

Bodemdaling meten in Nederland

Hoe precies moet het? Hoe moet het precies?

Inleidingen van de themadag *Monitoring van bodemdaling in Nederland*
Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie, Delft, 27 november 2001

F.B.J. Barends, F. Kenselaar, F.H. Schröder (redactie)

NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie

Delft, december 2002

Bodemdaling meten in Nederland. Hoe precies moet het? Hoe moet het precies?
F.B.J. Barends, F. Kenselaar, F.H. Schröder (redactie)
ISBN 90 6132 279 0

Vormgeving en productie: Bureau Nederlandse Commissie voor Geodesie
Druk: Optima Grafische Communicatie, Rotterdam
Omslag: De schematische weergave van een polderlandschap vóór bodemdaling
door gaswinning en na bodemdaling door gaswinning vóór en na maatregelen, NAM
b.v.

Bureau van de Nederlandse Commissie voor Geodesie
Bezoekadres: Thijsseweg 11, 2629 JA Delft
Postadres: Postbus 5030, 2600 GA Delft
Tel.: 015-2782819
Fax: 015-2781775
E-mail: ncg@citg.tudelft.nl
Website: www.ncg.knaw.nl

Inhoudsopgave

<i>Voorwoord</i>	v
Prof.dr.ir. F.B.J. Barends, voorzitter Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie, NCG; GeoDelft, TU Delft	
<i>Maatschappelijke relevantie van bodemdaling in Nederland</i>	1
<i>Hoe nauwkeurig moet monitoring wetenschappelijk gezien plaatsvinden?</i>	
Dr. D.K.J. Tommel, voorzitter van de Technische Commissie Bodembeweging	
<i>Wettelijke voorschriften en normering bij de meting van bodembewegingen als gevolg van delfstoffenwinning</i>	5
Dr.ir. A.J.H.M. Duquesnoy, Staatstoezicht op de Mijnen, sector Geo-Engineering	
<i>Bodemdaling: geofysische predictie versus monitoring</i>	25
<i>Nauwkeurigheid van predictiemodellen en mogelijkheden tot geïntegreerde modellering</i>	
Dr. J.N. Breunese, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO	
<i>Over NAP en bodembeweging Een bewerking van de presentatie 'NAP en bodembeweging - houvast of natte voeten?'</i>	33
Ir. R.E. Molendijk, Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat	
<i>Overzicht van geodetische meetmethoden, modellering en analyse</i>	39
Ir. F. Kenselaar, TU Delft, Afdeling Geodesie	
<i>Geodetische toevalsnetwerken: Ontwikkelingen in deformatiemetingen met satelliet-radarinterferometrie en de permanent-scatterers-methode</i>	52
Dr.ir. R.F. Hanssen, TU Delft, Afdeling Geodesie	
<i>Modelleren van bodemdaling bij zoutwinning</i>	63
Ir. A.J.H. Mensen, Ingenieursbureau 'Oranjewoud' b.v.	
Ir. W. A. Paar, Akzo Nobel Salt b.v.	
<i>Meetopzet, punt dichtheid, meetfrequentie en modellering bij gaswinning</i>	78
Ir. R.C.H. Quadvlieg, Nederlandse Aardolie Maatschappij b.v.	
<i>Onderzoeksprogramma 2002 - 2007 van de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie</i>	88

Voorwoord

Op de themadag *Monitoring van bodemdaling in Nederland*, op 27 november 2001, is door de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie van de Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG) een visie gepresenteerd op de invulling van haar missie, namelijk het zorgvuldig vaststellen en volgen van de bodembeweging in Nederland. Verschillende sprekers waren uitgenodigd om het maatschappelijk kader voor geodetische monitoring toe te lichten: 'hoe precies moet het?'. Als weerwoord gaven verschillende leden van de Subcommissie een beeld van de stand van de kennis, de gehanteerde normen en methodieken: 'hoe moet het precies?'. In deze publicatie zijn de presentaties van deze themadag weergegeven.

Sinds de oprichting in 1961 is de Subcommissie actief betrokken bij het meten van de bodembeweging in Nederland. Het aspect zeespiegelstijging, sinds enkele jaren opgenomen in de naam, is vanaf het begin een onderwerp van aandacht gewenst. Naast de oorspronkelijke klankbordfunctie voor het richting geven aan onderzoek en het beoordelen van de technisch-wetenschappelijke merites van onderzoeksresultaten, wordt nu tevens een meer maatschappelijke gerichte taak gewenst geacht, voor het ondersteunen van de publieke bewustwording van de bodemdaling en de effecten ervan.

Het is verhelderend om terug te kijken naar de standpunten en uitgangspunten bij de oprichting van de Subcommissie en de huidige visie daaraan te spiegelen. Nadat in 1960 door de toenmalige Subcommissie Triangulatie aan de Rijkscommissie voor Geodesie is voorgesteld een werkgroep bodembeweging op te richten, is op advies van prof.dr.ir. W. Baarda, dan secretaris van de Rijkscommissie, een subcommissie ingesteld die in 1961 van start ging met de taak zich te verdiepen in alle vraagstukken die verband houden met de beweging van de bodem in verticale richting. De Subcommissie werd breed samengesteld: de disciplines geodesie, grondmechanica, mijnmeetkunde, gravimetrie, seismologie, hydrologie en hydrometrie waren vertegenwoordigd. Onder leiding van voorzitter prof.ir. A.J. van der Weele presenteerde de Subcommissie in oktober 1962 een eerste notitie over de opzet van de werkzaamheden.

Deze notitie benadrukt de noodzaak om aan de nauwkeurigheid van de gegevens hoge eisen te stellen, teneinde ondanks het korte tijdsbestek toch betrouwbare cijfers voor de bodembeweging te bepalen. Met name zijn de juiste registratie met betrekking tot de tijdgegevens (metingen duurden soms jaren) en tot de aard (geologie, klink of fundering) en de reproduceerbaarheid van de hoogtemetingen van belang.

De opzet van de werkzaamheden van de toenmalige Subcommissie Bodembeweging hield in:

- Inhoudelijke beperking tot de verticale component van de bodembeweging (de horizontale behoorde tot het terrein van de Subcommissie Triangulatie), waarbij de geologische beweging (de rots), de inklinking (zetting) van de sedimenten zand, klei en veen, de beweging van waterbouwkundige kunstwerken en van kunstwerken met peilmerken van het NAP, en veranderingen van het zeeniveau dienen te worden onderscheiden.
- Als doelstelling de bepaling van alleen de recente bodemwerking uit bestaande gegevens rekening houdend met de eerder genoemde onderscheiding in deelaspecten en het opstellen van een waarnemingsprogramma om de huidige situatie vast te leggen voor toekomstige onderzoeken.

De Subcommissie bouwde na voorzitter prof.ir. A.J. van der Weele (1961 - 1978) onder leiding van zijn opvolgers dr.ir. A. Waalewijn (1978 - 1985), ir. J.J.E. Pöttgens (1985 - 1997), dr.ir. F.J.J. Brouwer (1998 - 1999) en prof.dr.ir. F.B.J. Barends (1999 - heden) met enthousiasme en in gepaste openheid gestaag aan haar positie als onafhankelijke klankbordgroep, gevoed door de producten en ideeën van de achterban van de leden.

De huidige Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie streeft nu, in 2001, net als voorheen naar een samenstelling van disciplinair evenwicht, passend bij de actuele maatschappelijke en wetenschappelijke conjunctuur. Naast de van oudsher aanwezige disciplines is de basis verbreed met goede aansluiting aan (ingenieurs)geologie en geofysica. In de problematiek van bodembeweging en zeespiegelvariatie is er behalve een accurate voorstelling ervan, ook een groeiende behoefte te constateren aan dieper inzicht in achterliggende fysische processen en aan zicht op trends en trendbreuken. Daarbij wordt de oorspronkelijke restrictie tot louter verticale en recente bodembeweging wat gevierd. Tevens is in de samenstelling van de Subcommissie naast de sterk vertegenwoordigde kennisinbreng nu ook de stem van het kennisgebruik krachtiger herkenbaar bij monde van participerende olie- en gasmaatschappijen en vanuit de zoutwinningsbranche. De huidige Subcommissie acht evenwel de bodemverandering door oppervlaktegrondstofwinning en locale zettingen door (ondergrondse) bouw niet tot haar primair aandachtsgebied.

De missie van de Subcommissie is niet wezenlijk veranderd ten opzichte van de oorspronkelijke opzet, namelijk richting geven aan fundamenteel en strategisch onderzoek en het bevorderen van het vastleggen en verspreiden van relevante kennis. Toch is ook hier sprake van enige verbreding in internationaal wetenschappelijk verband en ten aanzien van ondersteuning van de publieke voorlichtingstaak van instanties zoals de Technische Commissie Bodembeweging, het Staatstoezicht op de Mijnen en de Commissie Bodembeweging door Aardgaswinning naar de maatschappij.

De Subcommissie heeft op de themadag *Monitoring van bodemdaling in Nederland* een onderzoeksagenda gepresenteerd die aansluit op de hedendaagse maatschappelijke behoefte en past bij vigerende beleidsnota's (Vijfde Nota Ruimtelijke Ordening, Derde Kustnota), welke gericht zijn op integratie van functionaliteit en modaliteit. Zo wordt de invloed van klimaatverandering erkend en tellen landschap, cultuur- en na-

tuurwaarden sterker mee in de besluitvorming ten aanzien van grondstofwinning. De bodembewegingsproblematiek is hierin een essentieel aspect en de ingeslagen weg van de Subcommissie om te bevorderen dat grootschalige metingen goedkoper, transparanter en vooral ook preciezer worden, zal derhalve voortvarend worden gecontinueerd.

Prof.dr.ir. F.B.J. Barends,
voorzitter Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie, NCG
GeoDelft, TU Delft

Maatschappelijke relevantie van bodemdaling in Nederland

Hoe nauwkeurig moet monitoring wetenschappelijk gezien plaatsvinden?

Dr. D.K.J. Tommel

voorzitter van de Technische Commissie Bodembeweging

Inleiding

Bijeenkomsten waarop degenen, die zich met de wetenschappelijke ontwikkeling op een bepaald vakgebied bezighouden, kennis en ervaring uitwisselen, zijn onmiskenbaar nuttig. Er mag niet uit het oog worden verloren dat de ontwikkeling van de wetenschap - in het bijzonder van de bètawetenschappen - de motor is geweest (en nog is) van de vooruitgang in onze samenleving. Daarbij valt het initiatief om ook aandacht te besteden aan de samenhang tussen wetenschap en maatschappelijke vraagstukken zeer te prijzen.

Schade door bodemdaling als gevolg van mijnbouw zal de invalshoek zijn van het antwoord op de vraag hoe nauwkeurig monitoring dient plaats te vinden. Hoe belangrijk dit onderwerp ook is, het is slechts één van de maatschappelijk belangrijke probleemgebieden waarbij bodemdaling een rol speelt. Voorbeelden hiervan zijn inklinking van veen en de exacte hoogte van antennes. Het eerste onderwerp heeft terecht ruime aandacht gekregen in de Vijfde Nota Ruimtelijke Ordening.

In de komende decennia is immers sprake van een combinatie van zeespiegelstijging en verhoogde waterafvoer van de rivieren als gevolg van de klimaatverandering en van bodemdaling door inklinking en oxidatie van veen. Dit houdt in dat de waterhuishouding in ons land grote wijzigingen moet ondergaan. Er zijn onder andere bergingsbassins nodig en plaatsen waar wonen met (tijdelijke) waterberging kan worden gecombineerd. Dit zal ingrijpende wijzigingen teweeg brengen in de ruimtelijke ordening in ons land.

Het tweede onderwerp - de exacte hoogte van antennes - berust op het explosief stijgende aantal antennes (FM, AM, GSM, UMTS, enz.). Het is van belang de exacte locaties van alle antennes nauwkeurig te registreren. Hiervoor is recent een nieuwe organisatie opgericht - het zogenaamde Antennebureau - onderdeel van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, dat dit als één van haar taken heeft.

Technische Commissie Bodembeweging

De Technische Commissie Bodembeweging (TCBB) is een adviescommissie in het kader van de Mijnbouwwet. De TCBB adviseerde de Minister van Economische Zaken en de burgers met betrekking tot schade door mijnbouwactiviteiten. Hoewel de Mijnbouwwet nog in behandeling is in het Parlement, is de TCBB reeds in 1999 met haar werkzaamheden begonnen. De Commissie is breed samengesteld (deskundigheid op het gebied van geologie, mijnbouw, juridische zaken) en heeft een onafhankelijk secretariaat dat is ondergebracht bij het Staatstoezicht op de Mijnen. Een ambtelijke vertegenwoordiger van de minister woont de vergaderingen als waarnemer bij.

Schade door mijnbouw

Mijnbouwactiviteiten kunnen schade veroorzaken door trillingen (bijvoorbeeld bij seismisch onderzoek) en door bodemdaling die optreedt door winning van gas en of zout. Vroeger gaf ook de winning van steenkool en mergel klachten over schade. In het kader van bodemdaling blijven trillingen hier buiten beschouwing.

De door bodemdaling veroorzaakte schade bestaat uit schade aan gewassen (waar de waterstand niet is aangepast aan de bodemdaling) en schade aan gebouwen, veelal woningen of boerderijen. Deze schade kan variëren van ondiepe scheuren in pleisterwerk tot het geheel onbewoonbaar raken van een woning.

Gebieden waar dit verschijnsel optreedt zijn bijvoorbeeld Twente (zoutwinning), Groningen en Z.O.-Drenthe (gas) en de omgeving van Alkmaar (gas). In Z.O.-Drenthe en bij Alkmaar is sprake van een schoksgewijze bodemdaling.

De omvang van de schade varieert van enkele honderden euro's tot meer dan 250 miljoen euro's. Dit laatste bedrag behoort bij de daling van het Groningse gebied boven het Slochteren gasveld. Hier is overigens niet zozeer sprake van schade als wel van preventieve maatregelen om schade te voorkomen, zoals het extra verhogen van de zeedijken.

Vergoeding van de schade

Een burger of bedrijf kan bij schade de betreffende mijnbouwmaatschappij aansprakelijk stellen. Deze laat een onderzoek instellen naar de oorzaak en de omvang van de schade en trekt op grond van dit - technisch - onderzoek de conclusie al dan niet aansprakelijk te zijn. Eventueel kan bij verschil van opvatting tussen de maatschappij en de claimant een contra-expertise worden uitgevoerd.

Bij blijvend gebrek aan overeenstemming kan de claimant een civiele procedure starten. Deze procedure kent een aantal bezwaren, waarvan de belangrijkste zijn:

Het bureau dat het technisch onderzoek doet, staat bij de claimant onder de verdenking van 'wiens brood men eet, wiens woord men spreekt'.

De gang naar de rechter is nogal theoretisch. Het bewijs van het oorzakelijk verband tussen mijnbouw, bodemdaling en schade is moeilijk te leveren en vergt uiterst kostbaar technisch onderzoek. Opstalverzekeringen sluiten dergelijke schade uit en rechtsbijstandverzekeringen kennen een bovengrens die onvoldoende soulaas biedt. Bovendien weigeren verzekeringsmaatschappijen in Z.O.-Drenthe rechtsbijstandverzekeringen af te sluiten.

Door deze problemen geïnspireerd is de gedachte ontstaan om in de Mijnbouwwet het principe van de omgekeerde bewijslast op te nemen, waarbij de mijnbouwmaatschappij moet bewijzen dat er géén oorzakelijk verband bestaat tussen mijnbouw, bodemdaling en schade. De kans lijkt overigens niet groot dat de 'omkering van de bewijslast' een politieke meerderheid krijgt. Het maatschappelijk probleem - hoge kosten van het onderzoek en de ongelijkheid in machtsverhouding tussen claimant en mijnbouwmaatschappij - is intussen opgelost door de TCBB een nieuwe taak te geven. Indien tussen claimant en mijnbouwmaatschappij geen overeenkomst is bereikt en er nog geen onherroepelijke rechterlijke uitspraak is gedaan, kan de claimant zich tot de TCBB wenden.

Deze probeert via bemiddeling een oplossing te bereiken. Indien dit niet succesvol is laat de TCBB technisch onderzoek doen door een onafhankelijk bureau (ONRI-lid, dan wel een universitaire instelling). Zo nodig wordt een tweede opdracht voor een technisch onderzoek gegeven.

Op grond van het onderzoek wordt een uitspraak gedaan. Deze is formeel niet bindend, maar de gaswinningsmaatschappijen hebben meegedeeld zich wel gebonden te voelen.

Voor het Groninger gasveld geldt overigens een afwijkende regeling. Degene die schade lijdt kan tot de regeling 'toetreden', waarbij sprake is van bindende arbitrage door de Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning. Voor een claimant toetreedt kan hij het oordeel van het secretariaat van de commissie inwinnen over de kans van slagen van zijn claim.

Bij de nieuwe taak wordt de TCBB geconfronteerd met het gegeven dat bodemdaling een langzaam proces is en dat een nauwkeurige meting van de bodemdaling een vereiste is om het oorzakelijk verband tussen bodemdaling en schade te kunnen aantonen. De daling dient dan ook in centimeters en liefst in millimeters te worden gemeten. Zelfs waar dit mogelijk is moet rekening worden gehouden met complicerende factoren:

Er kunnen op dezelfde plaats meerdere mijnbouwactiviteiten worden uitgevoerd, bijvoorbeeld de winning van gas en van zout. Er is een groot aantal mogelijke oorzaken van schade aan gebouwen en over deze mogelijke oorzaken is in concrete gevallen meestal weinig bekend.

Desondanks luidt de conclusie dat het nauwkeurig (kunnen) meten van bodemdaling een belangrijke bijdrage kan leveren aan de bewijsvoering of een schade moet worden toegeschreven aan bodemdaling door mijnbouwactiviteiten.

Wettelijke voorschriften en normering bij de meting van bodembewegingen als gevolg van delfstoffenwinning

Dr.ir. A.J.H.M. Duquesnoy
Staatstoezicht op de Mijnen, sector Geo-Engineering

Inleiding

Door bodembewegingen aan het maaiveld als gevolg van delfstoffenwinning uit de ondergrond (gas, olie, zout en mergel) kan er schade en hinder optreden voor derden in het betreffende gebied van de winning. Hoewel deze bodembewegingen ook op het Nederlandse continentaal plat kunnen optreden, vormen in de praktijk alleen de bodembewegingen op het Nederlands territorium, inclusief de kustwateren en de Waddenzee, een probleem. De bodembewegingen kunnen bestaan uit bodemdaling, bodemstijging, horizontale vervormingen aan het maaiveld en uit aardbevingen. De schade en hinder omvat zaken als verstoring van de waterhuishouding, schade aan onroerend goed, problemen bij de zeevering, lokale instortingen aan het maaiveld ('sinkholes') en gevoelens van onrust bij de bevolking als gevolg daarvan.

1. Toezicht op bodembewegingen

Staatstoezicht op de Mijnen houdt toezicht op de bodembewegingen aan het maaiveld als gevolg van delfstoffenwinning. Dit toezicht wordt grotendeels bepaald door specifieke wettelijke voorschriften op het gebied van bodembewegingen. De wetgever legt de eindverantwoordelijkheid voor de beheersing van het bodemdalingsprobleem bij de mijnonderneming. Zodra echter de openbare veiligheid in het geding komt (zoals bijvoorbeeld bij het 'gat van Hengelo', een instortingstrechter boven een instabiele zoutcaverne) ligt er een expliciete taak voor de overheid voor het treffen van maatregelen ter beheersing en beperking van het probleem.

Het toezicht op bodembewegingen bestaat uit het door middel van inspecties en onderzoek verzamelen van informatie aan de hand waarvan beoordeeld wordt of de wettelijke regels en concessievoorwaarden met betrekking tot bodembewegingen door de mijnondernemingen voldoende worden nageleefd. Tevens wordt nagegaan op welke wijze de mijnondernemingen de regels naleven. De gegevens die de mijnondernemingen verstrekken, bestaan uit optische en hydrostatische waterpassingsresultaten, GPS-metingen, lengtemetingen, bodemdalingsprognoses, productieprofielen, holruimtemetingen in zoutcavernes en seismische registraties. Soms wordt er bij klachten van burgers aanvullend onderzoek door of in opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen naar de oorzaken van gebouwenschade uitgevoerd. Aan een strafrechtelijk opsporings-

onderzoek is op het gebied van bodembewegingen nog nooit behoefte geweest. In een enkel geval is een proces-verbaal van bevindingen opgesteld.

Een bijzondere vorm van toezicht op bodembewegingen wordt uitgeoefend in het kader van *nazorg*. De door Staatstoezicht op de Mijnen zelf uitgevoerde stabiliteitsinspecties in de mergelgroeven van Zuid-Limburg, die vaak niet meer voor delfstoffenwinning in gebruik zijn, vallen hieronder, evenals het toezicht op mogelijke verticale (en horizontale) bodembewegingen boven de verlaten steenkoolmijnen in Zuid-Limburg en de verlaten zoutcavernes bij Hengelo en Buurse.

2. Wettelijke voorschriften

De volgende wettelijke voorschriften en concessievoorwaarden hebben specifiek betrekking op bodembewegingen en op de uitoefening van het toezicht op de ter zake gestelde voorschriften en voorwaarden.

2.1 *Mijnreglement 1964*

- Artikel 132, lid 2. Regelmatig moet een voldoende aantal waterpassingen en lengtemetingen worden uitgevoerd.
- Artikel 133, lid 1. Alle metingen moeten met voldoende nauwkeurigheid worden uitgevoerd en voor zover mogelijk worden aangepast aan het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting.
- Artikel 134, lid 2. De Inspecteur-Generaal der Mijnen is bevoegd meetregisters te waarmerken.
- Artikel 3. Indien een voorschrift in dit reglement een der termen 'veilig', 'doelmatig' en 'voldoende' inhoudt, kan Onze Minister ter zake nadere regelen stellen.
- Artikel 325, lid 1. Staatstoezicht op de Mijnen heeft tot taak het toezicht op de naleving van dit reglement en medewerking aan de uitvoering daarvan.

2.2 *Concessievoorwaarden*

(in aktes, als bedoeld in artikel 5 van de wet van 21 april 1810)

In de voorwaarden van *aardgas- en aardolieconcessies* is een standaardartikel (vaak artikel 16) opgenomen, dat als volgt luidt.

Lid 1. Door de concessionaris moeten zowel vóór de aanvang van de ontginning, gedurende de ontginning en tot een jaar na beëindiging daarvan zo vaak als Onze Minister van Economische Zaken nodig oordeelt op de terreinen, waaruit de in artikel 1 bedoelde delfstoffen worden ontgonnen, zomede in de naaste omgeving daarvan ten minste een waterpassing en lengtemeting als bedoeld in artikel 132, tweede lid, van het Mijnreglement 1964 (Staatsblad 538) worden verricht. Onze voornoemde Minister kan

vaste punten aanwijzen, waaraan de waterpassingen en, indien nodig, de lengtemetingen moeten worden gerelateerd.

Lid 2. Van iedere waterpassing en lengtemeting moet schriftelijk rapport worden uitgebracht aan de Inspecteur-Generaal der Mijnen. Een afschrift van dit rapport moet worden toegezonden aan Gedeputeerde Staten van de betrokken provincie. Indien uit de resultaten van de waterpassingen en lengtemetingen zou blijken, dat een met de ontginning verband houdende bodemdaling optreedt, in zodanige mate dat met betrekking tot de oppervlakte een ongewenste situatie dreigt te ontstaan, kan Onze Minister van Economische Zaken maatregelen voorschrijven tot het zoveel mogelijk beperken van de bodemdaling of het zoveel mogelijk voorkomen van de nadelige gevolgen daarvan voor de oppervlakte.

N.B. In 1996 is ter uitvoering van richtlijn nr. 94/22/EG van de Europese Unie de Regeling vergunningen en concessies delfstoffen Nederlands territorium van kracht geworden, die specifiek betrekking heeft op koolwaterstoffen. In artikel 5.5 is een standaardregeling aangaande waterpassingen en lengtemetingen opgenomen, die vrijwel identiek is aan het hierboven geciteerde standaardartikel.

In de voorwaarden van *steenzout- en magnesiumzoutconcessies* zijn twee standaardartikelen (vaak artikel 11 en artikel 18) opgenomen, waarin verplichtingen ten aanzien van bodembewegingsaspecten zijn opgenomen.

De tekst van artikel 11 luidt als volgt.

Lid 1. Door de concessiehouder wordt vóór de aanvang van de ontginning van de in artikel 1 bedoelde delfstoffen en vervolgens tijdig voordat de ontginning op een andere plaats wordt voortgezet, aan de Inspecteur-Generaal der Mijnen een op de voorgenomen ontginningsswerken betrekking hebbend schriftelijk ontginningsplan overlegd.

Lid 2. Zodanig plan bevat tenminste de nodige gegevens betreffende: (a. t/m f.) g. De mogelijke bodemdaling als gevolg van de ontginning van de in artikel 1 bedoelde delfstoffen en de daaruit voortvloeiende te verwachte schade aan de eigendommen van derden blijkens een rapport van een onafhankelijke deskundige op het gebied van bodemdaling.

Lid 5. De ruimten welke als gevolg van de ontginning ontstaan, moeten zowel voor wat betreft hun vorm als ligging in kaart worden gebracht. De Minister van Economische Zaken kan, de concessiehouder gehoord, bepalen op welke wijze en tijdstippen de vorm en ligging van die ruimten met het oog op het in kaart brengen worden vastgesteld.

N.B. Voorschriften voor het opstellen van bodemdalingsprognoses (artikel 11, lid 2, g) zijn tot nu toe alleen opgenomen in de steenzout- en magnesiumzoutconcessies die na 1982 zijn verleend. In de aardolie- en aardgasconcessies zijn in het geheel geen bepalingen over bodemdalingsprog-

noses opgenomen. In het wetsvoorstel voor een nieuwe Mijnbouwwet, dat op 25 september 1998 aan het Parlement is aangeboden, is wel een algemene regeling voor bodembeweging opgenomen in de vorm van een verplichting om voorafgaande aan de winning van een veld een ontginningsplan in te dienen, waarin ook aandacht besteed wordt aan bodembeweging.

De tekst van artikel 18 luidt als volgt.

Lid 1. Door de concessiehouder wordt vóór de aanvang van de ontginning, gedurende de ontginning en tot 5 jaar na beëindiging daarvan zo vaak als de Minister van Economische Zaken nodig oordeelt op de terreinen, waaruit de in artikel 1, eerste lid bedoelde delfstoffen worden ontgonnen, zomede in de naaste omgeving daarvan tenminste een waterpassing en lengtemeting als bedoeld in artikel 132, tweede lid, van het Mijnreglement 1964 (Staatsblad 538) verricht. De in de vorige volzin genoemde termijn kan door voornoemde Minister worden verlengd, indien dit naar zijn oordeel op grond van de beschikbare gegevens met betrekking tot bodemdaling noodzakelijk is. De voornoemde Minister kan vaste punten aanwijzen, waaraan de waterpassingen en, indien nodig, de lengtemetingen worden gerelateerd.

Lid 2. De tekst identiek aan artikel 16, lid 2 van de aardgas- en aardolieconcessies.

2.3 Instructieregeling Staatstoezicht op de Mijnen (Staatscourant 202, 18 oktober 2001)

§ 2. Inspecteur-Generaal der Mijnen (IGM)

Artikel 7. Indien uit de resultaten van waterpassingen of lengtemetingen blijkt dat een met de ontginning van desbetreffende delfstoffen verband houdende aanmerkelijke bodemdaling optreedt, brengt de IGM hierover rapport uit aan de Minister. Is de bodemdaling zodanig, dat met betrekking tot de oppervlakte een ongewenste situatie ontstaat of dreigt te ontstaan, dan neemt de IGM in het rapport tevens een advies op over de door de betrokken concessionaris of vergunninghouder te treffen maatregelen tot het zover mogelijk beperken van de bodemdaling of het zoveel mogelijk voorkomen van de nadelige gevolgen daarvan voor de oppervlakte.

Artikel 9. De IGM draagt zorg voor het onderzoeken en afhandelen van klachten die derdebelanghebbenden bij hem indienen over de winning van delfstoffen.

Artikel 10. De IGM doet, gevraagd of ongevraagd, de Minister voorstellen voor het treffen of wijzigen van nadere regelen op grond van het Mijnreglement 1964 of het Mijnreglement continentaal plat.

2.4 Richtlijn waterpassingen

De Minister van Economische Zaken heeft geen nadere regelen gesteld ten aanzien van de term 'voldoende nauwkeurig' in artikel 133, lid 1, Mijnreglement 1964. Wel heeft de Inspecteur-Generaal der Mijnen in een brief aan NOGEPa (Nederlandse Olie en Gas Exploratie en Produktie Associatie) van 28 februari 2001 de op het land opererende NOGEPa-leden verzocht zich te houden aan de richtlijnen van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat voor doorgaande waterpassingen. Deze richtlijnen, bekend als 'Hoogtemetingen 1-Doorgaande waterpassingen' RWS-MD-NAP, bevatten instructies over de *uitvoering* van optisch doorgaande waterpassingen met secundaire-net-precisie. Over de meetfrequentie en de interpretatie van de meetresultaten laten de richtlijnen zich niet uit.

N.B. Het begrip GPS-meting komt in geen enkel wettelijk voorschrift met betrekking tot bodembewegingen voor. Met behulp van GPS-metingen kan men de hoogte van een punt ten opzichte van een referentievlak (WGS 84) bepalen. In zoverre men in staat is om dergelijke gemeten hoogten op betrouwbare wijze te koppelen aan het NAP-vlak kan men GPS-metingen beschouwen als een alternatief voor optische en hydrostatische waterpassingen.

2.5 Seismisch observatienetwerk Noord-Nederland

Op aanbeveling van de Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen (BOA) is in december 1994 door de Nederlandse Aardolie Maatschappij b.v. (NAM) het seismisch observatienetwerk Noord-Nederland in gebruik genomen. Dit netwerk omvat acht locaties met boorgatseismometers, gelegen in de provincies Groningen, Drenthe, Friesland en Overijssel. Het KNMI draagt zorg voor het netwerk en de aardbevingsregistraties. Volgens een verzoek van de Minister van Economische Zaken van 24 juni 1994 dient de Inspecteur-Generaal der Mijnen regelmatig in kennis te worden gesteld van de aardbevingsregistraties van het netwerk.

In juli 1997 zijn met de vereiste goedkeuring van de Inspecteur-Generaal der Mijnen (hindervergunningsvoorwaarde Norg A-19) boven de ondergrondse gasopslag Norg drie oppervlakteversnellingsmeters geplaatst in aanvulling op het seismisch observatienetwerk Noord-Nederland. Eventuele trillingsregistraties worden jaarlijks gerapporteerd aan de Inspecteur-Generaal der Mijnen.

3. Normstelling bij de uitvoering van voorschriften

3.1 Feiten en prognoses

Alle overheidsvoorschriften en regels hebben tot doel de feitelijke bodemdaling als gevolg van de activiteiten van de mijnondernemingen met voldoende nauwkeurigheid vast te leggen, zodat men tijdig maatregelen kan treffen indien de bodemdaling

een ongewenste omvang dreigt aan te nemen. Dit vraagt om een kennisinhoudelijke beoordeling van de geschiktheid van de methoden, waarmee de mijnondernemingen invulling geven aan de gestelde voorschriften en regels, en om een interpretatie van de verkregen meetresultaten.

