

november 2008

Opgesteld in opdracht van:
Technische Commissie Bodembeweging

Technische commissie bodembeweging



Van Meting naar Daling

Methodiek van verwerking van hoogtemeting
ten behoeve van de bepaling van bodemdaling
door delfstofwinning

Van meting naar daling

Methodiek van verwerking van hoogtemeting ten behoefte van de bepaling van bodemdaling door delfstofwinning

Versie
09

Datum
november 2008

Groen versie

Opgesteld in opdracht van
Technische Commissie Bodembeweging

Rapportnummer
09

Datum
november 2008

Versie
Groene versie

Aantal pagina's
44

Titel / subtitel

**Van meting naar daling /
Methodiek van verwerking van hoogtemeting
ten behoeve van de bepaling van bodemdaling
door delfstofwinning**

Samenvatting aanleiding rapport

De Technische Commissie voor Bodembeweging (Tcbb) ondervindt dat er geen eensluidende opvatting bestaat ten aanzien van de methodiek voor het verwerken van relatieve hoogtemetingen om bodemdaling door delfstofwinning vast te stellen. Uiteenlopende visies op de problematiek en het hanteren van andere uitgangspunten leiden tot verschillende uitkomsten. Met de bedoeling om meer duidelijkheid en eenheid te bereiken heeft de Tcbb een werkgroep "Methodiek verwerking hoogtemeting" ingesteld. De werkgroep heeft de toepasbaarheid beoordeeld van verschillende methodieken, betrokkenen gehoord en ervaringen van gebruikers meegenomen.

Dit rapport doet verslag van het voorlopige standpunt van de werkgroep, een groene versie. In april 2009 wordt na verwerking van commentaar door derden een definitief standpunt ingenomen.

Procedure

De Tcbb heeft tot de volgende procedure besloten:

1. Het rapport wordt gepubliceerd als 'groene versie'. (dit rapport)
2. De Tcbb zal deskundigen rechtstreeks benaderen met het verzoek een reactie te leveren. Deze kan tot en met 31 januari 2009 worden gericht aan het Secretariaat van de Tcbb.
3. In de maand april van 2009 wordt een workshop georganiseerd over het onderwerp en de reacties. De deskundigen dienen zich hiervoor op te geven bij het secretariaat van de Tcbb, eveneens uiterlijk 31 januari 2009 met vermelding of men actief wil deelnemen met een presentatie.
4. Op basis van het resultaat van de workshop publiceert de Tcbb medio 2009 zijn definitief standpunt en advies.

opgesteld in opdracht van

Technische Commissie Bodembeweging

Secretariaat van de Tcbb
Tav Mw drs M. Verreck
postbus 20101
2500 EC Den Haag.

Website
www.tcbb.nl

Samenvatting

Aanleiding en doel

Bij het winnen van delfstoffen is een belangrijk aspect de verwachte daling van de bodem en het bewaken van de toename van de daling tijdens productie. Voor het vaststellen van de bodembeweging worden relatieve hoogtemetingen uitgevoerd en vervolgens geïnterpreteerd. 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 verwerkingsprocedure geformuleerd waaraan mijnbouwondernemingen gehouden zijn. Belanghebbenden in gebieden met bodemdaling kunnen uit eigen beweging ook opdracht tot advies in zake de verwerking van relatieve hoogtemetingen geven aan derden. In Nederland biedt ir. A.P.E.M. Houtenbos zulke diensten aan.

De Technische Commissie voor Bodembeweging (Tcbb), ingesteld door de minister van Economische Zaken, ondervindt bij haar functioneren dat er geen eensluidende opvatting bestaat ten aanzien van de methodiek voor het verwerken van relatieve hoogtemetingen om bodemdaling door delfstofwinning eenduidig vast te stellen. Verschillen in visie op de problematiek en het hanteren van andere uitgangspunten leiden tot verschillende uitkomsten voor de bodemdaling door delfstofwinning en een andere conclusie ten aanzien van autonome daling. Met de bedoeling om meer duidelijkheid en eenheid te bereiken en ter zake een onafhankelijk advies te kunnen uitbrengen aan de minister heeft de Tcbb een werkgroep "Methodiek verwerking hoogtemeting" ingesteld.

Concreet heeft de werkgroep de toepasbaarheid beoordeeld van twee rivaliserende methodieken voor het vaststellen van bodembeweging door delfstofwinning, de verwerkingsmethode die SodM oplegt aan mijnbouwondernemingen en de verwerkingsmethode Houtenbos. De betrokken deskundigen hebben de wetenschappelijke hoofdkeuzes van de eigen methode kunnen uiteenzetten en bezwaren tegen de methode van de andere partij mogen benoemen. De NAM heeft vervolgens als grote gebruiker de werkgroep geïnformeerd over opgedane ervaring met het gebruik van de beide methoden en heeft wensen van de mijnbouwonderneming ingebracht.

Methodieken en beoordeling

De twee beoordeelde methodieken leiden tot vergelijkbare uitkomsten bij goed ingerichte meetnetten, maar kunnen bij magere meetnetten verschillende uitkomsten geven. Ze zijn min of meer uitersten op een schaal van eenvoudig en overzichtelijk naar complex en ondoorzichtig. De door SodM opgelegde methodiek is de eenvoudige versie. Deze maakt vrijwel geen gebruik van de ontwikkelingen die zich in de laatste 15 jaar hebben voorgedaan op het gebied van geodetische dataverwerkingsmethoden. Kenmerken van de methode zijn het gebruik van één referentiepunt, kwalificatie van peilmerken bij de start van de winning, vrije vereffening per meetepoche en interpretatie van de metingen onafhankelijk van geo-mechanische overwegingen. Breed beschikbare standaard software (Move3, MS Excel) volstaat. Uiteindelijk worden de gemeten hoogteverschillen geconfronteerd met resultaten van het geomechanisch model, aan de hand van een eenvoudige toets. Als voor enkele peilmerken een groter verschil optreedt dan de voorgeschreven tolerantie wordt beslist of deze peilmerken moeten worden gediskwalificeerd als instabiel. Treedt het verschil bij veel peilmerken op, dan behoeft het geomechanisch model verbetering.

De methode Houtenbos heeft een plaats aan het andere eind van het spectrum. Deze benut vrijwel alle wetenschappelijke vorderingen op geodetisch terrein, zoals statistische technieken, toetsingstheorie en vereffeningstheorie. De methode claimt een zeer objectieve geometrische analyse te bieden van bodemdaling door delfstofwinning. Kenmerken van de methode zijn o.a. de afwezigheid van vaste referentiepunten, het integraal meenemen van alle meetepochen, benutten van later bijgeplaatste peilmerken en interpretatie van de metingen onafhankelijk van geomechanische overwegingen. Ook wordt er automatisch getoetst op peilmerkinstabiliteit en uitschieters en wordt bodemdaling opgeschoond van meetruis en peilmerkinstabiliteit. Het gevolg is geavanceerde specialistische software. Langs wiskundige weg kan bodemdaling

automatisch worden toegedeeld aan verschillende oorzaken, die vervolgens moeten worden geïnterpreteerd op basis van de fysische realiteit en relevante gebiedsinformatie.

De SodM-methode heeft het voordeel van grote eenvoud en toepasbaarheid door zowel grote ondernemingen met specialistische kennis als kleine ondernemingen waar die kennis niet aanwezig is. De noodzaak van één stabiel referentiepunt buiten het gebied waar de delfstofwinning plaats vindt is een nadeel. Verder groeien meetfouten aan bij grotere afstand en is stabiliteit niet gegarandeerd als winning lang duurt. De toetsing op meetfouten is beperkt. De methode stelt daarom hoge eisen aan de kwaliteit van het meetnet, de peilmerken en het referentiepunt. De zuivering op peilmerkinstabiliteit vindt niet plaats op objectieve wijze. Autonome dalers moeten door de geodeet zelf worden opgemerkt en uitgesloten. De toets op het geomechanisch model is tenslotte tamelijk beperkt op basis van een eenvoudig criterium. De eenvoud van de methode en de als subjectief ervaren afwijzing van peilmerken zijn er tegelijk de achilleshiel van.

De methode Houtenbos is in wetenschappelijke zin duidelijk superieur, want hij gebruikt de meest actuele kennis van geodetische dataverwerkingsmethoden. Het gebruik van een tijd-plaats model voor bodemdaling maakt een statistische toetsing mogelijk op meetfouten, peilmerkmis-identificatie, peilmerkverstoring, abnormale bewegingsnelheid, onjuist a priori ruisniveau en autonome daling. De aanpak is streng wiskundig zonder (veel) gebruik te maken van inzichten uit disciplines met een fysische achtergrond. Zonder tussenkomst van de gebruiker vindt scheiding van de totale bodemdaling plaats in verschillende componenten, die achteraf moeten worden toegedeeld aan fysische oorzaken. Mogelijk vraagt het meer studie of de methode voldoende gevoelig is voor het vaststellen van een eventuele autonome dalingscomponent. Omdat de verwerkingsmethode zeer complex en ondoorzichtig is en alleen te doen door ervaren geodeten met een goede achtergrond in statistiek, toetsingstheorie en vereffeningstheorie, is zij niet werkbaar voor kleine bedrijven en kan dan zelfs (door de vele knoppen) gevaarlijk zijn. De specialistische complexe software SuRe is (nog) niet voldoende gedocumenteerd. De grote volledigheid van de methode houdt tegelijk de beperking in.

