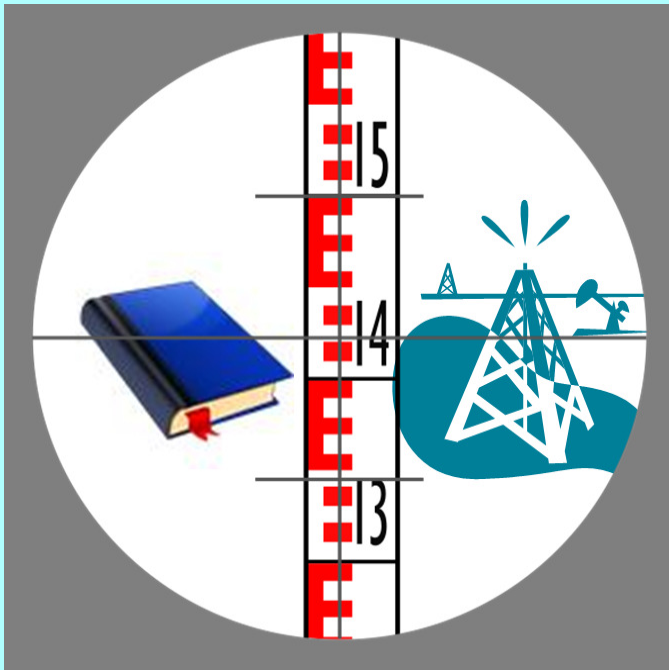
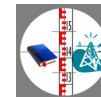


Geodetische basis voor Mijnbouw

Industriëleidraad
Versie 1.0

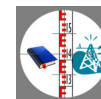


Technisch Platform Bodembeweging

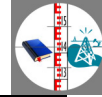


Inhoudsopgave

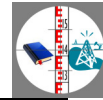
1	Inleiding en kader van de leidraad	5
1.1	Inleiding	5
1.2	Doel van de leidraad	6
1.3	Geldingsbereik van de leidraad	6
1.3.1	Voor welke activiteiten?	6
1.3.2	Voor welke (rechts)personen	7
1.3.3	Voor welk bevoegd gezag?	7
1.4	Delfstoffenindustrie	7
1.5	Rapport Tcbb	7
1.5.1	Samenvatting Tcbb-rapport	8
1.5.2	Leidraad versus Tcbb-aanbevelingen	8
1.6	Beheer en bijhouden van industrieleidraad	9
1.7	Transitie meetplannen	10
2	Procesbeschrijving	13
2.1	Algemeen	13
2.2	Procesflow diagram 1 (van te ontwikkelen veld tot en met meetplan)	13
2.3	Procesbeschrijving 1 (van te ontwikkelen veld tot en met meetplan)	17
2.3.1	Winningsplan	17
2.3.2	Representativiteit meetpunten	17
2.3.3	Punt dichtheid en frequentie (InSAR)	19
2.3.4	Bepaling sturende factoren en meettechniek-specifieke parameters	19
2.3.5	Bepaling meettechniek	21
2.3.6	Bepaling analysemethode	23
2.3.7	Bepaling meetopzet/frequentie	23
2.3.8	Meetplan	28
2.4	Procesflow Diagram 2 (van meting tot aanpassing meetplan)	28
2.4.1	Uitvoering meting	28
2.4.2	Verwerking meetgegevens en analyse	30
2.4.3	Rapportage	30
2.4.4	Confrontatie met geomechanisch model	30
2.4.5	Herbepaling van meetopzet en frequentie	31
2.4.6	Aanpassing van meetplan	31
2.4.7	Samenvoegen van meetnetten	31
3	Meettechnieken	34
3.1	Waterpassing	34
3.1.1	Proces	35
3.1.2	Peilmerken	36
3.1.3	Ontwerpcriteria voor kringen, trajecten en secties	39
3.1.4	Beheer van waterpasmeetnet	39
3.1.5	Productiespecificaties beheer NAP RSW-DID	40
3.1.6	Vereffeningstechniek	40
3.1.7	Precisie en betrouwbaarheid	40
3.1.8	Eindproduct van waterpassing	40
3.2	GPS netwerken	40



3.2.1	Hoge-precisie GPS-positiebepaling, gebruik van fase- en codemetingen	41
3.2.2	Precisie van GPS-netwerken	42
3.2.3	Ontwerp, inrichting en betrouwbaarheid van GPS-netwerken	44
3.2.4	GPS-verwerkingsmethoden	46
3.2.5	Schatting van stationssnelheden uit tijdreeksen van GPS-coördinaten	48
3.2.6	Toekomstige ontwikkelingen	49
3.3	INSAR	49
3.3.1	Satellietmissies	50
3.3.2	Selectie van meetpunten, Persistent en Distributed Scatterers	51
3.3.3	Vereffeningstechnieken	55
3.3.4	Precisie en betrouwbaarheid	56
3.3.5	Eindproduct InSAR	57
3.4	Vergelijking van meettechnieken	58
3.5	Te verwachten ontwikkelingen en andere meettechnieken	58
3.5.1	Laser altimetrie	59
4	Geodetische Deformatie-Analyse	60
4.1	Algemeen	60
4.2	Puntsgewijze multi-epochen deformatieanalyse	60
4.3	Continue ruimte-tijd deformatieanalyse	61
4.3.1	Functiemodel	61
4.3.2	Stochastisch model	61
4.4	Analyse Van deformatie ten gevolge van oorzaken in de diepe ondergrond	61
4.5	Integratie van verschillende meettechnieken	62
4.5.1	Ellipsoïdische versus orthometrische hoogteverschillen	62
4.5.2	Referentie in tijd en ruimte	63
4.5.3	Precisie van de meettechnieken	63
4.5.4	Representativiteit van de meetpunten	63
4.5.5	Continuïteit van metingen en back-up	63
4.6	Interpretatie van de analyseresultaten	63
4.6.1	Geen modellering van deformatiesignaal	63
4.6.2	Integrale ruimte-tijd analyse	64
5	Programmatuur	66
6	Referenties	67
Bijlagen		
Bijlage A	Regelgeving	69
A.1	Mijnbouwwet	69
A.2	Mijnbouwbesluit	71
A.3	Uitvoering en rapportage van waterpassingen conform artikel 31, MBB 2002	72
A.4	Toelichting op Mijnbouwbesluit	73
A.5	Mijnbouwregeling	74
Bijlage B	Stabiliteitsanalyse	75
B.1	Stabiliteitsanalyse op basis van hoogteverschillen	75
B.1.1	Op basis van gemeten hoogteverschillen	75



B.1.2	Op basis van geschatte hoogtes	76
B.1.3	Op basis van de geschatte autonome beweging uit de ruimte-tijd analyse	77
B.1.4	Combinatie van methoden	77
B.2	Checklist voor fysieke kenmerken van peilmerken	77
Bijlage C	Sturende factoren	79
C.1	Inventarisatie sturende factoren	79
C.1.1	Essentiële sturende factoren	80
C.1.2	Parameterisatie van sturende factoren	80
C.2	Classificatie	82
C.2.1	Classificatie scenario's	82
C.2.2	Samenvatting classificatie	82
C.3	Algemene richtlijnen en procedures per klasse scenario's	83
Bijlage D	Indeling deformatiemodellen (FIG)	84
D.1	Beschrijvende modellen	84
D.2	Oorzaak-Gevolg modellen	84
Bijlage E	Confrontatie met het geomechanisch model	85
E.1	Verificatie reservoirmodellen	85
E.2	Verificatie geomechanische modellen	85
Bijlage F	Standaardindeling meetregister	88
Bijlage G	InSar	89
G.1	Overzicht Satellietmissie	89
G.2	Punt dichtheid (InSAR)	89
G.3	Ontwerp berekeningen (InSAR)	90
Bijlage H	Referenties meettechnieken	93
H.1	Referenties waterpassing Meettechniek	93
H.2	Referenties GPS meettechniek	93
H.3	Referenties InSAR meettechniek	96
Bijlage J	Acroniemen, definities en contactadressen	98
J.1	Acroniemen	98
J.2	Definities	98
J.3	Contactadressen	101



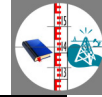
1 Inleiding en Kader van de leidraad

1.1 Inleiding

De mijnbouwwet omschrijft in artikel 41 de meetverplichting om de gevolgen van de winning van delfstoffen te kunnen monitoren en vastleggen. De meetverplichting rust op de houder van de winningsvergunning. Metingen worden volgens een door de Minister goedgekeurd meetplan verricht voor, tijdens en gedurende 30 jaar na beëindiging van de winning. De meetverplichting is ook ingesteld om de, in de winningsplannen omschreven bodemdalingsprognose, te checken en indien relevant het winningsplan aan te passen. De mijnbouwer heeft de plicht ervoor zorg te dragen dat de metingen op een zorgvuldige en betrouwbare wijze plaatsvinden. De meetresultaten worden binnen de daarvoor geldende tijdstippen overhandigd aan de Inspecteur Generaal der Mijnen. Het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is belast met het toezicht op de uitvoering van de meetverplichting. De mijnbouwwet geeft niet expliciet aan wat er met het meetresultaat moet gebeuren.

De Technische Commissie Bodembeweging (Tcbb) is volgens artikel 114 van de mijnbouwwet ingesteld om over gevolgen (schade) door mijnbouwactiviteiten te adviseren. De commissie wordt er in haar functioneren mee geconfronteerd dat er geen eensluidende opvatting bestaat ten aanzien van de methodiek voor het verwerken van hoogtemetingen om bodemdaling door delfstoffenwinning eenduidig vast te stellen. Inzicht in het bodembewegingsgedrag is essentieel bij de beoordeling van effecten die worden of kunnen worden veroorzaakt door gas-, olie- en zoutwinning. Daarvoor is een breed gedragen en wetenschappelijk gefundeerde mening over de toepasbaarheid van verschillende methodieken onmisbaar. Met de bedoeling om meer duidelijkheid en eenheid te bereiken en om ter zake een onafhankelijk advies te kunnen uitbrengen aan de minister heeft de Tcbb een werkgroep Methodiek Verwerking Hoogtemeting ingesteld en daarbij alle geïnteresseerde en betrokken partijen gehoord. In november 2009 heeft de Tcbb haar bevindingen over het meten van bodemdaling verwoord in het rapport *Van Meting naar Daling* (TCBB, november 2009). Daarin heeft de commissie aanbevolen dat de mijnbouwmaatschappijen, bijgestaan door SodM en experts, een industrieleidraad opstellen hoe bodemdaling te meten en te interpreteren.

In februari 2010 is een start gemaakt met het maken van de industrieleidraad. Partijen hebben hun activiteiten ondergebracht in een werkgroep, hierna aangeduid met *Technisch Platform Bodembeweging* (TPB). De individuele mijnbouwmaatschappijen NAM, TAQA, Northern Petroleum, Vermilion, de vakvereniging NOGEP (Nederlandse Olie en Gas Exploratie en Productie Associatie) en Oranjewoud spelen hierin een rol. Ook de zoutindustrie (Akzonobel, Frisia, Nedmag) treedt in gezamenlijkheid op. Zij worden aangeduid



als de (delfstoffen)industrie. TNO (Bouw en Ondergrond) en de Tcbb zijn in de TPB vertegenwoordigd. SodM en NAM leiden het project.

De TPB heeft een plan van aanpak en een Term of Reference (ToR) vastgesteld. Daarbij is geconstateerd dat de zoutwinning en de olie- en gaswinning anders van karakter zijn, maar men heeft besloten gezamenlijk de industrieleidraad te maken. In deze industrieleidraad, in feite een geodetische basis voor mijnbouw, ligt het accent op de inrichting en interpretatie van de monitoring van door mijnbouwactiviteiten geïnduceerde bodemdaling. De geomechanische prognose wordt daarbij als input beschouwd en vormt evenals de geologie, de waterhuishouding en het landgebruik geen wezenlijk onderdeel van de leidraad.

1.2 Doel van de leidraad

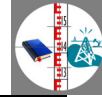
Doel van deze industrieleidraad is het vastleggen van het kader voor het inwinnen en verwerken van meetgegevens, overeenkomstig de aanbevelingen in (TCBB, november 2009). Het oogmerk is om uit geodetische waarnemingen eenduidig vast te stellen welk deel van de bodembeweging aan het maaiveld het gevolg is van delfstoffenwinning en/of opslag in de diepe ondergrond. Doel is ook de specificatie van bijbehorende nauwkeurigheid en betrouwbaarheid. In deze leidraad zijn de inrichting van meetnetten, het verwerven van gegevens, de wijze van verwerking en het rapporteren van de bodembeweging door delfstoffenwinning en/of opslag geformaliseerd. De leidraad is door de delfstoffenindustrie in samenwerking met de overheid opgesteld. De leidraad wordt door de overheid gebruikt als toetsingskader bij de beoordeling van de Meetplannen. In voorkomende gevallen kan gemotiveerd worden afgeweken van de gestelde richtlijnen in deze leidraad. Paragraaf 1.5.1 biedt een overzicht van de aanbevelingen van de Tcbb en waar deze in de leidraad zijn opgenomen. In meetplannen is ook een onderdeel opgenomen betreffende bodemtrillingsmetingen. Veelal zullen deze metingen door het KNMI verzorgd worden. Dit onderwerp maakt geen onderdeel van de leidraad uit.

1.3 Geldingsbereik van de leidraad

1.3.1 Voor welke activiteiten?

De leidraad geldt voor de bepaling van deformaties aan het aardoppervlak als gevolg van alle activiteiten, die vallen onder de Mijnbouwregelgeving. In deze eerste versie van de leidraad is nog geen aandacht geschonken aan de uitvoering van objectmetingen en aan de bepaling van horizontale deformaties (trek en druk), scheefstand (tilt) en rotatie.

Metingen van bodemtrillingen worden veelal door het KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) uitgevoerd en vormen geen onderdeel van deze leidraad.



1.3.2 Voor welke (rechts)personen

De leidraad wordt door de delfstoffenindustrie gebruikt bij het opstellen van meetplannen. De delfstoffenindustrie conformeert zich aan deze leidraad. Deze werkwijze is voor de delfstoffen-industrie een gevestigde praktijk. Dat blijkt onder meer uit de website (www.nogepa.nl) van de brancheorganisatie van de olie- en gasproducenten, NOGEPa, waar momenteel 30 leidraden zijn opgenomen. Het principe van een leidraad is, dat de industrie zelf een uniforme werkwijze ontwikkelt voor een bepaalde activiteit, rekening houdend met het door het bevoegd gezag bepaalde wettelijke kader. Doordat de delfstoffenindustrie zich vervolgens aan die werkwijze committeert, kan het bevoegd gezag zich beperken tot het geven van doelvoorschriften bij het verlenen van vergunningen.

1.3.3 Voor welk bevoegd gezag?

De overheid kan de leidraad gebruiken als toetsingskader bij de beoordeling van meetplannen in het kader van de diepe delfstoffenwinning. Volgens artikel 30, lid 3, van het Mijnbouwbesluit (MBB) behoeft het meetplan instemming van de minister van Economische Zaken (EZ). De goedkeuringsbevoegdheid is gedelegeerd aan SodM.

Indien het meetplan conform de regels in deze leidraad is opgesteld, zal SodM het meetplan in principe goedkeuren met een beperkt aantal doelvoorschriften. Als het meetplan wordt opgesteld zonder rekening te houden met de leidraad kunnen naast de doelvoorschriften ook middelvoorschriften worden opgenomen (op welke wijze aan de doelvoorschriften moet worden voldaan).

1.4 Delfstoffenindustrie

De delfstoffenindustrie is de industrie, die zich bezighoudt met het winnen en/of opslaan van delfstoffen. Het betreft olie- en gas producenten, verenigd in Nogepa, en de zoutproducenten.

1.5 Rapport Tcbb

Paragraaf 1.5.1 biedt een samenvatting van het Tcbb-rapport *Van Meting naar Daling*.

Paragraaf 1.5.2 geeft aan waar in deze leidraad invulling wordt gegeven geeft aan de aanbevelingen van de Tcbb.



1.5.1 Samenvatting Tcbb-rapport

Het winnen van delfstoffen (zoals gas en zout) uit de diepe ondergrond gebeurt op basis van een winningsplan, dat de instemming van de Minister van Economische Zaken) heeft. Onderdeel van het winningsplan is een indicatie van de bodemdaling door de delfstoffenwinning, die tijdens en na de winning wordt verwacht. Aan de hand van de gemeten bodemdaling kan de dalingsprognose worden getoetst en zo nodig worden bijgesteld, zodat de voorspelling van de toekomstige daling betrouwbaar blijft.

In het Tcbb-rapport wordt uitgenodigd tot het nuanceren van de verstrekte gegevens, worden implementeerbare aanbevelingen gegeven en worden concrete vervolgstappen voorgesteld.

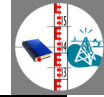
Eén van de voorgestelde vervolgstappen is het opstellen van een industrieleidraad. Het advies is om de inrichting van meetnetten, het verwerven van gegevens en het rapporteren van de bodemdaling door delfstoffenwinning te formaliseren. Het Tcbb-rapport beveelt aan dat de delfstoffenbranche zelf de wijze van verwerking (toetsing, analyse, ontwikkeling van software) uitwerkt in een richtlijn (industrieleidraad) binnen het kader van de vigerende regelgeving.

1.5.2 Leidraad versus Tcbb-aanbevelingen

Onderstaand overzicht noemt de aanbevelingen uit het Tcbb-rapport en waar deze in de leidraad zijn opgenomen.

Tabel 1.1 Overzicht van Tcbb-aanbevelingen en plaats van verwerking.

Tcbb aanbeveling	Industrie leidraad
Toetsing van de geodetische metingen op meet- en modelfouten	Hoofdstuk 4
Berekening van relatieve hoogteveranderingen in de peilmerken	Hoofdstuk 4
Confrontatie van het geomechanisch model met de uit meting bepaalde hoogteveranderingen	Paragraaf 2.4.4
Programmatuur voor de analyse van geodetische metingen	Hoofdstuk 5
Integratie van waterpasmetingen, GPS en PS-InSAR	Paragraaf 4.5

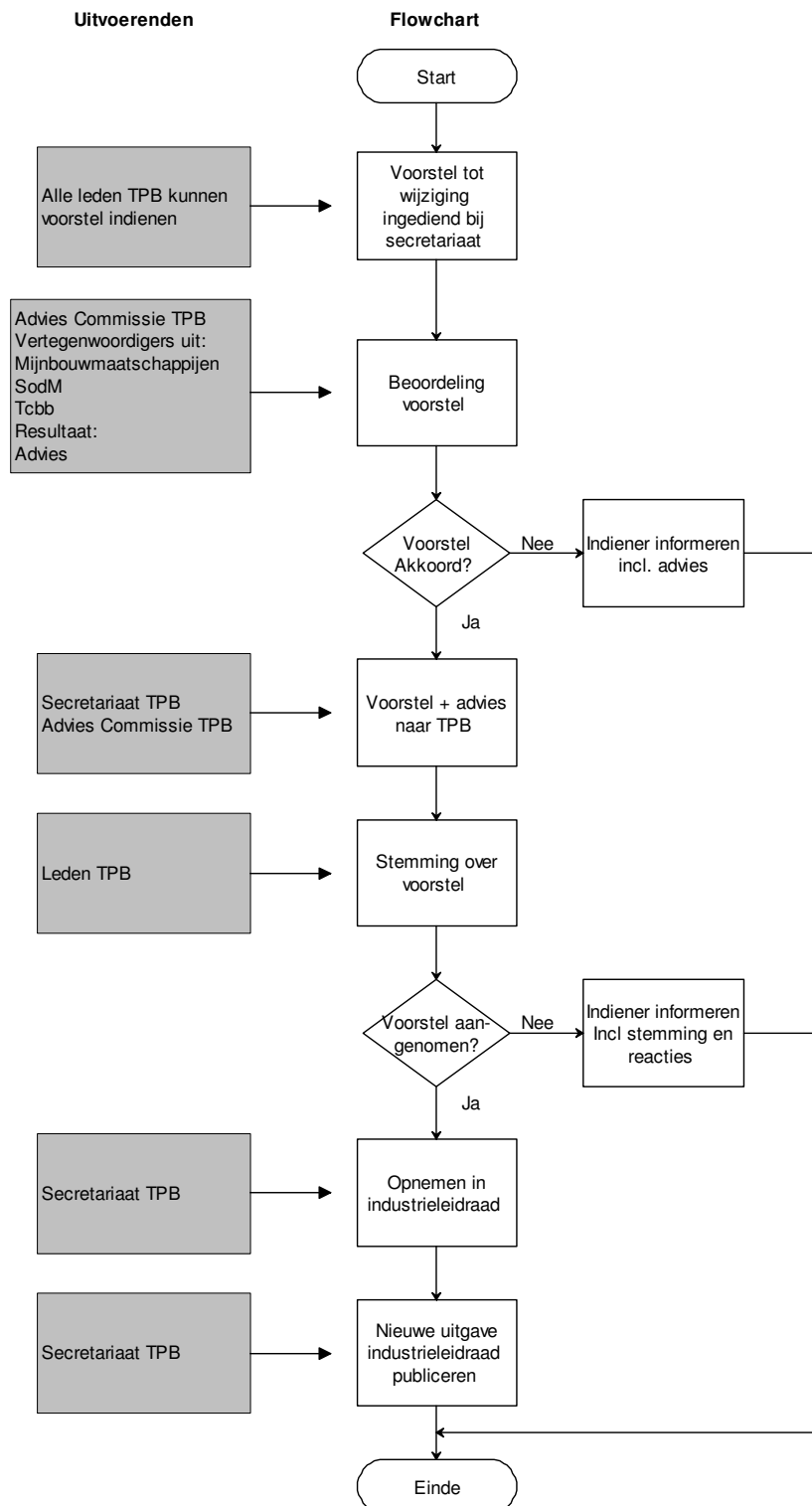
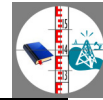


1.6 Beheer en bijhouden van industrieleidraad

De leidraad is eigendom van de TPB (Technisch Platform Bodembeweging) en wordt beheerd door de Tcbb, welke verantwoordelijk is voor de beschikbaarheid. Het onderhoud van de inhoud wordt uitgevoerd door de TPB.

Actualisering van de leidraad gebeurt op initiatief van de TPB op basis van ervaringen en suggesties van de delfstoffenindustrie (en lid van Tcbb). In voorkomende gevallen zal een ad-hoc werkgroep met vertegenwoordigers van de delfstoffenindustrie een voorstel beoordelen. Indien deze akkoord gaat met het voorstel, zullen leden van de TPB vervolgens hierover stemmen. Indien een meerderheid vóór stemt, zal het secretariaat van de TPB deze opnemen in de industrieleidraad en vervolgens de nieuwe uitgave publiceren. Relevante partijen worden hierover geïnformeerd. Figuur 1.1 geeft een schematische voorstelling van dit proces.

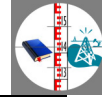
De deelnemende partijen van de delfstoffenindustrie dragen de kosten voor beheer, onderhoud en actualisering van de leidraad in gelijke delen. Concrete invulling hiervan vindt plaats binnen de TPB.



Figuur 1.1 Procesgang voor wijzigen van de industrieleidraad.

1.7 Transitie meetplannen

Reeds bestaande meetplannen zullen mogelijk niet of niet geheel aan deze industrieleidraad voldoen. Deze paragraaf beschrijft hoe men de transitie van oude meetplannen naar meetplannen, die wél voldoen aan de eisen van de industrieleidraad, kan vorm geven. Anders gezegd, het is een handreiking aan de mijnbouwindustrie hoe te komen van bestaande meetplannen naar aangepaste



meetplannen. De paragraaf biedt een handleiding om bestaande en nieuwe meetplannen te laten voldoen aan de eisen die in de industrieleidraad staan beschreven. De beschrijving wordt gegeven per onderdeel. In het stroomschema van figuur 1.2 staan de onderdelen op hoofdlijnen aangegeven.

Meetplannen kunnen op verschillende manieren tot stand komen.

- 1 Op basis van een nieuw winningsplan/opslagplan;
- 2 Op basis van een gewijzigd winningsplan/opslagplan;
- 3 Actualisatie op basis van artikel 30 MBB.

Voor nieuwe winningsplannen/opslagplannen geldt dat deze aan de eisen zo als gesteld in de industrieleidraad moeten voldoen.

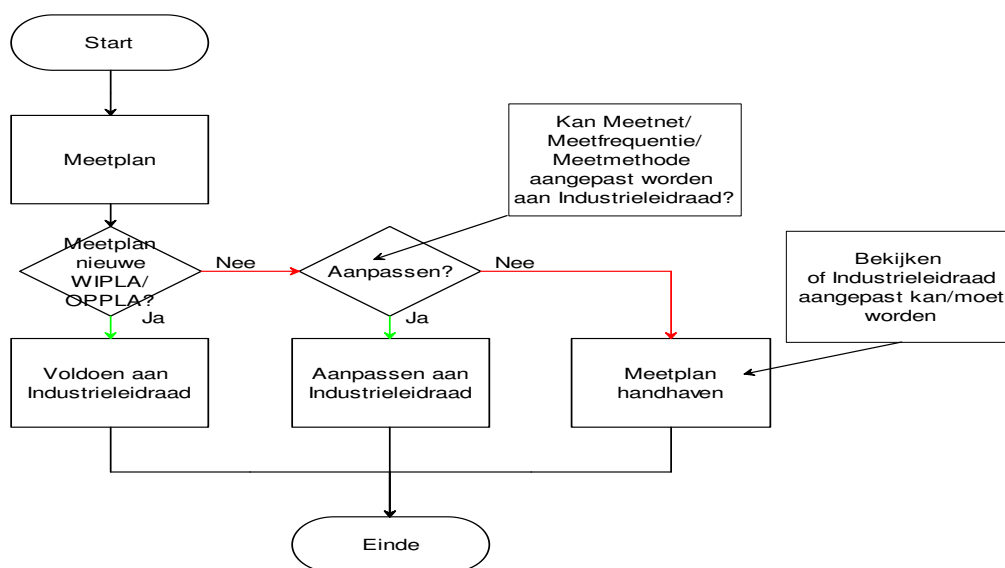
Een gewijzigd winningplan/opslagplan hoeft niet altijd te leiden tot een gewijzigd meetplan. Dat zal in het algemeen alleen het geval zijn als de wijziging in het winnings-/opslagplan (mede) betrekking heeft op de te verwachten bodembeweging en met name als het gebied, waarin de bodembeweging te verwachten is, groter of kleiner is dan in het voorgaande winnings-/opslagplan. Een veranderende snelheid van de bodembeweging kan leiden tot een aanpassing van de meetfrequentie. Indien het meetplan aanpassing behoeft, dient het meetplan in principe te voldoen aan de eisen die de industrieleidraad stelt.

De mijnbouwmaatschappij pleegt overleg met SodM indien de aanpassing van het meetplan bij wijziging van een winning/opslagplan zou leiden tot onredelijke eisen ten aanzien van het netontwerp en/of de frequentie in relatie tot de geprognoseerde bodembeweging. In overleg wordt dan besloten of en op welke wijze het meetplan kan/moet worden aangepast.

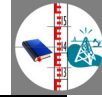
Dit overleg kan er tevens toe leiden, dat de Mijnbouwmaatschappij een voorstel doet aan de TPB om te komen tot aanpassing/verbetering van de industrieleidraad (zie paragraaf 1.6).

De TPB heeft besloten dat uiterlijk in 2018 meetplannen moeten voldoen aan de gestelde eisen in deze leidraad. Dat geldt dus voor alle meetplannen, die per 1 november 2017 moeten worden ingediend (genaamd "Meetplan 2018").

Transitie Meetplan Industrieleidraad v0.2



Figuur 1.2 Stroomschema voor de transitie van meetplannen om aan de Industriëleidraad te voldoen.



2 Procesbeschrijving

2.1 Algemeen

Deze paragraaf beschrijft het proces hoe een meetplan tot stand komt vanaf het moment, dat er plannen gemaakt worden voor het winnen van delfstoffen, aardwarmte of het opslaan van stoffen in een bepaald gebied. De meetresultaten worden vergeleken met de bodemdalings-prognose uit het winningsplan. Die prognose zal, indien nodig, bijgesteld worden. Dit hoofdstuk geeft de procesflow schematisch weer van geplande mijnbouwactiviteiten (te ontwikkelen veld) tot het meetplan. De feitelijke beschrijving gebeurt in de paragrafen 2.2 en 2.3. Gegevens uit het winningsplan zijn invoer voor de zogenaamde scenariotabel. Tot die invoer behoren ook de vooraf te bepalen stabiliteit van de meetpunten en een analyse van de punt dichtheid en benodigde inwinningsfrequentie t.b.v. InSAR. De scenariotabel geeft een overzicht van de verschillende combinaties van parameters met de daarbij behorende meest geschikte keuze van meettechniek en analysemethode. De procesflow van uitvoering van de meting tot verificatie met het geomechanisch model en eventueel aanpassing van het meetplan is het onderwerp van de paragrafen 2.4 en 2.5.

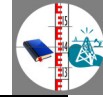
Alle ingrediënten voor het ‘kookboek’ van de industrieleidraad zijn opgenomen in bijlagen. Bijlage B beschrijft de stabiliteitsanalyse van meetpunten, bijlage C de sturende factoren, en bijlage H de relevante referenties betreffende de meettechnieken. Met behulp van deze ingrediënten moet de bodembeweging als gevolg van alle typen delfstoffenwinning of opslag kunnen worden bepaald, in overeenstemming met de wettelijke eisen. Het basisprincipe hierbij is *‘fit for purpose’*: eenvoudig als het kan, uitvoerig als het moet.

2.2 Procesflow diagram 1 (van te ontwikkelen veld tot en met meetplan)

Om te komen tot een adequaat meetplan voor de geodetische bepaling van bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten moet deze gezien worden vanuit zowel de *parameterruimte* (wat wil je weten), als de *meetruimte* (wat kun je meten). De volgende factoren spelen hierbij een rol:

- Spatio-temporele bemonstering en extensie,
- Magnitude en nauwkeurigheid van de meettechniek,
- Representativiteit van de meetpunten.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van deze factoren. De benodigde spatio-temporele bemonstering wordt bepaald door de gladheid van het verwachte deformatie signaal. De leidraad brengt structuur aan door sturende factoren te bepalen in de parameterruimte, die tezamen met de nauwkeurigheid en inzetbaarheid van de meettechnieken, de meet- en analysemethoden bepalen voor te



onderscheiden bodembewegingsscenario's. Dit proces wordt uitvoerig beschreven in bijlage C. Dit leidt uiteindelijk tot het procesflow diagram met bijbehorende scenario tabel, welke schematisch wordt weergegeven in figuur 2.1. In de volgende paragrafen wordt het procesflow diagram uitgelegd.