Bodemdalingsprognoses zijn een geval apart, omdat zij geen betrekking hebben op een feitelijk geconstateerde situatie, maar proberen aan te geven in hoeverre er in de toekomst sprake zou kunnen zijn van een ongewenste situatie.

3.2 Feitelijke bodemdaling door delfstoffenwinning

De oorzaak van bodemdaling door delfstoffenwinning in Nederland is bij de aardolie- en aardgaswinning gelegen in de compactie van de producerende aardlagen in de diepe ondergrond en bij de zoutwinning in de convergentie van met pekel gevulde holruimten (cavernes) eveneens gelegen in de diepe ondergrond. Gelet op de diepte, waarop de bron van de bodemdaling zich bevindt, zal de aan het maaiveld resulterende bodemdaling vrijwel altijd gelijkmatig en ongeveer schotelvormig zijn.

De aan een mijnonderneming opgelegde verplichting tot het vaststellen van bodemdaling beperkt zich in principe tot de door de betreffende onderneming zelf veroorzaakte bodemdaling. Alle additioneel optredende en gemeten bodemdaling (grootschalig of lokaal) zal de mijnonderneming niet worden aangerekend, zoals bodemdaling als gevolg van:

- natuurlijke regionale verticale bewegingen,
- activiteiten van andere mijnondernemingen (gas, olie, zout),
- waterwinning of bronbemaling,
- polderpeilverlaging door waterschappen,
- langdurige droogteperiode in combinatie met veel grondwater verdampende loofbomen, waardoor het waterpeil lager wordt dan normaal in dergelijke periodes.

Naast bodemdaling kan er sprake zijn van horizontale vervormingen aan het maaiveld (met name *bodemrek*). Bij olie- en gaswinning is bodemrek praktisch verwaarloosbaar. Bij zoutwinning kan in uitzonderlijke gevallen, zoals de instorting van een ondiepe caveerne of langdurige squeezepekelproductie met aanzienlijke caveerneconvergentie, een mate van bodemrek optreden, die mogelijk schadeveroorzakend is voor gebouwen of infrastructuur. De horizontale vervormingen worden in kaart gebracht met behulp van lengtemetingen. Deze dient de mijnonderneming te verrichten, indien aannemelijk is dat een kritische reknorm van $2,0 \cdot 10^{-4}$ (NEN6740) overschreden gaat worden.

Meetopzet en 'nulmeting'

In Nederland wordt de bodemdaling gemeten door het vaststellen van hoogten ten opzichte van Normaal Amsterdams Peil (NAP). Over het land verspreid bevindt zich

een honderdtal diepgefundeerde ondergrondse peilmerken (OM's) op geselecteerde plaatsen met een over een langere periode verwachte natuurlijke stabiliteit. Tussen deze punten in zijn vele duizenden andere peilmerken geïnstalleerd, meestal speciale bouten in goedgefundeerde gebouwen of kunstwerken. Van beide typen peilmerken is de NAP-hoogte nauwkeurig bekend.

Voorafgaande aan de delfstoffenwinning in een bepaald gebied dient de mijnonderneming een meetnet van vaste peilmerken in te richten, zoveel mogelijk met gebruikmaking van de reeds aanwezige peilmerken met bekende hoogten. Vrijwel altijd is een *peilmerkverdichting* noodzakelijk, wat betekent dat naast de bestaande peilmerken nieuwe peilmerken moeten worden geïnstalleerd in objecten met een onbekende zakkingsgeschiedenis. Voor een betrouwbare referentie wordt het meetnet vastgekoppeld aan een aantal diepgefundeerde OM's, waarvan men zeker weet dat ze buiten de invloedssfeer van de delfstoffenwinning en van diepe grondwaterwinning liggen. De eerste meting van de hoogte van de peilmerken in het nieuwe meetnet vindt plaats juist voordat met de delfstoffenwinning wordt begonnen. Deze eerste meting wordt de 'nulmeting' genoemd, omdat ze de nulsituatie vastlegt.

In het algemeen zijn er geen problemen met de nulmetingen. In gebieden met elkaar overlappende bodemdalingsschotels, die het gevolg zijn van op verschillende tijdstippen begonnen delfstoffenwinningen, is het soms moeilijk om een geschikt referentiejaar voor de nulmeting aan te wijzen. Tot voor kort was een uniform referentiejaar nodig om de gezamenlijke cumulatieve bodemdaling in een dergelijk gebied in kaart te kunnen brengen (bijvoorbeeld de bodemdaling in Midden-Friesland, die ondermeer het gevolg is van de delfstoffenwinning van drie verschillende mijnondernemingen). Recentelijk is door de TU Delft een wiskundig model ontwikkeld, het zogenaamde continue tijd-plaatsmodel, dat *hoogteverschillen* aan het maaiveld analyseert zonder de noodzaak tot een uniform referentiejaar en aaneengesloten, continue meetreeksen. Staatstoezicht op de Mijnen heeft eind 2000 ingestemd met de toepassing van dit model voor de interpretatie van meetresultaten uit waterpassingen.

Scheiding van bodemdalingscomponenten

Wanneer men door middel van herhaalde waterpassingen de hoogteveranderingen van de peilmerken in de tijd, en dus de eventuele bodemdaling, gaat vaststellen, meet men in feite de totale bodemdaling door alle mogelijke oorzaken tezamen. Hoe kan men uit de totaal gemeten bodemdaling de mijnbouwcomponent, de eigenlijke bijdrage als gevolg van de mijnbouwactiviteit achterhalen?

Indien in hetzelfde gebied meer dan één mijnonderneming actief is, zal men de bodemdaling veelal van elkaar kunnen onderscheiden door extrapolatie van de bodemdaling van de ene onderneming, voor zover gelegen buiten de invloedssfeer van de andere mijnonderneming, naar het gebied binnen de invloedssfeer van die andere onderneming. In gevallen waar extrapolatie niet mogelijk is, kan men toch een onder-

scheid maken als de geometrie van de betrokken dalingsschotels afwijkend is. Dit doet zich bijvoorbeeld voor als er lokaal zoutwinning plaatsvindt in een gebied, waarin zich tevens een omvangrijke dalingsschotel door gaswinning bevindt. Bij gelijksoortige delfstoffenwinning met minimale ruimtelijke scheiding zal kwantitatieve scheiding naar veroorzaker alleen mogelijk zijn als de betreffende reservoirmodellen bekend zijn. Een belangrijk vereiste voor een scheiding van bijdragen is de uitwisselbaarheid van meetgegevens. De mijnondernemingen moeten dus zoveel mogelijk van dezelfde peilmerken gebruik maken, metingen van vergelijkbare nauwkeurigheid uitvoeren en op gelijke tijdstippen meten.

Een volgende storende factor kan bodemdaling als gevolg van waterwinning zijn. Men zal die gebieden in kaart moeten brengen, waar veel grondwater gewonnen wordt en vervolgens door nauwgezette analyse van peilmerkbewegingen inzicht zien te krijgen in collectief afwijkend peilmerkgedrag ter plaatse. Een goed voorbeeld hiervan is het waterwingebied Kibbelgaarn in de gemeente Scheemda.

Polderpeilverlagingen en langdurige droogteperiodes leiden tot bodemdaling in de bovenste aardlagen als gevolg van compactie (inklink) en door oxidatie van organisch materiaal in deze lagen. De eerder genoemde OM's en andere peilmerken die zijn aangebracht in diepgefundeerde objecten, worden hierdoor niet of nauwelijks beïnvloed. Door gebrek aan goede alternatieven heeft men voorheen in veel gebieden, waar meetnetversteving nodig was, peilmerken aangebracht in slechts oppervlakkig gefundeerde bouwwerken (op staal gefundeerde boerderijen, etc.). Om de ongewenste bijdragen van dergelijke autonome bodemdalingsoorzaken te reduceren, zou men alsnog slecht gefundeerde, instabiele peilmerken zoveel mogelijk uit het meetnet moeten verwijderen. Mochten er door deze eliminatie onvoldoende peilmerken overblijven in een bepaald gebied of langs een bepaald traject, dan zullen er nieuwe, beter gefundeerde merken moeten worden bijgeplaatst. Vooral in veen- en kleigebieden zal deze aanpak van eliminatie en herplaatsing kunnen leiden tot een nauwkeuriger vaststelling van de feitelijke bijdrage van de delfstoffenwinning aan de gemeten bodemdaling.

Indien ter compensatie van bodemdaling door delfstoffenwinning polderpeilaanpassingen moeten worden doorgevoerd om de oorspronkelijke drooglegging zoveel mogelijk te handhaven, kan men een plaatselijke, extra inklinking van de bovenste aardlagen niet altijd uitsluiten. Vanwege de schotelvorm van de bodemdaling treden er namelijk vergeleken met de oude situatie afwijkingen op in de aangepaste drooglegging. Als de grondwaterstand daardoor verder onder het maaiveld kan dalen dan ooit voorheen (bijvoorbeeld na een lange droogteperiode), kan dat tot een extra zetting van de bovenste aardlaag leiden. Vooral de zettingsgevoeligheid van veen met een kleidek erop is groot. Bij op staal gefundeerde bebouwing uitgevoerd in metselwerk mag de grondwaterstand bij klei op veen maximaal 7 cm en bij klei maximaal 10 cm extra dalen om de vergroting van de kans op scheurvorming in het metselwerk tot 5% te beperken. Een toename van minder dan 5% wordt als niet significant beschouwd (Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning, Groningen, maart 1987).

3.3 Normering ten behoeve van het meten met voldoende nauwkeurigheid

Meestal is de bodemdaling aan het maaiveld door delfstoffenwinning gelijkmatig, ongeveer schotelvormig en grootschalig van karakter. Een uitzondering op de regel vormt het 'gat van Hengelo' (een instortingskrater). Hier heeft een nogal ondiep gelegen caveerne zich in de loop der tijd vanwege een onstabiel dak zover richting het maaiveld kunnen verplaatsen, dat uiteindelijk een resterend deel van de caveerne zich scherp omlijnd aan het maaiveld kon manifesteren. Uit wetenschappelijke studies naar dit voorval blijkt dat de fase, waarin het proces van een omhoog kruipende caveerne zich bevindt, door middel van frequente hoogtemetingen aan het maaiveld vastgesteld kan worden.

Om met voldoende nauwkeurigheid bodemdaling als gevolg van delfstoffenwinning te kunnen meten, dient men kort samengevat aan de volgende drie *uitgangspunten* te voldoen.

1. De geografische dichtheid van de peilmerken is zodanig dat men de omvang en de vorm van de bodemdalingsschotel uit de metingen kan afleiden.
2. De precisie van de meetmethode en de nauwkeurigheid van de gemeten hoogten zijn in overeenstemming met de richtlijnen van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat.
3. De meetfrequentie wordt zoveel mogelijk afgestemd op de meethistorie. Dit betekent dat een herhalingsmeting technisch pas nodig is wanneer de nauwkeurigheid van een nieuwe meting die van een voorspelling (extrapolatie) uit de bestaande metingen overtreft.

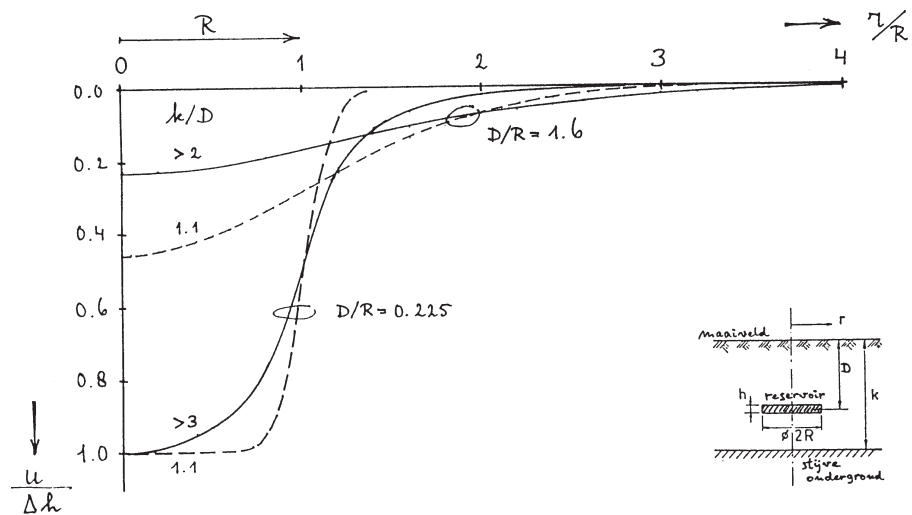
Ad 1. Geografische dichtheid van de peilmerken

Om voorafgaande aan de olie-, gas- en zoutwinning zoveel mogelijk inzicht te krijgen in de vorm van de bodemdalingsschotel hanteert Staatstoezicht op de Mijnen een robuuste en eenvoudige methode van bodemdalingsinschatting, die voldoende informatie oplevert voor praktische doeleinden, zoals de bepaling van de optimale geografische peilmerkendichtheid.

Bodemdalingscriteria

Als vuistregel voor de minimaal te verwachte uitgestrektheid van de dalingschotel kan men een zogenaamde grenshoek van 45° hanteren. Hieronder wordt verstaan de hoek, die de verbindingsslijn tussen de rand van de ondergrondse ontginning (olie- of gasreservoir, pekeltcaverne) en de nulcentimetercontour van de bodemdalingsschotel aan het maaiveld maakt met een horizontaal vlak, dat in Nederland identiek is aan het maaiveld.

Voor de eenvoud van de begripsvorming wordt verder uitgegaan van schijfvormige olie- en gasvelden (reservoirs) in de ondergrond. Een dergelijk reservoir heeft een gemiddelde straal R , ligt op een gemiddelde diepte D beneden het maaiveld en onder dit reservoir bevindt zich een praktisch niet compacteerbare aardlaag op een diepte K , de zogenaamde stijve ondergrond. Volgens het bekende poro-elastische 'nucleus of strain' model van Geertsma en Van Opstal (J. Geertsma, Journal of Petroleum Technology, juni 1973, pp. 734-744 en G.H.C. van Opstal, Proc. 3rd Congr. ISRM, Denver, 1974, pp. 1102-1111) zal het compacterende reservoir met compactie Δh een bodemdaling $u/\Delta h$ aan het maaiveld als functie van de verhoudingen D/R en K/D op een afstand r/R van het middelpunt van de dalingschotel veroorzaken als weergegeven in figuur 1.



Figuur 1. Spreiding van de bodemdaling over het maaiveld (schijfvormig reservoir met stijve ondergrond).

In de praktijk van de bodemdalingsprognoses tot nu toe is de bepaling van de compactie Δh de meest kritische en onzekere factor gebleken bij de bepaling van de absolute waarde van de bodemdaling in, bijvoorbeeld, het diepste punt van de schotel. De vorm van de schotel wordt echter voornamelijk door de andere grootheden in figuur 1 bepaald. Opmerkelijk hierbij is, dat naarmate een reservoir kleiner is ten opzichte van zijn diepteligging de bodemdalingsschotel breder maar minder diep wordt bij dezelfde waarde van de ondergrondse compactie. Ook een ondiepere ligging van het reservoir ten opzichte van de stijve ondergrond heeft een afvlakkende werking.

Bij zoutwinning heeft men te maken met pekelschotels. Ook hierop is het model van figuur 1 van toepassing. Bij zoutwinning uit een zoutdome heeft de caverne of het samenstel van caverne meestal een kleine straal R ten opzichte van de diepte D (grote D/R waarde), zodat men met zeer vlakke en uitgestrekte bodemdalingsschotels te doen heeft in relatie tot de omvang van de caverne. Tevens kan men bij dergelijke caverne

niet over een stijve ondergrond spreken, omdat het zout alzijdig naar de caveerne toe kruipt. In termen van het model uit figuur 1 betekent dit een schijnbaar grote verhouding tussen K en D, hetgeen een nog verdere afvlakking van de schotel bewerkstelligt. Omdat het dak van dergelijke cavernes vaak aanzienlijk zakt, kan er ondanks een zeer kleine verhouding tussen U en Δh in figuur 1 toch sprake zijn van een aanmerkelijke bodemdaling aan het maaiveld. De aldus te verwachte schotel zal vrijwel conusvormig zijn met een uitgestrektheid van iets meer dan de eerdergenoemde grenshoek van 45° .

Er vindt in Nederland ook zoutwinning plaats uit dunne, tamelijk vlak en ondiep gelegen zoutlagen. Ook op deze situatie is het model uit figuur 1 van toepassing, maar hier zijn de bodemdalingsschotels iets meer geprofileerd (omgekeerd klokvormig), omdat de verhouding tussen D en R kleiner is dan bij de cavernes aangelegd in een zoutdome.

Met behulp van criteria ontleend aan het bovenstaande model kan men nu een procedure opstellen voor de bepaling van de gewenste dichtheid van peilmerken om de zich ontwikkelende bodemdalingsschotel voldoende in kaart te kunnen brengen.

Procedure

- Bepaal de grenshoekstraal $R_g = R + D$. Indien het reservoir of de caveerne sterk afwijkt van een cirkelvorm kan men beter een grenshoekcontour bepalen aan de hand van de feitelijke vorm van de ondergrondse begrenzing van het reservoir of de caveerne.
- Hanteer in een ringvormig gebied ter breedte van 1 à 1,5 kilometer direct gelegen buiten de grenshoekcontour een peilmerkendichtheid van ongeveer 1,5 peilmerk per vierkante kilometer indien $R_g < 5$ km en van ongeveer 1 peilmerk per vierkante kilometer indien $R_g > 5$ km is.
- Zet in het buitengebied trajecten op naar de meest nabij gelegen stabiele ondergrondse merken (minimaal 2 OM's).
- Bepaal de verhouding D/R.
- Voor $D/R > 1$ verloopt de schotel tamelijk vlak en hanteert men in het cirkelvormige gebied gelegen binnen de straal R_g een uniforme peilmerkendichtheid die identiek is aan die van het buitengebied met onderscheiding van $R_g < 5$ km en $R_g > 5$ km.
- Voor $D/R < 1$ heeft de schotel een klokvorm en verdeelt men het binnengebied onder in een cirkelvormig gebied met straal $0,5 R_g$ en een ringvormig tussengebied met binnenstraal $0,5 R_g$ en buitenstraal R_g . Indien $R_g < 5$ km is, hanteert men in de binnencirkel met straal $0,5 R_g$ een dichtheid van ongeveer 1,5 peilmerk per vierkante kilometer en in de tussenring een dichtheid van 2 peilmerken per vierkante kilometer. Indien $R_g > 5$ km is, wordt de dichtheid 1 peilmerk, respectievelijk 1,5 peilmerk per vierkante kilometer.

Zo kan men in theorie een meetnet opzetten met vanuit het centrum uitwaaierende trajecten langs peilmerken, die tevens via cirkelvormige trajecten rond het centrum van de schotel aan elkaar gemeten kunnen worden. Men beschikt dan over een netwerk van vele gesloten kringen. Uiteraard wordt hier een ideaalbeeld geschetst. In de praktijk zal regelmatig van het patroon afgeweken moeten worden vanwege beperkingen opgelegd door de aanwezige topografie en infrastructuur. Ook ontbreken er soms geschikte en stabiele objecten om een betrouwbaar peilmerk in te kunnen aanbrengen.

Het Groningen gasveld vormt een uitzonderlijk geval. Dit reservoir met een effectieve straal van ongeveer 15 kilometer en gelegen op een diepte van 3 kilometer heeft een bijzonder kleine D/R verhouding. Het totale bodemdalingsoppervlak bedraagt ongeveer 900 vierkante kilometer. Met het opvolgen van de bovenstaande procedure voor de bepaling van de peilmerkendichtheid per vierkante kilometer zou men kunnen beargumenteren, dat er wel erg veel peilmerken moeten worden aangebracht. In de praktijk valt de redundantie tot nu toe mee, omdat het Groningse gasveld niet van begin af aan uniform gedepleteerd werd, zodat er zich in de loop der jaren een zich noordwaarts verplaatsende bodemdalingsschotel vormde. Voor het in kaart brengen van die ontwikkeling heeft men een relatief hoge peilmerkendichtheid nodig.

Ad 2. Richtlijnen doorgaande waterpassingen

De waterpassingen worden uitgevoerd volgens de richtlijnen van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat (zie paragraaf 2.4). De volgende criteria voor de kwaliteitsbeheersing worden gehanteerd:

- De gewenste overall-precisie van de meetmethode is een standaardafwijking van 1 mm per $\sqrt{\text{km}}$.
- Elk traject wordt heen en terug gemeten, waarbij voor de afwijking in het gemeten hoogteverschil (heen en terug) een tolerantie van $3\sqrt{L}$ mm (L = trajectlengte) wordt aangehouden. Bij overschrijding wordt opnieuw gemeten.
- Voor de sluitterm van gesloten kringen wordt een tolerantie van 1 mm per $\sqrt{\text{km}}$ aangehouden. Bij overschrijding wordt de kring over gemeten.
- De hoogten die men uiteindelijk wenst te berekenen moeten niet afhankelijk zijn van de keuze van de bij de berekening gebruikte trajecten, ook al vallen alle meetuitkomsten binnen de gestelde toleranties. Er wordt daarom een vrije vereffening uitgevoerd, dat wil zeggen dat er aan het gemeten hoogteverschil van elk traject een kleine correctie wordt toegekend, zodanig dat de gecorrigeerde meetuitkomsten aan de eis voldoen dat hun som in elke gesloten kring nul is. De zo verkregen hoogten zijn nog niet gerelateerd aan het NAP.
- Als het netwerk één peilmerk bevat waarvan de NAP-hoogte bekend is, kan men na de vrije vereffening de NAP-hoogten van alle peilmerken bepalen. In de praktijk gebruikt men ter verbetering van de betrouwbaarheid liever meer dan één aansluitpunt, namelijk de eerder genoemde OM's gelegen buiten de bodemdalingsschotel.

Er dient dan weer een vereffening, de zogenaamde gedwongen vereffening, te worden uitgevoerd.

N.B. Bij de gedwongen vereffening moet men bedacht zijn op eventuele fricties tussen de OM's, waardoor de betrouwbaarheid omlaag gaat ten opzichte van de vrije vereffening. De oorzaak hiervan is vaak gelegen in een niet-synchrone hoogtebepaling van de OM's, terwijl zij onderling wel een verschillend zakkingsgedrag kunnen vertonen, bijvoorbeeld door hun ligging al dan niet in een ander bodemdalingsgebied.

Ad 3. Meetfrequentie

De meetfrequentie voor het vaststellen van bodemdaling werd in het verleden voornamelijk afhankelijk gesteld van de precisie van de waterpassingen. De NAP-hoogten van de peilmerken kunnen bij toepassing van de richtlijnen van de Meetkundige Dienst bepaald worden met een standaardafwijking van 3 à 4 mm. De standaardafwijking van het verschil tussen twee opeenvolgende bepalingen van hetzelfde punt is $\sqrt{2}$ maal zo groot, dus 4,2 à 5,6 mm. Een zakking van driemaal dit bedrag, dus 12,6 à 16,8 mm, kan met een kans van meer dan 90% (eenzijdige toetsing, 5% onbetrouwbaarheid) betrouwbaar worden vastgesteld. Hieruit is de vuistregel ontstaan dat na een verwachte zakking van 1 à 2 centimeter in het diepste punt van de dalingschotel een volgende waterpassing noodzakelijk wordt geacht. Als maximum tijdsinterval tussen twee waterpassingen wordt een periode van 5 jaar acceptabel gevonden. Bij het vaststellen van de meetfrequentie spelen bodemdalingsprognoses als functie van de tijd een belangrijke rol.

De resultaten van de herhalingsmetingen bleken in vele gevallen nauwkeurig voorspelbaar uit de meethistorie. Uit de zakkingshistorie voor het centrum van de bodemdalingsschotel kan de dalingssnelheid met bijbehorende standaarddeviatie worden geschat. Hiermee kan men de toekomstige bodemdaling voorspellen. De nauwkeurigheid van die voorspelling zal afnemen naarmate het tijdstip, waarvoor de daling wordt voorspeld, verder afligt van dat van de laatste waterpassing. Bij ongewijzigd productiebeleid heeft de volgende waterpassing meettechnisch gezien pas zin wanneer de nauwkeurigheid van een dergelijke meting die van de voorspelling overtreft. Naarmate de meethistorie langer is zal de bodemdaling nauwkeuriger geschat kunnen worden en kan de meetfrequentie dus zonder nadelige gevolgen verlaagd worden. Om praktische redenen (toestand peilmerken, ingrepen door derden aan het maaiveld, etc.) wordt als maximum acceptabel tijdsinterval tussen twee waterpassingen een periode van 5 jaar gehandhaafd. Bij iedere significante verandering in de productiesnelheid zal de meetfrequentie weer verhoogd moeten worden.

Als voorbeeld wordt aan de hand van de waterpassingen boven het Amelandse gasveld het bepalen van de meetfrequentie uit de meethistorie toegelicht. Tussen 1986 en 1997 is op Ameland jaarlijks een waterpassing uitgevoerd. Met behulp van het door de TU Delft ontwikkelde continue tijd-plaatsmodel zijn de meetresultaten (in termen van

plaatselijke hoogteverschillen) van alle peilmerken en van alle waterpassingen gemiddeld. Uit dit wiskundige model voor Ameland resulteert een lineair dalingsgedrag in de tijd vanaf 1987 met gemiddeld 1,9 cm per jaar. In 1997 bedraagt de standaarddeviatie van de bodemdaling in het centrum van de schotel 3,7 mm. De standaarddeviatie van de dalingsnelheid in dit centrum bedraagt 0,3 mm per jaar. Vanwege foutvoortplanting in het model neemt de standaarddeviatie van een geëxtrapoleerde daling in het diepste punt in de tijd toe, maar blijft tot het begin van 2001 beter dan 5 mm. Bij waterpassingen ligt de standaarddeviatie van het verschil tussen twee opeenvolgende bepalingen van hetzelfde punt tussen 4,2 en 5,6 mm. Het heeft dus in modeltermen pas zin om in de loop van 2001 de volgende waterpassing te verrichten. Op dat moment kan men ook de voorspellingsnauwkeurigheid van het model opnieuw toetsen. Het model voorspelt tussen 1997 en 2001 een bodemdaling in het diepste punt van ongeveer 7,5 cm. Begin 2001 is er inderdaad weer een waterpassing op Ameland verricht. Het lineaire model blijkt deze meting echter te verwerpen vanwege een significante afzwakking in de dalingsnelheid. Dit kan op een structureel veranderde (productie)situatie duiden. De meetfrequentie zal weer verhoogd moeten worden. Staatstoezicht op de Mijnen zal hierbij de gebruikelijke vuistregel hanteren (meten bij een verwachte significante daling van 1 à 2 centimeter). Gelet op de afvlakkende dalingsnelheid betekent dit voor Ameland een volgende waterpassing in 2003.

Zoutwinning

Ook bij zoutwinning kan men het aantal waterpassingen op basis van een historische beschouwing en met inachtneming van de feitelijk gerealiseerde zoutproductie reduceren. De procedure gaat als volgt. In de beginfase van de zoutwinning verricht men regelmatig waterpassingen (bijvoorbeeld jaarlijks). Hierdoor krijgt men inzicht in de omvang en vorm van de bodemdalingsschotel. Eveneens voert men regelmatig een ondergrondse holruimtekening uit, waardoor men inzicht krijgt in het groeigedrag en het openstaande pekelgevulde volume van de holruimte (caverne). Door dit volume te relateren aan het feitelijk aan de ondergrond onttrokken zoutvolume kan men de gemiddelde convergentiesnelheid op jaarbasis van de caverne bepalen. Met convergentie wordt bedoeld het dichtgedrukt worden van de caverne door opdringend zout vanuit de cavernewand. Door deze convergentie blijft het cavernevolumen kleiner dan men op basis van de gerealiseerde zoutproductie zou verwachten. Dit ondergrondse volumetekort vertaalt zich in bodemdaling aan het maaiveld, maar vaak niet voor de volle 100% en met enige vertraging. Vanwege deze onzekerheidsfactoren en als gevolg van tijdelijke schommelingen in productie-omstandigheden, die invloed hebben op de grootte van de caverneconvergentie, zal de dalingsnelheid een bepaalde onzekerheid (standaarddeviatie) vertonen. Zoals eerder gesteld bedraagt bij waterpassingen de standaarddeviatie van het verschil tussen twee hoogtebepalingen ongeveer 5 mm. Zodra de bepaling van de bodemdaling op basis van het historische convergentiemodel nauwkeuriger wordt dan een waterpasmeting, kan men de volgende waterpassing uitstellen tot het tijdstip waarop de modelbepaling weer onnauwkeuriger wordt dan een

waterpassing. Uiteraard zal er bij een significante verandering in de productie-omstandigheden weer vaker gewaterpast moeten worden.

Naijlende bodemdaling

Volgens de wettelijke voorschriften moet de concessionaris tot één jaar na de beëindiging van de gas- en oliewinning en tot 5 jaar na de beëindiging van de zoutwinning waterpassingen verrichten. Er is hier sprake van een eindmeting. Wellicht kan zich na beëindiging van de productie in een enkel geval de situatie voordoen, dat de (verwachte) naijlingseffecten van de bodemdaling langduriger zijn dan de gestelde meettermijnen en dat ze bovendien significant zijn in de zin van: groter dan de autonome maaiveld-daling in het gebied. De huidige regelgeving voorziet niet in deze omstandigheid. De overheid wil in het kader van een nieuw Mijnbouwbesluit (conform artikel 36, lid 1, van het wetsvoorstel voor een nieuwe Mijnbouwwet) het fenomeen naijlende bodemdaling beter kunnen controleren via een mogelijke verlenging van de meettermijn.

Overigens vormt het inschatten van de mate en de duur van de naijlingseffecten van de bodemdaling een (wetenschappelijk) probleem zonder een spoedig zicht op een alomvattend antwoord. Het betreft hier problemen als kruip in het gesteente, de effecten van opdringend bodemwater uit aquifers, permeatie van pekkel door het dak van een afgesloten zoutcaverne, etc. Met dit probleem moet pragmatisch omgegaan worden. Enerzijds kan eventueel naijlende bodemdaling nog nadelige effecten voor derden met zich meebrengen, anderzijds leeft bij een operator de wens om op een bepaald moment in de tijd ontslagen te worden van verdere meetverplichtingen.

3.4 Rapportage van de metingen

De wettelijke voorschriften, vermeld in paragraaf 2, geven aan dat van iedere waterpassing en lengtemeting schriftelijk rapport moet worden uitgebracht aan de Inspecteur-Generaal der Mijnen met een afschrift aan Gedeputeerde Staten van de betrokken provincie (dit laatste is niet van toepassing op de oude steenzoutconcessies van Akzo Nobel in Overijssel en Groningen). Tevens is de Inspecteur-Generaal der Mijnen bevoegd meetregisters te waarmerken.

Uit de wetgeving rond deformatiemetingen (waterpassingen en lengtemetingen) kan men afleiden dat de resultaten van deze metingen in principe openbare informatie is. Hierin schuilt voor de mijnondernemingen een potentieel risico, dat in enkele gevallen reeds tot problemen heeft geleid met lagere overheden en burgers over (vermeende) schade als gevolg van bodemdaling door delfstoffenwinning.

