

Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2007-2012

NAM B.V.

<i>EP Document Nummer.:</i>	EP201306203527	<i>Owner:</i>	UIO/T/DL
<i>Revision No.:</i>		<i>Status:</i>	Final
<i>Document Date:</i>	10/6/2013	<i>Security:</i>	

The copyright of this document is vested in Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, The Netherlands. All rights reserved. Neither the whole, nor any part of this document may be reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner.

Meet- en Regel cyclus 2007-2012

Inhoudsopgave

Meet- en Regel cyclus 2007-2012.....	2
Inhoudsopgave.....	2
1 Inleiding.....	4
2 Methoden	6
2.1 Geodetische Meettechnieken.....	6
2.2 Metingen versus meetplan	11
2.3 Reservoir modellen	12
2.4 Geomechanische modellen.....	12
2.5 Belasting.....	13
3 Resultaten	16
3.1 Resultaten Geodetische Metingen	16
3.1.1 GPS metingen Waddenzee en Lauwersmeer.....	16
3.1.2 Waterpassing Waddenzee land (Lauwersmeergebied)	17
3.1.3 InSAR Waddenzee land (Lauwersmeergebied).....	19
3.1.4 Permanente GPS stations	19
3.1.5 Terrestrische maaiveldmetingen Waddenzee	19
3.1.6 Remote Sensing data	19
4 Analyse en Discussie	21
4.1 Geodetische metingen.....	21
4.1.1 Waterpassing, GPS en InSAR.....	21
4.1.2 Terrestrische maaiveldmetingen	22
4.1.3 Terrestrische maaiveld metingen versus Lidar	26
4.1.4 Vergelijk gemiddelde waarden Terrestrische maaiveld grids en Lidar	27
4.2 Productie.....	31
4.3 GPS meting versus gemodelleerde bodemdaling door de jaren heen.	32
4.4 Belasting.....	35
4.4.1 Winningsplan 2006	35
4.4.2 Rapportage Meet- en Regelcyclus 2008	35
4.4.3 Rapportage Meet- en Regelcyclus 2009	36
4.4.4 Rapportage Meet- en Regelcyclus 2010	37
4.4.5 Meet- en Regelcyclus 2011	37
4.4.6 Meet- en Regelcyclus 2012	38

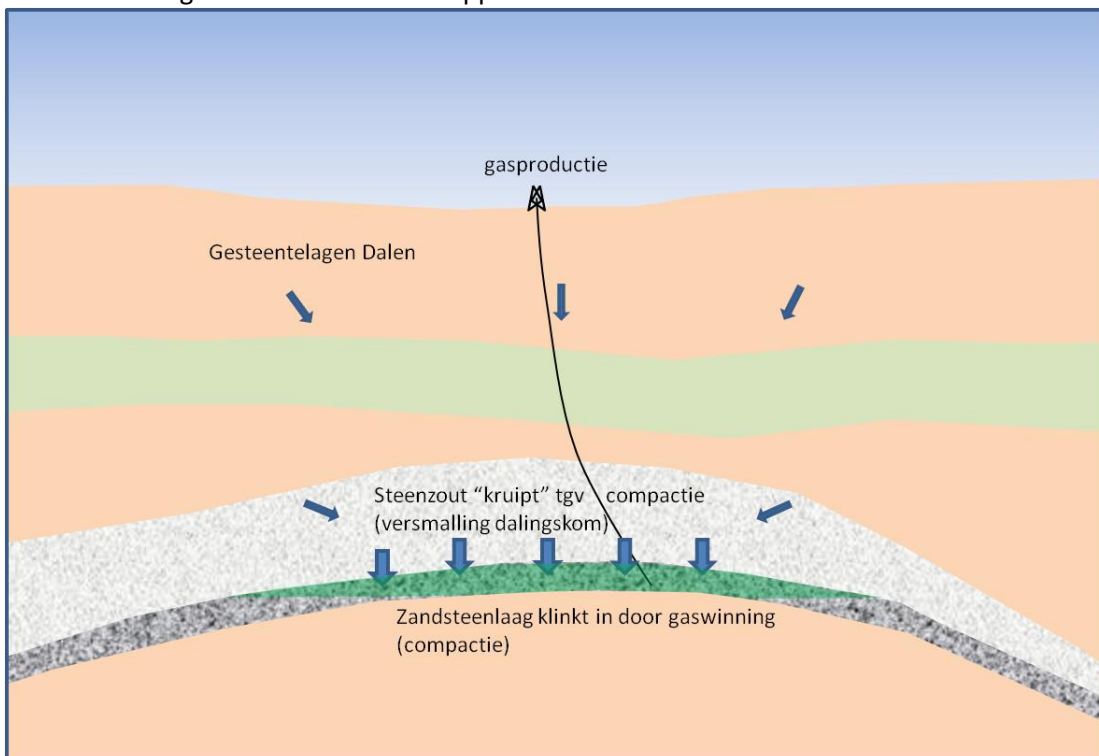
5	Conclusies	39
5.1	Geodetische meetresultaten	39
5.2	Modellering.....	39
6	Verbeteringen en Aanbevelingen	40
6.1	Verbeteringen	40
6.2	Aanbevelingen	40
7	Referenties.....	41
8	Bijlagen.....	42
8.1	Compactie Modellen.....	42
8.1.1	Bi-linear compactiemodel	42
8.1.2	Diffusie model	42
8.1.3	Zoutkruip.....	43
8.2	Bijlage GPS Differentiestaat	44
8.3	Bijlage Boxplots Griddata nabij GPS peilmerkclusters	49
8.4	Bijlage Sedimentatie grids nabij GPS peilmerkclusters.....	50
8.5	Bijlage Vergelijk Terrestrische maaiveldmetingen en Lidar per grid	51

1 Inleiding

Gaswinning uit de velden onder de Waddenzee vindt plaats volgens het principe van Hand aan de Kraan (HadK). Dit principe houdt in dat de gaswinning wordt aangepast als uit meet en monitoringgegevens blijkt dat er ten gevolge van de gaswinning nadelige gevolgen voor natuurwaarden in de Waddenzee dreigen.

In een gasveld veroorzaakt de winning van aardgas een vermindering van de poriëndruk (depletie) in de gasvoerende gesteentelaag. Daarbij wordt het gesteente in geringe mate samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende lagen.

De samendrukbaarheid of compactie hangt af van verschillende factoren zoals de materiaaleigenschappen van het reservoirgesteente, de grootte van de drukdaling en de dikte van het depletende reservoir (*Figuur 1.1*). Compactie wordt vervolgens vertaald in bodemdaling op maaiveldniveau. De mate van bodemdaling is afhankelijk van de diepte en omvang van het depletende gasveld. Bij een zeer groot gasveld als Groningen zal de bodemdaling boven het centrum van het veld vrijwel gelijk zijn aan de ondergrondse compactie. Bij kleinere voorkomens, zoals de meeste voorkomens in Friesland zal de maximale bodemdaling kleiner zijn dan de compactie van het reservoir. Hierbij moet rekening worden gehouden met eventuele daling van de druk in de watervoerende pakketten die grenzen aan het gasreservoir. De bodemdalingsschotel van een veld beslaat een groter oppervlak dan het veld zelf. Indien de gasvoorkomens dicht bij elkaar liggen kunnen de bodemdalingsschotels elkaar overlappen.



Figuur 1.1 Druk­daling in het reservoir resulteert in bodemdaling waarbij de bovenliggende pakketten invloed hebben op de vorm en magnitude van de dalingskom

Teneinde de opgetreden bodemdaling te monitoren, worden er sinds de start van de gaswinning in de Waddenzee en Lauwersmeer gebied geodetische metingen verricht. Het betreft metingen van de fysieke hoogteligging, van zowel het aardoppervlak als diep gefundeerde peilmerken. De resultaten van de metingen zijn gebruikt bij de kalibratie van de dynamische reservoir simulatiemodellen. De dynamische modellen zijn gebruikt voor een gedetailleerde onzekerheid analyse (een zogenaamd experimenteel ontwerp­methode). Met behulp van de experimenteel ontwerp­methode worden gericht

een aantal parameters in het model gevarieerd. Hierdoor wordt inzicht verkregen in het effect van deze parameters en combinatie van deze parameters op bijvoorbeeld bodemdaling. Voorbeelden van deze parameters zijn onder andere: porositeit (volume), permeabiliteit, capillaire druk (effect op water en gassaturatie), grootte en sterkte van de watervoerende laag.

Deze rapportage maakt onderdeel uit van de integrale beoordeling, beschrijft de uitgevoerde geodetische metingen van 2006-2012 en de bodemdalings modellering. Daarnaast worden voor de evaluatie de metingen met elkaar vergeleken en wordt onderscheid gemaakt tussen (diepe) bodemdaling ten gevolge van gaswinning en de daadwerkelijke bodemhoogte aan het aardoppervlak.

Belangrijke onderwerpen in de rapportage zijn:

- de bereikte nauwkeurigheid van de meetresultaten
- mate waarin met de huidige spatiële- en temporele dichtheid voldoende is om uitspraken te doen over de deformatie van de Kombergingen (Pinkegat en Zoutkamperlaag) en Lauwersmeer.
- Resultaten van de metingen
- Gebruikte geomechanische modellen
- Analyse en discussie omtrent de metingen onderling en in samenhang met de geomechanische modellen.

Dit rapport geeft eerst een overzicht van de gebruikte methodes, zoals meetmethoden en bodemdalingsmodellen.

Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd, gevolgd door analyse en discussie.

2 Methoden

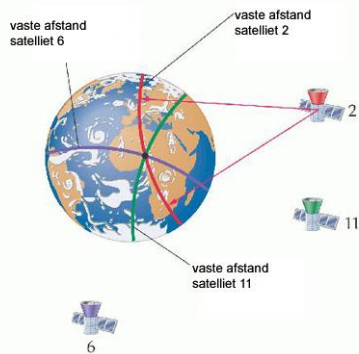
2.1 Geodetische Meettechnieken

Overzicht, uitleg en tijden/datums van de verschillende typen metingen die zijn uitgevoerd en de ingezette stations voor zover aan de orde/mogelijk. De lezer moet een indruk krijgen van het type gegevens dat is verzameld en wat je er mee kunt doen in het kader van de evaluatie.

Hierbij wordt een beknopt overzicht en beschrijving gegeven van de gebruikte meettechnieken. Het beoogd niet een volledig technisch gedetailleerde beschrijving te zijn. Hiervoor is in de literatuur voldoende informatie beschikbaar.

GPS

GPS is een techniek voor 3D positiebepaling, welke in principe overall op aarde en onder alle weersomstandigheden werkt. GPS-toepassingen die de allerhoogst haalbare precisie vereisen, zijn



gebaseerd op relatieve metingen. Relatief wil hier zeggen dat simultaan met minimaal twee ontvangers naar dezelfde satellieten wordt gemeten. De precisie (standaardafwijking) van deze metingen ligt op mm-niveau.

Onderscheid wordt gemaakt tussen campagne GPS en permanente GPS.

Campagne GPS betekent, dat er tijdelijk wordt opgesteld op een bekend peilmerk en daarvan de positie in X,Y,Z wordt bepaald. Voor de meting in de Waddenzee wordt per GPS opstelling 5 dagen continue gemeten. De data wordt tezamen

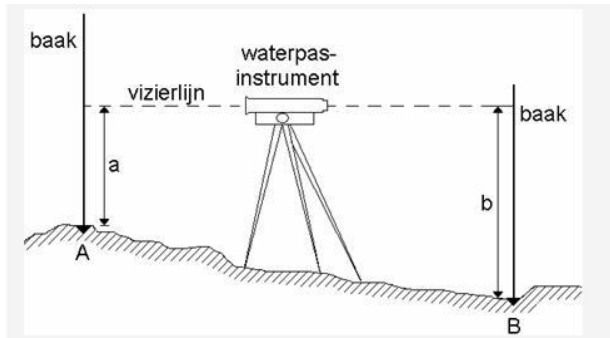
met data van omliggende GPS referentiastations verwerkt, zodat een plaatsbepaling met een nauwkeurigheid van 1-2 mm plaatsvindt.

In de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag bevinden zich 34 clusters van 3 peilmerken. Deze peilmerken zijn middels een paal van ong. 6 meter lengte verzekerd in de wadbodem. Aangezien een cluster uit 3 peilmerken bestaat is het mogelijk om controlemetingen/analyses uit te voeren op mogelijke instabiliteit van de peilmerken. Hierdoor kon worden geconstateerd dat in 2006 nieuw geplaatste peilmerken onderhevig waren aan initiële zetting. In het Lauwersmeer bevinden zich 8 peilmerken. Deze bestaan uit palen van ongeveer 1.50m lang. Hier wordt geen gebruik gemaakt van clusters.