Gebruikerservaring

De NAM heeft ervaring in het werken met zowel de SodM-procedure als met de methode Houtenbos. De ervaring is gerapporteerd tegen de achtergrond van binnen de Fédération Internationale des Géomètres (FIG) ontwikkelde gedachten. Deze worden daarom eerst kort samengevat en er wordt aangegeven welke betekenis ze voor de werkgroep hebben. FIG schetst een ideale situatie waarin kennis van diverse disciplines naast die van geodesie in een integrale aanpak een rol speelt, waaronder kennis van geologie en geomechanica. De werkgroep deelt op zich deze mening, maar oordeelt dat het een groot gebrek is dat geomechanische modellen nog niet statistisch kunnen worden beschreven. Het verdient daarom nu nog sterke voorkeur om de verwerking van geodetische metingen volledig te ontkoppelen van geomechanische kennis.

De mijnbouwondernemer heeft criteria aangereikt waaraan een 'optimale' methode zou moeten voldoen, waaronder transparantie, brede erkenning, toetsbaarheid door toezichthouder, scheiding naar oorzaken en geschikt voor standaard software. Het afzetten van beide methoden tegen deze criteria bevestigt de waarneming waartoe de werkgroep zelf is gekomen.

De NAM geeft aan goed te kunnen omgaan met de door SodM opgelegde procedure, liefst in combinatie met een geamendeerde methode Houtenbos, en voert een pleidooi voor het gebruik van kennis van de ondergrond bij de geodetische verwerking van de meetgegevens (richting dynamische aanpak).

Rol van geomechanische modellen

Aan het onderwerp van geomechanische modellen heeft de werkgroep een afzonderlijk hoofdstuk gewijd. Omwille van zuivere complementariteit moeten geodetische activiteiten met betrekking tot de bodembeweging door delfstofwinning idealiter (voorshands) volledig ontkoppeld blijven van geomechanische activiteiten en processen. Dit is ook mogelijk als er voldoende dekking is van geodetische metingen over het gebied (opgeschoond van meet-

fouten en instabiele peilmerken) waar men de bodembeweging wil weten. Als het mogelijk blijkt de relatieve bodemdaling te ontdoen van aandelen door andere oorzaken dan delfstofwinning, is het geodetische resultaat in het ontkoppelde geval een serie betrouwbare waarden van de bodembeweging door delfstofwinning. Hiermee gekalibreerde geomechanische modellen kunnen worden gebruikt voor extrapolatie in de tijd, dus voor voorspellingen van de bodembeweging, rekening houdend met veranderende reservoirdruk en geomechanische invloeden. Het geodetische model is voor dergelijke voorspellingen niet of zeer beperkt bruikbaar.

In situaties van te weinig betrouwbare geodetische metingen heeft men geomechanische modellering nodig voor het maken van voldoende nauwkeurige contourplots op vastgestelde meettijden. Geomechanische modellering kan dan de onzekerheid in de interpretatie van geodetische metingen verkleinen. Met kinematische modellen die geen relatie hebben met de fysica/geomechanica van de ondergrond gebeurt dat hooguit schijnbaar, want ze voegen geen nieuwe kennis toe. De werkgroep geeft een aantal overwegingen bij de gewenste nauwkeurigheid van zulke geomechanische modellen.

Advies

Tussen de partijen SodM en Houtenbos bestaat redelijke overeenstemming ten aanzien van de visie dat subjectiviteit moet worden uitgebannen en dat geometrische uitwerking van hoogtemetingen veel nauwkeuriger is dan uitkomsten van geomechanische modellen. Maar er zijn wezenlijke verschillen ten aanzien van zaken zoals de inrichting van het meetnet, compleetheid van het meetprogramma en de fundatie van peilmerken. Het volledige advies wordt uitgebracht in hoofdstuk 6. Belangrijke onderdelen zijn:

- Er worden nadere 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 winningsplan, te kunnen volgen. Het voor dit specifieke doel benodigde aantal op het Pleistoceen gefundeerde peilmerken wordt vastgesteld op basis van de gewenste mate van nauwkeurigheid, de verwachte grootte en vorm van de dalingskom en de kwaliteit van de reeds aangebrachte peilmerken.
- 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: toetsen van geodetische metingen op meet- en modelfouten; berekening van relatieve hoogteveranderingen in de peilmerken en 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 verantwoordelijkheid van de mijnbouwonderneming. Deze beoordeelt de correlatie tussen het geomechanisch model en de interpretatie van de hoogtemetingen en moet een verklaring bieden voor afwijkingen tussen geomechanische simulatie en hoogtemetingenuitwerking bij andere oorzaken dan delfstofwinning. Er is nadere regelgeving nodig over samenwerking van mijnbouwondernemingen bij het scheiden naar oorzaak in geval van overlappende delfstofvoorkomens. SodM speelt een toezichhoudende rol en kan het scheidingsresultaat accepteren of verwerpen. Er is behoefte aan een regeling voor geschillenbeslechting in gevallen waarin een of meer belanghebbenden het resultaat van de scheiding aanvechten.
- 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.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Probleemstelling en werkwijze	3
2.1	Probleemstelling	3
2.2	Werkwijze	3
3	Methodiek en beoordeling	5
3.1	Staatstoezicht op de Mijnen	5
3.1.1	Beschrijving van de methode	5
3.1.2	Beoordeling van de methode door de werkgroep	6
3.1.3	Conclusie	7
3.2	Ir. A.P.E.M. Houtenbos	8
3.2.1	Beschrijving van de methode	8
3.2.2	Beoordeling van de methode door de werkgroep	9
3.2.3	Conclusie	11
4	Praktijkervaring	13
4.1	Internationale ontwikkelingen	13
4.2	Betekenis van de internationale trend voor de werkgroep	14
4.3	Ervaring van NAM met methodes van bodemdalingmetingen	14
5	Geomechanische aspecten	17
5.1	Koppeling geodesie en geomechanica	17
5.2	Onzekerheid in geomechanische modellering	18
6	Advies	21
Bijlage(n)		
	Aanleiding en doel	
	Methodieken en beoordeling	
	Gebruikerservaring	
	Rol van geomechanische modellen	
	Advies	
Bijlage 1	SODM-procedure	
Bijlage 2	Aanleiding van SodM tot de toetsingsprocedure	
Bijlage 3	Methode Houtenbos	
Bijlage 4	Bedenkingen van Houtenbos bij de SodM-procedure	

1 Inleiding

Bij het verlenen van vergunningen voor winning van delfstoffen is een belangrijk aspect de verwachte daling van de bodem. 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. Voor het vaststellen van de bodembeweging ten gevolge van natuurlijke en antropogene activiteiten 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 verwerkingmethode geformuleerd waaraan mijnbouwondernemingen gehouden zijn. Belanghebbenden in gebieden met bodemdaling kunnen uit eigen beweging ook een oordeel vormen over de verwerking van hoogtemetingen. Daarbij wordt vaak naar onderzoek van ir. A.P.E.M. Houtenbos verwezen.

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 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 werkgroep heeft zich in haar studie en beoordeling primair gericht op de verwerking van relatieve hoogtemetingen volgens de SodM-methode en de Houtenbos-methode.

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 in de beschouwing willen betrekken van later bijgeplaatste peilmerken, het betrekken 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. 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 opnames aan het bodemoppervlak om veranderingen in de hoogteligging vast te stellen. De mate waarin deze wel of niet onafhankelijk van elkaar zijn is een discussiepunt, waarover de werkgroep zich mede heeft gebogen.

Geodetische metingen leveren met een hoge nauwkeurigheid informatie over de werkelijk opgetreden bodemdalingverschillen tussen meetpunten. Deze informatie wordt op twee verschillende manieren gebruikt: ten eerste ter controle van de verwachte bodemdaling zoals opgenomen in het winningplan; ten tweede ter verbetering van het geomechanisch model dat is gebruikt voor het voorspellen van de verwachte bodemdaling. De werkgroep heeft het niet tot haar taak gerekend om een analyse uit te voeren van voorspellingsmethoden.

2.2 Werkwijze

De werkgroep is zes keer in vergadering bijeen geweest. Drie van deze bijeenkomsten zijn gewijd aan gesprekken met de twee direct betrokken methode-ontwikkellende deskundigen dr.ir. A. Duquesnoy van SodM en ir. A.P.E.M. Houtenbos en met de toepassingsdeskundigen Dr.-Ing. S. Kampshoff en drs. D. Doornhof van de NAM. De genoemde ontwikkelings-deskundigen hebben de wetenschappelijke hoofdkeuzes in de eigen methode uiteengezet en kregen gelegenheid bezwaren tegen de methode van de andere partij te benoemen. 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.

Een concept van het uit te brengen advies is voorgelegd aan SodM, Houtenbos en de NAM om te beoordelen of de aangereikte informatie goed is weergegeven en begrepen. De werkgroep heeft daarna het conceptadvies afgerond en uitgebracht aan de Tcbb. De Tcbb heeft dit besproken in haar vergadering van 13 november 2008 en het definitieve advies vastgesteld.

