GNSS-metingen voor winning en opslag van Delfstoffen

Als elke millimeter telt

dr. M. Kregel, adviseur Ruimtelijke Informatie, Ingenieursbureau Oranjewoud
ir. J.P. Henry, operationeel manager 06-GPS

Bodembeweging is in Nederland een alledaags fenomeen. De drukke Nederlandse delta is echter erg gevoelig voor bodembewegingen en zeespiegelvariaties. Delfstofwinners en belanghebbenden hebben behoefte aan betrouwbare geodetische deformatiemetingen voor het detecteren en volgen van de bodembeweging door mijnbouwactiviteiten. De combinatie van 'Global Navigation Satellite Systems' (GNSS) technieken en diepe meetmerken is in veel gevallen in staat de geo-informatie en het gewenste inzicht te leveren.

De Nederlandse delta ligt grotendeels beneden zeeniveau. Het watersysteem en het grondgebruik zijn dan ook gevoelig voor relatief kleine bewegingen van de bodem en voor veranderingen van het niveau van de zeespiegel. Vanwege deze speciale situatie eist onze overheid dat de winning en opslag van stoffen in de diepe ondergrond vergezeld gaan van nauwkeurige deformatiemetingen aan het aardoppervlak. De metingen worden in detail vergeleken met prognoses van de bodembeweging waardoor de mijnbouwondernemingen in staat zijn om de activiteiten waar nodig bij te sturen.
De toezichthouder op bodembeweging door mijnbouwactiviteiten in Nederland is het Staatstoezicht op de Mijnen, een onderdeel van het ministerie van Economische Zaken. Ook in andere Europese landen zijn er geodetische monitoringsystemen voor bodembeweging door mijnbouwactiviteiten, hoewel de geodetische kwaliteitseisen verschillen van (en veelal lager zijn dan) die in de Nederlandse situatie.

De daling van het maaiveld is in feite een alledaags fenomeen en heeft in Nederland in het algemeen meerdere oorzaken.
De belangrijkste oorzaken zijn doorgaans delfstofwinning uit de diepe ondergrond (dieper dan 200 meter onder het maaiveld) en ontwatering van slappe aardlagen in het holocene pakket (tot 10-20 meter onder het maaiveld), bijvoorbeeld voor de landbouw. Andere oorzaken van beweging van het maaiveld hebben in Nederland veelal een