Bij permanente GPS is een GPS antenne vast opgesteld, waarbij continue de x,y,z, posities worden geregistreerd. Voor NAM zijn permanente GPS stations opgesteld op Ameland (NAM locatie), Moddergat en Anjum (NAM locatie). Metingen worden permanent uitgevoerd en opgeslagen (interval van 15 sec.). De data wordt verwerkt tezamen met bekende stabiele GPS referentiastations. Jaarlijks worden ook de exacte posities van deze referentiastations gecontroleerd en zondig gecorrigeerd. Zowel de registratie van de data als processing wordt uitgevoerd door externe partijen. Maandelijks worden de resultaten naar SodM gestuurd en zijn deze beschikbaar op www.nlog.nl (zie deze [link](#)) Meer detail wordt beschreven in de jaarlijkse rapportage door 06GPS (zie dezelfde link)





Waterpassen

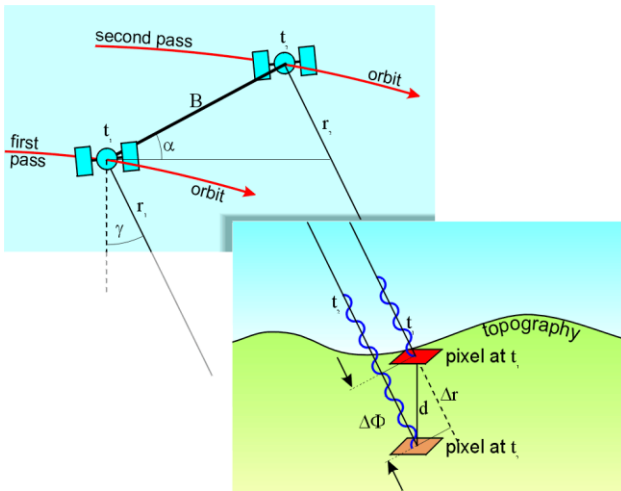
Waterpassen is het meten van hoogteverschillen tussen peilmerken. Bij een doorgaande waterpassing wordt het waterpastaestel telkens opgesteld tussen voorbaak (A) en achterbaak (B) en het hoogteverschil $(b-a)$ bepaald. Vervolgens wordt het toestel verplaatst waarbij de voorbaak als achterbaak wordt gebruikt en op een nieuw (tussen)punt de voorbaak wordt opgesteld, enz.. Door gemeten hoogteverschillen op te tellen kan het verschil in

hoogte tussen 1^e peilmerk en alle andere gemeten peilmerken bepaald worden. De waterpassingen worden uitgevoerd conform de voorschriften van Data-ICT dienst van Rijkswaterstaat (RWS-DID), zoals vastgelegd in: 'Productspecificaties Beheer NAP, Secundaire waterpassingen t.b.v. de bijhouding van het NAP, versie 1.1 van januari 2008'. Voor de standaardafwijking van de waarnemingen geldt dan een waarde van $1 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$.

De waterpassingen worden uitgevoerd met gecertificeerde zelfregistrerende optische waterpasinstrumenten en zogenaamde barcode meetbaken, waarbij de gegevens volautomatisch worden gemeten en opgeslagen in een door RWS-DID opgesteld registratie en validatie veldsysteem. Ten behoeve van deformatie metingen worden hoogteverschillen bepaald van peilmerken, ten opzichte van een referentiepunt, welke geografisch gezien buiten de invloedssfeer van de bodemdaling door gaswinning ligt. Door in meerdere epochen (tijdstippen) te meten, kunnen veranderingen in de hoogteverschillen tussen peilmerken en het gebruikte referentiepunt bepaald worden in de tijd.

InSAR

Satelliet radar interferometrie (InSAR) is een radar techniek, waarbij deformatie wordt berekend uit faseverschillen tussen verschillende acquisities en meetpunten (scatterers).



Om een precisie te behalen die vergelijkbaar is met waterpassen, moeten foutenbronnen (zoals atmosferische verstoringen, baanfouten) worden bepaald en verwijderd. Hiervoor is een tijdserie van satelliet opnames nodig ($> 20-25$ beelden), en een voldoende dichtheid van meetpunten. Voor de standalone toepasbaarheid van InSAR is het tevens noodzakelijk dat de deformatie tussen naburige scatterers in het tijdsinterval tussen twee opnames minder is dan de helft van de golflengte (de meerduidigheid in de deformatie schatting). Dit komt doordat enkel de fractionele fase kan worden gemeten, en niet het gehele aantal golflengten.

Spijkermetingen

Bij spijkermetingen wordt een draadje in het sediment verankerd met een grote schroefbout die tot een diepte van circa 60 cm in het sediment wordt gedraaid. Sedimentatie



en erosie worden bepaald ten opzichte van dit in de diepte verankerde punt door de lengte van het touwtje boven het sediment te meten. In 2006 is naar analogie van de spijkermetingen op wadplaten langs de kust, begonnen met spijkermetingen op meer centraal gelegen wadplaten. Spijkermetingen geven inzicht in de lokale sedimentatie/erosie en de gegevens kunnen worden gekoppeld aan hoogte- en bodemdalingmetingen. In 2009 is geanalyseerd of de spijkermetingen bruikbare informatie kunnen opleveren over de vlakdekkende sedimentatie/erosie op wadplaten (d.m.v. kriging; referentie 6 Kampshoff (zie www.nam.nl)).

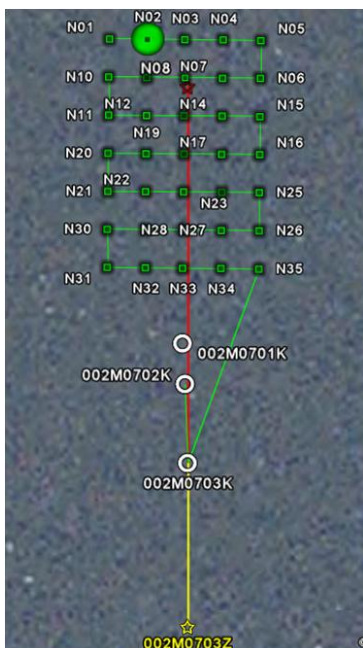


In 2009 is reeds gerapporteerd, dat de sedimentatiegegevens (spijkermetingen) die door de NAM zouden worden verzameld bij de vaste meetpunten op het wad zijn mislukt vanwege de grote sedimentdynamiek op de meetlocaties gecombineerd met een relatief lage meetfrequentie (1x/j tegen 6x/j voor de NCA (Natuur Centrum Ameland) meetpunten aan de kust). Enkele meetpunten zijn door geulverschuiving verloren gegaan of stonden op het punt om in de geul te verdwijnen; veel meetpunten zijn in het sediment verdwenen en een paar meetpunten zijn door onbekende oorzaak verloren geraakt. Doordat veel meetpunten moesten worden opgezocht en uitgespit, zijn de meetlocaties zodanig verstoord dat geen nauwkeurige metingen meer konden worden uitgevoerd. Door het wegvallen van de sedimentatiemetingen is de beoogde koppeling met bodemdalingmetingen van de diepe ondergrond ter plaatse niet mogelijk en is niet meegenomen in dit rapport.

Alternatieven voor de spijkermetingen zijn geschetst in het NAM rapport Geostatistische Analyse Spijkermetingen (EP200904215756), Zie Referentie 6. In navolging daarvan is in overleg met de Audit Cie besloten om in 2010 te starten met terrestrische maaiveldmetingen nabij de GPS clusters.

Terrestrische maaiveldmetingen

Sinds 2010 worden nabij de GPS clusters terrestrische maaiveldmetingen uitgevoerd. Hierbij is een grid uitgezet van 9x5 punten of 7x5 punten, welke op een onderlinge afstand van 5m liggen.



De horizontale positie wordt met GPS bepaald, terwijl de maaiveldhoogte middels waterpassing wordt verkregen. Hiervoor wordt de hoogte van de GPS punten als referentie gebruikt om te komen tot een NAP hoogte van de gridpunten op het maaiveld. Daar waar de bodem zacht is (slib) wordt de meetbaak voor waterpassing voorzien van een brede voet, zodat deze niet kan wegzakken in het zand van de wadplaat.

Tot nu toe zijn er van 5 grids 2 metingen uitgevoerd en van 3 grids 3 metingen.

De nauwkeurigheid van de waterpassing voor deze relatief korte afstanden is ~ 1mm. Afhankelijk van de gesteldheid van de bodem, zal de absolute nauwkeurigheid per meetpunt < 1cm bedragen.



PQ Metingen Lauwersmeergebied

In het Lauwersmeergebied wordt in het kader van het monitoringsprogramma veranderingen in vegetatie bijgehouden. Hiervoor worden vegetatieopnames gemaakt in raaien met permanente kwadranten waarbij ook enkele abiotische parameters worden meegenomen. Het gaat daarbij om gegevens van grondwaterstanden, bodemchemie en maaiveldhoogten.

De hoogtemetingen van peilbuizen zijn in 2008 en 2012 opgenomen door NAM en worden door de onderzoekers gebruikt in hun analyses. Deze hoogtemetingen worden niet gebruikt voor nauwkeurige bodemdeformatie bepaling en derhalve ook niet in dit rapport verwerkt.

Luchtfoto's

Luchtfoto's van het wad in de gehele Waddenzee zijn in de monitoring opgenomen om de ontwikkelingen in de arealen droogvallend wad en water te kunnen volgen in zowel ruimte als tijd. In 2007 en 2008 zijn luchtfoto's gemaakt in zowel True Color als Color InfraRed (CIR). Vanwege de beperkte bruikbaarheid en nauwkeurigheid m.b.t. het bepalen van de arealen droogvallend wad en de praktische beperkingen rond het maken van de foto's (weersgesteldheid in combinatie met getijden) is het in 2009 niet gelukt om opnames te maken. Derhalve is in overleg met de auditcommissie gezocht naar een alternatieve mogelijkheid om het areaal droogvallend wad te bepalen. Op basis van de goede ervaringen van RWS met LIDAR metingen is in het voorjaar van 2010 een proefproject uitgevoerd. Eén van de voordelen van deze techniek is, dat het minder beperkingen kent ten aanzien van de weersgesteldheid. Hoewel de nauwkeurigheid van de techniek zodanig is, dat niet op korte termijn een significante trend in relatie met de bodemdaling door gaswinning aangetoond kan worden (zie Referentie 9; Deltares, 2010) is op advies van de AuditCie besloten om ook in 2011 en 2012 Lidar opnames te maken van de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Deze data is door Deltares geanalyseerd en gerapporteerd (zie ook Lidar).

Lodingen

In het Monitoringprogramma 2007-2012 (NAM EP200701201533) rond de winningen van het wadgas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, is aangegeven dat de geomorfologische dynamiek in de Waddenzee nader zal worden onderzocht aan de hand van de lodinggegevens van Rijkswaterstaat (RWS). De lodinggegevens van de gehele Nederlandse Waddenzee worden door RWS continu verzameld in cycli van 6 jaar. RWS heeft op verzoek van de NAM de basisgegevens van de laatste vier lodingen beschikbaar gesteld.

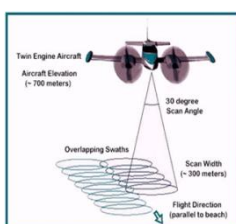
Aangezien RWS voor de 4^e cyclus een andere meetmethode heeft toegepast, zoals GPS-LRK (Long-Range-Kinematic) in plaats van WST (Waterstanden gecorrigeerde dieptemetingen) en Lidar, kan deze data niet met voorgaande cycli vergeleken worden. Zie hiervoor het rapport van Periplus ("*Gevolgen en omvang van verschillen LRK en Waterstandgecorrigeerde dieptemetingen*", 05-RWSRKZ-002)

De data van de 4^e cyclus is gebruikt om de nulsituatie voor de monitoring rond de MLV winningen te beschrijven. Zie hiervoor Referentie 7 (rapport "*NAM - Uitwerking Lodinggegevens RWS 2003-2008 (4e cyclus, incl. Lidardata)*". Nulsituatie voor de Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen winningen" (publicatiedatum: mei 2010). Gepubliceerd op www.nam.nl (zie [link](#))

Deltares heeft alle cycli beschouwd en gerapporteerd in het kader van de integrale beoordeling, ook in samenhang met de Lidar opnames.