3 Methodiek en beoordeling

In dit hoofdstuk staat de geodesie centraal. Aan beide partijen SodM en Houtenbos is in afzonderlijke bijeenkomsten gelegenheid geboden om de eigen visie en aanpak aan de orde te stellen, zodat de werkgroep zich een goed beeld kon vormen van de situatie. In dit hoofdstuk wordt per gastspreker ingegaan op hetgeen besproken is. Eerst wordt beknopt weergegeven wat vanuit elke partij is gepresenteerd over de eigen methode en welke bedenkingen men heeft tegen de methode van de andere partij. Voor een uitgebreidere weergave wordt verwezen naar de bijlagen. Vervolgens wordt de beoordeling door de werkgroep vermeld, afgesloten met een conclusie.

3.1 Staatstoezicht op de Mijnen

3.1.1 Beschrijving van de methode

SodM heeft recentelijk een toetsingsprocedure ontwikkeld op basis van 'iteratieve voorwaartse modellering'. De methode gaat uit van berekening van de waterpasmetingen per epoeche (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 epoeche 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 epoeche (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 epoeche). 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.

Toetsingsprocedure

Controle op meetfouten vindt plaats door middel van standaard geodetisch-statistische toetsing met Move3. Omdat deze toetsing per meetnetwerk (epoeche) plaatsvindt is op dat moment geen toetsing mogelijk op afwijkend gedrag van peilmerken of instabiliteit van het referentiepunt. Alle gemeten peilmerk-hoogteveranderingen in de differentiestaat worden vergeleken met de uit geomechanische modellering voorspelde bodemdaling ter plaatse. Hiervoor wordt een vaste drempel van 13 mm gehanteerd. Deze waarde 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.

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 overtalligheid 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).

3.1.2 Beoordeling van de methode door de werkgroep

De verwerkingsmethode is eenvoudig en inzichtelijk. De berekening van hoogten per epoche kan met standaard geodetische software als Move3 plaatsvinden. Analyse van de hoogtevariaties 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 methode SodM is een breuk met het verleden waarin het waterpasnet 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 meetnet 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 overtalligheid. 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 peilmerkhoogten 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.

De toetsingsprocedure komt erop neer dat elke door waterpassing verkregen peilmerk-hoogteverandering uit de differentiestaat wordt vergeleken met de voorspelde bodembeweging volgens het geomechanisch predictiemodel. De daarbij gehanteerde tolerantie van 13 mm is alleen gebaseerd op de aangenomen nauwkeurigheid van de berekende peilmerkhogten. Doordat geen rekening wordt gehouden met de (on)nauwkeurigheid van de geomechanische predictiemodellen is strenge statistische toetsing niet goed mogelijk.

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.

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 inmiddels zoveel oorspronkelijke peilmerken zijn verdwenen of verstoord dat daarmee nauwelijks nog een zinvolle analyse mogelijk is.

3.1.3 Conclusie

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.

3.2 Ir. A.P.E.M. Houtenbos

3.2.1 Beschrijving van de methode

De analysemethode van Houtenbos is sterk geïntegreerd en geautomatiseerd. Alle waterpasmetingen, die in de loop der tijd zijn uitgevoerd, worden tegelijk vereffend. De geleidelijkheid van de beweging in ruimte en tijd wordt daarbij gebruikt ter versteviging van de relatie tussen de metingen op dicht bij elkaar gelegen tijdstippen en plaatsen.

In plaats van de hoogte van één punt wordt de gemiddelde hoogte van alle punten als in de tijd onveranderlijke referentie vastgehouden. Deze referentie wordt achteraf met behulp van een absoluut bodemdalingmodel zodanig verlegd dat de gemiddelde daling in het buitengebied nul wordt. Deze referentiewijziging beïnvloedt de berekende absolute beweging wel, maar de relatieve beweging niet.

Vereffening

Elk gemeten hoogteverschil tussen twee punten wordt geschreven als de som van het hoogteverschil op de referentiedatum, een verschil in peilmerkspecifieke beweging, een bodemdalingverschil en een meetafwijking. Bij deze fenomenologische decompositie is bodemdaling door natuurlijke oorzaken als isostasie, tektoniek en compactie inbegrepen bij het bodemdalingverschil, maar niet bij het verschil in peilmerkspecifieke beweging. In tegenstelling tot bodemdaling kan peilmerkspecifieke beweging afhankelijk van funderingstype en belasting variëren voor verschillende peilmerken op een en dezelfde plaats.

Voor de meetafwijking in het gewaterpaste hoogteverschil wordt een normale verdeling aangenomen met verwachting nul en een standaardafwijking die toeneemt met de afstand tussen de meetpunten.

Voor de peilmerkspecifieke beweging van een meetpunt wordt een normale verdeling aangenomen met onbekende verwachting en een standaardafwijking, die toeneemt met een zekere macht van de tijd verstreken sinds de referentiedatum. In overeenstemming met de definitie wordt er geen correlatie tussen de peilmerkspecifieke beweging van verschillende peilmerken aangenomen. Voor alle meetpunten wordt dezelfde (onbekende) verwachting verondersteld.

De bodembeweging wordt geschreven als de som van een benaderde waarde, afgeleid uit een bodemdalingmodel, en een modelafwijking. Deze modelafwijking is het verschil tussen de werkelijke bodembeweging en de beweging volgens het bodemdalingmodel. Hierdoor is de som van bodemdalingmodel en modelafwijking, ongeacht de kwaliteit van het model, gelijk aan de werkelijke daling. Een slecht passend model wordt gecompenseerd door grotere modelafwijkingen. Voor de modelafwijking wordt een normale verdeling aangenomen met een onbekende verwachting en een standaardafwijking die toeneemt met een zekere macht van de tijd verstreken sinds de referentiedatum. Bovendien wordt aangenomen dat de modelafwijking ruimtelijk gecorreleerd is, waarbij de correlatie met toenemende afstand tussen twee meetpunten exponentieel afneemt.

De verwachting van de modelafwijking en van de peilmerkspecifieke beweging kunnen niet uit de gemeten hoogteverschillen tussen twee punten worden bepaald, maar zijn voor de bepaling van relatieve beweging ook niet van belang.

Het driedimensionale netwerk van gemeten hoogteverschillen in ruimte en tijd wordt in een keer integraal vereffend.

Toetsingsprocedure

Na vereffening wordt statistisch getoetst op onregelmatigheden. Waterpasnetwerken hebben in de regel een lage overtaligheid. Daardoor is slechts een beperkte toetsing op meetfouten mogelijk. In de gebruikelijke netwerkvereffening per epoche is bovendien geen integrale toetsing op abnormaal peilmerkgedrag in de tijd mogelijk. Door gebruik te maken van het feit dat peilmerkbeweging, veroorzaakt door geomechanische en geotechnische processen, in

ruimte en tijd gecorreleerd is, wordt de toetsing op meetfouten aanmerkelijk scherper en kunnen ook toetsen worden uitgevoerd op peilmerkmisidentificatie, peilmerkverstoring en abnormale peilmerkspecifieke bewegingsnelheid. Dit gebeurt tegen de achtergrond van het a priori aangenomen ruismodel. De parameters van dit ruismodel worden getoetst tegen en - bij significante verschillen - aangepast aan de fysiek in de metingen doorklinkende ruis. Het gaat hierbij om 6 parameters, die samenhangen met de standaardafwijkingen voor de meetruis, peilmerkspecifieke beweging en afwijkingen van het vooronderstelde bodemdalingmodel, de parameters voor de geleidelijkheid waarmee peilmerkspecifieke beweging en afwijkingen van het bodemdalingmodel zich ontwikkelen in de tijd en de ruimtelijke correlatielengte voor bodemdaling.

Detectie van een meetfout leidt tot eliminatie van het betreffende gemeten hoogteverschil. Bij peilmerkmisidentificatie krijgt het peilmerk op het tijdstip van misidentificatie een andere naam, zodat het gedrag van het peilmerk op het betreffende tijdstip wordt losgekoppeld van dat op de andere meettijdstippen. Bij peilmerkverstoring wordt het gedrag van het bewuste peilmerk vóór de verstoring los gekoppeld van dat na de verstoring door een andere naamgeving. Een abnormale peilmerkspecifieke bewegingsnelheid, tenslotte wordt geneutraliseerd door verhoging van de peilmerkspecifieke bewegingsruis voor het betreffende peilmerk. Elke aanpassing betreft steeds één gedetecteerde onregelmatigheid, namelijk die met de hoogste waarschijnlijkheid. Daarna wordt opnieuw vereffend, getoetst en aangepast.

De hele cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen wordt automatisch doorlopen totdat er geen specifieke onregelmatigheden meer zijn die waarschijnlijker zijn dan een onjuist ruismodel. Als het verschil tussen het fysiek in de metingen doorklinkende en het a priori veronderstelde ruisniveau dan nog groter is dan 5%, worden de parameters van het ruismodel herijkt tegen de geschoonde metingen en wordt de cyclus van vereffening, toetsing en aanpassing voortgezet. Pas als ook het gebruikte vooronderstelde ruisniveau in overeenstemming is met het fysieke ruisniveau van de geaccepteerde metingen wordt de cyclus van vereffening, toetsing en aanpassing beëindigd.