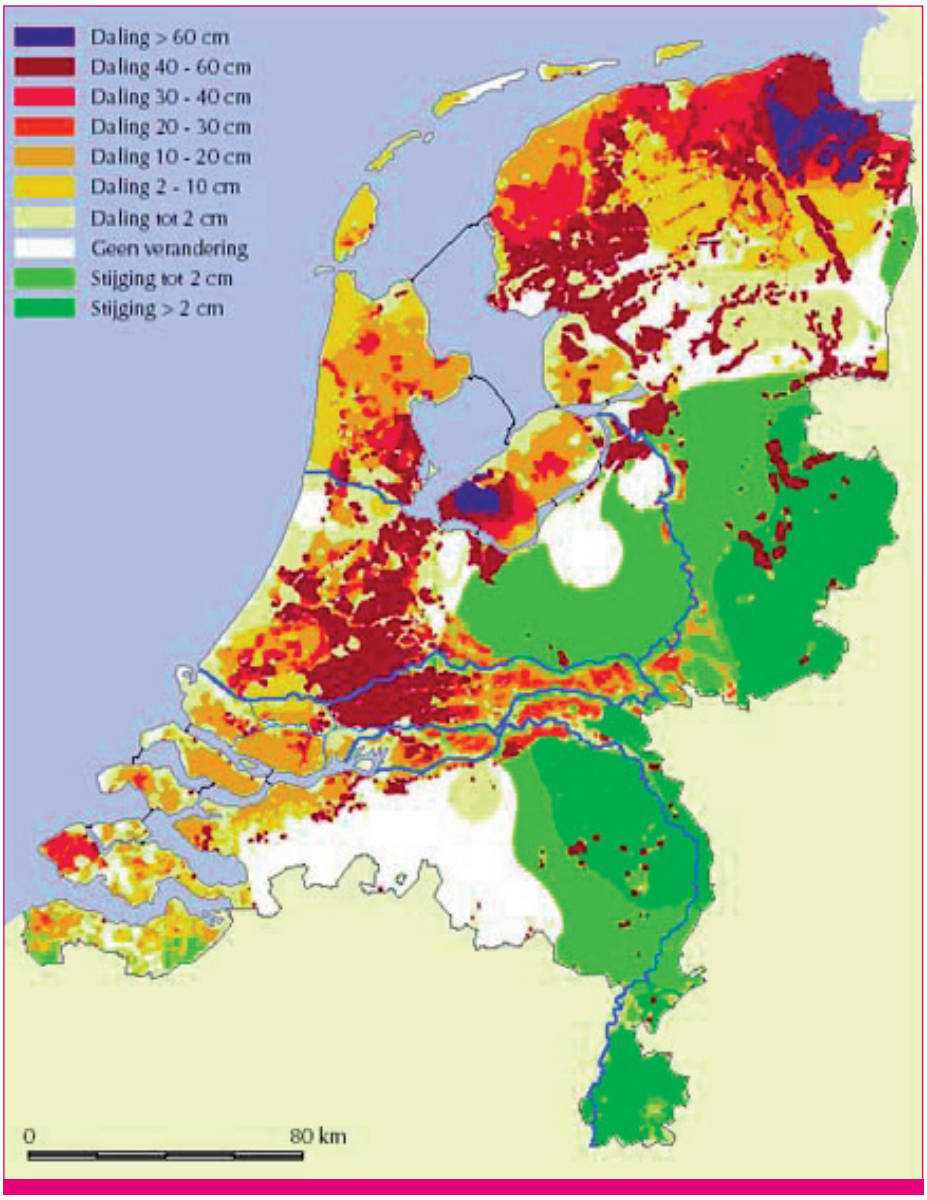

Fig. 1. Verwachte totale bodembeweging in Nederland 2002-2050 (bron: TNO).

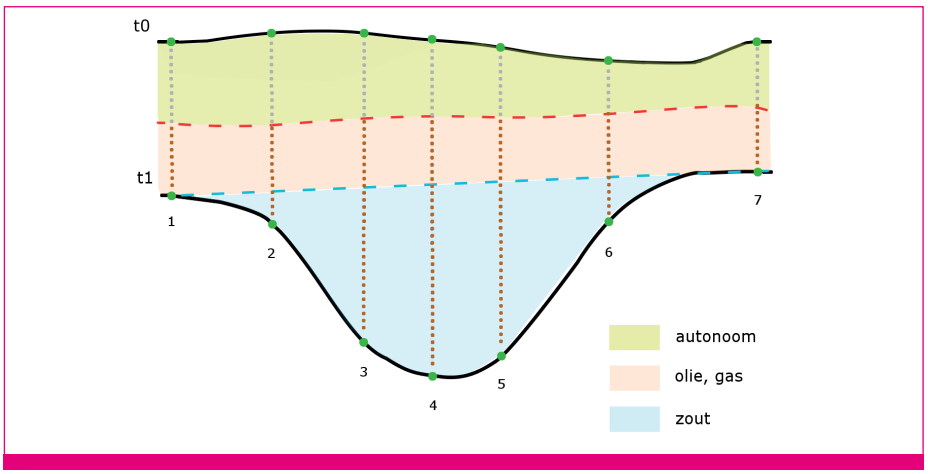

Fig. 2. In veel gebieden in Nederland kent bodemdaling meerdere oorzaken. In dit voorbeeld wordt er daling van een aantal peilmerken veroorzaakt door a) olie- en gaswinning, b) zoutwinning en c) autonoom, ofwel de daling ten gevolge van een verzameling natuurlijke oorzaken.

kleiner effect, zoals de beweging van de diepe aardkorst door natuurlijke processen als isostatie en tektoniek.

Het laatste decennium is er een toename van de eisen aan de geodetische deformatiemetingen voor het detecteren van de bodembeweging door mijnbouwactiviteiten. Ten eerste is er hernieuwde aandacht voor het gebruik van diepe, ondergrondse (meet)merken om de bodembeweging door delfstofwinning directer te kunnen meten, waardoor de metingen niet alleen de benodigde hoge meetnauwkeurigheid hebben maar ook daadwerkelijk de diepe bodembeweging representeren. Ten tweede is er een groeiende behoefte vanuit de mijnbouworganisaties, het bevoegde gezag, en andere belanghebbenden aan continu inzicht in de tijdsontwikkeling van de bodembeweging. 'Global Navigation Satellite Systems' (GNSS) technieken in combinatie met ondergrondse merken zijn in staat de gewenste geo-informatie en het gewenste inzicht te leveren.

Diepgefundeerde meetmerken

Tot op heden wordt in een groot aantal van de gebieden waar winning en/of opslag van delfstoffen plaatsvindt gebruikgemaakt van bestaande NAP-hoogtemerken van Rijkswaterstaat om de diepe bodembeweging door delfstofwinning te meten. De NAP-peilmerken zijn veelal bouten in een verticaal opgetrokken stenen muur van bestaande gebouwen of kunstwerken. Als de objecten gefundeerd zijn op het pleistocene zand wordt daarmee de ondiepe bodemdaling door compactie grotendeels uitgesloten van detectie. NAP-bouten in objecten zijn echter nagenoeg nooit aangebracht om bodemdaling door een enkele oorzaak zoals delfstofwinning te kunnen detecteren. Aan de beweging van een peilmerk kunnen meerdere oorzaken ten grondslag liggen, waarbij ook de kwaliteit van de fundering van het object, de bodemopbouw en het grondwater een rol spelen (fig. 2).

Het is dus van belang dat de peilmerken stabiel zijn in die zin dat alle overige oorzaken van bewegingen geminimaliseerd of, beter nog, uitgesloten zijn. Dit kan worden bereikt met behulp van ondergrondse merken zoals die door Rijkswaterstaat worden gehanteerd (fig. 3) voor de basis van het NAP-net.

