

# Tiltmeting een alternatief voor waterpassing?

*H.W. Haak*

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

## Technisch rapport; TR-192

De Bilt, 1996

Postbus 201  
3730 AE De Bilt  
Wilhelminalaan 10  
Telefoon 030-220 69 11  
telefax 030-221 04 07

Auteurs: H. Haak

UDC: 550.34.038.8

ISSN: 0169-1708

ISBN: 90-369-2104-X



# **Tiltmeting een alternatief voor waterpassing?**

door

H. W. Haak

KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT

februari 1996

## INHOUD

SAMENVATTING .....	3
PROBLEEMSTELLING .....	3
METHODEN .....	4
Waterpassing .....	4
Tiltmeting .....	5
BODEMDALING BEPAALD UIT TILTMETINGEN .....	6
Zuivere hoogteveranderingen .....	6
Ijking .....	8
Fouten .....	8
Volume veranderingen .....	9
Tiltveranderingen en bodemdaling bij zoutwinning .....	9
Tiltveranderingen en bodemdaling bij gaswinning .....	12
Aardbevingen en aseismische slip .....	12
Veranderingen in de geoïde .....	13
Voorbeeld berekening bodemdaling uit tilt .....	14
INVERSIE VAN DE BODEMDALINGSSCHOTEL .....	18
INSTRUMENTATIE .....	20
VERANTWOORDING .....	24
CONSTATERINGEN, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....	25
REFERENTIES .....	26

# Tiltmeting een alternatief voor waterpassing?

## Samenvatting

Dit rapport is een evaluatie van de techniek van tiltmetingen toegepast op de Nederlandse situatie. Tilt is de scheefstelling van het aardoppervlak. De meting van tilt met op de markt verkrijgbare apparatuur kan met extreem grote nauwkeurigheid uitgevoerd worden. Hierdoor zijn een aantal toepassingen gesuggereerd die ook voor Nederland van belang kunnen zijn. Het betreft bijvoorbeeld de meting van bodemdaling en de bepaling van de omvang van grote cavernes in de ondergrond. Tiltmetingen worden regelmatig met succes toegepast in de olie- en gasindustrie om de resultaten van reservoir stimulatie technieken (hydraulic fracturing) te volgen (Evans<sup>1,2</sup>, 1983, Holzhausen<sup>1,2</sup>, 1985).

De conclusie van dit rapport is dat de methode alleen van toepassing is wanneer de processen zich vrij dicht onder het oppervlak van de aarde afspelen. In dit verband is een diepte van drie kilometer te groot om de details van processen ter plaatse te onthullen. Ook in de bepaling van de bodemdaling heeft de techniek zijn bezwaren. Deze nadelen maken de toepassing van conventionele waterpassing gunstiger dan tiltmeting in technische en financiële zin. Het grote voordeel van de tilttechniek is dat de methode submillimeter bodemdaling kan aantonen binnen een klein gebied. Bovendien maakt de methode het mogelijk de verschillende bijdragen aan de totale bodemdaling te scheiden.

## Probleemstelling

Wat is de meest kosten effectieve methode om kleine zakkingen van het maaiveld te meten in een relatief klein gebied van circa 10x10 km? Is tiltmeting een alternatief voor de meer conventionele waterpassing? Het te onderzoeken gebied komt ongeveer overeen met een zakkingskom door een puntverstoring op een diepte van circa 3 km. Wanneer er sprake is van een verstoring over een groter gebied, zoals een gasveld, is het onderzoeksgebied navenant groter.

Deze probleemstelling kan optreden bij de exploitatie van kleine gasvelden of winning van andere delfstoffen op grote diepte, zoals steenzout. Ook kan in principe een aardbeving of een andere langzame verschuiving een verstoring in de diepe ondergrond teweegbrengen die tot een tiltverandering aanleiding geeft.

Het accent ligt in deze evaluatie vooral op de techniek van tiltmeting. Hierbij gaat het om de bepaling van het maaiveldprofiel, zodat ook bodemstijging, naast bodemdaling, in beschouwing genomen wordt. Daarnaast gaat het om de bepaling van de omvang van de verstoring, de karakterisering van de bron.

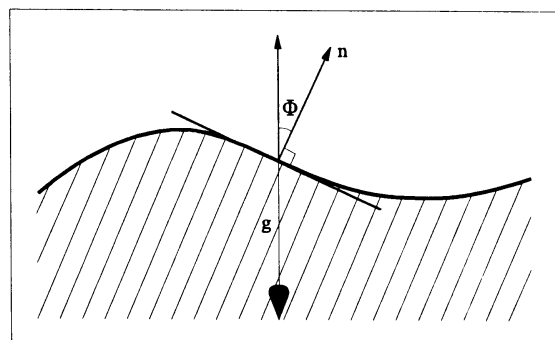
Er zijn relatief weinig technieken die in staat zijn om een afbeelding te maken van processen die zich in de diepe ondergrond afspelen. Wanneer er dus een tot nu toe in Nederland ongebruikte techniek wordt gepropageerd, is het de moeite waard de techniek aan een grondig onderzoek te onderwerpen. Deze evaluatie is een aanzet tot het onderzoek naar de bruikbaarheid van de tiltmethode.

## Methoden

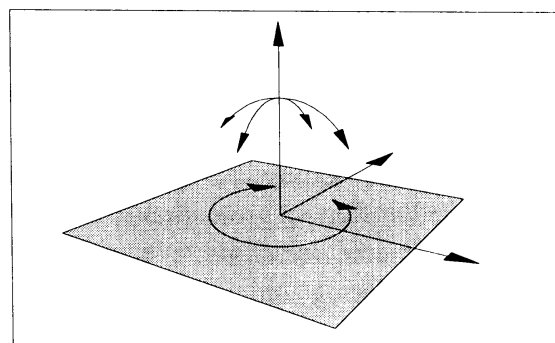
### *Waterpassing*

Waterpassing wordt als een bekende en gevestigde techniek verondersteld, die goed reproduceerbare en controleerbare meetresultaten geeft met een nauwkeurigheid van 5 tot 10 mm. Er worden in het algemeen strenge eisen gesteld aan de stabiliteit van de meetpunten. Een waterpassing moet uitgevoerd worden met een herhalingsfrequentie die gegeven wordt door de te verwachten snelheid van de maaiveldveranderingen en de nauwkeurigheid van de methode.

Als techniek levert waterpassing direct de gevraagde waarden op. Afgezien van de verwerking en de controle van de meetresultaten door computers is waterpassing een intensieve handmatige techniek. Er is veel ervaring met de techniek en uitbesteding van het werk is eerder regel dan uitzondering. Waterpassing is een primair meetproces.



*Figuur 1.*  
*Tilt: de hoekafwijking van de normaal van het aardoppervlak ten opzichte van de verticaal.*



*Figuur 2.*  
*Elementaire rotaties aan het aardoppervlak.*

### *Tiltmeting*

Tilt, scheefstelling of kanteling is de afwijking van de verticaal, bijvoorbeeld de hoek tussen de normaalvector van het aardoppervlak en die van een schietlood. Zie figuur 1. De verticale richting, die van het schietlood, wordt met grote nauwkeurigheid gegeven door de richting van de zwaartekracht of valversnelling  $g$ . De meting van een tilthoek is dus primair gericht op het meten van een richting ten opzichte van een referentie richting, de verticaal. Omdat de richting zelf meestal willekeurig gekozen moet worden, is de variatie van tilt in de ruimte en in de tijd van belang. Tiltmetingen zijn verwant aan rotaties. Er zijn drie rotatieassen, waarvan de twee die in het horizontale vlak gekozen kunnen worden in dit verband de belangrijkste zijn. Zie figuur 2. Er zijn zeer weinig geofysische experimenten bekend van rotatiemetingen met een verticale as, de meting dus van de torsie van het aardoppervlak (Nigbor, 1994).

De meting van tilt met horizontale rotatieassen kent twee fundamenteel verschillende methoden. De meest eenvoudige is de meting van de  $\Delta g$ -vector, de component van de zwaartekracht in het bijna horizontale vlak van het aardoppervlak. De verhouding  $\Delta g/g$  is dan rechtstreeks de tilthoek  $\Phi$ . Het meten van tiltverandering komt dus in deze methode neer op een meting van de horizontale versnelling. Daarom is met deze methode tilt niet te scheiden van horizontale versnelling die als ruiscomponent aanwezig kan zijn.

Fysisch gaat de meting als volgt in zijn werk. Door de horizontale versnelling wordt een kracht uitgeoefend op een massa, waardoor de massa van evenwichtsstand kan veranderen wanneer die vrij is opgehangen. Dit wordt door een positiedetector gemeten. Veel tiltmeters zijn dus niet anders dan elektronische waterpassen. De luchtbel in de waterpas vertegenwoordigt een negatieve massa en de positie kan bijvoorbeeld worden bepaald uit weerstandsmeting of door optische detectie. De kromming van het horlogeglas geeft samen met de gevoeligheid van de positie uitlezing de kleinste waarde van de tilthoek die nog betrouwbaar kan worden gemeten. De waarde voor de nauwkeurigheid ligt in de orde van 0,001 millimeter per kilometer, of  $10^{-9}$  rad, dit is dus gelijk aan  $\Delta g/g$ . De grote gevoeligheid maakt dat tiltmetingen een aantal geofysische toepassingen hebben. Het is echter de vraag of deze grote gevoeligheid ook op de lange termijn gehaald kan worden (Agnew, 1986).

Een ander voorbeeld van een gevoelige tiltmeter is een horizontale seismometer. Bij een seismometer wordt de gevoeligheid voor tilt gegeven door  $\Phi = \omega_0^2 x/g$ . Hierin is  $x$  de uitwijking van de massa en  $\omega_0$  de eigenfrequentie van de seismometer. Wanneer de seismometer een periode heeft van 20 seconden en de vergroting van de uitwijking van de massa 10.000 is, wordt dezelfde gevoeligheid bereikt als die van de boven beschreven elektronische waterpas. Deze condities zijn onder observatoriumomstandigheden gemakkelijk te bereiken.

De twee bovenstaande voorbeelden zijn verschillende uitwerkingen van hetzelfde fysische principe. Een fundamenteel andere tiltmeter wordt verkregen door gebruik te maken van de traagheid voor rotatie, bijvoorbeeld, die van vloeistoffen opgesloten in een cilindervormige ruimte. Dit type tiltmeters kan dezelfde gevoeligheid halen maar zal lastiger voor zeer lage frequenties geschikt gemaakt kunnen worden (Systron Donner). Dit komt omdat bij lage frequenties de wrijving met de wand van de cilinder een belangrijke rol gaat spelen. Het ontbreekt in deze methode van tiltmeting aan een absolute referentie, zoals  $g$ .