Na beëindiging van de cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen levert optelling van de modeldaling en de modelafwijking de totale relatieve bodemdaling tussen alle meetpunten op.

Scheiding in delen naar oorzaak

Tenslotte wordt met Microsoft Excel de totaal gemeten en van meetruis en peilmerkspecifieke beweging geschoonde bodembeweging ontleed in primair samenstellende delen. Deze samenstellende delen worden bij benadering gerepresenteerd door absolute wiskundige bodemdalingmodellen. De parameters van de bestpassende absolute modellen worden samen met de onbekende referentie*bias* door middel van een kleinste kwadraten vereffening berekend uit de totale relatieve bodemdaling op de meetpunten. Als de resulterende referentieverschuiving significant is wordt de totale procedure van vereffening, toetsing en aanpassing vanaf het begin herhaald met het verbeterde absolute bodemdalingmodel als uitgangspunt. De gevonden samenstellende delen moeten achteraf aan bekende delfstofwinning worden gekoppeld. Houtenbos acht dit veelal eenduidig mogelijk op grond van de plaats en ontwikkeling in de tijd van de samenstellende delen.

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.

3.2.2 Beoordeling van de methode door de werkgroep

De methode is in wetenschappelijk opzicht up-to-date. 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 hiermee corresponderende problematiek wordt vermeden. Dat geldt ook voor de gelijke waardering van primaire en secundaire meetpunten, een voordeel als het aantal meetpunten in de loop der jaren al behoorlijk is uitgedund.

In de methode Houtenbos wordt alles uit de la gehaald wat in de afgelopen 15 jaar aan geodetische analysemethoden is ontwikkeld. De grote volledigheid van de methode is tegelijk het nadeel ervan. Daardoor lijkt de hele procedure nogal ondoorzichtig en is deze alleen voor een expert op het gebied van geodetische analysemethoden (vereffeningtheorie, toetsingtheorie, statistische methodes) begrijpelijk.

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 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 invloed van parameteraanpassing en modelkeuze op het eindresultaat kan worden beoordeeld door een voldoende groot aantal cases te kiezen en met de methodiek te experimenteren, maar dat kon in de beschikbare tijd niet worden overwogen.

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 zinvol.

Het primaire resultaat van de analyse is een schatting van de totale relatieve bodembeweging ongeacht de oorzaak. Daarnaast is het mogelijk de bodemdaling te decomponeren in delen naar afzonderlijke oorzaken. Hiervoor worden een of meer wiskundig modellen (kommen) gekozen en worden de modelparameters uit de vereffende relatieve bodembeweging geschat. In principe is dit een puur wiskundige bewerking, waarbij de gebruiker van de methodiek uitsluitend het aantal kommen kiest. De gebruiker moet het geometrische decompositieresultaat fysisch interpreteren en een verband leggen met de geomechanische werkelijkheid van de delfstofwinning(en) en mogelijke andere oorzaken. Zo kan de wiskundige faciliteit een ondersteuning zijn bij het scheiden naar oorzaken, die strikt genomen kennis vereist over het reservoir en de geomechanische gesteldheid van de ondergrond wil men keuzes voorkomen, die fysisch onrealistisch zijn. Omgekeerd, indien geomechanische informatie van de lokatie in kwestie zou worden gebruikt voor het opstellen van het bodemdalingmodel, wordt het resultaat afhankelijk van het geomechanisch model en kan het niet meer als onafhankelijke controle worden beschouwd.

Een van de belangrijkste redenen voor het invoeren van een bodemdalingmodel was 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 meetnetten. 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 te veel a priori aannames te moeten maken over signaal en ruis.

De methode Houtenbos voorziet ook de mogelijkheid om voorspellingen te doen, puur op basis van de analyse van de waarnemingen. Betrouwbare voorspellingen zijn echter pas op basis van een geomechanisch model mogelijk. Daarom wordt geadviseerd, de metingen en een eventueel geschat kinematisch bewegingsmodel niet voor de predictie van bodembeweging te gebruiken

en slechts geomechanische modellen hiervoor te gebruiken mits ze daarvoor aan hand van geodetische metingen geverifieerd zijn.

3.2.3 Conclusie

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.
- + Biedt een wiskundig-geometrische faciliteit voor decompositie, die ondersteunend kan zijn bij het scheiden van de totale bodemdaling naar fysische oorzaken.

- Alleen geschikt voor gebruikers met een zeer goede kennis op het gebied van vereffeningtheorie, statistiek en toetsingtheorie.
- Automatische cyclus van vereffenen, toetsen en aanpassen maakt controle op het verwerkingproces moeilijk.
- In het geval van slechte meetnetten wordt het resultaat beïnvloed door de aannames m.b.t. de kansverdelingen voor modelafwijking en autonome beweging en de keuze van het bodemdalingmodel.

4 Praktijkervaring

De NAM heeft de werkgroep geïnformeerd over de opgedane ervaring met de verschillende methodieken en plaatste deze tegen de achtergrond van gedachtevorming die heeft plaatsgevonden in Fédération Internationale des Géomètres (FIG). In paragraaf 4.1 wordt die eerst kort beschreven. Daarna wordt de betekenis ervan voor de werkgroep samengevat in paragraaf 4.2. Tegen die achtergrond wordt de ervaring van de NAM weergegeven in paragraaf 4.3.

4.1 Internationale ontwikkelingen

De doorgaande gedachtevorming binnen FIG heeft plaatsgevonden ten aanzien van modellen en terminologie voor de analyse van geodetische metingen. Er is sprake van een ontwikkeling in de tijd. 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 (loads) en de resulterende deformaties. Het nut wordt beseft van een dieper en breder begrip van deformatiefenomenen die in feite het resultaat zijn van *dynamische processen*. Het wordt begrepen dat deformatieanalyse in wezen moet worden gezien vanuit een interdisciplinair gezichtspunt. Disciplines als civiele techniek, geotechniek, filter- en regeltechniek, systeemtheorie en signaalverwerking komen in beeld en moeten een rol spelen. Tegelijk groeide de behoefte om een heldere en eenduidige terminologie te hanteren.

Traditioneel is het doel van deformatiemetingen het vaststellen van bewegingen en verplaatsingen van een object naar plaats en tijd. Nu is het doel van geodetische deformatieanalyses om verder te gaan, van een puur 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 en de fysische eigenschappen van het beschouwde object of gebied. Tezamen worden het object, de krachten die erop werken en de resulterende deformaties 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 processen begrepen moet worden waaraan het beschouwde object onderworpen is. Daarom zijn de meest algemene en allesomvattende modellen dynamische modellen. Door het invoeren van vereenvoudigingen kunnen hiervan congruente, kinematische en statische modellen worden afgeleid. Zo ontstaan vier categorieën, waarvan er twee 'descriptive models' zijn (beschrijvende modellen: congruent en kinematisch) en twee 'cause-reponse models' zijn (oorzaak-gevolg modellen: statisch en dynamisch). 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
 - Permanente 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.

4.2 Betekenis van de internationale trend voor de werkgroep

De eerste twee categorieën zijn puur beschrijvend en de laatste twee betrekken de oorzaak in het model. De methoden van SodM en Houtenbos laten zich beide inpassen in de rubriek beschrijvende modellen. De werkwijze die SodM voorschrijft gaat uit van een congruent model en de methode van Houtenbos behoort tot de categorie kinematisch model. Qua eenvoudniveau bevindt SodM zich aan het uiterste einde, naar het lijkt op een niveau van begin jaren negentig van de vorige eeuw. Houtenbos maakt gebruik van de allerlaatste wetenschappelijke ontwikkelingen, maar wenst geen gebruik te maken van fysische informatie.

Een belangrijke vraag is welke rol het geomechanische voorspellingsmodel mag spelen in zijn eigen verificatie. Zowel SodM als Houtenbos staan een aanpak voor waarin de bodemdaling door winning wordt vastgesteld onafhankelijk van de geomechanische verwachting, uitsluitend op basis van de geometrische metingen (want de voorspelde bodemvervorming is veel onnauwkeuriger en herbergt mogelijk systematische fouten). In feite wordt daarmee afgeweken van de trend die door FIG wordt beoogd.

De werkgroep heeft er goede nota van genomen dat de FIG dynamische modellen als onderzoekstrend ziet. Er wordt bij opgemerkt dat FIG zich richt op een breed palet van onderwerpen en niet naar bodemdaling door delfstofwinning alleen. Voor het tot ontwikkeling brengen van dynamische modellen op het gebied van delfstofwinning is nog geen goede beschrijving van onzekerheden in de geomechanische modellen beschikbaar. Voortgezet onderzoek op dit terrein is geboden. Nu is het nog beter om het geodetische model onafhankelijk te houden van het fysische model en het te gebruiken om het fysische model te toetsen op betrouwbaarheid en om het te calibreren. Als die betrouwbaarheid is bewezen, kan een combinatie/integratie van beide modellen worden gebruikt voor het voorspellen van toekomstige bodemdaling.