Lidar

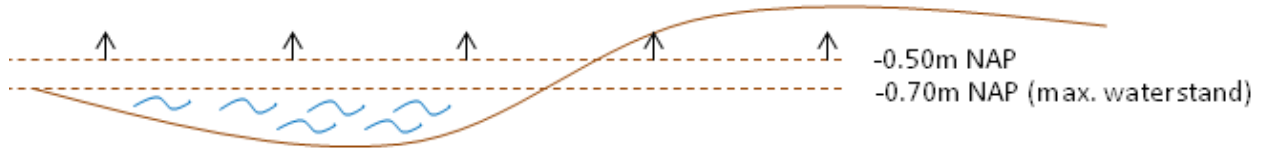
Laseraltimetrie of LIDAR staat voor Laser Imaging Detection and Ranging en is een technologie die de afstand tot een bepaald object of oppervlak bepaalt door middel van het gebruik van laserpulsen (vergelijkbaar met radar, dat echter radiogolven gebruikt in plaats van licht).



Voor hoogtemetingen wordt veelal vanuit een vliegtuig of helikopter gemeten. Met deze techniek zijn opnames gemaakt van de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Tevens gebruikt Rijkswaterstaat deze techniek naast lodingen om eens in de 6 jaren de hoogte van de gehele Waddenzee te bepalen.

Aangezien de topografische laserpuls niet door water penetreert, zal ook het wateroppervlak reflecteren (voor zover er geen speculaire reflectie optreedt,

ofwel daar waar geen reflectie naar de ontvanger optreedt in die delen van de scan, die een scherpe hoek maken met het water) en als meetpunt meegenomen worden. Opnames dienen dan ook zoveel mogelijk tijdens laagwater plaats te vinden. Voor de NAM surveys van de betreffende kombergingen is als eis gesteld, dat de maximale waterhoogte niet meer dan - 0.70m NAP mag bedragen. Door tijdens de analyse een grens te stellen aan de minimale gemeten hoogte van - 0.50m NAP zal de overblijvende data altijd het droogvallend wad representeren.



De Lidar data van 2010, 2011 en 2012 is door Deltares geanalyseerd en gerapporteerd.

Nauwkeurigheden

Meettechniek	Precisie deformatie schatting	Interval	Ruimtelijke dichtheid	Ruimtelijke componenten
Waterpassen	1-5 mm 1mm/vkm	campagne 1-5 jr	Meetpunten op 0.5-1 km afstand	1D (verticaal)
GPS	mm-cm niveau	continu en campagne	Enkele punten	3D
InSAR	3-5 mm	Opnames 8-35 dagen	Scatterers afhankelijk van terrein	1D (verticaal) en oost-west (indien 2 tracks asc/desc)
Spijkermeting		1-4 per jaar	Enkele punten	
Terrestrische maaiveldmeting	< 1cm	Samen met GPS campagnemeting in Waddenzee	Reguliere grids van 9x5 of 7x5 punten (5m tussenruimte)	1D (verticaal)
PQ hoogtemetingen		1x per 4 jaar		1D
Luchtfoto's		1-2x per jaar		2D
Lodingen	11-40cm	1x per 6 jaar		3D
Lidar	Systematisch 3.5 cm Stochastisch 2.7 cm	1-2x per jaar		3D

Tabel 2.1 : Karakteristieken meettechnieken

2.2 Metingen versus meetplan

In Tabel 2 staat een overzicht van de uitgevoerde metingen en het meetplan.

Tabel 2.2 Overzicht uitgevoerde metingen versus meetplan

Jaar	Meetplan	Uitgevoerd / Additioneel	Opmerking
2006	WP Ameland	✓	
	WP Wad vasteland (Lauwersmeergebied) (nulmeting)	✓	
	WP Schiermonnikoog (nulmeting)	✓	
	GPS Waddenzee (nulmeting)	✓	
	Permanente GPS Ameland-Oost, Moddergat en Anjum	✓	
2007	Permanente GPS Ameland-Oost, Moddergat en Anjum WP Ameland	✓	
	GPS Waddenzee (4 peilmerken)	✓	
		Luchtfoto's Waddenzee (Truecolor+ColorInfraRed).	
2008	Permanente GPS Ameland-Oost, Moddergat en Anjum WP Wad vasteland (Lauwersmeergebied)	✓	
	WP Oost-Ameland	✓	
	GPS Waddenzee (4 peilmerken)	✓	
		Luchtfoto's Waddenzee + Lauwersmeer(ColorInfraRed). PQ hoogtemetingen. Waterpassing van 16 peilmerkclusters t.b.v. stabiliteitsanalyse.	
2009	Permanente GPS Ameland-Oost, Moddergat en Anjum	✓	
	WP Ameland	✓	
	WP Schiermonnikoog	✓	
	GPS Waddenzee (34 peilmerken)	✓	
2010	Permanente GPS Ameland-Oost, Moddergat en Anjum	✓	
	GPS Waddenzee (6 peilmerken)	✓	
		Start terrestrische hoogtemeting nabij GPS clusters (sedimentatiemetingen). Start Lidar metingen i.p.v. luchtfotografie.	
2011	Permanente GPS Ameland-Oost, Moddergat en Anjum	✓	Op verzoek van SodM is de waterpassing Ameland vervroegd (i.p.v. 2012)
	WP Wad vasteland (Lauwersmeergebied)	✓	
	WP Ameland	✓ (19 peilmerken)	
	GPS Waddenzee (20 peilmerken)	Terrestrische hoogtemeting nabij GPS clusters. Lidar surveys (2). InSAR analyse Lauwersmeergebied.	
2012	Permanente GPS Ameland-Oost, Moddergat en Anjum	✓	
	WP Schiermonnikoog	✓	
	GPS Waddenzee (20 peilmerken)	✓	
		Terrestrische hoogtemeting nabij GPS clusters. GPS Lauwersmeer (8 peilmerken). Lidar survey (1). PQ hoogtemetingen.	

WP=Waterpassing

GPS=Global Positioning System

2.3 Reservoir modellen

Oorspronkelijk is de dynamische modellering van de Wadden voorkomens uitgevoerd met behulp van een twee dimensionaal (droog gas) model. Gebruikmakend van het drie dimensionale reservoir simulatie model van het analoge gasveld Anjum werd een analytische techniek toegepast om de drukkaling in de aquifers te simuleren. In de loop van de tijd toen er meer reservoir gegevens bekend werden, zijn er van alle Waddenzee velden drie dimensionale reservoir simulatie modellen gemaakt. In 2009-2010 heeft er een herinterpretatie plaatsgevonden van de seismiek en zijn naast bovengenoemde Waddenzeevelden ook voor de velden Ameland, Anjum en Metslawier nieuwe geologische modellen opgezet. Deze modellen zijn als uitgangspunt gebruikt voor het vernieuwde winningsplan van 2011. In 2012 is een nieuwe put (MGT-3) geboord in het Nes veld. De resultaten van deze put hebben geleid tot een update van de top structuur in dit gebied. De geologische modellen en de drie dimensionale reservoir simulatiemodellen zijn hiervoor aangepast en gekalibreerd door middel van productie en druk data.

De dynamische modellen zijn gebruikt voor een gedetailleerde onzekerheid analyse (een zogenaamd experimenteel ontwerp methode). Met behulp van de experimenteel ontwerp methode worden gericht een aantal parameters in het model gevarieerd. Hierdoor wordt inzicht verkregen in het effect van deze parameters en verschillende combinaties daarvan op bijvoorbeeld bodemdaling. De parameters die het grootste effect op de "history match" geven zijn: porievolumen, permeabiliteit en de grootte en sterkte van de watervoerende laag.

2.4 Geomechanische modellen

Voor bodemdalingsprognoses is in NAM in het algemeen het analytische programma SUBCAL gebruikt, gebaseerd op de analytische "Geertsma & Van Opstal Rigid Basement" theorie (Referentie 2 en Referentie 4). Daarnaast wordt het eindige elementen programma Geomec gebruikt voor velden zoals Ameland, waarvan het reservoir zeer heterogeen en de geologische structuur gecompliceerd is. Geomec is een door Shell en TNO ontwikkeld programma. Als basis voor deze software is het eindige-elementen-pakket DIANA van TNO gebruikt (Referentie 3).

In 2000 zijn zowel met het analytische als met het eindige-elementen-programma voor het Groningen veld bodemdalingsberekeningen uitgevoerd en met elkaar vergeleken. Uitgaande van dezelfde statische en dynamische modellen voor het reservoir, bleken SUBCAL en Geomec vergelijkbare resultaten te geven (Referentie 5).

In het algemeen blijkt de bodemdalingskom berekend met het analytische model SUBCAL iets ondieper en wijder te zijn dan de bodemdalingskom verkregen door analyse van de waterpasmetingen.

Tot 2011 werd voor de bodemdalingsprognoses voor de Waddenvelden het analytische model SUBCAL toegepast, waarbij een bi-lineair compactiemodel werd gebruikt (zie hoofdstuk 8). Toen uit bodemdalingsmetingen bij Ameland bleek dat het tijdsafhankelijke gedrag van de bodemdaling niet goed genoeg verklaard kon worden door een bi-lineair model, is in 2011 overgestapt op een diffusiemodel (zie bijlage 1, hoofdstuk 8). Ook wordt sindsdien het gedrag van de boven en onder het reservoir liggende gesteentelagen in meer detail gemodelleerd met Geomec.

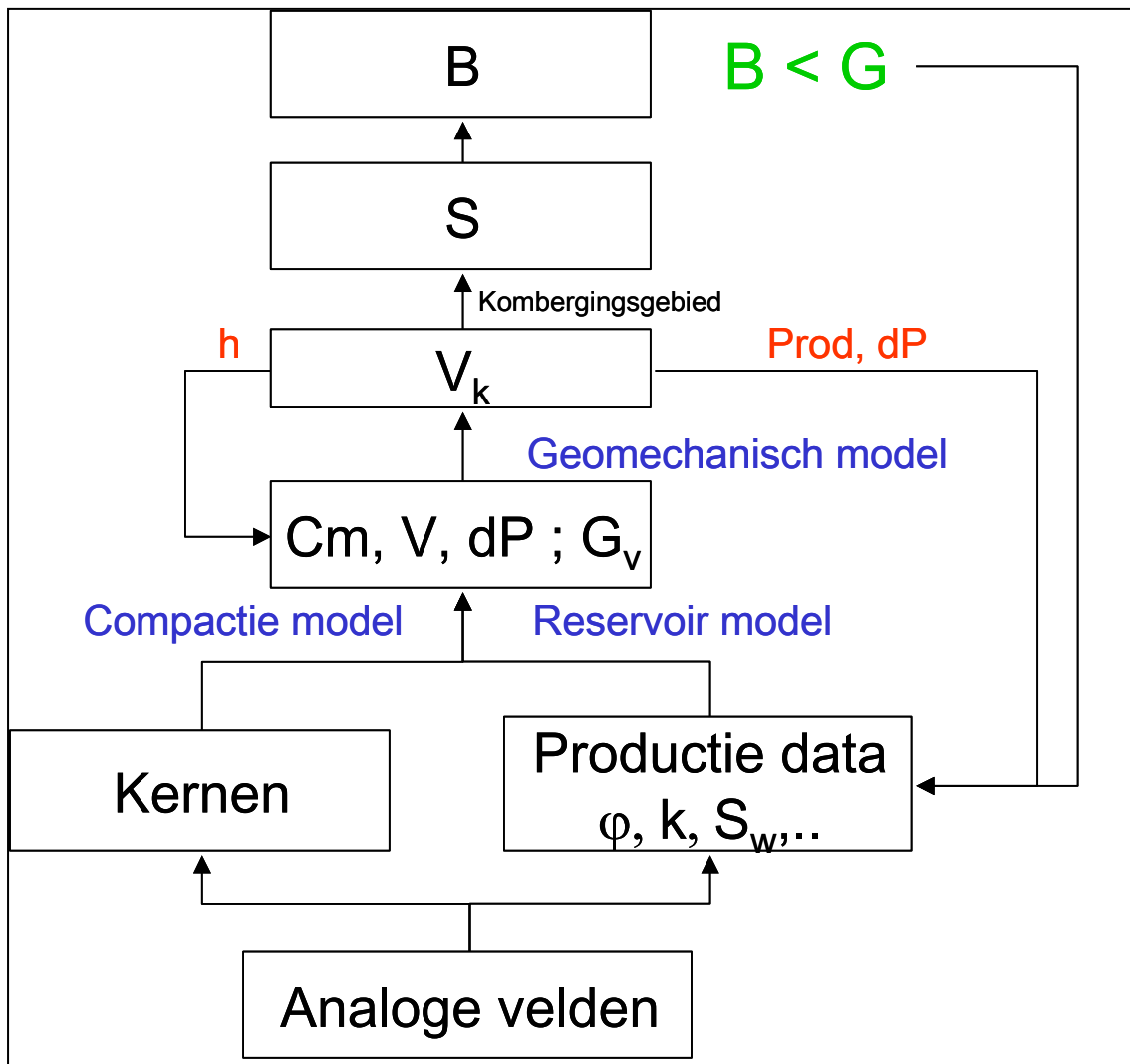
Bij uitvoering van de Meet- en Regelcyclus voor 2012 is naast een onzekerheidsanalyse op de reservoir modellen ook een onzekerheidsanalyse op de geomechanische parameters toegepast. Deze analyse is gebruikt om de bandbreedte van de onzekerheid voor diverse scenario's beter te bepalen.