Het *probleem* is dat de deformatiemetingen feitelijk de totale bodemdaling door alle mogelijke oorzaken tezamen opleveren. Vanuit het oogpunt van behoorlijk bestuur mag men de mijnonderneming alleen haar eigen bijdrage aan de bodemdaling aanre-

kenen. De scheiding van bodemdalingscomponenten is echter een complex geotechnisch vraagstuk, dat reeds in paragraaf 3.2 de revue passeerde.

N.B. Ook na een technisch correcte toedeling van de (deel)bijdrage van de mijnonderneming aan de bodemdaling blijft het aantonen van een direct causaal verband tussen deze bodemdalingscomponent en de eventueel door een particulier geclaimde gebouwenschade een complexe zaak. Ditzelfde probleem doet zich ook voor bij de schadeclaims als gevolg van aardbevingen, die worden toegeschreven aan delfstoffenwinning.

Sinds vele jaren en meestal als antwoord op verzoeken van externe derde-partijen voegen verschillende mijnondernemingen hun eigen interpretaties van de meetresultaten toe (bijvoorbeeld in de vorm van contourkaarten) aan de schriftelijke rapportages aan de Inspecteur-Generaal der Mijnen. Door voortschrijdende ontwikkelingen op geodetisch gebied, zoals het continue tijd-plaatsmodel, kan men steeds beter de eigen bijdrage afsplitsen van de totaal gemeten bodemdaling. Dit is niet zonder gevolgen. Door aanpassingen van het interpretatiemodel kan er een trendbreuk ontstaan in de getallenreeks van de 'eigen bijdrage'. Bovendien kunnen er misverstanden ontstaan, doordat in de loop van de tijd de daadwerkelijk gemeten bodemdaling nauwelijks meer gerelateerd is aan de bodemdaling door delfstoffenwinning. Bij de niet-deskundige buitenwacht kan hierdoor wellicht de indruk ontstaan dat er met de getallen gemanipuleerd wordt ten gunste van de mijnonderneming. Staatstoezicht op de Mijnen vindt het echter ongewenst dat de door haar te waarmerken meetregisters oneigenlijk belast worden met interpretatiekwesties met betrekking tot de feitelijke meetresultaten.

Als resultaat van overleg tussen Staatstoezicht op de Mijnen en de mijnondernemingen en andere betrokken partijen wordt met ingang van het jaar 2001 op een iets andere wijze invulling gegeven aan de wettelijke voorschriften met betrekking tot de rapportage van deformatiemetingen. De gang van zaken is als volgt.

- De mijnonderneming, c.q. in opdracht van de mijnonderneming een deskundig ingenieursbureau, verricht de voorgeschreven deformatiemetingen.
- Bij secundaire waterpassingen worden de meest recente richtlijnen hieromtrent van de Meetkundige Dienst opgevolgd.
- De meetgegevens van de secundaire waterpassingen worden ter kwaliteitsborging overhandigd aan de Meetkundige Dienst, Afdeling NAP, te Delft. Deze dienst voert vereffeningen uit en stelt nieuwe NAP-hoogten voor de aangemeten peilmerken vast.
- Na een positieve terugmelding van de Meetkundige Dienst stelt de mijnonderneming over de verrichte waterpassing een definitief rapport op. Dit voor openbaarmaking bedoelde rapport wordt zoveel mogelijk volgens een standaardopzet vervaardigd ten genoegen van de Inspecteur-Generaal der Mijnen (IGM). Het rapport bevat geen enkele interpretatie van de meetgegevens. Naast dit standaardrapport ontvangt de IGM een aparte differentiestaat in NAP-hoogten voor eigen gebruik.
- Na instemming van de IGM met het rapport geeft hij dit rapport officieel vrij en stelt de Meetkundige Dienst de nieuw vastgestelde NAP-hoogten voor eenieder ter

beschikking in haar openbare NAP-bestand. Het vrijgegeven rapport doet dienst als 'gewaarmerkt meetregister' conform artikel 134, lid 2, Mijnreglement 1964.

- Het staat de mijnondernemingen vrij om in aanvulling op de gewaarmerkte meetregisters, in eigen beheer vervaardigde interpretatiestudies uit te brengen (bijvoorbeeld in het kader van privaatrechtelijke overeenkomsten). Uiteraard zal de IGM ook kennis nemen van deze studies en ze beoordelen.
- Daarnaast voert Staatstoezicht op de Mijnen eigen onderzoek uit naar de mogelijke consequenties van de waterpassingsresultaten voor eerder uitgebrachte prognoses en om dreigende ongewenste situaties aan de oppervlakte tijdig te traceren. Als de inzichten van Staatstoezicht op de Mijnen en de resultaten van door de mijnonderneming uitgebrachte interpretatiestudie te zeer uiteen lopen, dan vindt er overleg plaats.

3.5 Bodemdalingsprognoses

Uit paragraaf 3.3 bleek reeds dat bodemdalingsprognoses een rol spelen bij de opzet van het waterpasnetwerk en bij het vaststellen van de meetfrequentie van waterpassingen. Daarnaast vormen prognoses een ondersteuning bij de bepaling van het tijdstip, waarop men maatregelen moet treffen om ongewenste effecten van bodemdaling te voorkomen of te compenseren.

Het opstellen van prognoses gaat met tamelijk veel onzekerheden gepaard, vooral in de beginfase van een veldontwikkeling wanneer men met nogal beperkte invoergegevens en diverse aannames ten aanzien van het reservoirmodel en het productieverloop moet werken. Ook de keuze van het soort gesteentemechanische modellering is van invloed op het eindresultaat. Het is dus belangrijk, dat bij elke afgegeven prognose duidelijk wordt aangegeven wat de betrouwbaarheidsgrenzen zijn en hoe groot de gevoeligheid van het eindresultaat voor mogelijke variaties in essentiële invoergegevens is. Om de robuustheid van dergelijke prognoses te toetsen kan men na verloop van tijd de resultaten van waterpassingen gebruiken. Door vergelijking van 'achterwaartse' voorspellingen met waterpasresultaten (inversie) kan men de mogelijke oorzaken van modelafwijkingen op het spoor komen.

Door nieuwe ontwikkelingen in de Mijnbouwwetgeving zullen bodemdalingsprognoses over enige tijd een verplicht onderdeel vormen voor alle in te dienen ontginningsplannen voor de winning van gas, olie en zout. Hierbij krijgt Staatstoezicht op de Mijnen de taak de Minister van Economische Zaken te adviseren over de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van de verstrekte prognoses. De eerder in paragraaf 3.3 onder ad 1. gepresenteerde *bodemdalingscriteria* kan men hierbij als een eerste toetsingskader gebruiken.

4. Interne procedure van toezicht op bodembewegingen

Zoals reeds gesteld in paragraaf 1, houdt Staatstoezicht op de Mijnen op systematische wijze toezicht op bodembewegingen aan het maaiveld als gevolg van delfstoffenwinning. In de *bijlage* is een processchema opgenomen, dat in grote lijnen de onderlinge relaties tussen de processen en beslismomenten van dit toezicht op bodembewegingen presenteert. Om het processchema overzichtelijk te houden is de wettelijke basis, die in paragraaf 2 uitvoerig is behandeld, niet in het schema opgenomen. In lijn met de wettelijke voorschriften is een onderverdeling in drie tijdfasen gemaakt: vóór aanvang, gedurende en na beëindiging van de delfstofwinning. Alle elementen van de normstelling, behandeld in paragraaf 3, zijn in het schema vertegenwoordigd.

5. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

1. Staatstoezicht op de Mijnen neemt actief deel aan de geotechnische en geodetische kennisopbouw op het gebied van bodembewegingen om op een doelmatige manier toezicht te kunnen houden op bodemdaling door delfstoffenwinning.
2. De normering van meettechnieken met betrekking tot bodembewegingen laat Staatstoezicht op de Mijnen zoveel mogelijk over aan de primair verantwoordelijke instanties en organisaties.
3. Vanuit de praktijkervaring bij delfstoffenwinning beschouwt Staatstoezicht op de Mijnen bodemdalingsprognoses op geofysische dan wel geodetische grondslag voornamelijk als nuttige hulpmiddelen voor het richting geven aan de verwachtingen op de korte termijn (i.e. 2 à 5 jaar). Door de gebleken onmogelijkheid van voldoende kennis vóóraf over een aantal van de voor de betrouwbaarheid van de modelleringen cruciale grootheden is de praktische waarde van deze modelleringen voor de middellange (10 à 15 jaar) en lange termijn (meer dan 20 jaar) derhalve tamelijk gering.

Aanbevelingen

Vanwege het vaak tamelijk geringe praktische nut van (middel)langetermijnvoorspellingen bij delfstoffenwinning, zowel op geofysisch als geodetisch gebied, pleit Staatstoezicht op de Mijnen ervoor dat de betrokken partijen bij het voorkomen van schade en hinder door bodemdaling als gevolg van delfstoffenwinning het volgende in acht nemen:

1. Pleeg geen kostbare investeringen voor herstelmaatregelen (bijvoorbeeld op waterhuishoudkundig gebied) op basis van de schijnzekerheid van langetermijn-bodemdalingsprognoses. Soms vallen de prognoses mee, soms vallen ze tegen. De enige

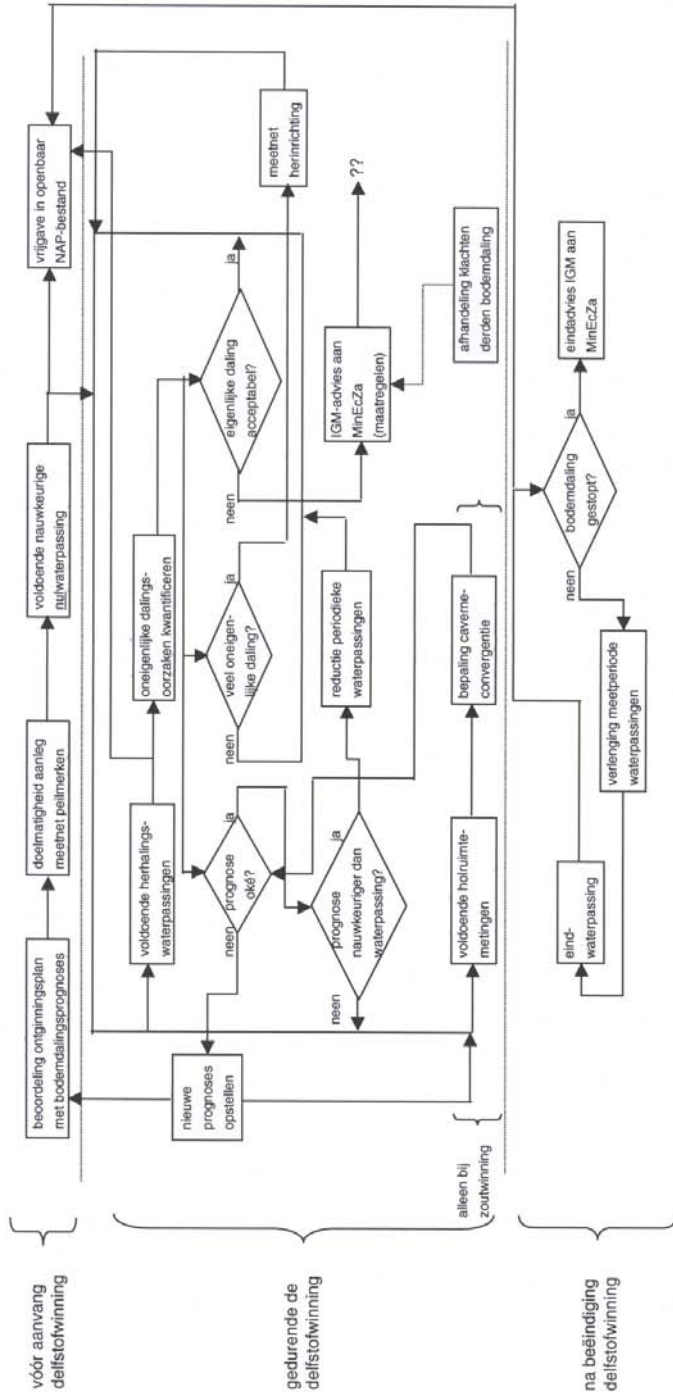
zekerheid tot nu toe is, dat ze na verloop van tijd aan herziening toe zijn vanwege het voortschrijdend inzicht in de diverse aspecten, die van essentieel belang zijn bij de zich ontwikkelende bodemdaling tijdens de delfstoffenwinning.

2. Verricht metingen (geofysische en geodetische) zodra men kan verwachten, dat deze significante informatie opleveren voor het inzicht in het verloop van de bodemdaling. Gebruik deze nieuwe informatie meteen om inversiestudies te verrichten en de prognoses voor de korte en middellange termijn aan te scherpen.

3. Tracht grote en dure infrastructurele herstelmaatregelen zo lang mogelijk uit te stellen, dat wil zeggen tot het moment dat voldoende inzicht is ontstaan in de meest waarschijnlijke eindsituatie van de bodemdaling door delfstoffenwinning. Financiële en maatschappelijke onzekerheid bij (toekomstig) schadelijgende partijen kan men in de tussenliggende tijd wegnemen door het oprichten van garantiefondsen, die meegroeien met de voortschrijdende bodemdaling.

Interne toezichtsprocedure "Bodembewegingen aan maaiveld"

(juni 1999, Sector G/M)



Bodemdaling: geofysische predictie versus monitoring

Nauwkeurigheid van predictiemodellen en mogelijkheden tot geïntegreerde modellering

Dr. J.N. Breunese

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO

Hoe wordt bodemdaling voorspeld?

Centraal staat het thema bodemdaling ten gevolge van extractie van delfstoffen als olie, gas en steenzout uit de diepe ondergrond (zeg dieper dan 500 meter).

Gekoppelde processen

Voorspelling van bodemdaling berust op een voorspelling van de volgende aan elkaar gekoppelde processen:

- tempo van extractie van de delfstof;
- volumeverandering op reservoirniveau ten gevolge van extractie;
- propagatie van de volumeverandering op reservoirniveau naar het oppervlak.

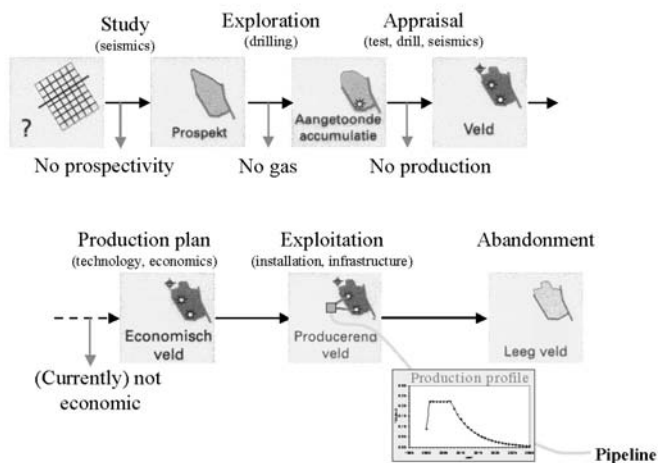
Op effecten van klink en neo-tektoniek wordt hier niet ingegaan. Elk van deze drie processen kent zijn eigen modelvormen, karakteristieke parameters en onzekerheden.

Tempo van extractie

Figuur 1 toont de 'life cycle' van een gasveld. Willen we een predictie doen van het productieverloop van een prospect (= een mogelijk maar nog niet aangetoond aardgasvoorkomen), dan vereist dat een voorspelling, waarin de volgende parameters en onzekerheden een rol spelen:

- Boorwaardigheid: wordt het prospect aangeboord en zo ja wanneer.
- Reserves: zal aardgas worden aangetoond, en zo ja, hoeveel; zal deze hoeveelheid economisch winbaar zijn qua volume, capaciteit en kwaliteit.
- Productie: wanneer zal de productie aanvangen en hoe ziet het ontwikkelingsplan er uit (aantal productieboringen, productiefaciliteiten, infrastructuur).

De onzekerheden zijn in het algemeen geringer naar mate een veld zich verder in de life cycle bevindt.



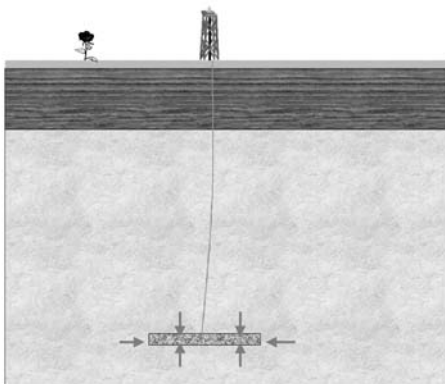
Figuur 1. De 'life cycle' van een gasveld.

Volumeverandering op reservoirniveau ten gevolge van extractie

Figuur 2 geeft schematisch weer, hoe het reservoir van volume verandert ten gevolge van extractie van delfstoffen. Op dit gebied bestaan drie typen modellen:

- analytisch gebaseerd op de materiaalbalans, zonder ruimtelijke dimensie;
- numeriek Finite Element modellen, waarmee in beginsel zeer complexe reservoirgeometrie kan worden gerepresenteerd (tijdrovend in opzet en bedrijf);
- hybride 'fast models' (snel maar met beperking in complexiteit).

In relatie tot bodemdaling moet met deze modellen de verdeling van de drukdaling in ruimte en tijd worden voorspeld, zoveel mogelijk gebruik makend van a-priori kennis over de reservoirbouw en met kalibratie aan reeds waargenomen drukken in boringen. Uit de drukverdeling kan vervolgens de ruimtelijke verdeling van de reservoircom-



Figuur 2. Schematisch weergave van hoe het reservoir van volume verandert ten gevolge van extractie van delfstoffen.

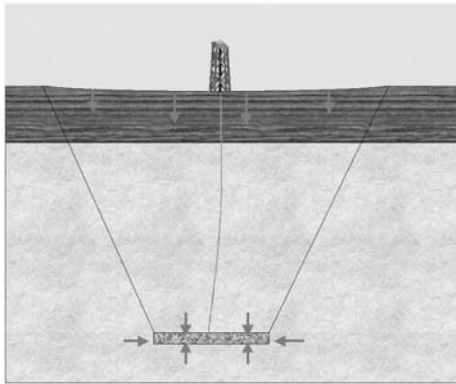
pactie worden geschat aan de hand van aannames over de lithologie en de daarmee geassocieerde compactiecoëfficiënt.

Propagatie van de volumeverandering op reservoirniveau naar het oppervlak

Figuur 3 geeft schematisch weer hoe volumeverandering op reservoirniveau zich vertaalt in bodemdaling. Ook op dit gebied bestaan weer drie typen modellen:

- analytisch (bijvoorbeeld Geertsma, van Opstal);
- numeriek Finite Element (bijvoorbeeld DIANA);
- hybride 'fast model' (AE Subs, TNO-NITG).

Weer wordt de keuze voor een modeltype bepaald door de afruil tussen snelheid, complexiteit, beschikbare gegevens en betrouwbaarheid van het resultaat.



Figuur 3. Schematisch weegave van hoe volumeverandering op reservoirniveau zich vertaalt in bodemdaling.

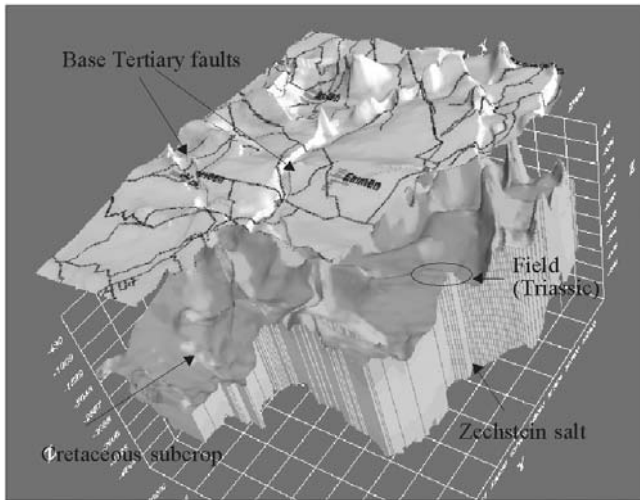
Figuur 4 illustreert de typische structurele complexiteit van aardgasreservoirs en hun geologische omgeving. Het is dus niet vanzelfsprekend, dat eenvoudige modellen volstaan. Niettemin kunnen relatief eenvoudige modellen wel een indruk geven van de gevoelige parameters in het probleem en daarmee zonnodig richting geven aan de opzet van een meer complex model.

Omgekeerd kan een hybride model worden gekalibreerd aan een meer complex model en vervolgens als fast model dienen in een modelketen.

Hoe nauwkeurig zijn de predictiemodellen?

De nauwkeurigheid van de predictie van bodemdaling is de resultante van de nauwkeurigheid, waarmee de drie eerder genoemde processen kunnen worden voorspeld. Opdracht is om die modelementen en parameters te identificeren, waardoor de

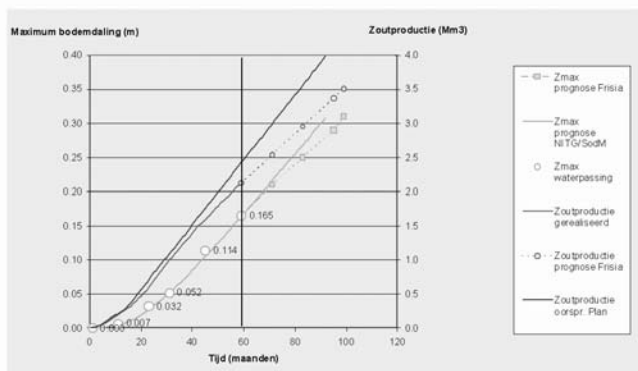
bodemdaling dominant wordt bepaald. Mogelijke oorzaken van de verschillen tussen voorspelling en meting worden besproken aan de hand van twee voorbeelden.



Figuur 4. Illustratie van de typische structurele complexiteit van aardgasreservoirs en hun geologische omgeving.

Zoutwinning Barradeel

Figuur 5 toont de prognose en de realisatie van de bodemdaling ten gevolge van zoutwinning in de concessie Barradeel, gemeten in het centrum van de dalingskom. In dit geval was het productietempo iets lager dan de oorspronkelijke raming. De meest bepalende parameter in dit geval bleek de volumeconvergentie van de zoutcavernes: het in-situ kruipgedrag van het steenzout zoals afgeleid uit laboratoriummetingen aan



Figuur 5. De prognose en de realisatie van de bodemdaling ten gevolge van zoutwinning in de concessie Barradeel, gemeten in het centrum van de dalingskom.

zoutmonsters bleek een sterke onderschatting te zijn van de werkelijke in-situ kruip-snelheid.

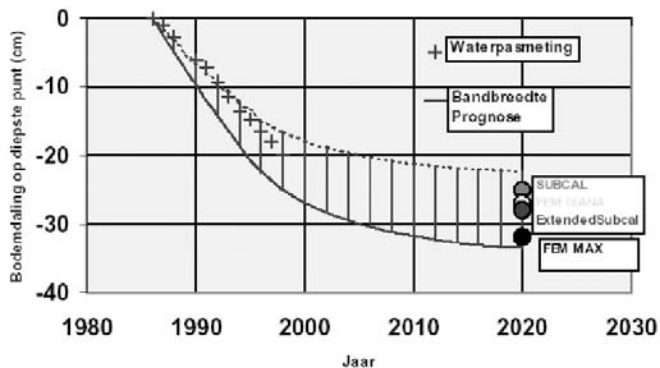
Gaswinning Ameland

Figuur 6 toont de realisatie van de bodemdaling ten gevolge van gaswinning uit het Amelandse gasveld, afgezet tegen prognoses van een aantal typen predictiemodellen:

- Subcal (analytisch);
- Extended subcal (uitbreiding op Subcal met zoutlaag);
- DIANA (FEM) numeriek model.

De voorspellingen van deze modellen vallen binnen een bandbreedte tussen 22 tot 33 cm, te bereiken in het jaar 2020; dit ondanks de reeds gevorderde productiehistorie van dit veld.

Ook voor het Amelandse gasveld geldt, dat de productie wat afwijkend is geweest van de oorspronkelijke raming. De belangrijkste onzekerheden op reservoorniveau zijn echter de drukverbinding (connectiviteit) tussen reservoircompartimenten en de relatie tussen lithologie en compactie.



Figuur 6. De realisatie van de bodemdaling ten gevolge van gaswinning uit het Amelandse gasveld, afgezet tegen prognoses van een aantal typen predictiemodellen (bron NAM).

Gebruik van predictiemodellen bij monitoring

Predictiemodellen hebben een functie bij het ontwerpen en optimaliseren van monitoringprogramma's; dit naar analogie van bijvoorbeeld het ontwerpen van een seismische survey. Afhankelijk van de situatie is een specifiek aspect van een bodemdalingskom van belang. De onderstaande tabel geeft een aantal voorbeelden. Dit vertaalt zich dan

weer in specifieke eisen ten aanzien van de meetnauwkeurigheid van het betreffende aspect.

Aspect dalingskom	Relatie met
Straal en maximum	waterhuishouding
Volume	zandhonger
Helling	schade aan gebouwen
Tempo	investeringen in maatregelen
Asymmetrie / vorm	reservoirgeometrie

Monitoring ten behoeve van predictie

Inversie

Via inversie van de monitoringresultaten kan in beginsel informatie worden verkregen over de dynamische processen in de diepe ondergrond. Een voorbeeld daarvan is de analyse van de ruimtelijke verdeling van de compactie in aardgasreservoirs. Resultaat is dan een verbeterde predictie van het reservoirgedrag en de extractie van gas uit verschillende delen van het reservoir. Toepassing van een dergelijke techniek kan aanzienlijk economische belang hebben voor de gasproducent.

A-priori kennis

Bij de inversie wordt a-priori kennis gebruikt om het probleem in te kaderen. Deze kennis is afgeleid uit andere informatiebronnen zoals seismiek, boorgegevens en productiegegevens.

Met betrekking tot de 'overburden' en relevante omgeving van het reservoir gaat het om informatie over structuur, gelaagdheid, lithologie en geomechanische eigenschappen (met name Poisson's ratio en Young's modulus; voor steenzout: kruipeigenschappen). Met betrekking tot het reservoir gaat het om informatie over structuur, breuken, interne laagopbouw en interne reservoir eigenschappen (porositeit, permeabiliteit, geomechanische eigenschappen).

Bij het gebruik van dergelijke a-priori kennis moet worden beseft, dat ook deze met - soms aanzienlijke - onzekerheid is omgeven.

Time-lapse techniek

Time-lapse dalingsmetingen kunnen worden gezien als een derde onafhankelijke bron van informatie over de dynamiek van een reservoir, naast productiegegevens uit

boringen en time-lapse seismische gegevens. Geen van deze drie bronnen levert op zichzelf een finaal antwoord op door gebrek aan uniciteit en resolutie in ruimte en tijd. De meerwaarde moet komen uit integratie van de drie informatiebronnen, rekening houdend met ieders beperkingen en onzekerheden.

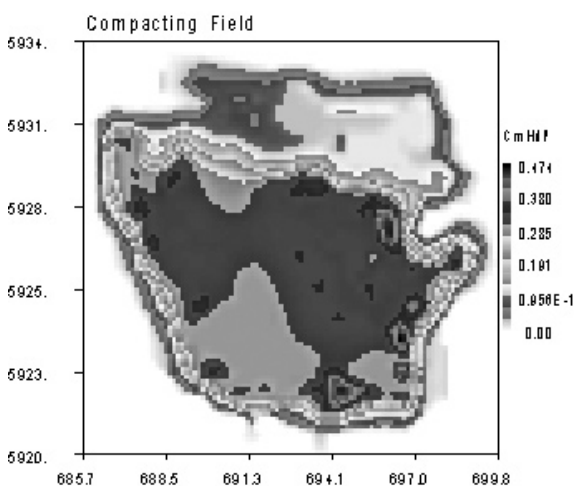
Met betrekking tot de dalingsmetingen is detectie van subtiele vormveranderingen in de tijd een grote uitdaging.

Inversie dalingsmetingen naar reservoircompactie

De onderstaande tabel geeft de kengetallen van twee voorbeelden uit de literatuur, waar is getracht om informatie over het compactiegedrag van het reservoir te ontlenen aan dalingsmetingen.

Case	Bachaquero Olieveld	Ameland gasveld
Referentie	[SPE, 1976]	[NAM & TNO, 1998]
Reservoir	ongeacholideerd	geeacholideerd
Diepte (m)	600	3600
Afmeting (km)	17 x 25	2 x 2
Zmax (cm)	370	28
Periode meting (jr)	2	1

Figuur 7 illustreert de ruimtelijke verdeling van de compactie binnen het producerende deel van het Amelandse veld. Figuur 8 toont de contouren van de gemeten bodemdaling in 1999.



Figuur 7. Illustratie van de ruimtelijke verdeling van de compactie binnen het producerende deel van het Amelandse veld.

De 'Bachaquero-case' biedt voor inversie een aantal voordelen boven de 'Ameland-case':

- Het reservoir is ongeconsolideerd, waardoor de compactie per eenheid van drukdaling relatief groot is.
- Het reservoir ligt relatief ondiep ten opzichte van zijn laterale afmetingen. De reservoircompactie vertaalt zich dan vrijwel volledig door in bodemdaling.
- De bovengrondse situatie liet toe overal boven het reservoir dalingsmetingen te doen (in de 'Ameland-case' is het meetnet op het eiland veel dichter dan daaromheen).

De toepasbaarheid van inversie zal dus mede afhangen van een aantal veldspecifieke kenmerken. Ondanks de te bereiken meetnauwkeurigheid blijft gebrek aan uniciteit in dit type inversie een fundamenteel probleem. Dit is momenteel onderwerp van actieve research (1).

Conclusies

- Predictie is alleen zinvol met 'learning curve' (= monitoring, verklaring en bijstelling).
- Predictie van bodemdaling onder beding van keten van processen.
- Nauwkeurigheid van predictie is de resultante van de deelprocessen.
- Geïntegreerde modellering is noodzaak.
- De gevraagde nauwkeurigheid is afhankelijk van de situatie.
- Het resultaat van een subsurface-model als input voor de analyse van dalingsmetingen is een mogelijk alternatief.
- Dalingsmetingen als input voor inversie naar informatie reservoir(dynamiek).
- Lokale time lapse surveys met hoge (relatieve) nauwkeurigheid zijn nodig.

Referentie

1. Subsidence Prediction and Inversion of Subsidence Data, Peter A. Fokker (TNO-NITG). Te presenteren op de SPE / ISRM 2002 conferentie in Irving, Texas (paper no. 76809).

Over NAP en bodembeweging

Een bewerking van de presentatie 'NAP en bodembeweging - houvast of natte voeten?'

Ir. R.E. Molendijk
Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat

Voor wie is het Normaal Amsterdams Peil (NAP) bij wijze van spreken niet een stevig houvast? Het NAP werd door het Koninklijk Besluit nr. 60 van 18 februari 1818 voorgeschreven als hoogterefentie voor het beheer van de Nederlandse rivieren. Sinds die tijd is het NAP een niet meer weg te denken referentie bij waterbeheer en aanleg en beheer van infrastructuur. Beheer van het Nederlandse hoogtesysteem, het NAP, is een publieke taak van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat (MD).

In deze bijdrage aan de themadag van de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie staan achtereenvolgens de plaats van het NAP in de geometrische infrastructuur, het verband tussen bodembeweging en het NAP en, met in het achterhoofd het ochtendthema 'Hoe precies moet het?', enkele kwaliteitsaspecten centraal.