4.3 Ervaring van NAM met methodes van bodemdalingmetingen

Criteria

De NAM kan duidelijk aangeven welke criteria worden aangelegd in het beoordelen van methodieken. Vooral internationale erkenning van de methode en transparantie zijn belangrijk. Ook aan continuïteit wordt gehecht om niet steeds de opgetreden bodemdaling aan te hoeven passen. De bodemdaling moet vaststaan, maar voorspellingen mogen indien nodig wel aangepast worden. De methode moet transparant en volledig geformaliseerd zijn, toetsbaar door de toezichthouder en geschikt voor waterpassing, GPS en PS-InSAR. De NAM vindt ook belangrijk dat de methode kan scheiden naar verschillende oorzaken en kennis van de ondergrond gebruikt in een integrale aanpak om het aandeel van de eigen delfstofwinning in de bodemdaling te kunnen vaststellen. Tenslotte is gemakkelijk toe te passen standaard software essentieel met support voor gebruik en garantie voor continuïteit.

Scheiden naar oorzaak

De metingen bestaan uit relatieve hoogteverschillen in ruimte, maar hetgeen gezocht wordt zijn de 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 cause-response modellen, kan bodemdaling aan oorzaken gekoppeld worden en kan een voorspelling gemaakt worden. Het is voor de NAM van belang om aan te kunnen tonen waar bodemdaling door veroorzaakt wordt en niet alleen de hoeveelheid totale bodemdaling. Daarom is het nodig om op een duidelijke manier ondergrondkennis mee te nemen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door iteratieve calibratie van geomechanische modellen met behulp van de gemeten peilmerkbeweging.

Visualisatie

Visualisatie van het resultaat is mogelijk door de contouren van het geomechanisch model in dezelfde kaart te plotten als de puntinformatie van de peilmerkbeweging die uit hoogteverschilmetingen is berekend.

Plaats van modelimplementaties in het schema van FIG-categorieën

De plaats van de in Nederland toegepaste modelimplementaties in de FIG-categorieën is door de NAM op overzichtelijke wijze in beeld gebracht in de vorm van onderstaand schema. Er blijkt ook uit welke resultaten kunnen worden verwacht.

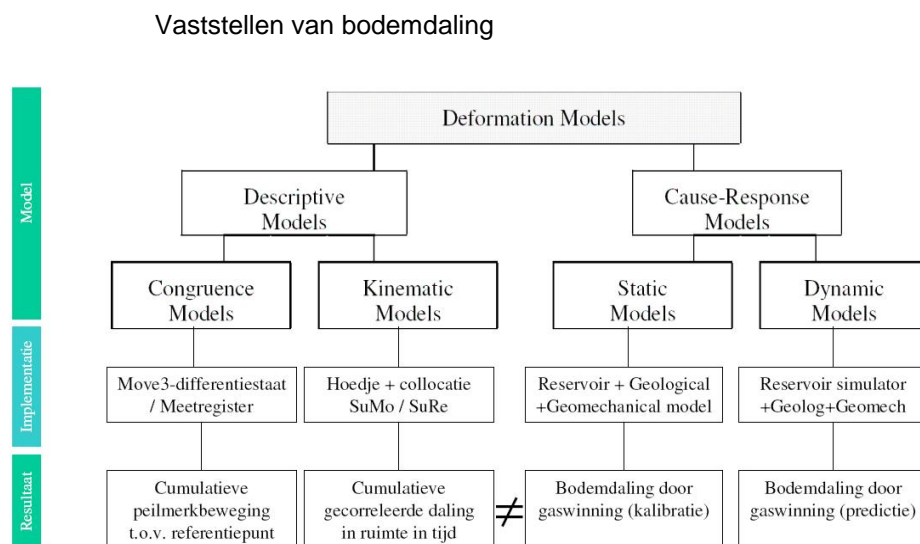


FIG 2001: MODELS AND TERMINOLOGY FOR THE ANALYSIS OF GEODETIC MONITORING OBSERVATIONS.

Invloed van keuzes

Bij beide methodes, SodM en SuMo/SuRe, moet uitgegaan worden van aannames om hoogteverschilmetingen naar deformaties te vertalen: 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.

Vergelijking van methoden

NAM heeft drie methoden (Move3, SuMo/SuRe en Root-Mean-Square toets (RMS) van SodM) vergeleken en beoordeeld op de genoemde acht criteria. SuMo/SuRe is nog als een iets oudere versie beoordeeld, maar het is in ieder geval duidelijk dat de andere twee methodes positiever scoren. 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), toetsbaarheid door een toezichthouder en het gebruik van standaard software met professionele support; dit ontbreekt (nog) bij SuMo/SuRe.

Dynamic modelling proces

De NAM kan de RMS-toets van SodM gebruiken als onderdeel van een integraal 'dynamic modelling proces' zoals geformuleerd door FIG. Dit iteratief 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 'system reaction' (bodemdaling door gaswinning).

Aan de hand van enkele voorbeelden heeft NAM laten zien hoe de SodM-methode gebruikt is. Als het referentiepunt ver weg ligt kan de SodM-methode onnauwkeurig worden. Er is een voorbeeld, waarbij de datumonzekerheid relatief groot bleek te zijn (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 voorbeeld zijn de resultaten van verschillende toegepaste modellen met elkaar vergeleken aan de hand van de RMS-toets van SodM. Het is niet eenvoudig om de beste op uit te kiezen. Dit kan alleen gebeuren door met meerdere experts de resultaten te beoordelen.

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 het datum en de keuze van het referentiepunt, betere modellering van tijdsafhankelijke ruis, beoordeling van lokale peilmerkverstoringen door experts en het consistent meenemen van alle punten. De NAM zou wel wat zien in een methode waarbij een integrale vereffening volgens de SuMo/SuRe opzet gebruikt kan worden, maar zonder a-priori correlaties, en er getoetst wordt op een significante afwijking van meting en prognose. Verder moeten de resultaten van deze methode beperkt blijven op punten en tijdstippen waarop feitelijk metingen uitgevoerd zijn. Er dient een duidelijke scheiding te blijven tussen 'filtering' en 'extrapolatie/predictie'. Iteratief kunnen puntsgewijze gladheid-constraints in ruimte en/of tijd toegevoegd worden om het opsporingsvermogen voor fouten te verhogen.

Voorwaarde voor werkbaarheid

Een dergelijke methode zou alleen werkbaar zijn voor de NAM als deze ook breed gedragen zou worden door de toezichthouder en andere belangrijke partijen zoals voorbeeld TU Delft en TNO. Een afsluitende wens is dat de te gebruiken methode omgezet zou moeten worden in een bruikbaar softwarepakket dat allerlei bedrijven gemakkelijk kunnen toepassen.

5 Geomechanische aspecten

In dit hoofdstuk wordt de rol belicht van geomechanische aspecten bij de hoogtemeting ten behoeve van bodemdaling door delfstofwinning. Eerst wordt ingegaan op de wenselijkheid en noodzaak van het al dan niet koppelen van geodesie en geomechanica bij de interpretatie van de metingen. Vervolgens worden de onzekerheden in de geomechanische modellering beschreven, voor zover relevant voor de interpretatie van de metingen.

5.1 Koppeling geodesie en geomechanica

Omwille van zuivere complementariteit zouden idealiter geodetische activiteiten met betrekking tot de bodembeweging door delfstofwinning volledig ontkoppeld moeten zijn van geomechanische activiteiten en processen. Dit is alleen mogelijk als er voldoende dekking is van geodetische metingen over het gebied waar men de bodembeweging wil weten en als deze geodetische metingen kunnen worden opgeschoond van meetfouten en instabiel peilmerkgedrag en kunnen worden ontdaan van niet door delfstof winning veroorzaakte (bijvoorbeeld ondiepe) bodembeweging zonder gebruik te maken van geomechanische modellen. Behalve van geodetische constraints kan men voor deze zuivering van de meetwaarden hooguit gebruik maken van aan grondmechanica gerelateerde constraints en overwegingen (zowel geobserveerde als gesimuleerde), zoals het feit dat:

- diepe compactie zich in het algemeen uitsmeert tot een *vrij geleidelijke* bodemdalingkom aan het maaiveld, die een breedte heeft van minstens 2x de diepte van het reservoir (zie volgende paragraaf); er is dus in het algemeen ruimtelijke correlatie tussen de meetpunten. Uitzonderingen hierop zijn ondiepe zoutcavernes waarbij het dak is bezwaken en "schoorsteenvormige" zakking zich voortzet tot aan het maaiveld.
- aan delfstofwinning gerelateerde beweging van de ondergrond in het algemeen leidt tot bodemdaling aan het maaiveld; stijgende peilmerken duiden dus op ondiepe, al dan niet autonome bodembewegingen. Uitzonderingen hierop zijn reservoirs gebruikt voor ondergrondse gasopslag, waar zowel bodemdaling als bodemstijging wordt gevonden en convergerende zoutcavernes, waarbij op enige laterale afstand van de caverne een geringe bodemstijging op kan treden.
- aan delfstofwinning gerelateerde bodembeweging in het algemeen *monotoon* is en niet leidt tot snelle wisselingen aan het maaiveld.