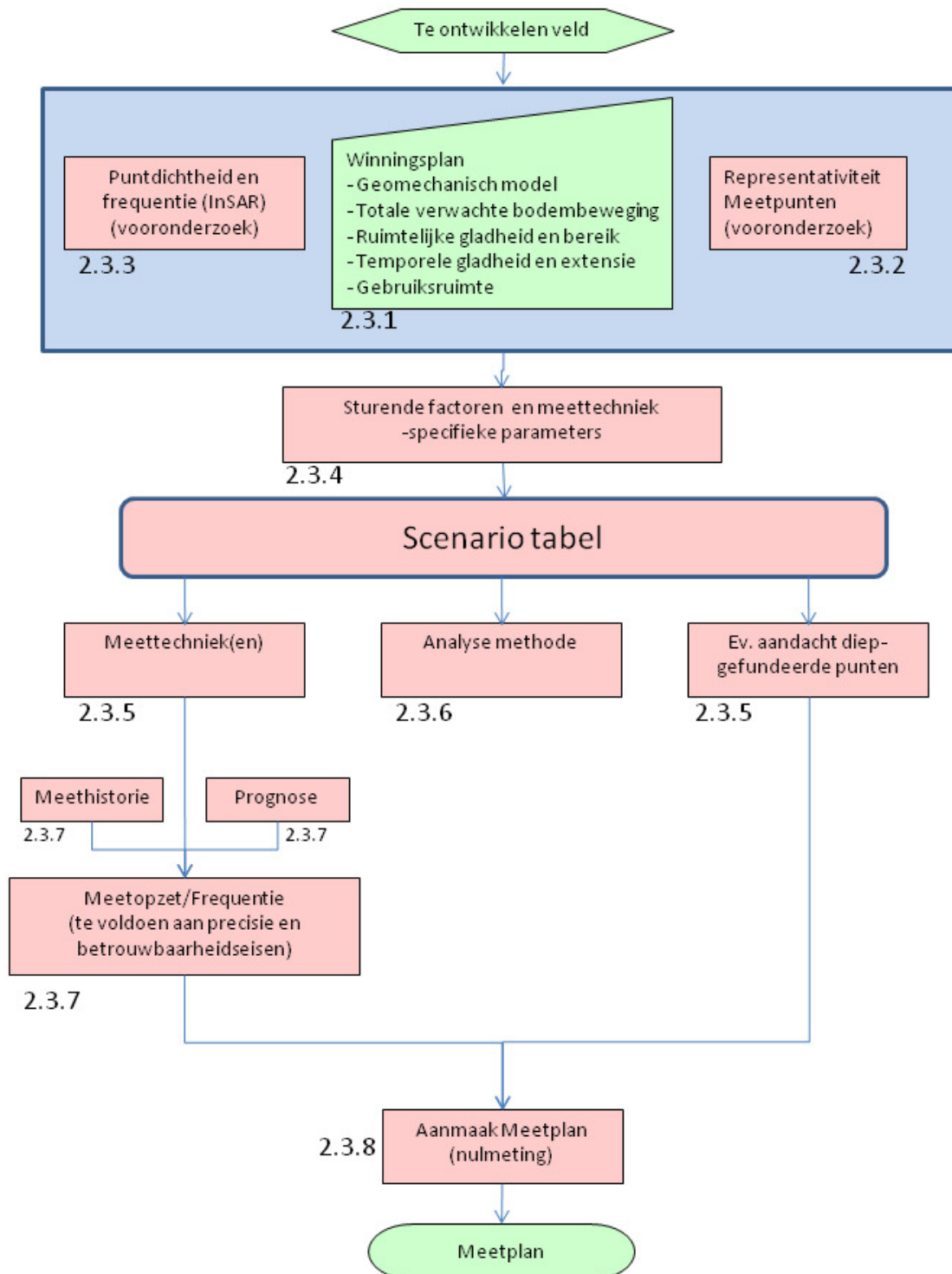
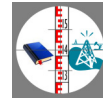
Tabel 2.1 Factoren die een rol spelen in de parameter- en meetruimte bij de geodetische bepaling van bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten.

Spatio-temporele bemonstering en extensie in parameterruimte en meetruimte					
Term	Betekenis	Hoofd-onderscheid	Middel	Financieel	
Parameterruimte (wat wil je weten?)					
Spatiële bemonstering (gladheid)	verwachte ruimtelijke gladheid van signaal (activiteit) en stoorsignaal	Homogeen/ inhomogeen	variogram/ opdelen in subdomeinen		
Spatiële extensie	verwacht maximaal ruimtelijk bereik van activiteit en stoorsignaal				
Temporele bemonstering (gladheid)	verwachte temporele gladheid van activiteit en stoorsignaal	homogeen/ inhomogeen	variogram/ opdelen in subdomeinen		
Temporele extensie	verwachte duur van activiteit, van effect daarvan, en van stoorsignaal				
Meetruimte (Wat kun je meten?)					
Spatiële bemonstering	te bereiken ruimtelijke bemonstering	altijd inhomogeen	techniek en locatie afhankelijk	financieel gevolg	
Spatiele extensie	haalbaar ruimtelijk bereik		techniek en locatie afhankelijk	financieel gevolg	
Temporele bemonstering	haalbare tijdsresolutie	homogeen/ inhomogeen	techniek afhankelijk	financieel gevolg	
Temporele extensie	haalbare start- en einddatum van tijdreeksen	a priori / a posteriori	techniek afhankelijk	financieel gevolg	

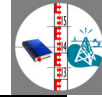


Tabel 2.1 (vervolg)

Magnitude en precisie					
	Term	Betekenis	Hoofd-onderscheid	Middel	Finan- cieel
Parameterruimte (wat wil je weten)?					
	Signaal- magnitude	hoe groot is het verwachte bodembeweging signaal	snelheid/ cum.defor- matie / relatief of absoluut	amplitude	
Meetruimte (Wat kun je meten?)					
	Meetprecisie	covariantie van metingen	Ambigui- teiten opgelost ja/nee	covariantie, ambigui- teiten	
Representativiteit, c.q. idealisatieprecisie (modelimperfecties)					
	Term	Betekenis	Hoofd-onderscheid	Middel	Finan- cieel
Parameterruimte (wat wil je weten)?					
	Parametrisatie- precisie	Zijn fysieke meetpunten representatief?			
Meetruimte (Wat kun je meten?)					
	Idealisatie- precisie	Meet ik wat ik wil meten?			



Figuur 2.1 Procesflow voor te ontwikkelen veld tot meetplan (nulmeting)



2.3 Procesbeschrijving 1 (van te ontwikkelen veld tot en met meetplan)

In volgende paragrafen worden de stappen in het procesflow diagram nader uitgelegd.

2.3.1 Winningsplan

Deze paragraaf geldt zowel voor winningsplannen als opslagplannen. De winning van delfstoffen of aardwarmte of de opslag van stoffen in een bepaald gebied vindt plaats in overeenstemming met een goedgekeurd winningsplan (opslagplan). In het winningsplan wordt o.a. beschreven waar de (delf)stoffen zich in de ondergrond bevinden, wat het aanvangstijdstip en de duur van de winning zijn en wat volgens de prognose (op basis van reservoirgegevens en geomechanische modellering) de verwachte bodembeweging is (artikel 35, MBW).

2.3.2 Representatieve meetpunten

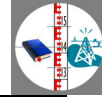
De beweging van de meetpunten dient representatief te zijn voor het bodembewegingssignaal dat wordt gemonitord. Het niet representatief zijn van de beweging van meetpunten zou resulteren in modelfouten; de relatie tussen de waarnemingen en de parameters die de bodembeweging beschrijven is dan niet juist. Deze modelfouten zijn onafhankelijk van de meetfouten: het zeer precies meten van de beweging van niet representatieve punten zal toch leiden tot een onjuiste schatting van het bodembewegingssignaal.

Meetpunten worden als representatief beschouwd, indien zij enkel de diepe bodembeweging representeren, gerelateerd aan de eerste stabiele laag (bijvoorbeeld pleistocene laag) en dieper. Omdat dit punten zijn die binnen de meetprecisie geen significante beweging vertonen bij afwezigheid van diepe activiteiten, wordt dit ook wel de 'stabiliteitsanalyse' genoemd (zie bijlage B). Alleen bij superpositie van diepe winningen zou de beweging van een stabiel punt niet direct representatief kunnen zijn. De leidraad voorziet hierin op het niveau van de analysemethoden.

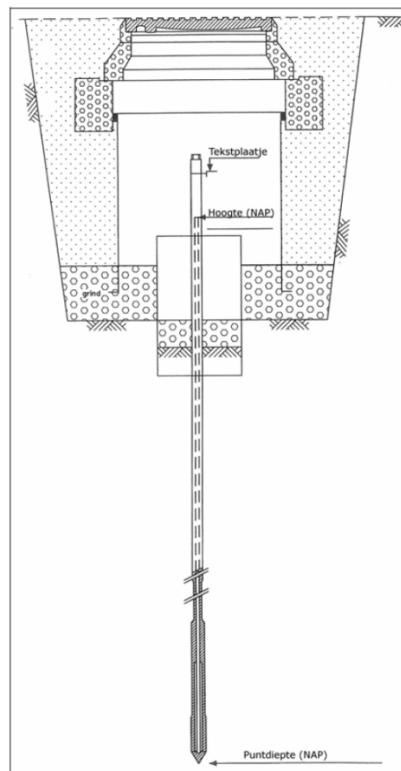
Vóór aanvang van de mijnbouwactiviteit kan een stabiliteitsanalyse worden uitgevoerd op de peilmerken in het interessegebied, op basis van gemeten hoogteverschillen in de tijd. Ook kunnen - voor zover aanwezig - historische NAP-hoogtes van peilmerken van Rijkswaterstaat worden gebruikt, waarbij de nodige onzekerheden in acht genomen moeten worden. Helaas wordt door RWS geen stabiliteitskenmerk per peilmerk meer bijgehouden.

Het is raadzaam om vóór aanvang van de mijnbouwactiviteit onderzoek te doen naar:

- mogelijke autonome daling (ondiepe compactie en zettingseffecten);
- mogelijke waterwinning uit het Pleistoceen en de effecten daarvan;
- het geotechnisch profiel van het interessegebied;
- de waterhuishouding in het interessegebied.



Indien bodembeweging door andere oorzaken dan mijnbouwactiviteiten niet met analyse- methodieken te scheiden zijn, is het van belang om gebruik te maken van diepgefundeerde ondergrondse peilmerken. Van deze peilmerken (type Geodelft, zie Figuur 2.2) wordt aangenomen dat eigenzetting als gevolg van natuurlijke invloeden zoals compactie, krimp, rijping en oxidatie in holocene sedimenten grotendeels wordt vermeden. Hierdoor kan door toepassing van deze merken onderscheid worden gemaakt tussen beweging van de eerste stabiele laag (veelal pleistoceen) en het holocene pakket

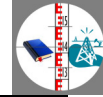


Figuur 2.2 Schets van een ondergronds peilmerk van het type GeoDelft.

Vanwege de fysieke kenmerken van een dergelijk peilmerk is de aanbeveling om diepgefundeerde ondergrondse peilmerken op te nemen in het meetnet. Om tot de juiste lengte (diepte van plaatsing) en het aantal van deze diepgefundeerde ondergrondse peilmerken te komen dienen vooraf de aanwezige objecten, NAP-peilmerken en gebiedskenmerken op basis van 'expert judgement' te worden gekwantificeerd.

De volgende factoren zijn daarbij bepalend:

- Kwaliteit en aantal van de aanwezige NAP-peilmerken;
- Kwaliteit van de omgevingsobjecten en hun fundatie;
- Diepte en opbouw eerste stabiele laag (b.v. pleistoceen);
- Opbouw holocene deklaag;
- (In)stabiliteit van het te monitoren gebied.



Om tot het juiste aantal en de goede plaats van diepgefundeerde ondergrondse peilmerken te komen geldt het volgende:

Bij voorkeur worden de aansluitpunten en/of referentiepunten voorzien van een diepgefundeerd ondergronds peilmerk b.v. van het type "Geodelft". Het verdient aanbeveling om tevens een diepgefundeerd ondergronds peilmerk te plaatsen in het verwachte diepste punt van de bodemdalingskom. Na overleg tussen de geodetisch expert en SodM kan worden besloten om extra diepgefundeerde ondergrondse meetmerken te plaatsen.

Voor contact adressen wordt verwezen naar bijlage J3.

Het is mogelijk dat er reeds andere winning of opslag plaatsvindt in (delen van) het betreffende gebied. In deze gevallen is het belangrijk om de bodembeweging naar oorzaken te scheiden. Daarvoor kan het raadzaam zijn om extra aandacht te besteden aan diepgefundeerde punten en is een ruimte/tijd-analyse aan te bevelen. Het is zinvol in de autonome beweging van meetpunten (door andere oorzaken) in de ondiepe ondergrond het volgende onderscheid te maken:

- Beweging < 1 mm/jaar.
- Beweging > 1 mm/jaar.

Uit de stabiliteitsanalyse moet blijken, of er sprake is van autonome bodembeweging en of deze meer of minder dan 1mm/jaar is.

2.3.3 Punt dichtheid en frequentie (InSAR)

Om te bepalen of InSAR-techniek gebruikt kan worden, is onderzoek nodig of:

1. de bemonstering via de reflectoren (*Persistent Scatterers*, afgekort tot PS, zie paragraaf 3.3.2) adequaat genoeg is, conform het verwachte ruimtelijke bodembewegingssignaal, zoals beschreven in paragraaf 2.3.7, en
2. het tijdsinterval tussen de te gebruiken InSAR-beelden klein genoeg is (in relatie tot de golflengte van de gebruikte radar en de afstand tussen de reflectoren) om de meerduidelijkheid in het aantal golflengtes op te lossen; daarbij mag de relatieve deformatie in dat tijdsinterval tussen de reflectoren niet de halve golflengte overstijgen. Zie voor de bepaling hiervan paragraaf 3.3 (InSAR).

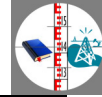
Indien de dichtheid van de scatterers voldoet aan de gestelde norm in paragraaf 2.3.7 kan gesteld worden, dat de "PS-dichtheid in ruimte" voldoet.

Indien het tijdsinterval voldoet aan 2., kan gesteld worden dat meerduidelijkheid in golflengtes oplosbaar is.

2.3.4 Bepaling Sturende factoren en meettechniek-specifieke parameters

Sturende factoren zijn bepalende factoren voor de strategie voor het monitoren van bodembeweging (stabiliteitsanalyse meetpunten, meettechnieken, en analyse methode).

In bijlage C wordt uitgelegd hoe deze sturende factoren en hun parameters bepaald zijn. Hierin wordt tevens aangegeven waarop deze van invloed zijn.



Meettechniek-specifieke parameters zijn toegevoegd voor de bepaling of de PS-InSAR meettechniek toepasbaar is. Hiervoor is analyse nodig of de PS-dichtheid in ruimte en in tijd afdoende is, waarbij de meerduidigheid oplosbaar is.

Sturende factoren

Op basis van het winningsplan worden sturende parameters bepaald en kunnen de grenswaarden/parameters vastgelegd worden:

Ruimtelijk bereik (grootste afstand tussen randen van het veld, hemelsbreed)

- < 10 km
- > 10 km

De grenswaarde van 10 km is gekozen met het oog op de foutvoortplanting in waterpasnetwerken.

Totale bodembeweging (verwachting in diepste punt, als gevolg van mijnbouwactiviteiten, zie MBW artikel 41 in bijlage A1)

- < 5 cm
- > 5 cm

Deze grenswaarde houdt rekening met de nauwkeurigheid waarmee bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten bepaald kan worden en de wijze waarop de mitigerende maatregelen worden bepaald.

Temporeel patroon (gedrag bodembeweging in de tijd).

- Consistent (lineair)
- Variabel

Gebruiksruimte (al of niet beperkingen opgelegd voor de maximale bodembeweging - eventueel per tijdseenheid - volgens vergunning).

- Ja
- Nee

De overige twee sturende factoren hebben te maken met de stabiliteit van de meetpunten en mogelijk ruimtelijk overlappende bodembeweging door verschillende delfstoffenwinningen:

Andere oorzaken, beweging meetpunten (niet ten gevolge van mijnbouwactiviteiten; zie ook paragraaf 2.3.2):

- < 1 mm/jaar
- > 1 mm/jaar

Superpositie (bodembeweging ten gevolge van 2 of meerdere mijnbouwactiviteiten in hetzelfde gebied)

- Ja
- Nee

Daarnaast kunnen in de scenariotabel tevens de parameters voor de punt dichtheid en frequentie t.b.v. mogelijk gebruik van InSAR, zoals bepaald in paragraaf 2.2.3, worden ingevuld:

Meettechniek

- **PS-dichtheid in ruimte (meer of minder dan vereiste punt dichtheid, zoals beschreven in paragraaf 2.3.7)**
 - Voldoet
 - Voldoet niet



- **PS-dichtheid in tijd en maximale afstand tussen PS; meerduidigheden oplosbaar**
 - Ja
 - Nee

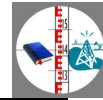
2.3.5 Bepaling meettechniek

Voor de bepaling van de meettechniek en de gewenste analysemethode is een scenariotabel ontwikkeld in Microsoft-Excel formaat, waarin alle sturende factoren en hun parameters zijn opgenomen. Voor iedere mogelijke combinatie van parameters geldt een bepaald scenario. Door middel van de Excel-filters laat zich in de scenariotabel de geschikte meettechniek(en) en analysemethode(n) bepalen. Dit gebeurt aan de hand van de sturende factoren en parameters zoals bepaald in paragraaf 2.3.4. Hierbij wordt per sturende factor het juiste filter gekozen. Automatisch verschijnen dan aan de rechterkant de geschikte strategieën.

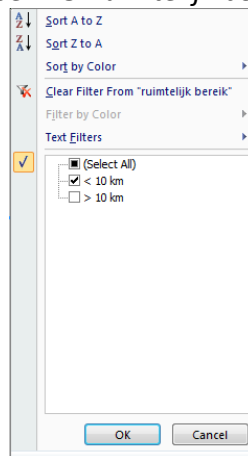
In alle gevallen geldt, dat er een zogenaamde nulmeting moet plaatsvinden vóór aanvang van de mijnbouwactiviteiten, zodat in alle volgende metingen geconstateerd kan worden of er bodembeweging heeft plaatsgevonden en zo ja, hoeveel.

Tabel 2.2 Voorbeeld van scenariotabel (waarbij nog niet gefilterd is op superpositie en meettechniek)

	A	B	C	D	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1										0=niet nodig (meetpunten)/niet geschikt (meettechnieken/analyse)						
2										1=uit te voeren (indien of/of keuze: 1a, 1b)						
3										3=ter controle						
4																
5	STURENDE FACTOREN						MEETTECHNIEK			STRATEGIE voor GECLASSIFICEERDE SCENARIO'S						
	ruimtelijk bereik	totale bodembeweging	temporeel patroon	gebruiksruimte	andere oorzaken; beweging meetpunten	superpositie	PS dichtheid in ruimte	PS dichtheid in tijd; meerduidigheden oplosbaar		Extra aandacht diep gefundeerde punten	WP	InSAR	GPS	WP nulmeting +1 locatie GPS	Analyse Vrije netwerk vereffening	Analyse Ruimte/Tijd
6	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	ja	2 vereist	ja		0	1a	1b	0	0	3	1
87	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	ja	2 vereist	nee		0	1	0	0	0	3	1
88	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	ja	<vereist	ja		0	1a	1b	0	0	3	1
89	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	ja	<vereist	nee		0	1	0	0	0	3	1
90	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	nee	2 vereist	ja		0	1a	1b	0	0	1	0
91	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	nee	2 vereist	nee		0	1	0	0	0	1	0
92	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	nee	<vereist	ja		0	1a	1b	0	0	1	0
93	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	nee	<vereist	nee		0	1	0	0	0	1	0
94	<10 km	>5 cm	consistent	nee	<1 mm/jaar	nee	<vereist	nee		0	1	0	0	0	1	0

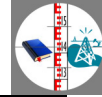


Tabel 2.3 Ruimtelijk bereik



Strategie voor geclassificeerde scenario's

- **Extra aandacht voor diepgefundeerde punten**
 - (0) geen extra aandacht nodig
 - (1) Als stabiliteitsanalyse wijst op bodembeweging in de ondiepe ondergrond is extra aandacht nodig voor de meting van diepgefundeerde punten. Indien deze niet of slechts minimaal aanwezig zijn binnen het betreffende gebied, kan besloten worden om extra punten te plaatsen. Dit is niet nodig als door middel van een ruimte/tijd-analyse de oorzaken in afdoende mate gescheiden kunnen worden.
- **WP**
 - (0) Waterpassing niet bij voorkeur geschikt.
 - Uitvoeren van waterpassing, eventueel in combinatie met andere technieken (waarvoor tevens een (1) geselecteerd is. Er moet altijd een nulmeting plaatsvinden (vóór aanvang van de mijnbouwactiviteiten).
 - (1a) Waterpassing is mogelijk, maar eventueel kan ook een andere techniek worden toegepast (welke met 1b wordt aangeduid).
- **InSAR**
 - (0) InSAR niet bij voorkeur geschikt
 - (1) Uitvoeren van InSAR-techniek, eventueel in combinatie met andere technieken waarvoor tevens een (1) geselecteerd is.
 - (1b) InSAR-techniek kan toegepast worden als alternatief voor waterpassing. Hiervoor dient echter wel een validatiemethodiek toegepast te worden. Zie hiervoor paragraaf 3.3.4.
- **GPS**
 - (0) Toepassing van GPS-meting niet bij voorkeur geschikt.
 - (1) Uitvoeren van GPS-metingen, eventueel in combinatie met andere technieken waarvoor tevens een (1) geselecteerd is. Een nulmeting moet altijd plaatsvinden vóór aanvang van de mijnbouwactiviteiten.
 - (1b) GPS-metingen kunnen toegepast worden als alternatief voor waterpassing.



- **WP nulmeting + één locatie GPS**
 - (0) Er kan *niet* worden volstaan met alleen een nulmeting door middel van waterpassing en één GPS-locatie, al dan niet continue meting of campagnemeting (met bepaalde frequentie).
 - (1) Uitvoeren van nulmeting door middel van waterpassing en metingen door middel van GPS op één locatie, al dan niet continue meting of campagnemeting (met bepaalde frequentie, zoals gedefinieerd in paragraaf 2.3.7). Indien daar aanleiding toe is kan eventueel later worden besloten om een herhalingswaterpassing uit te voeren.
 - Als alternatief voor de nulmeting door middel van waterpassing, zou ook een initiële GPS-campagne uitgevoerd kunnen worden. Daarbij dient echter wel te worden voldaan aan de gestelde punt dichtheid in paragraaf 2.3.7.

2.3.6 Bepaling analysemethode

Naast de bepaling van de meest geschikte meettechniek, wordt ook de meest geschikte analysemethode bepaald. Deze volgt ook uit de filtering in de scenariotabel.

De analyse moet ertoe leiden dat de metingen verwerkt worden tot een meetresultaat, waarmee de bodembeweging eenduidig en naar oorzaak gerapporteerd kan worden.

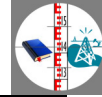
Voor een beschrijving van analysemethoden zie Hoofdstuk 4. De uitkomsten van de analyse worden gebruikt om de meetfrequentie te bepalen (zie paragraaf 2.3.7) en voor verificatie/bijstelling van de prognose. In grote lijnen zijn er twee analysemethoden:

- Analyse Vrije netwerkvereffening (met bijvoorbeeld softwarepakket MOVE3 van Grontmij).
 - (0) Vrije netwerkvereffening is niet de meest geschikte analysemethode.
 - (1) Vrije netwerkvereffening is voldoende, eventueel in combinatie met ruimte/tijd- analyse.
 - (3) Vrije netwerkvereffening kan ter controle worden uitgevoerd.
- Analyse Ruimte/Tijd
 - (0) Ruimte/tijd-analyse is niet noodzakelijk.
 - (1) Ruimte/tijd-analyse is meest geschikte analysemethode, eventueel in combinatie met vrije netwerkvereffening.
 - (3) Ruimte/tijd-analyse kan ter controle worden uitgevoerd.

Hierbij dient opgemerkt te worden, dat software voor het uitvoeren van een ruimte/tijd- analyse nog niet op de vrije markt beschikbaar is. Op deze eerste versie van de leidraad zal onderzoek volgen naar de mogelijkheid om een dergelijk pakket te ontwikkelen en op de markt te brengen.

2.3.7 Bepaling Meetopzet/Frequentie

De meetopzet houdt in de bepaling van de ruimtelijke bemonstering: De dichtheid van het netwerk, het te bestrijken gebied en welke diepgefundeerde peilmerken worden meegenomen.



De frequentie is de temporele bemonstering: hoe vaak wordt gemeten, of ingeval van InSAR, hoeveel beelden dienen opgenomen te worden in een bepaald tijdsbestek.

Voor het bepalen van de ruimtelijke en temporele bemonstering bestaan algemene richtlijnen, die onafhankelijk zijn van de sturende factoren. Om te bepalen welke strategie voor monitoring dient te worden gevolgd en of InSAR geschikt is, worden in de scenariotabel keuzetabellen opgenomen. Die dienen om te beoordelen of de dichtheid van de aanwezige natuurlijke reflectoren voldoende is en of de temporele bemonstering en de maximale afstand tussen Persistent Scatterers voldoende is om de meerduideligheden op te lossen.

Totdat het programma voor het uitvoeren van een ruimte-tijd analyse ter beschikking komt, wordt hier een overzicht gegeven van bestaande richtlijnen voor het vaststellen van de punt dichtheid en de meetfrequentie. Tevens wordt een vereenvoudigde methodiek beschreven waarmee de punt dichtheid kan worden bepaald waarmee op hun beurt de variabiliteit over de kortste afstanden in ruimte en tijd kan worden bepaald.

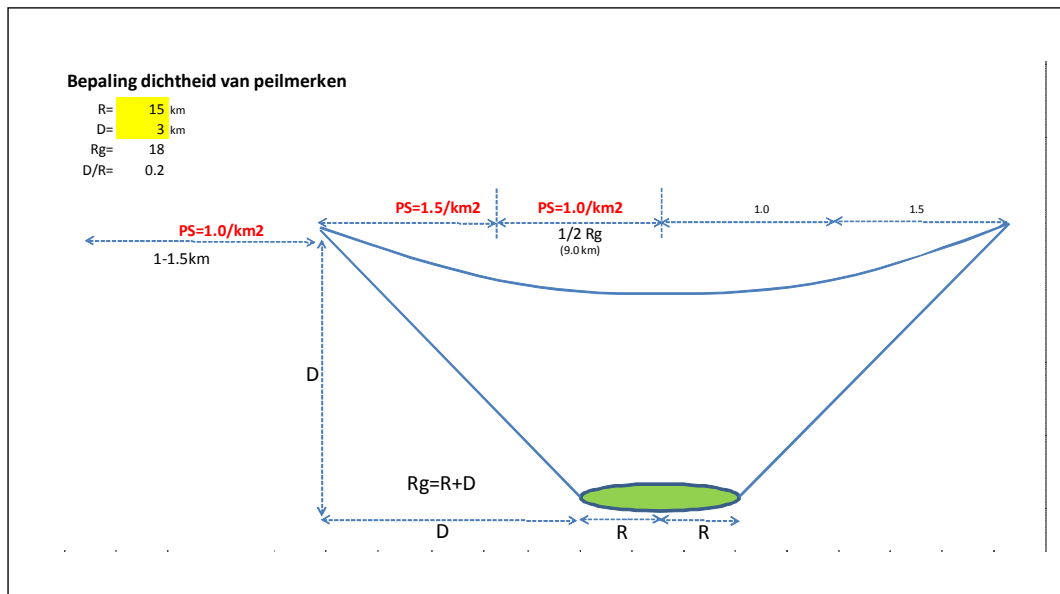
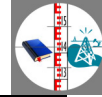
De intentie is, om bij het programma ook een functionaliteit voor ontwerp berekeningen in te bouwen. Op basis van de precisie van de meettechniek, het netwerk, en de (in)stabiliteit van de meetpunten, kan dan een inschatting worden gegeven van de relatieve precisie waarmee de bodembeweging kan worden bepaald.

Ruimtelijke bemonstering

Ter bepaling van de ruimtelijke bemonstering van peilmerken, voor een representatief beeld van de bodembewegingskom, kan de hier beschreven procedure gevolgd worden. Deze procedure is ook geautomatiseerd uit te voeren met het tabblad “Punt dichtheid” in de scenariotabel.

De in deze procedure bepaalde dichtheid zal in veel gevallen afdoende zijn, maar in specifieke gevallen kan hiervan in overleg met SodM worden afgeweken. Dat kan bijvoorbeeld in gebieden met een combinatie van variabiliteit over korte afstanden en puntinstabiliteit. Dat geldt evenzeer in gevallen van minimale verwachte daling, bijvoorbeeld voor een klein veld, waarbij de dichtheid geminimaliseerd kan worden.

Als vuistregel voor de minimaal te verwachten uitgestrektheid van een bodemdalingskom kan men een zogenaamde *grenshoek* van 45° hanteren. Voor de definitie van deze hoek is de verbindingslijn tussen de rand van de ondergrondse ontginning (olie- of gasreservoir, zoutcaverne) en de nul-centimetercontour (*grenshoekcontour*) van de bodemdalingskom aan het maaiveld van belang. De hoek die deze verbindingslijn maakt met een horizontaal vlak is de grenshoek. In Nederland is het horizontale vlak identiek aan het maaiveld.



Figuur 2.3 Voorbeeld van visualisatie van procedure voor bepaling punt dichtheid.

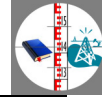
De afmetingen van de bodemdalingkom worden bepaald door de *grenshoekstraal* R_g , de afstand tussen de grenshoekcontour en het centrum van het delfstofvoorkomen. Met R de straal van het voorkomen en D de diepteligging van de basis van het voorkomen, geldt de formule $R_g = R + D$. In Figuur 2.3 is de formule schetsmatig toegelicht (ontleend aan *Wettelijke voorschriften en normering bij de meting van bodembeweging als gevolg van delfstoffenwinning*, A.J.H.M. Duquesnoy, 2002). Wanneer het reservoir of de caverne sterk afwijken van een cirkelvorm kan beter een grenshoekcontour bepaald worden aan de hand van de feitelijke vorm van de ondergrondse begrenzing van het reservoir of de caverne.

In een ringvormig gebied (buffer rondom grenshoekcontour) ter breedte van 1 à 1,5 kilometer direct buiten de grenshoekcontour wordt een peilmerkdichtheid van ongeveer 1,5 peilmerk per km^2 gehanteerd wanneer $R_g < 5$ km en van ongeveer 1 peilmerk per km^2 als $R_g > 5$ km.