Als verticaal referentiestelsel is het NAP eigenlijk een stelsel van afspraken waarmee een tastbare, bijna absolute referentie voor het begrip hoogte wordt gedefinieerd. Het NAP als referentie(vlak) is in 1682 voor het eerst vastgelegd door acht stenen in de sluizen in de dijk langs het IJ te Amsterdam. Het vastgelegde niveau is gebaseerd op het waargenomen gemiddelde zomervloedpeil en dus in zekere zin te relateren aan, maar niet per definitie gelijk aan (gemiddeld) zeeniveau. De laatste twee overgebleven dijk-



Figuur 1. Het NAP-nulniveau zichtbaar gemaakt in Amsterdam.

peilstenen te Amsterdam zijn voor het huidige NAP (de 2e Nauwkeurigheidswaterpassing) als uitgangspunt gebruikt. In 1956 is tijdens de 3e Nauwkeurigheidswaterpassing de hoogte van de laatste dijkpeilsteen overgebracht naar een nieuw ondergrondse merk op de Dam in Amsterdam, hiermee is nadien echter niets meer gedaan. In 1988 werd tevens een voor het publiek toegankelijk NAP-nulpunt ingericht in het Stadhuis Muziektheater. Andere bijzondere maar minder officiële vastleggingen van het NAP zijn het monument bij het laagste punt van Nederland langs de A20 in Nieuwerkerk aan den IJssel en de steen bij het hoogste punt van Nederland, de Vaalserberg in Limburg.

Over het NAP als onderdeel van de geometrische infrastructuur

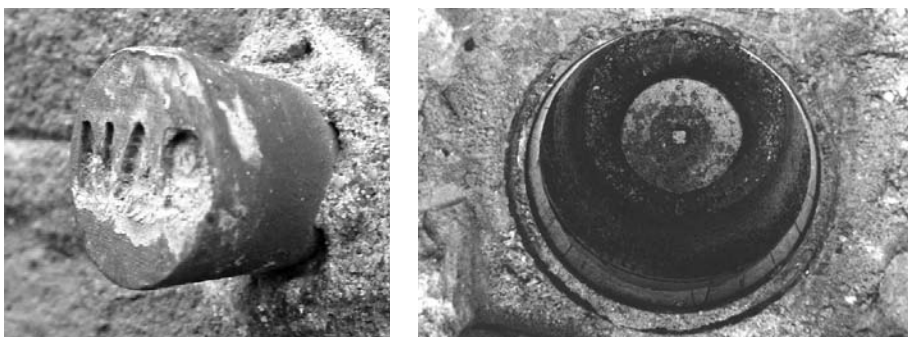
Het NAP vormt met het systeem van de Rijksdriehoeksmeting (RD) en het European Terrestrial Reference System (ETRS89) de geometrische infrastructuur van Nederland. Het systeem van de Rijksdriehoeksmeting is bedoeld voor vastlegging in het platte vlak en dankt zijn bekendheid met name aan de kadastrale toepassing ervan. Als basis voor het bepalen van RD-coördinaten wordt per definitie gebruik gemaakt van ETRS89.

ETRS89 is een recentelijk ingevoerd ruimtelijk Europees referentiesysteem dat direct bruikbaar is voor de GPS-gebruiker. Binnen Europa is ETRS89 als standaard benoemd om gebruik en uitwisseling van geo-informatiebestanden te vereenvoudigen.

Om dezelfde redenen is er ook behoefte aan een Europees hoogtesysteem, het European Vertical Reference System (EVRS). In de definitie van het EVRS is het NAP als referentie gebruikt zodat het voor praktische toepassingen niet zinvol is om dit systeem in Nederland van het NAP te onderscheiden.

Uit ETRS89 afgeleide hoogten kunnen niet zonder meer de EVRS-hoogten vervangen. ETRS89 geeft namelijk geometrische hoogten boven een referentie-ellipsoïde, waar NAP-hoogten juist fysische hoogten zijn. We noemen het NAP immers al snel in één adem met het stromen van water, een actueel blijvend onderwerp in Nederland.

Naast de gedefinieerde referentiesystemen is infrastructuur nodig voor het praktisch gebruik ervan. Voor het NAP zijn dit met name peilmerken, aangevuld met zogenaamde ondergrondse (peil)merken die om redenen van beheer niet voor publiek toegankelijk



Figuur 2. NAP-peilmerk (links) en ondergronds merk (rechts).

zijn. Deze basisinfrastructuur kan waar nodig lokaal verdicht worden voor specifieke toepassingen als grote civieltechnische werken en ze kan voor bepaalde toepassingen dienen als aansluitpunt, bijvoorbeeld voor peilschalen.

De centrale database met NAP-gerelateerde informatie bevat de historische gegevens van ruim 52.000 peilmerken. Van zo'n 35.000 peilmerken is door recente waterpassing een hoogte beschikbaar, gemiddeld is dit ongeveer een peilmerk per vierkante kilometer.

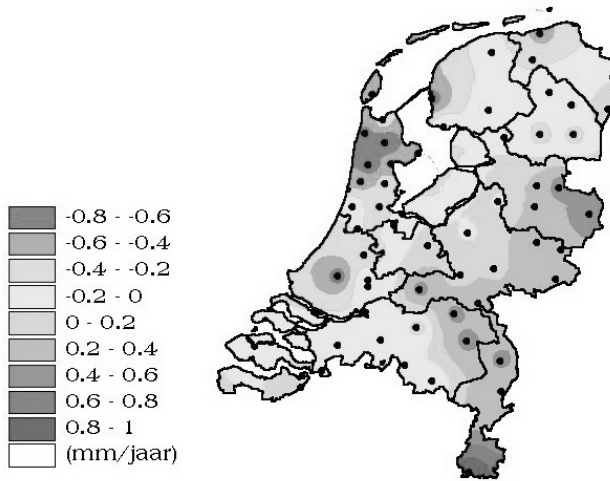
Over NAP en bodembeweging

Inzicht in bodembeweging is van belang voor het up-to-date houden van de NAP-infrastructuur en voor beleidsontwikkeling op het gebied van waterbeheer. In het algemeen hebben de factoren tijd en beweging altijd al een rol gespeeld in (de definities van) referentiesystemen. Gebruik van nieuwe inwintechnieken met een groter bereik en een hogere precisie maken positieveranderingen in een referentiesysteem veel sneller en beter zichtbaar. Voor de Nederlandse situatie geldt dit met name voor de hoogtecomponent. Hoogteveranderingen zijn significant zichtbaar in hoogteverschilmetingen en NAP-hoogten. Op Europese schaal is in GPS-tijdseries eveneens beweging detecteerbaar in alle drie de dimensies van ETRS89.

Instabiliteit van peilmerken is altijd één van de redenen geweest om regelmatig door metingen de hoogte van peilmerken te controleren. De som van alle (relatieve) bewegingen is zichtbaar in de NAP-hoogten. Of, omgedraaid, historische waterpassingen bevatten (dus) informatie over 'recente' bodembeweging. Recent omdat er processen aan ten grondslag liggen die zich uitstrekken over periodes van vele tienduizenden jaren. Historische hoogtemetingen in de vorm van waterpassingen zijn echter maar beschikbaar vanaf het begin van de 20e eeuw.

Het netwerk van NAP-peilmerken is nooit ontworpen om bodembeweging te monitoren maar de facto zijn de beschikbare meetgegevens hiervoor wel bruikbaar. Er is altijd verondersteld dat de in het Pleistoceen gefundeerde ondergrondse merken onderling niet bewegen. Zij dienen bij het beheer van het NAP als regionaal aansluitpunt voor het bepalen van de NAP-hoogte van peilmerken. De hoogte van peilmerken echter wordt in het algemeen veel sterker beïnvloed door externe factoren. Voorbeelden zijn de stabiliteit (fundering) van het object (bruggen, gebouwen etc) waarin zij verankerd zijn, en delfstoffenwinning. Overigens is de beweging die merkbaar is bij peilmerken meestal wel weer veel kleiner dan de beweging die aan het maaiveld optreedt.

Begin jaren 1990 heeft de analyse van historische waterpassingen geleid tot een globaal beeld van beweging van ondergrondse merken in Nederland. Hierdoor werd voor het eerst aangetoond dat ook de ondergrondse merken onderling minder stabiel waren dan gedacht. De sinds die constatering uitgevoerde 5e Nauwkeurigheidswaterpassing, tezamen met historische waterpassingen, zal het mogelijk maken om de gepubliceerde NAP-peilmerkhogten ook daadwerkelijk te verbeteren.



Figuur 3. Pleistocene bodembeweging in Nederland, afgeleid uit een beperkt aantal waterpassingen.

Voor beleidstoepassingen is het belangrijk om een onderscheid te kunnen maken tussen bodembeweging en (relatieve) zeespiegelvariaties. Hierbij gaat het uiteindelijk (ook) om voorspellingen en bijbehorende onzekerheden. Een beeld krijgen op basis van geodetische gegevens kan prima door het analyseren van een relatief lange historie aan (NAP-)hoogtemetingen. Hieraan een voorspelling koppelen is iets anders. Juist omwille van het beschrijven van de kwaliteit van deze schattingen is inbreng van andere geodisciplines gewenst. Zo heeft de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat na een eerste analyse van historische waterpassingen (begin jaren 1990) niet alleen aandacht gegeven aan het aanvullen en verbeteren van de geodetische dataset, maar ook aan de confrontatie van de 'gemeten' beweging van ondergrondse merken met geologische componenten als isostasie, tectoniek en compactie.

Over NAP en kwaliteit

Het NAP wordt vaak beschouwd als een absoluut gegeven terwijl NAP-hoogten zeker niet foutloos zijn! De vraag 'hoe precies moet het?' (het ochtendthema van deze themadag) zal dus in dit geval voorafgegaan moeten worden door de vraag 'hoe precies is het?'

De kwaliteit van de NAP-basisinfrastructuur wordt in eerste instantie bepaald door de gehanteerde meetmethodiek, dat wil zeggen de precisie waarmee gewaterpast is en de constructie van waterpasnetwerken. Nauwkeurigheidswaterpassingen resulteren aan de grenzen van Nederland in NAP-hoogten met een precisie van ongeveer zeven millimeter. Dit is dan een maat voor de 'absolute hoogte ten opzichte van Amsterdam'. In relatieve zin zijn de (verschillen tussen) NAP-hoogten op regionaal niveau echter veel beter bepaald en voor praktisch gebruik ook het meest belangrijk.

Belangrijk voor praktisch gebruik is ook de actualiteit van de NAP-hoogten. Door (niet gemodelleerde) beweging van peilmerken is de frequentie van controle mede bepalend voor de uiteindelijke kwaliteit die bij gebruik ervaren wordt. Als vuistregel kan worden genomen dat de precisie van de gepubliceerde peilmerken 1 cm bedraagt ten opzicht van het NAP met een betere onderlinge precisie voor kortere afstanden van $1 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$. Met dien verstande dat, afhankelijk van de regio van Nederland, de houdbaarheidsdatum vijf tot tien jaar is. Dit komt goed overeen met de wens van de gebruikers van NAP-hoogten.

Evenzeer is het de wens dat NAP, naast een maat voor hoogte, ook een stabiele referentie voor (bodem)bewegingsanalyses moet zijn. Toch wordt de hoogte in Nederland uitgedrukt ten opzicht van NAP, maar bodembeweging bijvoorkeur niet.

Bij het uitvoeren van een bodembewegingsanalyse kunnen NAP-(peil)merken, gebruikt als referentiepunt voor waterpassingen, wat toevoegen. Bijvoorbeeld omdat reeds beschikbare, historische metingen daardoor bij de analyse betrokken kunnen worden. Het directe gebruik van de NAP-hoogten van peilmerken kan alleen iets toevoegen op regionaal niveau. Dit heeft met name te maken met de vereiste (gewenste) kwaliteit waarmee hoogteveranderingen gedetecteerd moeten worden. Om daar verbetering in aan te kunnen brengen is het nodig de peilmerkhogten op een andere manier dan nu gebruikelijk te berekenen en te publiceren. Wordt vervolgd



Figuur 4. Aansluiting van de 5e Nauwkeurigheidswaterpassing op een NAP-peilmerk in het Koninklijk Paleis in Amsterdam.

Meer weten over NAP, bodembeweging en referentiesystemen?

Internet:

- www.rdnap.nl informatie over de geometrische infrastructuur (publicaties RD en NAP);
 - www.geo-loket.nl informatie over maaiveldhoogten;
 - www.euref-iag.org informatie over de Europese geometrische infrastructuur.
-
- Kooi, Henk, Paul Johnston, Kurt Lambeck, Catherine Smither, Ronald Molendijk (1998), Geological causes of recent (~ 100 yr) vertical land movement in the Netherlands, *Tectonophysics* 299 (1998), p. 297-316.
 - Dr.-ing. G.K. Lorenz, drs. W. Groenewoud, drs. F. Schokking, ir. M.W. v.d. Berg, dr. J. Wiersma, dr.ir. F.J.J. Brouwer, dr. S. Jelgersma, 'Heden en Verleden, Nederland naar beneden? - interim-rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland', Rijkswaterstaat en Rijks Geologische Dienst, november 1991.
 - Dr.-ing. G.K. Lorenz, ing. W.A. van Beusekom, ir. R.E. Molendijk, dr.ir. E.J. de Min, 'De 5e Nauwkeurigheidswaterpassing - Een geodetische uitdaging', *NGT Geodesia* 1996-3, p. 95-103.
 - Ir. R.E. Molendijk, ing. W.A. van Beusekom en ir. G.W. van Willigen, 'Het NAP, houvast in Nederland én Europa', *Geodesia* themanummer Stelselherziening geometrische infrastructuur van Nederland, 2000-9, p. 385-392.

Overzicht van geodetische meetmethoden, modellering en analyse

Ir. F. Kenselaar
TU Delft, Afdeling Geodesie

Inleiding

Dit artikel beoogt een beknopt overzicht te geven van de huidige stand van zaken in Nederland met betrekking tot monitoring van bodemdaling uit geodetische metingen. In de bijdragen van Quadvlieg, Hanssen en Paar en Mensen zal vervolgens nader op een aantal aspecten worden ingegaan.

Vooraf moet worden gesteld dat de magnitude van de bodembeweging in Nederland zeer klein is, in de orde van een millimeter per jaar natuurlijke beweging van het Pleistoceen, tot enkele centimeters per jaar bij gas- of zoutwinning. Tijdens internationale symposia verbazen buitenlanders zich er nogal eens over dat we ons in Nederland überhaupt druk maken over zo'n beperkte bodembeweging. De lage ligging en diensgevolge gevoelige waterhuishouding, gecombineerd met een kritische houding van de bevolking, doen ons bijzonder alert zijn op bodembeweging van een magnitude die men elders geen monitoring waard acht.

De geringe magnitude van de bodembeweging heeft tot consequentie dat de grootte van het gezochte signaal in de buurt ligt van de nauwkeurigheid waarmee we kunnen meten. De hoogtemetingen zijn mede daarom nog vrijwel uitsluitend op nauwkeurige optische waterpassing gebaseerd. De conclusies ten aanzien van bodembeweging door delfstofwinning zijn zeer gevoelig voor bijvoorbeeld instabiliteit van slecht gefundeerde peilmerken, natuurlijke bodembeweging en aannames met betrekking tot de hoogterefereentie. De verwerking en kwaliteitscontrole van de metingen zijn dan ook vrijwel nergens zo grondig uitgewerkt als in Nederland.

In dit artikel zal ik achtereenvolgens aandacht besteden aan de gebruikte geodetische meetmethoden, de procedures voor data-analyse en de verschillende wijzen van modellering en dataverwerking die in Nederland worden gebruikt.

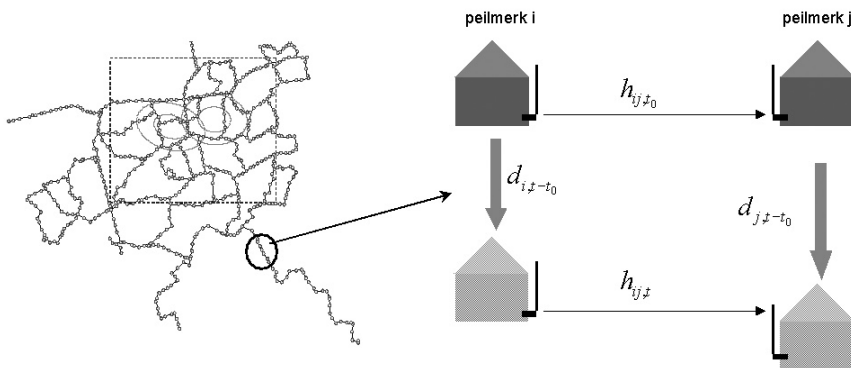
Geodetische meetmethoden

Bij geodetische monitoring van verticale bodembeweging tracht men de hoogtevariatie in de tijd te meten voor een aantal goed gedefinieerde, stabiele punten die de beweging van de (diepe) ondergrond representeren. Voor nauwkeurige meting van hoogten en hoogteveranderingen staan in principe een drietal geodetische meetmethoden ter beschikking: optisch of hydrostatisch waterpassen, GPS-hoogtemeting en InSAR remote sensing.

De bijdrage van Hanssen gaat uitgebreid in op *InSAR* (radarinterferometrie) voor monitoring van bodembeweging. Hoewel een recente pilotstudy naar het gebruik van *InSAR* in Groningen teleurstellende resultaten opleverde, zijn er toch aanwijzingen dat deze remote-sensing technologie toekomst heeft voor monitoring van bodembeweging in Nederland. Met behulp van zogenaamde 'permanent scatterers' zijn indrukwekkende resultaten behaald bij de detectie van bodembeweging en gebouwdeformatie in stedelijke gebieden.

In de jaren negentig zijn in Groningen verschillende jaarlijkse GPS-campagnes gemeten. Uit de GPS-basislijnen zijn (geometrische) hoogteverschillen tussen peilmerken te berekenen die alleen over lange afstanden qua precisie kunnen concurreren met de (orthometrische) hoogteverschillen uit waterpassing [Krijnen en De Heus (1995), De Heus et. al. (1999)]. Temporele hoogtevariatie met millimeterprecisie wordt zichtbaar in de tijdreeksen van permanente GPS-referentiestations. Dat is echter geen optie voor de monitoring van een groot aantal punten.

Resteert 'good old' optisch waterpassen, dat nog steeds de basis vormt voor de bepaling van hoogte en hoogteverandering. Terwijl we geïnteresseerd zijn in de temporele hoogteverandering van een punt i , $d_{i,t-t_0}$, bestaat de gemeten grootheid uit het ruimtelijke hoogteverschil tussen twee punten i en j op een enkel tijdstip, $h_{ij,t}$ (zie figuur 1).



Figuur 1. Een waterpasnetwerk. Bodembeweging van discrete punten berekenen uit gemeten hoogteverschillen op discrete tijdstippen.

Een algemene vorm van de waarnemingsvergelijking van een door waterpassing op een zeker tijdstip t gemeten hoogteverschil luidt dan:

$$\underline{h}_{ij,t} = -\underline{H}_{i,t} + \underline{H}_{j,t} + \underline{e}_{ij,t}, \quad (1a)$$

met $\underline{H}_{i,t} = H_{i,t_0} + \underline{d}_{i,t-t_0} + \underline{e}_{i,t-t_0}$ voor $i = i, j$, (1b)

en $\underline{d}_{i,t-t_0} = f(t - t_0, x_i, y_i, par) + \underline{e}_{x_i, y_i, t-t_0}$ voor $i = i, j$ (1c)

Vergelijking (1a) beschrijft het gemeten hoogteverschil als het verschil tussen de actuele hoogten van twee peilmerken, $H_{i,t}$ en $H_{j,t}$, plus een stochastische meetfout, ook wel meetruis genoemd. De precisie van optische waterpassing is goed bekend. De meetruis wordt meestal beschreven met een standaardafwijking van ongeveer $0.7\sqrt{L}$ mm, met L de trajectlengte in kilometer.

In het geval van bodembeweging beschrijft vergelijking (1b) de actuele peilmerkhogte als de hoogte op tijdstip t_0 voor bodemdaling, plus de hoogteverandering $d_{i,t-t_0}$ sindsdien. In de regel zijn we geïnteresseerd in de systematische hoogteverandering, bijvoorbeeld veroorzaakt door gaswinning. De stochastische term $e_{i,t-t_0}$ omvat dan de niet-systematische variatie in peilmerkhogte door andere, veelal lokale oorzaken. Hiervoor wordt wel de term puntruis gebezigd. Ook in gebieden zonder systematische bodemdaling ($d = 0$) blijken de sluitfouten tussen op verschillende tijdstippen gemeten hoogteverschillen niet louter verklaarbaar uit de meetruis. Modellerings van puntruis vindt plaats als een ruimtelijk ongecorrigeerd random walk proces, met een standaardafwijking van ongeveer $0.5\sqrt{T}$ mm, met T het tijdinterval tussen de metingen in jaren [Houtenbos en Kenselaar (2001)].

Vergelijking (1c) tenslotte beschrijft de kinematische modellering van de hoogteveranderingen $d_{i,t-t_0}$ door een parametrisering in tijd (bijvoorbeeld een polynoom per peilmerk) of in tijd en plaats (bijvoorbeeld een bodemdalingsskom).

In Nederland worden verschillende werkwijzen gehanteerd bij de verwerking van waterpasdata ten behoeve van de beschrijving van bodemdaling ('Hoe moet het precies?', zie de bijdragen van Quadvlieg en van Paar en Mensen). Deze zijn onder andere terug te voeren op de gemaakte keuze voor de modellering in (1c).

Aangezien de wiskundige modellering van een fysisch verschijnsel als bodemdaling door bijvoorbeeld gas- of zoutwinning een beperkte nauwkeurigheid heeft, wordt de vergelijking sluitend gemaakt door een stochastische modelfout $e_{x_i,y_i,t-t_0}$. Gezien de verwachting dat extractie uit de diepe ondergrond resulteert in een gladde bodemdalingsskom aan het oppervlak is ruimtelijke correlatie van deze *modelruis* aannemelijk.

De nauwkeurigheid waarmee we opgetreden bodembeweging kunnen vastleggen wordt dus begrensd door meetruis, puntruis en modelruis. Gedachten over punt- en modelruis zijn pas in recente jaren ontstaan, in een poging te verklaren waarom uit precieze waterpasdata toch lastig een sluitende hypothese omtrent de opgetreden deformatie kon worden verkregen.

Data-analyse

Meetruis, puntruis en modelruis vormen het stochastisch (dus verwachting nul) complement van respectievelijk *meetfouten*, *autonome beweging* van individuele peilmerken en systematische *modelafwijkingen*. Juist omdat het in Nederland om relatief geringe bodembewegingen gaat kunnen de grenzen tussen systematische bodemdaling, fouten en stochastische ruis niet eenvoudig worden getrokken. De dataverwerking vraagt dan

ook om een buitengewoon zorgvuldige aanpak. Onontdekte fouten in de data en de dataverwerking kunnen zich snel als schijnbare bodembeweging manifesteren. Statistische hypothesetoetsing dient dan ook standaard deel uit te maken van de berekening van opgetreden bodembeweging. De aan de TU Delft ontwikkelde procedures zijn zelfs volledig op *hypothesetoetsing* gebaseerd. Een en ander staat in detail beschreven in [De Heus et. al. (1995), Kenselaar (2001)]. We geven hier slechts de principes kort weer.

De bepaling van het deformatiemodel vindt iteratief plaats. Steeds uitgaande van een nulhypothese. Bijvoorbeeld 'er is geen significante bodembeweging en er zijn geen significante afwijkingen in de data'. Significant betekent hier 'met geringe kans verklaarbaar binnen de in het kansmodel gespecificeerde meet-, punt- en modelruis'. De parameters in het model onder de nulhypothese worden geschat met behulp van (iteratieve) kleinstekwadratenvereffening. Zolang de nulhypothese niet door statistische toetsing wordt aanvaard, wordt deze geconfronteerd met verschillende alternatieve hypothesen. Men kan hierbij denken aan de volgende conventionele hypothesen:

- Een enkele waarneming is fout (en dat voor alle waarnemingen respectievelijk).
- Een enkel peilmerk gedraagt zich afwijkend (en dat voor alle peilmerken respectievelijk).
- Een hele epoeche met data wijkt af van de rest (en dat voor alle epochen respectievelijk).

Meer specifieke hypothesen voor verdachte peilmerken zijn bijvoorbeeld:

- Het peilmerk daalt met constante snelheid.
- Er is een sprong in de peilmerkhogte vanaf een bepaalde epoeche.
- Het peilmerk daalt vanaf een bepaalde epoeche (een zogenaamd. breukpunt).

Elke alternatieve hypothese wordt geformuleerd als een uitbreiding van het model onder de nulhypothese, waarna wordt getoetst of de nulhypothese moet worden verworpen, ten gunste van de alternatieve hypothese.

In elke stap van het iteratieve toetsingsproces (zie figuur 2) wordt de nulhypothese dus geconfronteerd met een groot aantal alternatieve hypothesen. Voor elke alternatieve hypothese wordt een toetsgrootheid berekend, welke wordt vergeleken met een kritieke waarde uit een statische verdeling.

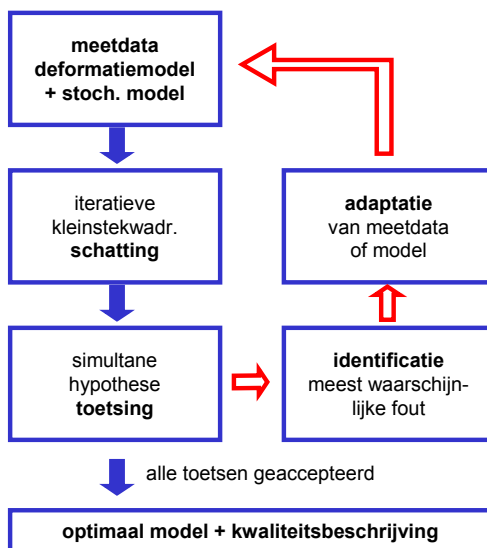
Een fout komt zelden alleen, en het is ondoenlijk elke mogelijke foutcombinatie in een alternatieve hypothese te vatten. Aangezien bovendien de toetsgrootheden gecorreleerd zijn, zal een grote fout in verschillende toetsen tot verwerping van de nulhypothese leiden. De praktische uitweg uit dit dilemma is om na elke kleinstekwadratenvereffening slechts de meest significant verworpen toetsgrootheid nader te analyseren (identificatie). Nadere beschouwing van de geïdentificeerde fout of modelafwijking leidt tot adaptatie van de data, het functiemodel of het kansmodel. Adaptaties zijn bijvoorbeeld het verwijderen van waarnemingen of peilmerken in een enkele epoeche,

of het toelaten van een eigen bewegingsgedrag van een peilmerk, onafhankelijk van de gemodelleerde systematische bodembeweging.

Na adaptatie beschikt men dan over een nieuwe, verbeterde nulhypothese. Een nieuwe ronde van vereffening en simultane hypothesetoetsing volgt, totdat de nulhypothese wordt geaccepteerd.

Het iteratief vaststellen van de beste hypothese omtrent de opgetreden bodembeweging is een boeiend spel dat niet geheel aan de computer kan worden overgelaten. Aan iedere adaptatie gaat een beslissing vooraf om in te grijpen in de data, het functiemodel, dan wel het kansmodel. Daarvoor is zowel kennis vereist van geodetische meet- en verwerkingstechnieken, als van de te verklaren bodembeweging.

Bij het schatten van modelparameters voor een fysisch verschijnsel zijn de gekozen aannamen voor functie- en kansmodel complementair. Het streng vasthouden van scherpe a-priori aannamen omtrent meet-, punt- en modelruis kan er toe leiden dat veel data wordt verworpen als zijnde niet (binnen de in het kansmodel gespecificeerde marges) passend bij het functiemodel. Het wekt echter geen vertrouwen indien eendeloos data wordt verwijderd om maar tot een sluitende hypothese te komen. Anderzijds kan men ruimere marges tussen data en functiemodel toestaan door de standaardafwijking voor meet-, punt- of modelruis te verhogen ('het kansmodel opblazen'). Een sluitende hypothese wordt dan eerder bereikt. Maar men moet dan wel consequent zijn en het ruimer aangenomen kansmodel voortplanten in de resultaten, en dus een lagere precisie van het geschatte deformatiemodel accepteren. Ter illustratie: neemt men voor de precisie van waterpasdata een standaardafwijking van een centimeter per wortel-kilometer, dan wordt ook zonder punt- en modelruis, en zonder verwerping van data, eenvoudig een sluitend deformatiemodel verkregen. De geschatte snelheid van bodemdaling heeft dan echter slechts een precisie van ongeveer een centimeter per jaar. Bovendien worden alle fouten in de data kleiner dan enkele centimeters niet op-



Figuur 2. Vaststellen van het deformatiemodel in een iteratief proces van kleinstekwadratenschatting, simultane hypothesetoetsing en modeladaptatie.

gespoord, maar eenvoudig onder het (dikke) tapijt van stochastische meetruis geveegd. In Nederland zou dan trouwens de hypothese 'geen significante bodemdaling' (lees: meer dan een centimeter per jaar) vrijwel in alle gebieden worden aanvaard. Als een dergelijke nauwkeurigheid maatschappelijk acceptabel is ('Hoe precies moet het?'), is er overigens niets mis met een dergelijke werkwijze.

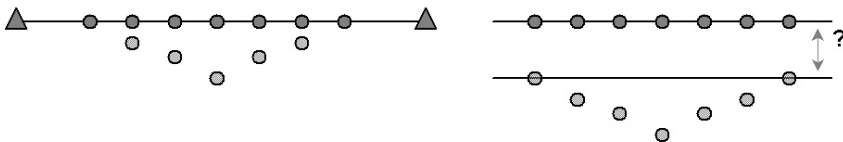
Beide strategieën worden in Nederland gevolgd. Er wordt gezocht naar zo realistisch mogelijke waarden voor de verschillende ruiscomponenten [Houtenbos en Kenselaar (2001)]. In de praktijk blijkt echter vaak dat metingen, noch peilmerken, noch werkelijke bodemdaling zich volledig aan onze hypothesen wensen te houden. De laatste iteratiestap in het toetsingsproces bestaat dan ook nogal eens uit een verruiming van het kansmodel om tot een sluitende hypothese te komen.

Varianten in meetopzet, modellering en dataverwerking

Bij de monitoring van bodembeweging worden in Nederland verschillende werkwijzen gehanteerd. De verschillen kunnen worden teruggevoerd op keuzen ten aanzien van de *meetopzet*, de *modellering* en de *verwerkingsstrategie*. Hieronder volgt een poging tot ordening. De vraag 'hoe moet het precies?' valt hiermee niet volledig te beantwoorden, verschillende situaties kennen hun eigen optimale werkwijze. Wel kunnen aanbevelingen worden gedaan op basis van recente inzichten.