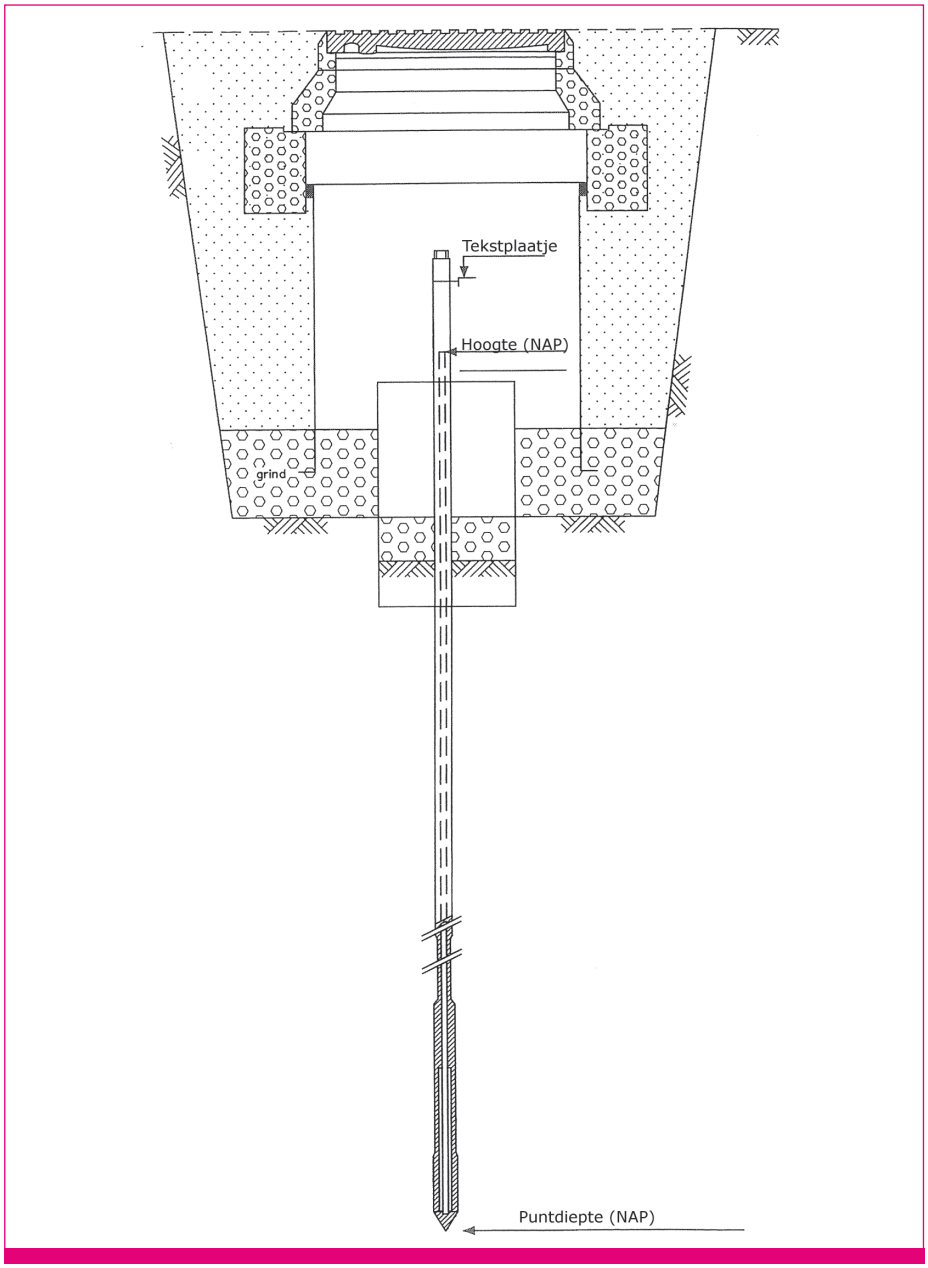

Fig.3. Ondergronds merk met een mechanische punt. De schets toont de algehele constructie, de foto (op p. 46) het aanzicht aan het maaiveld wanneer de putdeksel wordt verwijderd.

Een ondergronds merk bestaat uit een vastpuntconus, een sondeerbuis, een binnenstang en een dop en wordt aan het maaiveld afgewerkt met een put. Doorgaans wordt de punt van de conus in een pleistocene zandlaag geplaatst met een sondeertruck en verlengd met een binnenstang en buitenbuis tot het maaiveld. Tussen de conus en de buitenbuis bevindt zich een schuifconstructie zodat krachten op de buitenbuis door eventuele zetting van hoger gelegen lagen (kleef) niet op de conus worden overgebracht. De binnenstang is vastgeschroefd in de conus en kan onafhankelijk van de buitenbuis bewegen en daarmee de beweging van de pleistocene zandlaag volgen.

Voor de bepaling van bodemdaling van de diepe ondergrond heeft een ondergronds merk doorgaans een hogere stabiliteit en levensduur dan peilmerken aangebracht in objecten aan het maaiveld. Daarvoor is het wel nodig dat er gebruik wordt gemaakt van een overtallig aantal peilmerken ter controle op een eventuele verstoring. De controlerende merken kunnen een aantal bouten in goed fundeerde gebouwen zijn.