Bij een verhouding $D/R < 1$ zal de bodemdalingkom tamelijk vlak verlopen. Er kan dan in het cirkelvormige gebied gelegen binnen de straal R_g een uniforme peilmerkdichtheid gehanteerd worden die identiek is aan die van het buitengebied, eveneens met het onderscheid $R_g < 5$ km en $R_g > 5$ km.

Wanneer $D/R > 1$ zal de bodemdalingkom een klokvorm hebben. Het binnengebied wordt onderverdeeld in een cirkelvormig gebied met een straal $0,5R_g$ en een ringvormig tussengebied met binnenstraal $0,5R_g$ en buitenstraal R_g .

Voor $R_g < 5$ km wordt in de binnencirkel met straal $0,5R_g$ een dichtheid van ongeveer 1,5 peilmerk per km^2 gehanteerd en in de tussenring een dichtheid van 2 peilmerken per km^2 . Voor $R_g > 5$ km wordt een dichtheid van 1 peilmerk, respectievelijk van 1,5 peilmerk per km^2 gehanteerd.



In aanvulling op bovenstaande methode kan een analyse van de benodigde punt dichtheid worden gedaan op basis van een eenvoudige cross-validatiemethode:

- Er worden random puntenvelden gegenereerd voor verschillende punt dichtheden;
- Op basis van de geomechanische prognose (dit kan voor zowel low, base, als upper case) wordt de bodemdaling bepaald voor de gegenereerde puntenvelden (inclusief meetruis);
- Vervolgens wordt de bodemdaling op de niet bemonsterde locaties geschat op basis van interpolatie (lineair of spline);
- Cross-validatie: de verschillen (zowel standaarddeviaties als de maxima) tussen de geschatte bodemdaling op de niet bemonsterde locaties en de geomechanische prognose worden afgezet tegen de punt dichtheden.

Uit de relatie tussen de punt dichtheid en de verschillen tussen de geschatte en werkelijke bodemdaling kan vervolgens worden bepaald welke dichtheid nodig is om de variabiliteit over de kortste afstanden te schatten. De methode is relatief eenvoudig, maar de verschillen bevatten tevens de interpolatiefouten. Dit bemoeilijkt het bepalen van de vereiste punt dichtheid als deze (mede) dient te worden bepaald op basis van voorafgestelde precisie-eisen.

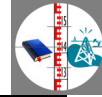
Combineren van meetnetten

Indien er sprake is van mijnbouwactiviteiten door meer dan één partij in hetzelfde gebied kan besloten worden om meetnetten te combineren. Daarbij kunnen de metingen in één analyse verwerkt worden. Hierdoor kan mogelijk ook onderscheid gemaakt worden naar oorzaak van de bodembeweging. Dit kan gevolgen hebben voor de temporele bemonstering.

Temporele bemonstering

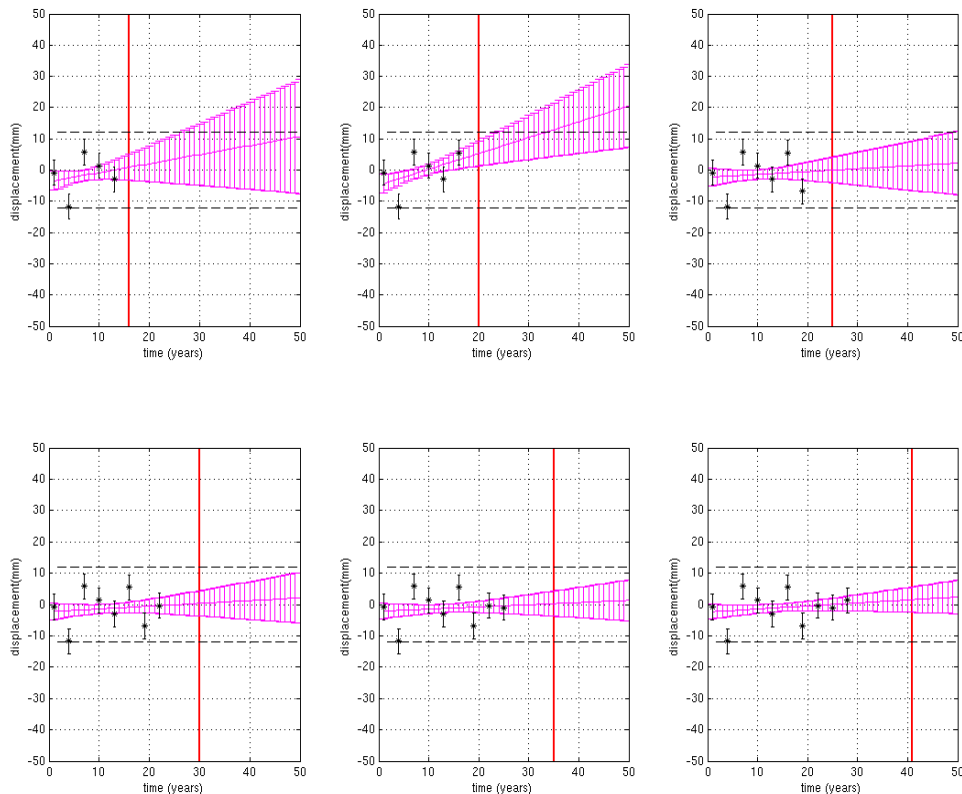
De prognose, de meetprecisie en de meethistorie zijn bepalend voor de frequentie. Afhankelijk van deze factoren, kan de meetfrequentie wijzigen in de tijd. De onderstaande procedure geeft de minimale meetfrequentie aan. Bij meettechnieken die inherent hogefrekventer bemonsteren (InSAR, continue GPS) zal deze hoger liggen.

1. De initiële meetfrequentie wordt bepaald door het tijdstip waarop de prognose, gebaseerd op het geomechanisch model, inclusief onzekerheid in het verwachte diepste punt, groter is dan de meetnauwkeurigheid (voor waterpassen 1 à 2 cm);
2. Bij ongewijzigd productiebeleid t.o.v. het winningsplan wordt een herhalingsmeting gedaan indien de nauwkeurigheid van een meting die van de voorspelling (op basis van de metingen) overtreft. Hierbij wordt een maximale interval van 5 jaren aangehouden, tenzij er duidelijke indicaties zijn, dat er geen sprake is van een absolute totale bodembeweging van meer dan 2 cm. In dat geval kan in overleg met SodM een ander meetbeleid worden toegepast;
3. Bij gewijzigd productiebeleid t.o.v. het winningsplan wordt de meetfrequentie opnieuw bepaald. Indien dit aanleiding geeft tot een wijziging, wordt deze verwerkt in de jaarlijkse actualisatie van het meetplan.;

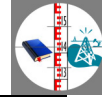


4. De genoemde meetnauwkeurigheid is een 3σ -criterium, en is bepaald op basis van de precisie van de geschatte peilmerkhogten uit waterpasmetingen.

Figuur 2.4 toont de bepaling van het interval tussen twee metingen op basis van de precisie van de meting en de precisie van de voorspelling. Het interval wordt groter naarmate de meethistorie langer is. Hier is een lineair verloop verondersteld van de bodembeweging, maar dit kan eenvoudig wordt aangepast naar een ander model. Ook hier geldt dat het interval langer wordt naarmate er meer metingen zijn gedaan. De verticale rode lijn geeft de tijd tot de volgende meetcampagne aan. Deze rode lijn geeft het moment aan, wanneer de precisie van een nieuwe meting hoger is, dan de voorspelde precisie, gebaseerd op de meethistorie (zwarte punten, inclusief foutmarge). De zwarte onderbroken lijn geeft het 3σ -criterium aan van de precisie van de geschatte peilmerkhogtes. De middelste magentalijn geeft de geschatte snelheid aan, inclusief de precisie weergegeven door de buitenste lijnen (σ , deze wordt vergeleken met de error bars van de peilmerkhogten om het meetinterval te bepalen).



Figuur 2.4 Voorbeelden van bepaling van de volgende meetcampagne



2.3.8 Meetplan

Het meetplan dient vóór aanvang van de winning/opslag ter goedkeuring bij SodM te worden ingediend. Vervolgens moet dit meetplan elk jaar geactualiseerd worden, tot 5 jaar na laatste productie/injectie. Het meetplan beslaat de termijn van winning /opslag en de daarop volgende 30 jaren. Onderdelen welke minimaal in het meetplan dienen te worden opgenomen zijn:

1. Tijdstippen waarop metingen worden verricht;
2. Plaats/gebied waar gemeten wordt;
3. Gebruikte meetmethode(n).

In overleg met SodM kunnen en/of “bij ministeriële regeling” nadere regels over het meetplan worden gesteld.

Ad 1) is bepaald in paragraaf 2.3.7. Per analyse kan opnieuw de frequentie van meting bepaald worden, welke in het volgende geactualiseerde meetplan verwerkt wordt.

Ad 2) is ook bepaald in paragraaf 2.3.7. Voor waterpassingen wordt er een trajectenkaart bijgevoegd, waarop de te meten peilmerken (inclusief ondergrondse merken) getoond worden. Voor InSAR is dit een overzicht van het door InSAR-beelden bedekte gebied en de locatie van de scatterers. GPS meetpunten worden eveneens op een kaart getoond.

Ad 3) is bepaald in paragraaf 2.3.5.

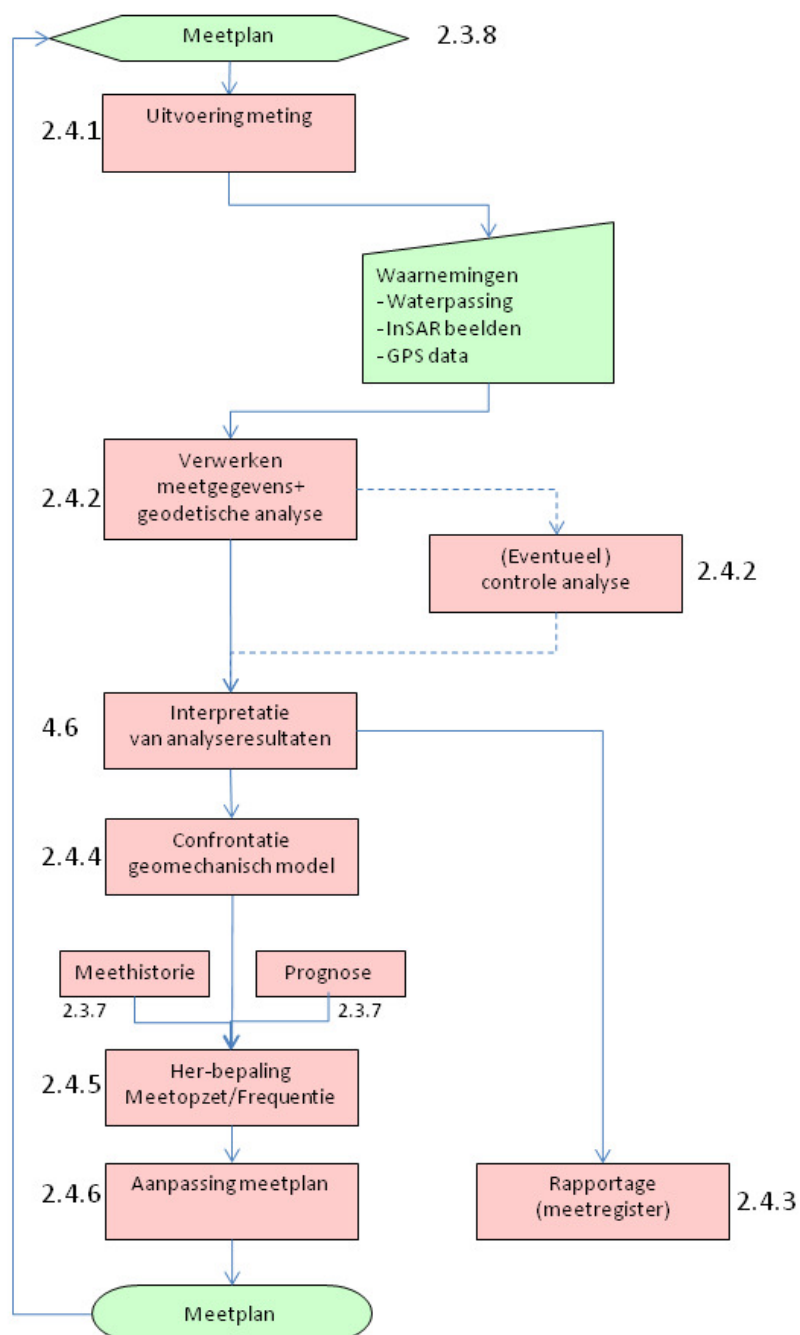
2.4 *Procesflow diagram 2 (van meting tot aanpassing meetplan)*

In de volgende paragrafen worden de stappen in het procesflow diagram van figuur 2.5 nader uitgelegd. Dit proces wordt telkens, na de rapportage van het meetregister, herhaald.

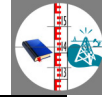
2.4.1 Uitvoering meting

Afhankelijk van de gekozen meetmethode wordt de data ingewonnen, conform artikel 41 van MBW en de artikelen 31-33 van MBB. De volgende meettechnieken zijn beschikbaar:

- Waterpassing;
- GPS;
- InSAR.



Figuur 2.5 Procesflow van meting naar aanpassing meetplan



2.4.2 Verwerking meetgegevens en analyse

Afhankelijk van de gekozen meetmethode en analysemethode wordt de verkregen data verwerkt en geanalyseerd, met als doel een eenduidige weergave van precisie en betrouwbaarheid van de waarnemingen en hoogteverschillen ten opzichte van een eerdere epoche. Op basis hiervan kan de bodembeweging eenduidig en naar oorzaak gerapporteerd worden (zie hoofdstuk 4). Mogelijke analysemethoden zijn.

- Puntsgewijze multi-epochen deformatie analyse (zie paragraaf 4.2).
- Continue ruimte-tijd deformatie-analyse (zie paragraaf 4.3).

Controle van analyse

Afhankelijk van de gekozen analysemethode, kan het raadzaam zijn een controle uit te voeren met een onafhankelijke analysemethode. Dus wanneer b.v. gebruik is gemaakt van de vrije netwerkvereffening, kan ter controle een ruimte/tijd analyse uitgevoerd worden. Of dit aan te bevelen is volgt ook uit de scenario-tabel.

Interpretatie van analyseresultaten

Zie paragraaf 4.6.

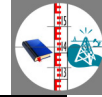
2.4.3 Rapportage

De resultaten uit de verwerking van de meetgegevens en analyse van de nulmeting moeten bij eerste meting uiterlijk 2 weken vóór aanvang van de mijnbouwactiviteit gerapporteerd worden aan SodM (conform de artikelen 31-33 van MMB) en resultaten van vervolgmetingen binnen 12 weken na het verrichten van de metingen. Veelal zal dit meetregister bestaan uit:

- Ontwerp en inrichting van het meetnet.
- Meetmethode.
- Toetsing en vereffening.
- Bewegingsanalyse (bijvoorbeeld differentiestaat van alle gemeten epoches).

2.4.4 Confrontatie met het geomechanisch model

Nadat de resultaten van de uit geodetische waarnemingen geschatte diepe bodembeweging bekend zijn, wordt het geomechanische model geconfronteerd met deze resultaten. Bij significante afwijkingen tussen gemeten en verwachte bodembeweging, moet worden bezien of andere oorzaken dan delfstoffenwinning de bodembeweging beïnvloeden. Anderzijds moet worden gesteld dat zowel de geodetisch bepaalde bodembeweging, als het geomechanisch prognose-model behept zijn met onvolkomenheden. Nadat een significante afwijking ten opzichte van de geomechanische prognose is vastgesteld, dient het statische/dynamische reservoirmodel en/of het geomechanische model te worden bijgesteld. Daarbij moet een plausibele verklaring worden gezocht in de geologische/ petrofysische/geomechanische eigenschappen, die het model bepalen. De modellen dienen zodanig aangepast



te worden, dat er voldoende consistentie is tussen de geomechanisch gemodelleerde bodemdaling en de geodetisch bepaalde bodemdaling. De verwachting van de toekomstige bodemdaling kan vervolgens worden herzien en toekomstige meetcampagnes kunnen die vervolgens staven. Voor meer details wordt verwezen naar Bijlage E.

2.4.5 Herbepaling van meetopzet en frequentie

Naar aanleiding van de meetresultaten en analyse kan worden besloten om de meetopzet en meetfrequentie aan te passen. Een voorbeeld is wanneer blijkt, dat ook aan de randen van het gemeten gebied bodembeweging optreedt. Dan is het wenselijk om het gebied uit te breiden. De meethistorie en meetprecisie bepalen wanneer de temporele bemonstering aangepast kan worden. Zie hiervoor paragraaf 2.3.7.

2.4.6 Aanpassing van meetplan

Conform artikel 30, lid 6, MBB moet elk jaar een bijgewerkt meetplan worden ingediend vóór 1 november.

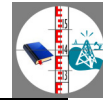
2.4.7 Samenvoegen van meetnetten

Inleiding

Tot nu toe worden de meetplannen die ten grondslag liggen aan het uitvoeren van metingen en het publiceren van de resultaten van de metingen per mijnbouwmaatschappij uitgevoerd. Daarbij heeft iedere mijnbouwmaatschappij zijn eigen gebiedsafbakening en ieder houdt ook zijn eigen stabiel veronderstelde referentiepunt aan. De referentiepunten liggen in het algemeen buiten de eigen invloedssfeer van de mijnbouwactiviteiten van de betreffende mijnbouwonderneming. Omdat er echter verschillende referentiepunten en referentie-epochen gebruikt worden, zijn de meetresultaten van de verschillende gebieden onderling vaak niet direct vergelijkbaar. Voor de uniformiteit is het raadzaam om meetnetten samen te voegen tot een groter meetnet, waarbij gebruik gemaakt kan worden van een referentiepunt dat buiten de invloedssfeer ligt van alle mijnbouwactiviteiten en daardoor meer stabiel zal kunnen zijn. In dit onderdeel wordt een handreiking gedaan hoe tot het samenvoegen van meetnetten kan worden overgegaan.

De volgende tekst beschrijft hoe meetnetten samengevoegd kunnen worden. Hierbij moet ook rekening gehouden worden met de invloedssfeer van de bodembeweging. De uitkomsten van de berekeningen voor een samengesteld meetnet zullen vergelijkbaar moeten zijn met de uitkomst van de afzonderlijke meetnetten. De beschrijving wordt zowel gegeven per vraag als schematisch. De eerste vraag die gesteld kan worden is of de gebieden waarvoor een winningsvergunning c.q. opslagvergunning is verleend aansluitend of overlappend zijn. De vraag betreft ook of de invloedssfeer met betrekking tot het aspect bodembeweging aansluitend of overlappend kan zijn.

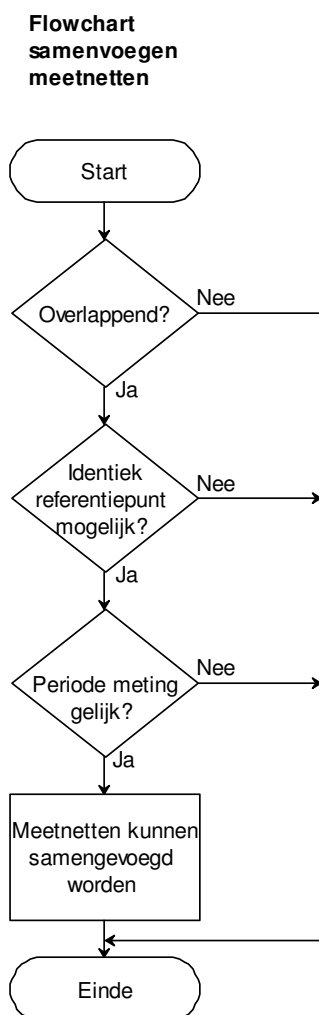
De volgende vraag is of de meetnetten geheel of gedeeltelijk overlappen, aansluiten of aansluitend te maken zijn. Als de netten aansluiten of overlappen,



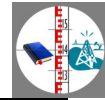
kunnen ze samengevoegd worden. Voor het samenvoegen van netten is het van belang dat deze zoveel mogelijk in dezelfde tijd (zelfde jaar) worden gemeten. Als de netten niet hetzelfde referentiepunt hebben zal gekeken moeten worden of het mogelijk is om eenzelfde referentiepunt voor de toekomstige metingen vast te stellen.

Meetnetten kunnen worden samengevoegd als bovenstaande stappen zijn doorlopen.

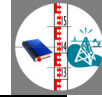
Heraansluiting met terugwerkende kracht is veelal niet mogelijk, aangezien vaak niet hetzelfde referentiepunt is aangemeten en het tijdstip van meten (en frequentie) verschillend is. Wijzigen van referentiepunt, dat niet bij eerdere metingen is aangemeten, betekent dat de historische gegevens niet direct meer gebruikt kunnen worden in vergelijking met nieuwe metingen. Het kan wél in een ruimte-tijd analyse op basis van de gemeten hoogteverschillen. Er zal in ieder geval gekeken moeten worden of voor nieuwe metingen een gezamenlijk referentiepunt kan worden gebruikt. In een plan moet aangegeven worden hoe de historische gegevens gebruikt worden in relatie tot de resultaten vanaf de samenvoeging van de meetnetten.



Figuur 2.6 Procesflow samenvoegen meetnetten



Bovenstaande stappen zijn niet noodzakelijk, als software beschikbaar is om ruimte/tijdanalyses uit te voeren.



3 Meettechnieken

In dit hoofdstuk worden per meettechniek de meetpunten, de inrichting van het meetnet, vereffeningstechnieken en precisie en betrouwbaarheid besproken. Dit beperkt zich tot de meettechniek zelf, onafhankelijk van het doel van de metingen (schatting van bodembeweging).

Als referentie wordt gebruikt het rapport (NCG, 2002) van de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie van de NCG (Nederlandse Commissie voor Geodesie) van 27 november 2001.

Deze leidraad verstaat onder waterpassing 'tweede-orde optische waterpassing'.

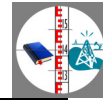
3.1 Waterpassing

De bodemdaling door delfstoffenwinning wordt gemeten met behulp van een net van peilmerken die representatief zijn voor de diepe bodembeweging. Zij zijn zo verdeeld over het gebied en de geografische dichtheid is zodanig, dat het mogelijk is een goede afbeelding te geven van de bodemdalingskom door de delfstoffenwinning. De dalingskom heeft haar oorsprong in de geomechanische eigenschappen van de diepe ondergrond, de omvang en diepte van het delfstofvoorkomen en de geplande productie.

De precisie van de meetmethode en de nauwkeurigheid van de gemeten hoogten zijn in overeenstemming met de richtlijnen van Data-ICT Dienst (DID) van RWS. 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.

In de praktijk zal vaak blijken dat ook bij een zorgvuldige keuze van objecten er toch lokale verschillen in peilmerkdaling optreden, die tevoren niet zijn onderkend. Bij nadere bestudering blijkt soms dat andere oorzaken een rol spelen, zoals verandering van de grondwaterspiegel, nazakking van nieuwe gebouwen, overbelasten (te zwaar belasten) van een fundering in vergelijking met het ontwerp, etcetera. Vooral bij (oude) bouwwerken waarin is gesloopt/verbouwd of die in de loop der tijd zijn vergroot, kunnen delen van de bestaande fundering bovenmatig belast worden en kan een instabiele situatie veroorzaakt worden. Het is daarom op voorhand niet altijd eenvoudig om juiste locatiekeuzes te maken bij het plaatsen van peilmerken. Van groot belang is daarom het verzamelen van gegevens over de kwaliteit en het gebruik van een bouwwerk waarin een peilmerk wordt verankerd. Een aanvullende bron van informatie kan het zettinggedrag van individuele peilmerken in de directe omgeving zijn, als functie van de tijd.

Een meetnet voor peilmerkdaling door delfstoffenwinning moet over een langere periode (verscheidene decennia) in stand gehouden worden. Daarbij is



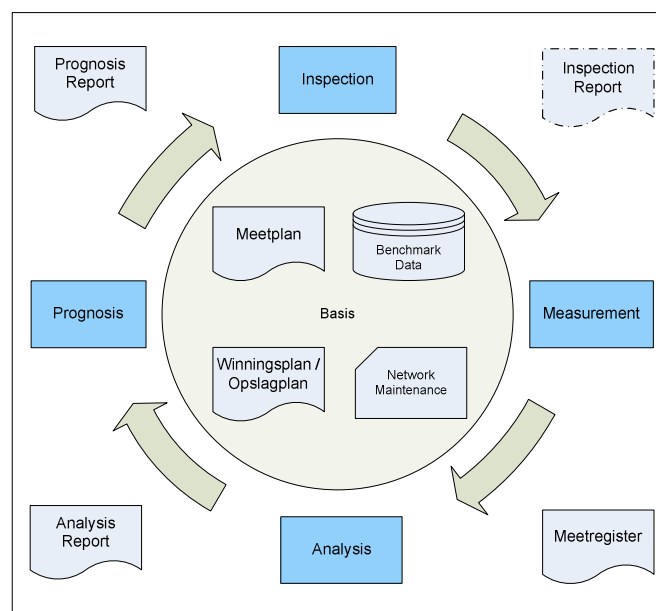
een zekere mate van overtalligheid van peilmerken noodzakelijk. Dat is naast de zorgvuldige locatiekeuze nodig met het oog op het verdwijnen of verstoren van peilmerken. De ervaring leert dat per jaar ongeveer 1 à 2 procent van de peilmerken verdwijnt, respectievelijk onbruikbaar wordt. Meetnetten moeten daarom minimaal éénmaal in de meetinterval volgens het meetplan, doch uiterlijk minimaal 1 keer in de vijf jaar verkend worden om de status van de objecten en de aanwezigheid van de peilmerken te controleren, zeker als die meetnetten minder frequent gemeten worden. Verdwenen of verstoorde peilmerken dienen te worden vervangen. Het resultaat van de verkenning dient in een rapport te worden vastgelegd. De mijnbouwmaatschappij geeft in een voorstel aan op welke wijze de vervangen peilmerken in het netwerk worden opgenomen en op welke termijn. Dit voorstel wordt tezamen met de rapportage van het resultaat van de verkenning ter goedkeuring aangeboden aan SodM. Na goedkeuring door SodM kunnen de resultaten in het te actualiseren meetplan worden verwerkt.

Tevens dienen nieuw geplaatste peilmerken conform de “Productspecificaties beheer NAP” van Rijkswaterstaat (als beheerder van NAP peilmerken) te worden geplaatst en gerapporteerd aan Rijkswaterstaat.

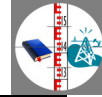
3.1.1 Proces

Waterpassing is het meten van hoogteverschillen tussen peilmerken.

Waterpassing is deel van een meetcyclus dat (van een proces dat) permanent doorlopen wordt. Figuur 3.1 brengt dit in beeld.



Figuur 3.1 De meetcyclus. In de binnenste cirkel zijn de elementen weergegeven die het proces aandrijven. De belangrijkste activiteiten staan in de blauwe blokken. De activiteitrappen zijn in de hoeken weergegeven.



De volgende stappen worden doorlopen:

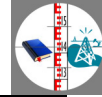
1. De mijnbouwonderneming verricht (of laat verrichten) de voorgeschreven deformatiemetingen. Bij secundaire waterpassingen worden de meest recente richtlijnen hieromtrent van de DID van RWS opgevolgd.
2. De meetgegevens van de secundaire waterpassingen worden ter kwaliteitsborging overhandigd aan de DID. Deze dienst voert vereffeningen uit en stelt nieuwe NAP-hoogten voor de aangemeten peilmerken vast.
3. Na een positieve terugmelding van de DID stelt de mijnbouwonderneming over de verrichte waterpassing een definitief rapport op. Dit openbare rapport wordt zoveel mogelijk volgens een standaardopzet vervaardigd ten genoegen van de Inspecteur-generaal der Mijnen (IGM). Naast dit standaardrapport ontvangt de IGM een aparte differentiestaat met geschatte hoogteverschillen voor eigen gebruik. Voor de inhoud van het standaardrapport zie Bijlage F.
4. Na instemming van de IGM met het rapport geeft hij dit rapport officieel vrij en publiceert de DID de nieuw vastgestelde NAP-hoogten in haar openbare NAP-bestand. Met het vrijgegeven rapport wordt voldaan aan het gestelde in artikel 31, lid 3, MBB.
5. Het staat de mijnbouwondernemingen vrij om in aanvulling op de meetrapporten, in eigen beheer vervaardigde interpretatiestudies uit te brengen (bijvoorbeeld in het kader van privaatrechtelijke overeenkomsten). De IGM zal eveneens kennis nemen van deze studies en ze beoordelen.
6. Daarnaast voert SodM eigen onderzoek uit naar de mogelijke consequenties van de meetresultaten voor eerder uitgebrachte prognoses. Dit mede om mogelijke ongewenste situaties aan het maaiveld tijdig te traceren. Wanneer de inzichten van Staatstoezicht op de Mijnen en de resultaten van de door de mijnbouwonderneming uitgebrachte interpretatiestudie te zeer uiteen lopen, vindt overleg plaats.

3.1.2 Peilmerken

Van belang is dat een peilmerk stabiel en representatief is. Dit laatste betekent dat het peilmerk de door de delfstoffenwinning veroorzaakte vervorming van de diepe ondergrond weergeeft en dat het niet door andere effecten uit de ondiepe ondergrond – bijvoorbeeld grondwaterstand of vorst - beïnvloed wordt. (Zie bijlage B2). Als de effecten te scheiden zijn in een ruimte-tijd analyse vervalt deze eis. Verstoring van peilmerken door activiteiten aan het maaiveld zoals graafwerkzaamheden en bermonderhoud treedt zeer vaak op.

Peilmerken dienen direct of indirect (aangebracht in een object) op de eerste stabiele laag (veelal het Pleistoceen) gefundeerd te worden. Het Pleistoceen is veelal de eerste competente zandlaag in de ondiepe ondergrond is, met conuspenetratiewaarden van 20 à 30 MPa. Om verstoring te voorkomen bij peilmerken die in het veld (de berm) en niet in een object zijn aangebracht, wordt aanbevolen om deze door een put met deksel te beschermen. Eventueel kan een aanrijdbeveiliging worden aangebracht.

Bij plaatsing van peilmerken in gebouwen wordt vooraf onderzoek verricht naar stabiliteit en fundering van het betreffende gebouw, waarbij de toestand van het



gebouw wordt vastgelegd met foto's. Bij het ontbreken van goed gefundeerde gebouwen wordt gebruik gemaakt van op de eerste stabiele laag (doorgaans Pleistoceen) gefundeerde peilmerken. Daarvan bestaan diverse uitvoeringsvarianten, waarbij het belangrijkste is dat ze aan de hier geformuleerde eisen voldoen. Bestaande peilmerken worden slechts opgenomen in het meetnet na onderzoek van hun historische beweging en de stabiliteit van de fundering. De situatie van het gebouw voor aanvang van winning wordt vastgelegd met foto's.