2.5 Belasting

De in het winningsplan beschreven Meet- en regelcyclus is de kern van het beheersproces van de bodemdalingssnelheid (S) door gaswinning in de Waddenzee. Het doel van dit beheersproces is om zorg te dragen en aan te tonen dat de belasting (B) door de bodemdalingssnelheid (gemiddeld over 6 jaar; voortschrijdend, symmetrisch) ten gevolge van de gaswinning vanaf bovengenoemde locaties en de bestaande winningen, binnen de gebruiksruimte (G) van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag blijft en zal blijven ($B < G$)¹. Binnen de gestelde gebruiksruimte zal NAM zorg dragen voor een doelmatige winning. Het beheersproces streeft tegelijkertijd naar een continue verbetering van de bodemdalingsprognoses. Door de cyclus regelmatig uit te voeren worden in de loop der tijd de prognoses steeds geverifieerd en geactualiseerd. In het beheersproces is een bewakingsfunctie ingebouwd met continue GPS-hoogtemetingen. Met het beheersproces, dat deel uitmaakt van het bedrijfsvoeringssysteem van NAM (ISO 14001 gecertificeerd), wordt gewaarborgd dat de belasting binnen de gebruiksruimte zal blijven.

De berekening van de bodemdalingbelasting (B) wordt volgens onderstaand schema expliciet gemaakt. De Gebruiksruimte (G) is beschikbaar voor belasting ten gevolge van de gasproductie. In het geval dat B kleiner dan G is, zullen de modellen worden geoptimaliseerd door nieuwe data toe te voegen, waarna B opnieuw berekend wordt. Wanneer blijkt dat B groter dan G is zal de productie (Prod) zodanig worden verlaagd dat uiteindelijk het criterium $B < G$ geldt.

¹ Rijksprojectbesluit, bijlage 3. Gaswinning binnen Randvoorwaarden – Passende beoordeling van het rijksprojectbesluit over de aardgaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, 20 januari 2006



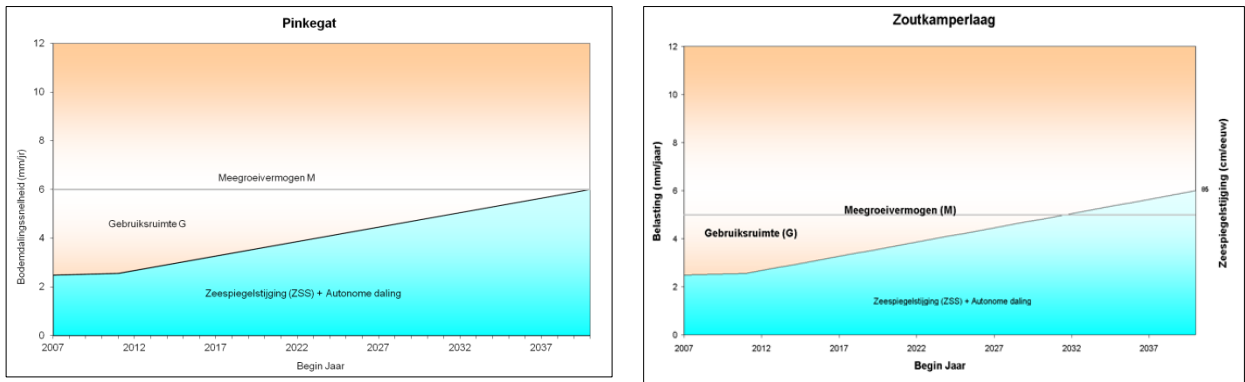
Figuur 2.1

h: bodemdaling, Prod: gasproductie, dP: depletie, φ: porositeit, k: permeabiliteit, Sw: Water saturatie, V_k: bodemdalingsvolume, G_v: bruto gesteente volume

De gebruikruimte (G) wordt met name bepaald door de zeespiegelstijging (Z).

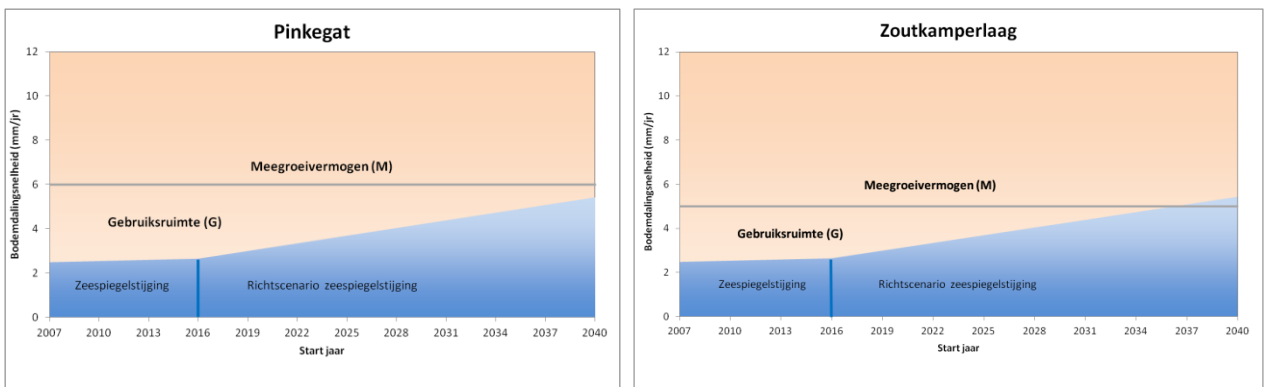
Pinkegat	$G(J) = 6 - Z(J)$	mm/jaar
Zoutkamperlaag	$G(J) = 5 - Z(J)$	mm/jaar

Figuur 2.2 toont het gebruikruimteplaatje zoals gebruikt in de Meet- en Regelcycli tot en met 2009, waarbij is uitgegaan van de relatieve zeespiegelstijging volgens het scenario vastgelegd in bijlage 3, hoofdstuk 4.7, van de passende beoordeling behorend bij het Rijksprojectbesluit.



Figuur 2.2, Zeespiegelstijging zoals gebruikt tot en met de Meet en Regelcyclus 2009

In 2011 is door het KNMI een nieuwe prognose van de zeespiegelstijging opgesteld, die door TNO (Referentie 1) is vertaald in een voorstel voor actualisatie van het beleidsscenario voor de zeespiegelstijging ten behoeve van inpassing gaswinning van onder de Waddenzee. Met het gewijzigde beleidsscenario voor de zeespiegelstijging wordt vanaf de Meet- en Regelcyclus 2010 gebruik gemaakt. Het nieuwe gebruikruimteplaatje is getoond in Figuur 2.3.



Figuur 2.3, Zeespiegelstijging zoals gebruikt vanaf de Meet- en Regelcyclus 2010

3 Resultaten

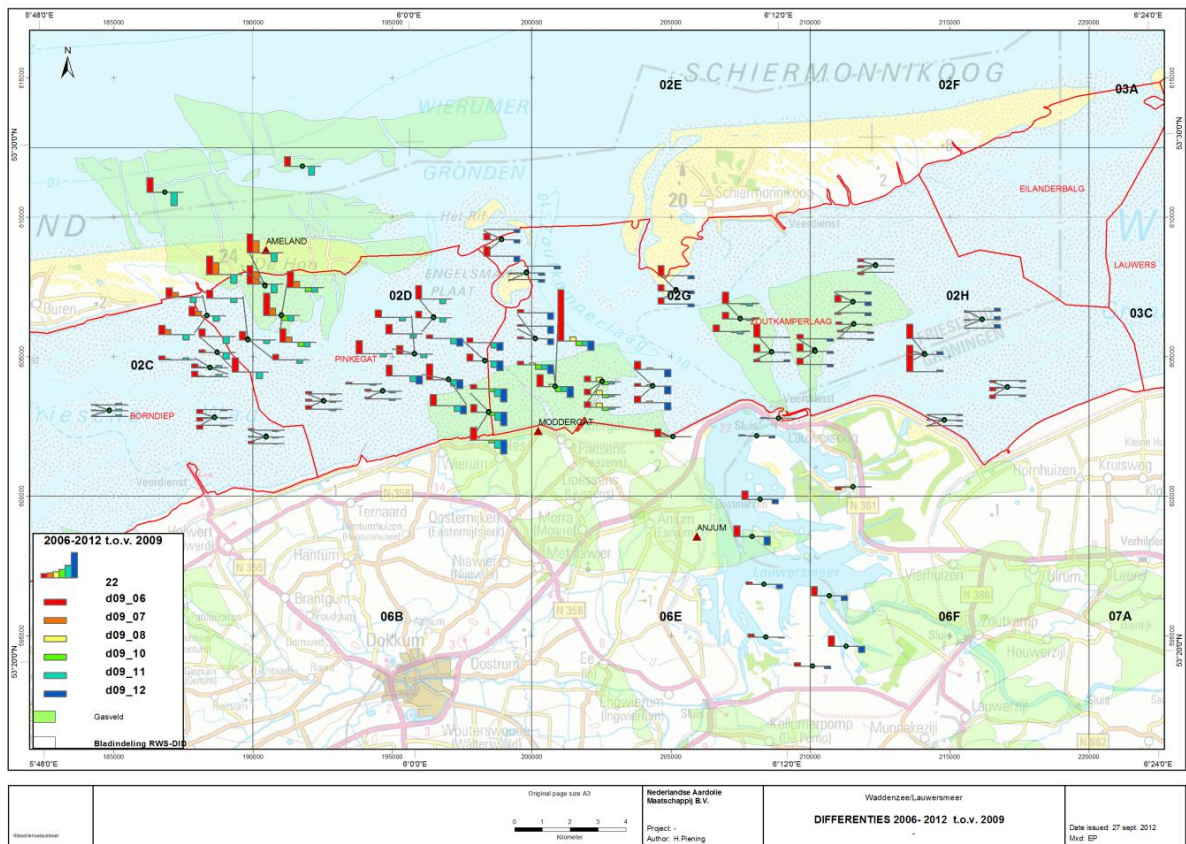
Overzicht van de resultaten van de metingen die conform het meetplan zijn uitgevoerd en in hoofdstuk 4 worden besproken, alsmede de resultaten van de geomechanisch gemodelleerde prognose.

3.1 Resultaten Geodetische Metingen

3.1.1 GPS metingen Waddenzee en Lauwersmeer

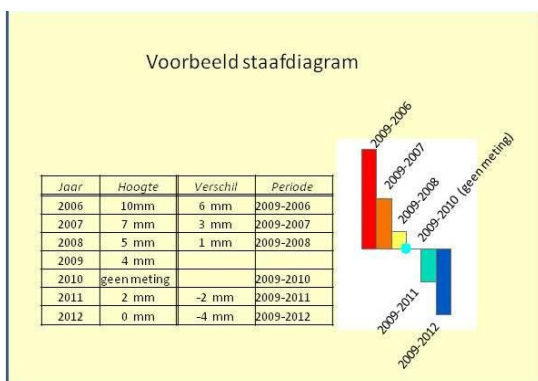
Onderstaande kaart toont de veranderingen in hoogte ligging in de tijd. Aangezien niet alle peilmerkclusters in 1 jaar gemeten worden (m.u.v. 2006 en 2009) is het niet mogelijk om in 1 kaart alle hoogteverschillen tussen 2007 en 2012 weer te geven.

In onderstaande figuur is getracht het verloop van de verandering in hoogteligging weer te geven in staafdiagrammen per peilmerk (3 per cluster).



Figuur 3.1 Relatieve peilmerkbeweging per jaar t.o.v. 2009

Uitleg Staafdiagram:



- Per peilmerk (3 per cluster) hoogteverschil t.o.v. 2009.
- Lengte staaf geeft grootte van daling weer t.o.v. 2009.
- Kleur staaf geeft epoche aan.