Het gebruik van ondergrondse merken voor detectie van bodembeweging door delfstofwinning is niet nieuw. Reeds in 1988 heeft Elf/Petroland, de voorganger van Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V., bij haar mijnbouwlocaties in noordwest Friesland zeven ondergrondse merken opgenomen. Uit de deformatiemetingen die sindsdien zijn verricht blijkt dat deze ondergrondse merken gemiddeld circa een mm/jaar minder dalen dan omringende peilmerken in gebouwen. Sinds kort maken mijnbouwondernemingen hernieuwd gebruik van ondergrondse merken, met name in aandachtsgebieden. Zo hanteren Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V. en Northern Petroleum Nederland ondergrondse merken in combinatie met GNSS-technieken om de pleistocene bodemdaling continu te monitoren.

GNSS-technieken

Steeds vaker wordt een combinatie van meerdere geodetische technieken ingezet om de deformatie van de bodem door mijnbouwactiviteiten in kaart te brengen. Traditioneel worden de hoogteverschillen tussen peilmerken onderling via doorgaande waterpassing in een kringnetwerk gemeten. Het uitvoeren van herhalingsmetingen met nauwkeurigheidswaterpassing geldt als een betrouwbare techniek waarmee op basis van bewezen procedures vlakdekkende deformatiegegevens kunnen worden verkregen. In het afgelopen decennium hebben GPS-metingen en Persistent Scatterer Interferometry (PS-InSAR) herhaaldelijk bewezen zeer waardevolle en soms cruciale aanvullende informatie te kunnen leveren. In het volgende richten wij ons op de mogelijkheden van GNSS in combinatie met waterpassing om hoogteverschillen tussen peilmerken verankerd in de pleistocene laag over grote afstanden continu en met hoge nauwkeurigheid te registreren.

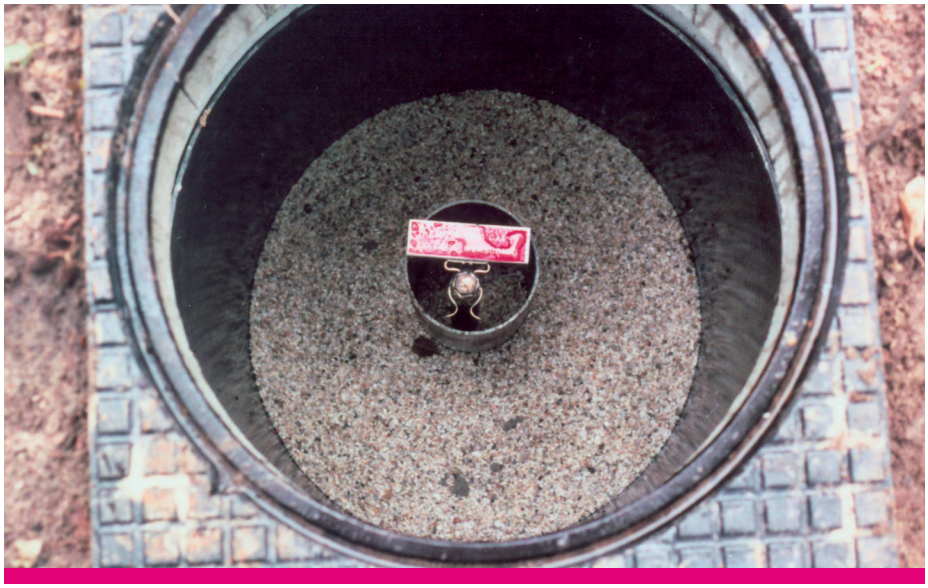

Fig. 4. Locaties GPS-stations Frisia Zout (blauw) en Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V. (rood). Het station Minnertsga wordt als referentiestation gehanteerd.

GNSS-stations zijn in staat om continu positiegegevens te leveren met millimeterprecisie. Het continu gebruik van dezelfde apparatuur en opstelling zorgt voor een verzameling gegevens die onderling consistent is. De betrouwbaarheid van de resultaten wordt nader geborgd door incidenteel controlerende (waterpas)metingen uit te voeren.
GNSS-stations kunnen zowel op het land als op de Waddenzee worden ingericht (gaswinning NAM, Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V.) en kunnen desgewenst via het internet op afstand worden beheerd. Momenteel wordt veelal gebruikgemaakt van GPS.

Twee postprocessing-methoden

Voor de beste resultaten wordt bij GNSS gebruikgemaakt van postprocessing (verwerking achteraf op kantoor) omdat men dan over een grotere tijdspanne alle beschikbare data in een keer kan benutten voor stabiele, betrouwbare resultaten.

Principieel zijn er twee varianten voor de GNSS-meetopzet die terug te voeren zijn op de postprocessing-methode. Vanouds is er de basislijnberekening op basis van één station in het deformatiegebied en één referentiestation daarbuiten. Sinds enkele jaren is er als alternatief een multi-stationsberekening op basis van een referentienetwerk van meerdere bestaande referentiestations die het deformatiegebied omringen.

De keuze voor de meetopzet en daarmee de toepassing van de processingtechniek is afhankelijk van de lokale situatie. Voor kleine bodemdalingschotels met een invloedsgebied tot circa 10 kilometer biedt een meting van een enkele basislijn met geodetische antennes en een integratietijd van een uur al een precisie van circa 5 mm in de standaardafwijking. FrisiaZout B.V. hanteert deze techniek al sinds 2004 boven haar zoutcavernes in noordwest Friesland (fig. 4). Met een aantal permanente Leica 1200 GPS-stations wordt de bodemdaling continu op afstand via internet gemonitord. Fig. 5 toont resultaten voor de bodemdaling ter plaatse van de zoutproductielocatie Bethanie (BAS4).