Peilmerken voor de detectie van bodemdaling door delfstoffenwinning moeten dus met de nodige zorg worden aangebracht. Hetzelfde geldt voor de keuze van het object, waarin een peilmerk wordt aangebracht. Vooral de stabiliteit van bovengrondse merken is van groot belang. Naast beweging van de diepe ondergrond door delfstoffenwinning kunnen er meerdere oorzaken zijn die daling van een merk veroorzaken:

- Kwaliteit van het peilmerk: type bout en verankering.
- Kwaliteit van het object, waarin het merk is verankerd, waarbij van belang zijn:
 - Robuustheid en vormvastheid;
 - Kwaliteit van de fundering;
 - Ondergrond waarop het bouwwerk is gefundeerd;
 - Gevoeligheid voor wijzigingen van de grondwaterstand;
 - Gevoeligheid voor verstoring;
 - Beschadiging;
 - Opbouw Holocene;
 - Diepte en opbouw eerste stabiele laag (bijvoorbeeld Pleistoceen);
 - Waterwinning.

Bij het plaatsen van peilmerken is het van belang te weten hoe diep het Pleistocene zand met conuswaarden van 20 à 30 MPa onder het maaiveld ligt. In gebieden waar het Holoceen een geringe dikte heeft of geheel ontbreekt en dus de eerste stabiele laag nagenoeg aan of direct onder het maaiveld ligt, is de peilmerkbeweging als gevolg van beweging van het Holoceen minimaal. Om het aantal van de (kostbare) diepgefundeerde merken te beperken vormt een beperkt aantal diep in de eerste stabiele laag gefundeerde punten in combinatie met bovengrondse peilmerken een acceptabele oplossing voor detectie van bodemdaling door delfstoffenwinning. Daarnaast is opname van bovengrondse punten in een meetnet ook noodzakelijk om meettechnische redenen.

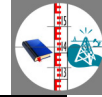
Bij de keuze van peilmerken die - naast de diepgefundeerde punten - acceptabel zijn in een meetnet, moet de kans op autonome beweging minimaal zijn. Door autonome bewegingen kan de daling van twee peilmerken die dicht bij elkaar in de buurt liggen namelijk sterk verschillen. Tevens kunnen de met zorg gekozen peilmerken het ondergrondse merk controleren op eventuele verstoring. Zo mogelijk worden paren van nabijgelegen peilmerken geplaatst ten behoeve van de onderlinge controle bij afwijkende peilmerkbeweging (verklikpunten).



Het verdient aanbeveling om rond een diepgefundeerd peilmerk minimaal 2 bovengrondse peilmerken te plaatsen. De overwegingen voor dit aantal zijn:

- Eén enkel peilmerk geeft een indicatie die,
- door een tweede peilmerk kan worden bevestigd waarbij,
- een derde peilmerk uitsluitel kan geven over een eventuele tegenspraak.

De plaatsing dient bij voorkeur in drie gescheiden objecten te geschieden, omdat het onwaarschijnlijk is dat verscheidene peilmerken in verschillende objecten eenzelfde (mogelijk onjuist) bewegingspatroon in de tijd vertonen. Voor object kan hier ook worden gelezen schroefanker.



3.1.3 Ontwerpcriteria voor kringen, trajecten en secties

Bij het inrichten van een meetnetwerk gaat het om de keuze van het aantal en de ligging van peilmerken, de fundering van de peilmerken en de manier waarop de metingen op of tussen de peilmerken worden uitgevoerd. Hierbij moet met een aantal factoren rekening worden gehouden, zoals een voldoende overtaligheid en de verwachte bodemdaling volgens het reservoirmodel en de geomechanische modellering. De peilmerken moeten zodanig worden ingericht, dat de gevoeligheid voor maaiveld dalingen of andere ondiepe effecten op de verticale positie geminimaliseerd wordt, zodat hoogteverandering van de peilmerken zoveel mogelijk de bodemdaling door delfstoffenwinning representeren.

Het aantal, de locatie van peilmerken en het ontwerp van het waterpasnetwerk worden afgestemd op de verwachte vorm en bewegingssnelheid van de bodemdalingsskom. Peilmerken hebben een goede spreiding over de verwachte kom en er zijn verscheidene peilmerken in de nabijheid van het voorspelde en het gemeten diepste punt. Enkele waterpastrajecten dienen de assen van de bodemdalingsskom te volgen.

In het buitengebied worden trajecten opgezet naar minimaal vier nabij gelegen stabiele peilmerken, één in iedere windrichting. Deze peilmerken staan dus niet onder invloed van de delfstoffenwinning. Ze dienen door tenminste drie nabijgelegen peilmerken gecontroleerd te worden.

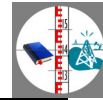
Een waterpasnet bestaat uit meer dan één kring. Iedere kring is opgebouwd uit meer dan één waterpastraject en een traject bestaat uit één of meer secties. Een sectie is de afstand tussen twee peilmerken. De maximale lengte van een sectie is in bebouwd gebied kleiner of gelijk aan 500 m, in landelijk gebied maximaal 1000 m. Daarbij kan van hulppeilmerken gebruik gemaakt worden.

Het ontwerp van het waterpasnet wordt getoetst in een voorverkenningberekening (-toetsing) met behulp van vereffeningsoftware volgens de Delftse methode van toetsing. Zie paragraaf 3.1.7. (Vereffeningstechniek).

3.1.4 Beheer van waterpasmeetnet

Gezien de lange levensduur en het belang van een goed onderhouden waterpasmeetnet moet het net beheerd worden. Van alle peilmerken worden, naast de zakkingshistorie, ook metadata – zie paragraaf 3.1.2 – verzameld en deze informatie wordt onderhouden. Daartoe dient het waterpasmeetnet regelmatig gecontroleerd te worden. Het beste kan dit voorafgaande aan de waterpassing gebeuren of, bij een langere epoeche tussen twee waterpassingen, minimaal om de twee à drie jaar.

De metadata en data worden in een database opgeslagen. Het resultaat van de regelmatige controles wordt in een rapport vastgelegd en mutaties worden in de database verwerkt.



Gedrag van peilmerken (historie, beoordeling)

Een eerste indicatie voor het gedrag van de peilmerken geven het historische onderzoek van de aanwezige NAP-peilmerken en de resultaten van de eerste twee metingen.

Afwijkend gedrag van peilmerken (verstoord, verdwenen, nieuw)

Afwijkend gedrag van een peilmerk – verstoord, verdwenen, nieuw – ten opzichte van de historie of van peilmerken in de directe omgeving wordt in de geodetische analyse vastgesteld. Het afwijkend gedrag wordt in het meetregister vermeld.

3.1.5 Productiespecificaties beheer NAP RSW-DID

De eisen en voorwaarden voor de waterpassing en te gebruiken apparatuur zijn in de “Productspecificatie beheer NAP” – geldige versie – van de RWS-DID opgenomen.

3.1.6 Vereffeningstechniek

De eisen en voorwaarden die zijn beschreven in de “Gebruikershandleiding versie 4.0 MOVE 3D” – of gelijkwaardig – zijn van toepassing.

3.1.7 Precisie en betrouwbaarheid

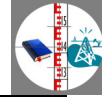
De eisen en voorwaarden zijn in de “Productspecificatie beheer NAP” – geldige versie – van de RWS-DID opgenomen.

3.1.8 Eindproduct van waterpassing

Resultaten van de waterpassing en vereffening worden vastgelegd in een rapport genaamd ‘Meetregister’. Bijlage F geeft een voorbeeld van de inhoudsopgave van zo’n meetregister. Tevens wordt een differentiestaat opgemaakt, waarin per peilmerk en per epoche de hoogteverschillen ten opzichte van het gekozen referentiepunt worden vermeld.

3.2 GPS Netwerken

Deze paragraaf behandelt GPS-netwerken voor hoog-precieze positiebepalingstoepassingen. Eerst zal kort het principe van hoge-precisie GPS-positiebepaling worden uitgelegd in paragraaf *Hoge-precisie GPS-positiebepaling, gebruik van fase- en codemetingen*. Daarna wordt in paragraaf *Precisie van GPS-netwerken* ingegaan op de haalbare precisie voor netwerken welke zijn ingedeeld op basis van de afstand tussen de GPS-ontvangers. Vervolgens zullen in paragraaf *Ontwerp, inrichting en betrouwbaarheid van GPS-netwerken* diverse aspecten worden behandeld rond het ontwerpen, de inrichting en betrouwbaarheid van zulke GPS-netwerken. In paragraaf *GPS-verwerkingsmethoden* worden daarna de diverse stappen beschreven om de GPS-metingen te verwerken tot hoogprecieze posities. Paragraaf *Schatting van stationssnelheden uit tijdreeksen van GPS-coördinaten* behandelt kort de schatting van de snelheid van permanente GPS-stations uit langdurige



tijdreeksen van coördinaten. Tenslotte gaat paragraaf *Toekomstige ontwikkelingen* kort in op voor GPS van belangzijnde toekomstige ontwikkelingen. Voor uitgebreidere informatie wordt verwezen naar de referenties in de bijlage H.2.

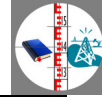
3.2.1 Hoge-precisie GPS-positiebepaling, gebruik van fase- en codemetingen

GPS is een techniek voor 3D positiebepaling, welke in principe overal op aarde en onder alle weersomstandigheden werkt. GPS-toepassingen die de allerhoogste precisie (cm-niveau of beter) vereisen, zijn gebaseerd op relatieve metingen van zowel de fase van de draaggolf, alsmede de code ("pseudo-range") van het GPS-signaal. Relatief wil hier zeggen dat simultaan met minimaal twee ontvangers naar dezelfde satellieten wordt gemeten. De precisie (standaardafwijking) van de fasemetingen ligt op mm-niveau en is globaal een factor 100 beter, dan die van de codemetingen. Codemetingen worden gebruikt voor standaard 'stand-alone' GPS-positiebepalingstoepassingen.

Nadeel van de fasemeting is dat deze behept is met een onbekende meerduidigheid. De aanwezigheid van deze meerduidigheid heeft als gevolg dat de precisie van de positie gebaseerd op een korte meetduur grotendeels wordt bepaald door de codemetingen. Bij een enkele epoche of instantaan is de positie zelfs volledig gebaseerd op de codedata, aangezien de meerduidigheden bij fasemetingen dan niet opgelost kunnen worden. De positieprecisie ligt dan in de orde van enkele decimeters. De precisie verbetert met het toenemen van de waarnemingsduur, vanwege de veranderende relatieve ontvanger-satellietgeometrie. Aangezien deze geometrie slechts langzaam verandert, wordt een zeer hoge positieprecisie (op mm-cm niveau) enkel bereikt na zeer lang meten (vanaf ruwweg een uur of meer).

De sleutel tot korte meettijden in combinatie met een hoge positieprecisie ligt in het geheelallig bepalen en vasthouden van de fasemeerduidigheden. Wanneer het verschil van de fasemetingen naar dezelfde satelliet wordt genomen en dit ook voor een andere satelliet wordt gedaan, en de zo gevormde 'single-differences' van elkaar af te trekken, wordt een zogenaamde 'double-difference' waarneming verkregen, waarvan de double-difference meerduidigheid een geheel aantal golflengten is. D.m.v. slimme zoekprocedures ('ambiguity resolution') kunnen deze meerduidigheden op hun geheelallige waarden worden bepaald. Vervolgens kunnen de fasemetingen hiervoor worden gecorrigeerd, zodat veel sneller van de hoge faseprecisie gebruik kan worden gemaakt.

Het is wel belangrijk dat simultaan met de fasemetingen ook de codemetingen worden gebruikt. De codemetingen zijn van zeer van belang zijn om ervoor te zorgen dat de 'float' (reëelwaardige) meerduidigheden van voldoende hoge precisie zijn, zodat geheelallige meerduidigheden correct kunnen worden geschat. Ook zorgt het tracken van het signaal op meerdere frequenties voor een betere precisie van de float oplossing dan bij slechts één frequentie.



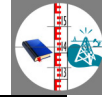
Naast het voordeel voor de geheeltalligheid van de fasemeerduidigheid biedt een relatieve of 'differentiële' meetopzet de mogelijkheid om systematische fouten tengevolge van o.a. satellietbaan en atmosfeer te verminderen of zelfs nagenoeg geheel te elimineren. Deze fouten nemen gewoonlijk toe met het toenemen van de afstand tussen de ontvangers. Wanneer de fouten niet meer mogen worden verwaarloosd, kan het effect van de vertraging van de signalen tengevolge van de ionosfeer (het grootste type atmosfeerfout in GPS-metingen) worden geëlimineerd uit dubbel-frequentiemetingen. Deze extra metingen (fase en code op meerdere frequenties) leiden tevens tot verhoging van de betrouwbaarheid van de meettechniek.

3.2.2 Precisie van GPS-netwerken

Binnen de hoogprecieze GPS toepassingen kan een indeling worden gemaakt naar gelang de afstand tussen de GPS-ontvangers. Men kan grofweg drie typen GPS-netwerken onderscheiden: kleinschalige (< 30 km), middelgrote (30-300 km) en grootschalige (> 300 km) netwerken. Voor kleinschalige netwerken is de precisie met name afhankelijk van de meet- of sessieduur, terwijl voor de middelgrote en zeer grote netwerken ook de afstanden tussen de stations van invloed zijn. Voor alle drie de type netwerken is aangenomen dat geodetische (dubbele-frequentie) ontvangers worden gebruikt, uitgerust met liefst een 'choke-ring' antenne ter reductie van multipath-fouten. Het fasecentrum van de antenne dient daarnaast zeer stabiel te zijn.

Kleinschalige GPS-netwerken

Wanneer de afstand tussen twee of meer GPS-stations is beperkt tot enkele tientallen kilometers, dan spreken we over een kleinschalig of lokaal GPS-netwerk. Kleinschalige GPS-netwerken kunnen worden opgezet voor allerlei doeleinden, variërend van landmeetkunde tot deformatie-analyse. De afstandsbeperking tussen de stations heeft met name invloed op de grootte van de fouten in de GPS-metingen tengevolge van de voortplanting door de atmosfeer. Bij GPS wordt er onderscheid gemaakt tussen de frequentie-dispersieve ionosferische vertragingen en de frequentie-onafhankelijke vertragingen tengevolge van de troposfeer. Afhankelijk van de actuele omstandigheden kunnen voor kleinschalige netwerken de differentiële ionosferische vertragingen gewoonlijk worden verwaarloosd. Dat leidt tot minder onbekende parameters en dientengevolge tot kortere waarneemtijden om een hoge positieprecisie te behalen. Voor kleinschalige netwerken volstaan de door de satellieten uitgezonden 'broadcast ephemeriden' om de satellietposities te berekenen. Vanwege de korte afstand tussen de ontvangers zullen eventuele fouten in de satellietbaan uitdempen. Door het gebruik van identieke antennes/ontvangers worden antenne-specifieke effecten ook geëlimineerd. Voor kleinschalige netwerken is het mogelijk om de geheeltallige fasemeerduidigheden zeer snel, dan wel instantaan (gebaseerd op een enkele epoeche) te bepalen (Teunissen et al., 1997). Langere waarnemingstijden kunnen daarentegen wel nodig zijn om locatieafhankelijke effecten zoals tengevolge van multipath van het signaal voldoende te laten uitmiddelen (Kremers et al., 2005).



Met de geheeltallige meerduidigheden vastgehouden, ligt de horizontale precisie in de orde van 2 à 3 mm, terwijl de verticale precisie op een niveau van 5 mm (1-sigma standaardafwijking) ligt, zie ook (Even-Tzur et al., 2004).

Deze getallen gelden voor een 'statische' vereffening, waarbij wordt verondersteld dat de ontvangers niet bewegen gedurende de tijdspanne van de metingen. De precisie van de verticale component is typisch 2-3 keer slechter dan horizontaal, vanwege de ongunstigere satellietgeometrie (alle satellieten bevinden zich boven het te bepalen punt). Hierbij wordt opgemerkt, dat de verticale precisie grotendeels afhankelijk is van de modellering van de troposfeer. Het grootste gedeelte van de troposferische vertraging kan worden gecorrigeerd m.b.v. een a-priori troposfeermodel, bijv. (Saastamoinen, 1972).

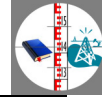
Het resterende gedeelte wordt gewoonlijk per ontvanger 'gemapped' naar het locale zenith en deze zenithvertragingen worden meegeschat in de verwerking. Helaas hebben deze extra parameters een nadelige invloed op de precisie van de hoogtecomponent. Een precisie van 5 mm in de hoogte is dan ook alleen haalbaar indien de meetduur lang genoeg is (min. 24 uur; zie Kleijer, 2004).

Overigens kan dit worden verbeterd wanneer de troposferische mapping functie wordt gebaseerd op 'numerical weather models', i.p.v. gebruik van een conventionele mapping functie, zoals die van bijv. Niell. Indien daarnaast ook wordt gecorrigeerd voor effecten tengevolge van 'atmospheric loading' en 'ocean loading', is een verticale precisie in de orde van 2 mm haalbaar (Munekane et al., 2008).

Middelgrote GPS-netwerken

Wanneer de afstanden tussen de GPS-stations te groot worden en de differentiële ionosferische vertragingen niet meer kunnen worden verwaarloosd, worden deze opgelost uit de fase- en codemetingen, tezamen met de andere parameters. Om fouten tengevolge van de vastgehouden satellietposities te minimaliseren, dienen deze te zijn gebaseerd op precieze baanproducten (van bijv. de International GNSS Service, oftewel IGS). In plaats van de ionosferische parameters te schatten uit de waarnemingen, kunnen ze ook worden geëlimineerd door het nemen van de ionosfeervrije combinatie van de dubbel-frequentiemetingen. Dit is equivalent aan het oplossen van de fasmeerduidigheden en positiecoördinaten. Eventueel kan de aanwezigheid van de ionosfeer worden 'gewogen' in het model. Meestal heeft men wel een idee van de ruimtelijke (en temporele) variatie van de differentiële ionosfeer. Dit kan het mathematisch meet-model aanzienlijk versterken, met name de geheeltallige meerduidigheidsbepaling blijkt zeer van deze 'ionosfeer-weging' te profiteren (Odiijk, 2000).

Voor wat betreft de troposfeer, ingeval van middelgrote (30-300 km) GPS-netwerken, worden de zenith troposferische vertragingen gewoonlijk relatief geschat (t.o.v. een referentie-ontvanger). Deze netwerken worden vaak opgezet voor permanente doeleinden, zoals het bepalen van regionale satellietklok- en atmosferische correcties voor 'netwerk-RTK en Precise Point Positioning Real-Time Kinematic (PPP-RTK)' gebruikers. Na toepassing van de netwerkcorrecties is het voor deze gebruikers mogelijk om positiebepaling te doen met ongeveer 1



cm horizontaal en 2 à 3 cm verticaal (gebaseerd op zeer korte waarnemingstijden, zie Landau et al., 2002). Tevens zijn permanente netwerken uitermate geschikt voor het permanent monitoren van de atmosfeer (troposferische waterdamp, ionosferische TEC) en om multipath-effecten in kaart te brengen. Deze netwerken maken tegenwoordig vaak deel uit van de nationale horizontale en verticale geometrische infrastructuur. In Nederland is dit het Actief GNSS Referentie Systeem Nederland (AGRS.NL, zie Van der Marel, 1998), bestaande uit een netwerk van 9 referentiestations, waarvan een aantal tegelijk deel uitmaakt van het grotere Europese EUREF-netwerk (zie volgende subparagraaf).

Grootschalige GPS-netwerken

Netwerken waarbij de GPS-stations een onderlinge afstand hebben van meer dan een paar honderd tot duizenden kilometers zijn meestal opgezet in continentaal of zelfs globaal verband. Te denken valt aan het EUREF Permanent Network in Europa (Bruyninx, 2004), het Asia-Pacific Reference Network (APREF, zie Huisman et al., 2011) en het wereldwijde IGS-netwerk (Dow et al., 2009). Naast continentale referentienetwerkdoeleinden dienen deze grootschalige netwerken ter bepaling van correcties voor GNSS-gebruikers, zoals satellietbaanparameters, alsmede satellietklokparameters en globale atmosferische correcties (ionosfeer en troposfeer) voor Precise Point Positioning-gebruikers (zie paragraaf 3.2.4. *GPS-verwerkingsmethoden*). Gezien de grootte van de netwerken, is het mogelijk de atmosfeercorrecties in absolute zin, dus per ontvanger, te bepalen. Voor wat betreft de positienauwkeurigheid, deze is afhankelijk van de meetduur; met een 2-uurs dataset is doorgaans een precisie van 2 cm horizontaal en 5 cm verticaal haalbaar. Met een langere meetduur (24-uursdata) en gebruik van precieze (finale) IGS-banen is de horizontale precisie beter dan 1 cm en de verticale precisie in de orde van 1-2 cm (Geoscience Australia, 2011). Een horizontale precisie van slechts enkele mm's en een verticale precisie van 5 mm is haalbaar bij gebruik van (dagelijkse) coördinaatoplossingen die één of meerdere jaren beslaan.

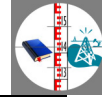
3.2.3 Ontwerp, inrichting en betrouwbaarheid van GPS-netwerken

De vereiste kwaliteit van met GPS bepaalde posities legt eisen op aan het ontwerp en de inrichting van GPS-netwerken. Daarnaast wordt de punt dichtheid van het netwerk en de duur van de sessies (enkele campagne of permanent) mede bepaald door het doel van het GPS-netwerk. We volstaan hier met het geven van algemene vuistregels voor het ontwerp, inrichting en betrouwbaarheid van GPS-netwerken.

Keuze van de locatie van GPS-stations

Bij het kiezen van de locatie van de GPS-stations, dient rekening te worden gehouden met, zie bijv. Hofmann-Wellenhof et al. (1994) en Polman & Salzmann (1996):

1. een stabiele ondergrond, d.w.z. opstelling boven een diepgefundeerd (bij voorkeur op de 1e stabiele laag, b.v. het Pleistoceen) meetpunt;
2. voldoende vrij zicht boven een zekere elevatie boven de horizon ter



- voorkoming van signaalblokkering;
- 3. zo min mogelijk reflecterende bronnen in de nabijheid van de opstelling (zoals metaal, hekken, wateroppervlakken), ter voorkoming van multipath-effecten;
- 4. zo min mogelijk in de nabijheid van elektrische installaties (zenders, hoogspanningskabels) ter voorkoming van signaalverstoringen.

Overige factoren die van invloed zijn op de keuze van de locatie zijn:

- 1. controlepunten nabij het GPS station;
- 2. mogelijkheid om GPS punten op te nemen in andere netten (waterpas en/of InSAR);
- 3. nabijheid van stroomvoorziening en internet (bij permanente monitoring);
- 4. toestemming regelen met grondeigenaren, zeker bij niet permanente meetcampagnes moet er gewaarborgd zijn dat je periodiek kunt meten op dezelfde locatie.

Betrouwbaarheids- of sterkteberekening van het GPS-netwerk

Alvorens de GPS-metingen te verzamelen en te verwerken, dient te worden geanalyseerd of het ontworpen net in combinatie met de veronderstelde precisie van de waarnemingen (voornamelijk bepaald door de apparatuur) voldoet aan de eisen t.a.v. de betrouwbaarheid. Dat wil zeggen: in welke mate is het ontwerp in staat (grote) fouten in de waarnemingen op te sporen m.b.v. statistische toetsing. Deze fouten kunnen outliers en cycle-slips in de fase- en codewaarnemingen zijn, maar ook bijv. fouten door het gebruik van een verkeerde opstelhoogte. Hierbij dient het GPS-netwerk voldoende overtalligheid (redundantie) te bezitten. Bij GPS vertoont de overtalligheid en dus de mogelijkheid op toetsing en kwaliteitscontrole zich op de volgende vier niveaus (Teunissen & Kleusberg, 1998):

1. Ontvangerniveau

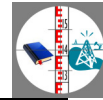
De fase- en codemetingen van een enkele GPS-ontvanger bieden al overtalligheid vanwege het meten op meerdere frequenties en op meerdere tijdstippen waarbij de fasemeerduidigheden in de tijd constant worden verondersteld.

2. Basislijnniveau

Voor een enkele basislijn tussen twee ontvangers ontstaat extra overtalligheid t.o.v. punt 1 tengevolge van het lineariseren van de ontvanger-satelliet afstanden in de relatieve ontvangerpositie.

3. Netwerkniveau

Extra overtalligheid t.o.v. punt 2 ontstaat door de vorming van een netwerk door het koppelen van meerdere gelijktijdig gemeten basislijnen. Hoewel met n stations er $n(n-1)/2$ basislijnen kunnen worden gevormd, zijn er slechts $n-1$ onafhankelijk. Mits de correlatie tussen de basislijnen streng in rekening wordt gebracht, maakt het niet uit welke $n-1$ basislijnen worden gekozen (sternet of kringnet met 'loops'). Bij een *basislijn-per-basislijn* verwerking (zie paragraaf 3.2.4 *GPS-verwerkingsmethoden*) is er een voorkeur voor de kortst mogelijke



basislijnen vanwege de geringste ionosfeereffecten (daar deze doorgaans proportioneel zijn met de basislijnlengthe).

4. Aansluitingsniveau

Extra overtalligheid ten opzichte van punt 3 ontstaat door aansluiting van het 'vrije' net aan de gewenste geodetische infrastructuur (d.m.v. het opnemen van tenminste vier 3D-controlepunten in het netwerk).

De interne betrouwbaarheid beschrijft de minimale grootte ("*grenswaarde*") van de fouten die kunnen worden gedetecteerd met de statistische toetsen. De externe betrouwbaarheid heeft betrekking op de invloed van deze grenswaarden op de meerduidigheden en de uiteindelijke ontvangerpositie. Bijvoorbeeld, voor wat betreft cycle-slips in de fasemetingen dient de meetopzet zodanig te zijn dat een slip van 1 cycle ook nog kan worden ontdekt. Een onontdekte slip kan de geheeltallige meerduidigheidsbepaling en daarmee de uiteindelijke positiebepaling nadelig beïnvloeden.

De betrouwbaarheids- of sterkteberekeningen hangen af van de precisie van de metingen alsmede van het netontwerp. Bij het netontwerp speelt overigens de relatieve ontvanger-satellietgeometrie een belangrijke rol en deze kan worden voorspeld/geanalyseerd m.b.v. planningssoftware. Met planningssoftware kunnen analyses worden gedaan t.a.v. onder meer satellietbeschikbaarheid en 'dilution-of-precision' (effect van de satellietgeometrie op positieprecisie). Het is belangrijk om bij het plannen van de daadwerkelijke metingen te controleren of er zich geen abnormale atmosferische verstoringen zullen voordoen (inspectie van het 'ruimteweerbericht').

3.2.4 GPS-verwerkingsmethoden

Na de inwinning van de GPS-data, kunnen de volgende verschillende stappen worden onderscheiden in de verwerking van de netwerkdata:

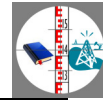
1. Voorbewerking

Deze heeft de volgende doelen:

- Berekening van benaderde waarden voor de ontvangerposities t.b.v. linearisatie;
- Berekening van de satellietposities (uit 'broadcast' ephemeriden of IGS-banen);
- a-priori correcties aan de fase/code data (atmosfeer, aardgetijden, ocean loading, etc.);
- Eerste controle van de kwaliteit (grove fouten) en beschikbaarheid van de metingen.

2. 'Float' basislijn-per-basislijnoplossing of netwerkoplossing

Dit is een standaard kleinste-kwadratenoplossing waarbij de double-difference fasemeerduidigheden als reëelwaardige parameters worden geschat. Eén station wordt vastgehouden op zijn a-priori positie. Afhankelijk van de verwerkingssoftware worden de fase- en codemetingen 'gedifferenced' of equivalent in 'undifferenced' aanpak verwerkt. Tevens kunnen parameters voor de ionosfeer worden geschat dan wel worden geëlimineerd middels de ionosfeervrije lineaire combinatie. De kwaliteit van deze oplossing wordt (vooral bij korte meetduur) grotendeels bepaald door de kwaliteit van de code-



metingen. Naast een schattingsdeel, dient de software een procedure te hebben voor de detectie (toetsing) en correctie van fouten in model en/of data (Overall Model Test; data-snooping).

3. *Geheeltallige schatting en validatie van de double-difference fasemeerduidigheden*

Voor de geheeltallige schatting is de LAMBDA-methode (Teunissen, 1995) het meest optimaal, in de zin van de hoogste kans op succesvol fixen van de meerduidigheden. Ter beoordeling van de correctheid van de geheeltallig geschatte meerduidigheden, dient er een statistische validatieprocedure (Teunissen & Verhagen, 2009) te worden uitgevoerd. Overigens is niet alle verwerkingssoftware uitgerust met de LAMBDA methode. Zo is de bekende 'Bernese GPS software' (Dach et al., 2007) gebaseerd op de 'general search' strategie voor meerduidigheidsbepaling. Er is wel al geëxperimenteerd met een LAMBDA-gebaseerde projectversie van de Bernse software (Schaer, 2009) om integrale schatting van de GPS en GLONASS meerduidigheden mogelijk te maken.

4. *'Fixed' basislijn-per-basislijnoplossing oplossing of netwerkoplossing*

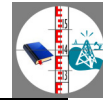
Deze oplossing is gebaseerd op vastgehouden double-difference geheeltallige fasemeerduidigheden, waardoor de ontvangerposities zijn te bepalen met mm-cm precisie. Wederom kan de toetsingsprocedure uit stap 2 worden herhaald, om eventueel onontdekte fouten op te sporen.

5. *Definitieve coördinaatoplossing*

De met GPS bepaalde relatieve basislijncomponenten zijn gedefinieerd in het referentiestelsel van de satellietposities (WGS84 voor broadcast ephemeriden, dan wel de realisatie van het International Terrestrial Reference System (ITRS) ingeval van IGS-banen). Indien de posities in een ander referentiestelsel (bijv. het Europese ETRS89 of het Nederlandse RD/NAP) zijn gewenst, dan kan dit via de volgende manieren worden gerealiseerd:

1. gewenste stelsel m.b.v. gepubliceerde ontvangerposities in het stelsel van de satellieten worden getransformeerd naar het gewenste stelsel met behulp van gepubliceerde transformatieparameters (zoals bijv. in Polman & Salzmann, 1996);
2. indien er meerdere punten zijn ingemeten welke bekend zijn in het gewenste referentiestelsel, dan kan er een (streng) aansluitingsvereffening (inclusief toetsing) worden uitgevoerd, waarbij de transformatieparameters als onbekenden worden meegeschat.