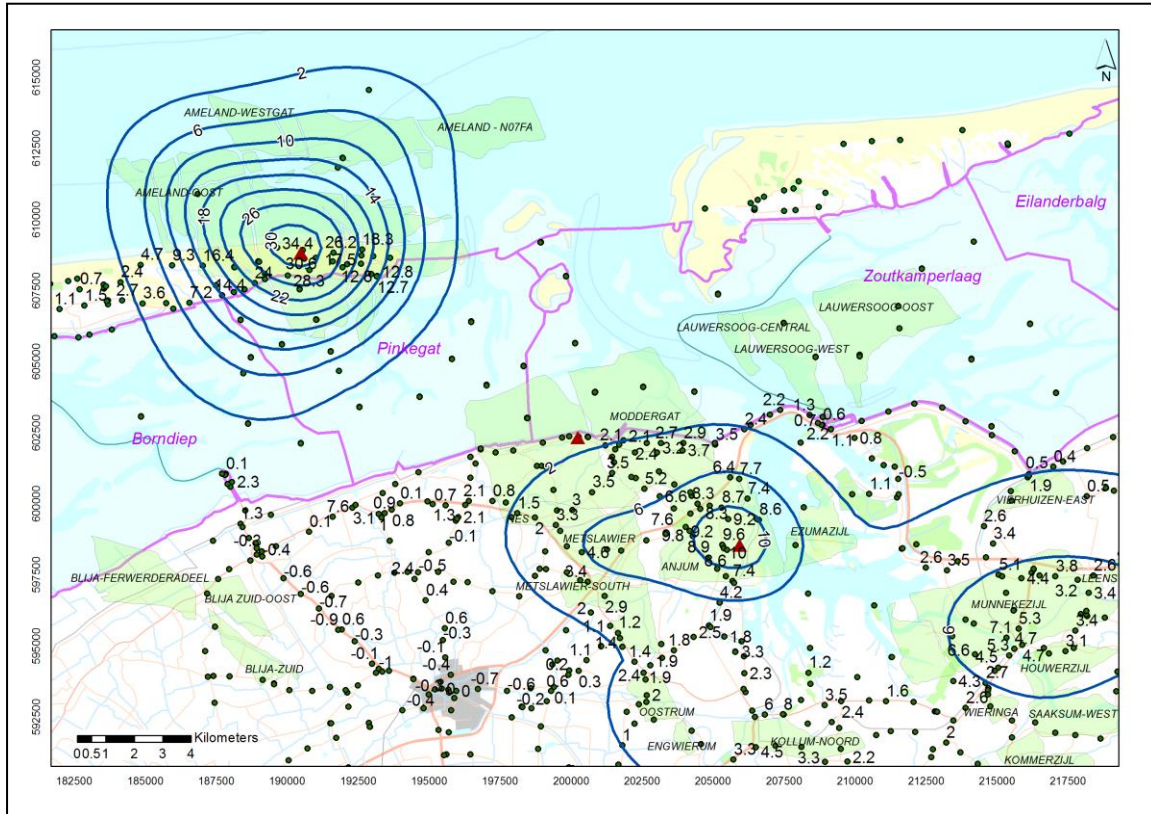
Daling vóór 2009 wordt positief afgebeeld in staafdiagram, na 2009 negatief.

Dus *hoogte van 2006* -(min) *hoogte van 2009*, 2007-2009, 2008-2009, 2010-2009, 2011-2009, 2012-2009. 2009 is als referentiejaar gekozen, omdat toen alle punten zijn aangemeten. Deze zijn ook in 2006 aangemeten, maar voor de nieuw geplaatste peilmerken is zetting geconstateerd tussen 2006 en

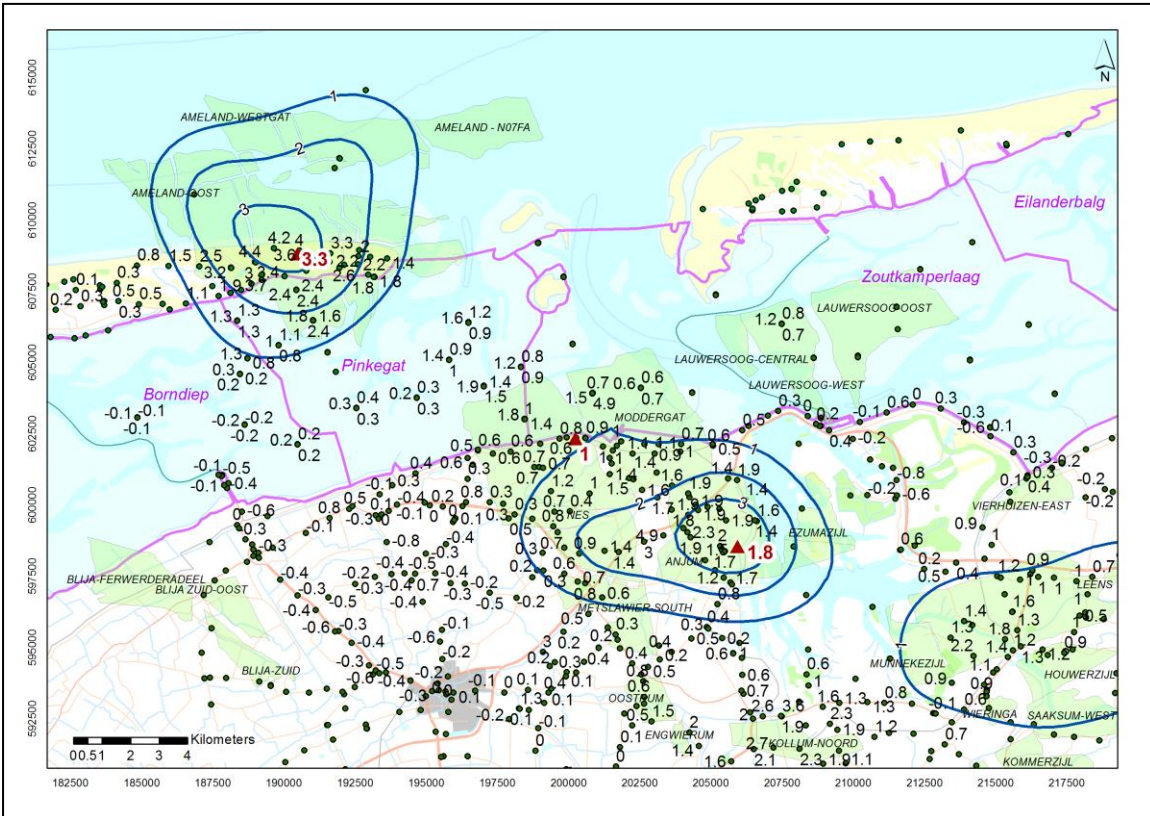
2007. Derhalve is 2009 als referentiejaar gekozen.
De zetting is duidelijk te zien in de relatief grote lengte van de rode staven (2006-2009).
Voor gedetailleerde differenties zie Bijlage 8.2 "GPS differentiestaat".

3.1.2 Waterpassing Waddenzee land (Lauwersmeergebied)

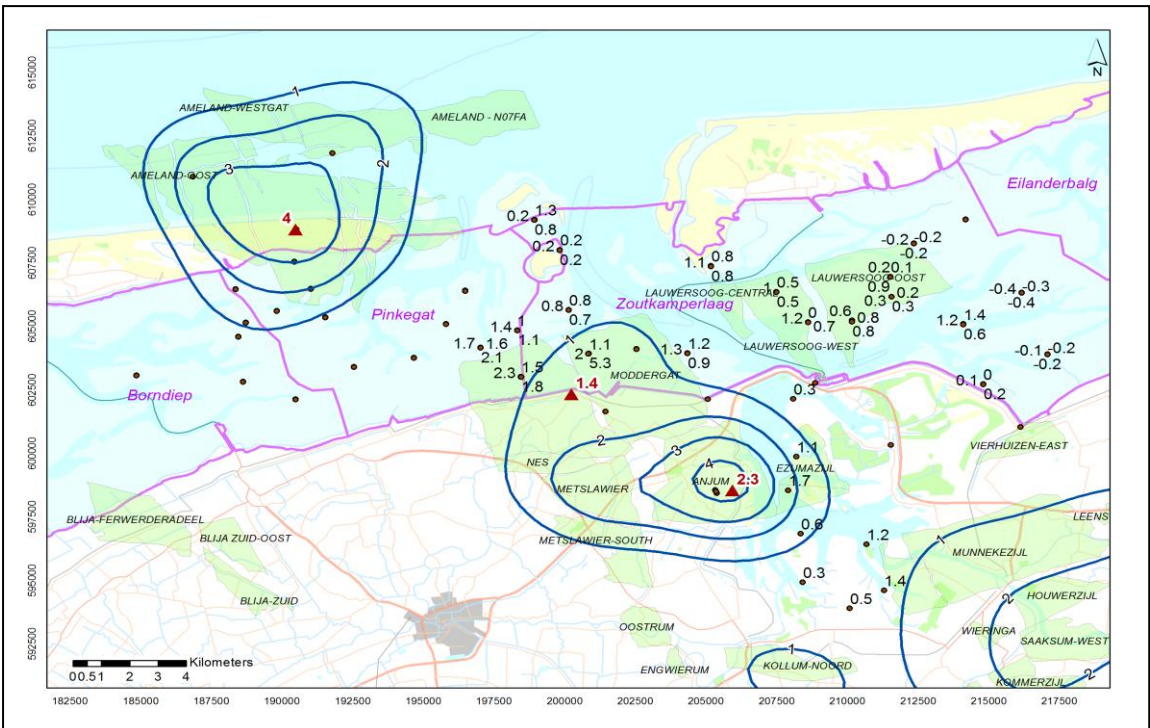
In het Lauwersmeergebied is regelmatig gewaterpast en in de periode van deze beoordeling in 2006, 2008 en 2011. Onderstaande kaarten geven per gemeten peilmerk aan wat het hoogteverschil (in mm) vanaf begin van de productie tot 2011 en tussen 2006 en 2012



Figuur 3.2, Totale bodemdaling door gaswinning in 2011 sinds start productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (januari 2011). De punten met label representeren de peilmerken met in 2011 gemeten hoogteverschillen sinds start productie. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS metingen uitgevoerd (rode driehoek). Bodemdaling in cm



Figuur 3.3, Totale bodemdaling door gaswinning in 2011 sinds nulmetingen in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (januari 2011) volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen. De punten met label representeren de peilmerken met in 2011 gemeten hoogteverschillen sinds start productie van de waddenvelden in 2006. Bodemdaling in cm.



Figuur 3.4; Totale bodemdaling door gaswinning in 2012 sinds nulmetingen in 2006. In blauw de contouren (januari 2012) van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen. De punten met label representeren de peilmerken met in 2012 gemeten hoogteverschillen sinds start productie van de waddenvelden in 2006. Bodemdaling in cm

Voor een gedetailleerd overzicht van de hoogteverschillen, volgend uit de GPS meetsessies zie Bijlage 8.2 "GPS Differentiestaat"

3.1.3 InSAR Waddenzee land (Lauwersmeergebied)

In het kader van het meetplan Groningen is in 2012 een InSAR analyse uitgevoerd.

Deze is gerapporteerd aan Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) en beschikbaar via het NLOG portaal (zie <http://www.nlog.nl/nl/hazards/registers/registers.html> onder "Meetplan Noord-Nederland" , Referentie 8 (Bodemdaling Groningen, satelliet radar interferometrie, rapportage behorende bij het meetplan Groningen, maart 2012). Hierbij zijn de waterpas resultaten van het Lauwersmeergebied van 2011 gebruikt ter verificatie van de InSAR analyse resultaten. Aangetoond is, dat de InSAR analyse vergelijkbaar is met de resultaten van waterpassing en daarmee de waterpassing kan vervangen, met dien verstande, dat er bij volgende InSAR analyses de nodige onafhankelijke controlemetingen plaatsvinden om de resultaten te verifiëren.

Daarmee kan ook in de toekomst de analyse van hoogteverschillen in het Lauwersmeergebied middels de InSAR techniek plaatsvinden, behoudens goedkeuring door SodM.

3.1.4 Permanente GPS stations

In 2006 zijn er permanente GPS stations geïnstalleerd op de locatie Ameland-Oost (AME-1) en op de locatie Anjum. Eind 2006 is ook nabij Moddergat een GPS station geplaatst. De resultaten van de metingen worden maandelijks gerapporteerd aan SodM. Deze zijn via het NLOG portaal beschikbaar (zie <http://www.nlog.nl/nl/hazards/registers/registers.html> onder "Meetplan Waddenzee" (Continue GPS hoogtemetingen AME-1, Moddergat en Anjum, rapportage).

De metingen geven inzicht in het verloop van de daling ter plaatste (Tabel 3.4) en kan worden vergeleken met de geprognosticeerde bodemdaling.

Locatie	Daling [mm] in de periode 05/02/07 - 01/01/13	Gemiddelde dalingssnelheid in 2012 [mm/jaar]	Gem. standaardafwijking van snelheid (1 jaar) [mm/jaar]
Ameland	40	7	0.7 (1 σ)
Moddergat	14	4	0.5 (1 σ)
Anjum	23	4	0.6 (1 σ)

Tabel 3.1 Absolute daling sinds 5-2-2007 en gemiddelde dalingssnelheden van afgelopen jaar

3.1.5 Terrestrische maaiveldmetingen Waddenzee

Hoogteverschillen van de meetpunten ligt veelal tussen -5 en +5 cm in 1 jaar. Van 2 grids zijn de gemeten verschillen groter (-15 tot +20 cm), vanwege de ligging nabij een migrerende geul. Gezien de variatie in de hoogteverschillen en het minimaal aantal metingen kan hieruit nog geen trend worden bepaald.