Voor delfstofvoorkomens met een verwachte bodemdalingschotel groter dan 10-20 kilometer is een basislijnberekening onvoldoende precies en betrouwbaar

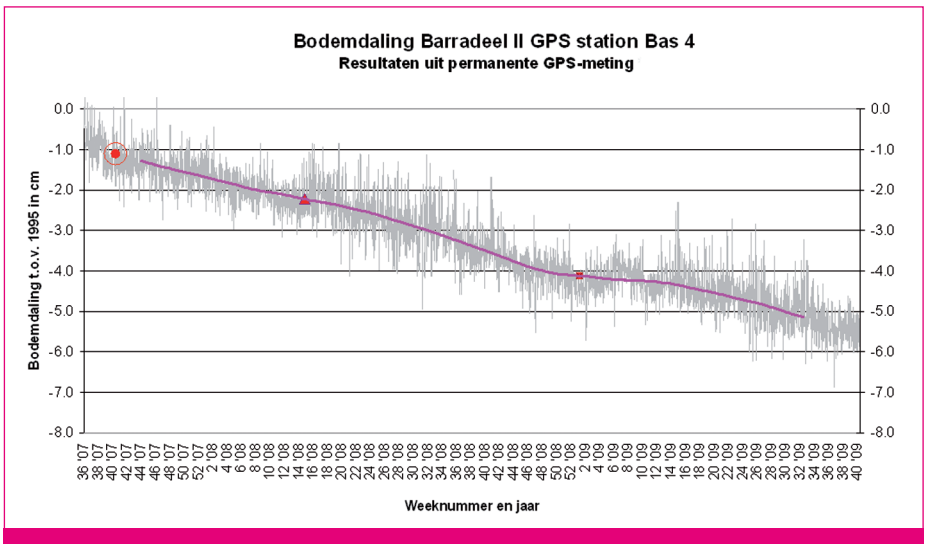

Fig. 5. Bodemdaling in de tijd op de locatie Bethanie (BAS4) van FrisiaZout B.V. in de periode 2007-2009. De roze lijn geeft een bepaling van het verloop van de bodemdaling weer op basis van de ruwe basislijnberekeningen (grijs).

vanwege problemen met het oplossen van fasemeerduidigheden. Hier geeft een multi-stationoplossing met meerdere referentiestations op voldoende grote afstand goede resultaten.

Multistations-postprocessingtechniek

Voor de multistations-postprocessing (verwerking achteraf) wordt al drie jaar bij NAM-projecten en binnenkort ook bij projecten van Northern Petroleum gebruikgemaakt van GNSMART, een softwarepakket van Geo++ GmbH. In 2005 zijn bij Anjum (Friesland) een aantal positieve tests gehouden voor de NAM/SHELL, waarbij met deze software opzettelijke verlagingen van de GPS-antennes werden gedetecteerd op millimeterniveau, terwijl de referentiestations zich op 25 tot 45 kilometer bevonden.

De Geo++-software is in staat om zeer nauwkeurige resultaten voor een combinatie van vaste, dynamische, statische en onbekende stations te leveren in één verwerkingsronde. Hiertoe wordt optimaal gebruikgemaakt van antennekalibratiemodellen en de modellering van alle foutenbronnen die van toepassing zijn op GPS-waarnemingen, waardoor een nauwkeurigheid geleverd wordt die vergelijkbaar is met optische waterpassing. Het systeem van Geo++ is in staat om fasewaarnemingen van meerdere stations tegelijkertijd te verwerken. Het resultaat is geen set van losse basislijnen die nog vereffend moet worden, maar een homogene set coördinaten met realistische (co-)varianties.

GNSMART staat voor GNSS State Monitoring and Representation Technique. Dit pakket heeft twee taken uit te voeren. Ten eerste moeten alle GNSS-foutenbronnen (fig. 6) nauwkeurig gemodelleerd worden om de fasemeerduidigheden op te kunnen lossen. Pas als de fasemeerduidigheden tussen de stations zijn opgelost is men omgekeerd pas echt goed in staat de foutenbronnen exact te bepalen.
Als tweede taak moet alle kennis van deze landelijke modellering van foutenbronnen weer worden overgedragen naar de eindgebruiker, in de praktijk vaak iemand die met een RTK-rover meet. Hiertoe wordt de kennis van alle foutenbronnen (in de literatuur vaak State Space Model genoemd) met bijvoorbeeld RTK-correcties via een RTCM-formaat overgedragen op de rover. In de praktijk van de bodemdalingsmetingen met monitoringstations kan dit echter in een verwerkingsronde, omdat alle stationsdata (referentie- én monitorstations) beschikbaar zijn op de server waarop GNSMART draait.
De State Space Modellering kan de actuele foutenbronnen modelleren, in plaats van de effecten van fouten te behandelen. De effecten behoren tot de 'observation space' (in de lijn tussen GPS-satelliet en antenne, zoals de RTCM-correcties), terwijl de foutenbronnen tot de 'State Space' behoren. GNSMART schat onder andere de volgende 'state parameters' van een GNSS-systeem:

- satellietklokfout (synchronisatiefouten);
- satellietbaanfouten;
- ionosferische signaalvoortplantingsfouten;
- troposferische signaalvertragingen;
- ontvangermultipath;
- ontvangerklokfout (synchronisatiefouten);
- fasemeerduidigheden;
- ontvangercoördinaten.