Indien wordt gekozen voor een aansluitingsvereffening, dan is de precisie na aansluiting mede afhankelijk van de aansluitingsmethode, d.w.z. een 'streng' kleinste-kwadratenvereffening, dan wel een 'pseudo' kleinste-kwadratenvereffening. Bij een streng aansluiting krijgen alle punten een correctie, zowel de punten van het 'vrije' GPS-netwerk (met de positie van één GPS-station vastgeprikt), alsmede de aansluitingspunten. De precisie van het aangesloten net is dan altijd beter dan van het vrije net, aangezien er informatie is toegevoegd in de vorm van de bekende coördinaten van de



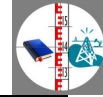
aansluitingspunten. Bij een pseudo-aansluiting krijgen de vrije punten wel, maar de aansluitingspunten geen correctie. Afhankelijk van de precisie van de aansluitingspunten van de afzonderlijke puntenvelden kan de precisie na aansluiting zowel verbeteren als verslechteren, vergeleken met de precisie van de vrije netpunten (Polman & Salzmann, 1996).

In plaats van een basislijn-per-basislijn dan wel netwerkoplossing met de meerduidigheden geschat als float parameters (zie punt 2), kunnen de netwerkmetingen ook worden verwerkt volgens de Precise Point Positioning (PPP) aanpak (Zumberge et al., 1997). Hierbij worden de stations niet gezamenlijk maar ieder apart verwerkt. Hiervoor zijn satellietklokcorrecties nodig welke net als de satellietbanen beschikbaar worden gesteld door IGS. Onbekende parameters zijn de ontvangerpositie, ontvangerklok, troposferische zenithvertraging, ionosferische vertraging en reëelwaardige fasemeerduidigheden. De ionosfeer kan wederom worden geëlimineerd d.m.v. de ionosfeervrije combinatie (uit dubbel-frequentiemetingen). De precisie van de met (statische) PPP bepaalde posities is afhankelijk van de meetduur. Na een convergentietijd van ruwweg 30 min ligt de precisie op dm-niveau voor horizontaal. Voor verticaal kan dit langer duren. Na meerdere uren kan cm-precisie worden bereikt (Kouba & Héroux, 2001). Om de precisie van de hoogtecomponent op cm-niveau te krijgen, kan zelfs 24-uursdata nodig zijn (Martin et al., 2011). Nadeel is wel dat bij PPP de meerduidigheden (vooral nog) niet als geheeltallige waarden kunnen worden geschat.

Bij punt 5 (definitieve coördinaatoplossing) wordt opgemerkt dat indien de GPS-ontvangercoördinaten van het vrije net niet worden getransformeerd van het ITRS stelsel van de IGS-satellietbanen naar een ander referentiestelsel zoals ETRS89, er een systematische drift in tijdreeksen van ITRS-ontvangercoördinaten te zien zal zijn. Deze voornamelijk horizontale drift wordt veroorzaakt doordat de Europese plaat beweegt ten opzichte van ITRS (met een paar cm/jaar in Noordoostelijke richting). Voor kleinschalige netwerken zullen alle stations vrijwel dezelfde drift ondergaan, waardoor deze wordt geëlimineerd in de coördinaatverschillen. Deze drift is overigens niet terug te vinden indien de posities worden aangesloten op ETRS89, aangezien dit referentiestelsel meebeweegt met de Europese plaat.

3.2.5 Schatting van stationssnelheden uit tijdreeksen van GPS-coördinaten

De dagelijkse oplossing van de (aardvaste) coördinaten van een permanent GPS-station biedt de mogelijkheid om een lineaire trend ("intercept", plus "slope" ofwel snelheid) te schatten uit een langdurige tijdreeks. Het blijkt echter dat GPS-coördinaattijdreeksen zowel voor de horizontale als de verticale componenten behoorlijke correlatie in de tijd vertonen (zie onder andere Zhang et al., 1997). Significante variaties met (half)jaarlijkse perioden blijken aanwezig te zijn in de positietijdreeksen. Mogelijke oorzaken hiervan kunnen van geofysische aard zijn danwel ontstaan door resterende ongemodelleerde systematische effecten (zogenaamde "aliasing multipath"; baanfouten). Indien



deze tijdcorrelatie niet wordt meegenomen in de beschrijving van de precisie van de GPS-tijdreeksen, kan dit tot een veel te optimistische precisiebeschrijving van de stationssnelheid leiden. (Amiri-Simkooei, 2007) beaamt dat de ruis van GPS-coördinaattijdreeksen het beste kan worden beschreven met een combinatie van witte ruis (volledig ongecorreleerd in tijd) en autoregressieve (exponentieel tijdgecorreleerde) ruis en flickerruis. Een typische waarde voor de precisie van de horizontale snelheid is dan 0.2 mm/jaar en voor de verticale snelheid 0.5 mm/jaar. Wanneer daarentegen enkel witte ruis wordt verondersteld, kan dit leiden tot maar liefst 9 tot 16 keer te lage (formele) standaardafwijking van de snelheid (Amiri-Simkooei, 2007).

3.2.6 Toekomstige ontwikkelingen

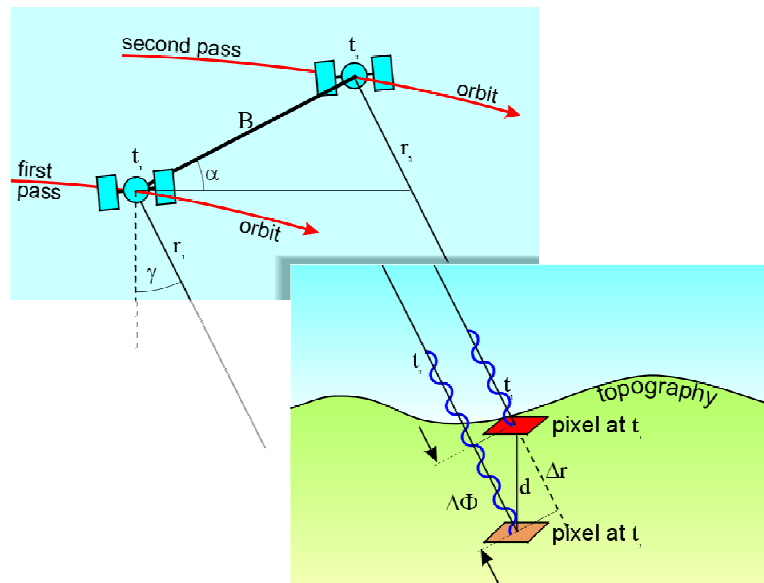
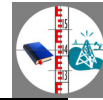
De satellietnavigatiewereld is momenteel volop in beweging. Naar verwachting zullen rond 2020 vier Global Navigation Satellite Systems operationeel zijn (Tiberius, 2011). Naast een gemoderniseerd GPS (drie frequenties, civiele codes op alle frequenties), zal het Russische GLONASS volledig (her)operationeel zijn. Verder is het de bedoeling dat het Europese Galileo er rond 2016 zal zijn, terwijl het Chinese COMPASS/Beidou-2 is gepland voor 2020. Tegelijkertijd zijn de ontvangerfabrikanten druk bezig om hun ontvangers geschikt te maken voor 'next-generation multi-GNSS'. Deze ontwikkelingen zullen voor de hoogprecieze toepassingen zoals beschreven in deze paragraaf van enorm belang zijn, met name door de enorme toename van het aantal beschikbare satellieten en de verwachte verbeterde precisie van de codemetingen. Zo zal bijvoorbeeld een combinatie van GPS met Galileo zowel de snelheid als betrouwbaarheid van geheeltallige meerduideligheidsbepaling significant verbeteren, zie onder andere de simulatieberekeningen uitgevoerd door Verhagen et al., 2007.

3.3 InSAR

Satelliet radar interferometrie (InSAR) is een radartechniek, waarbij deformatie wordt geschat uit faseverschillen tussen verschillende acquisities en meetpunten (Hanssen, 2001), zie figuur 3.2. Meetpunten worden ook wel *scatterers* genoemd.

Om een precisie te behalen die vergelijkbaar is met waterpassen, moeten foutenbronnen (zoals atmosferische verstoringen, baanfouten) worden geschat en verwijderd. Hiervoor is een tijdserie van satellietopnames nodig (> 20-25 beelden), en een voldoende dichtheid van meetpunten.

Voor de stand-alone toepasbaarheid van InSAR is het tevens noodzakelijk dat de deformatie tussen naburige scatterers in het tijdsinterval tussen twee opnamen minder is dan de helft van de golflengte (de meerduideligheid in de deformatie schatting). Dit komt doordat enkel de fractionele fase kan worden gemeten, en niet het gehele aantal golflengten.



Figuur 3.2 De faseverschillen tussen twee satellietopnamen zijn de basiswaarnemingen voor het schatten van deformatie.

3.3.1 Satellietmissies

Omdat de levensduur van een satellietmissie vaak korter is dan de monitoringsperiode, is het van belang om zorgvuldig een satellietmissie te kiezen.

Indien meerdere satellietmissies nodig zijn, en de beelden niet interferometrisch met elkaar te combineren zijn, is het aan te raden dat er minstens één acquisitie in een overlappende periode plaatsvindt. De tijdseries kunnen in dit geval geïntegreerd worden in de overlappende periode door één offset te schatten. Op deze wijze hoeft er geen aanname te worden gemaakt omtrent het deformatiegedrag, aangezien er geen time gap is. Ook moet rekening gehouden worden met de tijd die nodig is om tot een eerste resultaat te komen voor een nieuwe satellietmissie. Afhankelijk van het monitoringsinterval kan het 9 maanden tot 1,5 jaar duren voor een tijdserie van 25 beelden is opgebouwd. Indien binnen deze periode een rapportage moet plaatsvinden, moet worden geanticipeerd op deze situatie. Dit kan, door te kiezen voor een eerdere switch naar een andere satelliet, of voor een grotere overlap.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van huidige en toekomstige SAR-missies. De verschillen zitten in de golflengte, de herhalingsfrequentie en de resolutie. De X-band missies hebben een hogere resolutie (3 meter voor TerraSAR-X) en kunnen daardoor objecten gedetailleerder beschrijven. De kleinere golflengte heeft echter een nadelige invloed op de oplosbaarheid van de meerduidigheden. In tegenstelling tot de X- en C-band missies, zijn de L-band missies behept met ionosferische verstoringen in het atmosferisch signaal (Meyer and Watkins, 2011).

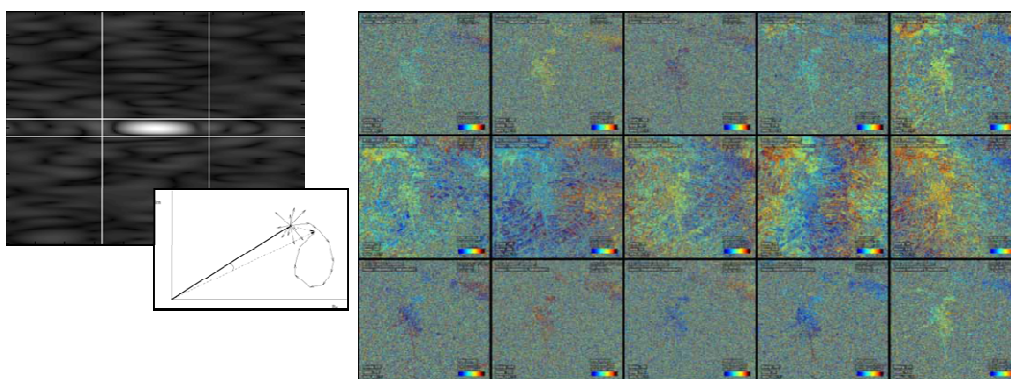


Door middel van de ontwerpberekeningen (zie bijlage G3) kan het effect van de golflengte en het tijdsinterval tussen opeenvolgende opnames worden geëvalueerd.

3.3.2 Selectie van meetpunten, Persistent en Distributed Scatterers

De InSAR meetpunten zijn de radar scatterers, die zijn onder te verdelen in twee groepen:

- *Persistent Scatterers (PS)*,
- *Distributed Scatterers (DS)*.

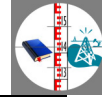


Figuur 3.3 Reflector (PS, links) en gedeeltelijk coherente gebieden (DS, rechts).



Tabel 3.1. Overzicht Satellietmissies

Satellite	Repeat interval (days)	Wave-length	<2006	2006	2007	2008	2010	2011	2012	2013	2014	>2014
ERS-1	35	C-band										
ERS-2	35	C-band										
Envisat	35	C-band										
Radarat-1	24	C-band										
Radarsat-2	24	C-band										
Radarsat-2 constellation (3)	12	C-band										
Sentinel 1a, 1b	12	C-band										
TerraSAR-X	11	X-band										
TanDEM-X	11	X-band										
Cosmo Sky-Med (4)	16	X-band										
JERS-1	44	L-band										
ALOS PALSAR	46	L-band										



Persistent Scatterers

Een Persistent Scatterer heeft een dominante reflectie binnen een resolutiecel, die een constante en hoge reflectie heeft in de tijd en (vrijwel) onafhankelijk is van de kijkhoek van de satelliet. De dichtheid van de bebouwing is in het algemeen een goede indicator van de PS dichtheid. Naast bebouwing kunnen ook rotsachtige oppervlakken veel PS bevatten.

Distributed Scatterers

Bij Distributed Scatterers is er geen sprake van een dominante reflectie en is er alleen sprake van coherentie van reflectiesignalen voor een gebied tussen bepaalde tijdstippen en voor bepaalde kijkhoeken van de satelliet. DS kunnen bijvoorbeeld landbouwgronden zijn.

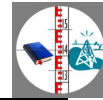
Alhoewel de eigenlijke waarnemingen voor InSAR deformatiemonitoring de faseverschillen zijn, worden PS-kandidaten geselecteerd op basis van de *amplitude* van hun reflectiesignaal. Voor PS zijn hiervoor de volgende methoden beschikbaar:

- Selectie van punten met een hoge Signal-to-Clutter ratio (signaal-ruis verhouding binnen een resolutiecel). Zie figuur 3.3.;
- Selectie van punten met een lage amplitudedispersie in de tijd (verhouding tussen de standaardafwijking en het gemiddelde van de amplitudes in de beschikbare SAR beelden).

Voor DS wordt gezocht naar scatterers met een soortgelijke kansverdeling van de amplitudes. DS met een gelijke kansverdeling worden ingedeeld in klassen. Er wordt óf een gemiddelde waarneming berekend, óf er vindt per klasse een filtering plaats om ruis te onderdrukken.

Het voordeel van de analyse van DS in aanvulling op PS is, dat het de betrouwbaarheid van de schatting van de meerduidigheden verhoogt door de kortere afstanden tussen de meetpunten. Eveneens kunnen de atmosferische verstoringen hierdoor gedetailleerder worden bepaald. Een ander potentieel voordeel is de verhoogde puntdichtheid voor deformatiemonitoring. Hierbij moet wel de kanttekening worden geplaatst, dat bekeken moet worden of de beweging van de DS representatief is voor bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten. In het geval dat de DS bijvoorbeeld een landbouwveld representeert, kan de beweging van het oppervlak vele malen groter zijn dan de beweging als gevolg van de diepe winning. Dit kan het gevolg zijn van variatie in grondwaterstanden.

Voor een nauwkeurige schatting van de deformatie is het van belang dat de ruimtelijke dichtheid van de scatterers voldoende is voor de schatting van het atmosferisch signaal. Afhankelijk van de ruimtelijke variabiliteit van de atmosferische verstoringen in het analyse gebied mag de onderlinge afstand tussen scatterers niet meer dan één of enkele kilometers bedragen. Zie ook bijlage G.

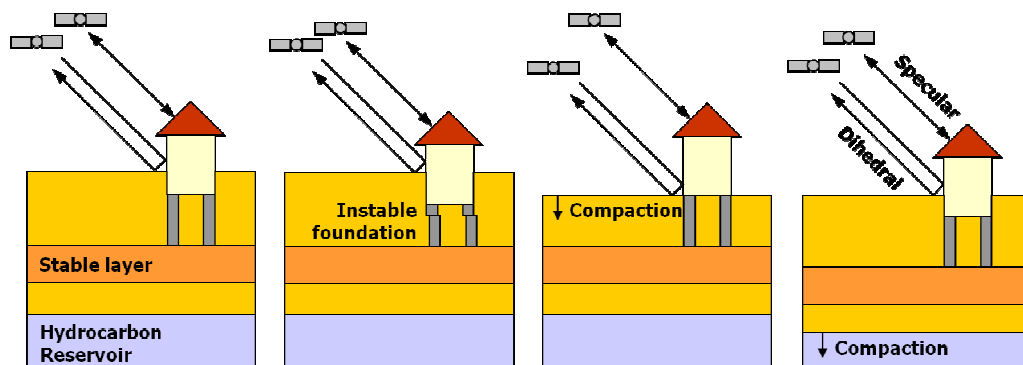


Representativiteit van de meetpunten

Voor zowel Persistent Scatterers als Distributed Scatterers geldt, dat onderzocht moet worden of de meetpunten representatief zijn voor bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten, zie figuur. 3.4. Hiervoor kunnen de volgende technieken worden toegepast of een combinatie ervan:

1. Gebruikmakend van de hoge ruimtelijke dichtheid van scatterers, zeker in bebouwde gebieden, kunnen autonome bewegingen worden gedetecteerd en verwijderd uit de analyse.
2. Indien er aanwijzing is dat er additionele processen aanwezig zijn in het gebied waar mijnbouwactiviteiten gaan plaatsvinden, is het aan te raden een tijdserie op te bouwen die de nulsituatie in kaart brengt.
3. De fysieke eigenschappen van de scatterer worden nader bepaald. De hoogte boven het aardoppervlak en/of een 'dual polarization' beeld worden gebruikt om te bepalen of de reflectie direct of indirect is. Gecombineerd met de geografische locatie (die een beperkte precisie heeft) kan de reflectie worden toegewezen aan een fysiek object. Vervolgens moet onderzocht worden of de fundering diep genoeg is om de beweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten te representeren.

De laatste optie (bepalen van de fysieke eigenschappen van de scatterers) is erg bewerkelijk en is alleen nodig als opties 1 en 2 niet volstaan.

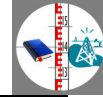


Figuur 3.4 Representiviteit van InSAR-deformatieschattingen voor bodembeweging door diepe en overige oorzaken.

De kracht van InSAR ligt in het gebruik van natuurlijke objecten als meetpunten. Indien natuurlijke meetpunten afwezig zijn, zou men ook kunnen overwegen (continue) GPS-stations te plaatsen (de horizontale bewegingen kunnen dan ook direct gemeten worden). Indien er slechts op enkele plaatsen extra dichtheid van meetpunten nodig is, zijn hoekreflectoren of de zogenaamde Compact Active Transponders (CATs, InSAR+GPS) een optie. Het gebruik van CATs bevindt zich momenteel nog in een onderzoeksfase (Mahapatra, 2011).

Punt dichtheid

Voor iedere deformatie monitoring techniek geldt, dat de punt dichtheid moet voldoen aan de richtlijnen zoals beschreven in paragraaf 2.3.7. Ten opzichte van waterpassingen hebben de InSAR-deformatieschattingen voor een enkele epoeche een lagere precisie. Echter, gebruikmakend van de hoge bemonstering in



ruimte en tijd, kan het deformatiesignaal toch met een gelijke of zelf hogere precisie geschat worden. Een procedure om de vereiste punt dichtheid voor InSAR voor het schatten van een deformatiesignaal te bepalen wordt beschreven in bijlage G2.

De minimale punt dichtheid voor InSAR is de minimale punt dichtheid die nodig is voor:

1. Het schatten van atmosferische verstoringen en het oplossen van meerduidigheden;
2. De bemonstering nodig voor het schatten van het deformatiesignaal.

3.3.3 Vereffeningstechnieken

De InSAR-basiswaarnemingen zijn de zogenaamde ‘double-differences’. Double differences zijn de faseverschillen (interferometrische combinatie tussen twee opnamen) tussen twee scatterers.

$$\varphi_{ij}^k = -2\pi a_{ij}^k - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_i^\perp}{R_i^m \sin \theta_i^m} H_{ij} - \frac{4\pi}{\lambda} D_{ij} + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_i^\perp}{R_i^m \tan \theta_i^m} \eta_{ij}^m + \frac{2\pi}{v} (f_{dc,i}^m - f_{dc,i}^s) \xi_{ij}^m + f_{\varphi_{orbit}}(\xi_{ij}^m, \eta_{ij}^m) + \varphi_{ij}^k{}_{defo} + \varphi_{ij}^k{}_{atmo} + n_{ij}^k,$$

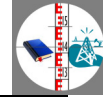
where:

φ_{ij}^k	double-difference phase observation,
$B_i^\perp, R_i^m, \theta_i^m$	perpendicular baseline, range and incidence angle for PS i ,
a_{ij}^k	integer ambiguity between PS i and PS j ,
H_{ij}	(residual) topographic height between PS i and PS j ,
D_{ij}	deformation between PS i and PS j ,
ξ_{ij}^m	sub-pixel position in azimuth direction,
η_{ij}^m	slant-range sub-pixel position,
η, ξ	range and azimuth radar coordinates,
v	satellite velocity,
$f_{dc,i}^m, f_{dc,i}^s$	Doppler centroid frequency of master and slave acquisition,
$f_{\varphi_{orbit}}(\xi_{ij}^m, \eta_{ij}^m)$	(residual) orbital trend as a function of radar coordinates,
$\varphi_{ij}^k{}_{defo}$	residual deformation signal,
$\varphi_{ij}^k{}_{atmo}$	(residual) atmospheric signal,
n_{ij}^k	measurement noise.

Figuur 3.5 InSAR waarnemingsvergelijking (Kampes, 2006).

Er zijn verschillende processing-methodieken ontwikkeld die in grote lijnen de in figuur 3.5 genoemde formule volgen. Ze verschillen echter op de volgende punten:

- De parameters die expliciet geschat worden;
- Integrale schatting van parameters of sequentieel (bijvoorbeeld eerst unwrapping, dan schatting van deformatie);
- De type meetpunten. Persistent Scatterers en/of Distributed Scatterers (Ferretti et al., 2011);
- De constructie van de waarnemingen. Één of meerdere ‘master’ beelden (Berardino, 2002);
- De wijze waarop de waarnemingsvergelijkingen opgelost worden. Best Linear Unbiased Estimation (Kampes, 2006), optimalisatie van de coherentie – de



‘periodogram’ benadering (Ferretti, 2000), Singular Value Decomposition (Berardino, 2002);

- De modellering van het deformatiesignaal (van Leijen, 2007). Aannames ten opzichte van ergodiciteit in tijd en ruimte (Hooper, 2004);
- Wel of niet toepassen van filtering procedures op de data.

In het algemeen geldt, dat op bovenstaande punten de gevolgde procedure moet worden vastgelegd, evenals alle aannames die zijn gedaan.

3.3.4 Precisie en betrouwbaarheid

De precisie van InSAR deformatieschattingen hangt af van de punt dichtheid, en varieert tussen ≤ 3 mm in stedelijke gebieden en 3-7 mm in landelijke gebieden in Nederland (Ketelaar, 2009). De geschatte precisie van Envisat deformatieschattingen in een gecontroleerd hoekreflector experiment was 1,6 mm, gebruikmakend van onafhankelijke waterpassingen.

Tabel 3.2 Mogelijke foutenbronnen en hun effect op de geschatte snelheid en hoogte (voor ERS)

Parameter	Effect op snelheid	Effect op hoogte
Subpixel positie, azimuth	0-0.5 mm/jaar	0-0.2 m
Subpixel positie, range	-	0-4 m
Sidelobe observations	-	tens of meters
Orbits, σ 8 cm across-track	+/- 0.5 mm/jaar	+/- 0.3 m
Orbits, σ 5 cm along track	+/- 1 mm/jaar	+/- 2 m

Naast de precisie moet rekening worden gehouden met systematische effecten die de nauwkeurigheid beïnvloeden (Ketelaar, 2009).

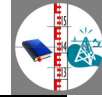
Samengevat is de te behalen nauwkeurigheid van geschatte snelheden uit InSAR-waarnemingen in de orde van 1 mm/jaar of minder.

InSAR-deformatieschattingen zijn in de satellietkijkrichting. Om een decompositie in horizontale (voornamelijk oost-west) en verticale beweging te kunnen uitvoeren, is een tijdserie uit zowel een opgaande als een neergaande satellietbaan nodig. Vooraf dient dus te worden geanalyseerd of de te verwachten horizontale beweging significant is (groter dan de meetnauwkeurigheid van InSAR).

Bij InSAR wordt enkel de fractionele fase waargenomen. Het gehele aantal golflengten is onbekend. Het systeem van waarnemingsvergelijkingen is hierdoor onderbepaald. Om toch overtalligheid in de monitoring in te bouwen (om een uitspraak te kunnen doen over de betrouwbaarheid) zijn er de volgende mogelijkheden:

1. oversampling van het bodemdalingssignaal in ruimte en tijd;
2. bemonstering door tijdseries uit meerdere onafhankelijke overlappende satellietbanen.

Voor optie 1 moet aannemelijk worden gemaakt dat de ‘success rates’ voor het oplossen van de meerduideligheden voldoende groot zijn. Deze success rates kunnen door middel van de ontwerpberekeningen zoals beschreven in bijlage



G.3 worden geëvalueerd (indicatief). Hier wordt uitgelegd van welke factoren de success rates afhankelijk zijn.

Indien gebruik wordt gemaakt van meerdere onafhankelijke tracks (opgaand, neergaand, overlappend), dienen na de datumtransformatie de verschillen tussen de deformatieschattingen binnen de grenzen van de precisie van de meettechniek te vallen. Datumtransformatie is het creëren van dezelfde referentie voor de tracks.

Eveneens kan de betrouwbaarheid van de InSAR-resultaten aangetoond worden door de volgende validatiemethodieken:

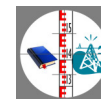
1. Een steekproefgebied laten processen door een ander, daarvoor gecertificeerd, bedrijf;
2. Een steekproefgebied valideren met een andere onafhankelijke meettechniek;
3. Aantonen van overeenkomst met een andere onafhankelijke meettechniek op basis van historische data. Dat kan allen bij een ongewijzigd winningsplan, of bij een herzien winningsplan, waarbij geen effect is op het verloop van de bodembeweging.

Bij al deze drie validatieopties, moet rekening worden gehouden met de nauwkeurigheid van de betrokken meettechniek(en).

3.3.5 Eindproduct InSAR

Het eindproduct van InSAR-processing bevat naast de waarnemingen (interferometrische faseverschillen) en de geschatte deformatie ook parameters ter controle van de precisie en betrouwbaarheid.

1. Overzicht van de opnamedata en basislijnen.
2. Gegevens per meetpunt (PS/DS):
 - Uniek PS puntnummer;
 - Radar coördinaten (azimuth en range, locatie binnen het gehele interferogram dat met een factor 2 oversampled is);
 - Geografische coördinaten in het gewenste referentie systeem / projectie;
 - Amplitude dispersie;
 - Hoogte (m);
 - Snelheid (mm/jaar) in de satelliet kijkrichting;
 - Snelheid (mm/jaar) langs de verticaal (indien geen opgaande en neergaande baan, gecorrigeerd voor de kijkhoek);
 - 'Ensemble coherence' ten opzichte van het referentiepunt;
 - 'Local ensemble coherence' ten opzichte van het dichtstbijzijnde punt in het eerste orde PS netwerk;
 - Standaardafwijking van de residuen uit de schatting van de snelheid ten opzichte van het dichtstbijzijnde punt in het eerste orde PS netwerk;
 - Type meetpunt:
 - referentie punt;
 - 1^e orde netwerk;
 - 2^e orde netwerk;
 - Indicatie onafhankelijke waarneming (1) of sidelobe (0).



Voor DS (Distributed Scatterers) moet tevens worden aangegeven welk gebied zij representeren.

3. Gegevens per meetpunt (PS/DS) en per acquisitie datum (ten opzichte van een 'master' beeld):
 - Interferometrische fasewaarnemingen;
 - Geschatte meerduidigheden;
 - Deformatie (mm) in de satelliet kijkrichting;
 - Deformatie (mm) langs de verticaal;
 - Atmosferische verstoringen (mm).
4. Covariantiematrices per PS/DS (lower triangular: σ^2_H , σ_{HV} , σ^2_V).
5. Indicatie oplosbaarheid meerduidigheden per zijde in het netwerk.
6. Indicatie nauwkeurigheid van de geografische locatie (o.a. bepaling hoogte referentiepunt, en tijdsvertragingen).

3.4 Vergelijking van meettechnieken

De kenmerken van de meettechnieken voor het monitoren van bodembeweging (waterpassen, GPS, InSAR) zijn samengevat in tabel 3.3.

Tabel 3.3 Karakteristieken meettechnieken

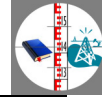
	Precisie deformati e schatting	Precisie snelheid bodem beweging	Interval	Ruimtelijke dichtheid	Ruimtelijke componenten
Waterpas- sen	1-5 mm 1mm/Vkm		campagne 1-5 jr	meetpunten op 0.5-1 km afstand	1D (verticaal)
GPS	mm-cm niveau	0.5 cm/jaar	continu of campagne	enkele punten	3D
InSAR	3-5 mm	0.5-2 mm/jaar	opnames 8-35 dagen	scatterers afhankelijk van terrein	1D (verticaal) en oost-west (indien 2 tracks asc/desc)

3.5 Te verwachten ontwikkelingen en andere meettechnieken

Op InSAR gebied wordt continu wetenschappelijk onderzoek verricht. Naar verwachting kunnen er nog verbeteringen worden doorgevoerd in de punt dichtheid en de precisiebeschrijving. Met de Sentinel-1 missies (lancering verwacht in 2013/2014) wordt de continuïteit gegarandeerd.

Op GPS gebied zijn er veranderingen te verwachten met de komst van het Galileo satellietnavigatiesysteem (in totaal zullen 30 satellieten worden gelanceerd).

Andere meettechnieken die ingezet kunnen worden voor deformatie monitoring op land zijn tiltmeters en laseraltimetrie. De beperkende factor bij tiltmeters is de drift in de tijd. Paragraaf 3.5.1 geeft een samenvatting van de laseraltimetrie-techniek.



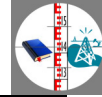
3.5.1 Laser altimetrie

Laseraltimetrie of laserhoogtemeting maakt gebruik van pulsen laserlicht die door een scanner aan boord van een vliegtuig of helikopter worden uitgezonden naar het aardoppervlak. In het buitenland wordt laseraltimetri veelal Lidar genoemd (“Laser Imaging Detection And Ranging” of “Light Detection and Ranging”). Lidar is analoog aan radar (Radio detection and ranging) voor radiostraling. Door van het gereflecteerde licht de looptijd te meten, wordt de afstand tussen oppervlak en vliegtuig bepaald. Ook is de hoek van de bundel bekend. Het instrument scant al vliegend een strook onder het vliegtuig.

