares visie is toetsing een integraal onderdeel van de methode om bodemdaling ten gevolge van ondergrondse processen te bepalen. Een bruikbare toets is de wetenschappelijk goed gedocumenteerde χ^2 toets. Deze volgt rechtstreeks uit het inversieresultaat. De toets geeft een kwaliteitsindicatie van de fit door de resultaten van de metingen te vergelijken met de resultaten van het gecalibreerde model, met inachtneming van de standaarddeviaties in zowel de metingen als de modelparameters. Als de waarde van de χ^2 toets te groot is, wordt het resultaat van de inversie in principe verworpen. In dat geval dient in de eerste plaats de a priori informatie kritisch te worden herbeoordeeld. Vragen die daarbij aan de orde kunnen komen zijn de correctheid van het model (ten onrechte verwaarloosde

processen, juiste procesbeschrijving?) en de geschatte onzekerheid in modelparameters. Een te kleine waarde van de χ^2 toets geeft aan dat de geschatte onzekerheid veel groter is dan de werkelijke onzekerheid. Een situatie die in synthetische testen vaak voorkomt, maar in werkelijkheid minder waarschijnlijk is.

De vergelijking tussen gemeten daling en met het gecalibreerde model gemodelleerde daling kan ook worden gebruikt om individuele meetpunten met een afwijkend gedrag op te sporen. Meetpunten waarbij het verschil groter is dan 2 maal de standaarddeviatie dienen kritisch te worden bezien. Twijfel aan de betrouwbaarheid van een meetpunt kan aanleiding zijn om op onderbouwde wijze de onzekerheid in de meting te verruimen. Twijfel kan bijvoorbeeld ontstaan door aanwijzingen uit het veld voor een slechte fundering van het meetpunt. Op grond van een helder criterium kan men kiezen een meetpunt helemaal niet mee te nemen in de visualisatie of interpretatie, wat overeenkomt met grote verruiming van de onzekerheid.

4.3.3 Beoordeling van de methode TNO-Deltares door de werkgroep

De dynamische methode van TNO-Deltares biedt de meeste mogelijkheden voor de analyse en interpretatie van bodemdalingprocessen. Door het geïntegreerd gebruik van alle beschikbare meetgegevens en fysische kennis van het dalingsproces is de methode bij uitstek geschikt voor het voorspellen van bodemdaling. Die voorspelling zal in de toekomst weer vergeleken moeten worden met de resultaten van een geodetische meting in de komende periode, door toepassing van de SodM-toets of een andere valide toets. Als dan (weer) afwijkingen optreden wordt het dynamische model verbeterd. Het meetnet kan ook worden aangepast.

Zoals eerder gezegd rekent de werkgroep de TNO-Deltares methode tot fase 5 in het productieproces, genoemd in paragraaf 3.1. Omdat de focus van de werkgroep bewust ligt op de geodetische analyse en de confrontatie ervan met de verwachte bodemdaling, de fasen 3 en 4, beperkt de werkgroep haar evaluatie van de TNO-Deltares methode tot wat hier is gegeven.

5 Ervaring van NAM met methodes van bodemdalingmetingen

5.1 Criteria

De NAM heeft aan de werkgroep uiteengezet hoe zij met bodemdalingmetingen omgaat. Als criteria bij het beoordelen van methodieken voor bodemdalingmetingen hanteert de NAM naast betrouwbaarheid vooral internationale erkenning en transparantie van de methode. Ook hecht zij aan continuïteit om niet steeds de interpretatie van opgetreden bodemdaling aan te hoeven passen. De opgetreden bodemdaling moet vaststaan, maar voorspellingen mogen indien nodig aangepast worden. De methode moet volledig geformaliseerd zijn, ook wat betreft de opsporing van meetfouten en instabiliteit van peilmerken, dit alles toetsbaar door de toezichthouder en geschikt voor waterpassing, GPS en PS-InSAR. De NAM vindt ook belangrijk dat de methode kan scheiden naar oorzaken en dat aanvullende kennis van de ondergrond gebruikt wordt in een integrale aanpak om het aandeel van de delfstofwinning in de opgetreden bodemdaling te kunnen vaststellen. Als laatste geldt voor de NAM dat een methode die makkelijk toe te passen standaard software gebruikt, garantie voor continuïteit heeft en wordt ondersteund de voorkeur geniet.

5.2 Scheiden naar oorzaak

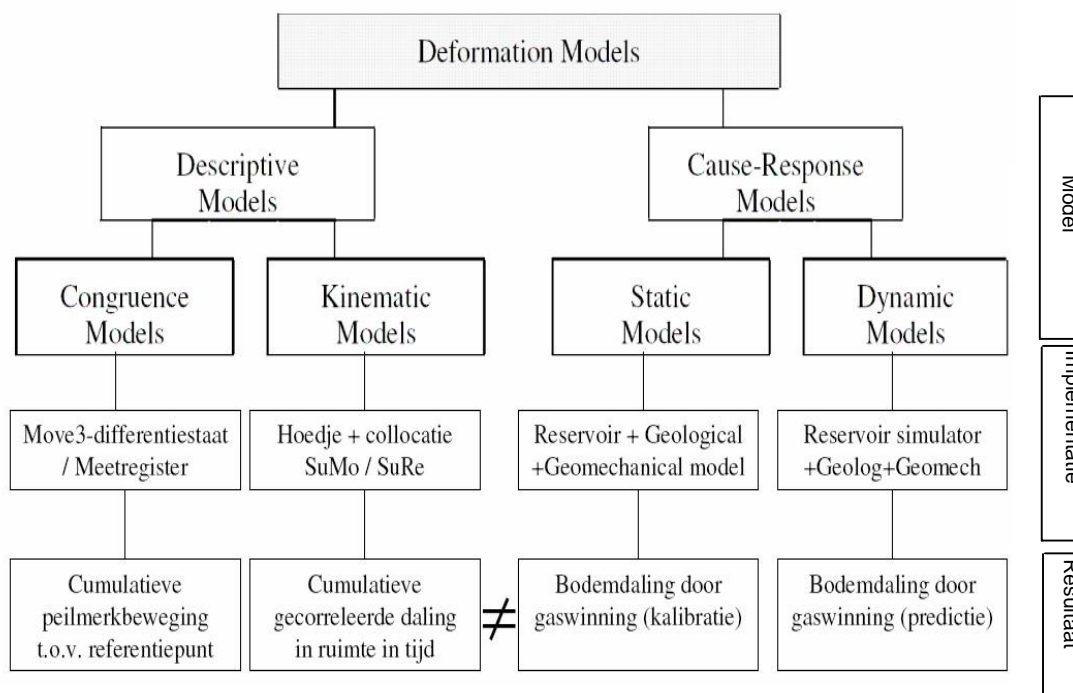
De metingen bestaan uit relatieve hoogteverschillen in de ruimte. Hetgeen gezocht wordt zijn echter relatieve bewegingen van meetpunten in de tijd. Afhankelijk van de meetmethode (waterpassing, GPS, InSAR) is er onduidelijkheid over wat gemeten wordt: pleistoceendaling, daling van gebouwen of maaiveld daling. Alleen met oorzaak-gevolg modellen, kan bodemdaling aan oorzaken gekoppeld worden en kan een voorspelling gemaakt worden van specifieke onderdelen van de gemeten bodemdaling. Het is voor de NAM van belang aan te kunnen tonen waar bodemdaling door veroorzaakt wordt. Daarom acht zij het noodzakelijk om op een duidelijke manier ondergrondkennis mee te nemen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door iteratieve calibratie van geomechanische modellen met behulp van alle gemeten en opgeschoonde peilmerkbewegingen.

5.3 Visualisatie

De NAM stelt dat visualisatie van het resultaat goed mogelijk is door de contouren van het geomechanisch model in dezelfde kaart te plotten als de puntinformatie van de peilmerkbeweging die uit hoogteverschilmetingen is berekend.

5.4 Plaats van modelimplementaties in FIG-categorieën

In hoofdstuk 3.2 is een uiteenzetting gegeven van de FIG-categorieën. De NAM heeft de in Nederland toegepaste modelimplementaties daarin op overzichtelijke wijze in beeld gebracht in de vorm van onderstaand schema. Er blijkt ook uit welke resultaten kunnen worden verwacht.



5.5 Invloed van keuzes

De NAM stelt dat bij de methode SodM en SuMo/SuRe moet worden uitgegaan van aannames om hoogteverschilmetingen naar deformaties te vertalen, aannames ten aanzien van ruis, a-priori gecorreleerd signaal, deterministische functie en het referentieniveau. Afhankelijk van de situatie spelen de aannames in meer of mindere mate een rol en kunnen ze het resultaat beïnvloeden. Er moeten keuzes gemaakt worden tussen het afgaan op alleen de metingen en het referentieniveau of het meenemen van a priori veronderstellingen over het tijd- en/of ruimtelijk gedrag, waardoor een hogere overtuiging bereikt wordt.

5.6 Vergelijking van methoden

NAM heeft drie methoden, te weten Move3, SuMo/SuRe en Root-Mean-Square toets (RMS) van SodM, vergeleken en beoordeeld op bovengenoemde criteria. Van SuMo/SuRe is een iets oudere versie beoordeeld, maar het is duidelijk dat de andere twee methodes positievere scores. Dit heeft vooral te maken met transparantie (geen vermenging van 'gemeten' peilmerkbeweging en op basis van a priori aannames in ruimte en tijd geëxtrapoleerde daling), scheiding naar oorzaak, toetsbaarheid door een toezichthouder en het gebruik van standaard software met professionele support. Bij SuMo/SuRe ontbreekt dit. Daarentegen biedt SuRe een beter foutenopsporingsvermogen en een volledig geformaliseerde toetsprocedure.