De diepe bodemdaling, welke volgt uit de metingen van de betreffende GPS clusters (0-5mm) is veel kleiner dan de variatie aan de oppervlakte, waardoor het eventueel aanwezig zijn van een relatie tussen de diepe bodemdaling en de sedimentatie/erosie niet kan worden aangetoond.

3.1.6 Remote Sensing data

Luchtfoto's

Zie Rapportage van Arcadis, Referentie 10 ("Areaal Waddengebied op basis van luchtfotografie: nulsituatie 1-2008 Arcadis, september 2008 (zie www.nam.nl)".

Lodingen

Resultaten: Zie rapport NAM, Referentie 7 (“Uitwerking Lodinggegevens RWS 2003-2008 (4e cyclus, incl. Lidardata). Nulsituatie voor de Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen winningen (publicatiedatum: mei 2010). Zie www.nam.nl”).

In het kader van de evaluatie wordt de data in zijn geheel opnieuw bewerkt en geanalyseerd door Deltares.

Laseraltimetrie of Lidar

De kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag zijn met Lidar opgenomen in 2010 (najaar), 2011 (voor- en najaar) en 2012 (najaar). Tevens wordt door Rijkswaterstaat elke 6 jaar lodingen en Lidar opnames gemaakt van de gehele Waddenzee. Voor het Friesche zeegat (Pinkegat en Zoutkamperlaag) is dit uitgevoerd in 2006 en 2012 (voorjaar).

Zie onder een tabel met overzicht van de Loding en Lidar opnames voor het Friesche zeegat (kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag).

Jaar	RWS	NAM
2006	Loding + Lidar	
2009	Lidar	
2010 Najaar		Lidar
2011 Voorjaar		Lidar
2011 Najaar		Lidar
2012 Voorjaar	Loding+Lidar	
2012 Najaar		Lidar

Tabel 3.2 Lodingen en Lidar opnames over het Friesche zeegat

Analyse van de Lidar data is gerapporteerd door Deltares. Deze rapporten zijn beschikbaar via de NAM website (zie www.nam.nl, of deze [link](#)).

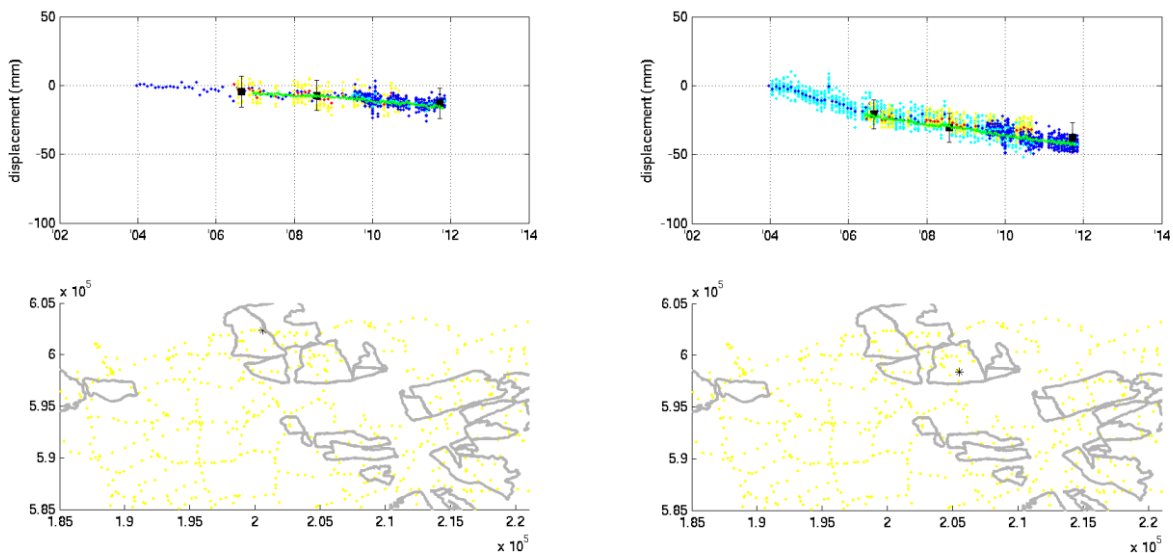
4 Analyse en Discussie

4.1 Geodetische metingen

4.1.1 Waterpassing, GPS en InSAR

Voor de Waddenzee moet voor wat betreft de hoogteveranderingen, onderscheid gemaakt worden tussen de diepe bodemdaling ten gevolge van aardgaswinning en veranderingen in de maaiveldhoogte, ofwel het plaatareaal bij een bepaalde waterstand. De diepe bodemdaling wordt in de Waddenzee sinds 2006 bepaald door de GPS metingen van de peilmerk-clusters. De maaiveldhoogte wordt bepaald middels Lidar en terrestrische maaiveldmetingen nabij de GPS clusters.

Op land zijn waterpassingen uitgevoerd en worden de GPS metingen geregistreerd van de permanent geplaatste GPS stations. Tevens wordt dit gebied met InSAR gemeten. Hieronder staan de tijdseries waarbij de data van alle 3 meetsystemen gecombineerd is voor de evaluatiegebieden van 500x500m bij GPS locaties Moddergat en Anjum.



Figuur 4.1 links: Locatie Moddergat. Figuur 4.2 rechts: Locatie Anjum

Legenda: Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. Zwart: hoogteverschillen waterpassingen (incl. foutmarges). Groen: GPS.

Duidelijk is te zien, data de resultaten van de 3 onafhankelijke meetsystemen, binnen de nauwkeurigheden, overeenkomen.

Zie Referentie 8 voor volledige rapportage “Bodemdaling Groningen, satelliet radar interferometrie rapportage behorende bij het meetplan Groningen 2010, NAM EP201203202214” (zie www.nlog.nl, of deze directe [link](#))

Meetpunt dichtheid Waddenzee

De NAM heeft simulaties uitgevoerd omtrent de schatbaarheid van het bodemdalingsspatroon, door middel van ruimte-tijd analyses, gebaseerd op gesimuleerde GPS metingen over de gehele productieperiode. De resultaten geven geen significante verschillen bij het bijplaatsen van punten. Deze resultaten komen overeen met eerder onderzoek, uitgevoerd door een onafhankelijke partij. Met het oog op de kwetsbaarheid van het gebied en de praktische mogelijkheden, zijn geen extra meetpunten geplaatst. Indien punten onbruikbaar raken, omdat ze bijvoorbeeld in een geul terecht

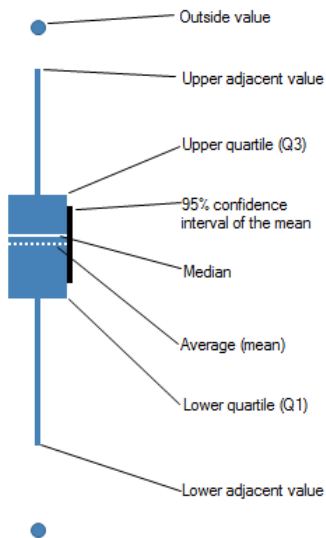
komen, zal er tijdig een nieuw punt geplaatst worden in de nabijheid van het bedreigde punt op een hoger gedeelte van de wadplaat. De hoogte van het bedreigde punt zal overgebracht worden naar het nieuw geplaatste punt.

4.1.2 Terrestrische maaiveldmetingen

De metingen van de oppervlakte (bodems) zijn geanalyseerd en onderling vergeleken.

Voor zover er reeds terrestrische metingen voor meerdere jaren bestaan van dezelfde grids, is voor deze gridpunten een box-plot analyse uitgevoerd, waarbij de hoogtewaarden van elk gridpunt binnen een grid in één 'box' zijn opgenomen (voor één bepaald jaar). Hieruit blijkt, dat er relatief grote verschillen bestaan tussen de plaathoogtes van verschillende meetjaren. Een paar voorbeelden van grids welke in alle 3 jaren zijn aangemeten (2010, 2011 en 2012).

Hieronder eerst een uitleg van een boxplot:

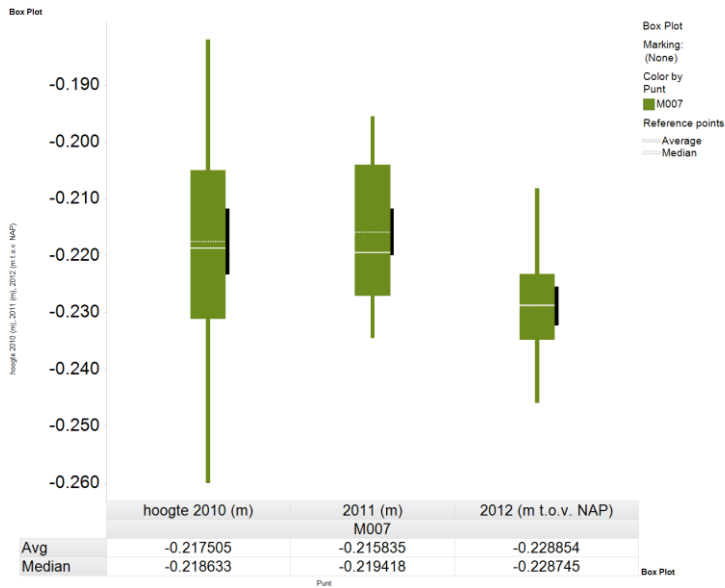


Figuur 4.3

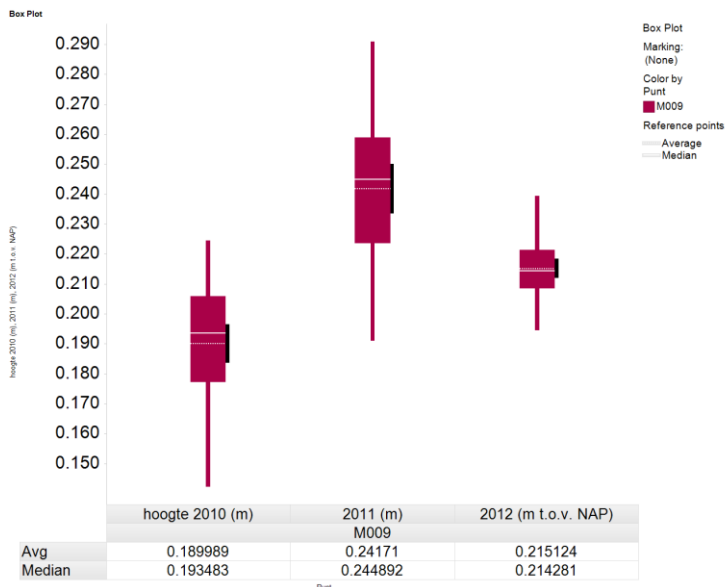
In de statistiek is een kwartiel een van de drie waarden die een geordende set data, de steekproef of populatie, in vier gelijke delen opdeelt. Elk deel is dus een kwart van de dataset. Men spreekt van eerste, tweede en derde kwartiel en noteert deze als Q1, Q2 en Q3.

- eerste kwartiel (Q1) = getalswaarde die de laagste 25% van de getalswaarden onderscheidt van de hogere waarden = 25ste percentiel
- tweede kwartiel (Q2) = mediaan = getalswaarde die het midden van de set aangeeft = 50ste percentiel
- derde kwartiel (Q3) = getalswaarde die de hoogste 25% van de getalswaarden onderscheidt van de lagere waarden = 75ste percentiel (bron Wikipedia.nl)

y-as geeft de hoogte in meters t.o.v. NAP

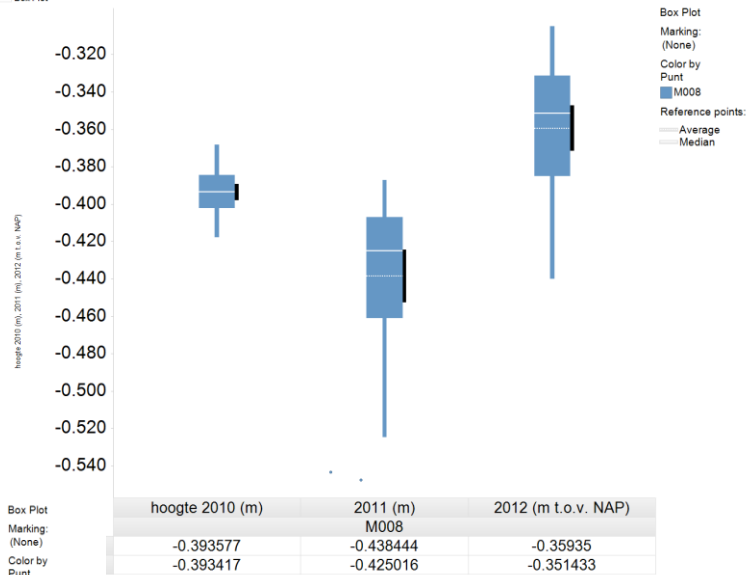


Figuur 4.5 Grid nabij meetpunt M008 – Hieruit valt af te lezen, een relatief grote variatie in meetwaarden in 2011 en 2012 en redelijk groot verschil tussen mediaan en gemiddelde in 2011, waardoor gebruik van gemiddelde statistisch gezien niet aan te bevelen is. Tevens is er een grote variatie van plaathoogte tussen jaren onderling. GPS meting op peilmerk M008 geeft tussen 2010-2011 een daling van 0mm en van 2011-2012 een daling van 4mm. Effecten van deze diepe bodemdaling op de plaathoogte verandering is gezien de dynamiek hiervan niet waarneembaar.