Meetopzet

Essentieel is de keuze tussen absolute of relatieve deformatieanalyse (zie figuur 3). Bij *absolute deformatieanalyse* wordt de meting in elke epoeche aangesloten op stabiel veronderstelde referentiepunten. De peilmerkhoogten in elke epoeche worden daarmee onderling vergelijkbaar. De hoogteverschillen tussen epoechen, differenties genoemd, geven een directe indicatie van de bodembeweging. Over lange tijdspannen is de beschikbaarheid en stabiliteit van (niet ondergrondse) peilmerken echter lastig te garanderen. Nieuwe gasvondsten hebben het gebied dat onder invloed staat van bodemdaling verder uitgebreid, waardoor in Noord-Nederland steeds minder referentiepunten beschikbaar kwamen. De aansluiting op referentiepunten noodzaakt dan ook tot waterpasnetwerken die veel groter zijn dan het te monitoren gebied.



Figuur 3. Absolute (links) of relatieve (rechts) deformatieanalyse.

Bij *relatieve deformatieanalyse* wordt a-priori geen van de peilmerken stabiel verondersteld. Uit de metingen wordt louter de relatieve beweging van peilmerken afgeleid. De omvang van het waterpasnetwerk kan zich dan tot de rand van het verwachte bodemdalingsgebied beperken. Een tweede belangrijk pluspunt is dat de invloed van instabiele referentiepunten op de deformatieanalyse wordt vermeden. Een vaak tijdroevende stabiliteitsanalyse, het toetsen van de stabiliteit van de referentiepunten, kan dan worden overgeslagen. Hoewel het wellicht een vreemde gedachte is dat niet in elke epoeche peilmerkhooften in NAP worden verkregen, is in veel situaties relatieve deformatieanalyse voldoende of verdient zij zelfs de voorkeur.

Modellering

Bij *statische deformatieanalyse* beschouwt men de hoogteverschillen tussen epochen, zonder deze nader te modelleren. De analyse beperkt zich dus tot de differenties d_i uit vergelijking (1b), terwijl vergelijking (1c) niet van toepassing is. In de regel berekent men hiertoe per epoeche een lijst met differenties voor alle peilmerken ten opzichte van nulhoogten voor bodemdaling. Deze aanpak treft men veelal aan in combinatie met absolute deformatieanalyse. De dataverwerking vereist slechts software voor de vereffening van waterpasdata per epoeche. Een ruimtelijke visualisatie van de bodembeweging kan worden verkregen door de peilmerkdifferenties per epoeche te interpoleren.

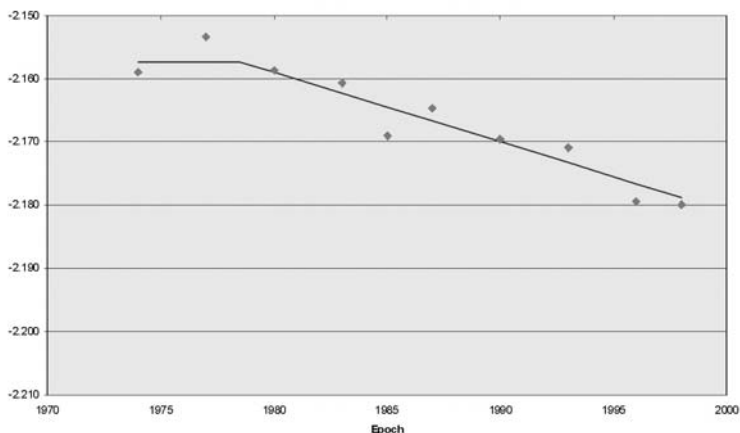
Bij *kinematische deformatieanalyse* wordt getracht de beweging te modelleren als deterministische functie van de tijd conform formule (1c). In het geval men per peilmerk bijvoorbeeld een constante bewegingssnelheid verwacht wordt (1c):

$$\underline{d}_{i,t-t_0} = v_i(t - t_0) + \underline{e}_{x_i, y_i, t-t_0} \quad (2a)$$

De te schatten parameters zijn dan een nulhoogte H_{i,t_0} en snelheid v_i per peilmerk, en mogelijk het begintijdstip van bodemdaling t_0 . Dat laatste is slechts mogelijk indien we over data van voor het begin van bodemdaling beschikken.

De aanname dat de systematische bodembeweging kan worden gemodelleerd met een constante snelheid per peilmerk lijkt nogal primitief, maar komt aardig overeen met de bevindingen in Groningen. Aangezien hooguit jaarlijks wordt gemeten kunnen de effecten van aanvang en afbouw van de exploratie met nauwelijks meer detail dan een breukpunt worden gemodelleerd (zie figuur 4). Met de in de jaren negentig ontwikkelde SCAN-1Defo software werd voor elk peilmerk de beweging met een tijdpolynoom gemodelleerd. Met behulp van toetsing werd de optimale graad van de polynoom bepaald, alsmede eventuele breukpunten [Verhoef en De Heus, 1995]. Het resultaat was een best-fit tijdfunctie als beschrijving van het gedrag per peilmerk.

Ter modellering van bodemdaling door gaswinning heeft de NAM enkele jaren geleden de beschrijving per peilmerk vervangen door een ruimtelijk model voor de gehele bodemdalingskom. De peilmerksnelheden in (2a) worden daarin onderling gerelateerd.



Figuur 4. Een geschatte tijdpolynoom met breukpunt voor een peilmerk.

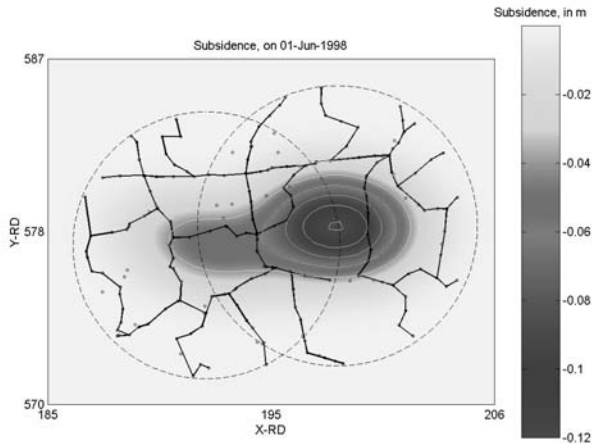
Zeker voor diepe exploratie voorspellen geomechanische predictiemodellen immers een betrekkelijk glatte bodemdalingskom. Formules (1c) en (2a) worden dan:

$$\underline{d}_{i,t-t_0} = v(t-t_0)f(x_i, y_i, par) + \underline{e}_{x_i, y_i, t-t_0} \quad (2b)$$

met v is de maximale snelheid in het diepste punt van de kom en $f(x_i, y_i, par)$ een functie die de afname van de snelheid vanuit het centrum van de kom beschrijft. Op voorstel van de NAM [Houtenbos, 2000] is hiervoor in de SUMO-software een Gaussisch afnemende snelheid boven een ellipsvormig gebied geïmplementeerd. Voor kleine gasvelden is dat een adequate benadering gebleken (zie figuur 5) [Kenselaar en Martens, 2000]. Indien toepasbaar heeft ruimtelijke modellering van bodembeweging een aantal voordelen. De overtaligheid neemt aanzienlijk toe omdat niet langer voor elk peilmerk een onafhankelijke snelheid wordt berekend. Indien in de loop van de tijd peilmerken verdwijnen of worden toegevoegd is dat geen probleem voor de schatting van de bodemdalingskom. Bovendien kunnen verschillende meetmethoden als waterpassing, GPS en InSAR veel gemakkelijk worden geïntegreerd. Het ruimtelijk model zorgt voor de relatie tussen de beweging op verschillende posities, zodat de metingen niet langer via identieke punten behoeven te worden gekoppeld. De bijdrage van Quadvlieg gaat verder in op deze aanpak.

In het algemeen vormt de beweging van peilmerken een coherent ruimtelijk patroon, wat overigens nog niet wil zeggen dat dit patroon eenvoudig in een deterministisch model kan worden beschreven. Vertonen de peilmerkbewegingen nauwelijks enige ruimtelijke samenhang, dan is de punt dichtheid te laag en/of de magnitude van de bodembeweging te zwak om de beweging per peilmerk verder ruimtelijk te modelleren.

Bij *dynamische deformatieanalyse* tenslotte tracht men een relatie te leggen tussen de uit geodetische metingen bepaalde bodembeweging en de krachten die hieraan ten grondslag liggen. In Nederland wordt dat nog niet toegepast bij de verwerking van



Figuur 5. Bodemdaling boven twee gasvelden gemodelleerd als een combinatie van twee ellipsvormige bodemdalingssommen (doorgetrokken lijnen zijn het waterpasnetwerk op epoche 1998).

geodetische data. Wel worden de resultaten van geodetische monitoring gebruikt ter verbetering van geomechanische predictiemodellen. Een tijdpolynoom per peilmerk is een best-fit oplossing zonder geomechanische interpretatie. De curve van het door de NAM gehanteerde tijd-plaatsmodel lijkt op die van predictiemodellen voor gaswinning, maar de geschatte parameters hebben geen directe geomechanische betekenis. Omvang en diepste punt van de bodemdalingssom, en zelfs het begintijdstip van bodemdaling worden louter uit de geodetische metingen bepaald.

Uitgaande van een ruimtelijke kinematische beschrijving van de bodemdalingssom lijkt het verleidelijk om een brug te slaan naar geomechanische predictiemodellen. Deze modellen zijn echter niet eenvoudig te parametriseren in een functiemodel voor geodetische metingen. Bovendien kan worden beredeneerd dat uit metingen op het aardoppervlak de geomechanische parameters van de ondergrond veelal niet onafhankelijk schatbaar zijn. Zo kunnen diverse combinaties van laagdikte, compactiecoëfficiënt en drukdaling in dezelfde compactie en dus bodemdaling resulteren. Wel lijkt het mogelijk om exploratiegegevens als (stochastische) a-priori data mee te nemen bij de schatting van een tijd-plaatsmodel. Een reden om daarvan juist af te zien is wellicht dat men de geodetische monitoring wenst te beschouwen als een geheel onafhankelijke controle van de voorspelde bodemdaling.

Verwerkingsstrategie

In combinatie met absolute deformatieanalyse werd tot enkele jaren geleden algemeen voor een stapsgewijze dataverwerking gekozen [De Heus et. al., 1995]. In de eerste stap, de *epochevereffening*, worden dan per epoche peilmerkhooften berekend uit

de waterpasmetingen, met behulp van modelvergelijkingen (1a), inclusief toetsing van de meetgegevens. In de tweede stap worden de referentiepunten getoetst op stabiliteit gedurende alle epochen. *Stabiliteitsanalyse* [De Heus et. al., 1994] is essentieel om geen verkeerde conclusies ten aanzien van bodembeweging te trekken ten gevolge van beweging in de referentiepunten. Met het toenemen van de omvang van het bodemdalinggebied en de duur van de te monitoren periode, kan deze stap bijzonder tijdrovend worden. Uiteindelijk worden de peilmerkhogten per epoche opnieuw berekend, waarbij de hoogten van stabiel bevonden referentiepunten in elke epoche worden vastgehouden. De eigenlijke (statische of kinematische) *deformatieanalyse* volgt dan op basis van deze aangesloten hoogten in stap drie, met behulp van de eerder genoemde iteratieve vereffenings- en toetsingsprocedure. De eerder genoemde SCAN-1Defo software werkte streng volgens deze stapsgewijze procedure.

Aansluitend bij relatieve deformatieanalyse is recentelijk software ontwikkeld waarmee de bodembeweging direct uit de metingen wordt geschat door integratie van vergelijkingen (1a), (1b) en (1c) tot:

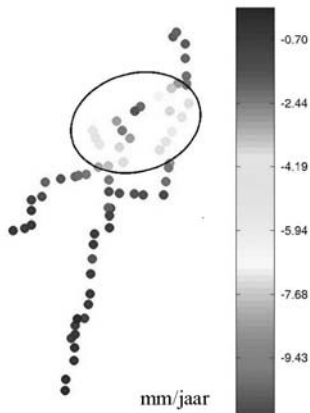
$$\underline{h}_{ij,t} = -\underline{H}_{i,t_0} - f(t - t_0, x_i, y_i, par) + \underline{H}_{j,t_0} + f(t - t_0, x_j, y_j, par) + \underline{e}_{ij,t}^* \quad (3)$$

De stochastische fout $\underline{e}_{ij,t}^*$ in (3) omvat nu zowel meet-, punt- als modelruis. Zonder

berekening van peilmerkhogten per epoche, en de daarmee gepaard gaande aanname van een hoogtereferentie, worden de parameters van een kinematisch deformatiemodel direct geschat uit alle beschikbare metingen op alle epochen. In de iteratieve vereffenings- en toetsingsprocedure van SUMO wordt niet alleen het bewegingsmodel vastgesteld, maar ook getoetst op meet- en identificatiefouten. De grote overtaligheid van het geïntegreerde model maakt scherpe toetsing van de data mogelijk, ook al hebben de waterpasnetwerken per epoche vaak een ijl karakter. Tot op heden kent deze elegante aanpak slechts één, betrekkelijk, nadeel: hoogten op discrete punten en tijdstippen kunnen slechts achteraf uit het model worden berekend. Maar voor het publiek is nu juist een beschrijving van de beweging per peilmerk als in figuur 4 een heel herkenbare visualisatie van bodemdaling.

Een stapsgewijze verwerkingsstrategie is zelfs onmogelijk indien gekozen wordt voor *strikt-kinematische* deformatieanalyse. De ordening van data in epochen (binnen een epoche hebben alle metingen hetzelfde tijdstip) wordt dan losgelaten. Elke waarneming heeft zijn eigen tijdstip en een epochevereffening is dus niet langer mogelijk. In gedachten moet u zich voorstellen dat alle in de tijd verrichte metingen op een hoop worden gegooid tot een kinematisch netwerk in plaats én tijd, waarin de peilmerken verondersteld worden te bewegen. De formules (1) en (3) blijven algemeen geldig, maar men kan wel op problemen met de schatbaarheid stuiten. Niet alleen de nulhoogten, maar ook de peilmerksnelheden kunnen immers slechts in relatieve zin worden bepaald. Deze aanpak heeft recentelijk geresulteerd in de KiMoNo-software waarmee uit alle beschikbare waterpassingen direct een bewegingssnelheid per peilmerk wordt geschat [De Bruijne en Kenselaar, 2001]. De Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat gebruikt deze software om uit historische waterpasdata de beweging van ondergrondse

peilmerken, en daarmee de diepe ondergrond van Nederland, in beeld te brengen. De periode waarin een nauwkeurigheidswaterpassing over heel Nederland wordt uitgevoerd is te lang (soms ruim 10 jaar) om uit te gaan van één tijdstip per epoche, en daarmee bewegingen binnen de periode te negeren. Toepassing op waterpasdata boven een klein gasveld levert het patroon van peilmerksnelheden op als in figuur 6,



Figuur 6. Individuele peilmerksnelheden boven een gasveld, uit strikt-kinematische schatting.

waarbij één peilmerk buiten de bodemdaling is vastgehouden.

Tot op heden wordt bij de kinematische modellering van bodembeweging gebruik gemaakt van deterministisch-parametriseerbare functies als tijdpolynomen en kommodellen, welke men (stapsgewijs of direct) uit de metingen tracht te bepalen. Dergelijke modellen zijn op zijn best slechts een 'in verwachting' goede benadering van de werkelijke, systematische bodembeweging. Dat de werkelijkheid zich niet perfect mathematisch laat modelleren wordt wel duidelijk uit de verschillen tussen voorspelde en gemeten bodemdaling.

Indien de discrepanties tussen de werkelijke, onbekende, bodemdaling door bijvoorbeeld gas- of zoutwinning en het aangenomen trendmodel stochastisch van karakter zijn, kunnen deze als modelruis in het kansmodel worden beschreven. Uit de kleinstekwadratenresiduen van de meetdata is dan, per peilmerk en epoche, een toeslag op het trendmodel te berekenen [Kenselaar en Quadvlieg, 2001]. Deze signaaltermen zijn belangrijk omdat ze nog steeds een deel zijn van de te beschrijven systematische bodembeweging, terwijl discrepanties ten gevolge van meet- en puntruïsniet aan de diepe gas- of zoutwinning kunnen worden toegeschreven. De gezochte bodembeweging wordt dan beschreven als de som van het trendmodel en de signaaltermen (zie ook figuren 9 en 10 in de bijdrage van Quadvlieg). Trend-siganaalanalyse wordt toegepast in de SUMO-software en berust in hoge mate op de aannamen voor modelruis in het kansmodel.

Verder onderzoek

Uit bovenstaande wordt duidelijk dat er de afgelopen tien jaar een behoorlijke ontwikkeling is geweest in de geodetische monitoring van bodembeweging. Met name op het gebied van data-analyse ten behoeve van geringe bodembeweging loopt Nederland voorop in de wereld. Klassieke optische waterpassing is tot op heden nog steeds de primaire meettechniek gebleven. Meer dan GPS lijkt InSAR echter een interessante, complementaire meettechniek te worden. Onderzoek hiernaar, en naar de integratie van InSAR-data en waterpasgegevens, verdient dan ook de aandacht. De recente discussies binnen de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie laten overigens zien dat het beschrijven van bodembeweging uit waterpasmetingen tussen bronzen boutjes ook nog minder eenvoudig is dan het op het eerste gezicht lijkt. Vrijwel alle onderwerpen uit het vakgebied der Mathematische Geodesie en Puntbepaling (coördinaatdefinitie, deterministische en stochastische modellering, toetsing, kansmodelschatting) komen daarbij aan de orde.

De trend wijst duidelijk richting relatieve deformatieanalyse en ruimtelijke modellering. Daarmee kunnen een aantal geconstateerde theoretische en praktische problemen bij de geodetische monitoring van bodembeweging worden ondervangen. Ruimtelijke modellering op basis van trend-signaalanalyse kan de kloof verkleinen tussen geomechanische predictie en geodetische monitoring. Een adequate modellering van punt- en modelruis is noodzakelijk voor deze aanpak, maar onze kennis hieromtrent is nog onvoldoende.

Referenties

- Bruijne, A.J.T. de, F. Kenselaar en F. Kleijer (2001). Kinematic deformation analysis of the first order benchmarks in The Netherlands. In: Proceedings 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, March 19-22.
- Heus, H.M. de, M.H.F. Martens, H.M.E. Verhoef (1994). Stability-analysis as part of the strategy for the analysis of the Groningen gasfield levellings. In: Proceedings Perlmutter Workshop on Dynamic Deformation Models, Aug. 29-Sept.1, Haifa, Israel, 14 p.
- Heus, H.M. de, P. Joosten, M.H.F. Martens, H.M.E. Verhoef (1995). Strategy for the analysis of the Groningen gas field levellings - an overview. In: Land Subsidence, proceedings IAHS Fifth International Symposium On Land Subsidence, The Hague (ISBN 0-947571-74-4), pp. 301-311.
- Heus, H.M. de, M.H.F. Martens, H. van der Marel (1999). Re-weighting of GPS baselines for vertical deformation analysis. Proceedings 22nd General Assembly IUGG, Birmingham.
- Houtenbos, A.P.E.M. (2000). The quantification of subsidence due to gas-extraction in the Netherlands. In: Land Subsidence, proceedings IAHS Sixth International Symposium On Land Subsidence, Italy (ISBN 88-87222-06-1), pp. 177-189.

- Houtenbos, A.P.E.M. en F. Kenselaar (2001). Peilmerk hoogtevariatiës, stochastische analyse van peilmerkbeweging in Nederland. TU Delft onderzoeksrapportage aan de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat.
- Kenselaar, F. en M.H.F. Martens (2000). Spatial-temporal modelling of land subsidence due to gas extraction. In: Land Subsidence, proceedings IAHS Sixth International Symposium On Land Subsidence (SISOLS), Italy (ISBN 88-87222-06-1), pp. 383-396.
- Kenselaar, F. en R.C.H. Quadvlieg (2001). Trend-signal modelling of land subsidence. In: Proceedings 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, March 19-22.
- Kenselaar, F. (2001). A testing procedure for subsidence analysis. In: Proceedings 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, March 19-22.
- Krijnen, H. en H.M. de Heus (1995). Application of GPS with sub-centimeter accuracy for subsidence monitoring. In: Barends, Brouwer & Schröder (eds.), Land Subsidence, proceedings IAHS Fifth International Symposium On Land Subsidence, pp. 333-344.
- Verhoef, H.M.E. en H.M. de Heus (1995). On the estimation of polynomial breakpoints in the subsidence of the Groningen gasfield survey. Survey Review, 255, pp. 17-30.

Geodetische toevalsnetwerken:

Ontwikkelingen in deformatiemetingen met satelliet-radarinterferometrie en de permanent-scatterers-methode

Dr.ir. R.F. Hanssen
TU Delft, Afdeling Geodesie

1. Introductie

Deformatiemetingen worden sinds geruime tijd ingezet voor het monitoren van verschillende soorten deformatieprocessen, zoals bodemdaling, gletsjerbeweging en tektonische en vulkanische deformatie. Alhoewel er een scala aan meettechnieken met een vast instrumentarium bestaat, zoals permanente hellings-, spannings- of lengteverschilmeters, beschouwen we hier voornamelijk de niet-continue metingen, uitgevoerd in beperkte campagnes en in een netwerkopzet, zoals waterpassing, elektronische afstandmeting en triangulatie.

Besproken zal worden hoe deze technieken zich verhouden tot moderne ruimtegeodetische technieken zoals GPS (Global Positioning System) en radarinterferometrie (InSAR). Hierbij wordt vooral ingegaan op de achtergronden van netwerkontwerp en de consequenties hiervan voor de uiteindelijke resultaten en kwaliteitsbeschrijving. In paragraaf 2 worden standaardgeodetische netwerken besproken. Uit recente ontwikkelingen in InSAR is gebleken dat meetwaarden van een beperkte set stabiele reflectoren, bekend als 'permanent scatterers', die inhomogeen verdeeld zijn op onvoorspelbare locaties, bruikbaar zijn om hoognauwkeurige deformatieparameters te schatten [4, 5]. Aangezien de positie van deze punten onvoorspelbaar is, vormen alle punten een netwerk dat gekenschetst kan worden als *toevalsnetwerk*. In paragraaf 3 worden de achtergronden van InSAR kort besproken, waarbij vooral wordt ingegaan op de parameters die de inzetbaarheid van de techniek voor een specifiek geval beïnvloeden. Dit wordt gevolgd door een discussie over permanent scatterers in paragraaf 4. In paragraaf 5 worden enkele belangrijke punten samengevat.

2. Geodetisch netwerkontwerp

Het concept van de gecontroleerde optimalisatie is kenmerkend voor het ontwerp en de analyse van geodetische netwerken. Een nauwgezet ontwerp van het netwerk maakt vereffenings- en toetsingsprocedures mogelijk, die leiden tot aanvaardbare precisie en betrouwbaarheid van de geschatte parameters, tegen aanvaardbare kosten [8, 2, 3, 1]. Een belangrijke, maar vaak onderbelichte voorwaarde voor een succesvol netwerkontwerp is de beschikbaarheid van a-priori-informatie of aannamen over de fysica van het deformatieproces. Deze informatie wordt voornamelijk gebruikt om te komen tot een

optimale parametrisatie van het probleem voor wat betreft robuustheid, gevoeligheid en een minimaal maar toereikend aantal onafhankelijke parameters. Wanneer een verscheidenheid aan meettechnieken beschikbaar is, kan de vooraf bepaalde set van parameters worden gerelateerd aan de precisie en de eigenschappen van deze techniek om via een optimaal ontworpen netwerk de inwendige betrouwbaarheid en de precisie en betrouwbaarheid van de parameters te bepalen.

In de praktijk houdt het ontwerpen van een netwerk in dat de fysieke meetpunten optimaal geïncorporeerd moeten worden in relatie tot het te verwachten deformatiepatroon. Hierbij moet worden gedacht aan de ruimtelijke omvang van het deformatiepatroon, maar ook aan de te verwachten ruimtelijke variabiliteit in verband met de bemonsteringsdichtheid en de relatieve positie van de punten binnen het netwerk. Deze beslissingen zijn direct bepalend voor de ontwerpmatrix van het vereffeningsprobleem. Een suboptimaal netwerkontwerp leidt tot rangdefecten en schattingsproblemen, die een juiste interpretatie van de metingen in de weg staan. In de tweede plaats moet een beslissing worden genomen over de herhalingsfrequentie van de meetcampagnes. Een herhalingsfrequentie die te laag is, temporele onderbemonstering, kan leiden tot het ontstaan van een kunstmatig signaal, een effect bekend als 'aliasing'. Een te hoge temporele bemonstering leidt tot een ongewenste toename in de meetkosten, zonder dat dit noodzakelijkerwijs leidt tot betere schatting. In deze overwegingen zit een paradox: om een netwerk en een meetstrategie te ontwerpen om deformatieoptimaal te monitoren, moet deze deformatie al bij voorbaat bekend zijn!

De belangrijkste praktische consequenties van de aanpak van het netwerkontwerp zijn: (i) de noodzaak tot het installeren van permanente kunstmatige meetpunten, (ii) de beperking in de ruimtelijke dichtheid van deze meetpunten als gevolg van praktische en financiële overwegingen, (iii) een meetcampagne die qua uitvoering te lang kan duren in vergelijking met de deformatiesnelheid, in het bijzonder voor arbeidsintensieve methoden zoals waterpassing, en (iv) de noodzaak voor een nulmeting die kan worden gebruikt als referentie voor de deformatieanalyse. Het is evident dat deformaties die plaatsvonden voor de nulmeting niet kunnen worden bepaald. Hierdoor blijven deformaties die niet werden verwacht buiten beschouwing, net als deformaties die vanuit economisch, veiligheids of wetenschappelijk oogpunt minder belangrijk worden geacht. Lokale afwijkingen binnen een deformatiepatroon blijven vaak onopgemerkt. Wanneer een meetpunt binnen zo'n gebied met een afwijkend patroon ligt, zal de schatting van het ruimere patroon een systematische afwijking geven of, in het beste geval, worden verworpen in de toetsing.

De afhankelijkheid van permanente meetpunten, de 'benchmarks', leidt dus tot een belangrijke beperking in de optimalisatie en het onderhoud van geodetische netwerken. De fysieke aard van meetpunten, bijvoorbeeld de bouten voor waterpassingen of de pijlers voor GPS-ontvangers en theodolieten, beperken het aantal mogelijke locaties. Voor waterpasmetingen zijn stabiele (onderheide) gebouwen of infrastructurele werken nodig, terwijl GPS-satellieten onder een lage elevatie dienen te worden gemeten voor nauwkeurige meetresultaten. Daarnaast verdwijnt jaarlijks vaak ook een aanzienlijk

deel van de meetbouts ten gevolge van veranderende infrastructuur. Vaak zorgen deze praktische beperkingen in combinatie met financiële overwegingen voor een behoorlijke limitatie in de analyse van deformatiemetingen.

Door gebruik te maken van een speciale verwerkingsmethodiek van satellietradargegevens, kunnen onder bepaalde omstandigheden een aantal van de bovengeschetste problemen worden voorkomen door gebruik te maken van een set van door toeval gevonden en non-interveniërende kunstmatige meetpunten. Deze aanpak, 'permanent scatterers' genaamd, is vergelijkbaar met een Monte Carlo-methode, waarbij waarden willekeurig worden getrokken uit een bepaalde kansdichtheidsfunctie. Voordat we deze toepassing verder zullen bespreken volgt hier eerst een korte samenvatting van de conventionele toepassing van satelliet-radarinterferometrie voor deformatiemetingen.

3. InSAR conventionele aanpak

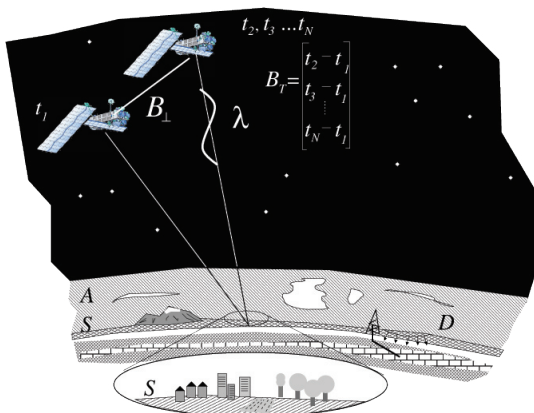
De introductie van de beeldvormende radar kan worden gezien als een van de meest spectaculaire ontwikkelingen in de remote sensing sinds de jaren 1960. Hierdoor werd een breed scala van toepassingsgebieden in de geowetenschappen en de astronomie geopend en werd een alternatief gevonden voor de traditionele optische methoden, die belichting door de zon en wolkenvrije omstandigheden nodig hadden. Beeldvormende radar werd mogelijk gemaakt door het concept van de synthetische apertuur: het kunstmatig vergroten van de afmetingen van de radarantenne om hiermee hoge resoluties te behalen. De afstanden, afgeleid uit tijdmetingen, worden gemeten vanuit het referentiesysteem van de satelliet en kunnen worden gebruikt om de gemeten reflectiewaarden in een grid of beeld te representeren. Aangezien de radar geen hoekmetingen kan uitvoeren kan dit beeld niet direct worden gebruikt om bijvoorbeeld topografie te meten. Wanneer echter twee radaropnamen worden gebruikt en het principe van multiplicatieve interferometrie wordt toegepast op de complexe waarden van het radarsignaal, kunnen zowel afstanden als hoeken nauwkeurig worden afgeleid waardoor hoogtemetingen mogelijk worden. Vanuit een satelliet kan deze techniek, bekend als Interferometrische Synthetische Apertuur Radar (InSAR), worden gebruikt om metingen te verrichten in willekeurige gebieden op aarde met een typische herhalingsfrequentie van een beeld per maand. De basismetgrootte in de combinaties van beelden zijn faseverschillen. De interferometrische beelden worden interferogrammen genoemd.

Temporele veranderingen in de afstand satelliet - aarde, zoals bijvoorbeeld veroorzaakt door deformaties zoals bodemdaling, tektoniek, vulkaan- of gletsjerbeweging, kunnen ook worden gemeten met nauwkeurigheden vanaf het subcentimeterniveau. Twee belangrijke groepen parameters, de ontwerp- en de omgevingsparameters, zijn van invloed op de potentiële toepassingen en de beperkingen van de techniek. Voor een diepgaander overzicht in de techniek kan worden verwezen naar bijvoorbeeld [9, 7] en de daarin genoemde referenties. Figuur 1 is een schets van de interferometrische geometrie met haar relatie tot de belangrijkste parameters. De belangrijkste ontwerpparameters zijn de radargolfenlengte λ (3 - 24 cm), de loodrechte basislijn B_{\perp} (de effectieve

afstand tussen de twee satellieten), de temporele basislijn B_T (het tijdsinterval tussen de radaropnamen) en het totale aantal radaropnamen N . De omgevingsparameters zijn de aardse atmosfeer A , het aardoppervlak S en de eigenschappen van de deformatie D .