5.7 Dynamic modelling proces

De NAM kan de RMS-toets van SodM gebruiken als onderdeel van een integraal dynamisch modelleerproces zoals geformuleerd door FIG. Dit iteratieve proces wordt momenteel door NAM toegepast voor de calibratie van geomechanische modellen. De RMS-toets dient als evaluatiemethode voor de berekening van afwijkingen tussen de berekende en gemeten waarden voor de bodemdaling door gaswinning.

Aan de hand van enkele voorbeelden heeft NAM haar ervaringen laten zien met de SodM-methode. Als het referentiepunt ver weg ligt kan de SodM-methode onnauwkeurig worden. In een voorbeeld bedroeg de invloed van meetruis in het traject van referentiepunt tot het meetgebied op meer dan 10 km afstand 25% van totale daling, bij een totale bodemdaling van minder dan 5 cm. Hier zou de methode SuMo/SuRe een voordeel kunnen hebben omdat die niet met een vast referentiepunt werkt.

Voor een ander projectgebied zijn de predictieresultaten van verschillende geomechanische modellen met elkaar vergeleken aan de hand van de RMS-toets van SodM. O.a. een lineair compactiemodel, een bi-lineair model en een finite element model. Het is niet eenvoudig vast te stellen welk model het beste past bij de gemeten bodemdaling. Dit kan alleen gebeuren door meerdere experts de resultaten te laten beoordelen.

5.8 Wens van NAM ten aanzien van werkwijze

De ervaringen die NAM heeft met de methode van SodM zijn procedureel goed, maar verbeteringen zouden kunnen plaatsvinden op de volgende punten: de vastlegging van de keuze en de hoogte van het referentiepunt, betere modellering van tijdsafhankelijke ruis, beoordeling van lokale peilmerkverstoringen door experts en het consistent meenemen van alle punten. De NAM ziet voordeel in een methode waarbij op basis van geodetisch opgeschoonde peilmerkbewegingen een integrale vereffening volgens de SuMo/SuRe opzet gebruikt kan worden, maar zonder a-priori aannames over gladheid in ruimte en/of tijd en met toetsing op significante afwijkingen van meting en prognose. Als mogelijke verbetering van de RMS-toets van SodM kan worden gedacht aan de B-methode van toetsen, waarbij rekening dient te worden gehouden met de volledige covariantie-matrix van de gemeten peilmerkbewegingen. Verder moeten de resultaten van deze methode beperkt blijven tot punten en tijdstippen waarop feitelijk de metingen uitgevoerd zijn. Er dient een duidelijke scheiding te blijven tussen 'filtering' en 'extrapolatie of predictie'.

5.9 Voorwaarde voor werkbaarheid

Een geodetische verwerkingsmethode is te meer acceptabel voor de NAM naarmate die ook gedragen wordt door de toezichthouder en andere belangrijke partijen zoals bijvoorbeeld TUDelft en TNO. Een afsluitende wens is dat de te gebruiken methode gevat wordt in een bruikbaar softwarepakket dat bedrijven gemakkelijk kunnen toepassen.

6 Advies

Dit advieshoofdstuk bestaat uit drie delen. In paragraaf 6.1 geeft de werkgroep een aantal overwegingen voor nuancering. Paragraaf 6.2 bevat aanbevelingen voor het bepalen van hoogteveranderingen uit metingen en in paragraaf 6.3 doet de werkgroep een voorstel voor concrete vervolgstappen.

6.1 Overwegingen voor nuancering

In het algemeen kan worden gesproken over een goede praktijk in Nederland ten aanzien van de bewaking van bodemdaling door delfstofwinning door middel van hoogtemetingstechnieken. Bij ruim honderd grote en kleine gasvelden in productie blijft discussie beperkt tot slechts enkele velden. De grote media-aandacht in enkele gevallen mag niet blind maken voor de bevredigende gang van zaken in Nederland.

De focus van de werkgroep is op bodemdaling door delfstofwinning. Daarvoor is de diepe ondergrond relevant en is de mijnbouwindustrie de direct betrokken partij. Andere maatschappelijke gremia als waterschappen en de land- en tuinbouw hebben mede een grote betrokkenheid, maar op andere wijze en andere tijdschaal. Waterschappen moeten investeringsbesluiten nemen voor een verwachte situatie na een aantal decaden en hebben daarom veel belang bij voldoende betrouwbare voorspellingstechnieken voor de lange termijn. Soms gaat het dan eerder om decimeters dan centimeters. Land- en tuinbouwers daarentegen zijn geïnteresseerd in dagelijkse waterstandvariaties op centimeterniveau. Deze sector is meer gebaat bij het vermogen tot fijnregeling van waterstanden door waterschappen dan bij een goede voorspellingsmethode van de daling in de diepe ondergrond door delfstofwinning. Als die op centimeterniveau betrouwbaar is, maar het aanpassen van het oppervlaktewaterpeil slechts lukt op een decimeter nauwkeurig, is er toch een probleem.

Tegen deze achtergrond rijst een vraag over de nauwkeurigheid waarmee de verwachte bodemdaling in winningplannen wordt aangegeven. Dat is één getal in centimeters of millimeters nauwkeurig. De predictie moet worden gedaan voor een productieperiode van tientallen jaren bij een vermoede hoeveelheid te winnen delfstof en een verondersteld productieschema. In de loop van de jaren zal over de te winnen hoeveelheid meer duidelijkheid ontstaan en zal het productieschema worden bijgesteld. In dit licht is het niet erg realistisch om bodemdaling te voorspellen in één centimetergetal en die ook streng te bewaken op centimeterniveau. Het zet betrokkenen op een verkeerd been. Winningplannen zouden liever een bandbreedte voor de verwachte bodemdaling moeten aangeven. Het is wenselijk dat alle betrokken partijen zich van de relatieve nauwkeurigheid bewust zijn en daarmee leren omgaan.

Een belangrijke beslissing bij het waarderen van de drie beoordeelde bodemdalingsmethodieken betreft de interactie van kennis over meten (geodesie) en kennis over de ondergrond (geomechanica). Er zijn grosso modo twee opstellingen mogelijk. De ene is dat de twee soorten kennis zo veel mogelijk geïntegreerd worden in één methodiek. Voor het voorspellen van toekomstige bodemdaling is een dynamisch model de meest verfijnde aanpak omdat die de kennis van reeds gemeten bodemdaling en de kennis van de ondergrond in samenhang benut. TNO-Deltares kiest voor deze aanpak. De andere opstelling is juist een keuze voor het volledig ontkoppelen van geodesie en geomechanica. De ratio hierachter is om te vermijden dat geomechanische modelaspecten een rol spelen in hun

eigen verificatie. Deze bewuste keuze is gemaakt in de methoden van SodM en Houtenbos. Zo wordt gemeend dat toetsen van geomechanische modellen het meest zuiver plaatsvindt.

Zoals eerder gesteld in paragraaf 3.1 worden in het productieproces de volgende fasen onderscheiden:

1. vaststellen van de te verwachten bodemdaling door delfstofwinning (geomechanisch bepaald);
2. inrichten van een meetnetwerk voor bodemdalingwaarneming;
3. analyse van de geodetische metingen (geodetisch bepaald);
4. confrontatie van de geodetisch bepaalde bodemdaling met de verwachte geomechanisch bepaalde bodemdaling;
5. aanpassing van de modellen en meetnet.

De werkgroep heeft er nota van genomen dat de internationale geodetische gemeenschap de dynamische modellen als onderzoekstrend ziet, dus modellen waarin gegevens van diverse disciplines geïntegreerd worden benut. Voor dit rapport betekent dit gekoppeld gebruik van geodetische waarnemingen en geomechanische kennis van de bodem. Voor de procesfase van het kalibreren van het voorspellingsmodel, fase 5, is zo'n aanpak de optimale werkwijze. De werkgroep stond echter voor een andere vraag hoe een voorspelde bodemdaling moet worden getoetst aan metingen, fasen 3 en 4. Ten eerste overweegt zij dan dat de internationale trend zich richt op een breder palet van onderwerpen dan alleen bodemdaling door delfstofwinning. Verder weegt ze mee dat voor het ontwikkelen van dynamische modellen op het gebied van delfstofwinning vooralsnog geen goede bepaling van onzekerheden in de geomechanische modelparameters beschikbaar is. Voortgezet onderzoek op dit terrein is stellig geboden. De werkgroep is ook gevoelig voor de overweging dat geen aspecten mogen worden gebruikt die je juist wilt bewijzen. Op al deze gronden beveelt de werkgroep voor de analyse van geodetische waarnemingen, fase 3, en de confrontatie met de verwachting van het geomechanische model, fase 4, aan om het geodetische model onafhankelijk te houden van het geomechanisch model. Als de betrouwbaarheid van het fysische voorspellingsmodel is bewezen, kan dit natuurlijk wel worden gebruikt voor de verwachting van toekomstige bodemdaling.

De werkgroep adviseert om ruimte te laten voor verschillende methodieken. Voor de Nederlandse praktijk is niet steeds dezelfde aandacht of perfectie nodig. Voor de controle of bodemdaling de verwachting van het winningplan volgt is een ontkoppelde aanpak zeer geschikt, zoals in de SodM methode en de Houtenbos methode plaatsvindt. Vaak zal de SodM methode al voldoen. Alleen als er reden is om autonome daling door andere bodemeffecten te veronderstellen, of er veel discussie blijft tussen betrokken partijen over het scheiden naar oorzaak, komt de geïntegreerde methode met voordeel in beeld. Ook mijnbouwmaatschappijen kunnen hun voordeel doen met de geïntegreerde methode voor zo goed mogelijke voorspellingen.