Figuur 4.4 Grid nabij meetpunt M007- Hieruit valt af te lezen, dat er een relatief grote variatie in meetwaarden is in 2010. Gemiddelde en mediaan liggen dicht bij elkaar.

GPS meting op peilmerk M007 geeft tussen 2010-2011 een daling van 4mm en van 2011-2012 een daling van 5mm (zie GPS Differentiastaat, bijlage 8.2). Effecten van deze diepe bodemdaling op de plaathoogte verandering is gezien de dynamiek hiervan niet waarneembaar.



Figuur 4.6 Grid nabij meetpunt M009 - Hieruit valt af te lezen, een relatief grote variatie in meetwaarden in 2010 en 2011. Tevens is er een grote variatie van plaathoogte tussen jaren onderling. GPS meting op peilmerk M009 geeft tussen 2010-2011 een daling van 1mm en van 2011-2012 een stijging van 2mm. Effecten van deze diepe bodemdaling op de plaathoogte verandering is gezien de dynamiek hiervan niet waarneembaar.

Overige Boxplots zijn opgenomen in bijlage 8.3 “Boxplots Griddata nabij GPS peilmerkclusters”

Hieronder zijn de hoogtemetingen per gridpunt vergeleken voor dezelfde 3 (GPS)clusters. Negatieve waarden betekenen daling voor betreffende periode (erosie), positieve waarden stijging (sedimentatie).

Legenda:

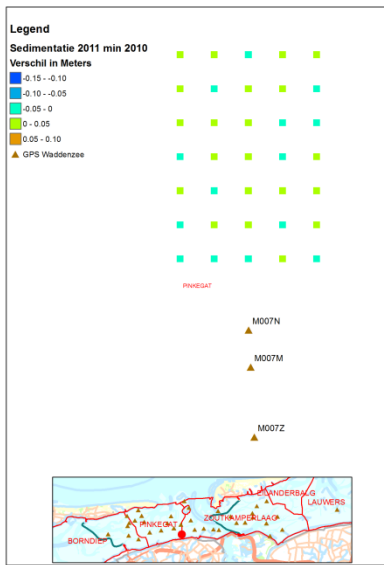


Fig. 4.7 M007 Deformatie in periode 2010-2011
GPS meting 2010-2011: Daling 4mm

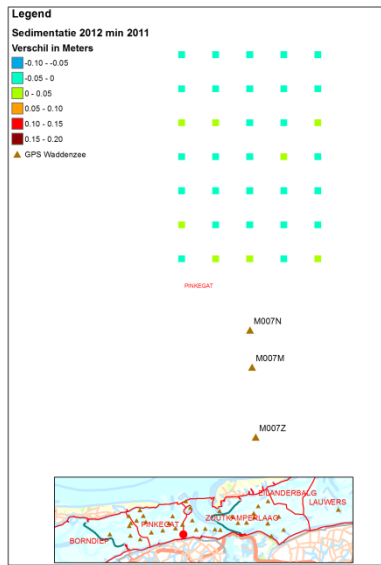


Fig. 4.8 M007: Deformatie in periode 2011-2012
GPS meting 2011-2012: Daling 5mm

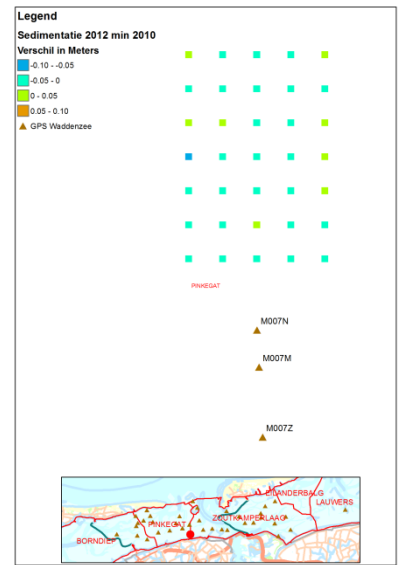


Fig.4.9 M007: Deformatie in periode 2010-2012
GPS meting 2011-2012: Daling 9mm

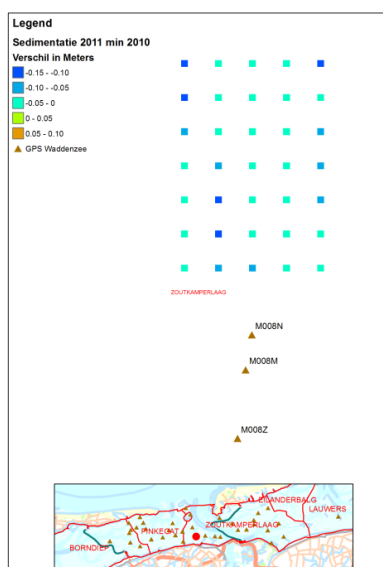


Fig.4.10 M008 Deformatie in periode 2010-2011
GPS meting 2010-2011: Daling 0mm

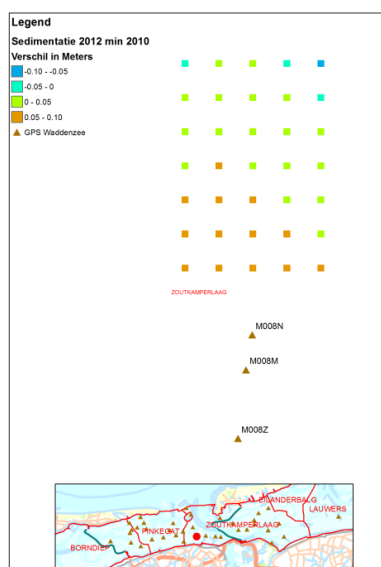


Fig.4.11 M008: Deformatie in periode 2011-2012
GPS meting 2011-2012: Daling 4mm

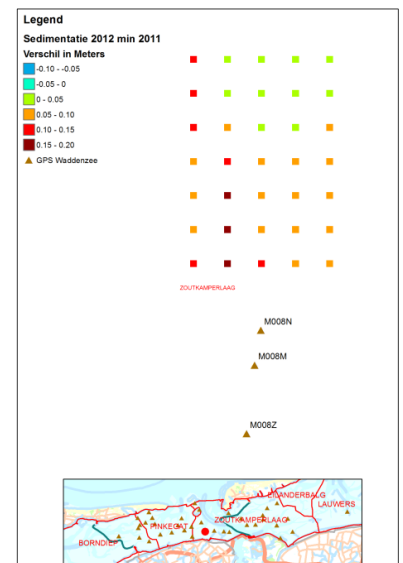


Fig.4.12 M008: Deformatie in periode 2010-2012
GPS meting 2011-2012: Daling 4mm



Fig.4.13 M009 Deformatie in periode 2010-2011
GPS meting 2010-2011: Daling 1mm

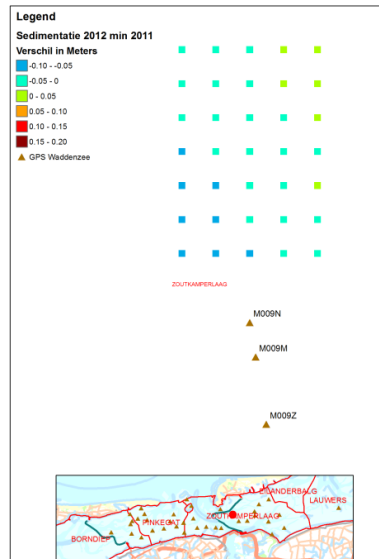


Fig.4.14 M009: Deformatie in periode 2011-2012
GPS meting 2011-2012: Stijging 2mm

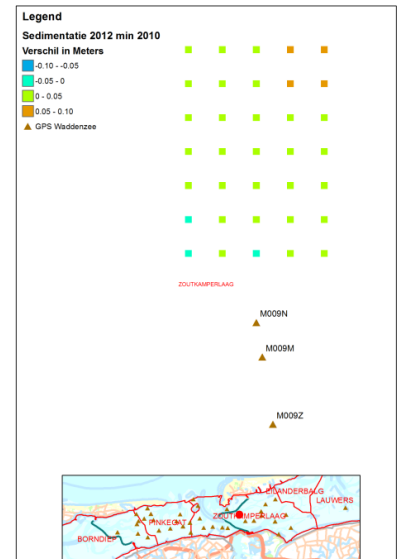


Fig.4.15 M009: Deformatie in periode 2010-2012
GPS meting 2011-2012: Stijging 1mm

Plots van overige grids zijn beschikbaar in bijlage 8.4 "Sedimentatie grids nabij GPS peilmerkclusters"

Histogrammen van alle verschillen (van grids per cluster, voor zover thans gemeten) geven aan, dat er een relatief grote spreiding is.

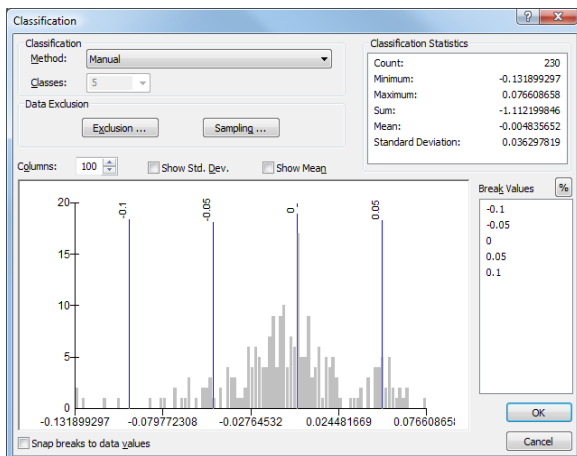


Fig. 4.16

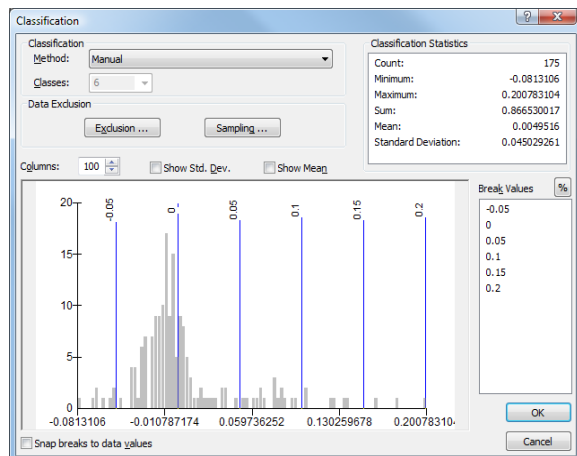


Fig. 4.17

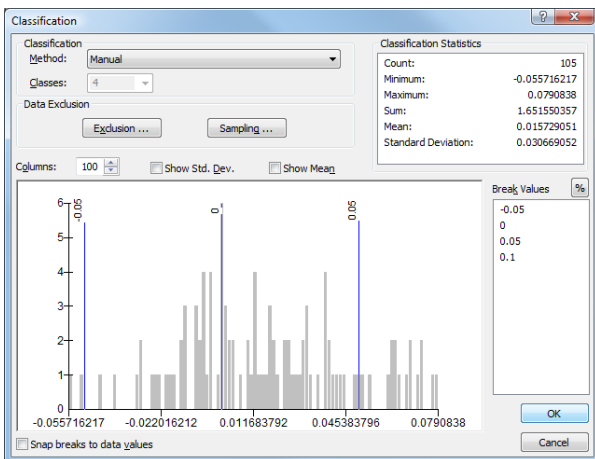


Fig. 4.18

Gezien de grote variatie in meetwaarden per grid en tussen meetjaren onderling is het niet altijd verantwoord om de hoogteverschillen van meetpunten van 1 grid te middelen en hieruit de verandering per jaar te bepalen. Wel geven deze resultaten de dynamiek van de wadplaten aan. Of uit deze meetresultaten een lange termijn trend bepaald kan worden is onzeker, maar vooralnog zullen deze metingen voortgezet worden, aangezien de nauwkeurigheid hoog is en ook kan dienen als controle op de Lidar metingen. Na 5 jaren zal de data opnieuw beoordeeld worden.