Deze geomechanische overwegingen zitten ten dele impliciet in het kinematische "hoedjesmodel" van Houtenbos, dat dan ook uitstekend geschikt is voor het opschonen van de metingen. In veel gevallen zouden dergelijke modellen ook kunnen worden gebruikt om de bodemdaling te ontdoen van (ondiepe) componenten bijvoorbeeld door andere menselijke activiteit dan delfstofwinning, via het veelal significante verschil in specifieke kombreedte bij diepe en ondiepe activiteit. Echter het scheidingsresultaat kan hierbij nog te zeer afhangen van de inzichten van de softwareoperator en objectiviteit is daarom (nog) niet voldoende gegarandeerd. Verdere objectivering van deze methode zou zinvol zijn.

Het uiteindelijke geodetische resultaat is in het ideaal ontkoppelde geval een serie betrouwbare waarden van de door delfstofwinning veroorzaakte bodembeweging, waaraan de geomechanische modellen kunnen worden getoetst en gecalibreerd. In minder ideale gevallen zullen de meetwaarden nog vervuild kunnen zijn door een ondiepe bodemdalingscomponent. Bij de confrontatie met het geomechanisch model kan de meetset in een overleg tussen de meest betrokkenen worden ontdaan van deze laatste nog niet eerder verwijderde ondiepe componenten.

De gecalibreerde geomechanische modellen worden vervolgens gebruikt voor ruimtelijke inter- en extrapolatie van de meetpunten, dat wil zeggen het maken van contourlijnen, en voor extrapolatie in de tijd, dat wil zeggen voor voorspellingen van de bodembeweging, rekening houdend met veranderende reservoirdruk en geomechanische invloeden. Het geodetische model is voor dergelijke voorspellingen niet of zeer beperkt bruikbaar, omdat het impliciet aanneemt dat de druk in het hele veld proportioneel blijft dalen en dat responsfunctie van reservoir en overburden dezelfde blijft. In gevallen van ruim voldoende meetdekking en geringe

vervuiling van de data kunnen de meetwaarden eventueel ook zonder gebruik van geomechanische modellen ruimtelijk worden geïnterpoleerd tot bodemdalingcontouren.

Puur geodetische ruimtelijke interpolatie (contouring) is niet meer mogelijk als:

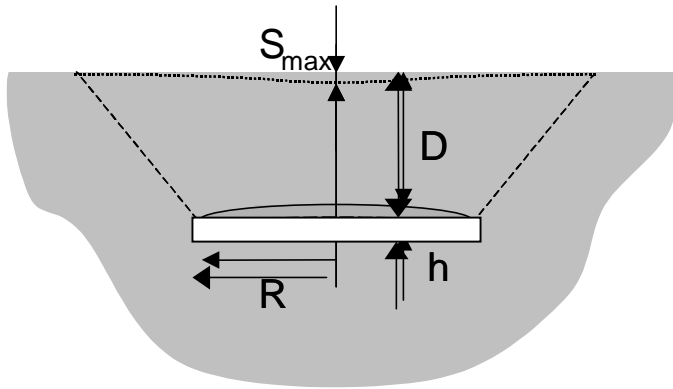
- de geodetische metingen te onbetrouwbaar zijn, bijvoorbeeld te zeer vervuild zijn met meetfouten, ruis, instabiele peilmerken of autonome -bijvoorbeeld plaatselijke, ondiepe- bodembeweging.
- er te weinig meetpunten zijn in het gebied waarvan men de bodemdaling wil weten; dit is met name het geval bij velden die grotendeels onder de zeebodem liggen en waar men naast de daling van het land ook die van de zeebodem wil weten.

Om de ont koppeling ook hier zover mogelijk door te voeren dient het opschonen van de meetwaarden nog met zuiver kinematische modellen te gebeuren (bijvoorbeeld met het "hoedjesmodel"), zodat het geomechanisch model kan worden gecalibreerd aan zo zuiver mogelijke geodetische waarden. Maar voor inter- en extrapolaties dient in deze gevallen altijd geomechanische modelering te worden gebruikt, niet alleen voor voorspellingen van de bodemdaling, maar ook voor ruimtelijke extra- en interpolatie, dat wil zeggen voor het maken van voldoende nauwkeurige contourplots. Geomechanische modelering maakt het mogelijk gebruik te maken van extra gegevens en constraints vanuit de ondergrond door een relatie te leggen tussen de bodemdaling en de min of meer bekende drukveranderingen, stijfheden en geometrie in de ondergrond. Via deze extra kennis kan de onzekerheid in de interpretatie van geodetische metingen worden verkleind. Elliptische, "hoedjesvormige", of wat voor ruimtelijke inter- en extrapolatiemodellen dan ook die niet via fysica/geomechanica de extra gegevens /constraints vanuit de ondergrond mobiliseren kunnen niet echt, maar hooguit schijnbaar de onzekerheid verkleinen, omdat geen nieuwe kennis wordt toegevoegd.

5.2 Onzekerheid in geomechanische modellering

Het volgende kan worden gezegd over hoe nauwkeurig deze geomechanische modelering kan en moet zijn:

- Het is buiten kijf dat de onzekerheid in de meetwaarden van de bodemdaling in het algemeen veruit het kleinst is en veel kleiner is dan de onzekerheden in de invoer en uitkomsten van de geomechanische modelering. Echter: zoals al gezegd, er kunnen te weinig meetpunten zijn en/of de meetwaarden zijn teveel verstoord door andere processen en zijn onvoldoende representatief voor de bodemdaling ten gevolge van delfstofwinning.
- Bij de geomechanische modelering van bodemdaling ten gevolge van gaswinning zijn de invoergegevens het meest onzeker, met name de stijfheidsgegevens van de overburden, en daarna de stijfheid van het reservoirgesteente. De drukveranderingen in het reservoir en de reservoirgeometrie zijn in het algemeen wat beter bekend, hoewel reservoirs vaak in een breukgebied liggen en dan is ook dit wat minder stellig. Echter: de te berekenen bodemdaling is het minst afhankelijk van de stijfheid van de overburden, zodat de grote onzekerheid hierin relatief minder uitmaakt. Verder is de bodemdaling aan het maaiveld het geïntegreerde effect van de compactie in de respectieve reservoircompartimenten, waarbij de koppeling tussen een verandering in het reservoir en het bodemdalingseffect aan het maaiveld niet erg sterk is. Dat betekent dat de druk- en stijfheidsverdeling in het reservoir en de reservoirgeometrie ook niet heel erg nauwkeurig bekend hoeven te zijn, hetgeen dan tevens geldt voor de nauwkeurigheid van het reservoir model en het geomechanisch model. Wel zijn de absolute effectieve stijfheidwaarden in het reservoir van belang en deze blijken niet erg betrouwbaar met labproeven op boorkernen 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 invoer.



- In de praktijk van geomechanische modellering van bodemdaling door delfstofwinning (olie- of gasvelden) worden verschillende niveaus van complexiteit gehanteerd. De eenvoudigste is het Geertsema model dat de maximale bodemdaling S_{max} relateert aan de reservoirkarakteristieken: drukkaling Δp , reservoirdikte h en effectieve reservoircompressibiliteit (compactiecoëfficiënt) c_m , volgens

$$S_{max} = 2(1-\nu)[1 - C/(1+C^2)^{0.5}] c_m \Delta p h$$

waarin het geomechanische effect boven het reservoir wordt uitgedrukt met $C = D/R$ (D is diepte en R de straal van het reservoir; ν is de Poissonconstante. De bodemdaling wordt dan weergegeven als een Gauss-curve¹, met een breedte (95% marge) die vanuit diagonalen vanaf de zijinden van het reservoir onder 45° naar boven lopen. Voor een zoutcaverne kan een eerste indruk van de bodemdaling worden verkregen met bovenstaande formule door in plaats van $c_m \Delta p h$ de gemeten verticale vervorming in te voeren.

- Is er ook sprake van na-ijling door kruip, nabije watervoerende lagen, kleilagen in het reservoir dan kan die worden meegenomen met een extra tijdsafhankelijk effect volgens (geldig voor geleidelijk reservoirdrukdaling):

$$S_{tot} = S_{max} [t - T_m (1 - e^{-t/T_m})]$$

waarbij de retardatietijd T_m samenhangt met het karakter van het vertragend proces (ervaring laat zien dat dit meestal enkele jaren is). De nauwkeurigheid van S_{tot} 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 T_m is meestal geen belangrijk aspect, behalve daar waar de kruip samenhangt met skelet collaps of aanliggende actieve watervoerende lagen een grotere rol spelen dan aanvankelijk ingeschat. In het laatste geval blijft de drukval enigszins beperkter maar is de dalingskom groter. Voor kleine reservoirs (dat wil zeggen klein ten opzichte van hun diepte) voldoet bovenstaande formule.