6.2 Aanbevelingen

De visie op het vaststellen van de bodemdaling aan het oppervlak uit geodetische metingen komt in de methode SodM en de methode Houtenbos redelijk overeen, maar er is ook sprake van wezenlijke verschillen in elementen van de aanpak. Er is brede overeenstemming dat subjectieve elementen in de aanpak ongewenst zijn. Over de eisen die moeten worden gesteld aan de kwaliteit van peilmerken (fundatie) en het aantal peilmerken bestaat echter verschil van mening evenals over het compleet zijn van de meetreeks per peilmerk (beperkte

meetperiode). In de methode TNO-Deltares zijn deze zaken niet aan de orde, omdat deze uitgaat van de beschikbaarheid van een set opgeschoonde metingen. Bestudering en beoordeling van de SodM en Houtenbos methoden leidt de werkgroep tot de volgende aanbevelingen.

1. Er worden regels gesteld voor het inrichten van meetnetten en de frequentie van metingen voor de bepaling van bodemdaling door delfstofwinning. Deze regels waarborgen, dat er robuuste meetnetten ontstaan van goede kwaliteit en dat er voldoende metingen in ruimte en tijd worden uitgevoerd om het verloop van de bodemdaling, zoals vastgelegd in het winningplan, te kunnen volgen. In bijlage D wordt hieraan verdere uitwerking gegeven.
2. Het verdient de voorkeur te werken met de relatieve bodemdaling. Het gaat dan niet om de veranderingen ten opzichte van een of meer vaste referentiepunten, maar om de verschillen van peilmerken ten opzicht van elkaar. De stabiliteit van referentiepunten is over een lange periode nauwelijks te garanderen. Een referentiepunt op grote afstand buiten het beschouwde gebied beperkt bovendien de nauwkeurigheid van berekende hoogten en hoogteveranderingen.
3. Als peilmerken worden uitgesloten moet dit gebeuren op een objectieve wijze. De aangewezen aanpak is om onbetrouwbare peilmerken te indiceren op basis van in de geodesie aanvaarde toetsen. In tweede instantie komen overwegingen van fysieke aard in beeld. Er kan een visuele inspectie volgen van die peilmerken, die als kandidaat voor uitsluiting uit de statistische test volgen.
4. Peilmerken die worden bijgeplaatst na de start van de winning bevatten evengoed betekenisvolle informatie als peilmerken vanaf de start. Er is geen reden om later geplaatste peilmerken buiten beschouwing te laten of een minder gewicht aan toe te kennen.
5. De werkgroep adviseert een aanpak in drie gescheiden stappen: toetsen van geodetische metingen op fouten (zowel fouten in de meting zelf als in het model waarmee de metingen worden bewerkt); berekening van relatieve hoogteveranderingen in de peilmerken en confrontatie van het geomechanisch model met de uit meting bepaalde hoogteveranderingen.
 - In de opschoningstap van de metingen (data screening) worden instabiele peilmerken gedetecteerd, komen evidente meetfouten aan het licht en worden mogelijke blunders zichtbaar. In deze stap wordt een analysemethode gebruikt op basis van een bodemdalingmodel dat continu is naar tijd en plaats en waarin diverse statistische toetsen kunnen plaatsvinden. Primaire taak van deze iteratieve toets- en vereffeningprocedure is het identificeren van meetfouten en individueel afwijkend peilmerkgedrag. Als correlatiefuncties voor de beschrijving van kansverdelingen worden gehanteerd, moeten deze zoveel mogelijk een algemene fysieke grondslag hebben, maar wel los van de specifiek geomechanische gesteldheid van de betreffende locatie. Als uitsluiten van peilmerken nodig is, gebeurt dat op basis van de resultaten van deze stap in het proces, eventueel na visuele inspectie van die peilmerken.

- In stap twee worden per epoche relatieve hoogteveranderingen van de peilmerken berekend uit de in stap één opgeschoonde metingen. Met inachtneming van aanbeveling 2 wordt een daartoe geschikt referentieniveau gekozen. De beschrijving van de nauwkeurigheid van de hoogteverschillen dient te zijn gebaseerd op de in stap één bepaalde meet- en puntprecisie. Het resultaat bestaat uit een differentiestaat met discrete waarden voor de gemeten hoogteveranderingen per meetpunt en per epoche. Er dient geen ruimtelijke extrapolatie plaats te vinden. De hoogteveranderingen in de differentiestaat mogen slechts worden geïnterpreteerd als relatieve beweging van de peilmerken onderling.
 - In stap drie vindt de confrontatie van de uit geodetische waarnemingen geschatte relatieve bodemdaling met de output van het geomechanisch model plaats. Indien significante afwijkingen tussen de gemeten en verwachte bodemdaling geconstateerd worden, moet worden bezien of er andere oorzaken dan delfstofwinning in het spel zijn. Daarna dient het geomechanisch model te worden aangepast via calibratie aan geïnterpreteerde meetwaarden en moet vervolgens een nieuwe berekening van de verwachte bodemdaling worden gemaakt. Eventueel kan een en andere leiden tot een herziening van de vergunning.
6. In de drie-stappen procedure heeft het scheiden naar oorzaak, waar relevant, een plaats in de derde stap. Het behoort tot de verantwoordelijkheid van de mijnbouwonderneming. Deze beoordeelt de correlatie tussen het geomechanisch model en de interpretatie van de hoogtemetingen en biedt een verklaring voor afwijkingen tussen geomechanische simulatie en hoogtemetingenuitwerking, die veroorzaakt kunnen zijn door natuurlijke processen en andere menselijke activiteiten dan delfstofwinning, zoals waterpeilaanpassing en (grond)werken. SodM speelt een toezichthoudende rol en kan het scheidingsresultaat accepteren of verwerpen. Er is behoefte aan een wetenschappelijke uitspraak als een maatschappelijke partij het resultaat van scheiding aanvecht.
 7. Betrouwbare voorspellingen kunnen niet worden gemaakt puur op basis van de analyse van de geodetische waarnemingen. Hiervoor is een geomechanisch model nodig. Voorwaarde is wel dat het geomechanische model is gecalibreerd aan de hand van uit geodetische metingen afgeleide relatieve bodemdaling.
 8. Programmatuur voor de analyse van geodetische metingen moet standaard software zijn, transparant, gebruikersvriendelijk en moet (al dan niet tegen vergoeding) vrij beschikbaar zijn. De geïmplementeerde theorie moet gedocumenteerd en geformaliseerd zijn en er dient een duidelijke gebruikershandleiding te wezen.
 9. Het presenteren van het toetsingsresultaat kan gebeuren in kaartvorm met contourlijnen. Aanbevolen wordt om dit als volgt te doen. De geomechanische simulatie(s) worden in de vorm van contourlijnen gepresenteerd en het resultaat van de hoogtemetinganalyse wordt er als puntinformatie ter plaatse van de peilmerken in getal of kleur bij opgenomen. Interpolatie van de hoogteverschillen tot contouren blijft dus achterwege en interpolatie tot contouren van de hoogtemetingen vindt ook niet plaats. Zulke kaartinformatie kan voor verschillende tijdstippen worden vervaardigd.
 10. Tot de transparantie behoort ook dat overgelegde analyses vergezeld gaan van een duidelijke verantwoording van gemaakte keuzes ten aanzien van kansmodellen en/of

parameterkeuzes, zowel voor geomechanische voorspellingen als geodetische verwerking en interpretatie van hoogtemetingen.

Voor mijnbouwondernemingen gelden nog overwegingen die niet (of minder) relevant zijn voor het geschil waarover de werkgroep zich heeft gebogen, maar wel het vermelden waard zijn. Belangrijke punten zijn:

- Support bij toepassen van de methodiek en gebruik van software is gegarandeerd op lange termijn.
- De analysemethode voor de geodetische metingen moet internationaal en wetenschappelijk erkend zijn.
- Scheiding naar verschillende oorzaken moet mogelijk zijn.
- De methode is geschikt voor waterpassing, GPS en PS-InSAR,
- De methode is begrijpelijk voor leken

6.3 Voorstel voor vervolgstappen

In dit rapport is uiteengezet wat er nodig is om vast te stellen hoeveel bodemdaling er is opgetreden door delfstofwinning. Daarbij is ingegaan op de inrichting van het meetnet, de verwerking van de geodetische metingen, de confrontatie van het geomechanisch model met de metingen, de calibratie van het geomechanisch model en de wijze waarop bodemdaling vervolgens voorspeld zou kunnen worden. Deze beschrijving is in dit hoofdstuk gevolgd door een advies met een aantal aanbevelingen en enkele aandachtspunten voor de inrichting van meetnetten. In deze paragraaf wordt nog een stap verder gedaan door een richting uit te zetten voor het vervolgproces. We bespreken drie voorstellen om uitwerking te geven aan de aanbevelingen en lacunes in het inzicht te elimineren:

- o Het formeren van een Kenniscentrum Bodemdaling.
- o Het formaliseren in nadere regels op basis van de mijnbouwregelgeving.
- o Het opstellen (door de delfstofwinners) van een Industrieleidraad.
- o Het inrichten van een benchmark voor methoden

6.3.1 Kenniscentrum

Met het opzetten van een Kenniscentrum Bodemdaling zou bereikt kunnen worden, dat de verworven kennis op het gebied van bodemdalingvraagstukken wordt gebundeld en dat er nieuwe kennis wordt ontwikkeld. Het Kenniscentrum kan ook een bijdrage leveren aan het ontwikkelen van (ISO-) standaarden voor de meting en vaststelling van bodemdaling door delfstofwinning. De werkgroep sluit hiermee aan bij het voorstel voor een centraal coördinerend overheidsorgaan voor de strategie van de monitoring van bodembeweging in Nederland dat de Raad voor Aarde en Klimaat in samenwerking met de Nederlandse Commissie voor Geodesie, KNAW, heeft gedaan.