Doordat met differentiële GPS de positie van het instrument nauwkeurig bekend is en met een traagheidsnavigatiesysteem (INS) de stand van het platform kan worden berekend, is het mogelijk uit de looptijd van de laserpulsen de hoogte van het oppervlak in bijvoorbeeld het referentiestelsel (bijvoorbeeld RD, NAP) te berekenen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van referentiemetingen, waarbij een grid van punten in hoogte ten opzichte van een bepaald verticale referentiehoogte (bijvoorbeeld NAP) wordt bepaald door middel van (bijvoorbeeld) waterpassing.

De resolutie is de laatste jaren sterk verbeterd van 1 laserpunt per 5x5meter tot thans rond 30 laserpunten per vierkante meter wanneer een langzaam vliegende helikopter wordt gebruikt. De nauwkeurigheid van de absolute hoogte wordt geclaimd rond 5-10cm.

Het digitale terreinmodel van geheel Nederland is momenteel door middel van Lidar bepaald in het AHN bestand (Actueel Hoogtebestand Nederland) met een hoogtenauwkeurigheid van 15cm met een resolutie van 1-16m. Een 2^e Lidar meting is in 2007 gestart en afgerond in het voorjaar van 2013. Dit heeft geleid tot een hernieuwd AHN2-bestand. De hoogtenauwkeurigheid van AHN2 is 5cm, met een resolutie van 50x50cm.



4 Geodetische DeformatieAnalyse

4.1 Algemeen

De geodetische technieken voor het monitoren van deformatie zijn in de loop der jaren steeds verder ontwikkeld. Naast het gebruik van geschatte hoogteverschillen tussen peilmerken is deformatiemonitoring uitgebreid met parameters voor het gedrag van de deformatie in tijd en plaats. Zelfs dynamische systemen die de fysische oorzaken van het deformatiemechanisme beschrijven, kunnen daarin worden meegenomen, zie bijvoorbeeld (Walter M. Welsch, 2001). Voor geavanceerde deformatieanalyse is dan ook een interdisciplinaire aanpak nodig met inzet van geodetische en geofysische kennis en vaardigheden.

De geodetische deformatieanalyse is gebaseerd op een vereffenings- en toetsingsprocedure. Daarbij worden onbekende parameters geschat. Tegelijkertijd wordt getoetst op waarnemingsfouten en modelfouten. De toetsingsprocedure is belangrijk omdat, in het geval van deformatiemonitoring, de parameters van de onbekenden vaak moeilijker zijn te bepalen dan in klassieke landmeetkundige toepassingen. Daarom worden meerdere alternatieve hypothesen getoetst om het mathematische model vast te stellen dat het best past bij de waarnemingen. Uiteraard moet elke alternatieve hypothese wel fysisch verklaarbaar zijn om te voorkomen dat de waarnemingen worden vereffend met een onrealistisch model. Voor een mathematische beschrijving van de vereffenings- en toetsingsprocedure zie (Teunissen, 2000a) en (Teunissen, 2000b).

4.2 Puntsgewijze multi-epochen deformatieanalyse

Bij puntsgewijze multi-epoche deformatieanalyse wordt het gezochte deformatiesignaal beschreven door discrete meetpunten op discrete tijdstippen. Een voorbeeld is een 1D deformatieanalyse van waterpasmetingen uit verschillende epochen (Heus, 1994). De analyse bestaat uit de volgende onderdelen:

1. *epoche-analyse*

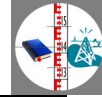
Een netwerk vereffening (vrij netwerk, pseudo kleinste kwadraten of gedwongen) en toetsing van gemeten hoogteverschillen per epoche;

2. *stabiliteitsanalyse*

Toetsing van de stabiliteit van (diepgefundeerde) peilmerken die zich bevinden buiten de invloedsfeer van de deformatie;

3. *schatting van de deformatieparameters.*

Deze laatste stap beperkt zich tot een statische of kinematische analyse in tijd van geschatte peilmerkhoogten. Bij de statische analyse wordt de deformatie per peilmerk berekend door de geschatte hoogte af te trekken van de initiële hoogte. Bij de kinematische analyse wordt de deformatie gemodelleerd in tijd door een



polynoom te bepalen aan de hand van de geschatte peilmerkhoogten of door de geofysische parameters te schatten die de deformatie veroorzaken.

De kinematische deformatieanalyse kan nog worden onderverdeeld in een deterministische en een stochastische methode. Bij de deterministische methode worden alle residuen toegekend aan ruis in de waarnemingen. Bij de stochastische methode kunnen residuen ook worden toegekend aan onvolkomenheden in het model.

4.3 Continue ruimte-tijd deformatieanalyse

Voortbordurend op de puntsgewijze multi-epoche deformatieanalyse is een methode ontwikkeld waarbij het continue karakter in ruimte en tijd van de deformatie wordt gemodelleerd. Afhankelijk van de geofysische kennis over het verwachte deformatiesignaal is, behalve functionele modellering, ook stochastische modellering van onvolkomenheden van het model noodzakelijk.

4.3.1 Functiemodel

Het ruimtelijk verloop van deformatie over verschillende epochen kan worden beschreven aan de hand van bijvoorbeeld een punt bron model, of een ellipsoïdisch model of een prognose grid op basis van geomechanische modellering. De toepasbaarheid van deze modellen is uiteraard afhankelijk van de complexiteit van het deformatiemechanisme.

4.3.2 Stochastisch model

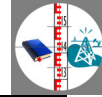
Omdat het functioneel deformatiemodel meestal vooraf niet goed bekend is, worden onvolkomenheden in het model vaak opgenomen in het stochastisch model. Daarvoor is het noodzakelijk dat deze onvolkomenheden worden gemodelleerd in een covariantiefunctie die het gedrag beschrijft in ruimte en tijd. Dat betreft niet alleen de onnauwkeurigheden in de parameters van het gezochte deformatiesignaal, maar ook de autonome beweging van peilmerken. Autonome bewegingen kunnen stochastisch worden gemodelleerd als ruimtelijk ongecorrleerd, maar wel gecorrleerd in tijd. Een bekend zettingsmodel is het Koppejan-model (Baars, 2005) waarbij de zetting van een peilmerk wordt beschreven als een logaritmische functie in tijd. Onvolkomenheden in het model door onzekerheden in de parameters van het deformatiesignaal of prognose kunnen eveneens stochastisch worden beschreven met een covariantiefunctie (Houtenbos, 2004).

De integrale ruimte-tijd analyse draagt bij aan een hogere precisie en betrouwbaarheid bij het analyseren van metingen om een bepaald deformatiesignaal te bepalen.

4.4 Analyse van deformatie ten gevolge van oorzaken in de diepe ondergrond

Zowel puntsgewijze multi-epoche deformatieanalyse als continue ruimte-tijd deformatieanalyse methoden worden toegepast in de industrie.

De eerste methode heeft als voordeel dat zij direct inzicht geeft in de verplaatsing van individuele peilmerken. Een voorbeeld van puntsgewijze multi-



epoche deformatieanalyse in Groningen is de analyse van opeenvolgende peilmerkhoogten uit waterpassingen. Een nadeel van deze methode is dat de peilmerkhoogten afhankelijk zijn van de gekozen referentiepeilmerken. Er gaat ongeveer 2% van alle peilmerken jaarlijks verloren, wat resulteert in onvolledige tijdseries. En bovendien wordt er geen gebruik gemaakt van de correlatie in ruimte en tijd van het deformatiesignaal.

Bij een continue modellering in ruimte en tijd kunnen onvolledige tijd series eenvoudig worden ingevoegd. Door gebruikmaking van de correlatie in ruimte en tijd van de deformatie, kunnen meetfouten, identificatiefouten en autonome bewegingen van peilmerken worden gedetecteerd en verwijderd op een geautomatiseerde wijze. Deze methode is onafhankelijk van de gekozen referentie peilmerken omdat de hoogteverschillen worden gebruikt als waarnemingen.

Methodologiën die het concept van de continue ruimte-tijd deformatie analyse toepassen zijn beschreven door Kenselaar en Quadvlieg (Quadvlieg, 2001) en Houtenbos (Houtenbos, 2004). Hoewel deze analysemethode duidelijke voordelen heeft ten opzichte van de puntsgewijze multi-epoche deformatieanalyse, is het essentieel dat de covariantiefuncties van de onvolkomenheden in het functioneel model adequaat zijn voor het betreffende deformatiesignaal. Is dat niet het geval, dan bestaat het risico dat bepaalde deformatiecomponenten worden toegekend aan een verkeerde oorzaak.

4.5 Integratie van verschillende meettechnieken

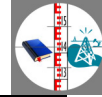
Bij de integratie van verschillende meettechnieken (waterpassen, GPS, InSAR) voor het schatten van de bodembeweging moet rekening worden gehouden met het volgende:

1. Ellipsoidische (GPS, InSAR) versus orthometrische (waterpassen) hoogte verschillen.
2. Verschillende opnametijdstippen, en de (on)mogelijkheid van het definiëren van een gemeenschappelijk referentiepunt.
3. Precisie van de meettechnieken (variantie-covariantie matrix).
4. Representativiteit van de meetpunten.

4.5.1 Ellipsoïdische versus orthometrische hoogteverschillen

Ellipsoïdische en orthometrisch hoogteverschillen kunnen gezamenlijk worden gebruikt in de schatting van een deformatiesignaal, als hoogteverschillen in de tijd ('double-differences') worden gebruikt als waarnemingen. Immers, de geoïde ondulatie vervalt in de 'double-difference' combinatie. Voorwaarde is, dat er geen fysische massa veranderingen plaatsvinden waardoor de geoïde significant verandert in de tijd).

Indien er verschillende type hoogteverschillen in een netwerk worden gecombineerd, moet echter wel bekeken worden, of dit geen onnodige onnauwkeurigheden introduceert. De precisie van de geoïde (in cm) is $0.35+0.003d(\text{km})$. Indien in een netwerk vereffening ellipsoidische en



orthometrische hoogteverschillen worden gecombineerd, kan dit dus leiden tot het vereffenen van onnauwkeurigheden in de geoïde-ondulatie.

4.5.2 Referentie in tijd en ruimte

Bij het ontbreken van een gemeenschappelijke referentie in tijd en ruimte, kunnen geschatte hoogteverschillen niet direct worden vergeleken. Zij worden gecombineerd bij het schatten van de parameters van het deformatiesignaal.

4.5.3 Precisie van de meettechnieken

Een juiste beschrijving van de precisie van de deformatieschattingen uit verschillende meettechnieken (inclusief covarianties!) is essentieel. Ook de mate van overeenkomst tussen de verschillende meettechnieken kan alleen worden bepaald indien de precisiebeschrijving volledig is.

4.5.4 Representativiteit van de meetpunten

De meetpunten moeten worden uitgesloten van de berekening, als deze een component kunnen bevatten anders dan bodembeweging door delfstoffenwinning. De betreffende component moet dan in het functie- of stochastisch model verwerkt worden.

4.5.5 Continuïteit van metingen en back-up

Voor alle meettechnieken geldt, dat hun continuïteit moet worden gewaarborgd. Voor technieken die gebruik maken van satellieten betekent dit, dat op een andere techniek moet kunnen worden teruggevallen bij uitval van een satelliet (constellatie). Voor de waterpasnetwerken betekent dit, dat de peilmerken regelmatig moeten worden gecontroleerd op aanwezigheid.

4.6 Interpretatie van de analyseresultaten

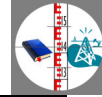
Voor de interpretatie van de analyseresultaten is het belangrijk om te realiseren in hoeverre het deformatiesignaal is gemodelleerd. Deze paragraaf zet de aandachtspunten voor de twee uiterste gevallen – geen modellering en integrale ruimte-tijd analyse – op een rij.

4.6.1 Geen modellering van deformatiesignaal

Indien enkel de geschatte hoogtes uit de vereffende waterpassingen van opeenvolgende epochen met elkaar worden vergeleken, vindt er geen modellering van het deformatiesignaal plaats.

Aandachtspunten:

- Het eindresultaat per vereffende epoche moet bestaan uit de geschatte peilmerkhoogtes, én de volledige variantie-covariantiematrix. De volledige variantie-covariantiematrix is van belang voor het behoud van een juiste precisiebeschrijving bij het converteren naar een ander referentiepunt. Ook voor het objectief bepalen van het meest waarschijnlijk scenario bij de calibratie van ondergrondse modellen, is de volledige variantie-covariantiematrix essentieel.



- In geval van grote gebieden moet rekening worden gehouden – zeker bij vrije netwerkvereffeningen – met een aanzienlijke foutenvoortplanting.

Voordelen:

- Direct inzicht in de peilmerkbewegingen.

Nadelen:

- Peilmerkbewegingen zijn niet noodzakelijkwijs representatief voor bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten. Autonome bewegingen en identificatiefouten kunnen in een ‘per epoche’ analyse niet worden gedetecteerd;
- Alleen tijdseries met hetzelfde referentiepunt en gelijke begin epoche kunnen direct met elkaar vergeleken worden;
- Het resultaat van bovenstaande twee punten is, dat interpolatie van het bodemdalingssignaal niet representatief is. De resultaten kunnen alleen op peilmerkniveau worden bekeken.

4.6.2 Integrale ruimte-tijd analyse

De integrale ruimte-tijd analyse maakt aannames omtrent de modellering en het gedrag van de deformatie als gevolg van mijnbouwactiviteiten, zowel in ruimte als in tijd.

Aandachtspunten

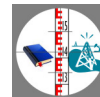
- Een cross-check met geschatte peilmerkbewegingen is aan te raden;
- Controle van de gedetecteerde fouten is aan te raden. Bijvoorbeeld uitschieters, autonome dalers, identificatiefouten, verstoringen;
- Controleer de gevoeligheid van de ruimte-tijd analyse op de waarden voor de a-priori parameters. Dit geldt met name voor de parameters voor het kansmodel en de modellering van het bodemdalingssignaal (bijvoorbeeld bodemdalingsprognoses). In principe zou een iteratieve procedure met een 0-prognose hetzelfde resultaat moeten opleveren.

Voordelen

- Rekent direct met alle gemeten hoogteverschillen en hun precisie;
- Scherpe en geautomatiseerde toepassing van geodetische toetsingsprocedures. Het is mogelijk om de meest waarschijnlijk alternatieve hypothese te selecteren, of het hier nu gaat om het stochastisch model (parameters kansmodel) of het functiemodel (autonome dalers, identificatiefouten etc.);
- Time stamping per waarneming.

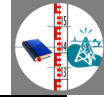
Nadelen

- Toewijzing van de afwijkingen van de bodemdalingsprognoses gebeurt op basis van de stochastische modellering door middel van covariantiefuncties. Autonome bewegingen zijn enkel gecorreleerd in de tijd. Afwijkingen in de bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten zijn zowel ruimtelijk als in de tijd gecorreleerd. De uitsplitsing van het bodemdalingssignaal is daardoor afhankelijk van de mate waarin de covariantiefuncties de fysische werkelijkheid beschrijven. Deze zijn niet direct gerelateerd aan de parameters die het gedrag van het



reservoir en de overburden beschrijven. Hierdoor heeft de geschatte ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging voornamelijk een signaalfunctie.

Uiteindelijk moeten op basis van de geodetische waarnemingen de ondergrondse parameters worden gekalibreerd. Hiervoor is het noodzakelijk, dat de geodetische input dusdanig is, dat objectief het meest waarschijnlijk scenario geschat kan worden. Dit betekent dat de geschatte hoogteverschillen inclusief de volledige precisiebeschrijving (= volledige variantie-covariantie matrix) ter beschikking worden gesteld, na een uitvoerige geodetische toetsingsprocedure.



5 Programmatuur

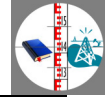
Programmatuur voor de analyse van geodetische metingen moet standaard software zijn. Deze moet transparant, gebruikersvriendelijk en, al dan niet tegen vergoeding, vrij beschikbaar zijn. De geïmplementeerde theorie moet gedocumenteerd en geformaliseerd zijn. Er dient een duidelijke gebruikershandleiding beschikbaar te zijn.

Support bij het toepassen van de methodiek en gebruik van software moet gegarandeerd zijn op lange termijn.

Voor netwerkvereffeningen kan software zoals MOVE3, of een equivalent, gebruikt worden. Voor de ruimte-tijd analyse zal de volgende weg gevolgd worden:

- Het opstellen van een conceptueel model door geodetische experts, gevolgd door een peer review;
- De ontwikkeling van de programmatuur op basis van het peer reviewed conceptuele model.

Hierbij kan bestaande software zoals SuRe (Houtenbos, 2004) als basis worden gebruikt. Bij de ontwikkeling van het conceptuele model zal ook rekening worden gehouden met de toepasbaarheid voor verschillende meettechnieken.



6 Referenties

Baars, V. e. (2005).
Grondmechanica. DUP Blue Print.

Heus, H. d. (1994).
Geodetische deformatie analyse: "1D-deformatieanalyse uit
waterpasnetwerken". Delft Geodetic Computing Centre.

Houtenbos, A. P. E. M. (2004).
Subsidence Residual Modeling, SURE user manual,
A.P.E.M. Houtenbos Geodetic Consultancy.

NCG. (2002).
Bodemdaling meten in Nederland. Delft: NCG.

Quadvlieg, K. e. (2001).
Trend-signal modelling of land subsidence. Proceedings 10th FIG International
Symposium on Deformation Measurements. Orange, California.

TCBB. (november 2009).
Van Meting naar Daling (Bodemdaling door delfstoffenwinning)

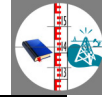
Teunissen, P. J. G. (2000a).
Adjustment theory; an introduction, Delft University
Press, Delft, 1st edn.

Teunissen, P. J. G. (2000b)
Testing theory; an introduction, Delft University Press,
Delft, 1st edn.

Walter M. Welsch, O. H. (2001).
MODELS AND TERMINOLOGY FOR THE ANALYSIS (Official Report of the Ad-Hoc
Committee of FIG Working Group 6.1). FIG.



BIJLAGEN



Bijlage A Regelgeving

Deze bijlage biedt een samenvatting van de Mijnbouwwet (MBW) en het Mijnbouwbesluit (MBB) voor zover deze betrekking hebben op de geodetische metingen. De verplichting tot het uitvoeren van deformatiemetingen is vastgelegd in de MBW, artikel 41, en in het MBB, artikelen 30 t/m 33. In het winningsplan (opslagplan) krijgt deze verplichting concrete inhoud. Het jaarlijks ter goedkeuring in te dienen meetplan geeft een beschrijving van de feitelijke werkzaamheden. Dit plan moet worden ingediend vóór 1 november van het aan de meting voorafgaande jaar.

Ook winningsvergunningen kunnen specifieke voorschriften bevatten over metingen. Zie in dit verband bijvoorbeeld Winningsvergunning Noord Friesland artikel 14:

14.1 Voor aanvang en tijdens winning waterpassingen en lengtemetingen uitvoeren (als bedoeld in artikel 132 lid 2 MR 1964) zowel in als buiten bodemdalingsgebied met een frequentie zo vaak als de minister dat noodzakelijk acht.

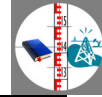
14.1 Rapportageverplichting aan SodM met afschrift aan de provincie. Als uit de rapportage blijkt dat de bodemdaling tot een ongewenste situatie dreigt kan de Minister maatregelen voorschrijven ter beperking van bodemdaling of het zoveel mogelijk voorkomen van de nadelige gevolgen daarvan voor de oppervlakte.

Tenslotte kunnen ook specifieke meetvoorschriften zijn opgenomen in winningsplannen. Zie in dit verband bijvoorbeeld de meetvoorschriften bij de gaswinning Waddenzee.

A.1 *Mijnbouwwet*

Artikel 35

1. Het winningsplan bevat voor elk voorkomen binnen het vergunningsgebied ten minste een beschrijving van:
 - a. de verwachte hoeveelheid aanwezige delfstoffen en de ligging ervan;
 - b. het aanvangstijdstip en de duur van de winning;
 - c. de wijze van winning alsmede de daarmee verband houdende activiteiten;
 - d. de hoeveelheden jaarlijks te winnen delfstoffen;
 - e. de kosten op jaarbasis van het winnen van de delfstoffen;
 - f. de bodembeweging ten gevolge van de winning en de maatregelen ter voorkoming van schade door bodembeweging, voorzover het winnen van delfstoffen niet geschiedt in het continentaal plat of onder de territoriale zee vanuit een voorkomen dat is gelegen aan de zeezijde van de in de bijlage bij deze wet vastgelegde lijn, tenzij Onze Minister anders heeft bepaald.
2. De Technische commissie bodembeweging brengt aan Onze Minister advies uit omtrent het eerste lid, onderdeel f.
3. Bij of krachtens algemene maatregel van bestuur kunnen nadere regels worden



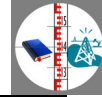
gesteld met betrekking tot het winningsplan.

Artikel 41

1. Met het oog op de kans op beweging van de aardbodem worden metingen verricht voor de aanvang van het winnen van delfstoffen, tijdens het winnen en tot dertig jaar na het beëindigen van het winnen. Bij of krachtens algemene maatregel van bestuur worden regels gesteld omtrent deze metingen en de rapportage over de uitkomsten daarvan.
2. Dit artikel is van overeenkomstige toepassing op het winnen van aardwarmte en het opslaan van stoffen.
3. Dit artikel geldt, tenzij in de desbetreffende vergunning anders is bepaald, niet met betrekking tot het winnen van delfstoffen of aardwarmte of het opslaan van stoffen in het continentaal plat en onder de territoriale zee, voorzover het winnen of het opslaan plaatsvindt vanuit of in een voorkomen dat gelegen is aan de zeezijde van de in de bijlage bij deze wet vastgelegde lijn.
4. De verplichtingen van dit artikel rusten op de houder van de desbetreffende, in artikel 6 of 25 bedoelde vergunning, dan wel, indien de vergunning haar geldigheid heeft verloren, op de laatste houder van de vergunning. Indien de vergunning wordt gehouden door meer dan een natuurlijke persoon of rechtspersoon, rusten de verplichtingen van dit artikel op de in artikel 22 bedoelde aangewezen persoon, dan wel, indien de vergunning haar geldigheid heeft verloren, de laatstelijk op grond van dat artikel aangewezen persoon.

De meetplicht moet worden gezien tegen de achtergrond van de positie van de burger tegen schade door bodemdaling. (MvA 26219 nr 313b) Ook natuurbelangen kunnen een rol spelen bij het bepalen van een meetmethode of meetfrequentie (referentie: gaswinning Waddenzee).

Voorgaande toelichting biedt de mogelijkheid voor het toepassen van verschillende meetmethoden. De meetmethode zou moeten worden afgestemd op het doel van de metingen en de daarbij gewenste nauwkeurigheden. De meetfrequentie en de meetmethode kunnen worden afgestemd op de te verwachten bodemdaling. Indien op voorhand kan worden verwacht dat bodemdaling geen dan wel schadelijke gevolgen heeft, kunnen toepasselijke eisen aan het meten worden gesteld door het bevoegde gezag. Indien additionele metingen geen toegevoegde waarde hebben kan de meetfrequentie zeer laag zijn (referentie: parlementaire behandeling).



A.2 **Mijnbouwbesluit**

In deze paragraaf wordt de letterlijke tekst weergegeven zoals die in het MijnBouwBesluit is opgenomen.

HOOFDSTUK 4. HET METEN VAN BODEMBEWEGING

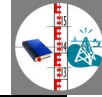
§ 4.1. Metingen met het oog op bodembeweging

Artikel 30

1. De uitvoerder verricht metingen naar bodembeweging ten gevolge van het winnen van delfstoffen of aardwarmte als bedoeld in artikel 41 van de wet. De metingen worden verricht overeenkomstig een meetplan.
2. De uitvoerder dient het meetplan in bij Onze Minister voor ieder voorkomen waaruit wordt gewonnen.
3. Het meetplan behoeft de instemming van Onze Minister alvorens met de winning wordt aangevangen.
4. Onze Minister beslist over het meetplan binnen acht weken na indiening ervan. De instemming is van rechtswege gegeven, indien Onze Minister niet binnen de instemmingstermijn een beslissing heeft genomen. De instemming van rechtswege wordt voor de mogelijkheid van bezwaar en beroep gelijkgesteld met een besluit als bedoeld in artikel 1:3, eerste lid, van de Algemene wet bestuursrecht.
5. Onze Minister kan de instemming onder beperkingen geven en aan zijn instemming voorschriften verbinden.
6. Het meetplan beslaat de termijn van de winning en de daarop volgende dertig jaren. De uitvoerder actualiseert het meetplan gedurende de periode van winning en de daarop volgende vijf jaren jaarlijks en verstrekt daarvan vóór 1 november afschrift aan Onze Minister. Onze Minister kan de uitvoerder een aanwijzing geven omtrent de tijdstippen waarop en de plaatsen waar gemeten wordt.
7. Het meetplan bevat tenminste een beschrijving van:
 - a. de tijdstippen waarop de metingen worden verricht;
 - b. de plaatsen waar gemeten wordt, en
 - c. de meetmethoden.
8. Een van de tijdstippen, bedoeld in het zevende lid, onderdeel a, ligt voor de aanvang van de winning.
9. Bij ministeriële regeling kunnen nadere regels worden gesteld omtrent het meetplan.

Artikel 31

1. De uitvoerder draagt ervoor zorg dat de metingen op een zorgvuldige en betrouwbare wijze plaatsvinden.
2. De uitvoerder overlegt de resultaten van de eerste meting, bedoeld in artikel 30, achtste lid, uiterlijk twee weken voor de aanvang van de winning aan de inspecteur-generaal der mijnen.
3. De uitvoerder overlegt de resultaten van de metingen twaalf weken na het verrichten van de metingen aan de inspecteur-generaal der mijnen.



4. Bij ministeriële regeling kunnen nadere regels worden gesteld omtrent de inhoud van en de wijze van verstrekking van de meetresultaten.

Artikel 32

De artikelen 30 en 31 zijn van overeenkomstige toepassing op de opslag van stoffen.

§ 4.2. Zoutholten

Artikel 33

In geval van zoutwinning en opslag van stoffen in een door zoutwinning ontstane holruimte bevat het meetplan, bedoeld in artikel 30, eerste lid, tevens een beschrijving van:

- a. de tijdstippen waarop metingen in de holruimte worden uitgevoerd, en
 - b. de methode die voor het uitvoeren van holruimtemetingen wordt gebruikt.
1. De uitvoerder overlegt de resultaten van de metingen, alsmede op de metingen gebaseerde holruimtekaarten en holruimtedoorsneden uiterlijk twaalf weken na het verrichten van de metingen aan de inspecteur-generaal der mijnen.
 2. De holruimtekaarten en holruimtedoorsneden worden onverwijld bijgewerkt, zodra nieuwe gegevens beschikbaar komen.
 3. Bij ministeriële regeling kunnen nadere regels worden gesteld omtrent de in het tweede lid bedoelde kaarten en doorsneden.

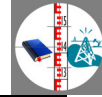
A.3 Uitvoering en rapportage van waterpassingen, conform artikel 31, MBB 2002

Bijlage bij SodM-brief 5052482 van 18-8-2005 , waarin het huidige RWS-DID nog RWS-AGI wordt genoemd.

Procedure; Uitvoering en rapportage waterpassingen, conform artikel 31, Mijnbouwbesluit 2002

(Staatstoezicht op de Mijnen, augustus 2005)

- De 'uitvoerder' (d.w.z. de mijnbouwonderneming), of in opdracht van de uitvoerder een deskundig ingenieursbureau, verricht de metingen naar bodembeweging als gevolg van delfstoffenwinning volgens een goedgekeurd meetplan conform artikel 30, Mijnbouwbesluit.
- Bij toepassing van secundaire waterpassingen als meetmethode hanteert de uitvoerder of het ingenieursbureau de meest recente richtlijnen en normen 'Specificaties Doorgaande Waterpassing instandhouding NAP-net' van Rijkswaterstaat Adviesdienst Geo-Informatie en ICT (RWS-AGI).
- RWS-AGI stelt waar mogelijk, en zonder dat het voor haar tot meerkosten of andere risico's leidt, haar normen voor de uitvoering van metingen en andere hiervoor benodigde hulpmiddelen beschikbaar voor gebruik door derden.
- De resultaten van de uitgevoerde waterpassingen worden door de uitvoerder of het ingenieursbureau zonder uitstel aangeleverd bij RWS-AGI in Delft.



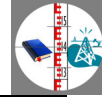
- RWS-AGI beoordeelt deze metingen als vrij net en rapporteert over de resultaten aan de uitvoerder, c.q. het ingenieursbureau, met een afschrift hiervan aan de Inspecteur-generaal der Mijnen (IGM).
- RWS-AGI neemt naar eigen inzicht de metingen van de mijnbouwondernemingen op in haar database met NAP-peilmerken.
- Na een positieve terugmelding van RWS-AGI stelt de uitvoerder een 'meetregister' op ten behoeve van de IGM. Dit meetregister is een rapport, dat het meetnet beschrijft en de meetgegevens bevat, met inbegrip van een staat van periodieke verschillen t.o.v. eerdere waterpassingen. Conform artikel 31, lid 3, mijnbouwbesluit, dient dit rapport 12 weken na het verrichten van de waterpassing aan de IGM te worden overhandigd.
- Na instemming van de IGM met het rapport wordt het vrijgegeven en is voldaan aan het gestelde in artikel 31, Mijnbouwbesluit. Vanaf dat moment kunnen de gegevens in de database van RWS-AGI aan derden ter beschikking worden gesteld.
- Met behulp van de meetregisters onderzoekt Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) of de meetresultaten mogelijk gevolgen hebben voor eerder uitgebrachte prognoses en of er door de delfstoffenwinning geen ongewenste situaties aan de oppervlakte ontstaan of dreigen te ontstaan.
- Het staat de uitvoerder vrij om ter aanvulling op het meetregister zelf interpretatiestudies van de meetgegevens uit te brengen (bijvoorbeeld ten behoeve van bodemdalingprognoses in het kader van privaatrechtelijke overeenkomsten). Desgevraagd door derden zal SodM deze studies beoordelen.
- RWS-AGI informeert jaarlijks in de maand december bij SodM naar de uitstaande meetopdrachten van de goedgekeurde meetplannen en geeft aan SodM een overzicht van de beoordeelde en geaccepteerde waterpassingen in de afgelopen periode.
- Als derden bij RWS-AGI gegevens opvragen met betrekking tot waterpassingen, verricht op basis van de Mijnbouwwet, wordt de volgende clausule toegevoegd: 'Uit de geschiedenis van gepubliceerde hoogten kan men een indruk van de beweging van peilmerken krijgen. De bijdrage hieraan van een enkele oorzaak en de relatie met maaiveld- en/of bodembewegingen kan men slechts afleiden met doelgerichte verdere analyses door deskundigen'.