De omvang van het netwerk bepaalt het gewicht van de correcties en daarmee de kwaliteit van de State Space Modellering. In kleinere netwerken kunnen sommige correcties worden verwaarloosd. De vereffening geschiedt met een Kalman-filter voor real-time toepassingen. Het Kalman-filter heeft bewezen zeer geschikt te zijn voor 'state estimation' en monitoringtaken. De huidige vereffening is een simultane vereffening van alle GPS L1 en

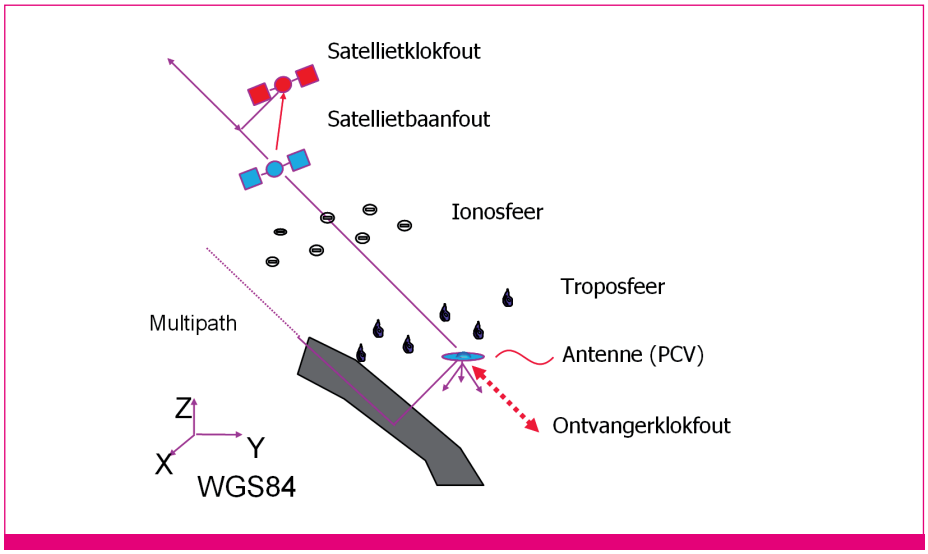

Fig.6. Foutenbronnen GNSS.

L2 code- en fasewaarnemingen. Later kunnen L5- en Galileo-waarnemingen worden toegevoegd.

Het van elkaar scheiden en het modelleren van individuele GNSS-foutcomponenten is eenvoudiger wanneer gebruikgemaakt wordt van ongedifferentieerde waarnemingen. Het gebruik van ongedifferentieerde waarnemingen is binnen GNSMART een randvoorwaarde voor de fasemeerduidigheidsoplossing, geoptimaliseerde modellering van alle GNSS-fouten en verwerking. De voordelen van ongedifferentieerde modellering en meerduidigheden zijn:

- het netwerk functioneert in absolute modus, dat wil zeggen dat de eindresultaten geen basislijnen zijn maar absolute coördinaten;
- geen mathematische correlatie tussen waarnemingen;
- robuust tegen falen van afzonderlijke referentiestations.

Het gebruik van verschilwaarnemingen (double difference waarnemingen) en daarbij horend het gebruik van basislijnen tussen referentiestations zoals in de meeste postprocessingpakketten gebeurt, is een beperking en een verlies aan informatie vergeleken met de ongedifferentieerde benadering. Informatie over GNSS-fouten kunnen het beste worden verkregen via strikte vereffening van meerdere referentiestations met voldoende overtalligheid en netwerkgrootte.

Stationsafhankelijke fouten

Multipath (meerwegeffect), het (mede) ontvangen van GPS-signalen via een reflecterend oppervlak en dus een langere of onzekere loopweg, is de meest beperkende factor voor zeer nauwkeurige positionering met GNSS. Deze fout wordt veroorzaakt door de omgeving die echter bijna nooit vrij te kiezen is.
Verschillende multipathreductietechnieken zijn bekend en geïmplementeerd in vele ontvangertypen. Echter, deze technieken reduceren normaal gesproken alleen de code-multipatheffecten. Multipathfouten in fasewaarnemingen zijn vele malen gecompliceerder om te worden gereduceerd met slimme ontvangertechnologie.
Alle GPS-ontvangers in het gebruikte netwerk van 06-GPS hebben al een vorm van multipathreductie. Ook zijn alle antennes in het netwerk chokering-antennes, die veel minder gevoelig zijn voor multipath dan normale, lichte roverantennes.
Door de dagelijkse herhaling van de GPS-constellatie komen dezelfde effecten elke dag opnieuw terug waardoor deze met meerdere meetdagen te elimineren zijn.