6.3.2 Nadere regels

Een wenselijke vervolgstap is het formaliseren van de aanbevelingen in de mijnbouwregelgeving. De wet biedt enkele kapstukken om de aanbevelingen uit te werken. Op basis van artikel 30, 9^e lid, van het Mijnbouwbesluit kunnen bij ministeriële regeling nadere regels worden gesteld voor het meetplan. Daarnaast biedt artikel 31, 4^e lid, van het Mijnbouwbesluit de mogelijkheid om aanvullende eisen te stellen aan 'de inhoud van en de wijze van verstrekking van de meetresultaten'.

Nadere regels zijn vooral geschikt voor het maken van voorschriften voor de inrichting van meetnetten (aanbeveling 1 en bijlage D) en voor de wijze van rapporteren van metingen en analyses (aanbevelingen 9 en 10). Voor het formaliseren van de *verwerking* van meetgegevens (toetsing, analyse, ontwikkeling van software) zijn nadere regels in beginsel minder geschikt, vanwege het wiskundig/statistische karakter van dit proces. Een dergelijk proces kan beter geüniformeerd worden met behulp van een industrieleidraad.

6.3.3 Industrieleidraad

Het ontwikkelen van een Industrieleidraad houdt in, dat aan de branche (de delfstofwinners) wordt gevraagd om de aanbevelingen over de verwerking van de meetgegevens (aanbevelingen 2 t/m 8) om te zetten in een richtlijn (leidraad). Vervolgens verplicht de branche zichzelf om deze leidraad te volgen. Deze werkwijze is voor de delfstofindustrie een gevestigde praktijk. Dat blijkt onder meer uit de website (www.nogepa.nl) van de brancheorganisatie van de olie- en gasproducenten, NOGEPA, waar vijftien guidelines zijn gepubliceerd. Het principe van een leidraad is, dat de industrie zelf een werkwijze ontwikkelt voor een bepaalde activiteit. Doordat de industrie zich vervolgens aan die werkwijze committeert, hoeft de overheid geen gedetailleerde regels uit te vaardigen om die bepaalde activiteit ordelijk te laten verlopen. Zo snijdt het mes aan twee kanten. De overheid kan het aantal regels beperkt houden en de industrie beschikt over een kader, dat zij zelf – onder toezicht van de overheid – heeft ingevuld. In Bijlage E doet de werkgroep een voorstel voor de inhoud van de leidraad, voor de bekostiging en de organisatie.

De toezichthouder verzoekt de delfstofindustrie op korte termijn met het samenstellen van de leidraad te beginnen. De leidraad zou uiterlijk eind 2010 beschikbaar moeten zijn. Zolang de leidraad nog niet beschikbaar is zou het proces van meting naar vaststelling van de bodemdaling op de thans gebruikelijke manier kunnen plaatsvinden.

6.3.4 Benchmarking van Methoden

De oordeelvorming van de werkgroep en de aanbevelingen zijn gebaseerd op de aangereikte informatie en de actuele stand van kennis. Natuurlijk houdt de werkgroep er rekening mee dat niet alle partijen even tevreden gesteld zullen zijn. Het advies zou daarom nog aan overtuigingskracht winnen als de onderscheiden methoden voor het vaststellen van bodemdaling door delfstofwinning konden worden toegepast voor een aantal goed gedefinieerde cases. Door dergelijke benchmark situaties te ordenen naar toenemende complexiteit en daarbinnen te focussen op de geschiktheid van het meetnet kan naar verwachting een goed beeld worden verkregen van de beperkingen en mogelijkheden van de respectieve methoden. In Bijlage F wordt aangegeven welke aspecten relevant zijn voor het ontwikkelen van synthetische data sets voor een voldoende aantal onderscheiden en realistische gevallen. Het beoogde Kenniscentrum zou hieraan uitwerking kunnen geven.

Bijlage A

Workshop

Workshop, 19 juni 2009, Amersfoort

Programma

- 9:30 uur Ontvangst met koffie en thee
- 10:00 uur Welkom
dr. Tommel, voorzitter Tcbb
Kaderschets
prof. Blaauwendraad, voorzitter werkgroep Tcbb
- 10:30 uur Wettelijk kader
dhr. van Herk, SodM
Geometrische Methodiek
ir. Houtenbos
Geomechanische Methodiek
dr. Fokker, TNO
- 12:00 uur Lunch
- 13:00 uur Subjectiviteit in interpretatie
prof. Barends, TUDelft
Praktijk van Consultant
dr. Kregel, Oranjewoud
Praktijk van Mijnbouwonderneming
dr. Kamshoff, NAM
- 14:15 uur Pauze
- 14:30 uur Discussie
o.l.v. prof. Barends, Tcbb
- 16:00 uur Afsluiting met een drankje

Genodigden

Willem Paar	Akzo Nobel
Frans Geerts	Akzo Nobel
F. van Veen	Commissie Bodemdaling Friesland
P.L. Lap	Commissie Bodemdaling Friesland
W. Epema	Commissie Bodemdaling Friesland
Leen Vogelaar	Commissie Bodemdaling Groningen
T. van den Bout	Commissie Bodemdaling Groningen
A.H. Oude Elferink	Commissie Bodemdaling Groningen
C.W. Woldring	Commissie Bodemdaling Groningen
A. van der Werf	Commissie Bodemdaling Groningen
P.J. Hug	Commissie Bodemdaling Groningen
K. d'Angremond	Commissie Bodemdaling Groningen
P.M.A. van Bergen	Commissie Bodemdaling Groningen
Ger de Lange	Deltares
Gerard Kruse	Deltares
Jan Gunnink	Deltares
Tom Bakker	Frisia Zout BV/WEP
Adriaan van Seters	Fugro Ingenieursbureau BV
Floris Schokking	GeoConsult
Adriaan Houtenbos	Geodetic Consultant
Bernard Dost	KNMI
Jan van Herk	Min EZ, SodM
Hans Roest	Min EZ, SodM
Dirk Doornhof	NAM
Pieter van de Water	NAM
Stefan Kampshoff	NAM
Peter Teunissen	NCG-KNAW
John Schelhaas	Nedmag Industries Mining & Manufact. BV
Jacob Visser	Nedmag Industries Mining & Manufact. BV
Joren Bullen	Nedmag Industries Mining & Manufact. BV
Nico Tielens	NPN BV
Tonie Speelman	Oranjewoud
Michiel Kregel	Oranjewoud
Kyra van Onselen	RWS-DID
Anton Kösters	RWS-DID
Pieter Jansen	RWS-Waterdienst
Willem van Soest	TAGA Energy BV
Justine Oomes	TCB (VROM)
Dick Tommel	Tcbb
Hein Haak	Tcbb
Jaap Zeilemaker	Tcbb
Hans Klasen	Tcbb
Cristel de Zwaan	Tcbb
Pieter Jongerius	Min EZ, ministerieel waarnemer in Tcbb
Peter Fokker	TNO
Jaap Breunese	TNO
Ingrid Kroon	TNO
Annemarie Muntendam-Bos	TNO
Barthold Schroot	TNO
Cok van Meurs	Total E&P Nederland BV
Ramon Hanssen	TUD LenR
Stijn Harms	VermilionEnergy
Frans Barends	(Werkgroep) Tcbb
Johan Blaauwendraad	(Werkgroep) Tcbb

Frank Kenselaar
Roland Klees
Cor Kenter
Micheline Hounjet

Werkgroep Tcbb
Werkgroep Tcbb
Werkgroep Tcbb
Werkgroep Tcbb

Bijlage B
Bijdrage van SodM

Iteratieve voorwaartse modellering van bodembeweging

Metingen naar bodembeweging

Bodembeweging is een proces, dat zich afspeelt in tijd en plaats. In het algemeen liggen er vele oorzaken aan ten grondslag. De mijnbouwondernemingen verrichten conform het Mijnbouwbesluit 2002 metingen naar bodembeweging ten gevolge van het winnen van delfstoffen en het opslaan van stoffen in de ondergrond. De meeste metingen bestaan uit tweede orde optische waterpassingen aan vaste peilmerken. Aanvullend wordt de GPS-meettechniek ingezet, indien men continue informatie over het verloop van de bodemdaling op een specifieke locatie nodig heeft of indien waterpassingen geen praktisch uitvoerbare optie zijn, zoals in de Waddenzee.

Autonome peilmerkbeweging

De metingen geven een indruk van de totale beweging in de tijd van de peilmerken. Naast mijnbouw en ondergrondse opslag kunnen ondermeer de bouwkundige instabiliteit van het fundament, waarmee het peilmerk is verbonden, en de inklinking van ondiepe aardlagen door natuurlijke of waterhuishoudkundige effecten, significant bijdragen aan de beweging van een peilmerk. De niet-mijnbouw gerelateerde bewegingen worden hier als 'autonome' effecten aangemerkt. Extra complicaties ontstaan, wanneer in hetzelfde gebied meer dan één mijnbouwonderneming actief is. Daarvan is momenteel in zes gebieden in Noord-Nederland sprake, namelijk vier gevallen van overlappende invloeden van gaswinning en zoutwinning, één geval van overlappende gaswinning en gasopslag in zoutcavernes, en één geval van overlappende gaswinningen.