Het voordeel van deze instrumenten is echter dat zij niet gevoelig zijn voor horizontale versnellingen. Daardoor kunnen ze in combinatie met langperiodieke seismometers gebruikt worden om echte tilt, in de zin van een hoekverdraaiing, te scheiden, van een  $\Delta g/g$  meting, waarbij primair een horizontale versnelling  $\Delta g$  gemeten wordt (Mat-Isa, 1992).

Het menselijk evenwichtsorgaan is gebaseerd op het principe van vloeistofrotatie. De drie bogen in ons binnenoor vormen samen een tiltmeter die met grote precisie werkt. Een koorddanser, bijvoorbeeld, krijgt feedback van de tiltmeter in zijn oor, om in de uiterst instabiele positie op het slappe koord toch staande te blijven.

Uit de seismologie is bekend dat tiltbewegingen afnemen met de diepte onder het aardoppervlak. Dit was de reden dat de langperiodieke SRO-stations (Seismic Research Observatories) op 100 meter diep geplaatst werden voor de detectie van oppervlaktegolven van kernexplosies die kleine amplitudes hebben. In de seismologie kan een dergelijk systeem tot een aanzienlijke reductie in laagfrequente bodemruis leiden, omdat tiltvariaties de belangrijkste bijdrage vormen tot de bodemruis aan het aardoppervlak bij lage frequenties.

Samenvattend kan gesteld worden dat instrumenteel gezien voldoende gevoeligheid bereikt kan worden met relatief eenvoudige instrumenten. Deze instrumenten zijn zonder meer op de commerciële markt beschikbaar. De aarde vertoont bij lage frequenties een vrij grote bodemruis die voornamelijk uit tiltcomponenten bestaat (Wyatt, 1980). Deze ruis heeft vooral externe oorzaken, zoals langzame variaties van de luchtdruk. De term Infraseismic Diagnostic Monitoring (IDM) verwijst in het verband naar de afbeeldende karakteristieken bij zeer lage frequenties, zoals van de exploratieseismiek, en niet naar de eigenschap van de tilttechniek om langzame of laagfrequente aardbevingen te detecteren (Wood, 1995).

## **Bodemdaling bepaald uit tiltmetingen**

### *Zuivere hoogteveranderingen*

Wanneer het maaiveld hoogteveranderingen ondergaat ontstaat een hoekafwijking van de normaal, dus tilt. De tilt wordt gegeven door  $\Phi_x = dh(x,y)/dx$  en  $\Phi_y = dh(x,y)/dy$ ,  $h(x,y)$  is de hoogte, bijvoorbeeld de bodemdaling, en  $x,y$  zijn de coördinaten in het platte vlak. Door de tilt te integreren over de ruimte kan dus de hoogteverandering worden teruggevonden op een constante na. De constante kan worden afgeleid uit de randvoorwaarden bijvoorbeeld de voorwaarde dat de hoogteverandering aan de rand van het te onderzoeken gebied nul is. Deze voorwaarde kan worden getoetst door één of meer tiltmeters ver van het onderzoeksgebied te plaatsen als referentie. Het aantal meetpunten is van belang voor een eenduidige integratie.

De methode veronderstelt dus dat de tilt op een voldoende aantal punten gemeten wordt om tot een goede reconstructie van het oppervlakteprofiel te komen. Veelal zullen tiltmeters met een onderlinge afstand van 750 à 1000 m geplaatst worden. Circa 25 instrumenten voor een gebied van 5x5 km, dit aantal loopt echter snel op tot 100 waarnemingspunten wanneer met dezelfde resolutie een gebied van 10x10 km onderzocht moet worden. De resolutie die gehaald moet worden hangt op zijn beurt weer af van de te verwachten diepte waarop zich de processen afspelen. Voor processen op 3 km moet aan een gebied van 10x10 km gedacht

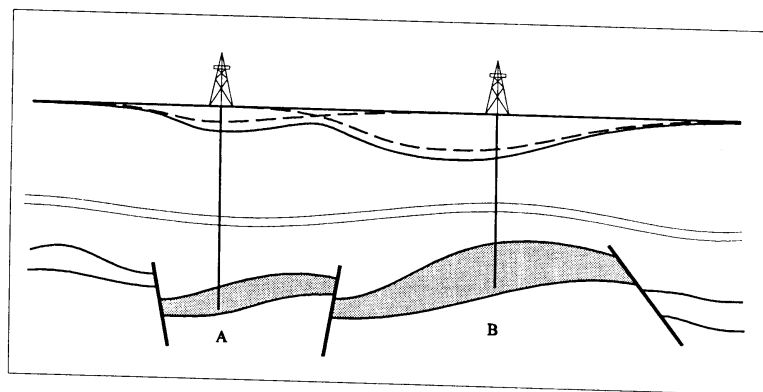


worden, 15x15 km is nog beter. Het zal duidelijk zijn dat in dit laatste voorbeeld de afstand tussen de sensoren vergroot moeten worden tot circa 3 km om tot een beperkt aantal sensoren te komen dat nog aanvaardbaar is.

Veronderstel, dat in één jaar de bodemdaling 1 cm is over het aangegeven gebied dan is de tilt circa  $2,0 \cdot 10^{-6}$  rad, wanneer de puntbron van deze bodemdaling op 3 km diepte gelegen is (Geertsma, 1973, Maruyama, 1964). Deze waarde ligt dus ver boven de gevoeligheidsgrens. Anderzijds is bekend dat stabiliteit van meetpunten en de stabiliteit van de tiltmeters niet zo groot is dat deze tilt over de lange periode van een jaar te volgen is, zelfs niet onder observatorium condities (Agnew, 1986).

De truc, die kan worden gebruikt, is dat korte termijn tiltveranderingen toegepast moeten worden om daarmee een veel grotere stabiliteit te halen op kleinere tijdschalen. Dit kan bereikt worden door korte pulsen te genereren in de heersende spanning in de ondergrond. Het is een essentiële stap in de meetprocedure. Deze stap brengt dus met zich mee dat ook een nauwkeurige boekhouding moet worden bijgehouden van drukveranderingen en hoeveelheid gewonnen delfstof om door een tweede integratie, nu over de tijd, de totale hoogteverandering van het maaiveld te berekenen. Het is de prijs die betaald moet worden om met minder stabiele meetpunten te volstaan. Hoogteveranderingen van het maaiveld die niet gepulst kunnen worden zoals het natuurlijke proces van oxydatie of inklinken van de bodem worden hiermee niet in het meetproces betrokken.

Wanneer bijvoorbeeld gas of vloeistof wordt geïnjecteerd dan kan de injectiedruk tijdelijk voor een uur of een dag weggenomen of juist verhoogd worden. Een eenvoudige berekening leert dat  $2,0 \cdot 10^{-6}$  rad/jaar nog altijd gemiddeld  $5,5 \cdot 10^{-9}$  rad/dag oplevert. Het zal duidelijk zijn dat dit alleen maar goed gaat wanneer kan worden afgezien van transporteigenschappen. Dit is bij kleine velden een betere benadering. Het is echter wél mogelijk de bijdragen van verschillende putten van elkaar te scheiden wanneer deze op verschillende tijdstippen gepulst worden. Zie figuur 3. Er is dus sprake van een modulatietechniek, de stabiliteit van de techniek hangt hiermee dus af van de stabiliteit van de aan te brengen modulatie en minder van de tiltmeting zelf.



*Figuur 3.  
De bijdrage van verschillende tiltcomponenten kan worden gescheiden wanneer verschillende putten op verschillende tijdstippen een drukpuls krijgen.*

### *Ijking*

In de praktijk blijkt het noodzakelijk te zijn de tiltmeters in het veld te ijken. Deze ijking geeft een waarde aan de conversiefactor tussen uitgangsspanning van de sensor en de werkelijke tilt. Door het grote dynamisch bereik van de metingen is de ijking belangrijk. Het iksignaal voor de tiltmeting is te vinden in de getijdenbeweging door zon en maan (Melchior, 1983). Deze hemellichamen veroorzaken een grootschalige vervorming van de vaste aarde die te vergelijken is met eb en vloed. Berekening leert dat een verplaatsing van 30 cm in het verticale vlak en een basislijn van 1/4 van de omtrek van de aarde, 10.000 km, een tilthoek geeft van  $3,0 \cdot 10^{-8}$  rad. Uit de meting van de getijdenbeweging blijkt dat de versnellingen en daarmee de tilthoek op grond van  $\Delta g/g$  van vergelijkbare grootte zijn, circa  $10^{-7}$  rad.

### *Fouten*

Door bewust aangebrachte drukvariaties in de ondergrond is de vorm van het maaiveldprofiel te berekenen. Die drukvariaties zullen volumeveranderingen met zich mee moeten brengen om aan het aardoppervlak als tilt meetbaar te zijn. De nauwkeurigheid waarmee dat gedaan kan worden heeft echter zijn beperkingen. Dit wordt vooral veroorzaakt door het kleine aantal meetpunten en door de integraties over tijd en ruimte.

De foutvoortplanting van tiltmeting door de integraties is waarschijnlijk minder goed dan die in de klassieke waterpassing. Hier staat tegenover dat de tilttechniek aanvankelijk nauwkeuriger resultaten geeft, zodat dit verschil in de twee technieken pas over langere tijd merkbaar is.

Wanneer de tiltmetingen zijn verricht op een relatief klein aantal meetpunten is de integratie naar bodemdaling niet langer een triviaal probleem. Bij het oplossen van differentiaal vergelijkingen is in het algemeen de differentiaal vergelijking zelf analytisch bekend op elk punt. In dit geval echter is de afgeleide slechts op circa 25 punten bekend. In principe kan de tilt als afgeleide van de bodemdaling tussen de meetwaarden elke waarde aannemen. Hierdoor wordt het onvermijdelijk dat een aantal aannames moet worden gemaakt om tot een verantwoorde interpolatie van de meetwaarden te komen. Dit betreft in het bijzonder de schaallengte van de te verwachten tiltveranderingen in het horizontale vlak. In de praktijk komt dit neer op aannames omtrent de diepte van de processen in de ondergrond. Er zal alleen een goed resultaat bereikt worden wanneer een bestaand model van de processen wordt geoptimaliseerd met behulp van de meetwaarden; het testen van een hypothese aan de meting.