De radargolflengte λ is belangrijk omdat de component van de deformatievector in de richting van de satelliet wordt gemeten als fractie van de (halve) golflengte. Afhankelijk van het signaal-ruisniveau van de radar wordt de nauwkeurigheid van de fasemeting direct vertaald naar de nauwkeurigheid van de gemeten deformatie. Een standaardafwijking van 15 graden in de fasemeting leidt dus bij een golflengte van 56 mm tot een standaardafwijking van 1,2 mm in de deformatiemeting. Een radar met een korte golflengte en een hoge signaal-ruisverhouding lijkt dus optimaal. Hierbij moet echter rekening worden gehouden dat korte golflengten (bijvoorbeeld 3 cm) ook verstrooid worden door kleine objecten op aarde, bijvoorbeeld door bladeren aan bomen. De willekeurige veranderingen van objecten van deze dimensies in de tijd verstoren de analyse van het fasesignaal. Om deze reden wordt vaak een wat langere golflengte zoals 5,6 en 24 cm geprefereerd. Een golflengte van 24 cm wordt voornamelijk verstrooid door grotere objecten, waardoor deze door het bladerdak van bomen heen dringt en dichterbij de grond wordt verstrooid. Statistisch gezien is de variatie in de tijd van deze grotere objecten kleiner, waardoor de verstoring van het fasesignaal beperkt is. Golflengten groter dan 24 cm zijn minder geschikt vanwege hun gevoeligheid voor radiogolfinterferentie en ionosferische verstoringen.

De lengte van de loodrechte basislijn B_\perp bepaalt de interferometrische geometrie (zie figuur 1). Hierdoor wordt de gevoeligheid voor topografische hoogteverschillen geïntroduceerd. Afhankelijk van de radargolflengte en de terreinhelling varieert de absolute lengte tussen 0 m, waarbij de configuratie ongevoelig is voor topografische hoogte, en 1 - 2 km, waarbij er een zeer sterke invloed van de topografie op de fasewaarden



Figuur 1. De belangrijkste parameters die van invloed zijn op de inzetbaarheid van satelliet-radarinterferometrie voor deformatiemetingen: de loodrechte basislijn B_\perp , de temporele basislijn B_T , de radargolflengte λ , de tijdstippen van opname t_i , de atmosfeer A , het aardoppervlak S en de deformatie-eigenschappen D .

is. Idealiter worden deformatiemetingen uitgevoerd met een basislijn van nul meter, waardoor alle invloed van topografie uit het signaal verwijderd is. Helaas vertonen satellietbanen een drift ten opzichte van hun nominale banen, waardoor de basislijn in het algemeen ongelijk aan nul zal zijn. Externe topografische informatie (DEM's) of DEM's afgeleid uit InSAR-metingen zonder deformatiesignaal worden in deze gevallen gebruikt om de topografische invloed uit de deformatiemetingen te elimineren. Een additioneel ongewenst effect van de basislijn is, dat faseruis wordt geïntroduceerd proportioneel aan de basislijnlengthe.

Een derde ontwerpparameter is de temporele basislijn B_T ; een veelvoud van de herhalingsstijd ΔT (zie tabel 1) van de satellietbaan en afhankelijk van de acquisitieplanning. De acquisitieplanning wordt gestuurd door het energieverbruik van de radar en het gebruik van mogelijke conflicterende andere instrumenten aan boord van de satelliet. De temporele basislijn dient lang genoeg te zijn om de verwachte deformatie te kunnen detecteren, maar niet te lang aangezien de ruis in de beelden meestal proportioneel toeneemt met het tijdsinterval. De redenen hiervoor worden hieronder verder beschreven.

Missie	start - eind	T (dagen)	λ (cm)
ERS-1	1991 - 2000	35(3)	5,6
ERS-2	1995 -	35	5,6
ERS-1/ERS-2	1995 - 1996	1	5,6
JERS	1992 - 1998	44	23,6
Radarsat	1995 -	24	5,6
Envisat	2002 -	35	5,6

Tabel 1. Overzicht van de satelliet-InSAR-missies die gebruikt kunnen worden voor deformatiemetingen, met duur van de missie, de herhalingsfrequentie en de golflengte.

Tenslotte is het totale aantal beschikbare radaropnamen N van belang, aangezien de beschikbaarheid van veel beelden alternatieve wijzen mogelijk maakt om individuele pixels met een hoge kwaliteit te kunnen herkennen temidden van de ruis, zoals beschreven in de volgende paragraaf. Bovendien wordt met veel beelden de ratio tussen het deformatiesignaal en het atmosfeersignaal gunstiger.

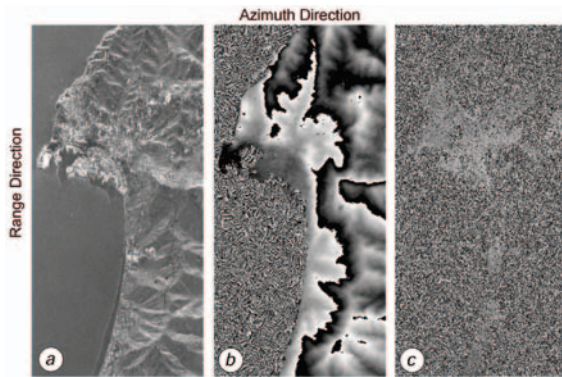
De tweede groep van parameters bestaat uit de omgevingsinvloeden ten tijde van de radaropname: atmosfeer, deformatie-eigenschappen en het landoppervlak. Alhoewel radargolven niet worden tegengehouden door wolken, worden ze wel inhomogeen vertraagd, wat resulteert in spatieel gecorreleerde fouten in de afstandmetingen. De mate van verstoring is afhankelijk van de klimaatomstandigheden en de lokale weersituatie ten tijde van de opname. Weersverschijnselen zoals regen, convectieve bewol-

king en fronten resulteren vaak in significante fouten, oplopend tot enkele centimeters [7]. Aangezien een potentieel deformatiesignaal relatief wordt gemeten tussen punten in het beeld zal een grotere afstand tussen de punten leiden tot een grotere atmosferische fout A in de deformatiemeting

De verwachte eigenschappen van het deformatiesignaal D dienen te worden meegenomen wanneer de inzetbaarheid van InSAR wordt overwogen. Fouten in de satellietbanen resulteren in langgolelige trends in de interferogrammen, terwijl het atmosfeersignaal leidt tot een 'gladde' fasevariatie over verschillende schalen. Het deformatiesignaal met vergelijkbare eigenschappen, zowel ruimtelijk als qua magnitude, is moeilijk te onderscheiden van de verstoringen. Bij interferometrische analyses die slechts gebruik maken van twee beelden, worden hierdoor bijvoorbeeld aardgetijden en langzame en ruimtelijk uitgestrekte bodemdaling zeer moeilijk te meten. De kinematische eigenschappen van de deformatie spelen een belangrijke rol: een plotselinge deformatie veroorzaakt door een aardbeving is vele malen makkelijker af te leiden dan tektonisch kruipgedrag, alhoewel de methodologie voor het analyseren van dit laatste fenomeen al is ontwikkeld. Tenslotte dienen de ruimtelijke deformatiegradiënten tussen naburige pixels in het beeld kleiner te zijn dan de radargolflengte.

Verreweg de belangrijkste omgevingsparameter is het verstrooiende oppervlak S van de aarde. Het afleiden van deformatie uit interferometrische metingen is slechts mogelijk wanneer er sprake is van coherente verstrooiing. Dit betekent dat voor elk interferogram de fase-informatie alleen afhankelijk mag zijn van de geometrie. Met andere woorden, in de tijd variërende verstrooiingseigenschappen binnen een resolutiecel dienen te worden vermeden. Deze beperking maakt bijvoorbeeld water onbruikbaar voor interferometrie, aangezien de vorm van het wateroppervlak al binnen een seconde te sterk verandert. Voor temporele basislijnen van meerdere weken worden door hetzelfde principe ook veel landbouwgebieden en gebieden met een sterke vegetatie uitgesloten. Ook gebieden waar veel menselijke activiteit waarneembaar is, bijvoorbeeld bij het bouwen of slopen van gebouwen of infrastructuur, zijn in het algemeen onbruikbaar. De mate waarin deze interferometrische correlatie aanwezig is, wordt uitgedrukt in de coherentie.

Een hoogcoherent-interferogram resulteert in een glad fasepatroon: er is in dat geval een sterke ruimtelijke correlatie tussen de modulo- 2π -fasewaarden (zie figuur 2b). Gebieden met een lage coherentie resulteren in een ruzig fasebeeld (zie figuur 2c). Aangezien de coherentie een belangrijke kwaliteitsmaat voor het interferogram is, variërend over het beeld, dient deze per pixel te worden geschat. In een ideale situatie zijn herhaalde metingen onder identieke omstandigheden nodig om de coherentie per pixel te schatten. Dit is echter in de conventionele interferometrische aanpak niet mogelijk aangezien slechts twee beelden worden gebruikt waaruit een interferogram wordt berekend. Hierdoor is er geen overtaligheid in de interferometrische metingen per pixel en kan de coherentie niet worden geschat. Als benadering wordt in plaats hiervan de coherentie uit een groep waarnemingen rondom een pixel bepaald, onder de aanname van ergodiciteit. Deze aanname is in veel gevallen bruikbaar, voornamelijk wanneer



Figuur 2. Interferometrische radarbeelden van Ancona, Italië, uit Hanssen en Ferretti (2002). (a) ERS SAR-magnitudebeeld. (b) Hoogcoherent-interferogram afgeleid uit een ERS-tandembaar: twee acquisities met een tussentijd van 24 uur. De fasecycli komen direct overeen met de locale topografie. (c) Laagcoherent-interferogram van hetzelfde gebied. De loodrechte basislijn is kort (< 10 m), maar de temporele basislijn is langer dan 1 jaar. Interferometrische metingen zijn niet mogelijk wanneer de locale verstrooiing van het terrein te veel verandert in de tijd.

de eigenschappen van het terrein homogeen zijn en korte temporele basislijnen worden gebruikt. Desalniettemin is de aanname zeker niet juist bij interferogrammen met lokaal sterk variërende verstrooiingseigenschappen. Hierdoor zijn veel interferogrammen met lange temporele basislijnen vaak aanzienlijk gedecorreleerd, voornamelijk in gebieden met vegetatie. Gebouwen, blootliggende rots of infrastructurele werken behouden vaak hun verstrooiingseigenschappen over lange tijdsintervallen en onder variabele opnamegeometrieën. Herkenning van dit soort punten, vaak een enkele pixel temidden van ruis, is zeer moeilijk wanneer slechts een beperkt aantal beelden beschikbaar is. Wanneer meerdere beelden beschikbaar zijn, kan een oplossing voor dit herkenningsprobleem worden gevonden door een stapeling van beelden te maken. Deze aanpak wordt gehanteerd bij de permanent-scatterers-methode en wordt besproken in de volgende paragraaf.

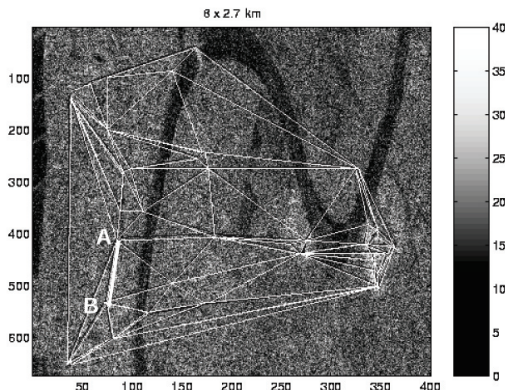
4. InSAR-permanent-scatterers-methode

De permanent-scatterers-methode (PS) is ontwikkeld om geïsoleerde coherente pixels te herkennen en om het probleem van atmosferfouten op te lossen. De prijs die hiervoor betaald wordt, is dat een groot aantal beelden (meer dan 30), pixel voor pixel, moet worden verwerkt [5]. Puntdoelen die niet worden beïnvloed door temporele decorrelatie worden herkend door middel van een statistische analyse van hun amplitude in de gehele set radarbeelden. De statistische verdeling van de amplitudewaarden per pixel in de gehele gecoregistreerde set SAR-beelden wordt gebruikt om potentiële permanent scatterers te identificeren. Deze selectie vindt plaats onder de aanname dat pixels met

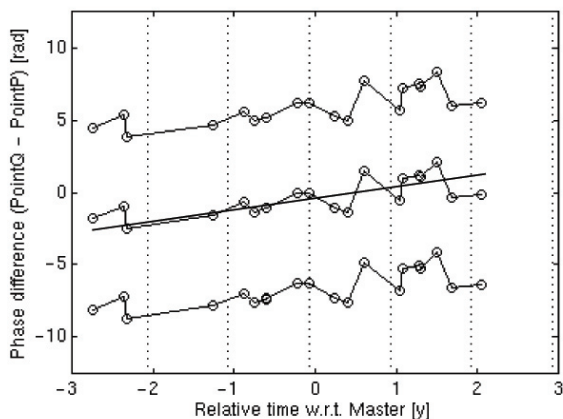
PS-eigenschappen een minimale verandering in amplitude hebben, waardoor hun variatie laag is. Pixels die sterk variëren in amplitude zijn hoogstwaarschijnlijk ook niet stabiel in fase. De invloed van topografie, deformatie en atmosfeer kan met behulp van een iteratieve kleinstekwadratenvereffening worden geschat door zorgvuldig gebruik te maken van het verschil in hun ruimtelijke en temporele gedrag. Zo is het atmosferisch signaal ruimtelijk sterk gecorreleerd, terwijl het in de tijd nagenoeg ongecorrleerd is. Topografie is constant in de tijd en schaal met de loodrechte basislijn. Deformatie tenslotte is vaak sterk gecorreleerd in de tijd, op breukpunten na, en afhankelijk van het type deformatie ook in meer of mindere mate in ruimtelijke zin.

De combinatie van alle geïdentificeerde permanent scatterers is vergelijkbaar met een standaard geodetisch netwerk (zie figuur 3), alhoewel de posities van deze punten door het toeval worden bepaald en onvoorspelbaar en niet te optimaliseren zijn. Desalniettemin, alhoewel voor stedelijke gebieden slechts tussen de 0,5 en 2,5 procent van het totale aantal punten kan worden gebruikt, correspondeert dit met tussen de 50 en 400 punten per vierkante kilometer. Dit is veel meer dan de gemiddelde punt dichtheid bij typische waterpassings- of GPS-metingen, waardoor optimaliseren minder belangrijk is dan in een standaard geodetisch netwerk ontwerp. De nauwkeurigheid van de permanent-scatterer-deformatiemetingen is in bepaalde gevallen beter dan 0,1 mm per jaar. De hoge herhalingsfrequentie van nieuwe satellietbeelden leidt tot een tijdige identificatie van een veranderend deformatiepatroon. Dit is bijvoorbeeld belangrijk bij het monitoren van de stabiliteit van individuele gebouwen.

Alhoewel de verzameling van geïdentificeerde permanent scatterers kan worden gezien als een geodetisch toevalnetwerk, zijn er ook belangrijke verschillen. Zo ontbreekt de sluitfout zoals bekend uit waterpasnetwerken. Dit wordt veroorzaakt doordat waterpassingen hoogteverschilmetingen zijn die in een waterpaskring gesommeerd worden.



Figuur 3. Eerste selectie pixels (permanent scatterers) met een signaal-ruisverhouding hoger dan 50, georganiseerd in een netwerk van basislijnen. Ondergrond vormt het gemiddelde amplitudebeeld 20 interferogrammen van Hangu, China. Bij een groter aantal beelden wordt de detectiedrempel van stabiele reflectoren lager, waardoor een hogere punt dichtheid kan worden bereikt.



Figuur 4. Deformatie van zijde AB in figuur 3 met een lengte van 530 m. De fasewaarnemingen zijn gerepresenteerd in drie ambiguïteitsmogelijkheden. De geschatte lineaire deformatie bedraagt 3 mm per jaar.

Hierdoor stapelen meetfouten zich op en dient er vereffend te worden, wat meteen een controle op de metingen vormt. De permanent-scatterers-netwerken zijn in feite kinematische deformatiemetingen, waarbij per punt een deformatiegedrag in de tijd wordt geschat. Ruimtelijk gezien zijn de metingen vergelijkbaar met hoogte- in plaats van hoogteverschilmetingen. De hoogteverschillen zijn afgeleide grootheden van de hoogten en daarom ook niet te vereffenen of te toetsen in kringmetingen.

Hier volgt een kort overzicht van de voor- en nadelen van de permanent-scatterers-methode. Voordelen zijn onder andere: (i) de grote punt dichtheid in stedelijke gebieden, (ii) de instantane waarnemingsgreep, (iii) de hoge potentiële nauwkeurigheid van geschatte deformaties, (iv) het grote archief van data, vanaf 1991, (v) de hoge herhalingsfrequentie, die leidt tot gevoeligheid voor bijvoorbeeld seizoensinvloeden, selectieve wateronttrekking, etc, (vi) de potentiële monitorfunctie: ook wanneer er niks deformeert of verzakt kan dat aangetoond worden (dit is belangrijk bijvoorbeeld in relatie met juridische aspecten), en (vii) de relatief lage kosten per radaropname. De nadelen zijn onder andere: (i) de onzekerheid van de serievoortzetting in verband met de beperkte levensduur van de satelliet, (ii) de beperking in de omvang van het gebied, (iii) succes is niet bij voorbaat verzekerd en dient van geval tot geval te worden bekeken, (iv) de beperking tot gebieden met een behoorlijke dichtheid van infrastructuur of lage vegetatiegraad, (v) de afhankelijkheid van een minimum aantal beelden (dit wordt niet overal ter wereld gehaald), en (iv) de rekentechnische aspecten.

Onderzoeksonderwerpen die kunnen worden geïdentificeerd zijn onder meer (a) het kwantitatief beschrijven van de precisie en betrouwbaarheid van de resultaten, (b) het oplossen van de faseambiguïteiten en het kwantitatief beschrijven van de kwaliteit van de oplossing, bijvoorbeeld met integer kleinste kwadratenmethoden, (c) het opzetten van een toetsingsmethodiek om fouten of afwijkingen in het model (en dus het

deformatiegedrag) automatisch te detecteren, (d) het uitbreiden van de techniek voor grotere gebieden, waardoor onder andere atmosfeerschatting moeilijker wordt, (e) het uitbreiden van de toepassingen naar gebieden met een lagere dichtheid van stabiele reflectoren en het analyseren van dit type geïsoleerde reflectoren, (f) de aanscherping van het model voor verdwijnende en bijkomende reflectoren, (g) het doorzetten van de ERS-1- en ERS-2-tijdserie met ENVISAT-data, in principe mogelijk voor een selecte set punten, (h) het optimaliseren van rekenmethoden voor grote datahoeveelheden, en (i) het integreren van de radarmetingen met alternatieve en complementaire technieken.

5. Discussie

De definitie van geodetische netwerken zou kunnen worden uitgebreid met *toevalsnetwerken*, netwerken van meetpunten die op onvoorspelbare locaties worden gekozen. Alhoewel dit concept nieuw is in de geodesie, is het statistisch vergelijkbaar met de bekende Monte Carlo-methoden. De inzetbaarheid van deformatie-monitoring met behulp van satelliet-radarinterferometrie en de permanent-scatterers-methode kan redelijk snel worden nagegaan door een beperkt aantal parameters te evalueren. De ontwerpparameters zoals de loodrechte en temporele basislijnen, de radargolfenlengte en het totale aantal beelden (belangrijk voor de permanent-scatterers-methode) kunnen eenvoudig worden verkregen uit de overzichtsbestanden van data zoals deze door de diverse ruimtevaartorganisaties beschikbaar worden gesteld. De omgevingseigenschappen, zoals atmosfeer, oppervlakedecorrelatie en de verwachte deformatie-eigenschappen zijn moeilijker te voorspellen en worden dan ook stochastisch gemodelleerd. Voorstellen voor InSAR-satellietmissies toegesneden voor deformatiemetingen worden momenteel geëvalueerd door de grote ruimtevaartorganisaties.

Referenties

1. J.E. Alberda. Planning and optimization of networks: some general considerations. *Bolletino di Geodesia e Scienze Affini*, 2: 209-240, 1974.
2. W. Baarda. Statistical concepts in geodesy. Volume 4 of Publications on Geodesy. Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1967.
3. W. Baarda. A testing procedure for use in geodetic networks. Volume 5 of Publications on Geodesy. Netherlands Geodetic Commission, Delft, 2 edition, 1968.
4. A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212, September 2000.
5. A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20, January 2001.
6. R. Hanssen and A. Ferretti. Deformation monitoring by satellite radar interferometry: Design parameters and environmental factors affecting feasibility. *GIM International*, 16(9): 27-31, September 2002.

7. R.F. Hanssen. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
8. F.R. Helmert. Studien über rationelle Vermessungen im Gebiete der höheren Geodäsie. Zeitschrift für Mathematik und Physik, 13(73), 1868.
9. P. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughin, F.K. Li, S. Madsen, E. Rodriguez and R. Goldstein. Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, 88(3):333-382, March 2000.

Modelleren van bodemdaling bij zoutwinning

Ir. A.J.H. Mensen, Ingenieursbureau 'Oranjewoud' b.v.

Ir. W. A. Paar, Akzo Nobel Salt b.v.

Inleiding

Zoutwinning in Nederland vindt plaats door middel van oplosmijnbouw. Bij het optreden van bodemdaling boven een caverne - of een boorterrein - wordt onderscheid gemaakt tussen komvormige en trogvormige bodemdaling. Bij extreme trogvorming kan een 'sinkhole' gevormd worden.

Komvormige bodemdaling ontstaat door verkorting van de pijlers tussen cavernes als gevolg van de kruip van zout. Trogvormige bodemdaling en sinkhole-vorming ontstaan als gevolg van het mechanisch bezwijken van het dakgesteente boven een caverne en de daarop volgende migratie van de holruimte.

Welk type bodemdaling optreedt is afhankelijk van de geologie in de diepe ondergrond, onder meer van het type afzetting (zoutpijler of zoutlaag), van de eigenschappen van het zout, van het dakgesteente en van het dekterrein en van de specifieke kenmerken van een holruimte.

Op last van Staatstoezicht op de Mijnen worden regelmatig deformatiemetingen uitgevoerd. In de regel wordt hiervoor secundaire optische waterpassing gebruikt; in uitzonderingsgevallen worden lengtemetingen uitgevoerd. In de loop van meer dan veertig jaar is een omvangrijke database met hoogtegegevens opgebouwd. De beschikbare informatie wordt gebruikt voor de analyse van de bodemdaling aan het maaiveld.

Op basis hiervan kan een kosteneffectief scenario voor de uitvoering van deformatiemetingen ontwikkeld worden en kunnen voorspellingen gedaan worden over de toekomstige bodemdaling. Daarbij wordt geologische en geomechanische kennis van de (diepe) ondergrond gecombineerd met geodetische informatie die aan het maaiveld verkregen is.

Het eerste deel van deze bijdrage beschrijft de toepassing van de geodetische deformatieanalyse op de ontwikkeling van komvormige bodemdaling op de boorterreinen van Akzo Nobel Salt b.v. in Zuidwending en Heiligerlee (Groningen). Met behulp van de voorgestelde methodiek kan het tijdstip van de volgende waterpassing worden bepaald. Bovendien kan een verwachting over de ontwikkeling van de bodemdaling uitgesproken worden.

In het tweede deel van de bijdrage wordt ingegaan op bodemdaling ten gevolge van het bezwijken van het dakgesteente boven een holruimte in de gelaagde zoutafzetting van het boorterrein te Hengelo (Overijssel). Met behulp van de classificatie van cavernes en van de nauwkeurige analyse van de bodemdaling over de tijd kan een 'risicoprofiel' voor een caverne opgesteld worden. Hierop kan de uit te voeren meetinspanning in

termen van methode, omvang en frequentie van de deformatiemeting voor het gehele boorterrein afgestemd worden. Eveneens kan een prognose gemaakt worden voor de verwachte ontwikkeling van de bodemdaling.

Monitoring van bodemdaling op basis van geodetische deformatieanalyse

Inleiding

Het concessiegebied Adolf van Nassau en Uitbreiding is al ruim dertig jaar in gebruik voor de exploitatie van zout. De zoutwinning vindt plaats in twee clusters van acht respectievelijk elf boringen nabij de dorpen Zuidwending en Heiligerlee.

De winning vindt op een gecontroleerde manier plaats, hetgeen te zien is aan de regelmatige vorm van de ontstane ondergrondse holruimten. De holruimten zijn cilindervormig en liggen op een diepte tussen 500 en 1500 meter onder het maaiveld, met een maximale diameter van 125 meter.

De 'diepe' winning in combinatie met een continue zoutproductie door de jaren heen levert een beperkte komvormige bodemdaling aan het maaiveld op. Deze bodemdaling is met uitzondering van de beginjaren altijd tweejaarlijks gecontroleerd door middel van waterpassingen.

In het gebied wordt naast zout eveneens gas gewonnen. Deze winning vindt plaats op een diepte van circa drie kilometer onder het maaiveld vanuit de velden Slochteren en Annerveen. Daarnaast heeft Akzo Nobel vanaf de start van de zoutwinning in dit gebied water gewonnen uit de ondiepe ondergrond, variërend van circa 30 tot 150 meter onder het maaiveld. Dit water werd gebruikt ten behoeve van het oplossen van het zoutgesteente bij de winning. Er werd water gewonnen uit enkele tientallen waterputten verspreid over twee gebieden Kibbelgaarn en Heiligerlee. Medio jaren 1990 is deze waterwinning gestaakt. Tegenwoordig wordt oppervlaktewater uit het nabij gelegen Winschoterdiep gebruikt.

Gedurende de gehele winningsperiode vond periodiek registratie plaats van de hoogteveranderingen van de meetpunten door middel van waterpassing. De gemeten hoogteverschillen werden naast de zoutwinning voor een deel door gaswinning, waterwinning en natuurlijke bodemdaling veroorzaakt.

Aangezien Akzo Nobel slechts aansprakelijk is voor de bodemdaling die daadwerkelijk door 'eigen' zoutwinning wordt veroorzaakt (en daarnaast ook de waterwinning), ontstond de behoefte om de componenten van bodemdaling van elkaar te scheiden. Vervolgens diende er bij het vaststellen van de bijdrage door zoutwinning aan bodemdaling een heroverweging plaats te vinden van de omvang en frequentie van de waterpassingen.

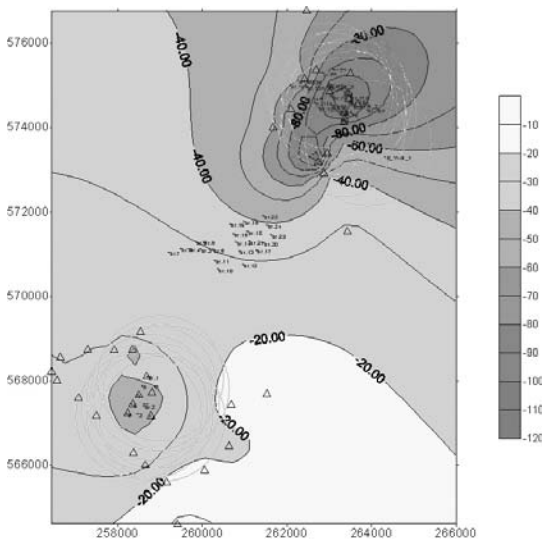
De aldus geformuleerde doelstelling luidde: 'optimaliseer de frequentie en omvang van de deformatiemeting op basis van inzicht in de bijdrage door zoutwinning aan de bodemdaling'.

Methode

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' b.v. heeft een methode ontwikkeld waarmee bovenstaande probleemstelling wordt opgelost. Een belangrijk deel van deze methode wordt gevormd door de theorie van de geodetische deformatieanalyse [1]. De methode is opgebouwd uit meerdere stappen.

De eerste stap bestaat uit een tijdcorrectie per epoche. De meetsessies zijn in de loop der jaren telkens aangesloten op stabiele peilmerken van de NAM. Op basis van de gepubliceerde hoogten van deze peilmerken zijn de netwerken vereffend en getoetst. De berekende NAP-hoogten van het Akzo Nobel-netwerk dienen echter 'teruggezet' te worden op het tijdstip van de NAM-meting. Het gevolg van deze bewerking is de eliminatie van de tijdsprong tussen de metingen van de NAM en Akzo Nobel.

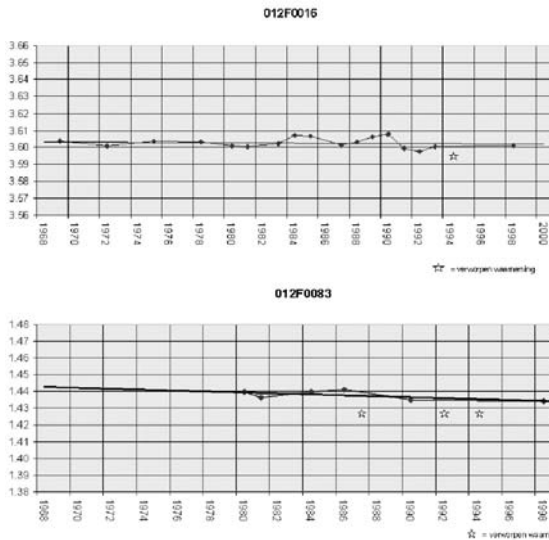
Vervolgens worden in stap twee alle 'Akzo Nobel-hoogten' gezuiverd op de bijdrage door gaswinning door toepassing van het kommodel van de NAM. De correctie van de data betekent slechts een globale correctie op de gaswinning. In figuur 1 is het resultaat van deze stap te zien. De twee zoutwinningsgebieden zijn te herkennen aan de clusters van cirkels. Te constateren valt dat de nu ontstane globale kom in het noordoostelijke gebied (Heiligerlee) 'dieper' is dan de zuidwestelijke kom (Zuidwending). In deze kommen is de bijdrage van zout- en waterwinning, natuurlijke bodemdaling en een restbijdrage door gaswinning aanwezig.



Figuur 1. Bodemdaling tussen 1969 en 1998 exclusief gaswinning (volgens kommodel NAM).

In de derde stap worden referentiepunten geselecteerd die regelmatig verspreid rond de beide zoutwinningsgebieden gelegen zijn en niet onder invloed van de waterwinningsgebieden Kibbelgaarn en Heiligerlee liggen. Naast de ligging van deze punten is een 'lange' meetreeks eveneens een voorwaarde voor selectie. De referentiepunten wor-

den gebruikt om de effecten van gaswinning en natuurlijke bodemdaling optimaal te kunnen reduceren. Deze referentiepunten worden vóór gebruik, getoetst op stabiliteit [1]. In figuur 2 zijn voorbeelden te zien van respectievelijk een aangenomen en een verworpen referentiepunt.

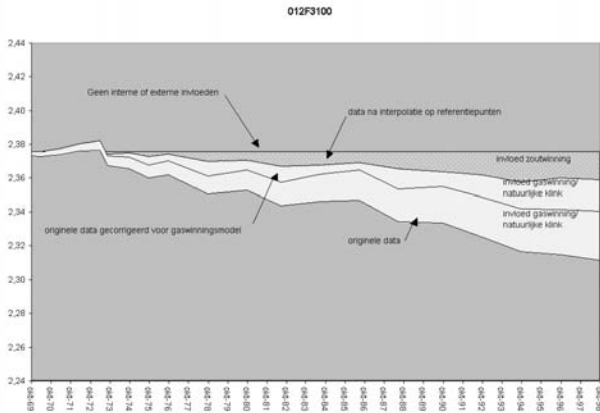


Figuur 2. Toetsresultaten van een aangenomen (boven) en een verworpen (onder) referentiepunt.