Toetsingsprocedure van geodetische waarnemingen versus geomechanische berekeningen

SodM heeft in 2007 een toetsingsprocedure op basis van *iteratieve voorwaartse modellering* aan de mijnbouwondernemingen voorgelegd. De methode heeft tot doel de bewegingen van het aardoppervlak als gevolg van ondergrondse delfstofwinning of opslag van stoffen zo eenvoudig en zuiver mogelijk af te leiden uit de totale bodembeweging. Hiertoe staan twee informatiebronnen ter beschikking, namelijk waarnemingen en berekeningen. De waarnemingen bestaan uit gemeten hoogteverschillen tussen vaste peilmerken, verkregen volgens richtlijnen van SodM en Rijkswaterstaat (zie o.a. jaarverslagen 2005 en 2006). De metingen en de hieruit door vrije netwerkvereffening afgeleide hoogten worden gepubliceerd in openbare meetregisters in de vorm van differentiestaten. Deze differentiestaten bevatten alleen discrete waarden in tijd en plaats onder de aanname van een stabiel referentiepunt, zonder modellering van de tijdsafhankelijkheid van de differenties en zonder aannames over de mogelijke (ruimtelijke) oorzaken van de peilmerkbewegingen. De geomechanische berekeningen daarentegen resulteren in continue tijd- en plaatsafhankelijke bodemdalingwaarden, die de mijnbouwondernemingen baseren op een ondergrondse modellering van de effecten van delfstofwinning en opslag aan maaiveld. De gegevens uit deze twee informatiebronnen worden integraal in tijd en plaats met elkaar vergeleken en getoetst. De procedure is schematisch getoond in de figuur.

De toetsingsprocedure bestaat uit twee gescheiden trajecten van informatieverwerving en informatiebehandeling. Deze scheiding tussen waarnemingen en berekeningen waarborgt een functioneel onafhankelijke toetsing van de berekeningen op basis van waarnemingen op discrete plaatsen en tijdstippen. De procedure is eenvoudig en transparant. Ze wijkt af van de bekende inversietechnieken, waarbij men onder de nodige aannames juist wel een functionele oorzaak-

gevolg relatie tussen peilmerkbewegingen en ondergrondse processen probeert op te bouwen. De procedure werkt bovendien tegengesteld aan geostatistische collocatietechnieken, waarbij men met behulp van tijdsafhankelijke benaderingsmodellen van bodemdaling (trend) en kansmodellen alle gemeten, discrete hoogteverschillen integraal hervereffend. Men krijgt vloeiende, niet-transparante overgangen tussen werkelijk gemeten waarden en modelmatig berekende, 'geïnterpreteerde' waarden. In de SodM procedure is de situatie omgekeerd: de discrete waarnemingen als zodanig worden niet herbewerkt, de in tijd en plaats continue ondergrondse modellen worden mogelijk wel gewijzigd in geval van significante afwijkingen tussen berekeningen en waarnemingen.

Primaire en secundaire peilmerkensets

In eerste instantie komen voor de toetsing alleen de cumulatieve hoogteverschillen van peilmerken in aanmerking, die vóór aanvang van de winning of opslag al deel uitmaakten van de nulmeting (de zogenaamde 'primaire' peilmerkenset). In de praktijk gaan met enige regelmaat peilmerken verloren, die door nieuwe vervangen worden (de 'secundaire' peilmerkenset). Soms moet het meetnet worden uitgebreid of intern versterkt. In gevallen, waarin men de primaire peilmerkenset niet meer als voldoende representatief qua absoluut aantal of vlakdekking kan aanmerken, is het gewenst een nieuw nuljaar te benoemen. De bodemdaling, die uit de primaire waarnemingen is afgeleid voor de periode tussen het oude en nieuwe nuljaar, dient men te fixeren. Vervolgens begint men als het ware weer met een schone lei op basis van werkelijke metingen, waarbij men nu zowel de primaire als de secundaire peilmerkensets kan inzetten. De SodM procedure biedt geen ruimte om te werken met in de tijd geïnterpoleerde en/of geëxtrapoleerde 'waarnemingen'.

Verworpen waarnemingen en berekeningen

De hoogteverschillen¹ en modelberekeningen, die wederzijds de toetsing niet doorstaan hebben, worden nader onderzocht en mogelijk gecorrigeerd. In geval van niet-geaccepteerde hoogteverschillen wordt onderzocht of dit een peilmerkspecifiek gedrag is. Het is nuttig om een veldinspectie naar de status van dergelijke peilmerken uit te voeren. Naar bevind van zaken kan het nodig zijn bepaalde peilmerken als ondeugdelijk en onbetrouwbaar te verwerpen. Het zijn echter vooral de systematisch verworpen modelberekeningen (in plaats en/of tijd), die grote consequenties hebben voor de mijnbouwonderneming. Om een betere verklaring te krijgen van de gemeten peilmerkdalingen moet men veelal tijdrovende nadere analyses en onderzoeksprojecten binnen de betreffende mijnbouwonderneming uitvoeren. Het probleem kan namelijk zitten in het geologische model, of het reservoirmodel, of het geomechanische model of in een combinatie van deze modellen.

Iteraties met vaste toetsdrempel

Na aanpassing van de modelparameters en nieuwe berekeningen vindt weer een vergelijking en toetsing met de niet-verworpen en de eventueel voor autonome effecten gecorrigeerde hoogteverschillen plaats. In principe gaat het aanpassingsproces door totdat alle verschillen in plaats en tijd tussen de vrij vereffende hoogteverschillen en de modelberekeningen binnen de bandbreedte van de kritische toetsdrempel D_{krit} liggen. In geval van peilmerkbewegingen verkregen met tweede orde waterpassingen wordt voorlopig een vaste drempel van 13 mm gehanteerd voor de gehele toetsing in plaats en tijd. SodM heeft geen duidelijke aanwijzingen, dat de meetruis in de hoogteverschillen als functie van de tijd algemeen toeneemt.

De differenties van opeenvolgende met MOVE3 standaardsoftware vrij vereffende hoogten, waarbij wordt aangesloten op één vastgehouden peilmerk, tonen aan dat ook de toevallige autonome beweging peilmerkgebonden is ('kwaliteit' van het peilmerk), maar niet tijdsafhankelijk. Daarnaast vertonen diepgefundeerde peilmerken in het algemeen minder toevallige autonome beweging dan bovengrondse peilmerken in ondiep gefundeerde objecten.

Toetsmethodiek nader verklaard

De toetswaarde D_{krit} van 13 mm vraagt om enige uitleg. Deze waarde is afgeleid uit de gemiddelde standaard afwijking van de vrij vereffende hoogten. De vrije vereffeningen leveren een standaardafwijking van het meetresultaat per peilmerk op. De afwijkingen bedragen gemiddeld circa 3 mm, met iets lagere waarden voor peilmerken vlak bij het aansluitpunt en iets grotere waarden voor op afstand gelegen peilmerken. De standaardafwijking van het verschil tussen de vrij vereffende hoogten van twee verschillende meetepoches in de tijd aan hetzelfde peilmerk is $\sqrt{2}$ maal zo groot, dus 4,2 mm. Een verschil van driemaal dit bedrag, dus 13 mm, kan betrouwbaar worden vastgesteld met een kans van meer dan 90%.

De betrouwbaarheid van bodemdalingprognoses is in de loop der jaren zeer wisselvallig gebleken. Prognoseaanpassingen van 50 à 100% zijn geen uitzonderingen gebleken. Het toepassen van Gaussische kansverdelingen bij prognoses wekt de indruk, dat de bodemdaling nauwkeurig voorspeld kan worden in termen van verwachtingswaarden, onzekerheidsmarges en overschrijdingskansen. In de SodM toetsprocedure worden de berekeningen echter als één mogelijk scenario (zonder kansverdeling) van wellicht vele mogelijke scenario's beschouwd. Wanneer het verschil tussen een berekende waarde en een waarneming groter wordt dan 13 mm, is dat een significant afwijkende situatie. Men zal in eerste instantie eerder twijfelen aan de juistheid van de berekende waarde dan aan het gemeten hoogteverschil, tenzij er expliciet aanwijzingen zijn dat het betreffende peilmerk veel autonome beweging vertoont.

In de iteratieve voorwaartse modellering wordt een filosofie toegepast, die treffend is beschreven door Tarantola (Albert Tarantola, 'Popper, Bayes and the inverse problem', Nature Physics, Vol.21, August 2006). Indien de oplossing van een probleem berust op de interpretatie van waarnemingen, dient dat niet zozeer te gebeuren door het poneren van één 'beste' oplossing en een beschrijving van de ermee gepaard gaande onzekerheden, maar eerder door het opstellen van alle mogelijke oplossingen, die consistent zijn met de waarnemingen.