Profielveranderingen met een schaallengte van minder dan de gemiddelde afstand tussen de opnemers worden op zijn best niet door het systeem opgemerkt. Veel waarschijnlijker echter, zullen de kleinschalige veranderingen worden omgevormd door het meetsysteem tot grootschalige veranderingen, van dezelfde amplitude wanneer Fourier-technieken gebruikt worden. In het tijddomein is dit bekend onder de term aliassing. Hier hebben we te maken met een ruimtelijke variant van dit effect. In de elektronica is het gebruikelijk in de schakeling een analoog filter op te nemen om aliassing door hoge frequenties tegen te gaan. In het ruimtelijke domein is het ontwerp van een ruimtelijk antialiasfilter vrijwel onmogelijk en wordt daarom ook zelden toegepast. De aarde zelf zal hier het antialiasfilter moeten vormen. Formeel wordt hierdoor de grootste inter-sensor afstand bepaald, gegeven een te bereiken ruimtelijke resolutie.

### *Volume veranderingen*

Om een indruk te krijgen van de relatie tussen tilthoek en volumeveranderingen in de ondergrond is de volgende vuistregel nuttig:  $\Phi_m = \kappa \Delta V/z^3$  (Wood 1995). In deze formule voor de maximale tilthoek  $\Phi_m$  is  $\kappa = 0,2$  een dimensieloze constante,  $z$  is de diepte en  $\Delta V$  is de volumeverandering. In  $\kappa$  zijn een aantal factoren samengenomen. De vuistregel laat zien dat de techniek het best werkt voor processen dicht onder het oppervlak door de afhankelijkheid met  $1/z^3$ , een factor 3 ondieper vergroot het tiltsignaal met ongeveer een factor 30. Deze regel laat ook zien dat wanneer verschillende bronnen van vergelijkbare volumeverandering zich boven elkaar bevinden, de minst diepe bron het grootste tiltsignaal veroorzaakt. Diepe bronnen worden effectief afgeschermd door ondiepe bronnen wanneer die aanwezig zijn.

Wanneer een diepte wordt aangenomen van 3 km en een volume verandering van  $1000 \text{ m}^3$ , dan is de tilt  $7,4 \cdot 10^{-9}$  rad. Stel dat er een bolvormige caveerne gemaakt is met een straal van 50 meter en met een binnenoppervlak van circa  $30.000 \text{ m}^2$ . Een vergroting van de straal van de caveerne met 6,7 cm levert een volumeverandering op van  $2100 \text{ m}^3$ . De tiltverandering wordt dan circa  $15 \cdot 10^{-9}$  rad. In dit voorbeeld is een drukverandering van ongeveer 100 atmosfeer ( $\approx$  bar) aangenomen om de gewenste volumeveranderingen te bewerkstelligen (compressibiliteit is  $4,0 \cdot 10^{-5}$  per bar). De getalswaarden kunnen ongeveer overeen komen met een reële situatie.

### *Tiltveranderingen en bodemdaling bij zoutwinning*

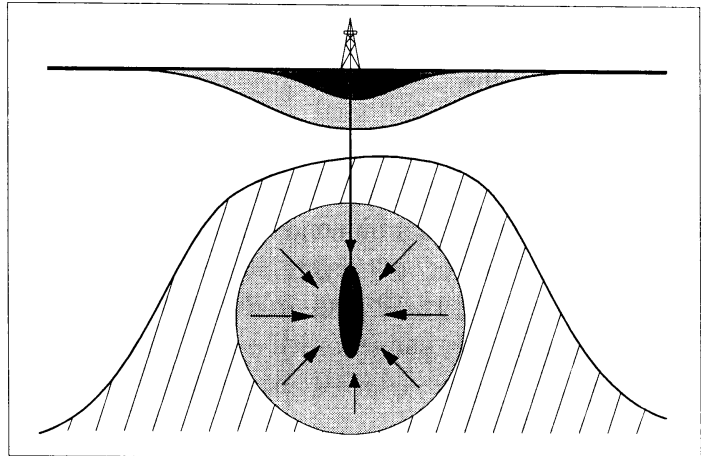
Bij zoutwinning op grote diepte spelen zich verschillende processen af. Het zout wordt enerzijds opgelost door het aangevoerde water en als pekkel naar boven gepompt, anderzijds vindt er aanvoer van steenzout plaats door plastisch gedrag in de omgeving van de caveerne die met pekkel gevuld is. De kruip is sterk afhankelijk van de viscositeit. De caveerne is het oplosvolume, de omgeving vormt het kruipvolume, ook wel convergentievolume genoemd.

De aanvoer van zout door plastisch gedrag is afhankelijk van de tegendruk van de pekkel in de caveerne. Zo ontstaat er dus de mogelijkheid van vergroting van de caveerne door oplossing bij hoge druk en aanvoer uit een groter volume bij lagere druk. Dit betekent in de praktijk dat de bodemdaling door zoutwinning op grote diepte wordt gegeven door het hele kruipvolume. Dit volume kan veel groter zijn dan de caveerne waar het zout opgelost wordt, vooral wanneer de winning in een ver gevorderd stadium is. Het gevolg van deze processen is dat een plotselinge drukverhoging in de caveerne om een pulsformige tiltverandering te krijgen uitsluitend informatie geeft over de caveerne zelf en niet over het hele kruipvolume. In het kruipvolume buiten de caveerne spelen vooral langzame processen. Zie figuur 4a.

Wanneer het zout vrij diep gewonnen wordt is het interessant om na te gaan hoe groot de bijdrage is van de plastische en de elastische processen aan de totale bodemdaling en de tilt. Stel bijvoorbeeld dat zout door oplossing wordt gewonnen op een diepte van 3 kilometer. Het oplosvolume kan grote afmetingen aannemen. In dit voorbeeld is een cilindervormige caveerne met een straal van 50 meter en een hoogte van 400 meter genomen. Het totale volume van de caveerne is dan  $3,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Verder wordt er verondersteld dat in de caveerne een hydrostatische druk heerst die wordt vermeerderd met een extra druk van 80 bar. Deze extra druk kan de convergentie van de caveerne regelen.

Met deze gegevens kan de bodemdaling worden uitgerekend wanneer onder de gegeven druk de convergentie 4% van het cavernevolumen per jaar is. Dus onder “steady state” omstandigheden vloeit jaarlijks circa 125.000 m<sup>3</sup> zout naar de caverne, dat als pekkel wordt gewonnen. De jaarlijkse bodemdaling kan worden geschat wanneer wordt aangenomen dat het bodemdalingsprofiel de vorm heeft van een omgekeerde kegel met een gelijk volume als de gewonnen hoeveelheid zout.

*Figuur 4a.  
Schematische bodemdalingsprofielen  
als gevolg van zoutwinning.  
Het zout is gearceerd, kruipvolume  
en caverne zijn respectievelijk licht  
en donker grijs weergegeven.*



De straal van de kegel zal bij de gegeven diepte ongeveer 3 tot 4 kilometer zijn. Dit is afhankelijk van het elastische gedrag en de dikte van de boven de zoutlaag liggende gesteenten. De bodemdaling bedraagt in dit voorbeeld 1,3 tot 0,75 centimeter per jaar. De tiltverandering die hieruit kan worden afgeleid, is 4,3 tot 1,8 10<sup>-6</sup> rad per jaar. Het is de vraag of deze tiltverandering groter is dan de lokale tiltverstoringen (Savage, 1979).

Op gezette tijden, bijvoorbeeld jaarlijks, zal de overdruk van 80 bar van het systeem gehaald worden voor onderhoud of revisie van onderdelen. Op dat moment heerst er in de caverne een hydrostatische druk van 1,1 bar per 10 meter dit is ongeveer 330 bar. Deze verandering van druk in relatief korte tijd kan dienen als drukpuls om hiermee de omvang van de caverne te berekenen en de bodemdaling die met de caverne verbonden is.

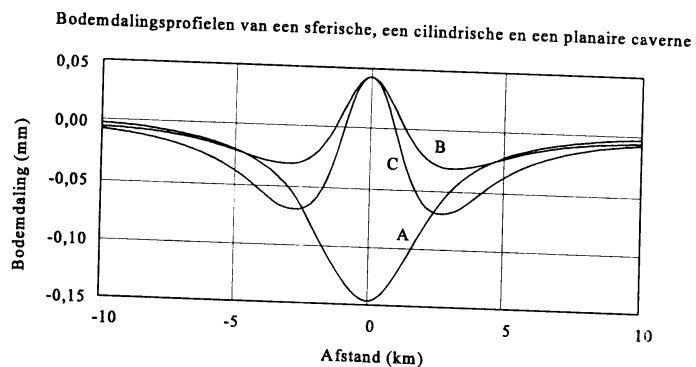
De drukverlaging zal twee gevolgen hebben. In de eerste plaats zal de convergentie toenemen van 4 % naar circa 10 % van het cavernevolumen per jaar. Wanneer het onderhoud een maand in beslag gaat nemen zal de volume afname van de caverne 26.000 m<sup>3</sup> bedragen. In de tweede plaats zal er een elastische reactie optreden die evenredig is met de drukverandering en het caverne volume. Een schatting van de elastische volumeafname komt uit op 10.000 m<sup>3</sup>. Hierbij is aangenomen dat de compressibiliteit van het systeem 4,0 10<sup>-5</sup> per bar is. In totaal zal de straal van de caverne circa 30 cm kleiner worden. Omdat het hier om aanzienlijke volumes gaat zal de druk in de caverne slechts geleidelijk aangepast kunnen worden waardoor de plastische en de elastische reactie in omvang vergelijkbaar kunnen zijn.

De vorm en de inhoud van de caverne die van belang zijn om het proces van zoutwinning in de hand te houden kunnen in theorie worden bepaald uit de vorm van de bodemdaling en de daarmee gepaard gaande tilt door de elastische reactie. De maximale tiltverandering in dit voorbeeld is 50 nanoradialen. Zie figuur 4c. Hierbij is rekening gehouden met de langwerpige vorm van de caverne. Door het effect van de dwarscontractie dat wordt bepaald door de Poisson-constante zal de bodem niet alleen dalen, zoals te verwachten is bij een drukafname, maar ook stijgen vooral boven de caverne. Zie figuur 4b. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een homogene halfruimte met een Poisson-constante  $\nu = 0,25$  (Maruyama, 1964). Voor de volledigheid zijn ook berekeningen gemaakt van een verticale planaire caverne. Deze situatie kan optreden bij vloeistof injectie in een verticale breuk (hydraulic fracturing).