De stabiele referentiepunten (uit stap drie) worden verondersteld niet onderhevig te zijn aan bodemdaling door zout- en waterwinning. Daarom mag de trendlijn van bodemdaling als nullijn worden gesteld. De verschillen per epoeche per referentiepunt worden geïnterpoleerd over alle overige meetpunten, objectpunten genoemd. Interpolatie op de objectpunten vindt afstandsafhankelijk (afstand objectpunt - referentiepunt) plaats. Daarna worden de objectpunten getoetst op stabiliteit via dezelfde manier van toetsing als gebruikt in stap drie. Het resultaat van deze wijze van toetsing wordt gevormd door een trendlijn voor bodemdaling door de jaren heen.

In deze stap (vier) zijn 230 objectpunten gecorrigeerd en getoetst, waarvan circa 10% verworpen werd. Verwerping vond voor de overgrote meerderheid zijn oorzaak in het geringe aantal metingen van het betreffende meetpunt; een 'betrouwbaarheidsprobleem' dus. De verworpen objectpunten worden niet meegenomen in de verdere schatting van de bijdrage aan bodemdaling door zoutwinning.

De hoogten van de objectpunten bevatten nu nog slechts een bijdrage ten gevolge van zout- en waterwinning. Aangezien het waterwingebied Heiligerlee én het zoutwingebied Heiligerlee elkaar qua omvang grotendeels overlappen is onderzocht of het waterwingebied Kibbelgaarn als referentiegebied zou kunnen dienen om de bodemdaling ten gevolge van waterwinning in Heiligerlee te kunnen berekenen. De waterwingebieden blijken, na onderzoek, zowel op het gebied van doorlooptijd van winning, productievolume, winddiepte en geologische structuur erg sterk op elkaar te lijken.

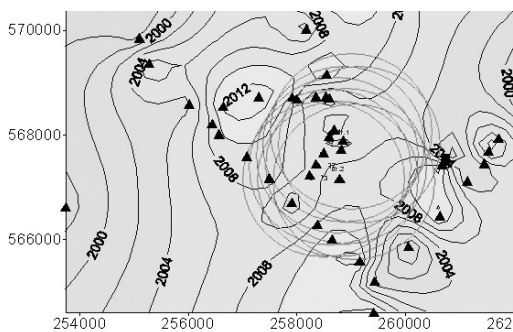


Figuur 3. Bodemdaling-componenten in de tijd bij een meetpunt binnen het zoutwinningsgebied.

Vervolgens is het referentiegebied als kom gemodelleerd en zijn de berekende komparameters gebruikt om de waterwinningskom van Heiligerlee te modelleren. Het resultaat hiervan is de bijdrage door zoutwinning in de gebieden Heiligerlee en Zuidwending. In figuur 3 is een voorbeeld te zien van de opbouw van bodemdaling uitgezet in de tijd bij een meetpunt binnen het zoutwinningsgebied.

Aan de hand van de berekende en getoetste trendlijnen ten gevolge van zoutwinning van alle objectpunten binnen de zoutwinningsgebieden wordt de frequentie van meting bepaald. Deze frequentie is afhankelijk van drie criteria: 1. Welke deformatie dient in een volgende meting minimaal gedetecteerd te worden? 2. Welke precisie moet de geprognosticeerde deformatie minimaal bezitten? 3. Welke betrouwbaarheid moet minimaal gehaald worden?

Bij toepassing van deze criteria en extrapolatie van de trendlijn wordt per meetpunt een jaartal vastgesteld op basis waarvan minimaal opnieuw moet worden gemeten. Door isolijnen te tekenen kunnen ruimtelijke trends worden vastgesteld. In figuur 4 is een isolijnenkaart voor Zuidwending gepresenteerd. Het zoutwinningsgebied wordt omsloten door de cluster van cirkels, die de 'critical area' representeren, dit is het theoretisch gebied waarbinnen bodemdaling optreedt als gevolg van zoutwining. De jaartallen variëren van 2004 tot 2010, hetgeen betekent dat dit gebied sinds 1998 pas in 2004



Figuur 4. Isolijnenkaart nieuwe meting Zuidwending.

opnieuw gemeten hoeft te worden. Ten opzichte van de tweejaarlijkse cyclus wordt hier een winst van 4 jaar behaald.

Conclusie

Het hier beschreven onderzoek geeft de geodetische onderbouwing voor een verlaging van de frequentie van deformatiemetingen in de zoutwinningsgebieden van de concessie Adolf van Nassau en Uitbreiding. De uiteindelijke beslissing wordt door Staatstoezicht op de Mijnen, dat onder het Ministerie van Economische Zaken ressorteert, genomen. Besloten is om de frequentie van de deformatiemeting van tweejaarlijks naar vijfjaarlijks terug te brengen.

In dit gebied heeft eveneens een geomechanische modellering van de bodemdaling plaats gevonden. Met name voor het gebied Zuidwending sluiten de geodetische en de geomechanische benadering goed aan. Voor het gebied Heiligerlee zal uit nader onderzoek moeten blijken waardoor de verschillen tussen de resultaten van beide benaderings- c.q. modelleringswijzen veroorzaakt worden.

In de beschreven case is een optimum bereikt tussen enerzijds het bodemdalingrisico, in termen van precisie, deformatie en betrouwbaarheid en anderzijds de minimalisering van de kosten voor deformatiemetingen.

Deformatiemeting op basis van dynamische geomechanische modellering

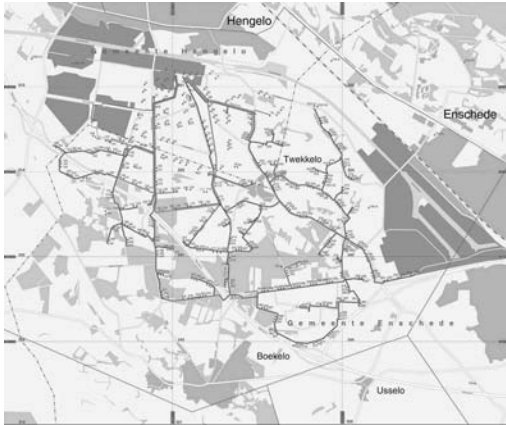
Inleiding

Akzo Nobel wint al meer dan zestig jaar zout met behulp van oplosmijnbouw in haar concessie Twenthe-Rijn te Hengelo (Overijssel). In de loop der jaren zijn meer dan 450 boringen afgediept. Minder dan de helft van deze boringen is op dit moment nog in productie. De andere boringen zijn buiten bedrijf en afgecementeerd (figuur 5).

De winning vindt plaats in de Röt-formatie (Boven-Bontzandsteen, deel van het Boven-Trias) op een diepte tussen 300 en 450 meter. De min of meer horizontaal liggende zoutlaag heeft een dikte die varieert tussen 35 en 90 meter; de gemiddelde dikte bedraagt 50 meter. De formatie bestaat uit vier, lokaal echter drie, zoutlagen die (van onder naar boven) de benamingen A, B, C en D dragen. De lagen worden gescheiden door schalieachtige, anhydritische kleisteen of anhydriet.

De winning vindt plaats volgens de zogenaamde 'gecontroleerde methode' in series van (in de regel) drie boringen die onderling met elkaar in verbinding staan. De zo gevormde, met pekkel gevulde, holruimte in de zoutlaag wordt ook wel caverne genoemd.

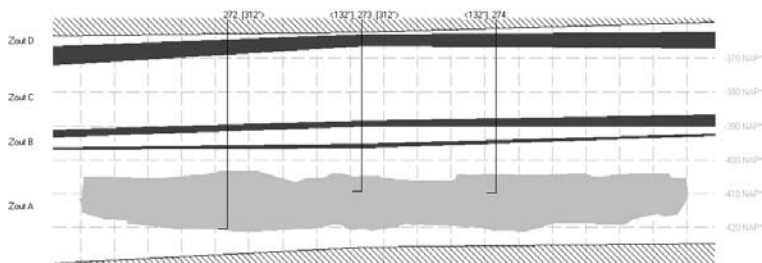
De mijnbouwactiviteiten staan onder toezicht van Staatstoezicht op de Mijnen en worden onder meer gereguleerd door het Mijnreglement 1964 (MR'64) en de daarbij behorende Nadere Regelen Mijnreglement 1964 (NRMR'64).



Figuur 5. Overzicht van het boorterrein te Hengelo (Overijssel).

Stabiliteit van cavernes

De ontwikkeling van de cavernes vindt plaats op basis van in [2, 3] geformuleerde criteria. Naast de mechanische en kruipeigenschappen van het zout spelen de diameter van de caveerne en de onderlinge afstand tussen de holruimten een rol. Belangrijk is echter ook de aanwezigheid van een zogenaamd veiligheidsdak boven de caveerne in het C-zout. Dit veiligheidsdak, bestaande uit (impermeabel) zout, zorgt er voor dat de hydrostatische steundruk, die wordt uitgeoefend door de (pekkel)vloestofkolom in de boring, de gesteenteformaties boven de holruimte effectief ondersteund (figuur 6).



Figuur 6. Lengteprofiel van met pekkel gevulde zoutcaverne.

De productie van pekkel en de ontwikkeling van de holruimte (over een periode van circa 25 jaar) is er op gericht dat dit veiligheidsdak, dat een dikte van minimaal vijf meter heeft, ook daadwerkelijk gevormd wordt. De gecontroleerde methode van winning, waarbij cyclisch de stappen 'plan - do - check - react' achter elkaar doorlopen

worden, garandeert dat de ontwikkelde holruimtes stabiel zijn en geen bodemdaling van betekenis zullen veroorzaken ¹.

Bodemdaling

Wanneer het veiligheidsdak niet of slechts gedeeltelijk aanwezig is treedt een andere situatie op [4]. Dit kan met name het geval zijn bij cavernes die in de dertiger tot zestiger jaren van de vorige eeuw ontwikkeld werden. Ten gevolge van onvoldoende kennis en technische mogelijkheden is het genoemde veiligheidsdak niet bij alle cavernes aanwezig.

Als gevolg daarvan treedt bodemdaling aan het maaiveld op. Principieel kunnen drie typen bodemdaling onderscheiden worden. Het eerste type bodemdaling is komvormig; de zakking is gering en treedt aan het maaiveld over een relatief groot oppervlak op. Schade aan gebouwen treedt in de regel niet op. Bij trogvormige bodemdaling is de 'critical area' beter gedefinieerd en kan de zakking in het centrum van het dalingsgebied na verloop van tijd meerdere tientallen centimeters bedragen. Schade aan gebouwen en infrastructuur kan optreden; op den duur kan het niveau van het grondwater beïnvloed worden. Tevens moet rekening gehouden worden met het optreden van trek en drukzones aan het maaiveld.

Het derde type bodemdaling is een variant op het tweede type. Ten gevolge van het afschuiven van ongeconsolideerde (zand, grind en klei) tertiaire en quartaire formaties onder belasting kan lokaal aan het maaiveld een sinkhole ontstaan. In Hengelo is dit in 1991 gebeurd (figuur 7).



Figuur 7. Foto sinkhole (Hengelo, 1991).

¹ Op termijn zal ten gevolge van verkorting van de pijlers tussen de holruimtes bodemdaling aan het maaiveld optreden die vergelijkbaar is met de natuurlijke bodemdaling ten gevolge van klink en oxidatie van de ondiepe ondergrond (< 1 millimeter per jaar).

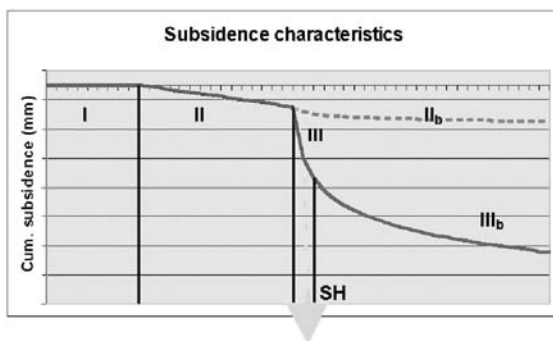
Komvormige bodemdaling aan het maaiveld ontstaat door verkorting van de hoogte van pijlers tussen holruimten als gevolg van kruip van het zout. Trogvormige bodemdaling ontstaat als gevolg van verticale migratie van de holruimte in de ondergrond ten gevolge van het bezwijken van het dakgesteente direct boven de caveerne². Het netto effect is de verplaatsing van de holruimte in verticale richting. Bij dit zich herhalende proces treedt afname van het volume (hoogte) van de holruimte op ten gevolge van 'bulking' van het losse materiaal. In Hengelo ligt deze bulking factor tussen 1,07 en 1,14 [6, 7]. De verticale migratie van de holruimte leidt op termijn tot het optreden van bodemdaling aan het maaiveld. Wanneer de gemigreerde caveerne bij het bereiken van de basis van het Tertiair nog een bepaalde resthoogte heeft, kunnen de ongeconsolideerde tertiaire en quataire formaties afschuiven. De vorming van een sinkhole aan het maaiveld is het resultaat.

Voor trogvormige bodemdaling en sinkhole-vorming geldt dat na de hoofdfase van de zakking een consolidatiefase (fase IIb respectievelijk fase IIIb) optreedt, waarbij verdichting plaatsvindt van het losse materiaal dat zich in de ondergrond heeft verzameld.

Bestaande uitvoering van deformatiemetingen

In het boorterrein worden jaarlijks deformatiemetingen (lengtemeting en nauwkeurigheidswaterpassing) uitgevoerd. Op sommige plaatsen, met name op het terrein van de fabriek en in de bestaande bodemdalingsgebieden, gebeurt dit tweemaal per jaar. Over de resultaten van deze metingen wordt extern aan Staatstoezicht op de Mijnen en aan de eigenaren, grond- en leidingbeheerders gerapporteerd. Bovendien vindt een aantal interne rapportages plaats.

Het blijkt dat de cumulatieve bodemdaling boven een caveerne over een bepaalde periode een kenmerkend verloop heeft [8]. Zoals te zien is in figuur 8 kan de meetperiode - in dit geval 55 jaar - zeer lang zijn. Dit betekent dat de curve in de regel uit verschillende, elkaar in de tijd overlappende, meetreeksen samengesteld kan zijn.



Figuur 8. Ontwikkeling van de bodemdaling in de tijd.

² Het bezwijken van het dakgesteente wordt hier begrepen als een mechanisch proces [5]. Fysisch-chemische fenomenen spelen naar verwachting een ondergeschikte rol. Hetzelfde geldt ten aanzien van de aanwezigheid van geologische anomalieën, hoewel over dat laatste geen overeenstemming bestaat.

Er kunnen verschillende, elkaar opvolgende fasen in de ontwikkeling van de bodemdaling worden onderscheiden (tabel 1):

Fase I	Holruimte bevindt zich in het zout of tegen het dakanhydriet aan. Geen bodemdaling aan het maaiveld.
Fase II	Holruimte migreert door de Boven-Bontzandsteen- en de Muschelkalkformaties. Optreden van lineaire bodemdaling aan het maaiveld.
Fase IIb	Afnemende bodemdaling ten gevolge van consolidatie van het losse gesteente.
Fase III	Holruimte bereikt de basis van het Tertiair, versnelde bodemdaling aan het maaiveld. Optreden van trogvormige bodemdaling (fase III), mogelijk vorming van een sinkhole.
Fase IIIb	Afnemende bodemdaling ten gevolge van consolidatie van het losse gesteente.

Tabel 1. Bodemdalingsfasen.

Geomechanisch model van de ondergrond

Voor iedere holruimte kan in principe een curve zoals in figuur 8 weergegeven samengesteld worden. Tevens kan van iedere caverne de vorm en de afmetingen met behulp van (wire line) sonarmetingen in kaart gebracht worden. In combinatie met de bekende geologie ter plaatse kan vervolgens bepaald worden of het veiligheidsdak aanwezig is (dit is immers een voorwaarde voor het optreden van bodemdaling).

Met behulp van het 'geomechanische model van de ondergrond' [4, 6, 8] kan aansluitend voorspeld worden of er bodemdaling optreedt en zo ja, welk type bodemdaling dit naar verwachting zal zijn. Belangrijke variabelen van dit analytische model zijn onder meer de diepte top zout, de hoogte van de caverne, de bulking factor, de dikte van de Boven-Bontzandsteen- en Muschelkalkformaties en de diepte van de basis Tertiair. De feitelijke migratie van de caverne in de ondergrond wordt gevolgd door het uitvoeren van deformatiemetingen aan het maaiveld. Indien gewenst vindt er controle plaats met behulp van boorgatmetingen (NGR, CCL, sonar).

Met behulp van de beschreven methodiek vindt de classificatie van een specifieke holruimte plaats. Dit gebeurt op het tijdstip dat de productie van pekkel definitief beëindigd wordt. Er worden drie klassen holruimten onderscheiden (zie tabel 2).

Door boringsklasse en bodemdalingsfase te combineren kan een matrix opgesteld worden waarin de eigenschappen van een holruimte, het potentiële bodemdalingsrisico en het actuele bodemdalingsrisico direct weergegeven kunnen worden (tabel 3). Op basis

van de resultaten van deformatiemetingen en de informatie van boorgatmetingen wordt deze matrix geactualiseerd.

Klasse 0	Veiligheidsdak is aanwezig. Holruimte is stabiel en zal op termijn slechts beperkte bodemdaling veroorzaken (in de orde van grootte van de natuurlijke bodemdaling, < 1 millimeter per jaar).
Klasse 1	Veiligheidsdak is niet aanwezig. Holruimte heeft een geringe hoogte en zal de basis van het Tertiair niet bereiken als gevolg van de bulking factor. Optreden van matige (komvormige) bodemdaling aan het maaiveld (fase II, gevolgd door fase IIb bodemdaling).
Klasse 2	Veiligheidsdak is niet aanwezig. Holruimte zal de basis van het Tertiair bereiken als gevolg van de grote effectieve hoogte van de holruimte. Optreden van ernstige (trogvormige of sinkhole) bodemdaling (fase IIIa), gevolgd door fase IIIb bodemdaling.

Tabel 2. Classificatie van holruimten.

Fase	Klasse		
	0	1	2
I			
II			
IIIb			
III			
IIIb			

Tabel 3. Matrix met klasse / fase van boring.

Nieuwe uitvoering van de deformatiemetingen

Genoemde matrix (tabel 3) kan ook gebruikt worden om het risico van bodemdaling uit te drukken. Tabel 4 geeft een onderverdeling naar de mate van risico waarbij een onderverdeling in laag, potentieel en actueel risico wordt gemaakt [9].

Tabel 5 geeft op basis van de combinatie klasse / fase een overzicht van de gewenste nauwkeurigheid en toe te passen meetmethode, terwijl dit in tabel 6 nader gespecifi-

Mate van risico					
Actueel		Potentieel		Laag	
Klasse	Fase	Klasse	Fase	Klasse	Fase
2	III	2	I	2	IIIb
2	II	1	I	1	IIb
1	II			0	I

Tabel 4. Mate van risico van bodemdaling.

Klasse / fase	Gewenste nauwkeurigheid	Meetmethode
Klasse 0, fase I	< 5 centimeter	Waterpassen (tertiair) of (na terreinonderzoek) RTK-GPS
Klasse 1, fase I	< 2 millimeter	Waterpassen (secundair)
Klasse 1, fase II	< 2 millimeter	Waterpassen (secundair)
Klasse 1, fase IIb	Eerste 5 jaar < 2 millimeter, daarna naar bevind van zaken	Waterpassen (secundair), daarna afhankelijk van gewenste nauwkeurigheid
Klasse 2, fase I	< 2 millimeter	Waterpassen (secundair)
Klasse 2, fase II	< 2 millimeter	Waterpassen (secundair)
Klasse 2, fase III	< 2 millimeter	Waterpassen (secundair)
Klasse 2, fase IIIb	Eerste 10 jaar < 2 millimeter, daarna naar bevind van zaken	Waterpassen (secundair), daarna afhankelijk van gewenste nauwkeurigheid

Tabel 5. Gewenste nauwkeurigheid en meetmethode, afhankelijk van klasse / fase.

ceerd wordt met betrekking tot het aantal meetpunten en (of) meetlijnen en de meetfrequentie.

Uitgaande van een beginsituatie waarbij alle holruimten zijn geïdentificeerd en waarbij een volledige deformatiemeting volgens de bestaande opzet is uitgevoerd, vormt de analyse van de meetresultaten zoals beschreven in combinatie met de kennis over de diepe ondergrond het uitgangspunt voor de uitvoering van de deformatiemeting volgens de nieuwe opzet. De analyse van de gegevens van de vorige deformatiemeting vormt de grondslag voor de uitvoering van de volgende meting. Op deze wijze wordt de meetinspanning gestuurd door de ontwikkeling van de bodemdaling ('analyse gaat vóór meten') [10].

Klasse / fase	Meetpunten / meetlijnen	Meetfrequentie
Klasse 1, fase I	1 meetpunt	Jaarlijks
Klasse 1, fase II	2 meetlijnen haaks op elkaar	Jaarlijks
Klasse 1, fase IIB	Eerste 5 jaar 2 meetlijnen haaks op elkaar, daarna naar bevind van zaken	Eerste 5 jaar jaarlijks, daarna naar bevind van zaken
Klasse 2, fase I	1 meetpunt	Jaarlijks
Klasse 2, fase II	Eerste 10 jaar 2 meetlijnen haaks op elkaar, daarna naar bevind van zaken	Eerste 10 jaar jaarlijks, daarna naar bevind van zaken
Klasse 2, fase III	2 meetlijnen haaks op elkaar	Halfjaarlijks of naar bevind van zaken
Klasse 2, fase IIIB	Eerste 10 jaar 2 meetlijnen haaks op elkaar, daarna naar bevind van zaken	Eerste 5 jaar halfjaarlijks, daarna 5 jaar jaarlijks, vervolgens naar bevind van zaken

Tabel 6. Meetpunten en -lijnen en meetfrequentie, afhankelijk van klasse / fase.

Het ligt voor de hand dat de uitvoering van de beschreven methodiek, waar mogelijk en zinvol, ondersteund wordt door het gebruik van databases en van specifiek ontwikkelde software.

Resultaten

Door de combinatie van geologische en geomechanische kennis van de ondergrond en geodetische informatie die verkregen is aan het maaiveld wordt een beter inzicht in de actuele situatie verkregen. De ontwikkeling van de bodemdaling boven geïdentificeerde 'risico' holruimten kan gericht gevolgd worden. Daarbij wordt een juist evenwicht gevonden tussen het gewenste meetresultaat en de verrichte meetinspanning.

In tabel 7 zijn de bestaande en de nieuwe uitvoering van de deformatiemeting met betrekking tot de lengte van de primaire (enkelvoudige) en secundaire waterpastrajecten en het aantal meetpunten met elkaar vergeleken. Het valt op dat bij objectmetingen (fabrieksterrein, overig) slechts een beperkte vermindering van de lengte van de waterpastrajecten en van het aantal meetpunten optreedt.

Bij de interpretatie van de meetresultaten moet bedacht worden dat de 'signaturen' van de holruimten aan het maaiveld elkaar kunnen beïnvloeden. Er moet daarom voor gewaakt worden alleen op basis van deformatiemetingen conclusies te trekken. In de regel wordt daarom gebruik gemaakt van de resultaten van meetreeksen van meerdere

meetpunten. Bovendien wordt de plausibiliteit van de conclusies altijd gecontroleerd op basis van de beschikbare kennis van de ondergrond.

Toekomstige ontwikkeling

De dynamiek van de beschreven systematiek garandeert dat de ontwikkeling van de bodemdaling ook in de toekomst gevolgd zal kunnen worden. Het is de bedoeling dat methodiek deel gaat uitmaken van een CAD/GIS-systeem waarin alle bedrijfsmatige aspecten van de winning van ruwe pekkel zijn opgenomen. Dit CAD/GIS-systeem wordt op dit moment in samenwerking met Ingenieursbureau 'Oranjewoud' b.v. ontwikkeld.

Lengte waterpastrajecten (m)	Voorjaar 2000	Najaar 2000	Voorjaar 2001	Najaar 2001
<i>Primair (enkel)</i>				
Op fabrieksterrein	2603	2797	100	2837
Buitengebied	12108	45582	6461	26627
	14711	48379	6561	29464
<i>Secundair</i>				
Op fabrieksterrein	2395	3286	435	3729
Buitengebied	13038	35042	3010	23153
	15433	38328	3445	26882
<i>Overig</i>				
EF-gebouw	418	314	294	314
Kalksilo's		161		161
Tanks		1172		1172
	418	1647	294	1647
Totaal	30562	88354	10300	57993
<i>Aantal meetpunten</i>				
Op fabrieksterrein	184	309	16	303
Buitengebied	338	683	52	418
EF-gebouw (binnen)	36	36	34	34
Kalksilo's		12		12
Tanks		174		174
Totaal	558	1214	102	941

Tabel 7. Vergelijking bestaande en nieuwe opzet deformatiemetingen.

Conclusie

Op basis van generieke criteria voor de uitvoering van deformatiemetingen en met behulp van het geomechanisch model van de ondergrond werd een integrale, dynamische benadering voor de uitvoering van deformatiemetingen ontwikkeld. Op basis hiervan wordt een halfjaarlijkse, een jaarlijkse en een vijfjaarlijkse controle op bodemdaling uitgevoerd.

De beschreven methode resulteert in een kosteneffectieve uitvoering van de deformatiemeting. Tevens vormt de methode de grondslag voor de analyse van de (ontwikkeling van) de bodemdaling in het winningsgebied. Rapportages aan de toezichhouder en externe betrokkenen zijn zonder probleem en tegen acceptabele kosten mogelijk. Naar verwachting zullen vraagstukken met betrekking tot ruimtelijke ordening met behulp van deze methodiek opgelost kunnen worden.

Referenties

1. Collegedictaat geodetische deformatieanalyse (ge 135), cursusjaar 1994/1995, Verhoef, H.M.E., Dictaat TU Delft: faculteit der Geodesie. Hoofdstuk 4.
2. Gebirgsmechanisches Gutachten zur Standsicherheit der bestehenden Kavernen und für die Dimensionierung neuer Kavernen im Feld Hengelo, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, März 1998 (niet gepubliceerd).
3. Richtlijnen voor de ontwikkeling van cavernes in de steenzoutconcessies Twenthe-Rijn en uitbreiding en Buurse, Akzo Nobel, 1999 (niet gepubliceerd).
4. Bodemdaling en mijnschade, Akzo Nobel, 2000 (niet gepubliceerd).
5. Subsidence over upwards migrated Salt Solution Cavities in the Hengelo Brine Field, Bekendam, Dr. R.F., Geo Control Maastricht, 2000 (niet gepubliceerd).
6. Subsidence over solution cavities in salt in the Twenthe-Rijn concession area, Bekendam, R.F., TNO, Delft, 1996.
7. High Resolution 3D Seismic Reflection Applied to Subsidence Evaluation and Solution Mine Design, Brite/Euram program, contract no: BRE2.CT92.0316, project no: BE-5889, 1997.
8. Subsidence Potential of the Hengelo Brinefield (part II), an analytical model to predict future surface subsidence, Cor E. Oldenziel, Akzo Nobel Salt b.v.; Wim A. Paar, Akzo Nobel Salt b.v.; Roland F. Bekendam, GeoControl; SMRI autumn meeting, San Antonio, 2000.
9. Onderzoek systematiek deformatiemeting Twenthe-Rijn concessie, Ingenieursbureau Oranjewoud, 2001 (niet gepubliceerd).
10. Deformatiemetingen concessiegebied Twenthe-Rijn, Ingenieursbureau Oranjewoud, 2001 (niet gepubliceerd).

Meetopzet, punt dichtheid, meetfrequentie en modellering bij gaswinning

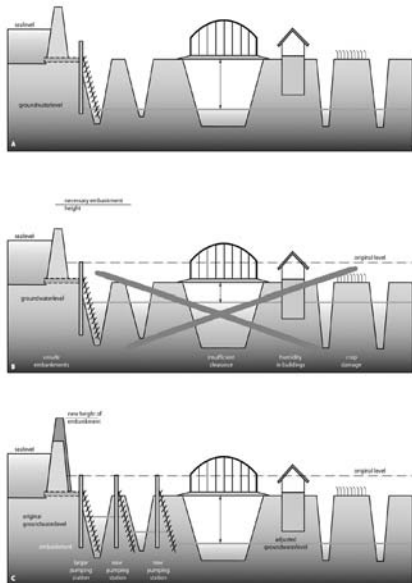
Ir. R.C.H. Quadvlieg
Nederlandse Aardolie Maatschappij b.v.

Van het thema van deze publicatie '*Hoe precies moet het? Hoe moet het precies?*' zal in dit artikel voornamelijk het tweede deel, '*Hoe moet het precies?*', worden behandeld. Het eerste deel behoort echter het tweede deel te bepalen.

Doelstellingen

Wie bepaalt dan dit zo belangrijke eerste deel? Dat hangt af van het doel van de bodembewegingsanalyse. Voor de NAM is dit, naast het voldoen aan de wettelijke verplichtingen:

1. Verificatie van de bodemdalingsprognose die voornamelijk gebaseerd is op een reservoirmodel.
2. Verificatie van de maatregelen die worden genomen om de gevolgen van bodemdaling door gaswinning te mitigeren. Deze maatregelen hebben altijd een relatie met de grondwaterstand (zie figuur 1).
3. Het correleren van de biologische veranderingen in natuurgebieden met opgetreden bodemdaling.



Figuur 1. 1a. De schematische weergave van een polderlandschap, vóór bodemdaling door gaswinning. 1b. In geval van grote bodemdaling (of zeespiegelrijzing) zonder maatregelen. Het is overigens de verantwoordelijkheid van de waterschappen om het nooit zover te laten komen en deze situatie zal zich dan ook nooit voordoen. 1c. Situatie ná maatregelen voor bodemdaling door gaswinning. De waterschappen houden de grondwaterstand zodanig op peil dat de situatie in 1a naadloos overgaat naar 1c en worden hiervoor financieel gecompenseerd door de Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning.

De afgeleide bodemdaling moet dan ook precies genoeg zijn om aan bovenstaande doelstellingen te voldoen. Is de afgeleide bodemdaling te precies dan wordt meer kennis verkregen dan gebruikt kan worden. Is de bodemdaling niet precies genoeg dan kan niet aan de doelstelling worden voldaan. Het is derhalve van belang de doelprecisie te kennen.

Voor doeleinden 2 en 3 is literatuur beschikbaar waaruit blijkt dat een precisie van vier centimeter voldoende is [Eysink e.a., 2000] en [Lorenz e.a., 1991]. Hiermee is meteen de doelprecisie van de bodemdalingsprognose bekend. Dit betreft dan de eindsituatie als het gasveld leeg is. Het tussentijds kalibreren van de prognose met de metingen kan het beste zo precies mogelijk gebeuren. Dit omdat onder andere op basis van deze vergelijking weer een nieuwe prognose wordt gemaakt en hoe preciezer gekalibreerd wordt, hoe preciezer geprognosticeerd kan worden. Het heeft echter geen zin om de metingen zo in te richten dat bodemdaling veel preciezer wordt afgeleid dan geprognosticeerd kan worden.

Het is niet vanzelfsprekend om de bewegingen van huizen tot op millimeterniveau vast te leggen in de hoop een uitspraak te kunnen doen over een oorzakelijk verband tussen gaswinning en scheuren in huizen. Van de gelijkmatige bodembeweging kan op basis van bestaande metingen worden vastgesteld wat het verschil in daling tussen voor- en achtergevel bedraagt. Dit ligt bij alle gasvelden enkele orden lager dan de drempelwaarden voor schade aan huizen [Kratzsch, 1983], waardoor geen beschadigingen aan huizen ontstaan door bodemdaling door gaswinning op grote diepten. Indirect, als er geen compensatie voor het stijgende grondwater plaatsvindt, zoals afgebeeld in figuur 1b, zou bij veel verschil in bodemdaling over korte afstand door het grondwater een niet-uniforme druk op de fundering uitgeoefend kunnen worden, wat tot schade kan leiden aan gebouwen volgens [Verruijt e.a., 2000]. Door extra bemaling én door het geringe bodemdalingsverschil over korte afstand, typisch 0,05 mm/jaar over 100 meter, zal dit echter niet voorkomen.