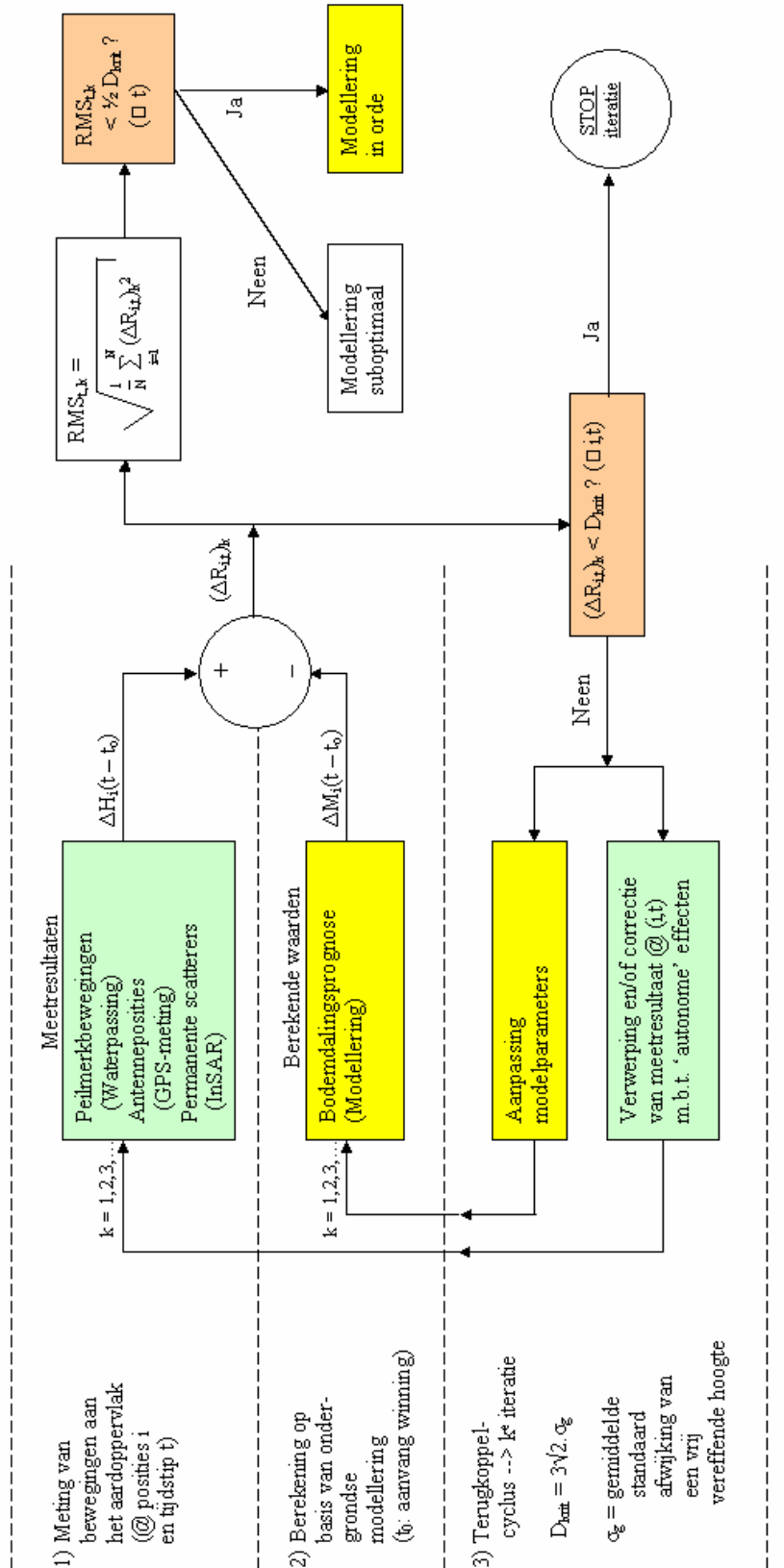
Eerste ervaringen met de procedure

In 2007 hebben de mijnbouwondernemingen al enige praktijkervaring met de iteratieve voorwaartse modellering opgedaan. Het betreft de gecombineerde bodemdaling door zoutwinning en gaswinning bij Franeker, de bodemdaling door gaswinning op Ameland en de bodemdaling in het Rotterdam gebied door gas- en oliewinning. De volgende praktische inzichten zijn inmiddels verkregen:

- In gebieden met relatief aanzienlijke autonome peilmerkdalingen zijn diepgefundeerde peilmerken van doorslaggevend belang voor een robuuste toetsing en validatie van de met behulp van ondergrondse modellen opgezette bodemdalingsscenario's.
- In gebieden met weinig autonome peilmerkdaling legt de mijnbouwonderneming eerst een differentietabel vast van de hoogteverschillen van alle primaire en secundaire peilmerken. Het in de tabel aanwezige bewegingsbeeld in tijd en plaats vormt het kader, waarbinnen de gemodelleerde bodemdalingsscenario's worden getoetst.

- Steekproefsgewijze veldinspecties van 'verdachte' peilmerken hebben duidelijk gemaakt, dat er nog een hele kwaliteitslag te maken valt met betrekking tot de installatie en het onderhoud van peilmerken. Dit betreft zowel de in vaste objecten bevestigde peilmerken (bouten) aan maaiveld, als een deel van de diepgefundeerde, ondergrondse peilmerken (meetstangen in met olie gevulde sondeerbuizen).

Toetsingsprocedure op basis van iteratieve voorwaartse modellering



Bijlage C

Bijdrage van Houtenbos

Relatie tussen meting en bodemdaling

Waterpassing, GPS en Radar meten op één moment het hoogteverschil tussen twee meetpunten. Dit gemeten hoogteverschil is normaliter niet gelijk aan het hoogteverschil op de gekozen referentiedatum door meetafwijkingen, verschillen in beweging van de meetpunten ten opzichte van de bodem en verschillen in daling van de bodem zelf rond de beide meetpunten. De bijdrage van elk van deze fenomenen aan een individueel gemeten hoogteverschil is niet afzonderlijke meetbaar. Wel kunnen de karakteristieken van de kansverdeling van deze bijdrages worden beschreven.

Voor de meetafwijking wordt een normale verdeling aangenomen met een gemiddelde van nul en een in de dagelijkse praktijk beproefde standaarddeviatie. Deze standaarddeviatie neemt toe met de afstand tussen de meetpunten, maar is onafhankelijk van het tijdstip van de meting.

Voor de beweging van meetpunten ten opzichte van de bodem over een zekere tijdsduur wordt ook een normale verdeling aangenomen. Deze verdeling heeft een onbekend gemiddelde. Omdat hoogteverschilmeting alleen verschillen in beweging tussen meetpunten kan registreren, heeft de gemiddelde beweging van meetpunten ten opzichte van de bodem geen enkel effect op de metingen of op de daaruit afgeleide relatieve bodembeweging. Voor de standaarddeviatie wordt aangenomen, dat zij toeneemt met een zekere macht van de tijd verstreken sinds de referentie datum. Bij een macht van 1 groeit de standaarddeviatie lineair in tijd. Aangenomen wordt verder, dat de meetpuntspecifieke beweging van het ene meetpunt ongecorrleerd is met die van elk ander meetpunt.

De bodemdaling is onderverdeeld gedacht in een a priori modeldaling en een modelafwijking. Voor de modelafwijking over een zekere periode wordt weer een normale verdeling verondersteld. Ook deze verdeling heeft een onbekend gemiddelde: de modelbias. Deze onbekende modelbias speelt net als de onbekende, gemiddelde, meetpuntspecifieke beweging geen rol in de afleiding van bodemdaling uit hoogteverschilmetingen. Voor de standaarddeviatie wordt weer aangenomen, dat deze toeneemt met een macht van de tijd verstreken sinds de referentie datum. Ten slotte wordt aangenomen dat het correlatie van de modelafwijking op naburige punten exponentieel zal afnemen met het kwadraat van de afstand tussen de beide punten.

De soms aanzienlijke klink en oxidatie van de bodem tussen maaiveld en meetpuntfundering beïnvloeden de metingen en de daaruit afleidbare bodemdaling op meetpuntfundering niveau niet.

Vereffening en toetsing

Als de meetfout, de afwijkingen in meetpuntspecifieke beweging en de modelafwijkingen van de beide meetpunten allen gelijk zijn aan nul, dan levert elke herhalingsmeting tussen dezelfde meetpunten - na correctie voor de modeldaling - het zelfde oorspronkelijke verschil in hoogte tussen de meetpunten. De verschillen in deze berekende, zogenaamde nulhoogtes ten gevolge van een combinatie van afwijkingen in de meting, meetpuntspecifieke bewegingsafwijkingen en modelafwijkingen worden integraal – d.w.z. voor alle metingen, ongeacht het tijdstip van meten, tegelijk - vereffend en getoetst op onregelmatigheden.

Na vereffening wordt getoetst op specifieke, veel voorkomende onregelmatigheden in de metingen en op onzuiverheden in de vooronderstelde parameters voor de kansverdelingen van meetafwijkingen, meetpuntspecifieke beweging en afwijkingen van het bodemdalingmodel. De

metingen bemonsteren een samenhangend, geleidelijk vervormend vlak. Tegen deze achtergrond wordt gecontroleerd op meetfouten in individuele metingen, op geïsoleerde uitschieters en sprongen in het gedrag van individuele peilmerken en op sterk van omringende peilmerken afwijkende bewegingsnelheden. Zolang er nog specifieke onregelmatigheden worden gedetecteerd, die waarschijnlijker zijn dan een fout in het vooronderstelde algemene ruisniveau, zullen metingen of punten worden geëlimineerd, meetpunt histories worden gesplitst of standaarddeviaties voor de specifieke beweging van individuele meetpunten worden aangepast. Na elke aanpassing wordt opnieuw vereffend.

Zodra een onjuist algemeen ruisniveau de meest waarschijnlijke fout is en het berekende ruisniveau meer dan 5% verschilt van het vooronderstelde ruisniveau zullen de parameters van het ruismodel via een variantie component analyse (VCA) worden herberekend uit de metingen. Dit betreft de standaarddeviaties voor de meetpuntspecifieke beweging en bodembeweging, de parameters voor de geleidelijkheid waarmee de meetpuntspecifieke beweging en bodembeweging zich ontwikkelen in de tijd en ruimtelijke correlatielengte voor bodembeweging. Na aanpassing van de vooronderstelde ruismodelparameters wordt opnieuw vereffend.

De geautomatiseerde cyclus van vereffening, toetsing en aanpassing wordt gestopt zodra een onjuist algemeen ruisniveau de meest waarschijnlijke fout is en het berekende ruisniveau minder dan 5% verschilt van het vooronderstelde algemene ruisniveau.