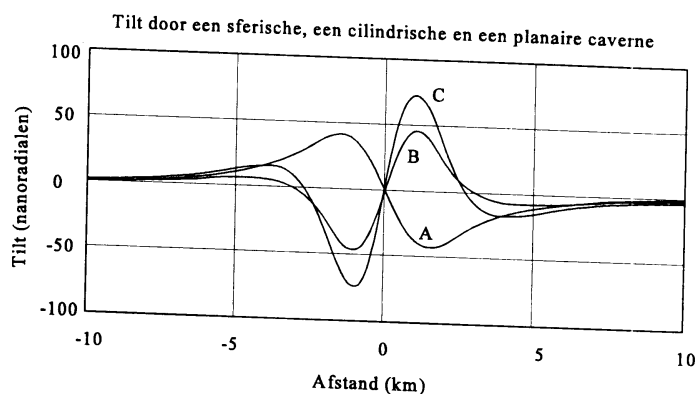
De tiltverandering door het plastische gedrag gedurende de drukverlaging is ongeveer 400 nanoradialen per maand. Bij het plastische gedrag speelt dwarscontractie geen rol. De bodemdaling in deze periode is circa 1,5 millimeter per maand.

In dit voorbeeld wordt duidelijk dat wanneer de plastische reactie van het medium vergelijkbaar is in volume met de elastische reactie en wanneer de tijdschalen van de processen overeenkomen, het erg lastig is, zo niet onmogelijk, met bodemdalingsgegevens of met tiltmetingen de omvang van de caverne te bepalen.

*Figuur 4b.  
Bodemdalingsprofielen van een sferische (A), een cilindrische (B) en een planaire (C) caverne met gelijke volumes op een diepte van 3 km.*



*Figuur 4c.  
Tiltveranderingen door een sferische (A) een cilindrische (B) en een planaire (C) caverne. Afgezien van de flanken keert het signaal van teken om in het geval van een sferische caverne.*



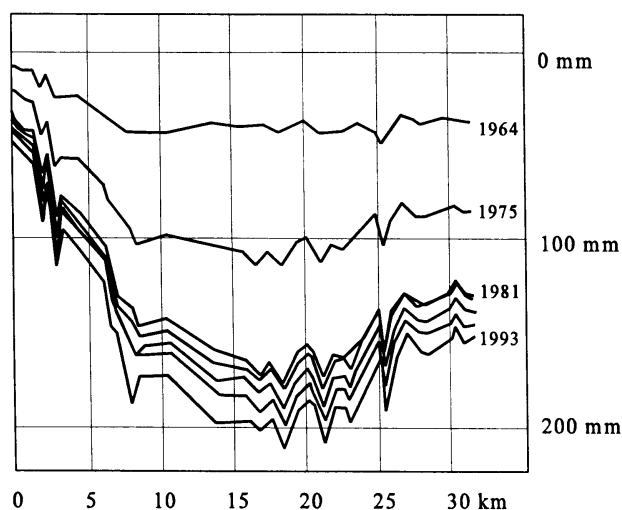
### *Tiltveranderingen en bodemdaling bij gaswinning*

Bij gaswinning ligt de relatie tussen drukverandering in het reservoir en volume van het reservoir waarschijnlijk wat duidelijker dan bij de winning van zout. Gegeven de permeabiliteit van het matrixgesteente kan berekend worden hoe snel een drukpuls zich door het gasveld voortplant. Dit bepaalt op zijn beurt weer de responstijd van de bodemdaling.

In de loop van de gasexploitatie in Nederland is een keur van bodemdalingsgegevens beschikbaar gekomen. Door onderzoek zijn de diepe en ondiepe processen, die bij bodemdaling van belang zijn, beschreven en als component in de totale bodemdaling geïdentificeerd. Het is in dit verband de moeite waard om tiltmetingen te verrichten om te verifiëren dat gaswinning op grote diepte inderdaad een gelijkmatige schotelvormige daling veroorzaakt.

De respons van de ondiepe ondergrond op langere termijn bepaalt de kleinschalige structuur van het bodemdalingsprofiel. Deze structuur elementen worden ook wel aangeduid met de term bliksemschichten. Zie figuur 5. In de lappendeken van weilanden en akkers die Nederland nu eenmaal rijk is, met verschillende waterhuishoudingen en verschillende klink van de bodem en daarmee verschillende responsies kan dit interessant onderzoek zijn. De stabiliteit van de meetpunten zelf door bewegingen in de bodem vormt een ander probleem in dit verband. De processen die kunnen optreden bij gasinjectie zijn waarschijnlijk snel genoeg om een zinvolle tiltmeting in dit verband mogelijk te maken.

*Figuur 5.*  
*Schematisch bodemdalingsprofiel*  
*van het Groningen gasveld*  
*van Groningen tot Delfzijl.*  
*Naar jaarverslag 1993 van het*  
*Staatstoezicht op de Mijnen.*



### *Aardbevingen en aseismische slip*

In het geval van seismische of aseismische slip kunnen tiltveranderingen aan het aardoppervlak optreden als gevolg van verschuivingen aan weerszijden van een breuk (Savage, 1966, Mansinha, 1971). Wat betreft aseismische slip is het de vraag of dit uit de tiltmetingen herkend kan worden omdat het tijdstip van optreden willekeurig is en omdat de tijdschaal van dit fenomeen niet bekend is.

Berekeningen aan de aardbeving van Alkmaar met een magnitude van 3,2 op de schaal van Richter en een diepte van 2,5 kilometer hebben aangetoond dat de statische verplaatsing van het aardoppervlak in verticale richting maximaal 0,1 millimeter was. Dit brengt een tiltverandering met zich mee van circa 75 nanoradialen. Wanneer een magnitude van 2,0 gekozen wordt en een diepte van 3 kilometer, zal geen meetbare tilt ( $<1$  nrad) aan het oppervlak optreden. De berekeningen zijn gemaakt voor een homogene elastische halfruimte (Maruyama, 1964).

De tiltmethode kan dus, in het beste geval, aantonen dat er langzame bewegingen gaande zijn in de ondergrond (Wood, 1971, Savage, 1979). Deze mogelijke uitkomst staat echter nog ver af van voorspelling van aardbevingen zoals dat zo nu en dan in de media wordt gesuggereerd. Het optreden van aseismische slip betekent nog niet dat ook aardbevingen zullen volgen.

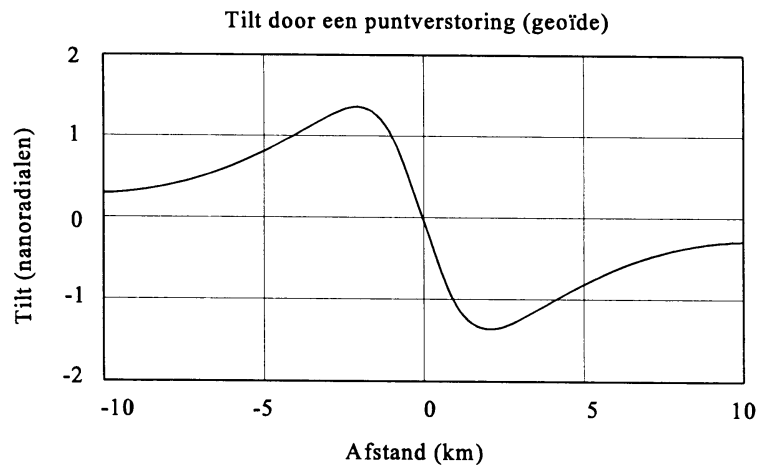
Voorspellen van aardbevingen betekent dat het tijdstip (periode), de plaats (gebied) en de kracht van de schok bepaald kunnen worden. Wanneer één van deze parameters buiten beschouwing wordt gelaten is de voorspelling aanzienlijk gemakkelijker, maar heeft veel minder betekenis. Het is nog niet mogelijk zware aardbevingen te voorspellen, ook internationaal niet, ondanks veel onderzoek. Dit geldt ook voor lichte schokken. Bij vulkanische processen is tiltmeting wél een gevestigde techniek om tijdig waarschuwingen te geven (Gouly, 1976, Oikawa, 1991).

#### *Veranderingen in de geoïde*

Wanneer de massaverdeling in de aarde veranderd wordt, zal ook de geoïde veranderen. De geoïde is het oppervlak om de aarde waar de valversnelling constant is. Dit is het fictieve oppervlak dat gemiddeld in de tijd door het wateroppervlak van de aarde aangenomen wordt wanneer de oceanen verbonden zouden zijn met alle binnenwateren zonder sluisen. Formeel is de geoïde dus het equipotentiaal oppervlak op zeeniveau. De verandering van de geoïde is het directe gevolg van de verandering in het gravitatieveld door verandering in de massaverdeling. Bij hoge bergketens of diepe oceaantroggen is het gravitatieveld van de aarde verstoord ten opzichte van het gemiddelde veld. Ook relatief kleine massaverplaatsingen kunnen het gravitatieveld verstoren wanneer de afstand tot het oppervlak klein is.

Stel dat bijvoorbeeld zout wordt gewonnen en dat een caverne is ontstaan, die met water gevuld is, op een diepte van 3000 meter met een straal van 100 meter. De verandering van het gravitatieveld bedraagt aan het oppervlak ongeveer 0,003 mgal. Een mgal is circa een miljoenste g. Deze verandering van de valversnelling kan gemakkelijk worden omgerekend in een pseudo-tiltverandering. In dit voorbeeld komt dit uit op maximaal 1,3 nanoradiaal. Zie figuur 6. Deze waarden zijn dus niet groot genoeg om werkelijk van invloed te zijn op de meetresultaten. Dit laatste is een gelukkige bijkomstigheid omdat anders het verschil tussen bodemdaling en massaverandering in de ondergrond niet te meten is met elektronische waterpassen. Een tiltmeter op basis van vloeistofrotatie heeft deze complicatie helemaal niet.

Wanneer een caverne op een geringere diepte gesitueerd wordt, kan de situatie veranderen. Bijvoorbeeld zal een holte gevuld met water op een diepte van 200 meter met een straal van 50 meter een verandering van ongeveer 0,1 mgal geven. Dit komt overeen met een pseudo-tiltverandering van 35 nanoradialen.