Geodetische en precieze GPS-metingen maken het noodzakelijk om de exacte kennis van de ontvangstkarakteristieken van de gebruikte antennes te kalibreren. Door productieverschillen kunnen fouten van 1-2 mm ontstaan tussen antennes van hetzelfde type. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van de absolute antennekalibratiemethode. Alle gebruikte antennes in de bodemdalingprojecten zijn individueel gekalibreerd.

Het gebruik van gekalibreerde antennes heeft ook een logistiek voordeel. Zo hoeft men op moeilijk begaanbare plaatsen er niet voor te zorgen dat bij elke herhalingsmeting, dezelfde antenne op hetzelfde punt moet staan.

Praktijk

De Nederlandse tak van het van oorsprong Britse bedrijf Northern Petroleum is voornemens om de multi-stationstechniek begin 2010 te introduceren als signaleringsmeting van bodembeweging ter plaatse van haar gasvelden in Nederland. Gezien de zeer geringe verwachte bodemdalingsnelheid van een aantal millimeter per jaar voor deze gasvelden is voor een semi-continue meetopzet gekozen waarin allereerst jaarlijks wordt gemeten. Hiervoor zijn voor Northern Petroleum Nederland (NPN) een aantal mobiele GNSS-meetpalen (fig. 7) ontwikkeld op basis van de nieuwe Leica AR25-antenne. De meetpalen bouwen voort op het principe zoals in 2005 geïntroduceerd door de NAM. De meetpalen worden gelijktijdig opgesteld, elk nabij een ondergronds meetmerk, en er wordt vervolgens gedurende een week data gelogd. Het hoogteverschil tussen de meetpaal en het ondergrondse merk wordt voor én na de meting gemeten via secundaire nauwkeurigheidswaterpassing. Met de combinatie van waterpassing en GNSS kan zo het hoogteverschil tussen ondergrondse merken over grote afstanden worden gemonitord. In het geval van een te korte meettijd kan het effect van multipath niet uit de dataserie worden gefilterd. Er is daarom gekozen voor zowel een lange meettijd als de inzet van een hoogwaardige chokering-antenne om multipath zoveel mogelijk te elimineren.

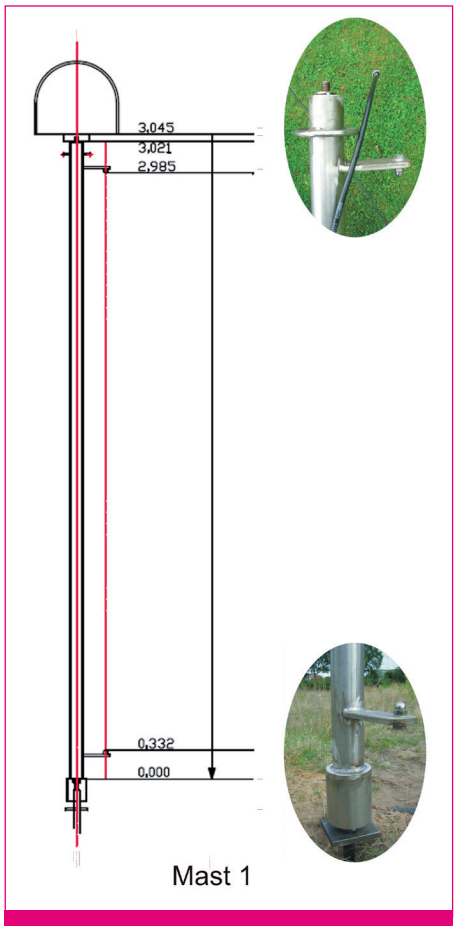

Fig. 7. Principe GNSS-meetpaal.

NPN hanteert voorlopig GPS met de nieuwe meetpalen en is daarnaast voorbereid op het gebruik van alle bestaande (bijvoorbeeld GLONASS) en geplande GNSS (bijvoorbeeld Galileo).

GPS in Schoonoord

Recentelijk is in Schoonoord (Drente) getest of deze nieuwe aanpak de gewenste resultaten kan leveren.
Alle mobiele GNSS-meetpalen zijn naast elkaar in een testveld opgesteld (fig. 8), elk op een stalen pen. Zowel de stalen pennen als de palen van de tuidraden zijn vast geslagen in de harde keileemlaag op een diepte van een meter onder het maaiveld. Ter controle van de GPS-resultaten zijn de palen via nauwkeurigheidswaterpassing

Fig. 8. Opstelling van 3 Leica AR25-antennes tijdens de testmeting in Schoonoord.

in hoogte gerelateerd. Zo kon ook worden getest hoe snel de oplossing convergeerde, of antennekalibraties inderdaad de onderlinge uitwisselbaarheid konden waarborgen en of de gewenste millimeternauwkeurigheid kon worden gehaald. Vervolgens is er gedurende zeven dagen data verzameld.

Het maximale verschil ten opzichte van de gemiddelde hoogte bedroeg 0,9 mm. De spreiding van de resultaten was twee keer zo klein als de korte-basislijntest in de specificaties van de Leica AR25 zelf. Vier dagen bleken gemiddeld afdoende om de oplossing naar een nauwkeurigheid van 1 mm te laten convergeren. Voor de X- en Y-coördinaten was 24 uur al genoeg, wat echter voor de bodemdaling minder interessant is.