Berekening totale relatieve bodemdaling

De kleinste kwadraten vereffening levert de best mogelijke (lineaire) schatting van de nulhoogtes op. Het verschil tussen de voor modeldaling gecorrigeerde metingen en het nulhoogteverschil van de betrokken meetpunten wordt veroorzaakt door een combinatie van een meetafwijking, afwijkingen in de meetpuntspecifieke beweging en de modeldalingen van de beide meetpunten. De verschillen tussen gecorrigeerde meting en nulhoogteverschil worden zodanig over meetafwijkingen, meetpuntspecifieke beweging en modelafwijkingen verdeeld dat de gewogen som van de kwadraten van de afwijkingen minimaal is.

Optelling van de modeldaling en modelafwijking levert de totale relatieve bodemdaling voor elk van de meetpunten op. Deze berekende bodemdaling geeft het verschil in bodemdaling tussen twee meetpunten nauwkeurig weer. Door het relatieve karakter van de metingen zal deze bodemdaling in absolute zin een onbekende systematische afwijking kunnen hebben.

Oorzakelijke decompositie

Bij de oorzakelijke decompositie van de gemeten relatieve bodemdaling blijken komvormen met een elliptische horizontale doorsnede en een klokvormige dwarsdoorsnede goede diensten te kunnen bewijzen. De vorm wordt geparаметriseerd door de coördinaten van het diepste punt, de afstand van het diepste tot het steilste punt langs de lange en korte as, de oriëntatie van de lange as, de kom afplattingparameter en de daling in het diepste punt.

Aanvankelijk wordt voor elke vermoede oorzaak een aparte kom geschat. De standaarddeviatie van het verschil tussen de gemeten totale bodemdaling en de som van komdalingen en meegeschatte systematische modelafwijking is maatgevend voor de precisie van deze modelering. De standaarddeviatie wordt enerzijds bepaald door verschillen tussen de geïdealiseerde komvorm en de werkelijke bodemdaling per oorzaak, anderzijds door niet

gemodelleerde bodemdalingcomponenten. Over gebieden ($\approx 120 \text{ km}^2$) en periodes (≈ 25 jaar), waarin zich geen bodemdaling door delfstofwinning of andere afgetekende oorzaak voordoet, blijft de standaarddeviatie van de bodembeweging ten opzichte van het gemiddelde over het hele gebied onder 0.25 mm per jaar. Voor de verschillen tussen geïdealiseerde komvorm en werkelijk dalingspatroon t.g.v. een specifieke oorzaak wordt een standaard deviatie van 0.15 mm per jaar toegestaan. Daarmee kan van een succesvolle modelering worden gesproken zodra de standaarddeviatie van het verschil tussen de gemeten totale bodemdaling en de som van komdalingen en systematische fout kleiner is dan 0.3 mm per jaar.

Soms zijn de bodemdalingen t.g.v. delfstofwinning uit naburige reservoirs of cavernes zodanig versmolten, dat met één kom voor het samengestelde effect kan worden volstaan zonder dat het criterium voor succesvolle modelering wordt overschreden. Anderzijds tekent zich soms in het ruimtelijke beeld van de gemeten totale bodemdaling een onverwachte kom af. Als dat voor succesvolle modellering nodig is, wordt ook deze kom geschat. De parameters van de kommen worden samen met de onbekende systematische modelfout met de kleinste kwadraten methode berekend uit de rond elk meetpunt gemeten totale bodemdaling.

De systematische modelfout heeft een verwaarloosbaar effect op de relatieve bodemdaling tussen de meetpunten. Om ook het effect op plaatsen anders dan de daadwerkelijk aangemeten punten te minimaliseren is een herberekening nodig totdat de systematische modelafwijking kleiner is dan 0.1 mm per jaar. Voor deze herberekening dient de som van de geïdentificeerde kommen als a priori modeldaling.

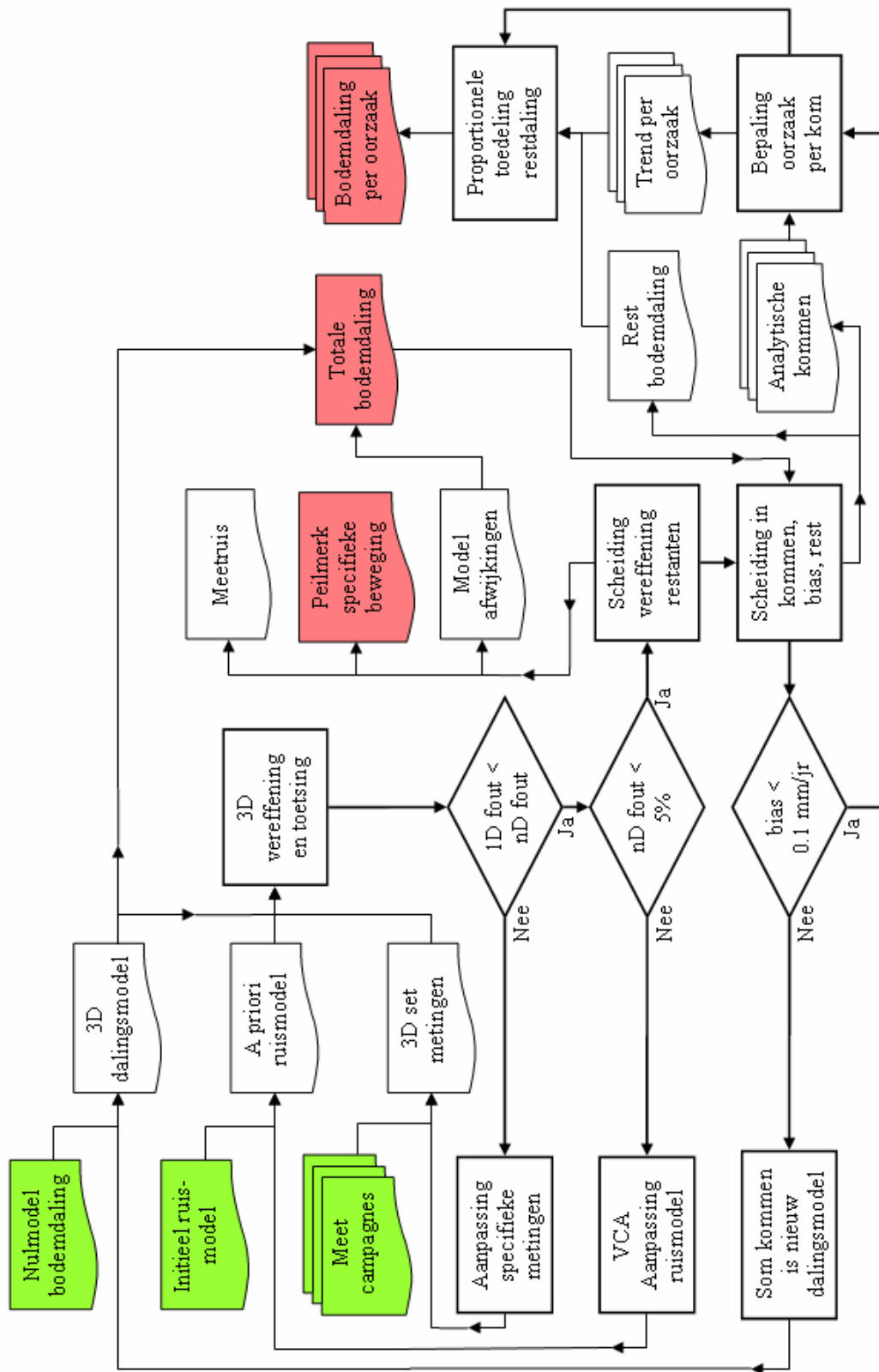
Na succesvolle reductie van de systematische modelfout kan voor elke plaats en elk tijdstip de bodemdaling worden berekend als gewogen gemiddelde van de gemeten totale bodemdaling. Het gewicht van elke meting neemt daarbij af met de afstand in ruimte en tijd tussen die meting en de plaats en tijd, waarvoor de bodemdaling wordt berekend.

Vergelijking van plaats en ontwikkeling van de gedetecteerde kommen met plaats en aanvang van bekende delfstofwinningen laat doorgaans geen enkele twijfel bestaan omtrent de oorzaak van elk van de komontwikkelingen. In een enkel geval blijft er een kom over, waarvan de oorzaak niet geïdentificeerd kan worden. Deze wordt toegerekend aan de oorzaak 'ongespecificeerd'.

Het verschil tussen de gemeten totale daling en de som van komdalingen en systematische modelfout is het restsignaal. Dit restsignaal kan positief en negatief zijn en heeft bij succesvolle modellering een standaard deviatie kleiner dan 0.3 mm per jaar. Het wordt eerst provisorisch aan de oorzaak 'ongespecificeerd' toegekend. Daarna wordt het restsignaal per plaats en tijdstip proportioneel met de amplitude van de aan elke oorzaak aanvankelijk toegewezen bodemdaling verdeeld over de individuele oorzaken, inclusief de oorzaak 'ongespecificeerd'. De totale daling per oorzaak is gelijk aan de algebraïsche som van de aan de betreffende oorzaak toegewezen komdaling en het toegerekende deel van het restsignaal.

Stroomdiagram: Bodemdaling, van meting tot oorzaak

Ter visualisatie van de afleiding van bodemdaling op meetpunt fundatieniveau per oorzaak uit de metingen is onderstaand stroomdiagram bijgevoegd.