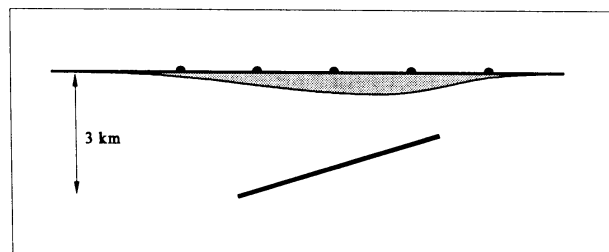


*Figuur 6.*  
*Tiltverandering door een grote massa van 4,6 miljoen ton met een straal van 100 m. op een diepte van 3 km,  $\Delta\rho = 1,1$ .*

Om bovenstaande waarden wat meer perspectief te geven is ook de gradiënt van de zwaartekracht in verticale richting  $\Delta g = dg/dz$  berekend. De gradiënt van het zwaartekracht veld van de aarde  $\Delta g/g$  is  $3 \cdot 10^{-7}$  per meter,  $\Delta g$  is 0,3 mgal per meter.

*Voorbeeld berekening van bodemdaling uit tilt*

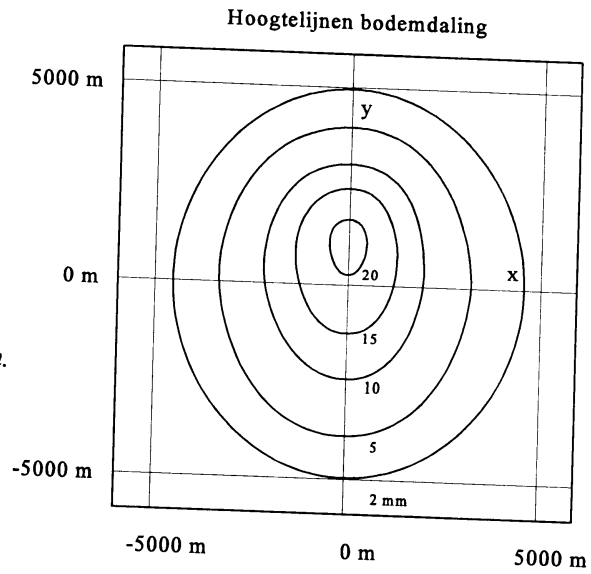
In dit rekenvoorbeeld is een scheefstaande gasvoerende laag op een diepte van circa 2 kilometer aangenomen. De laag heeft afmetingen van 5 x 2 kilometer en is 100 meter dik. Door de scheve stand van de laag is het bodemdalings- en tiltprofiel asymmetrisch. De berekende profielen zijn het gevolg van een drukverandering van 100 atmosfeer. De profielen illustreren de ruimtelijke uitgestrektheid van het tiltveld en de orde van grootte van de te verwachten effecten. Er is in deze berekeningen niet geprobeerd om de realiteit in alle facetten te modelleren. Zo is uitgegaan van dezelfde geomechanische eigenschappen voor de hele gesteentekolom volgens het Geertsma-model (Geertsma, 1973). Zie figuur 7a-d.



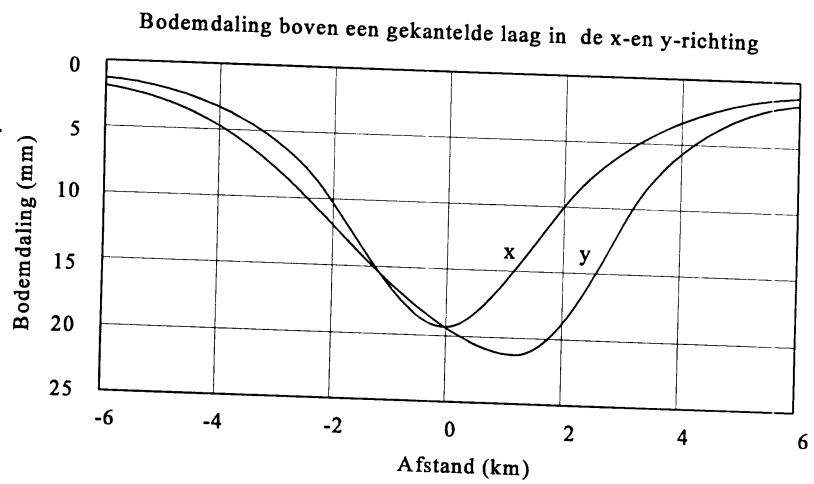
*Figuur 7a.*  
*Schematische situatieschets. Naar verhouding is de bodemdaling 40.000 x te groot getekend.*



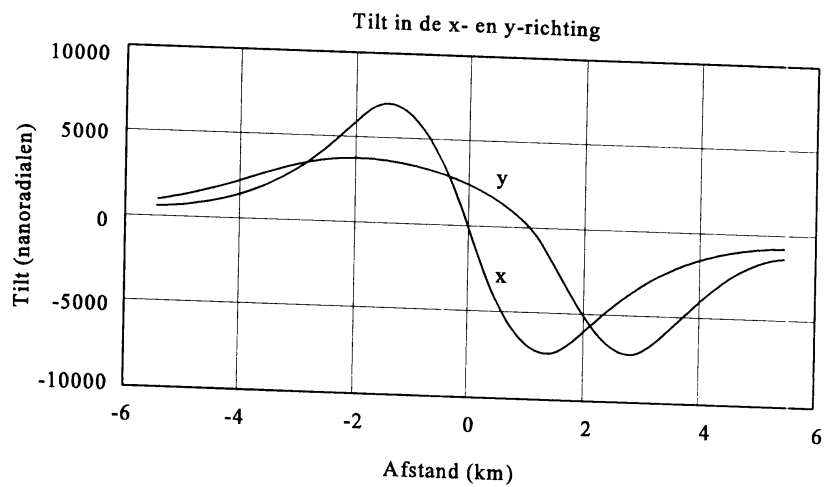
**Figuur 7b.**  
 Hoogtelijnen in mm van het bodemdalingsprofiel.  
 Doordat de laag in de positieve y-richting meer aan het oppervlak ligt verschuift het minimum van de kom in dezelfde richting. De asymmetrie in x- en y-richting wordt ook veroorzaakt door de afmetingen van de plaat 2 x 5 km.



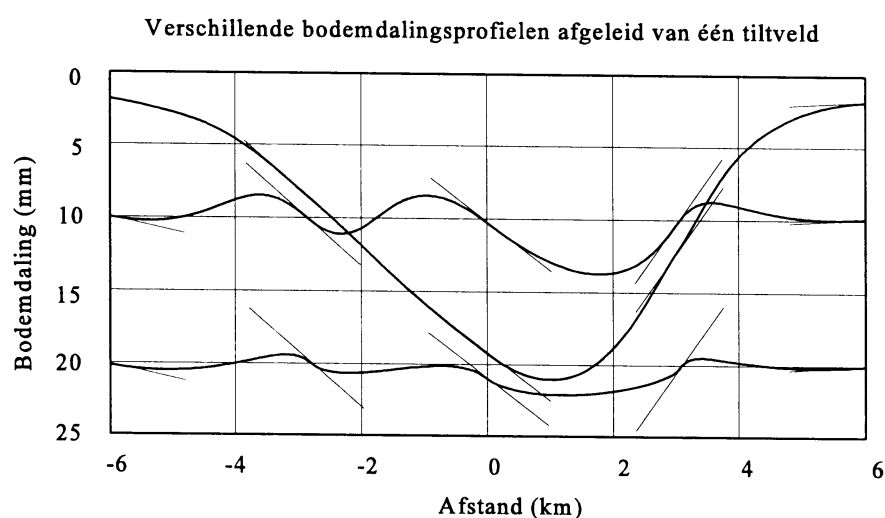
**Figuur 7c.**  
 Bodemdalingsprofielen.



**Figuur 7d.**  
 Tiltprofielen.



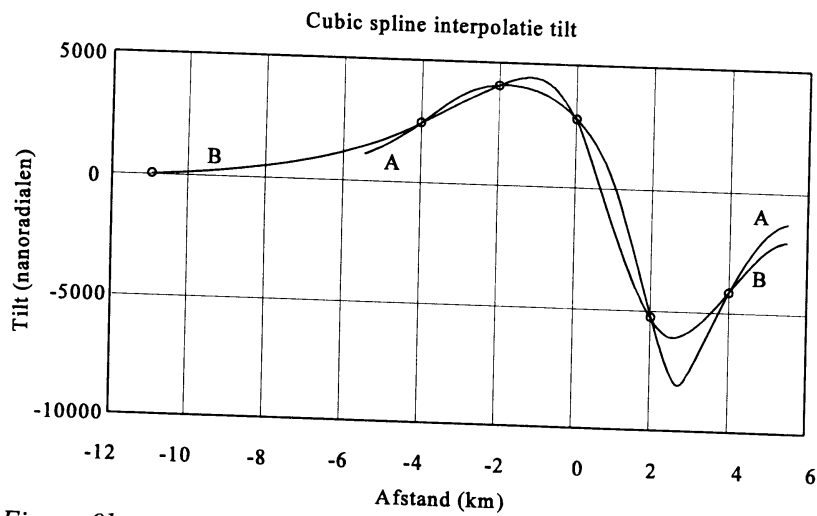
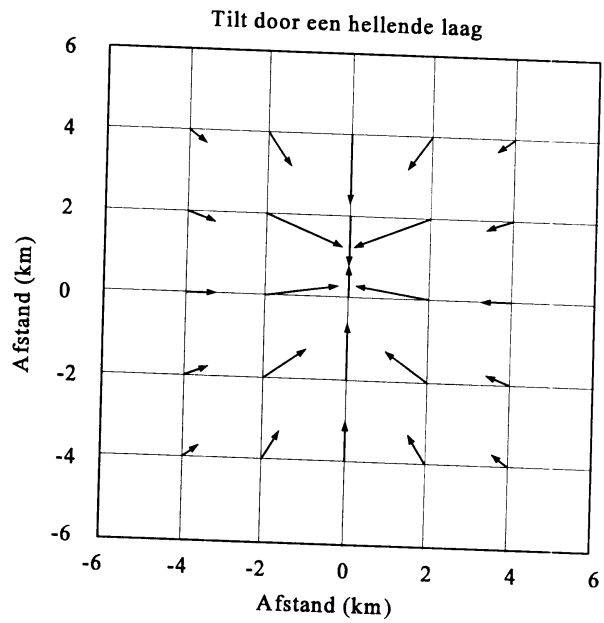
Bovenstaande voorbeelden gaan van de veronderstelling uit dat bodemdaling en tilt in elk punt van het oppervlak bekend is. In werkelijkheid wordt tilt in een relatief klein aantal punten gemeten. Hierdoor is een goede interpolatieprocedure onmisbaar. In principe zijn vele oplossingen mogelijk van schaars bemonsterde differentialen. Zie figuur 8. In dit voorbeeld van een hellende laag zijn een aantal interpolaties van tiltmetingen berekend. Het werd daardoor duidelijk dat een onzorgvuldige interpolatieprocedure tot onjuiste schattingen leidt, zowel van het aantal mogelijke bronnen als van de diepte. De interpolatie moet zijn aangepast op voorkennis van de optredende processen, de te verwachten diepte en de uitgestrektheid van de bron. Voor interpolatie komen technieken in aanmerking die gebruik maken van “cubic splines” of tweedimensionale Fourier-transformaties.