Voordelen

Deze GNSS-aanpak van bodemdalingsmetingen biedt een aantal belangrijke voordelen ten opzichte van waterpassing en losse GPS-basislijnbepaling. De inzet van personeel is minimaal en de afstanden die men kan overbruggen zijn zodanig groot dat men met een bestaand (RTK-) referentienetwerk voldoende vaste stations heeft om de metingen uit te voeren. Ook is er zo voor te zorgen dat de referentiepunten altijd buiten de invloedsfeer van de gaswinning liggen. Tevens zijn er altijd voldoende referentiestations te gebruiken zodat eventuele verstoringen in een of enkele van deze stations altijd te detecteren zijn.

Wel moet men er zeker van zijn dat de meetpalen ongestoord kunnen blijven staan. Plaatsing op particulier terrein heeft de voorkeur ten opzichte van het langs de weg zetten van zo'n opvallend stuk kostbare geodetische techniek.

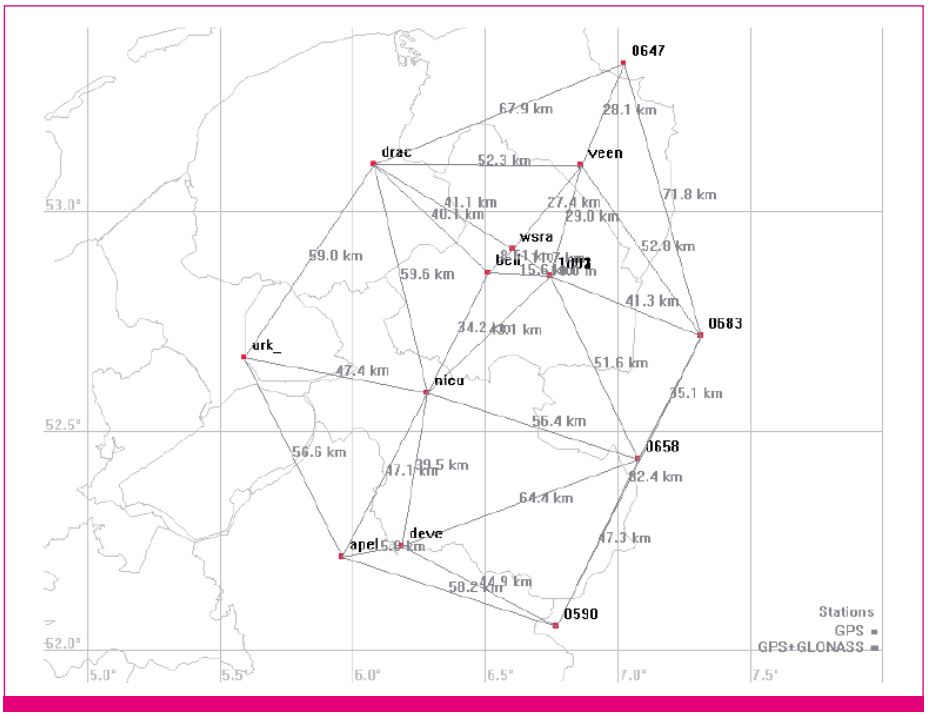

Fig. 9. Overzicht referentienetwerk testmeting Schoonoord.

Literatuur en websites

- www.oranjewoud.nl
- www.06-gps.nl
- Bedford, L., N. Brown & J. Walford, *Leica AR 25 White Paper*. www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/nrs/AR25/white-tech-paper/AR25_White%20Paper.pdf
- Wübbena, G., *On the modelling of GNSS observations for high–precision position determination*, Geo++, 2001. www.geopp.de/download/seeb60_wuebbena_e.pdf
- NAM en 06-GPS, *Voorzichtig gas geven*, De Ingenieur, no. 21, december 2006.

Samenvatting

GNSS-metingen voor winning en opslag van Delfstoffen

Bodembeweging is in Nederland een alledaags fenomeen. De drukke Nederlandse delta is echter erg gevoelig voor bodembewegingen en zeespiegelvariaties. Delfstofwinners en belanghebbenden hebben behoefte aan betrouwbare geodetische deformatiemetingen voor het detecteren en volgen van de bodembeweging door mijnbouwactiviteiten. In dit artikel worden de voor- en nadelen van 'Global Navigation Satellite Systems' (GNSS) technieken uiteengezet. Vervolgens wordt het gebruik, in de praktijk, van een hoognauwkeurige GNSS-meetopstelling beschreven. De combinatie van 'Global Navigation Satellite Systems' (GNSS) technieken en ondergrondse merken is in veel gevallen in staat de geo-informatie en het gewenste inzicht te leveren.

Summary

GNSS measurements for extraction and storage of mining substances

Soil subsidence in the Netherlands is a regularly occuring phenomenon. The busy Dutch delta system is however very sensitive for soil subsidence and sea level changes. Mining companies and other stakeholders have a need for reliable geodetic deformation measurements in order to trace and control subsidence due to mining activities. In this article the advantages and disadvantages of 'Global Navigation Satellite Systems' (GNSS) techniques are discussed. The daily use of a highly accurate GNSS measurement setup is also described. The combination of GNSS techniques and deep underground benchmarks can in many cases provide the necessary geo-information and insight.