Bijlage D

Aandachtspunten voor de inrichting van meetnetten

In nader uit te werken regelgeving voor de inrichting van meetnetten ten behoeve van de vaststelling van bodembeweging door delfstofwinning zou in ieder geval aandacht moeten worden besteed aan de volgende punten:

Meetnet

- Aantal en locatie van peilmerken, en ontwerp van het te waterpassen netwerk worden afgestemd op de verwachte vorm en bewegingssnelheid van de kom.
- Peilmerken hebben een goede spreiding over de verwachte kom en er zijn meerdere peilmerken in de nabijheid van het diepste punt.
- Enkele waterpastrajecten volgen zo mogelijk de assen van de kom.
- Meetnetten worden onderhouden en zwakke meetnetten worden aangepast om beter aan de richtlijnen te voldoen.
- Bij bestaande meetnetten kunnen peilmerken worden bijgeplaatst. Hoewel niet aanwezig voor aanvang van bodembeweging dragen deze peilmerken bij aan de analyse van de actuele beweging.
- Niet alle peilmerken uit bestaande NAP-waterpastrajecten behoeven te worden opgenomen in de deformatieanalyse. Dit voorkomt een onevenwichtige spreiding en een nodeloos groot aantal peilmerken in de analyse. Voor deze tussenpunten zijn de genoemde stabiliteitseisen ook niet noodzakelijk.
- Voor kleine velden met een verwachte geringe daling volstaat een beperkt meetnet van slechts enkele punten.

Peilmerken

- Peilmerken representeren de beweging van de diepe ondergrond en zijn gefundeerd op het pleistoceen.
- Bij plaatsing van peilmerken in gebouwen wordt vooraf onderzoek verricht naar stabiliteit en fundering. De toestand van het gebouw wordt vastgelegd met foto's.
- Bij het ontbreken van goed gefundeerde gebouwen wordt gebruik gemaakt van op het pleistoceen gefundeerde palen of buizen.
- Zo mogelijk worden paren van nabijgelegen peilmerken geplaatst ten behoeve van de onderlinge controle bij afwijkende peilmerkbeweging (verklikpunten).
- Bestaande peilmerken worden slechts opgenomen in het meetnet na onderzoek van hun historische beweging en de stabiliteit van de fundering. De situatie van het gebouw voor aanvang van winning wordt vastgelegd met foto's.

Meetopzet en analyse

- De frequentie van de periodieke waterpassing wordt afgestemd op de verwachte bewegingssnelheid.
- Voor aanvang van delfstofwinning wordt twee maal een waterpassing uitgevoerd zodat sprake is van een gecontroleerde nulmeting.
- Bij een verwachte hoge bewegingssnelheid kan tussentijds met GPS de beweging van het diepste punt worden gecontroleerd om te bepalen wanneer herwaterpassing noodzakelijk is.
- Een vermoeden van afwijkende peilmerkvariatie die niet representatief is voor de beweging van de diepe ondergrond (autonome beweging) wordt eerst door statistische toetsing vastgesteld. Vervolgens moet onderzoek ter plaatse uitwijzen wat de oorzaak is van de verdachte peilmerkbeweging voordat het peilmerk uit de analyse wordt geëlimineerd.

Bijlage E

Opzet voor industrieleidraad

Inhoud leidraad

De leidraad wordt een document, waarin de volgende onderwerpen worden geadresseerd:

1. Toetsing van de geodetische metingen op meet- en modelfouten
2. Berekening van relatieve hoogteveranderingen in de peilmerken
3. Confrontatie van het geomechanisch model met de uit meting bepaalde hoogteveranderingen
4. Programmatuur voor de analyse van geodetische metingen
5. Integratie van waterpasmetingen, GPS en PS-InSAR

Uitgangspunt voor de leidraad zijn de aanbevelingen van dit rapport en de bepalingen in de mijnbouwwetgeving.

Middelen

Het samenstellen van de leidraad gebeurt onder de verantwoordelijkheid van de delfstofindustrie: de olie- en gasproducenten en de zoutproducenten. Ook de middelen, die voor het samenstellen van de leidraad nodig zijn, worden door de delfstofindustrie beschikbaar gesteld. De overheid ziet erop toe, dat de leidraad voldoet aan het hierboven aangegeven uitgangspunt.

Organisatie

De werkgroep stelt voor om de samenstelling van de leidraad te laten begeleiden door een groepje deskundigen, bestaande uit de delfstofindustrie, de relevante onderzoeksinstituten (TNO, Deltares, TU-Delft) en de toezichthouder (Staatstoezicht op de Mijnen). Ook is het raadzaam om een vertegenwoordiger van de Tcbb aan de begeleidingsgroep te laten deelnemen. De begeleidingsgroep krijgt hiermee een samenstelling, die vergelijkbaar is met het Technisch Platform Aardbevingen (TPA).

Bijlage F

Relevante aspecten voor benchmarking

Motivatie

Bij de hierboven gegeven beoordeling zijn drie, deels conflicterende, methoden om uit geodetische data de bodemdaling ten gevolge van diepe delfstofwinning af te leiden kritisch doorgelicht. Ondanks diverse kritische kanttekeningen is het niet mogelijk gebleken om hard aan te tonen dat de ene methode meer en de andere methode minder deugt in de praktijk. Het probleem is dat de werkelijke bodemdaling niet bekend is en daarom niet gebruikt kan worden voor de toetsing van de methoden. Immers, een verschil tussen de geïnterpreteerde bodemdaling en de meetwaarden kan even goed het gevolg zijn van een onbetrouwbare meting als van een model/interpretatiefout. Als gevolg daarvan kunnen bijvoorbeeld voorstanders van de methode Houtenbos stellen dat het door SodM gebruikte model te grof is en te gemakkelijk afwijkende meetwaarden als onbetrouwbaar terzijde legt. Voorstanders van de SodM methode kunnen daartegenover met even veel recht stellen dat de methode Houtenbos te veel vrijheidsgraden heeft en daarmee ook fits realiseert aan onbetrouwbare en onrealistische meetdata, en daarmee onrealistische interpretaties geeft. Omdat aan geen van beide methoden een fysisch/geomechanisch model ten grondslag ligt, kunnen geen voorspellingen van meetwaarden in de tijd worden gemaakt en is het dus ook niet mogelijk om de kwaliteit van de modellen aan toekomstige meetwaarden te toetsen. De derde methode – de methode van TNO, die wel op fysica is gebaseerd – heeft hier duidelijk een voordeel. Maar in het algemeen is toetsing van een ruimtelijk model aan veranderingen in de tijd niet optimaal (het lukt bijvoorbeeld niet als veranderingen vrijwel monotoon zijn). Omdat de werkelijke bodemdaling in de praktijk nooit bekend is, kan dit probleem niet met behulp van meetwaarden uit de praktijk worden opgelost.

De manier om uit deze impasse te komen is de vervaardiging van een realistische synthetische dataset, op basis van een aangenomen bodemdalingkom, een aangenomen meetnet en een vervuiling van de “exacte” bodemdalingwaarden in de punten van het meetnet met ruis, meetfouten, autonome peilmerkbewegingen en ondiepe bodemdaling. Deze realistische synthetische “meet”dataset, gebaseerd op exact bekende “werkelijke” bodemdalingwaarden, kan dienst doen als benchmark voor huidige en toekomstige methoden. Voor een voldoende onderscheidend vermogen dient de benchmark-set te bestaan uit synthetische datasets voor voldoende aantal onderscheiden en realistische gevallen; deze zouden gebaseerd kunnen zijn op bodemdalingkommen berekend met geëigende geomechanische modellen voor een aantal typische reservoircondities en geometrieën. Hieronder is in grote lijnen een procedure gegeven voor het vervaardigen van een dergelijke benchmark-dataset.

Procedure

- a. Identificeer typische Nederlandse reservoircondities die tot bodemdaling kunnen leiden. Parameters zijn bijvoorbeeld: soort delfstof (olie, gas, zout en combinatie gas en zout), reservoirgeometrie, diepte, heterogeniteit in het reservoir (in druk, compressibiliteit of dikte). Schat kwalitatief het effect van de parameters op de bodemdalingkom en kies op basis hiervan een beperkt aantal (<10) onderscheiden gevallen (N.B. de bedoeling van deze stap is niet om met deze keuze de hele parameter ruimte te dekken, maar om een voldoende aantal essentieel verschillende gevallen te krijgen). Deze stap zou bij voorkeur in samenwerking/overleg met een operator moeten worden uitgevoerd.
- b. Bereken voor de onderscheiden gevallen uit stap a de bodemdalingkom voor een aantal productietijdstippen, waarbij in een aantal gevallen ook niet lineair gedrag van het reservoirgesteente en later geproduceerde reservoircompartimenten moet worden meegenomen. Voor deze berekeningen moet een redelijk rekenmodel worden gebruikt

om enigszins realistische (evolutie van) bodemdalingen te krijgen als basis voor de datasets, maar de keuze van het model is niet heel kritisch.

- c. Leg een meetnet over de bodemdalingen uit stap b, met de fijnheid van het meetnet als parameter (bijvoorbeeld een fijn, medium grof en grof meetnet). Bepaal de “exacte” bodemdaling ten gevolge diepe delfstofwinning ter plaatse van de meetpunten; dit worden de referentiewaarden voor de onderscheiden gevallen uit stap a.
- d. Leidt uit de referentiewaarden realistische meetwaarden af door het toevoegen van meetruis, meetfouten, peilmerkestabiliteit, ondiepe autonome daling, etc.

Het uiteindelijke resultaat is een aantal realistische “meet”datasets voor de bodemdaling in een aantal onderscheiden realistische reservoirsituaties, waarbij de werkelijke bodemdaling bekend is. Deze kan als referentie kan worden gebruikt bij benchmarking van huidige en toekomstige methoden. Door deze benchmark situaties te ordenen naar toenemende complexiteit en daarbinnen te benchmarken op de fijnheid van het meetnet, kan naar verwachting een goed beeld worden verkregen van de beperkingen en mogelijkheden van de respectieve methoden. Als spin-off wordt ook waardevolle informatie verkregen over de minimaal benodigde fijnheid van het meetnet in de praktijk en de waarde van extra informatie uit extra meetpunten.