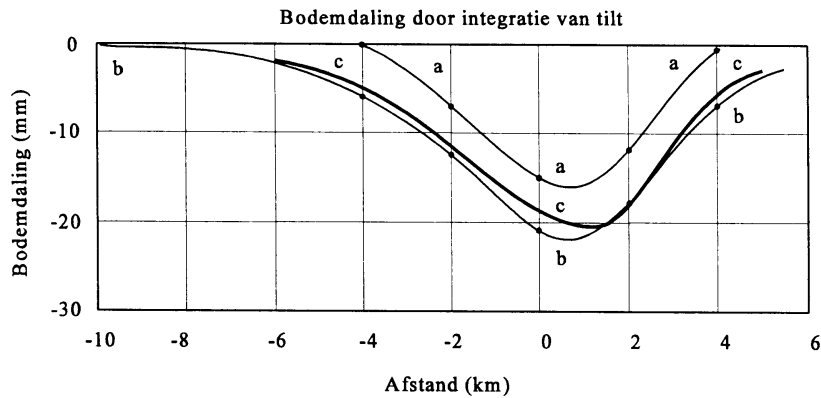
*Figuur 8.*  
*Verschillende bodemdalingsprofielen die kunnen behoren bij één tiltveld.*  
*Het tiltveld is in dit voorbeeld afkomstig van een hellende laag en is op een*  
*vijftal punten gemeten. De tiltrichting van het profiel is in deze punten met*  
*dunne lijnen weergegeven. Naar mate de bodemdaling kleiner gemaakt*  
*wordt, bevat het bodemdalingsprofiel hogere frequenties.*

In de volgende berekeningen is met een cubic splines methode geprobeerd in het voorbeeld van de hellende laag een goede interpolatie te vinden wanneer metingen van een tilt-array met 25 elementen in een gebied van 8x8 km verwerkt moeten worden. Zie figuur 9a. De berekeningen zijn voor het asymmetrische profiel in de y-richting gedaan om de resultaten overzichtelijk te presenteren. Berekeningen in twee dimensies met cubic splines leveren grosso modo dezelfde resultaten. Om de effecten van de integratieconstante te laten zien, zijn ook interpolaties gemaakt waarbij één tiltstation ver buiten het tilt-array is opgenomen op 11 km van het centrum. Zie figuur 9b-c.

*Figuur 9a.  
Tilt door een hellende laag gemeten  
met een tilt-array op 25 punten.  
In elk meetpunt zijn de grootte en  
de richting van de tilt aangegeven.*



*Figuur 9b.  
Interpolatie door cubic splines van het tiltprofiel. De meetpunten zijn  
aangegeven met cirkeltjes. Curve A is de analytische berekening.  
Curve B is berekend door cubic spline interpolatie uit de gegevens van  
de 6 meetpunten. De meetpunten komen overeen met de verticale as  
uit figuur 9a. Het punt op -11 km ligt op de negatieve y-as. Voor het  
gebied tussen -4 en 4 km is de cubic spline interpolatie gelijk met of  
zonder het punt op -11 km.*



*Figuur 9c.*  
 Bodemdaling berekend door integratie van de tiltmetingen. Curve 'a' is berekend door uitsluitend meetpunten van het tilt-array tussen -4 en +4 km op te nemen. In curve 'b' is bovendien nog een punt opgenomen op -11 km. Zie figuur 9b. Curve 'c' is de theoretische curve uit een analytische berekening.

De berekeningen laten zien dat bij de gekozen parameters zoals diepte en uitgestrektheid van de laag en de afstand tussen de sensoren, het tiltprofiel maar zeer ten dele wordt gereproduceerd. De cubic spline methode benadrukt de grote golflengtes in het profiel. De scherpe pieken of dalen worden afgerond. Dit is duidelijk te zien op een afstand van +3 km in het dal van het profiel waar de laag het meest ondiep is. Zie figuur 9b. Voor deze situatie zou de afstand tussen de sensoren dus verkleind moeten worden of er zouden sensoren moeten worden toegevoegd. De Fourier-methode geeft vergelijkbare resultaten.

De integratie naar bodemdaling gaat in dit voorbeeld opvallend goed. Er zijn geen meetfouten of ruis toegevoegd aan de meetgegevens. De overeenstemming is met name goed wanneer het extra station in de berekening betrokken wordt. Zie figuur 9c. Over het geheel is het bodemdalingsprofiel iets symmetrischer dan de werkelijkheid, door de nadruk op de grote golflengtes. Onder de condities in deze modelberekening is de grootste afwijking circa 15%.

Wanneer wèl een normaal verdeelde foutendistributie aan de meetwaarden wordt toegevoegd blijkt, dat weliswaar de tiltprofielen kunnen afwijken, maar dat de bodemdalingsprofielen opmerkelijk nauwkeurig blijven. Een verdeling met een standaarddeviatie die 10% is van de grootste tiltwaarde geeft nog een acceptabel bodemdalingsprofiel dat binnen 20% van de theorie ligt. Wanneer het aantal meetpunten wordt vergroot, bijvoorbeeld tot 8, is de verbetering aanzienlijk en blijft binnen 10% van de analytische waarden. In dit opzicht is de interpolatiemethode robuust.

### **Inversie van de bodemdalingsschotel**

De vorm van de bodemdalingsschotel maakt het mogelijk om ook de details van de verandering in de diepte tot op zekere hoogte af te beelden. Dit is een wiskundige opgave waarvoor in de meeste gevallen niet een eenduidige oplossing mogelijk is. Ook in dit geval is

de oplossing niet uniek. Bijvoorbeeld, één enkele bolvormige caveerne geeft vrijwel dezelfde bodemdaling als een convexe ruimte, een omgekeerde schotel, die zich op een minder grote diepte bevindt. In geologische zin is het denkbaar dat een dergelijk onderscheid gemaakt moet kunnen worden. Bijvoorbeeld wanneer steenzout in de top van een koepel is weggespoeld terwijl de bedoeling was het zout op grotere diepte te winnen. Het gegeven van het langzame groeiproces van de omvang van een caveerne of de geleidelijke drukverandering in een gasveld maakt echter wel een meer eenduidige oplossing mogelijk. Of dit werkelijk tot een unieke oplossing leidt, is echter de vraag.

De inversie gaat het meest eenvoudig door “trial and error”, waarbij telkens het voorwaartse probleem wordt doorgerekend, dat wèl een eenduidige oplossing heeft. Bij elke “trial” wordt de afwijking met de werkelijk gemeten waarden bepaald. Aan de hand van de afwijkingen kan worden bepaald in welke richting de volgende stap in het benaderingsproces gezet moet worden om een betere aanpassing te bereiken. Hierbij kan ook andere informatie dan uitsluitend tiltmetingen gebruikt worden.

In veel geofysische technieken is van een zuivere inversie geen sprake omdat de resultaten niet uniek zijn of omdat de inversie gewoon te moeilijk is. Hierdoor wordt in veel gevallen volstaan met de optimale aanpassing van de meetresultaten aan een bestaand wiskundig model van wat verondersteld wordt de werkelijke situatie te zijn. Uitspraken over dergelijke technieken zijn dus alleen maar binnen dit wiskundige model geldig en hebben geen algemene geldigheid. Dit wordt in de praktijk van alledag vaak vergeten.

Het is te verwachten dat uitsluitend de ruwe vorm van bijvoorbeeld een zoutcaveerne met deze techniek te bepalen is. Ook kan bijvoorbeeld worden nagegaan hoe gasstromen zich gedragen bij snelle extractie of injectie van gas in de ondergrond, gegeven dat er zich aan het aardoppervlak voldoende grote bewegingen voordoen. Het is bij deze berekeningen dus van essentieel belang om na te gaan in hoeverre de gevonden oplossing ook werkelijk een unieke oplossing is. Wanneer de oorzaak van de maaiveldveranderingen dicht onder het aardoppervlak gelegen is en een behoorlijke uitgestrektheid heeft werkt de methode beter.

Wellicht is hier een eenvoudig voorbeeld van belang om de term “ruwe vorm” wat nader te specificeren. Stel dat voor een netwerk van 25 tiltmeters gekozen wordt. Bij de eerste meting van tilt kunnen dan 25 tiltvectoren bepaald worden, dat zijn 50 getallen. Stel ook dat geen van deze 50 getallen redundante informatie bevatten. De resolutie van het ruimtelijk veelvlak dat maximaal kan worden bepaald ligt hiermee vast op 16 hoekpunten van driedimensionale coördinaten. Dit veelvlak kan dus maximaal 28 vlakjes bevatten. Dit is een heel aardige theoretische resolutie in de ruimte. Wanneer echter het aantal onafhankelijke meetpunten met een factor 2 of 3 gereduceerd wordt, wat dicht bij de werkelijkheid zal zijn, dan zijn er nog 5 tot 8 hoekpunten over voor 6 tot 12 vlakken. Zelfs een ellipsoïde met drie ongelijke hoofdassen heeft al 9 parameters. Dit zijn drie coördinaten voor het zwaartepunt, drie lengtes van de assen en drie hoeken voor de oriëntatie van de ellipsoïde.

Een andere reden waarom inversie van een bodemdalingsschotel naar de vorm van een caveerne zo lastig is, wordt duidelijk wanneer de curve van verschillende bronnen met elkaar vergeleken worden. Het onderscheid naar diepte en naar uitgestrektheid van de caveerne is door de slappe functie die de bodemdaling beschrijft lastig te maken.