Het uitvoeren van hoogteverschilmetingen aan huizen die scheuren vertonen is hoogstens zinvol om de geomechanische modellen en de drempelwaarden voor schades aan huizen te toetsen. Het bewijs dat het ene deel van het huis beweegt ten opzichte van de andere wordt triest genoeg wel door de scheuren geleverd. Om de oorzakelijke schadevraag te beantwoorden is het wellicht zinvoller om een grondwaterstandsmonitoringsnetwerk rond een getroffen huis aan te leggen. Het grondwater zorgt immers voor de niet-uniforme druk die leidt tot de scheuren. Er kan nauwkeurig worden uitgerekend wat de verandering van deze lokale grondwaterstand als gevolg van bodemdaling door gaswinning is. Dit geldt onder de gebruikelijke aanname van doorlaatbaarheid van de bovenste lagen. Als de gemeten verandering in grondwaterstand anders is dan die door bodemdaling door gaswinning, zijn er tevens externe invloeden in het spel.

Derhalve zal de doelprecisie benodigd voor het toetsen van de prognose worden gehanteerd als uitgangspunt om de vraag '*hoe moet het precies?*' te beantwoorden.

Hoewel de precisie van de prognose nog niet strikt statistisch gedefinieerd is zoals dat bij geodetische vraagstukken gebruikelijk is, is 1 cm een realistisch uitgangspunt.

Van NAP-differentiestaten via Scan-Defo naar trend-sigitaal

Tot en met 1997 werden door de NAM de waterpassingen gerapporteerd in hoogten ten opzichte van het NAP. Door de NAP-hoogten van de laatste meting te vergelijken met NAP-hoogten van een vroeger tijdstip werd voor peilmerken bodemdaling afgeleid. Het was bekend dat deze peilmerken behalve door gaswinning ook andere dalingsoorzaken kenden. De peilmerken die sterk daalden ten opzichte van de peilmerken in de omgeving werden als niet-representatief voor gaswinning beschouwd. Dit werd nog vaak onderbouwd door een onderzoek naar de stabiliteit van het peilmerk of, indien beschikbaar, naar het peilmerkgedrag vóór de gaswinning.

Op basis van de overgebleven peilmerken werden differentiestaten gemaakt en hiermee werden contouren getekend. Op deze wijze is niet aan te geven wat de precisie van de contouren is. De precisie van de peilmerkdaling op basis van meetruis kon wel worden gegeven waarbij werd aangenomen dat het NAP perfect stabiel is. Netwerkoptimalisatie vond plaats op basis van meetprecisie. Deze methodiek is niet bruikbaar bij aanpassingen van het NAP zoals in Zuid-Holland in 1989 die opliepen tot 3 centimeter.

Door een samenwerkingsverband tussen de Meetkundige Dienst, de TU Delft en de NAM werd begin jaren negentig onder andere hiervoor naar een oplossing gezocht. Het belangrijkste kenmerk van deze deformatieanalyse strategie, geïmplementeerd in het pakket Scan-Defo, is waarschijnlijk de stabiliteitsanalyse. Hiermee wordt na elke meting opnieuw getoetst of het referentievlak meetruisontstijgend is veranderd. Het vergelijken van hoogten met hoogten bepaald op een vroeger tijdstip is immers slechts zinvol, als de hoogten ten opzichte van hetzelfde referentieniveau en dezelfde aansluitpunten zijn bepaald. Na elke meting krijgen de aansluitpunten en vervolgens alle andere peilmerken, óók op vroegere tijdstippen, een nieuwe hoogte. Op basis hiervan wordt vervolgens bodemdaling afgeleid. Deze strategie is onder andere beschreven in [De Heus e.a., 1995].

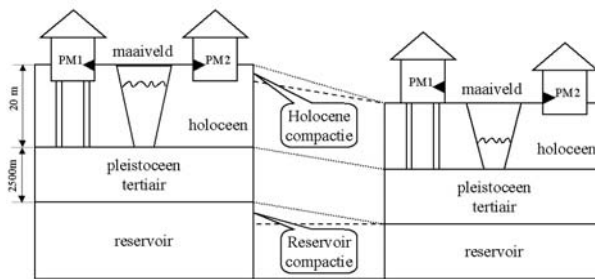
De volgende problemen konden echter slechts bevredigend opgelost worden met de in 1998 ontwikkelde trend-signaalaanpak voor het eerst beschreven in [Houtenbos, 2000], [Kenselaar en Martens, 2000] en vervolgens [Kenselaar en Quadvlieg, 2001]:

1. Het ontbreken van 'nulhoogten' (hoogten voor aanvang gasonttrekking) voor grote aantallen peilmerken (zie figuur 2).
2. Het ontbreken van stabiele aansluitpunten en het gebruik van wisselende aansluitpunten per meting.
3. Het ontbreken van een objectieve, statistische methode om peilmerkdaling ten gevolge van gasonttrekking van overige oorzaken te onderscheiden en vervolgens te modelleren (zie figuur 3).

4. De moeizame scheiding van signaal (het bodemdalingssignaal bedraagt typisch 0,05 mm/jaar over 100 meter) en allerlei ruiscomponenten.



Figuur 2. De netwerken van de Groninger waterpassing van 1964 in lichtgrijs dik en van 1998 in zwart dun. De buitenste grijze contour geeft de 2 cm contour van de verwachte bodemdaling in 2050.



Figuur 3. Twee oorzaken voor maaivelddaling: reservoir compactie ten gevolge van gaswinning en ondiepe compactie als gevolg van grondwaterpeilverlaging. Afhankelijk van de fundering van het gebouw waar het peilmerk in is bevestigd, zal het peilmerk slechts daling als gevolg van reservoir compactie geven of van beiden.

Een andere doelstelling van een trend-sigtaalprocedure is om op een verantwoorde manier op elk tijdstip en op elke plaats bodemdaling door gaswinning te interpoleren. Dit gebeurt het best middels collocatie, ook vaak aangeduid als 'Kriging'. Er zijn echter twee voorwaarden waaraan een signaal moet voldoen voordat deze interpolatie toegepast kan worden. Het signaal moet gemiddeld over tijd en plaats gelijk zijn aan nul, én het moet een stationair proces zijn. Hieraan wordt voldaan door een benaderde waarde af te trekken van de waarnemingen. Dit is een simpel komvormig model als volgt geformuleerd:

$$z\{x, y, t\} = \begin{cases} 0 & \text{voor } t \leq t_0 \\ \dot{z} \cdot (t - t_0) \cdot e^{-r^2/2} & \text{voor } t_0 < t < t_e \\ \dot{z} \cdot (t_e - t_0) \cdot e^{-r^2/2} & \text{voor } t \geq t_e \end{cases}$$

met:

$$r^2 = u^2 + v^2$$

$$u = ((x - x_0) \cdot \sin \alpha + (y - y_0) \cdot \cos \alpha) / a$$

$$v = ((x - x_0) \cdot \cos \alpha - (y - y_0) \cdot \sin \alpha) / b$$

waarbij:

- \bar{z} = bodemdalingstrend door gasonttrekking;
- x, y, t = coördinaten en tijd waarop bodemdaling wordt uitgerekend;
- t_0, t_e = start en eind tijdstip van de lineaire bodemdalingstrend;
- x_0, y_0 = x-, y-coördinaten van het centrum van de bodemdalingssom;
- a, b = afstand van het komcentrum tot de steilste helling in de bodemdalingssom, de halve lange en korte as van de kom;
- α = hoek van de lange as van de bodemdalingssom;
- \dot{z} = bodemdalingssnelheid in het centrum van de kom, eventueel bestaand uit meerdere polynomen.

Het te toetsen mathematisch model luidt dan als volgt:

$$\underline{h}_{ijt} = \underline{h}_{j0} - \underline{h}_{i0} + z\{x_i, y_i, t\} - z\{x_{ir}, y_{ir}, t\} + \underline{e}_{ijt}$$

- \underline{h}_{ijt} = hoogteverschil tussen i en j op tijdstip t ;
- \underline{h}_{j0} = hoogte peilmerk j voor aanvang gasdaling;
- $z\{x_i, y_i, t\}$ = gasdaling tijdstip t , plaats j , als in bovenstaande formule;
- \underline{e}_{ijt} = stochastisch veronderstelde afwijking.

\underline{e}_{ijt} bestaat gedeeltelijk uit het signaal dat na acceptatie van de nulhypothese geïsoleerd kan worden. Deze acceptatie kan pas bereikt worden met een juist stochastisch model dat uit meet-, punt- en modelruis bestaat.

Deze *modelruis* compenseert voor de imperfectie van het model. Als deze modelruis niet de werkelijkheid (lees: de discrepantie tussen model en waarnemingen) beschrijft, zal de nulhypothese verworpen worden. Elk aangemeten peilmerk vertoont dus een kleine beweging die door modelruis moet worden beschreven. Deze modelruis moet beweging door gaswinning beschrijven. Het ligt dan ook voor de hand deze gecorrigeerd in plaats te veronderstellen. Doordat de gaswinning op grote diepte plaatsvindt zullen twee peilmerken die dicht bij elkaar liggen als gevolg hiervan ongeveer éénzelfde gedrag vertonen. De modelruis wordt vaak met de volgende functie beschreven:

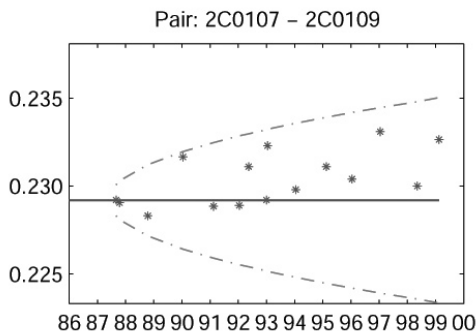
$$\sigma_{i,t}^2 = \sigma_m^2 (t - t_1) e^{-\ln 2 \left(\frac{t - t_1}{L} \right)^2}$$

Dit geeft de modelruis van een peilmerk i hetgeen exponentieel gewogen wordt met de afstand l_{ij} tot alle andere in de analyse betrokken peilmerken j op tijdstip t , t_1 is het eerste tijdstip waarop het peilmerk is waargenomen en L is de correlatielengte. Voor een gasveld met $\sqrt{a \cdot b}$ gelijk aan 3 kilometer bedraagt deze typisch 1 kilometer. Dit betekent dat als peilmerk j één kilometer is verwijderd van peilmerk i , peilmerk j 50% van de resterende, niet door de trend beschreven beweging van peilmerk i als gevolg van gaswinning ondergaat. Met andere woorden: de correlatie als gevolg van peilmerk i is op afstand L gehalveerd. Als deze modelruis niet de discrepantie tussen model en waarneming beschrijft, zal geen acceptatie van de nulhypothese worden beschreven. Vooralsnog blijkt dusver dat bij kleine gasvelden de waarnemingen voldoende worden beschreven door het trendmodel en is het signaal ongeveer gelijk aan nul. Bij het gasveld Groningen zal de magnitude van het signaal ongeveer 10 tot 15% van de maximale daling bedragen.

Meetruis

Alle metingen zijn behept met kleine meetfoutjes. De gemiddelde meetfout is nul. De spreiding van de foutjes wordt gekarakteriseerd door de standaarddeviatie. Voor tweedeorde waterpassingen is deze standaarddeviatie experimenteel bepaald op 0,7 mm maal de wortel uit de trajectlengte in kilometers. Meetruis is ongecorrleerd in tijd.

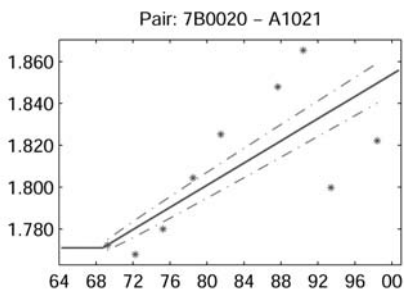
Puntruis beschrijft de minieme bewegingen die peilmerken vertonen. De gemiddelde relatieve beweging is per definitie nul. Deze kleine bewegingen zijn ongecorrleerd in plaats. Zonder deze puntruis is het verloop van hoogteverschillen in tijd buiten gaswinningsgebieden niet sluitend te verklaren. Puntruis neemt toe in tijd (zie figuur 4). Uiteraard is puntruis voor ondergrondse merken beduidend kleiner dan voor overige peilmerken.



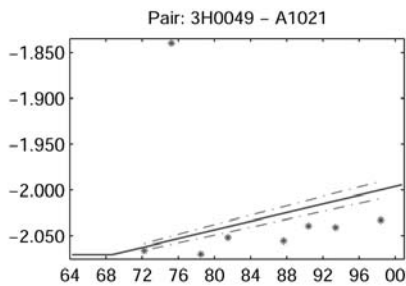
Figuur 4. Een voorbeeld van het stochastische karakter van puntruis. Op de y-as het hoogteverschil tussen peilmerk 2C0107 en 2C0109 met op de x-as tijd. Dit hoogteverschil bevindt zich ver verwijderd van gaswinning.

Alternatieve hypotheses

Ook wordt de nulhypothese tegen een aantal alternatieve hypotheses getoetst, waarvan een aantal voorbeelden. Uiteraard wordt op waarnemingsfouten getoetst, maar de aardigste mogelijkheid tot uitbreiding van de klassieke alternatieve hypotheses wordt natuurlijk geboden doordat metingen herhaald in tijd zijn uitgevoerd. Hierdoor kan worden getoetst op identificatiefouten en verstoringen. In figuur 5 staat een voorbeeld van een identificatiefout. Hierbij is éénmalig een verkeerde waarneming geregistreerd te herleiden tot een foutieve aanmeting van één peilmerk. Als actie hierop wordt een nieuwe waarneming gevormd, waarbij deze aanmeting als het ware wordt overgeslagen. Figuur 6 geeft een voorbeeld van een verstoring: voor en na de verstoring laat het peilmerk een dalingsgedrag zien in overeenstemming met de overige peilmerken. De meest voor de hand liggende oplossing hiervoor is het peilmerk van een nieuwe naam te voorzien na de verstoring. In de vereffening wordt dan een nieuwe nulhoogte geschat voor dit 'nieuwe' peilmerk gebaseerd op de tweede helft van de waarnemingshistorie.



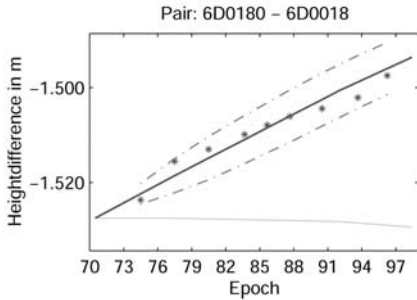
Figuur 5. Een voorbeeld van een verstoring. Op de y-as het hoogteverschil tussen peilmerk 7B0020 en A1021 met op de x-as tijd. Tussen 1972 en 1991 laat het peilmerk een grofweg lineaire daling zien. Tussen 1991 en 1993 is het hoogteverschil om niet gaswinningsoorzaken peilmerk ruim 5 cm kleiner geworden. Het gedrag voor en na de verstoring is ongeveer gelijk.



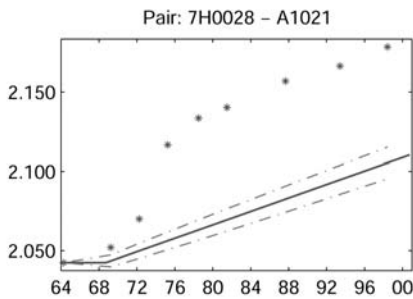
Figuur 6. Een voorbeeld van een identificatiefout. Op de y-as het hoogteverschil tussen peilmerk 3H0049 en A1021 met op de x-as tijd. In 1975 is een eenmalige afwijking van 20 cm te zien. Daarna volgt het peilmerk een min of meer zelfde verloop.

Daarnaast is er een alternatieve hypothese voor een afwijkend peilmerkgedrag dat toegeschreven wordt aan een andere oorzaak dan gaswinning. Als actie op een identificatie van een lineaire daler wordt een extra afwijking voor dit peilmerk geschat. Een voorbeeld wordt gegeven door figuur 7.

Vaak echter vertoont een peilmerk zetting, wat zich vertaalt in een sterkere daling over een korte periode waarna vervolgens het peilmerk zich min of meer als andere peilmerken gedraagt. Hiervoor is de alternatieve hypothesetoets niet geschikt. Figuur 8 geeft hier een voorbeeld van.



Figuur 7. Een voorbeeld van een autonome lineaire daler. Op de y-as het hoogteverschil tussen peilmerk 6D0180 en 6D0018 met op de x-as tijd. De onderste lijn geeft het gedrag wat op basis van andere peilmerken verwacht mag worden en de dikke lijn geeft de som van deze trend met de afwijkende snelheid. Deze benadert de waarnemingen beter.

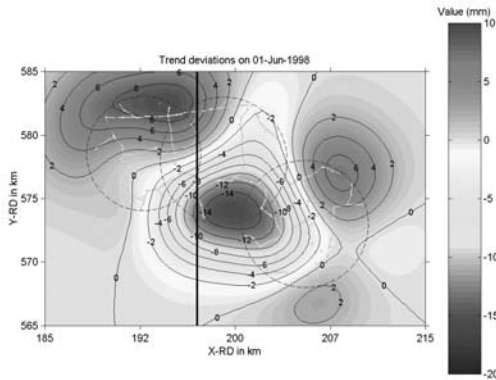


Figuur 8. Een voorbeeld van een autonome lineaire daler. Op de y-as het hoogteverschil tussen peilmerk 7H0028 en A1021 met op de x-as tijd. De doorgaande lijn geeft de trend weer. Na 1980 blijkt dit ook gevolgd te worden door het hoogteverschil, daarvoor lijkt het nog aan zetting onderhevig. De aanvullend geschatte lineaire dalingsnelheid zal dan ook niet voldoende zijn om de discrepantie tussen waarneming en model te verklaren.

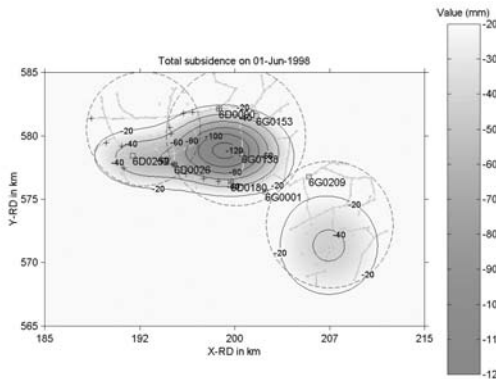
Weergave trend-sigitaal

Na de iteratieve hypothesetoetsing en acceptatie van de nulhypothese wordt een plaatje van de modelafwijkingen gemaakt, ook wel het signaal genoemd en afgebeeld in figuur 9. Hier lijkt nog een behoorlijke ruimtelijke correlatie aanwezig. De stijgingen moeten in het licht worden gezien van de eis dat het gemiddelde nul is. De absolute waarde van de maximale amplitude is echter het grootst bij de daling. De hierop te nemen actie is dan ook om een extra kom te schatten waar de daling maximaal is. Hierna zal de benodigde modelruis om tot acceptatie te komen afnemen, waardoor de stijgingen aan de noordzijde verdwijnen. Figuur 10 geeft dan de som van trend en signaal weer waar meerdere komen over elkaar zijn gesuperponeerd. Bij een volledig geaccepteerde nulhypothese kan ook de precisie worden bepaald hoe precies bodemdaling kan worden geïnterpoleerd, te zien in figuur 11. Op de plaats waar de precisie het slechtst is kan vaker of dichter worden gemeten. In het afgebeelde geval wordt ruimschoots voldaan aan de eis van 1 cm precisie. Deze figuur is dan ook een

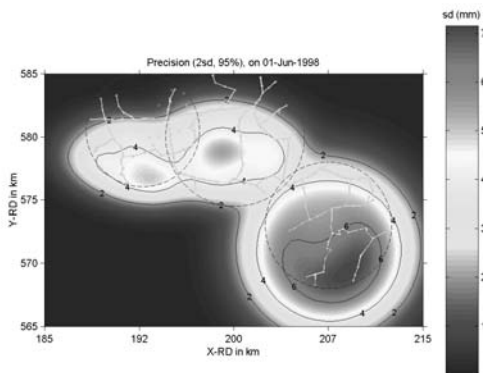
basis om de metingen te optimaliseren, waarmee de meetopzet, de punt dichtheid en de meetfrequentie gedefinieerd worden.



Figuur 9. Een weergave van het signaal in millimeter bij de Friesland-analyse, de waterpastrajecten zijn in lichtgrijs afgebeeld.



Figuur 10. De som van trend en signaal bij dezelfde Friesland-analyse als in figuur 9, de waterpastrajecten zijn in lichtgrijs afgebeeld.



Figuur 11. De precisie van de afgeleide bodemdaling van figuur 10, de waterpastrajecten zijn in lichtgrijs afgebeeld.

Referenties

1. Lorenz, G.K. e.a. (1991), *Heden en verleden, Nederland naar beneden?*, Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat.
2. Eysink, W.D. e.a. (2000), *Monitoring effecten bodemdaling op Ameland-Oost, evaluatie na 13 jaar gaswinning*, WL | Delft Hydraulics / Alterra, rapport H841.
3. Verruijt, A., R.B.J. Brinkgreve (2000) *Structural damage by uniform subsidence*. In: *Land Subsidence, proceedings of the IAHS Sixth International Symposium On Land Subsidence (SISOLS)*, Italy (ISBN 88-87222-06-1), pp. 167-175.
4. Kratzsch, H. (1983): *Mining Subsidence Engineering*. ISBN 3-540-11930-2, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
5. Heus, H.M. de, P. Joosten, M.H.F. Martens, H.M.E. Verhoef (1995). *Strategy for the analysis of the Groningen gas field levellings - an overview*. In: *Land Subsidence, proceedings of the IAHS Fifth International Symposium On Land Subsidence (FISOLS)*, the Hague (ISBN 0-947571-74-4), pp.301-311.
6. Houtenbos, A.P.E.M. (2000). *The quantification of subsidence due to gas-extraction in the Netherlands*. In: *Land Subsidence, proceedings of the IAHS Sixth International Symposium On Land Subsidence (SISOLS)*, Italy (ISBN 88-87222-06-1), pp. 177-189.
7. Kenselaar, F., M.H.F. Martens (2000). *Spatial-temporal modelling of land subsidence due to gas extraction*. In: *Land Subsidence, proceedings of the IAHS Sixth International Symposium On Land Subsidence (SISOLS)*, Italy (ISBN 88-87222-06-1), pp. 383-396.
8. Kenselaar, F., R.C.H. Quadvlieg (2001). *Trend-signal modeling of land subsidence*. In: *Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, Orange, California, March 19-22.

Onderzoeksprogramma 2002 - 2007 van de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie

Inleiding

Deze notitie beschrijft de visie van de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie op de onderzoeksactiviteiten in de periode 2002 tot 2007, afgestemd op het programma van de Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG).

Samenstelling

De Subcommissie streeft naar een samenstelling met disciplinair evenwicht, die past bij de actuele maatschappelijke en wetenschappelijke conjunctuur. Naast de van oudsher sterke aanwezigheid van geodesie is er ook goede aansluiting met geologie, seismologie, geofysica, geotechniek en hydrologie. In de problematiek van bodembeweging en zeespiegelvariatie is er immers behalve een accurate voorstelling ervan, ook een groeiende behoefte te constateren aan inzicht in achterliggende fysische processen en aan zicht op trends en trendbreuken. Tevens is in de samenstelling van de Subcommissie naast de sterk vertegenwoordigde kennisinbreng ook de stem van het kennisgebruik herkenbaar bij monde van participerende olie- en gasmaatschappijen. De Subcommissie is recent versterkt vanuit de zoutwinningsbranche. De Subcommissie acht de bodemverandering door oppervlaktegrondstofwinning en lokale zettingen door (ondergrondse) bouw niet tot haar primaire aandachtsgebied.

De huidige samenstelling van de Subcommissie is:

Prof.dr.ir. F.B.J. Barends (voorzitter)	GeoDelft/TU Delft	geotechniek
Ir. R.H. Camphuysen	Total Fina Elf	mijnbouw
J.H. ten Damme	Meetkundige Dienst RWS	geodesie
Dr. B. Dost	KNMI	seismologie
Dr.ir. A.J.H.M. Dusquesnoy	Staatstoezicht op de Mijnen	petrofysica
Ing. J. Kroos	RIKZ	hydrologie
Ir. A.P.E.M. Houtenbos	voorheen NAM b.v.	geodesie
Ir. F. Kenselaar (secretaris)	TU Delft	geodesie
Dr. H. Kooi	VU	geofysica
Drs. G.A.M. Kruse	GeoDelft	geologie
Drs. G. de Lange	TNO-NITG	ingenieursgeologie
Ir. W.A. Paar	Akzo Nobel Salt b.v.	zoutwinning
Ir. R.C.H. Quadvlieg	NAM b.v.	geodesie
Dr.ir. F. Schokking	GeoConsult	ingenieursgeologie
F.H. Schröder (ambt. secretaris)	NCG KNAW	
Ir. G.W. van Willigen	Meetkundige Dienst RWS	geodesie

Missie

Als afgeleide van de hoofdtaken van de NCG wordt de missie van de Subcommissie als volgt omschreven.

1. Richting geven aan fundamenteel en strategisch onderzoek

De Subcommissie realiseert dit in haar bijeenkomsten, waarin onderzoeksresultaten op het gebied van bodembeweging en zeespiegelvariatie worden gepresenteerd en besproken; door het formuleren en stimuleren van specialistisch onderzoek (NCG-promotieplaatsen) en door het onderhouden van (inter)nationale wetenschappelijke contacten.

2. Bevorderen van het vastleggen en verspreiden van relevante kennis

De Subcommissie realiseert dit door de versterking van de relatie tussen kennisleveranciers en kennisafnemers middels thematische bijeenkomsten, door NCG-publicaties en het bijhouden van de 'state of the art' middels actieve informatie-uitwisseling en deelname aan (inter)nationale commissies.

3. Voorlichtingsrol en aanspreekpunt

De Subcommissie realiseert dit door gevraagd en ongevraagd adviezen te verstrekken aan de NCG en haar subcommissies, de wetenschappelijke wereld en collectieve onderzoeksprogramma's (ICES, EU), en tevens aan instanties zoals de Technische Commissie Bodembeweging, Staattoezicht op de Mijnen en Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning, ter ondersteuning van hun voorlichtingstaak naar de maatschappij. Relaties met de omgeving worden bij voorkeur ingevuld via personele unies.

Omgevingsanalyse

De verwachting dat de maatschappelijke belangstelling voor de problematiek van bodembeweging en zeespiegelvariatie de komende jaren groot zal zijn, is gerechtvaardigd. De recente beleidsnota's (5e Nota Ruimtelijke Ordening, 3e Kustnota) zijn gericht op integratie van functionaliteit en modaliteit. Zo wordt de invloed van klimaatverandering onderkend in een verwachte zeespiegelstijging en getijdenverandering, vraagt de verwachte toename van maximale neerslag en hoogwaterstanden om drastische waterhuishoudkundige aanpassingen en tellen landschap, cultuur- en natuurwaarden ook internationaal sterker mee in de politieke en maatschappelijke besluitvorming ten aanzien van grondstofwinning (gas, olie, zout, water), inpoldering en kustvorming. Het besef dat de maakbaarheid van de samenleving haar grenzen kent,

levert de vraag op naar de haalbaarheid en de gevolgen van menselijke ingrepen. De bodembewegingsproblematiek is hierin een essentieel aspect en de ingeslagen weg van de Subcommissie om te bevorderen dat grootschalige metingen goedkoper, sneller en vooral ook preciezer worden, zal voortvarend gecontinueerd worden.

Onderzoeksagenda

De Subcommissie acht de kwaliteitsborging van technisch-wetenschappelijke aspecten van bodembeweging en zeespiegelvariatie de belangrijkste van haar taken, naast die van kennisconservator en voorlichting. Zij voert zelf geen onderzoek uit, maar stimuleert, consulteert, rapporteert en adviseert over processen en projecten in haar aandachtsgebied. De onderwerpen die aandacht behoeven in de komende jaren vormen de onderzoeksagenda.

1. Inzicht in de fysische achtergrond van bodembeweging en zeespiegelvariatie

De oorzaken van gemeten beweging van de regionale bodem en zeespiegel (NAP), plaatselijk het maaiveld en lokale kleinschalige veranderingen worden helder door kennis van de achterliggende processen zoals bij grondstoffenwinning, bodemklink, erosie en sedimentatie (zandsuppletie), aardbeving, grondverzet en (grond)waterbeheer. Zowel vanwege de aard van de processen als de grotere aandacht voor de bodembeweging aan de kust ziet de Subcommissie dat ook de horizontale component van de bodembeweging belangrijker wordt.

2. Normeren van meetgegevens en interpretatiemethodieken van bodembeweging en zeespiegelvariatie

Ten aanzien van betrouwbaarheid, precisie en meetbaarheid wil de Subcommissie een meer formele rol spelen bij het vaststellen van standaardisatie en normering in data-acquisitie, in analysemethoden en in bruikbaarheid van methodieken, afhankelijk van gestelde doelen. Door actieve deelname in (inter)nationale commissies en door in de Subcommissie uitgewerkte normvoorstellen wil zij deze taak vormgeven.

3. Profileren van de Subcommissie; haar kennis en kunde bekend stellen

Door het up-to-date houden van de website (ook in het Engels), door het zorgen voor aansluiting (hyperlinks, zoekmachines) en door gerichte professionele ondersteuning op het gebied van bodembeweging en zeespiegelvariatie aan beleidsinstanties en nationale onderzoeksprogramma's (EMR, TCBB, MD, DC, COB, TAW, Waterbeheer 21e eeuw) wil de Subcommissie haar technisch-maatschappelijke rol versterken.¹

Werkplan

1. Voor de planperiode 2002 - 2007 stelt de Subcommissie jaarlijks een actieplan op, waarin concrete projecten en activiteiten, die passen in de onderzoeksagenda, als ook te behalen resultaten (targets) zijn benoemd. Het actieplan wordt jaarlijks met instemming van de NCG als bijlage aan het onderzoeksprogramma toegevoegd.
2. De Subcommissie blijft wat samenstelling betreft ongewijzigd.
3. De Subcommissie komt twee à driemaal per jaar bijeen en organiseert tweejaarlijks een thematische bijeenkomst voor breder publiek.
4. De Subcommissie zorgt waar mogelijk voor nationale vertegenwoordiging in relevante internationale activiteiten op het gebied van bodembeweging en zeespiegelvariatie (ESEAS, SISOLS).
5. De Subcommissie zorgt voor adequate profilering van haar kennis en kunde, zowel via directe acquisitie als via internet.

¹ Pers, publiek en politiek hebben geringe kennis op het gebied van bodembeweging en zeespiegelvariatie. Dat leidt regelmatig tot onjuiste conclusies, verdraaiing van feiten en onjuiste beslissingen.