- Voor wat grotere reservoirs kan bovenstaande formule gebruikt worden per reservoirzone en het totaaleffect wordt dan via superpositie samengesteld. Voor grote reservoirs die aanmerkelijke bodemdaling veroorzaken is bovenstaande aanpak 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 maar ten dele beschikbaar komt, namelijk via observatie en interpretatie (onder andere inverse modelering) in de loop van het exploitatieproces. Als het reservoir nagenoeg leeg is, zijn de parameters die de bodemdaling bepalen via koppeling met geodetische metingen nauwkeurig bekend geworden. De onzekerheid neemt met de tijd af.

¹ De Gauss-curve komt nagenoeg overeen met de theoretische bodemdalingsvorm volgens Mindlin & Cheng (1942) Nuclei of strain in the semi-infinite body, Jnl Appl Mech 9a

- Bij de geomechanische modellering van bodemdaling door zoutwinning (en met name Halite winning) zijn de onzekerheden kleiner. De cavernegeometrie kan in het algemeen prima worden bepaald met akoestische technieken, terwijl uniforme druk en temperatuur in de caveerne ook voldoende nauwkeurig bekend zijn. Het rheologisch gedrag van het zout is hier de complicerende factor. Daarom is een redelijk verfijnd geomechanisch model nodig dat iteratief gekalibreerd dient te worden aan de gemeten bodembeweging. Door de veelal geringe diepte en grotere horizontale component in de deformatie lijkt automatisch wegfilteren van autonome (ondiepe) bodemdaling in het geval van weinig meetpunten moeilijker.

6 Advies

De werkgroep 'Methodiek Verwerking Hoogtemetingen' van de Tcbb heeft kennis genomen van de visie op en aanpak van de hoogtemeting van SodM en Houtenbos (partijen) en van de ervaring en wensen van de NAM. De werkgroep neemt waar dat de visie op de problematiek redelijk overeenkomt, maar dat ook sprake is van wezenlijke verschillen in sommige elementen van de aanpak. Partijen en werkgroep stemmen breed overeen 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 bij partijen verschil van mening evenals over het compleet zijn van de meetreeks per peilmerk (beperkte meetperiode). Partijen oordelen weer wel eensluidend over het grote verschil in nauwkeurigheid van de uitwerking van hoogtemetingen en die van geomechanische voorspellingen.

Bestudering en beoordeling van de methoden brengt de werkgroep tot de volgende aanbevelingen.

1. Er worden nadere 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 winningsplan, te kunnen volgen. Het voor dit specifieke doel benodigde aantal op het Pleistoceen gefundeerde peilmerken wordt vastgesteld op basis van de gewenste mate van nauwkeurigheid, de verwachte grootte en vorm van de dalingskom en de kwaliteit van de reeds aangebrachte peilmerken.
2. Het verdient de voorkeur te werken met de relatieve bodemdaling. 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 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.
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 er minder gewicht aan toe te kennen.
5. De werkgroep adviseert een aanpak in drie gescheiden stappen: toetsen van geodetische metingen op meet- en modelfouten; 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 fysische 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 referentiepunt 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 bepaalde 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 moet een verklaring bieden voor afwijkingen tussen geomechanische simulatie en hoogtemetingenuitwerking door andere oorzaken dan delfstofwinning. Er is nadere regelgeving nodig over samenwerking van mijnbouwondernemingen voor het scheiden naar oorzaak bij overlappende delfstofvoorkomens. SodM speelt een toezichhoudende rol en kan het scheidingsresultaat accepteren of verwerpen. Er is behoefte aan een regeling voor geschillenbeslechting in gevallen waarin een of meer belanghebbenden het resultaat van scheiding aanvechten.
 7. Het presenteren van het toetsingsresultaat kan ook 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.
 8. 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.
 9. 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.
 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. Het wordt belangrijk genoemd dat:

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

-

Bijlage 1 SODM-procedure

Iteratieve voorwaartse modellering van bodembeweging

dr.ir. A.J.H.M. Duquesnoy, Staatstoezicht op de Mijnen, april 2008.

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 informatieverwerking 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.

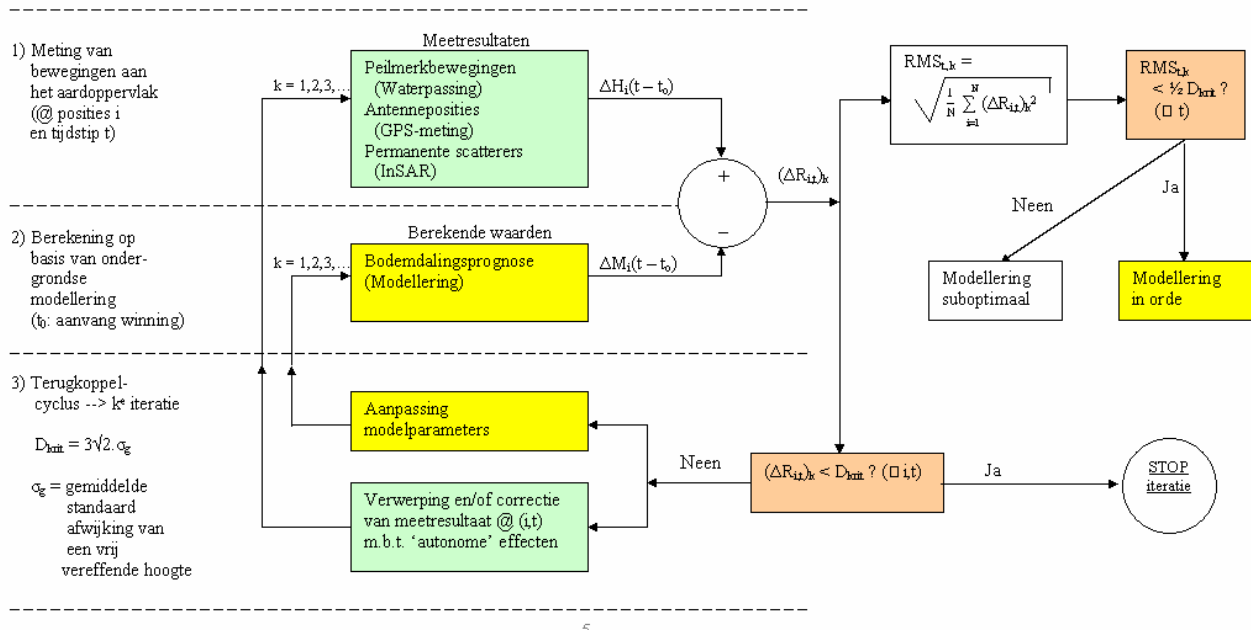
In de iteratieve voorwaartse modellering wordt een filosofie toegepast, die treffend is beschreven door Tarantola (Albert Tarantola, 'Popper, Bayes and the inverse problem', Nature Physics, Vol.21, August 2006). Indien de oplossing van een probleem berust op de interpretatie van waarnemingen, dient dat 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 2 Aanleiding van SodM tot de toetsingsprocedure

De toetsingsprocedure, zoals beschreven in Bijlage 1, is tot stand gekomen nadat SodM had vastgesteld, dat de introductie van de programma's SuMo en SuRe bij NAM tot missers leidde bij de berekening van bodemdaling door gaswinning. Nader onderzoek wees het volgende uit:

1. De introductie van SuMo en SuRe leidde ertoe, dat NAM sinds 2000 meetregisters aan SodM overlegde, die niet langer de feitelijke waarnemingen weergaven, maar metingen die bewerkt waren. Bovendien werden er *pseudo-waarnemingen* en *pseudo nulhoogtes* geïntroduceerd. Er was sprake van een vloeiende, oninzichtelijke overgang tussen 'gemeten/geïnterpoleerde' en 'geëxtrapoleerde' waarden. SodM raakte daardoor het zicht op de feitelijke waarnemingen kwijt en heeft om die reden NAM in 2006 verzocht om de openbare meetregisters op gelijke voet te brengen met de andere producenten (rapportage op basis van de standaard MOVE3 bewerking).
2. De trend-signaal methode (SuRe), de methode die mede gebruikt wordt om de bodemdaling door gaswinning te scheiden van bodemdaling door andere oorzaken, heeft de neiging om teveel bodemdaling toe te schrijven aan delfstofwinning. Dat heeft volgens SodM te maken met het feit dat de trend-signaal methode geen raad weet met gecorreleerde autonome daling van peilmerken.
3. De SuRe methode gebruikt de bodemdalingsprognose als trendmodel. Er wordt een directe mathematische koppeling aangebracht tussen de verwachtingswaarden van bewegingen uit de diepe ondergrond en de aan de bovengrond verkregen hoogteverschilmetingen. Dat bemoeilijkt een onafhankelijke controle van de juistheid van bodemdalingsprognoses door middel van waterpasmetingen en GPS-metingen

Bijlage 3 Methode Houtenbos

Ir. Adriaan P.E.M. Houtenbos, Geodetic Consultancy, Haren (GN), juni 2008

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 bodemdalingkommen 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.