A.4 Toelichting op Mijnbouwbesluit

In dit document wordt de letterlijke tekst weergegeven zoals die in de toelichting op het MijnBouwBesluit is opgenomen (hoofdstuk 4).

In dit hoofdstuk wordt uitwerking gegeven aan de meetverplichting van artikel 41 van de wet. Ingevolge dat artikel moeten er voor de aanvang van de winning of opslag tot dertig jaar na het beëindigen van de winning- of opslagactiviteiten, metingen worden verricht naar bodembeweging. Dat geldt overigens uitsluitend bij winning op land en binnen de drie-mijlszone op zee.

Onder bodembeweging wordt niet alleen verstaan de bodemdaling en horizontale vervormingen aan het maaiveld (bij winning), dan wel de stijging (bij opslag), maar ook bodemtrillingen (aardschokken). De bodemdaling en



horizontale vervormingen in het kader van de winning zijn in belangrijke mate voorspelbaar; voor bodemtrillingen is dit niet het geval.

Om de bodembeweging zo goed mogelijk te kunnen voorspellen en te volgen, wordt in hoofdstuk 4 voorgeschreven dat de metingen worden verricht volgens een meetplan, goed te keuren door de Minister van Economische Zaken. In dat meetplan wordt opgenomen op welke tijdstippen en plaatsen zal worden gemeten en volgens welke meetmethode de meting wordt verricht.

De frequentie waarmee de metingen moeten worden verricht en het aantal plaatsen waar moet worden gemeten, is in de eerste plaats afhankelijk van het type bodembeweging. In het geval van bodemdaling (c.q. bodemstijging) wordt de meetfrequentie voornamelijk bepaald door de precisie van de meetmethode, de snelheid van de bodemdaling en de voorspelbaarheid van de bodemdaling.

De tot nu toe meest toegepaste meetmethode is de doorgaande secundaire waterpassing. Hierbij volgen de mijnbouwondernemingen de meest recente richtlijnen van de Meetkundige Dienst, afdeling NAP, van Rijkswaterstaat. In feite is echter iedere meetmethode acceptabel, waarmee men adequaat bodembewegingen kan vaststellen. Nieuwe methoden zijn overigens in ontwikkeling.

De plaatsen, waar gemeten moet worden, worden hoofdzakelijk bepaald door de vorm en uitgestrektheid van de verwachte bodemdalingsschotel. Daarnaast heeft de meetmethode invloed op het aantal meetplaatsen. Zo is in het geval van doorgaande secundaire waterpassingen een meetnet Staatsblad 2002 604 68 nodig, dat bestaat uit meetplaatsen (peilmerken), die samen aaneengesloten meetkringen vormen.

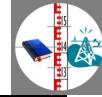
Ook de structuur van de ondiepe ondergrond kan een rol spelen bij het vaststellen van het aantal en type benodigde peilmerken. Horizontale vervormingen aan maaiveld zijn bij de olie- en gaswinning praktisch verwaarloosbaar.

Bij zoutwinning kan in uitzonderlijke gevallen (bijvoorbeeld instorting van een ondiepe holruimte) een mate van bodemrek optreden, die mogelijk schadeveroorzakend is voor gebouwen en infrastructuur. Door middel van lengtemetingen worden deze horizontale vervormingen in kaart gebracht.

Tenslotte: in het winningsplan (artikel 24, eerste lid, onderdelen m tot en met s, van het Besluit) wordt een schatting gemaakt van de verwachte mate van bodemdaling en het risico op bodemtrillingen. Op basis van die verwachtingen zal het meetplan worden ingevuld. In die zin bestaat er dus een verband tussen beide plannen.

A.5 Mijnbouwregeling

In deze regeling staat geen informatie die op de industrieleidraad Bodembeweging van toepassing is.



Bijlage B Stabiliteitsanalyse

Stabiele punten zijn meetpunten die binnen de meetprecisie geen significante beweging vertonen anders dan bewegingen veroorzaakt door oorzaken in de diepe ondergrond. Voor verdere uitleg, zie paragraaf 2.3.2. Hier wordt tevens de representativiteit van meetpunten toegelicht.

Deze bijlage beschrijft de stabiliteitsanalyse op basis van metingen. Tevens is een checklist toegevoegd om de stabiliteit van meetpunten te beoordelen op basis van fysieke kenmerken.

B.1 Stabiliteitsanalyse op basis van hoogteverschillen

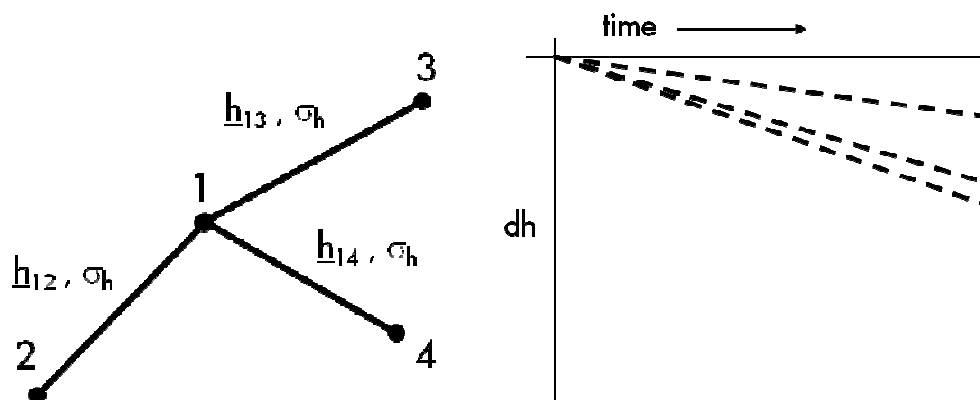
De stabiliteit van meetpunten voor het bepalen van bodembeweging als gevolg van delfstoffenwinning kan op verschillende wijzen worden beoordeeld:

- op basis van gemeten hoogteverschillen in de tijd;
- op basis van geschatte hoogtes in de tijd;
- op basis van de geschatte autonome beweging uit de ruimte-tijd analyse.

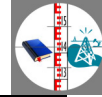
Ook kan een combinatie van deze methodieken worden gebruikt.

B.1.1 Op basis van gemeten hoogteverschillen

De stabiliteit van meetpunten kan beoordeeld worden op basis van hun gedrag ten opzichte van naburige punten, door gebruik te maken van gemeten hoogteverschillen inclusief hun precisie (zie figuur B1). Een stabiel punt is een peilmerk dat (significant) minder daalt dan de naburige punten.



Figuur B.1: Bepaling van de stabiliteit van meetpunten voor bodembeweging als gevolg van delfstoffenwinning op basis van gemeten hoogteverschillen naar naburige punten.



De procedure hierbij is als volgt:

- Peilmerken worden geanalyseerd als er hoogteverschillen zijn gemeten naar minimaal twee naburige punten;
- Uit de tijdserie van hoogteverschillen tussen naburige punten wordt een lineaire snelheid (of polynoom) geschat. In deze schatting wordt tenminste een overtaligheid van 1 aangehouden;
- Een peilmerk wordt als stabiel aangemerkt, indien deze minder daalt dan alle naburige peilmerken;
- Als een naburig punt van een stabiel peilmerk minder dan significant daalt, dan wordt deze ook toegevoegd aan de set van stabiele peilmerken. Minder dan significant houdt in, dat de dalingssnelheid van het naburige punt ten opzichte van het stabiele punt minder dan 3-sigma van de geschatte snelheid is.

Het verdient de voorkeur om dit te doen op basis van de gemeten hoogteverschillen vóór aanvang van de delfstoffenwinning. Het kan ook tijdens de meting, maar dan moet er een extra marge worden ingebouwd, gebaseerd op de afstand tussen de punten en de bodemdalingsprognose.

Voordeel:

- De stabiliteitsanalyse vindt plaats op basis van ruwe metingen en hun precisie.
- Bij deze methodiek worden de stabiele punten geselecteerd, ook wanneer het merendeel van de naburige punten een extra dalingscomponent zou hebben.

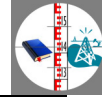
Nadeel:

- Stabiliteitsanalyse blijft lokaal.
- Niet alle punten kunnen goed geanalyseerd worden; dit is afhankelijk van de beschikbare gemeten hoogteverschillen.

B.1.2 Op basis van geschatte hoogtes

Voorafgaand aan de delfstoffenwinning kan het zettingsgedrag worden geschat uit beschikbare waterpassingen. Hierbij kunnen zowel vrije netwerkvereffeningen als gedwongen vereffeningen worden gebruikt. Van belang is dat ook de precisie van de geschatte zetting wordt bepaald, om te bepalen of deze wel of niet significant is.

Soms zijn alleen de geschatte hoogtes beschikbaar en ontbreekt de precisiebeschrijving. Zeker bij hoogtes uit gedwongen vereffeningen is het van belang dat naar een gemeenschappelijk referentiepunt wordt getransformeerd, alvorens de zetting wordt geschat. Er moet rekening worden gehouden dat de analyse niet helemaal zuiver is, vanwege wisselende sets van referentiepunten door de tijd heen.



Voordeel:

- Geeft inzicht in ruimtelijke verschillen.

Nadeel:

- Is alleen nuttig voorafgaand aan de winning.

B.1.3 Op basis van de geschatte autonome beweging uit de ruimte-tijd analyse

In de ruimte-tijd analyse wordt de niet ruimtelijk gecorreleerde beweging per peilmerk geschat. Het tijdsgedrag wordt gemodelleerd als een covariantiefunctie en wordt gelijk verondersteld voor alle peilmerken. De parameters van de covariantiefunctie (magnitude en exponent in de tijd) wordt geschat middels variantie componenten schatting.

Voordeel:

- Autonome bewegingen worden uit een integrale geodetische vereffenings- en toetsingsprocedure geschat;
- Alle gemeten hoogteverschillen worden gebruikt in de analyse.

Nadeel:

- Stabiliteitsanalyse blijft lokaal;
- Indien het merendeel van de naburige punten een extra dalingscomponent heeft, is het mogelijk dat stabiele punten als 'outlier' worden aangemerkt.

B.1.4 Combinatie van methoden

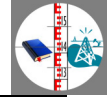
Ook een combinatie van bovenstaande methoden kan gebruikt worden om de stabiliteit van meetpunten te beoordelen. Omdat hierdoor gebruik gemaakt wordt van alle voordelen van de methoden laat zich hierdoor de meeste volledige set van stabiele punt vaststellen. Indien de stabiele punten die zijn selecteerd op basis van de ruimte-tijd analyse en de gemeten hoogteverschillen worden geïntegreerd, ontstaat een set punten die:

- Gebaseerd is op een integrale geodetische vereffenings- en toetsingsprocedure, en
- Tevens de stabiele punten bevat waarvan het merendeel van de naburige punten mogelijk een extra dalingscomponent heeft.

B.2 Checklist voor fysieke kenmerken van peilmerken

Onderstaand volgt een opsomming vande fysieke kenmerken van peilmerken en dalingsgedrag:

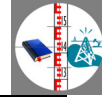
- **Peilmerk**
 - Soort peilmerk
 - Kwaliteit peilmerk
 - Leeftijd



- **Omgeving**
 - Bereikbaarheid
 - Zicht/toegankelijkheid
 - Verankeringsgarantie

- **Object**
 - Soort object
 - Kwaliteit bouwwerk
 - Leeftijd (zetting)
 - Verwachte levensduur
 - Gebruik, met name belasting
 - Type objectfundatie (op staal, palen, geen)

- **Ondiepe ondergrond**
 - Diepte Pleistoceen
 - Gronsoort/grondopbouw
 - Draagkracht



Bijlage C Sturende factoren

In deze bijlage wordt beschreven hoe de sturende factoren, zoals gebruikt in hoofdstuk 2, bepaald zijn. Om de leidraad en procedures volgens het 'fit for purpose' principe op te kunnen stellen, wordt eerst een classificatie gemaakt van bodembewegingsfenomenen. Hierbij worden de volgende stappen doorlopen:

1. Inventarisatie van sturende factoren: factoren (I) die het bodembewegingssignaal van de verschillende delfstoffenwinningen typeren, alsmede factoren (II) die bepalend zijn voor het gebruik van meet- en analysemethodieken;
2. Eliminatie van sturende factoren (I) die geen effect hebben op de te gebruiken meet- en analysemethodieken;
3. Elke mogelijke combinatie van sturende factoren leidt tot een bodembewegingsscenario. Per scenario worden de benodigde meet- en analysemethodieken bepaald;
4. Scenario's met dezelfde meet- en analysemethodieken worden samengevoegd tot een klasse. Per klasse worden verdere richtlijnen en procedures gedefinieerd.

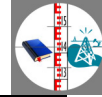
C.1 *Inventarisatie Sturende factoren*

Om de industrieleidraad alomvattend te maken voor het bepalen van bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten, wordt eerst een brede inventarisatie gemaakt van sturende factoren. Dit zijn factoren die:

1. het bodembewegingssignaal van de delfstoffenwinning typeren, en/of
2. invloed hebben op het type en de dichtheid van meetpunten, de keuze voor meettechnieken, de analysemethoden, en de meetfrequentie.

Voorbeelden van mogelijke sturende factoren zijn:

- Productieperiode;
- Diepte delfstoffenwinning;
- Soort mineraal (i.v.m. kruipgedrag bij zoutwinning);
- Ruimtelijke spreiding;
- Magnitude; totaal te verwachten bodembeweging;
- Tijds patroon van de bodembeweging (mate van variatie);
- Vorm: klok- of komvormig;
- Bodembeweging door andere oorzaken;
- Integriteit van de meetpunten in de tijd;
- Onzekerheid in de geomechanische prognose;
- Beschikbare gebruiksruimte;
- Effecten voor derden;
- Verwachtingen van externe stakeholders;
- Superpositie van meerdere typen delfstoffenwinning (bijvoorbeeld gas en zout).



Aanvullend kunnen er factoren zijn die te maken hebben met de toepasbaarheid van een meettechniek, zoals:

- Meetpunt dichtheid (landelijk of bebouwd gebied),
- Temporele bemonstering van het bodembewegingssignaal in verhouding tot de golflengte (InSAR, in verband met de meerduidigheden in de fasewaarnemingen).

C.1.1 Essentiële sturende factoren

Aangezien deze lijst van sturende factoren een aanzienlijk aantal bodembewegingsscenario's oplevert, wordt eerst bekeken of deze effect hebben op het type en de dichtheid van meetpunten, de meettechnieken, analysemethoden, en de meetfrequentie.

Voor de **punt dichtheid** en **meetfrequentie** zijn generieke regels voorhanden, die op alle typen delfstoffenwinning van toepassing zijn. De bestaande richtlijnen voor de punt dichtheid zijn te vinden in paragraaf 2.3.3.

Voor de **analysemethode** zijn enkel de *ruimtelijke spreiding* en *superpositie van delfstoffenwinningen* sturende factoren. In verband met de foutenvoortplanting in geodetische netwerken, is het wenselijk om over grote afstanden met de hoogteverschillen als waarnemingen te werken, en niet de hoogtes te schatten ten opzichte van één referentiepunt. Om de bodembeweging te schatten over grote afstanden wordt dan een integrale ruimte-tijd analyse gedaan. Overigens heeft zo'n analyse ook voor kleine netwerken voordelen (hoger foutopsporend vermogen), maar hij is niet verplicht.

Voor de **meetpunten** is het van belang dat de gemeten hoogteverandering de bodembeweging door delfstoffenwinning representeren. De sturende factor 'andere oorzaken' speelt hier een rol, en daarmee samenhangend de integriteit van de meetpunten in de tijd.

Met inachtneming van de bestaande richtlijnen voor meetfrequentie en punt dichtheid, blijven de volgende sturende factoren over die van invloed zijn op de meetpunten, de meettechnieken en de analysemethode:

1. Ruimtelijk bereik bodembeweging;
2. Totaal te verwachten bodembeweging;
3. Patroon van bodembeweging in de tijd;
4. Gebruiksruimte;
5. Bodembeweging door meer dan één oorzaak;
6. Superpositie van delfstoffenwinningen.

C.1.2 Parameterisatie van sturende factoren

Om met behulp van de sturende factoren scenario's op te stellen, dienen ze te worden gekwantificeerd. De onderstaande tabel toont deze parameterisatie. Verder geeft de tabel aan waar de sturende factor invloed op heeft, en in onderstreept het effect hiervan.



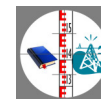
Tabel C.1 Parameterisatie sturende factoren

Sturende factor	Parameterisatie		Heeft invloed op
Ruimtelijk bereik	< 10 km <u>Vrije netwerkvereffeningen</u>	> 10 km <u>Ruimte-tijd analyse</u>	Analysemethode
Totale bodembeweging	< 5 cm <u>Nulmeting vlakdekkend, daarna 1 GPS punt voldoende</u>	> 5 cm <u>Waterpassen of InSAR</u>	Meettechniek
Patroon bodembeweging in de tijd	Consistent <u>Waterpassen of InSAR</u>	Variabel <u>Waterpassen & GPS of InSAR</u>	Meettechniek
Gebruiksruimte	< Afgesproken daling per tijdseenheid <u>Waterpassen of InSAR, aangevuld met GPS</u>	geen limiet <u>Waterpassen of InSAR</u>	Meettechniek
Andere oorzaken	Beweging meetpunten < 1 mm/jaar <u>Meetpunten representatief</u>	Beweging meetpunten > 1 mm/jaar <u>Extra aandacht diep gefundeerde peilmerken</u>	Selectie meetpunten
Superpositie delfstoffenwinningen	Ja <u>Ruimte-tijd analyse</u>	Nee <u>Zie ruimtelijk bereik</u>	Analysemethode

Tabel C.2 Toepasbaarheid InSAR

Dichtheid InSAR meetpunten	< Vereiste punt dichtheid <u>Geen InSAR of extra artificiele targets</u>	> Vereiste punt dichtheid <u>InSAR toepasbaar</u>	Meettechniek
Temporele bemonstering InSAR	Meerduidigheden oplosbaar met hoge success rate <u>Geen InSAR</u>	Meerduidigheden niet eenduidig oplosbaar <u>InSAR toepasbaar</u>	Meettechniek

In de scenariotabel ter bepaling van de monitoringsstrategie zijn eveneens keuzes opgenomen die te maken hebben met de toepasbaarheid van de InSAR techniek, zie bijlage C.2.



C.2 Classificatie

C.2.1 Classificatie scenario's

Iedere willekeurige combinatie van de sturende factoren leidt tot een scenario. Dit wordt geïllustreerd in de onderstaande scenariotabel. Deze voert voor de gebruiker de koppeling uit tussen de sturende factoren en de meet- en analysemethodieken. Met behulp van de buttons (filterfunctie) kan voor iedere sturende factor een keuze worden gemaakt, waaruit automatisch de te gebruiken meet- en analysemethodieken volgen.

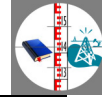
Tabel C.3 Voorbeeld van (deel van) keuzetabel voor sturende factoren met bijbehorende meet- en analysemethodieken.

						Deniet nodig (meetpunten)/niet geschikt (meettechnieken/analyse) 1=uit te voeren (indien of/of keuze: 1a, 1b, 1c, ...) 3=ter controle									
STURENDE FACTOREN						MEETTECHNIEK		STRATEGIE voor GECLASSIFICEERDE SCENARIO'S							
ruimtelijk bereik	totale bodembeweging	temporeel patroon	gebruiksruimte	andere oorzaken; beweging meetpunten	superpositie	PS dichtheid in ruimte	PS dichtheid in tijd; meerduidigheden oplosbaar	Extra aandacht diep gefundeerde punten	WP	InSAR	GPS	WP nulmeting +1 locatie GPS	Analyse Vrije netwerk vereffening	Analyse Ruimte/Tijd	
▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	ja	2vereist	ja	0	1a	1c	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	ja	2vereist	nee	0	1a	0	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	ja	<vereist	ja	0	1a	0	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	ja	<vereist	nee	0	1a	0	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	nee	2vereist	ja	0	0	1b	0	1a	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	nee	2vereist	nee	0	0	0	0	1	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	nee	<vereist	ja	0	0	0	0	1	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent ja	<1 mm/jaar	nee	<vereist	nee	0	0	0	0	1	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	ja	2vereist	ja	1	1a	1c	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	ja	2vereist	nee	1	1a	0	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	ja	<vereist	ja	1	1a	0	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	ja	<vereist	nee	1	1a	0	1a	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	nee	2vereist	ja	1	0	1b	0	1a	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	nee	2vereist	nee	1	0	0	0	1	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	nee	<vereist	ja	1	0	0	0	1	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent ja	>1 mm/jaar	nee	<vereist	nee	1	0	0	0	1	1	0	0	
<10 km	<5 cm	consistent nee	<1 mm/jaar	ja	2vereist	ja	0	1a	1c	0	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent nee	<1 mm/jaar	ja	2vereist	nee	0	1a	0	0	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent nee	<1 mm/jaar	ja	<vereist	ja	0	1a	0	0	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent nee	<1 mm/jaar	ja	<vereist	nee	0	1a	0	0	1b	3	1	1	
<10 km	<5 cm	consistent nee	<1 mm/jaar	nee	2vereist	ja	0	0	1b	0	1a	1	0	0	

C.2.2 Samenvatting classificatie

Met de sturende factoren en bijbehorende parameterisatie kunnen 256 scenario's worden gedefinieerd. De bijbehorende meet- en analysemethoden zijn veelal niet uniek. Naar aanleiding van de te gebruiken meetpunten, meettechnieken, en analysemethoden kunnen klassen worden onderscheiden:

- Winningen met een verwachte bodembeweging minder dan 5 cm (wel significant meetbaar);
- Winningen met een bodembewegingssignaal zonder temporele variabiliteit;
- Winningen (inclusief injectie en opslag) met een variabele bodembeweging in tijd;



- Winningen met een strikte gebruiksruimte.

Voor alle opties geldt dat:

1. Voorafgaand aan de winning moet de stabiliteit van de meetpunten worden onderzocht. Dit kan aan de hand van beschikbare (historische) data op statistische wijze, of door de fundering te onderzoeken. Indien verschillende oorzaken van bodembeweging niet uit te sluiten zijn (bewegingen hoger dan 1 mm/jaar), moeten diep gefundeerde merken geplaatst worden.
2. Indien het bereik van het bodembewegingsgebied groter dan 10 km is, of als er een superpositie is van verschillende delfstoffenwinningen, dan zou een ruimte-tijd analyse moeten worden uitgevoerd. Echter, software voor het uitvoeren van een ruimte-tijd analyse is nog niet op de vrije markt beschikbaar. In het vervolg van deze 1^e versie van de industrieleidraad zal onderzoek gedaan worden naar de mogelijkheid om een dergelijk pakket te ontwikkelen en op de markt te brengen.

InSAR kan niet worden toegepast als de temporele bemonstering en de afstanden tussen de meetpunten niet voldoende zijn om de meerduidigheden met voldoende hoge kans op succes op te lossen. Ook als de punt dichtheid niet voldoet aan de richtlijnen, kan InSAR niet worden toegepast, tenzij er artificiële reflectoren bij worden geplaatst.

C.3 Algemene richtlijnen en procedures per klasse scenario's

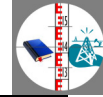
De richtlijnen voor punt dichtheid, meetfrequentie en stabiliteit van de meetpunten zijn algemeen en te vinden in de paragrafen 2.3.2 en 2.3.3.

Meettechnieken per klasse scenario's

De kenmerken van de meettechnieken voor het monitoren van bodembeweging (waterpassen, GPS, InSAR) zijn eerder samengevat in tabel 3.3.

Voor de in bijlage C.2 genoemde klassen scenario's wordt het volgende gebruik van de meettechnieken *minimaal* aangeraden:

- Winningen met een verwachte bodembeweging minder dan 5 cm. Vlakdekkende nulmeting (waterpassing of InSAR), vervolgens is GPS in het verwachte diepste punt voldoende ter verificatie (GPS ook in nulmeting);
- Winningen met een bodembewegingssignaal zonder temporele variabiliteit. Vlakdekkende herhalingsmetingen (waterpassing of InSAR);
- Winningen (inclusief injectie en opslag) met een variabele bodembeweging in tijd. Indien de magnitude groter dan 5 cm is: vlakdekkend en hoogfrequent: InSAR of waterpassen en GPS. Bij een magnitude lager dan 5 cm: een vlakdekkende nulmeting (waterpassen, InSAR, GPS), daarna is meting bij aanvang van een enkel punt met een hoogfrequente techniek (InSAR of GPS) voldoende ter verificatie van de prognose;
- Winningen met een strikte gebruiksruimte. Vlakdekkende herhalingsmetingen (waterpassing of InSAR), aangevuld met tenminste één continu GPS station.



Bijlage D Indeling deformatiemodellen (FIG)

Korte beschrijving van de deformatiemodellen zoals beschreven door “Ad-Hoc Committee of FIG working group 6.1” in (Walter M. Welsch, 2001). Dit is geen onderdeel van deze eerste versie van de leidraad, maar geeft slechts een kort overzicht van de modellen als achtergrond informatie. In deze leidraad worden het congruent model (vrije netwerkvereffening) en het kinematisch model (ruimte/tijd analyse) uit figuur D.1 beschouwd.

		Deformatie-modellen		
Beschrijvende Modellen			Oorzaak-gevolg modellen	
Congruent Model	Kinematisch Model		Statisch Model	Dynamisch Model

Figuur D.1 Overzicht van deformatiemodellen

D.1 Beschrijvende modellen

Congruent model

- ‘Vrije netwerk vereffening’;
- Tijd zit niet in het model;
- Geen oorzaak beschouwd;
- Geen verandering in de tijd.

Kinematisch model

- ‘Ruimte/tijd analyse’;
- bewegingen als functie van tijd;
- geen oorzaak beschouwd;
- permanent in beweging.

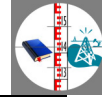
D.2 Oorzaak-gevolg modellen

Statisch model

- tijd zit niet in het model;
- verplaatsingen als functie van (fysische) oorzaken;
- geen verandering in de tijd.

Dynamisch model

- ‘Integratie geodesie en geomechanica’;
- bewegingen als functie van tijd en (fysische) oorzaken;
- permanent in beweging.



Bijlage E Confrontatie met het geomechanisch model

Deze bijlage geeft meer achtergrond informatie over de confrontatie van het geomechanische model met de meetresultaten.

Hierin zijn de volgende onderdelen opgenomen:

- Algemene beschrijving van de calibratie van het reservoir- en geomechanisch model ;
- Bepaling van de significantie van afwijkingen in relatie tot de meetprecisie;
- Lijst van mogelijke verklaringen van significante afwijkingen.

E.1 Verificatie reservoirmodellen

Reservoir (gas en aquifer) simulatiemodellen worden gekalibreerd met behulp van gemeten gasproductie en drukdata. Hierbij worden ook nieuwe inzichten uit analoge velden meegenomen.

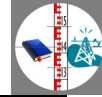
E.2 Verificatie geomechanische modellen

Daarnaast worden de geomechanische bodemdalingsmodellen van de velden met een uitgestrekte bodemdalingskom, met behulp van inversie van de integraal-vereffende peilmerkdalingen in tijd geoptimaliseerd.

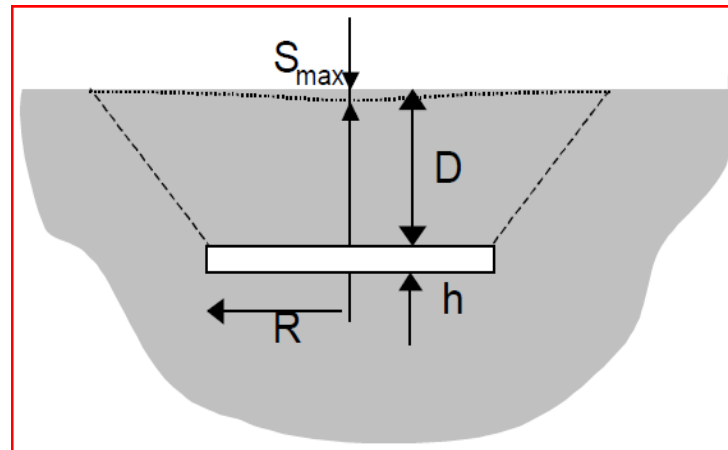
Met behulp van het geoptimaliseerde geomechanische bodemdalingsmodel worden het bodemdalingsvolume en de onzekerheid daarvan berekend als gevolg van de gerealiseerde productie. Vervolgens wordt met behulp van het geoptimaliseerde geomechanische bodemdalingsmodel, de in de toekomst te verwachten bodemdaling op basis van het productieprofiel bepaald. Dat is de bijgestelde prognose.

Indien nodig zullen de parameters worden aangepast en zal met het nieuwe "gekalibreerde" bodemdalingsmodel de bodemdalingsprognose worden bijgesteld voor het geplande productiescenario. Kennis van de ondergrond wordt ingezet om afwijkingen tussen de daling op de peilmerken en geomechanische prognose modellen te verklaren en waar nodig de geomechanische modellen bij te stellen. Bij aanpassingen van de geomechanische modellen zal ter controle de nieuw gemodelleerde bodemdaling nogmaals als invoer worden gebruikt in de hiervoor beschreven analyse methode. Verschillen tussen gemodelleerde bodemdaling en bodemdaling bepaald met de hierboven beschreven analyse geven daarbij aan, hoe meting en prognose op elkaar aansluiten.

Aan het Tcbb-rapport (TCBB, november 2009) wordt het volgende ontleend: Het geomechanisch model simuleert het vervormingsgedrag van de grond rondom het reservoir ten gevolge van druk- en vormveranderingen die bij delfstoffenwinning worden veroorzaakt. Het belangrijkste omgevingseffect, de



bodemdalingsschotel gekenmerkt door de maximale zakking S_{max} en de schotelvorm en -omvang (straal is orde $R+D$, zie figuur E.1), wordt bepaald door de mechanische bodemeigenschappen, de geïnduceerde drukverdeling in het reservoir en de daarmee samenhangende reservoircompactie en de omvang en diepteligging van het reservoir.



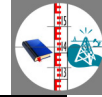
Figuur E.1 Bodemdalingsschotel

Ook spelen soms aanliggende watervoerende grondlagen een rol, als de lokale waterdruk daar beïnvloed wordt door de delfstoffenwinning. In de praktijk van geomechanische modellering van bodemdaling door delfstoffenwinning (olie- of gasvelden) worden verschillende niveaus van complexiteit gehanteerd. De eenvoudigste is het Geertsma model dat de maximale bodemdaling S_{max} relateert aan de reservoirkarakteristieken, zoals drukdaling, reservoirdikte en effectieve reservoir-compressibiliteit (compactiecoëfficiënt).