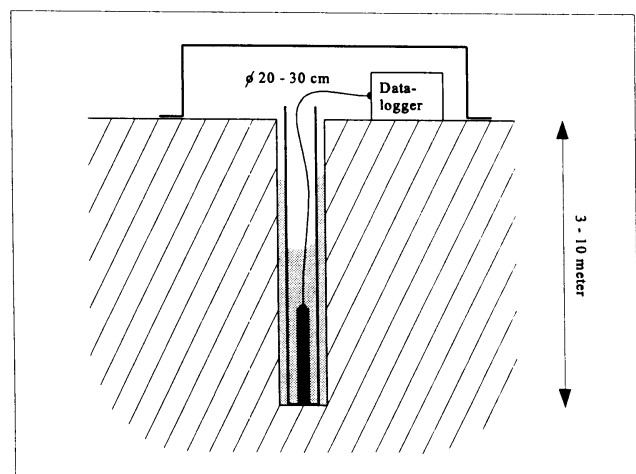
Het bovenstaande laat zien dat een analyse van de bereikbare resolutie en de aanwezigheid van natuurlijke ruisbronnen van belang is om tot een wel overwogen oordeel over het ruimtelijk oplossend vermogen van de techniek te komen. Dit is bepaald geen triviaal wiskundig inversieprobleem.

Met de modulatie techniek komt het meetproces dus neer op de wiskundige integratie van de primaire meetgegevens. Dus de integratie over de grootte van de actie dat het meetgegeven uitlokt en het tijdsverloop van de modulatie. In het algemeen hebben integraties de neiging in het verloop van het integratie proces te divergeren. Dit maakt de techniek lastiger te gebruiken over langere periodes van tientallen jaren.

### Instrumentatie

De instrumentatie voor de meting van tilt op één tiltstation zal bestaan uit de tiltmeter zelf, een analoog/digitaal omzetter, een data acquisitiesysteem en een archiveringssysteem. Omdat dit totale systeem weinig plaatsruimte inneemt kan het geheel geplaatst worden in een kleine betonnen bak net onder het maaiveld. Ook kan er voor gekozen worden kleine instrumentatie containers uit plastic of staal direct in te graven. Op lange termijn is dit veel minder stabiel. Bovendien moet de tiltmeter dan buiten dit punt worden ingegraven. In figuur 10 is een eenvoudige boorgattiltmeter weergegeven in een standaard configuratie (Applied Geomechanics, Evans<sup>1</sup>, 1983). Figuur 11 geeft een detail van de tiltmeter zelf.

*Figuur 10.*  
*Mogelijke experimentele opstelling van één element van een tilt-array.*  
*De tiltsensor wordt geplaatst in een boorgat op een diepte van 3 - 10 m.*  
*De diameter van de bekistingsbuis is 20 - 30 cm, deze wordt met fijn zand vastgezet. De sensor zelf wordt ook met aangestampt zand gefixeerd.*

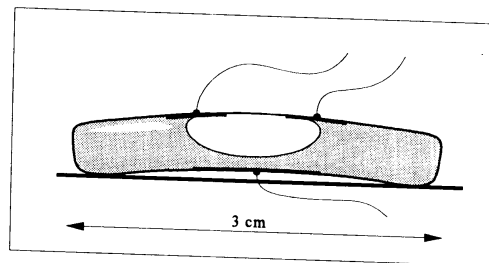


De stabiliteit van de beste tiltmeters is groot. Voor de tiltmeter die aanvankelijk voor het Institut de Physique du Globe (IPG) in Parijs ontwikkeld is, met het oog op getijdemetingen, en die geheel van kwartsglas gemaakt is, bedraagt de resolutie van de meetgegevens  $10^{-10}$  rad. Zie figuur 12. De nauwkeurigheid is  $10^{-9}$  rad en de stabiliteit over een jaar is  $3.0 \cdot 10^{-7}$  rad. De tiltmeter is van kwartsglas gemaakt om temperatuursinvloeden te minimaliseren (SIG<sup>SA</sup>).

De elektronische waterpas, zie figuur 11, is gevoeliger voor veranderingen van de omgevingstemperatuur dan de tiltmeter van kwarts. Wanneer de waterpas in een ondiep boorgat geplaatst wordt, is dit probleem grotendeels ondervangen. Meestal wordt toch de temperatuur van de sensoren gemeten als een integraal onderdeel van de meetprocedure. De gevoeligheid is circa  $2 \cdot 10^{-8}$  rad (rms-waarde) voor perioden in de orde van uren onder goede omstandigheden (Westphal, 1983). Een twee-assige elektronische waterpas is veelvuldig toegepast in de geofysica en is geproduceerd door Rockwell voor de Minuteman raketten. De elektronische waterpas kan ook als horizontale seismometer gebruikt worden (Miller, 1978).

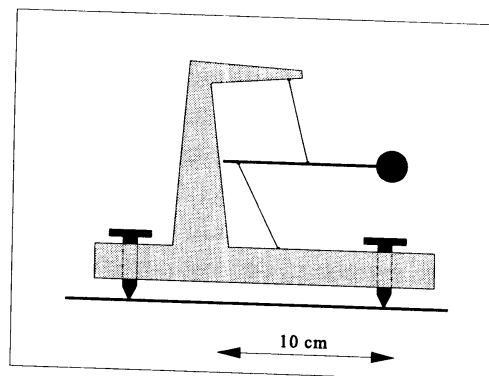
*Figuur 11.*

*Schema van een elektronische waterpas. Een afgesloten glazen buis is gevuld met elektrolyt. De elektroden zijn opgenomen in een brugschakeling om de positie van de luchtbel te meten. (Applied Geomechanics)*



*Figuur 12.*

*Tiltmeter gebaseerd op een horizontale slinger, Zöllner ophanging. De massa die aan een arm bevestigd is hangt aan twee snaren. Dit type slinger kan geheel uit kwarts gemaakt worden. De massapositie kan optisch of elektronisch (condensatorbrug) met grote nauwkeurigheid worden gemeten.*



Een gebruikelijke straal voor de kromming van elektronische waterpassen is 30 cm. De details van het fabricageproces worden meestal geheim gehouden als bedrijfsinformatie. Dit betreft het materiaal van de elektroden, het elektrolyt, het gas in het belletje en de speciale bewerkingen van de binnenkant van de glasbuis. Deze details zijn van belang om te voorkomen dat het belletje gaat vastzitten aan de glaswand of aan de elektroden ook bij zeer kleine verplaatsingen (Westphal, 1983). De verplaatsing van de bel  $\Delta x$  wordt gegeven door  $\Delta x = \Delta \Phi \cdot R$ . Hierin is  $\Delta \Phi$  de verandering van de tilhoek en  $R$  de straal van de glasbuis. Een tiltverandering van  $10^{-8}$  rad geeft dus een verplaatsing van de bel van 3 nanometer.

Niet alleen de waterpas zelf maar ook de details van de behuizing zijn van belang om een stabiele werking te garanderen. Het gaat hier bijvoorbeeld om de thermische isolatie en de methode waarop het instrument waterpas gezet wordt. Stel, dat een materiaal met een zeer kleine uitzettingscoëfficiënt zoals Invar wordt gebruikt voor de stelschroeven. Volgens de formule  $\Phi = K \cdot \Delta L / D$  kan dan de tilt  $\Phi$  worden berekend als gevolg van een lengteverschil  $\Delta L$  tussen de poten, met een uitzettingscoëfficiënt  $K$  en een onderlinge afstand  $D$ . Uit de bovenstaande formule volgt dat voor poten van Invar met een onderlinge afstand  $D = 10$  cm en met  $K = 1,25 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  een homogene temperatuurverandering van  $1,0$  °C al een kleine tiltverandering van  $1,25 \cdot 10^{-8}$  rad veroorzaakt wanneer  $\Delta L$  slechts  $1,0$  mm is. Dus variaties in het aangrijpingspunt van de schroefdraad tussen de verschillende stelschroeven kan al aanleiding zijn tot een behoorlijke temperatuur afhankelijkheid (Westphal, 1983).

Bovenstaande voorbeelden zijn illustraties van tiltmeters met een korte basislijn, in de orde van centimeters. Wanneer de tilhoek wordt gemeten als een verhouding van de uitwijking van een massa en de basislijn, zoals in bovenstaande voorbeelden het geval is, kan de uitwijking groter gemaakt worden door de basislijn te verlengen. Van deze eigenschap wordt gebruik gemaakt bij tiltmeters met een lange basislijn. De lengte van de basislijn kan bij deze instrumenten variëren van circa één meter tot enkele honderden meters. Meestal zijn deze tiltmeters gebaseerd op de wet van de communicerende vaten waarbij een vloeistofniveau het hoogteverschil bepaald tussen twee meetpunten. Deze tiltmeters komen vooral voor toepassing in aanmerking in een observatorium.

In het voorgaande zijn de instrumentele grondslagen van tiltmeters beschreven. Deze meters komen onder verschillende namen voor in de literatuur. Aan de naam van het instrument kan niet op voorhand een maat voor de gevoeligheid worden toegekend. Zo is de term clinometer en inclinometer verbonden met een van de meest gevoelige en stabiele tiltmeters (SIG<sup>SA</sup>).

De stabiliteit van de meeste tiltmeterstations is beperkt voor lange termijn metingen. Dit wordt veroorzaakt door instrumentele effecten en de details van de plaatsing van de tiltstations (Agnew, 1986). Als gevolg hiervan zijn lange termijn tiltmetingen met kleine amplitudes zelfs incoherent voor afstanden tussen de verschillende stations in de orde van tientallen meters (Wyatt, 1980). In de pulsmethode wordt echter gebruikt gemaakt van een modulatie techniek die alleen stabiliteit eist in de veel kortere perioden waarin er voor de tiltmeters een goed waarneembaar en coherent signaal geregistreerd wordt.

De A/D-omzetter van een tiltmeter heeft tenminste 2 kanalen voor de bemonstering met een grote resolutie en een groot dynamisch bereik. Op dit moment zijn goedkope 24 bits A/D-omzetteren gemakkelijk beschikbaar. Het dynamisch bereik van deze omzetteren is 1: 16.777.216; dit is ruim 140 dB. De bemonsteringsfrequentie is over het algemeen zeer laag zoals één sample per 10 tot 100 seconden. Deze lage bemonsteringsfrequentie maakt een verregerende “on-line” gegevensbewerking mogelijk zodat de resolutie en dynamisch bereik ook inderdaad gehaald worden.