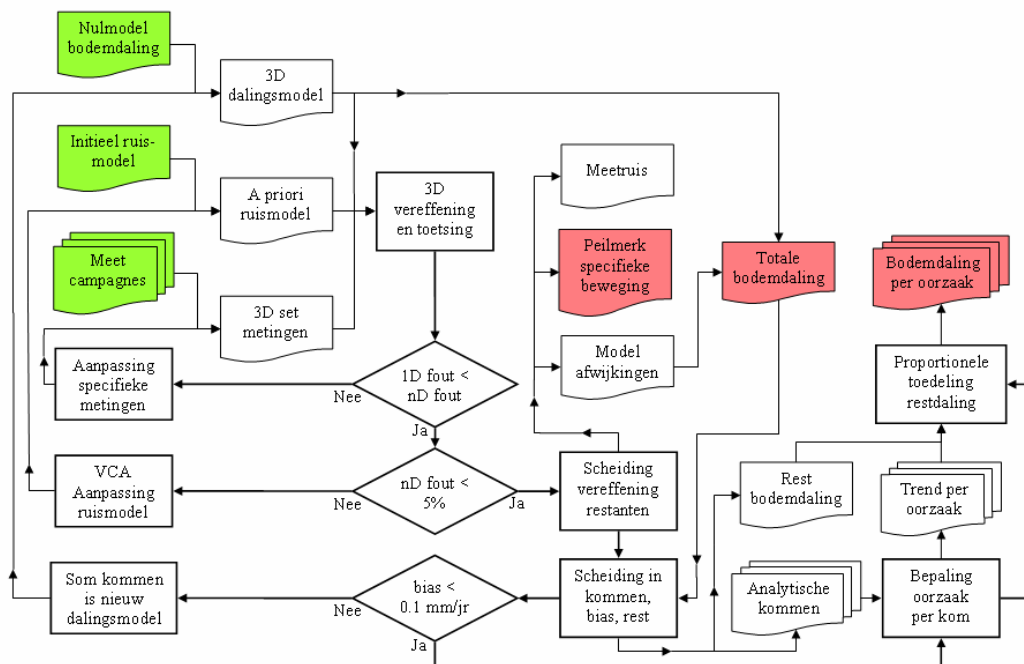
Na succesvolle reductie van de systematische modelfout kan voor elke plaats en elk tijdstip de bodemdaling worden berekend als gewogen gemiddelde van de gemeten totale bodemdaling. Het gewicht van elke meting neemt daarbij af met de afstand in ruimte en tijd tussen die meting en de plaats en tijd, waarvoor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

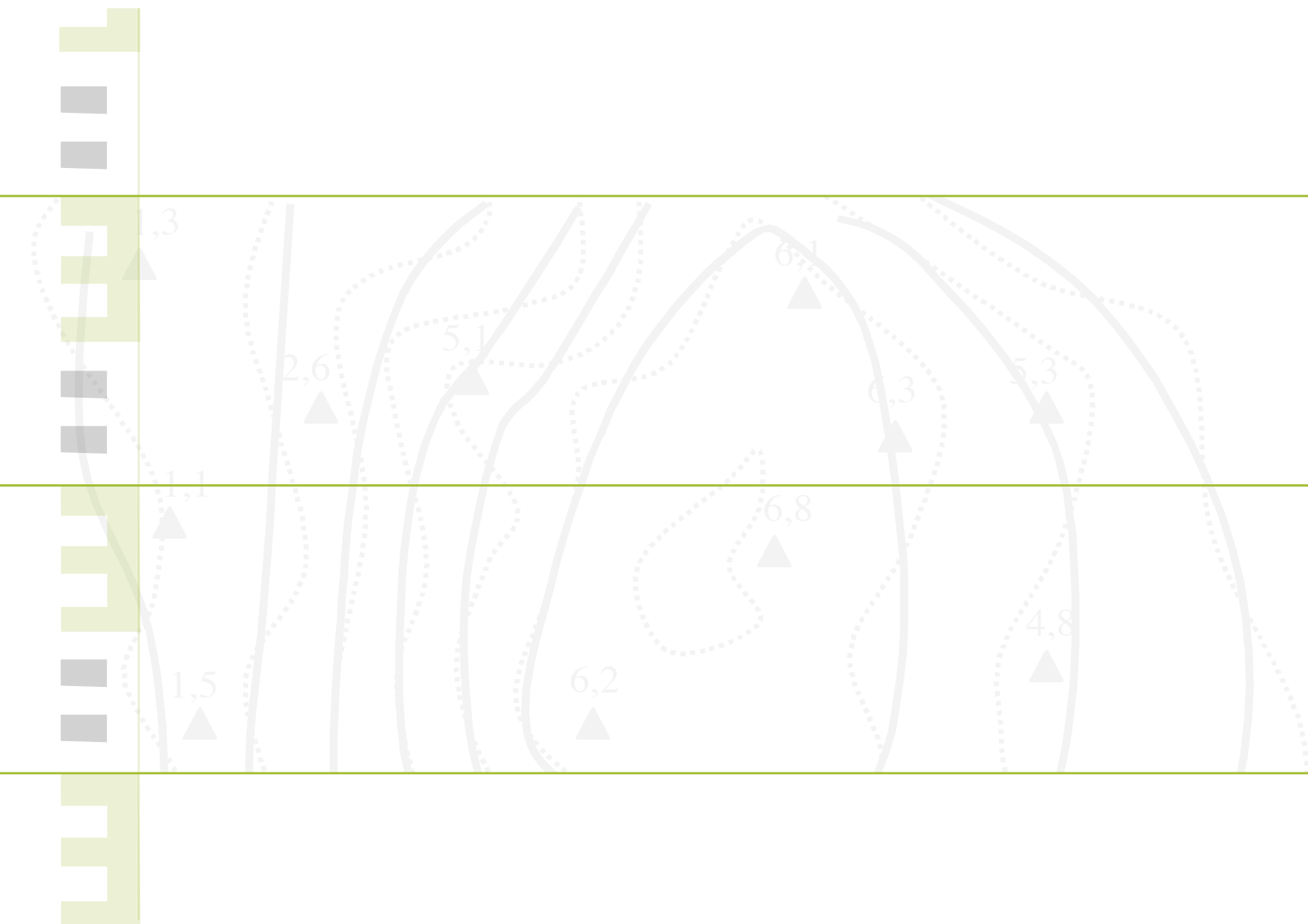
Stroomdiagram: Bodemdaling, van meting tot oorzaak

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



Bijlage 4 **Bedenkingen van Houtenbos bij de SodM-procedure**

1. Oude meetpunten vervallen, nieuwe worden bijgeplaatst. Na enige tijd is nog maar een fractie van de dan aangemeten meetpunten ook voor aanvang van de winning al aangemeten. De SodM-procedure laat de later bijgeplaatste meetpunten buiten beschouwing. Hierdoor blijft de daarin besloten informatie over het gedrag van de bodem ongebruikt en vallen er gaten in de meetdekking. Dit kan leiden tot een onderschatting van de totale bodemdaling boven een veld van delfstofwinning.
2. Bodemdalingmetingen bepalen de vervorming van het vlak door de meetpunten, niet de absolute daling daarvan. Uit de oorspronkelijke hoogteverschilmetingen berekent de SodM-procedure hoogtes, die beschouwd worden als onafhankelijke van elkaar verkregen, losse 'metingen'. Deze krijgen daardoor ten onrechte betekenis toegekend voor de absolute mate van daling. Tegelijkertijd wordt de werkelijke vormbepalende betekenis van de metingen sterk ondergewaardeerd.
3. De SodM-procedure vergelijkt de geomechanische gemodelleerde bodemdaling door winning met de berekende absolute daling, niet met de gemeten relatieve vervorming.
4. Peilmerkinstabiliteit is objectief meetbaar. In de SodM-procedure worden de metingen ten onrechte niet gezuiverd voor de gemeten peilmerkinstabiliteit vóór vergelijking met de geomechanisch verwachte bodemdaling. Dit leidt tot subjectieve verwerping van instabiele peilmerken, omdat de effecten van onjuiste geomechanische modellering en die van peilmerkinstabiliteit dan verweven zijn. Belangrijke peilmerken kunnen zo ten onrechte buiten beschouwing worden gelaten.
5. Gemeten bodemdalingen komen zijn doorgaans meer trechtersvormig en de gemeten dalingreactie op veranderingen in de snelheid van winning veel meer gedempt dan voorspeld. Incidenteel wijzen de metingen ook op eerder theoretisch voor onmogelijk gehouden gedrag. De SodM-procedure sluit detectie van theoretisch onverwacht gedrag uit. Discrepancies tussen het geomechanisch model voor bodemdaling door winning en de metingen leiden in zo'n geval tot onterechte verwerping van peilmerken als instabiel en tot onterechte identificatie van de oorzaak van de afwijkende daling als 'autonoom'. Het gevolg is dan onderschatting van de bodemdaling door delfstofwinning.
6. De toedeling van de totaal gemeten bodemdaling aan afzonderlijke oorzaken is bepalend voor aansprakelijkheden. De SodM procedure biedt de mogelijkheid een deel van de gemeten daling toe te schrijven aan 'autonome' oorzaken zonder aannemelijke verklaring voor plaats en periode waarin deze plaats vindt. In het kader van een evenwichtige aansprakelijkheidsstelling is het bovendien bezwaarlijk dat de model- en parameterkeuzes in de oorzakelijke toedeling eenzijdig en niet transparant worden gemaakt door partijen die aansprakelijkheid dragen.



Technische commissie bodembeweging