Is er ook sprake van na-ijling door kruip, nabije watervoerende lagen of kleilagen in het reservoir dan kan die worden meegenomen met een extra tijdsafhankelijk effect.

De nauwkeurigheid van de berekende bodemdaling hangt samen met de nauwkeurigheid van de samenstellende factoren, waarbij de effectieve compactiecoëfficiënt het slechtst bekend is. Zeker bij de aanvang van de winning is een afwijking van 100% niet ongebruikelijk.

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



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

De ervaring leert dat de diepe compactie zich gewoonlijk geleidelijk verspreidt tot een vloeiende bodemdaling aan het maaiveld, waarvan de omvang groter is dan het onderliggende winningveld. Deze kom vormt de basis van de ruimtelijke correlatie tussen de geïndiceerde dalingen in de meetpunten. Bij zoutcavernes zal zich, als het dak bezwijken is, meer een schoorsteenvormige zakking voordoen aan het maaiveld. Bij winning is er sprake van daling en bij gasopslag van stijging van de peilmerken. Bij convergerende zoutcavernes kan op enige afstand geringe bodemstijging optreden. De bodemdaling die wordt geïnduceerd door delfstoffenwinning varieert gewoonlijk in de tijd, waarbij naijling kan optreden door kruip of effecten van aanliggende diepe watervoerende lagen.

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

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



Bijlage F Standaardindeling meetregister

1	Inleiding	4
2	Ontwerp en inrichting van het meetnet	5
2.1	Ontwerp van het meetnet	5
2.1.1	<i>Aansluitpunten</i>	5
2.1.2	<i>Kringen en trajecten</i>	5
2.1.3	<i>Punt dichtheid</i>	5
2.1.4	<i>Secundaire optische waterpassingen</i>	5
2.1.5	<i>Betrouwbaarheid en precisie</i>	5
2.2	Inrichting van het meetnet	6
3	Metingen	7
3.1	Meetmethode	7
3.2	Instrumentarium en uitvoering	7
4	Toetsing en vereffening	8
4.1	Toetsing en vereffening	8
4.2	Beoordeling resultaten	8
4.2.1	<i>Metingen</i>	8
4.2.2	<i>Toetsing door RWS-DID</i>	8
5	Bewegingsanalyse peilmerken	9
5.1	Analyse	9
5.2	Conclusies	9
6	Presentatie van de resultaten	10
6.1	Bijlage 1: Overzicht sectie- en trajectsluitfouten	10
6.2	Bijlage 2: Overzicht kringsluitfouten	10
6.3	Bijlage 3: Resultaten eerste fase (vrije) vereffening	10
6.4	Bijlage 4: Differentiestaat	10
6.5	Bijlage 5: Overzicht deformatienet met differenties 2006-2010	11
7	Verantwoording	12
	Bijlagen	13
	Bijlage 1: Overzicht sectie- en trajectsluitfouten	14
	Bijlage 2: Overzicht kringsluitfouten	23
	Bijlage 3: Resultaten eerste fase (vrije) vereffening	26
	Bijlage 4: Differentiestaat	43
	Bijlage 5: Overzichtskaart deformatienet met differenties 2006-2010	88



Bijlage G InSAR

G.1 Overzicht satellietmissies

Tabel G.1 Overzicht satellietmissies

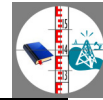
SAR missies	Eigenaar	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
C-Band SAR																
Envisat (ASAR)	ESA															
Sentinel-1 A	ESA															
Sentinel-1 B	ESA															
Sentinel-1 C	ESA															
Radarsat -2	CSA															
RCM	CSA															
X-Band SAR																
TerraSAR-X	DLR															
TerraSAR-X/2	InfoTerra															
TanDEM-X	DLR															
Cosmo-Skymed - 1,2,3	ASI															
Cosmo-Skymed - 4	ASI															
Cosmo-Skymed 2nd generation A,B	ASI															
SeoSAR / PAZ	CDTI															
SeoSAR / PAZ-2	CDTI															
In orbit																
Approved																
Planned																

G.2 Punt dichtheid (InSAR)

Deze paragraaf beschrijft hoe kan worden bepaald of de punt dichtheid van InSAR voldoende is om de precisie van deformatieschattingen uit waterpassingen te evenaren. Hierbij wordt de richtlijn opgesteld door RWS-DID in acht genomen.

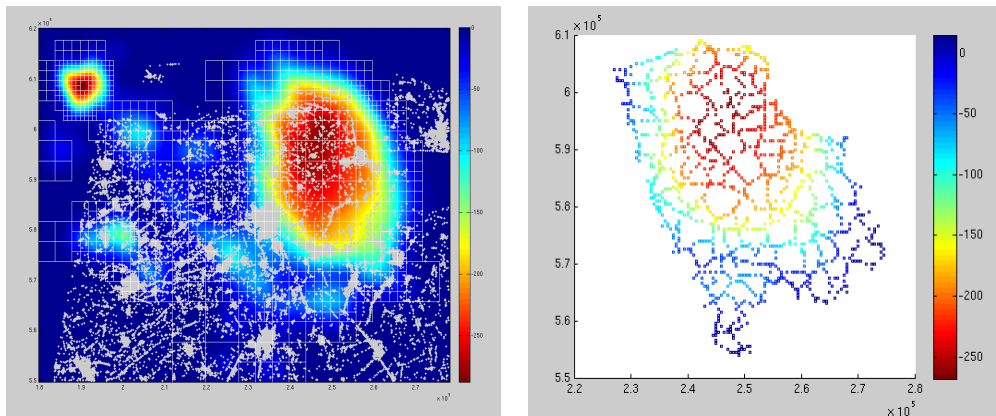
De volgende procedure maakt een vergelijking tussen de precisie voor het schatten van een bodembewegingssignaal uit InSAR en waterpassen:

- Maak een quadtree decompositie van de prognose van het bodembewegingssignaal (zie figuur G1). Dit impliceert dat in gebieden met een grotere gradiënt, kleinere quadtree cellen worden gevormd. In deze gebieden zijn ook relatief meer meetpunten nodig om de vorm van het signaal goed te kunnen beschrijven;



- Simuleer de variantie-covariantiematrix op basis van de aanwezige waarnemingen. Neem hierbij een tijdsinterval van tenminste vijf jaar. Voor InSAR is het van belang dat rekening wordt gehouden met de correlatie tussen waarnemingen;
- Bereken de precisie van het geschatte gemiddelde per quadtree cel. Hiervoor zijn geen waarnemingen nodig, enkel de variantie-covariantie matrix en de ontwerpmatrix voor het berekenen van een gemiddelde;
- Vergelijk de precisie van het geschatte gemiddelde per quadtree cel tussen InSAR en waterpassen. Op deze wijze kan worden geëvalueerd of de punt dichtheid van InSAR overal voldoende is. Hierbij wordt vergeleken met de haalbare precisie uit waterpassingen.

1.



Figuur G.1. Ruimtelijke dichtheid meetpunten InSAR en quadree decompositie (links) en dichtheid meetpunten waterpassen (rechts).

G.3 Ontwerpberekeningen (InSAR)

Het mathematisch model volgens voor het schatten van deformatie uit InSAR waarnemingen ziet er als volgt uit (Delftse methode):

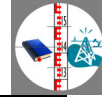
$$E \begin{bmatrix} \varphi_{ij}^k \\ \underline{d} \\ \underline{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{4\pi}{\lambda} & -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_1^\perp}{R_1^m \sin \theta_1^m} & -2\pi \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ H \\ a \end{bmatrix} \quad ; \quad D \begin{bmatrix} \varphi_{ij}^k \\ \underline{d} \\ \underline{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_\varphi & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_d^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h^2 \end{bmatrix}$$

Omdat er meer onbekenden dan waarnemingen zijn, worden er pseudo waarnemingen ingezet om het model volle rang te maken.

De oplosbaarheid van de meerduidigheden, essentieel voor de toepasbaarheid van InSAR als een standalone techniek, kan gevalideerd worden zonder dat er waarnemingen beschikbaar zijn. Het is voldoende om een tijdserie tussen twee scatterers te evalueren.

De vereiste input voor de ontwerpberekeningen zijn de volgende:

- Grootte en verdeling van de satelliet basislijnen;
- Standaardafwijking van de fasewaarnemingen. Deze is een functie van de Signal-to-Clutter Ratio (SCR, 1993). De SCR van een scatterer met amplitudedispersie



0.25 is 8, terwijl de SCR van een corner reflector rond de 200 kan liggen (Ketelaar, 2009).;

- Te verwachten hoogteverschillen tussen naburige scatterers. Deze worden uitgedrukt als de standaardafwijking voor de pseudo waarneming voor het hoogteverschil;
- Te verwachten deformatie tussen naburige scatterers. Deze worden uitgedrukt als de standaardafwijking voor de pseudo waarneming voor de relatieve deformatie.
- Variogram dat de variabiliteit van de atmosferische verstoring beschrijft. Deze kan uit resultaten van eerdere satellietmissies geschat worden, of op basis van resultaten in een representatief gebied.

De waarnemingen kunnen vervolgens worden gesimuleerd met behulp van de Cholesky decompositie van de variantie-covariantie matrix van de waarnemingen. De variantie-covariantiematrix in formulevorm is $Q_y = R^T R$; $y = R^T n$, waarbij n een vector van standaardnormaal verdeelde waarnemingen.

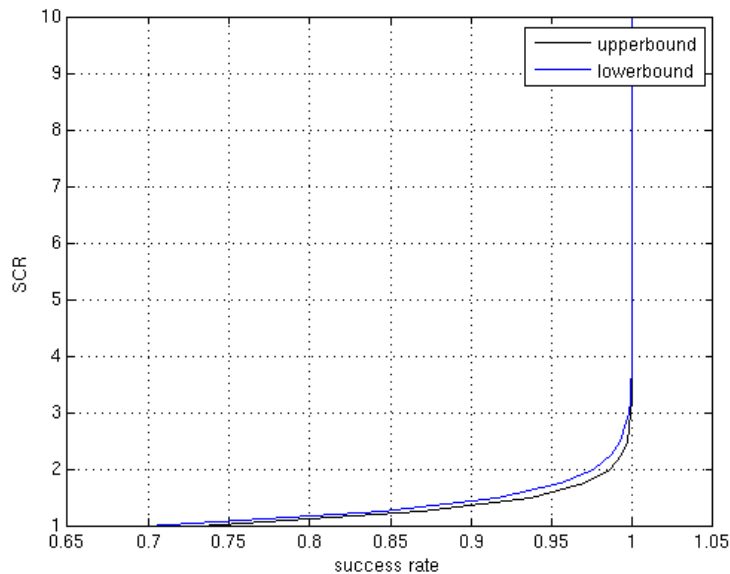
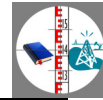
Het effect van de volgende settings op de success rates van de meerduidigheden kan worden geëvalueerd via:

- Standaardafwijking waarnemingen (gerelateerd aan SCR);
- Aantal opnames en tijdsinterval;
- Golflengte;
- Afstand tussen de scatterers (in verband met atmosferische verstoringen);
- Standaardafwijking pseudo waarnemingen (bepaalt de oplossingsruimte voor deformatie en hoogteverschil tussen naburige scatterers).

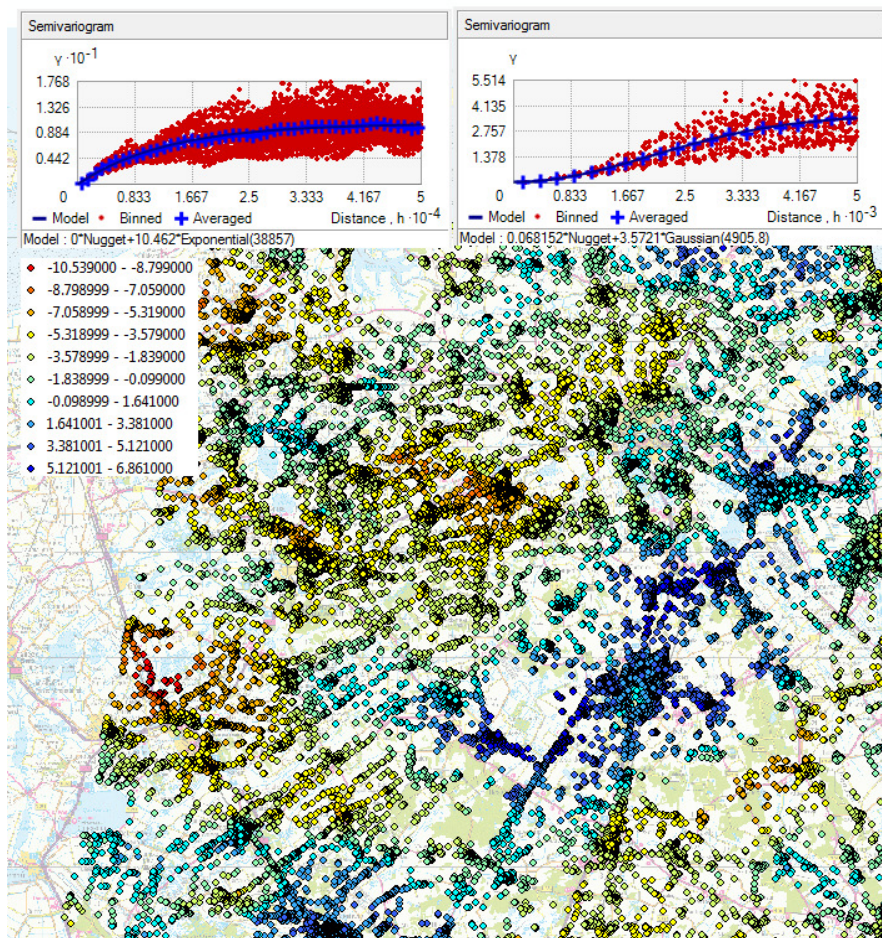
Figuur G.2 toont de oplosbaarheid van meerduidigheden als functie van de Signal-to-Clutter ratio (standaardafwijking waarnemingen), voor een tijdserie van 25 beelden met 24 dagen interval. De ondergrens geeft de oplosbaarheid (success rate) op basis van de 'bootstrap' methodologie; de bovengrens is berekend op basis van de 'Ambiguity Dillution of Precision (ADOP)' (Teunissen et al., 1998).

De oplosbaarheid van de meerduidigheden in de tijd wordt voornamelijk bepaald door het tijdsinterval tussen de opnames en de golflengte versus de magnitude van het deformatiesignaal.

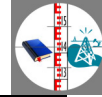
Ruimtelijk gezien is voor de oplosbaarheid van de meerduidigheden, de variabiliteit van atmosferische verstoringen en de afstand tussen de scatterers van belang. Figuur G.3 geeft hiervan een voorbeeld.



Figuur G.2 Voorbeeld van een evaluatie van de oplosbaarheid van meerduidigheden als functie van de Signal-to-Clutter ratio (standaardafwijking waarnemingen).



Figuur G.3 Voorbeeld van geschatte atmosferische verstoringen (tussen -11 en 7 mm), en twee variogrammen voor korte (< 5 km) en lange afstanden.



Bijlage H Referenties meettechnieken

H.1 Referenties Waterpassing Meettechniek

- [1] Alberda, J. E. (1990) "Inleiding landmeetkunde"
- [2] Barends, F.B.J., Kenselaar, F. & Schröder, F.H. (2001) "Bodemdaling meten in Nederland, "Hoe precies moet het, hoe moet het precies?"
- [3] Grontmij (2005) "Gebruikershandleiding versie 4.0 MOVE 3D"
- [4] Kadaster (1997) "Handleiding Technische Werkzaamheden"
- [5] Oranjewoud (2008) "Meetnetten voor de bepaling van bodemdaling door delfstoffenwinning"
- [6] Rijkswaterstaat (2008) "Productspecificatie beheer NAP"
- [7] Rijkswaterstaat (2008) "Productspecificatie Deformatiemeting overig"
- [8] Staatstoezicht op de Mijnen (2004) "Toezicht op het meten van de bodembewegingen, revisie 01, DMP27 "
- [9] Tcbb (2009) "Van Meting naar Daling"
- [10] Teunissen, P.G.J. (2006) "Testing Theory An introduction", Series on mathematical Geodesy and Positioning

H.2 Referenties GPS meettechniek

Amiri-Simkoei, A.R. (2007).

Least-squares variance component estimation – Theory and GPS applications.
Publications on Geodesy, 64, Netherlands Geodetic Commission, Delft, 208 p.

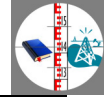
Bruyninx, C. (2004).

The EUREF Permanent Network; a multidisciplinary network serving surveyors as well as scientists, GeoInformatics, No. 5, Vol. 7, pp. 32-35.

Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez en M. Meindl (2007). Bernese GPS Software Version 5.0.

Astronomical Institute, University of Bern, 640 p.

Dow, J.M., R.E. Neilan en C. Rizos (2009).



The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy*, Vol. 83, pp. 191-198.

Even-Tzur, G., E. Salmon, M. Kozakov and M. Rosenblum (2004).
Designing a geodetic-geodynamic network: a comparative study of data processing tools, *GPS Solutions*, Vol. 8, No. 1, pp. 30-35.

Geoscience Australia (2011).
(website consulted in July 2011).

Hofmann-Wellenhoff, H. Lichtenegger, en J. Collins (1994).
Global Positioning System – Theory and Practice, 3rd revised edition, Springer-Verlag, Wien New York.

Huisman, L., J. Dawson en P.J.G. Teunissen (2011).
The APREF Project. *Coordinates*, May 2011, pp. 14-18.

Kleijer, F. (2004).
Troposphere modeling and filtering for precise GPS leveling. *Publications on Geodesy*, 56, Netherlands Geodetic Commission, Delft, 262 p.

Kouba, J. en P. Héroux (2001).
Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, Vol. 5, No. 2, pp. 12-28.

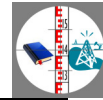
Kremers, R., H. van der Marel en R. Hanssen (2005).
Bodembeweging langs de kust: “Wat kun je meten?” Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 22 p.

Landau, H., U. Vollath, en X. Chen (2002).
Virtual reference station systems, *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 1, pp. 137-143.

Marel, H. van der (1998).
Virtual GPS reference stations in the Netherlands, *Proc. ION GPS-1998*, 15-18 September, Nashville, TN, pp. 49-58.

Martin, A., A.B. Anquela, R. Capilla en J.L. Berne (2011).
PPP technique analysis based on time convergence, repeatability, IGS products, different software processing and GPS+GLONASS constellation: a case study, Accepted for *Journal of Surveying Engineering*.

Munekane, H., Y. Kuroishi, Y. Hatanaka, en H. Yarai (2008).
Spurious annual vertical deformations over Japan due to mismodelling of tropospheric delays. *Geophys. J. Int.*, Vol. 175, pp. 831-836.



Odijk, D. (2000).

Weighting ionospheric corrections to improve fast GPS positioning over medium distances, Proc. ION GPS-2000, 19-22 September, Salt Lake City, UT, pp. 1113-1123.

Polman, J. en M.A. Salzmann (1996).

Handleiding voor de Technische Werkzaamheden van het Kadaster (HTW), Kadaster, Apeldoorn, 685 p.

Saastamoinen, J. (1972).

Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The use of artificial satellites for geodesy, Geophys. Monogr. Ser., Vol. 15, pp. 247-251.

Schaer, S.C., E. Brockmann, M. Meindl en G. Beutler (2009).

Rapid static positioning using GPS and GLONASS, Proc. EUREF 2009 Symp., 27-30 Mei, Florence, Italië, 7 p.

Teunissen, P.J.G. (1995).

The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. Journal of Geodesy, Vol. 70, pp. 65-82.

Teunissen, P.J.G., P. de Jonge, D. Odijk en C. Tiberius (1997).

Fast ambiguity resolution in network mode. In: Advances in Positioning and Reference Frames, Vol. 118, pp. 313-318.

Teunissen, P.J.G., en A. Kleusberg (1998).

GPS for Geodesy, 2nd edition, Springer.

Teunissen, P.J.G., and S. Verhagen (2009).

The GNSS ambiguity ratio-test revisited: a better way of using it. Survey Review, Vol. 41, No. 312, pp. 138-151.

Tiberius, C.C.J.M. (2011).

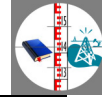
Global Navigation Satellite Systems: a system update. Hydro International, March-April 2011, pp.23-37.

Verhagen, S., P.J.G. Teunissen, en D. Odijk (2007).

Carrier-phase ambiguity success rates for integrated GPS-Galileo satellite navigation. Proc. SANE2007, Japan, Vol. 107, No. 2, pp. 139-144.

Zhang, J., Y. Bock, H. Johnson, P. Fang, S. Williams, J. Genrich, S. Wdowinski, en J. Behr (1997).

Southern California permanent GPS geodetic array: error analysis of daily position estimates and site velocities. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No., B8, pp. 18035-18055.



Zumberge, J., M. Heflin., D. Jefferson, M. Watkins, en F. Webb. (1997).
Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from
large networks. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 5005–5017.

H.3 Referenties InSAR meettechniek

(Berardino et al., 2002)

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002), A New Algorithm for
Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR
Interferograms,
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11):2375–2383.

(Ferretti et al., 2000)

Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2000), Nonlinear Subsidence Rate Estimation
using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Transac-
tions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5):2202–2212.

(Ferretti et al., 2001)

Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001), Permanent Scatterers in SAR
Interferometry,
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1):8–20.

(Ferretti et al., 2011)

Ferretti, A., Fumagalli A., Novali F., Prati, C. and Rocca, F. (2001), A New
Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR, *IEEE
Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011.

(Hanssen, 2001)

Hanssen, R. F. (2001), *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error
Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, ISBN 978-1-4020-4576-9

(Hooper, 2004)

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B. (2004), A new method for
measuring
deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent
scatterers, *Geophysical Research Letters*, 31(23):L23611.1–L23611.5.

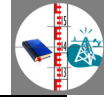
(Kampes, 2006)

Kampes, B. M. (2006), *Radar interferometry – persistent scatterer technique*,
Springer, Dordrecht, ISBN 978-1-4020-4576-9

(Ketelaar, 2009)

Ketelaar, V. (2009), *Satellite radar interferometry – subsidence monitoring
techniques*, Springer, Dordrecht, ISBN 978-1-402-09427-9

(Mahapatra, 2011)



Mahapatra, P. (2011), A comparative study of corner reflectors, compact active transponders and I2GPS for monitoring deformation in areas with low spatial density of persistent scatterers: the Delft field experiment, ESA Fringe workshop.

(Meyer and Watkins, 2011)

Meyer, F., and Watkins B. (2011), IP-STATS – A System for Deriving Statistical Models of Ionospheric Signals in Low-Frequency SAR, ESA Fringe workshop.

(SCR, 1993)

SCR (1993), in: CEOS SAR Calibration Workshop, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 20-24 Sept 1993.

(Teunissen et al, 1998)

Teunissen P., Odijk D., and Joosten P., A Probabilistic Evaluation of Correct GPS Ambiguity Resolution, Proc. of the 11th International Technical Meeting, Algorithms and Methods ION-GPS '98, Nashville, USA, 15-18 september 1998, part 2: pp. 1315-1323

(Van Leijen et al, 2007)

Van Leijen, F. J. and Hanssen, R. F. (2007), Persistent Scatterer interferometry using adaptive deformation models, in: ESA ENVISAT Symposium, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007, p. 6 pp.



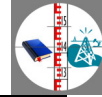
Bijlage J Acroniemen, definities, contactadressen

J.1 Acroniemen

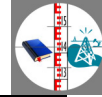
Afkorting	Naam
CAES	Compressed Air Energy Storage
CAT	Compact Active Transponders
FIG	International Federation of Surveyors (Fédération Internationale des Géomètres)
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar (Satelliet radar interferometrie)
Lidar	“Laser Imaging Detection And Ranging” of “Light Detection and Ranging”
MBB	Mijnbouwbesluit
MBR	Mijnbouwregeling
MBW	Mijnbouwwet
NAM	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
NCG	Nederlandse Commissie voor Geodesie
NOGEPA	Nederlandse Olie en Gas Exploratie en Productie Associatie
RWS-AGI	Thans RWS-DID: Rijkswaterstaat Data ICT Dienst
RWS-DID	Rijkswaterstaat Data ICT Dienst
SodM	Staatstoezicht op de Mijnen
Tcbb	Technische commissie bodembeweging
TPB	Technisch Platform Bodembeweging (excl. aardtrillingen)
WKO	Warmte Koude Opslag

J.2 Definities

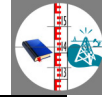
Aardwarmte	In de ondergrond aanwezige warmte die aldaar langs natuurlijke weg is ontstaan.
Autonome bodemdaling	Zie peilmerkeigenbeweging
Betrouwbaarheid	Mate waarin fouten in de waarnemingen ontdekt kunnen worden (interne betrouwbaarheid) en en hun invloed op de geschatte parameters(externe betrouwbaarheid)



Bodembeweging	Deformatie van diepe ondergrond als gevolg van mijnbouwactiviteiten volgens Mijnbouwwet (MBW)
Bovengronds peilmerk	Peilmerk verankerd in een object (gebouw, kunstwerk). Direct zichtbaar, in tegenstelling tot een ondergronds peilmerk
Conuswaarde	Zie sondering.
Critical area	Het deel van het maaiveld waar verwachting van bodemdaling door delfstoffenwinning optreedt. Het gebied wordt begrensd door de z.g. grenshoek (in de regel 45°).
Delfstoffen	In de ondergrond aanwezige mineralen of substanties van organische oorsprong, in een aldaar langs natuurlijke weg ontstane concentratie of afzetting, in vaste, vloeibare of gasvormige toestand, met uitzondering van brongas, kalksteen, grind, zand, klei, schelpen en mengsels daarvan.
Delftse methode van toetsing	Vereffening en toetsings theorie voor geodetische netwerken, ontwikkeld door prof. Baarda.
Diepe ondergrond	Deel van de ondergrond dat zich onder de Pleistocene laag bevindt.
Diepgefundeerde punten	Peilmerken, welke zodanig diep in de grond verzekerd zijn, dat geen of weinig verticale beweging verwacht wordt. Meestal op een diepte van de pleistoceen laag (met conuspenetratiewaarden van 20 – 30 MPa)
Drooglegging	De afstand tussen het maaiveld en de grondwaterspiegel
Epoche	De tijdsperiode tussen twee opeenvolgende metingen
Frequentie (van meting)	Hoe vaak iets (meting) voorkomt per tijdseenheid
Fundatie op staal	Fundatie van een object (gebouw, kunstwerk) op de eerste competente (Pleistocene) zand- of kleilaag, in de regel op geringe diepte.
Fundatie op palen	Fundatie van een object (gebouw, kunstwerk) op de eerste competente (Pleistocene) zand- of kleilaag, in de regel op grotere diepte (daarom palen).
Gebruiksruimte	Bepierking van de maximale toegestane bodembeweging (eventueel per tijdseenheid), zoals beschreven in vergunning.
Geodetische analyse	Verwerking van geodetische metingen volgens de vereffennings- en toetsingstheorie (van vrije netwerk vereffening tot ruimte-tijd analyse).
Geomechanisch model	Model van de ondergrond (reservoir inclusief overburden).
Grenshoek	Hoek die de invloedssfeer van de bodembeweging aangeeft.
GPS	Global Positioning System



Holoceen	Het Holoceen, vroeger ook Alluvium genoemd, is het <u>geologische tijdvak</u> van <u>11.700 jaar geleden</u> tot nu. Het Holoceen volgt op het <u>Pleistoceen</u>
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
Meetruis	Stochastische beschrijving van de fouten in geodetische waarnemingen.
Meetregister	Rapportage van geodetische metingen ten behoeve van het monitoren van de bodembeweging.
Meetplan	Beschrijft de meettechnieken, inclusief plaats en tijd, die ingezet worden voor het monitoren van de bodembeweging.
MOVE3	Gelicenseerd softwarepakket van Grontmij voor geodetische vereffeningen.
NAP	Normaal Amsterdams Peil
Waterpastraject	Traject waarlangs hoogteverschillen tussen meetpunten worden gemeten.
Nauwkeurigheid	Precisie+betrouwbaarheid.
Ondergronds peilmerk (OM)	GeoDelft, Deltares
Ondiepe ondergrond	Het gedeelte van de ondergrond boven het Pleistoceen.
Peilbesluit	Bestuurlijk besluit met betrekking tot de te handhaven waterhoogte in waterlopen.
Peilmerkeigenbeweging	Autonome beweging van een peilmerk t.o.v. de diepe ondergrond (ook wel autonome bodemdaling genoemd)
Peilmerk	Meetpunt
Precisie	Variabiliteit in (herhaalde) waarnemingen.
Pleistoceen	Geologische formatie, direct volgend op het Holoceen. Peilmerken dienen verankerd te zijn op de top van het Pleistocene zand of indien afwezig, de 1 ^e stabiele laag.
Puntruus	Beweging van een meetpunt dat enkele gecorreleerd is in de tijd (niet ruimtelijk).
Referentie(peilmerk)	Basis ten opzichte waarvan hoogtes of deformatie wordt berekend.
Relatieve bodemdaling	Bodemdaling tussen twee punten in ruimte en tijd.
Schroefanker	Type meetpunt
Stochastische model	Statistische beschrijving van de variabiliteit in de waarnemingen.
Sondering	Methode ter bepaling van de draagkracht van een formatie (Deltares, Fugro). De minimale conuswaarde voor objecten (gebouwen, objecten) bedraagt xx – xx MPa, voor peilmerken 20 – 30 MPa
Superpositie	Bodembeweging ten gevolge van 2 of meerdere mijnbouwactiviteiten in hetzelfde gebied.
W-toets	Waarnemingstoets (volgens Delftse theorie)



Variantie	De variantie is in de statistiek een maat voor de spreiding van de betrokken waarden
Winningsvergunning	Een vergunning voor het winnen van delfstoffen, alsmede voor het opsporen van delfstoffen
Zettingsgedrag	Beweging van een meetpunt of object onder invloed van het eigen gewicht relatief ten opzichte van de ondiepe ondergrond.

J.3 Contactadressen

Onderwerp	Naam	Contactgegevens
Waterhuis- houding	Unie van Waterschappen	Postbus 93218 2509 AE Den Haag Tel.: 070-351 97 51 Email: info@uvw.nl Website: http://www.uvw.nl
NAP hoogtes peilmerken	Rijkswaterstaat	Data-ICT-Dienst Derde Werelddreef 1 2622 HA Delft Postbus 5023 2600 GA Delft Tel.: 015-275 75 75 Website: http://www.rws.nl/kenniscentrum/databestanden/normaal_amsterdams_peil/
Geotechniek		