De gegevens worden in het algemeen continu in de data-acquisitiecomputer opgeslagen. Om een idee te krijgen van de hoeveelheid gegevens zijn de volgende berekeningen van belang. Per dag worden  $24 \times 60 \times 6 = 8640$  samples genomen, één sample per 10 seconden. Met een resolutie van 24 bits en twee kanalen komt dit neer op circa 54.000 bytes per dag. Een PC heeft tegenwoordig standaard een vaste schijf van 200 megabytes (MB) of meer. Dit betekent dus dat met eenvoudige middelen gemakkelijk 10 jaar onafgebroken kan worden geregistreerd, zonder dat het computergeheugen leeggehaald moet worden. Voor eenvoudige toepassingen is een telefoonlijn overbodig.

Wanneer de tiltstations zijn uitgerust met elektronica en computers (portable PC's, laptops), die zeer weinig stroom verbruiken, dan zijn zelfs zonnepanelen of batterijen voor de stroomvoorziening gebruikelijk. Dit maakt de plaatsing van de stations meer onafhankelijk van het 220 V net. Het is daarmee niet alleen flexibeler voor de plaatsing, maar ook goedkoper in aanleg.

Per station zullen de investeringskosten voor permanente aanschaf tussen de 20 en 35 kf liggen. Zie tabel 1. Wanneer werkelijk het onderste uit de kan wordt gehaald kan waarschijnlijk een systeem worden ontwikkeld voor niet meer dan 15 kf per station. De flexibiliteit voor de plaatsing en de data kwaliteit is dan verminderd. De totale investering voor een tilt-array van 25 stations varieert dus tussen 375 en 875 kf.

De kosten van de dataverwerking zijn sterk afhankelijk van de mate waarin de ontwikkelingskosten betrokken worden in de afrekening. De ontwikkelingskosten van dergelijke metingen zijn namelijk hoog. Bovendien worden de kosten ook bepaald door tijd en inspanning die het kost om de pulsmethode toe te passen. De resultaten van die metingen zijn vervolgens bepalend voor het technisch-wetenschappelijke niveau van de daar op volgende dataverwerking.

<i>prijs in guldens</i>	minimum prijs	reële prijs
Tiltmeter	5.000	7.000
Computer, A/D-kaart	4.000	8.000
Plaatsing, behuizing	10.000	20.000
Totaal	19.000	35.000

Tabel 1. *Kosten tiltstation*

## **Verantwoording**

In het proces van het tot stand komen van dit rapport naar aanleiding van de voordracht van M. D. Wood, is naast de onafhankelijke meningsvorming, het narekenen van de belangrijkste prestaties van de techniek, ook contact gezocht met gebruikers van de techniek met name het United States Bureau of Mines (USBM). Dit is het Amerikaanse equivalent van het Nederlandse Staatstoezicht op de Mijnen. Het USBM zei tiltmetingen te gebruiken voor “monitoring” om gebeurtenissen te zien aankomen, zoals grote verzakkingen, en niet om veiligheid te waarborgen. Het volgen van de situatie (monitoring) vond plaats door de USBM in eigen beheer. Daarnaast heeft het Amerikaanse bureau antwoorden gegeven op een groot aantal vragen die in dit rapport verwerkt zijn, deels ter bevestiging van de bestaande oordeelsvorming.

Er is ook contact geweest met Dr. G. R. Holzhausen van Applied Geomechanics Incorporated op advies van het USBM om een aantal instrumentele vragen te beantwoorden. Deze firma, die tiltmeters produceert, stelt met name dat tiltmetingen tot circa 1-2 km goede resultaten kunnen geven maar dat naar hun oordeel veel dieper niet goed mogelijk is. Uitzonderingen zijn echter mogelijk (Pollard, 1979, pag. 53).

Over zoutwinning zijn met name de gesprekken met Ir. J. J. E. Pöttgens van het Staatstoezicht op de Mijnen belangrijk geweest voor een goed inzicht. Tot slot zijn er informele contacten geweest met een aantal buitenlandse collega's die ervaring hadden met tiltmetingen.

## Constateringen, conclusies en aanbevelingen

Puntsgewijs volgen hier de belangrijkste constateringen, conclusies en aanbevelingen van dit rapport.

- \* In Nederland is geen praktische ervaring op het gebied van tiltmetingen. Dit rapport bevat een theoretische schatting in hoeverre tiltmetingen bruikbaar zijn om maaiveld veranderingen in kaart te brengen, onder de Nederlandse omstandigheden. De mogelijkheden die de conventionele waterpassing biedt zijn hierbij als vergelijking genomen.
- \* De tilttechniek steunt op een modelmatige aanpak en is dus geen primair meetproces zoals waterpassing. Dit brengt een aantal theoretische onzekerheden met zich mee.
- \* De instrumentatie voor tiltmetingen is van elementaire aard en is op de commerciële markt goed verkrijgbaar. De totale kosten betreffen met name de infrastructuur.
- \* Tiltmetingen kunnen voor een klein deel waterpasmetingen vervangen. Dit is vooral het geval wanneer er relatief snelle gecontroleerde veranderingen kunnen worden aangebracht in geologische structuren waarvan de omvang in goede verhouding staat met de diepte.
- \* Tiltmetingen zijn minder geschikt wanneer naar kleine langzame veranderingen in het bodemprofiel gezocht wordt, die een min of meer onbekende oorzaak hebben. Dit betreft dus ook de stabiliteit van de meetpunten.
- \* Tiltmetingen zijn minder geschikt om processen op grote diepte te onderzoeken. Om tot een betrouwbaar meetresultaat ten opzichte van de ruis te komen, zijn grote krachten voor de forcering van de bodembewegingen noodzakelijk, of grote volumes. Dit betreft dus vooral transport eigenschappen.

Naar aanleiding van dit rapport en op grond van bovenstaande constateringen en conclusies worden de volgende aanbevelingen gedaan.

- \* Het verdient aanbeveling om een gericht onderzoek te verrichten naar de praktische bruikbaarheid van tiltmetingen in verband met de studie van de processen waarbij bodembewegingen een rol spelen. Pas dan kan een volledig oordeel geveld worden over een specifieke toepassing van de tilttechniek.
- \* Dit onderzoek kan een eerste stap zijn naar een meer algemene evaluatie van de bruikbaarheid van tiltmetingen als een middel van onderzoek naar de diepere ondergrond in Nederland.

De Bilt / Genève, november 1995-februari 1996, H. W. Haak.

## Referenties

- Agnew, D. A., Strainmeters and Tiltmeters, *Rev. Geophys.*, **24**, 579-624, 1986.
- Applied Geomechanics Incorporated, product documentatie, 1336 Brommer Street, Santa Cruz, CA 96062, USA.
- Evans<sup>1</sup>, K., On the Development of Shallow Hydraulic Fractures as Viewed Through the Surface Deformation Field: Part 1- Principles, *J. Pet. Tech.*, 406-410, 1983.
- Evans<sup>2</sup>, K., and G. Holzhausen, On the Development of Shallow Hydraulic Fractures as Viewed Through the Surface Deformation Field: Part 2- Case Histories, *J. Pet. Tech.*, 411-420, 1983.
- Geertsma, J., A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: The homogeneous case, *Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen.*, **28**, 43-62, 1973.
- Goult, N. R., Strainmeters and tiltmeters in geophysics, *Tectonophysics*, **34**, 245-256, 1976.
- Holzhausen<sup>1</sup>, G. R., C. C. Card, J. M. Raisbeck, M. D. Wood, and T.L. Dobecki, Hydraulic Fracture Growth During Steam Stimulation in a Single Well Test, Proceedings Society of Petroleum Engineers California Regional Meeting, Bakersfield, 1985.
- Holzhausen<sup>2</sup>, G. R., C. H. Haase, S. H. Stow, and G. Gazonas, Hydraulic-fracture growth in dipping anisotropic strata as viewed through the surface deformation field, Proceedings 26<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics / Rapid City, SD 1985.
- Mansinha, L., and D. E. Smylie, The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **61**, 1433-1440, 1971.
- Maruyama, T., Statical Elastic Dislocation in an Infinite and Semi-Infinite Medium, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo*, **42**, 289-368, 1964.
- Mat-Isa, A. R., and M. J. Usher, An angular accelerometer for reducing the effect of tilt in seismic records, *Geophys. J. Int.*, **109**, 197-208, 1992.
- Melchior, P., The Tides of the Planet Earth, Pergamon, New York, 1983.
- Miller, W. F., R. J. Geller, and S. Stein, Use of a bubble tiltmeter as a horizontal seismometer, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **54**, 661-668, 1978.
- Nigbor, R. L., Six-Degree-of-Freedom Ground-Motion Measurement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1665-1669, 1994.

- Oikawa, J., Y. Ida, K. Yamaoka, H. Watanabe, E. Fukuyama, and K. Sato, Ground deformation associated with volcanic tremor at Izu-Oshima volcano, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 443-446, 1991.
- Pollard, D. D., and G. Holzhausen, On the mechanical interaction between a fluid-filled fracture and the earth's surface, *Tectonophysics*, **53**, 27-57, 1979.
- Savage, J. C., and L. M. Hastie, Surface Deformation Associated with Dip-Slip Faulting, *J. Geophys. Res.*, **71**, 4897-4904, 1966.
- Savage, J. C., W. H. Prescott, J. F. Chamberlain, M. Lisowski, and C. E. Mortenson, Geodetic tilt measurements along the San Andreas Fault in central California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**, 1965-1981, 1979.
- SIG<sup>SA</sup>, product documentatie, 1, ch. Pré des Clos, CH-1009 Pully-Lausanne, Zwitserland.
- Staatstoezicht op de Mijnen, Jaarverslag van de Inspecteur-Generaal der Mijnen, 1993.
- Systron Donner Inertial Division, product documentatie, 2700 Systron Drive, Concord, California 94518, USA.
- Westphal, J. A., M. A. Carr, and W. F. Miller, Expendable bubble tiltmeter for geophysical monitoring, *Rev. Sci. Instrum.*, **54**, 415-418, 1983.
- Wood, M. D., and R. V. Allen, Anomalous microtilt preceding a local earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **61**, 1801-1809, 1971.
- Wood, M. D., voordracht, Staatstoezicht op de Mijnen, 8 juni 1995.
- Wyatt, F., and J. Berger, Investigations of Tilt Measurements Using Shallow Borehole Tiltmeters, *J. Geophys. Res.*, **85**, B8, 4351-4362, 1980.