4.1.3 Terrestrische maaiveld metingen versus Lidar

Verder is gekeken naar een mogelijke relatie met de Lidar metingen op grid niveau. Gezien de relatief hoge nauwkeurigheid van de terrestrische maaiveldmetingen, zouden deze meetresultaten kunnen dienen als 'ground truth' voor de Lidar metingen.

Zie onder de visualisatie van de verschillen tussen Lidar data en 'sedimentgrids' (afgeleid van terrestrische maaiveldmetingen).

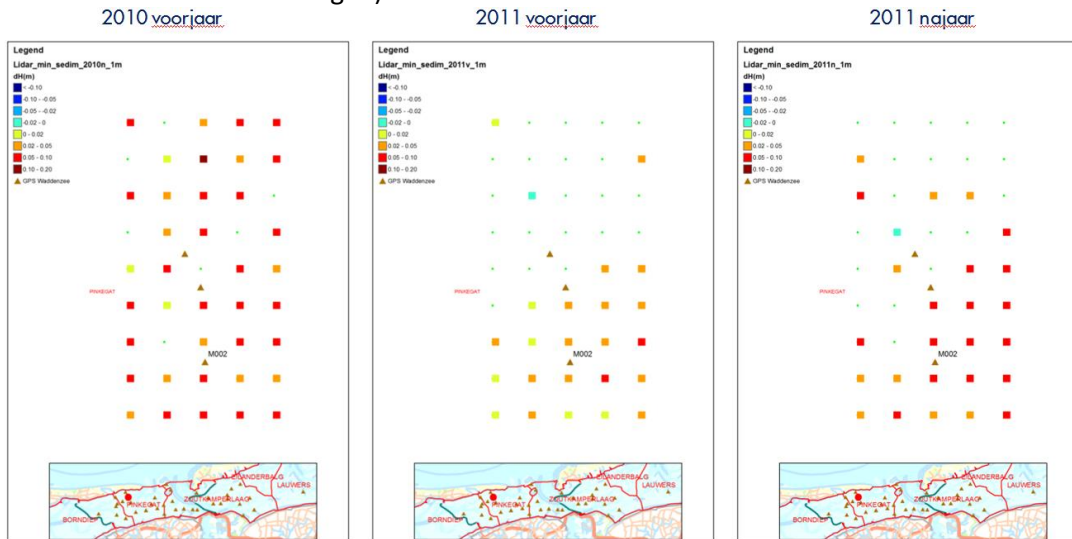


Fig.4.19 M002

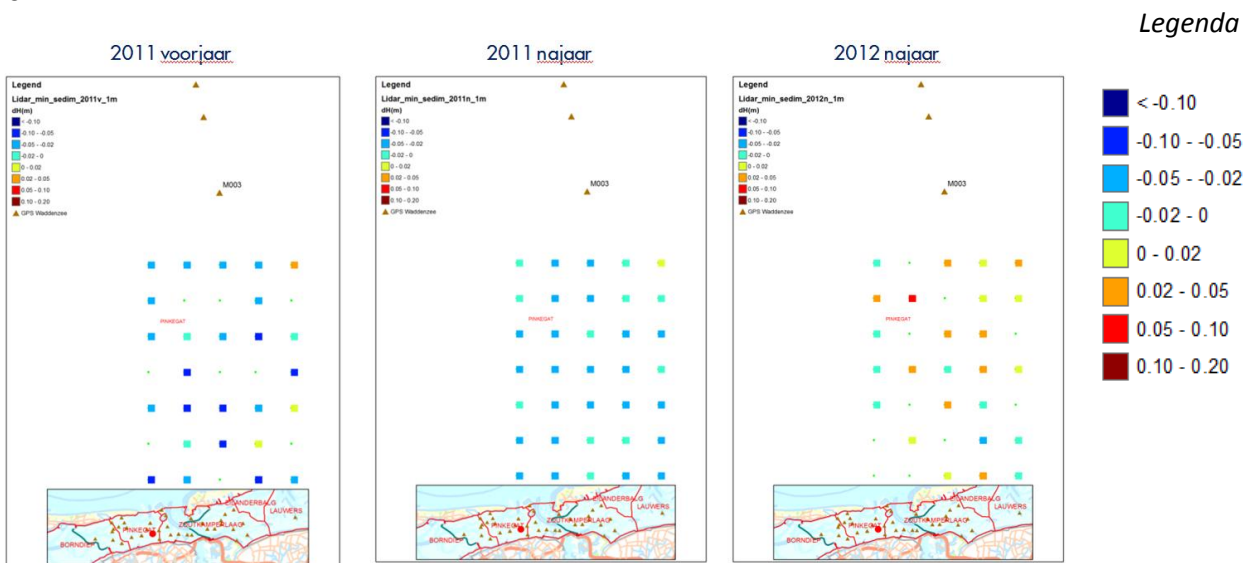


Fig.4.20 M003

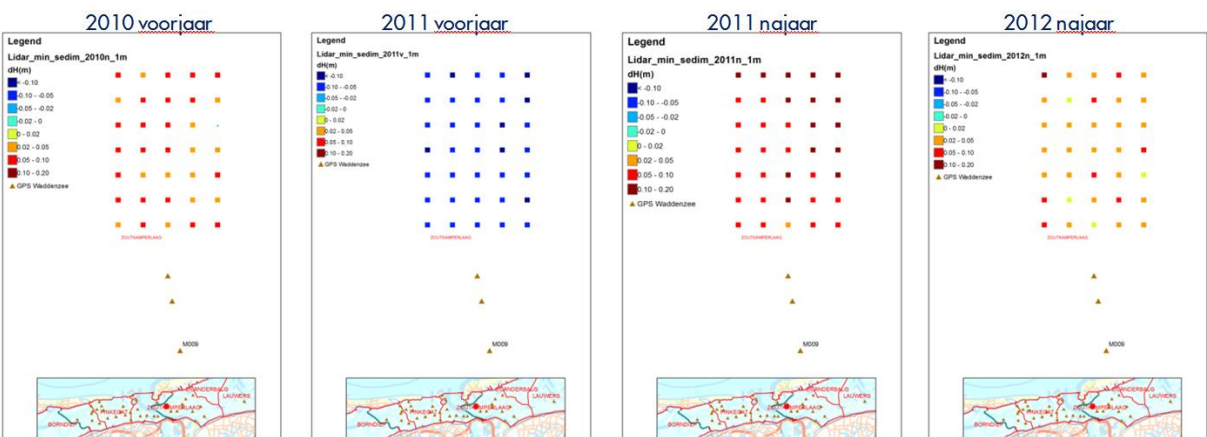


Fig.4.21 M009

Jaar	Opname Lidar	Opname terrestrische maaiveldmeting (sedimentgrids)
2010	Maart	Augustus
2011	April	Mei
2011	September	Mei
2012	Oktober	Mei

Tabel 4.1

Aan de kleuren is te zien, dat de verschillen tussen Lidar meting en terrestrische maaiveldmetingen grofweg variëren van -10 cm tot +10 cm. Aan bovenstaande tabel is te zien, dat het opnametijdstip niet gelijk is, m.u.v. 2011 waar Lidar in april en terrestrische maaiveldmeting in mei plaatsvond. Oorzaken voor de verschillen zouden kunnen zijn, de morfologische dynamiek in de Waddenzee en/of de onnauwkeurigheid in de meettechniek. Aangezien de verschillen ook voorkomen in het voorjaar van 2011, lijkt het erop, dat de (on)nauwkeurigheid van de meettechniek (Lidar) een grote rol speelt.

Plots van overige grids zijn beschikbaar in bijlage 8.5 "Vergelijk Terrestrische maaiveldmetingen en Lidar per grid"

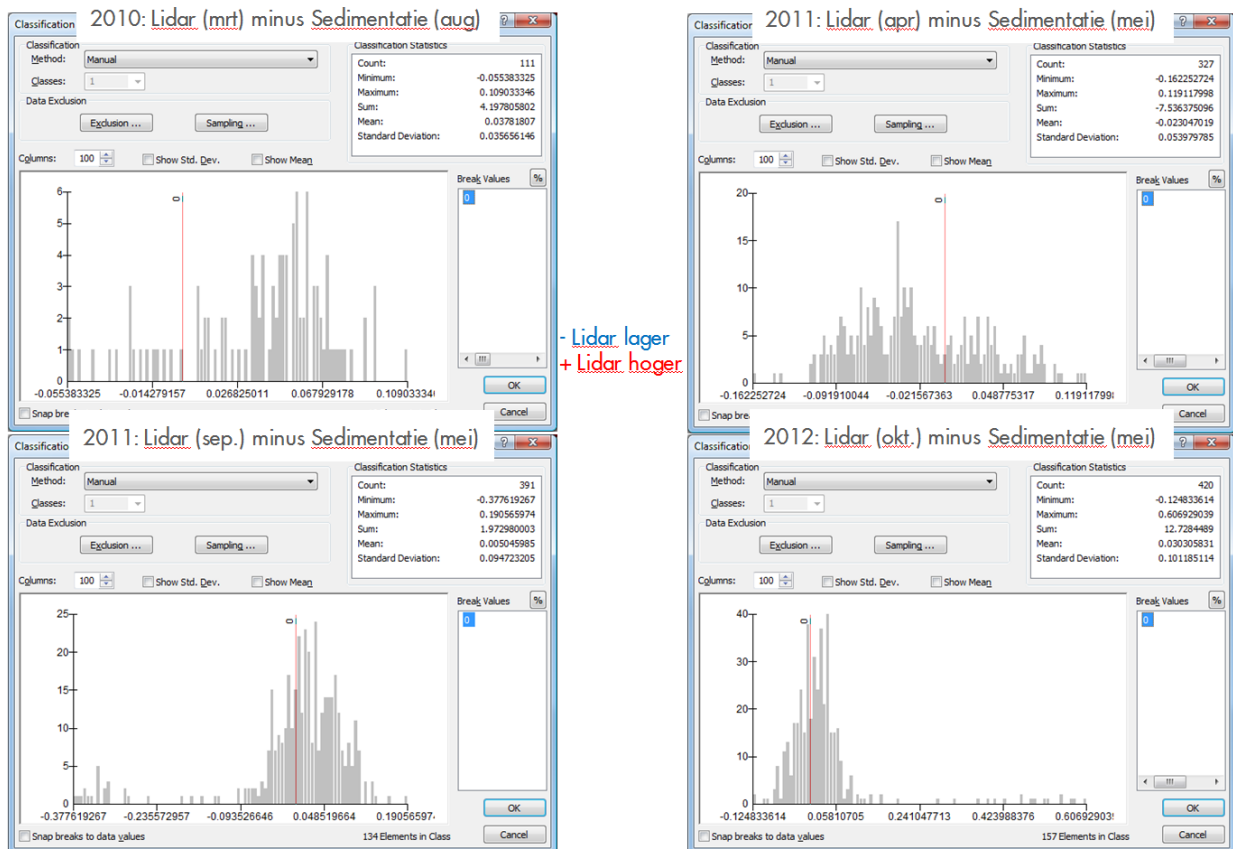


Fig.4.22 Histogrammen van alle verschillen op meetpuntniveau per jaar/opname tussen Lidar en terrestrische maaiveldmetingen (links 2010, rechts 2011).

4.1.4 Vergelijk gemiddelde waarden Terrestrische maaiveld grids en Lidar

Hoewel reeds in 4.1.2 en 4.1.3 geconstateerd is, dat er relatief grote verschillen optreden binnen het grid van de terrestrische maaiveld meting in zowel waterpasdata als Lidar data is hier de gemiddelde waarde per grid beschouwd. De hoogte verschillen binnen het grid worden hiermee vereffend, maar

geeft wel een indicatie van de gemiddelde hoogtewaarde van een klein gebied en in hoeverre er verschillen bestaan tussen beide opnametechnieken.

Allereerst wordt de correlatie van de gemiddelde hoogtewaarden (in meters t.o.v. NAP) weergegeven in een grafiek, met de x-waarde van de waterpasdata en y-waarde van Lidar. Indien deze exact gelijk zouden zijn, lagen alle waarden op de $y=x$ lijn (zie zwarte doorgetrokken lijn).

Te zien is, dat de waarden enigszins afwijken, maar dat deze afwijkingen, behoudens enkele uitschieters, relatief klein zijn.

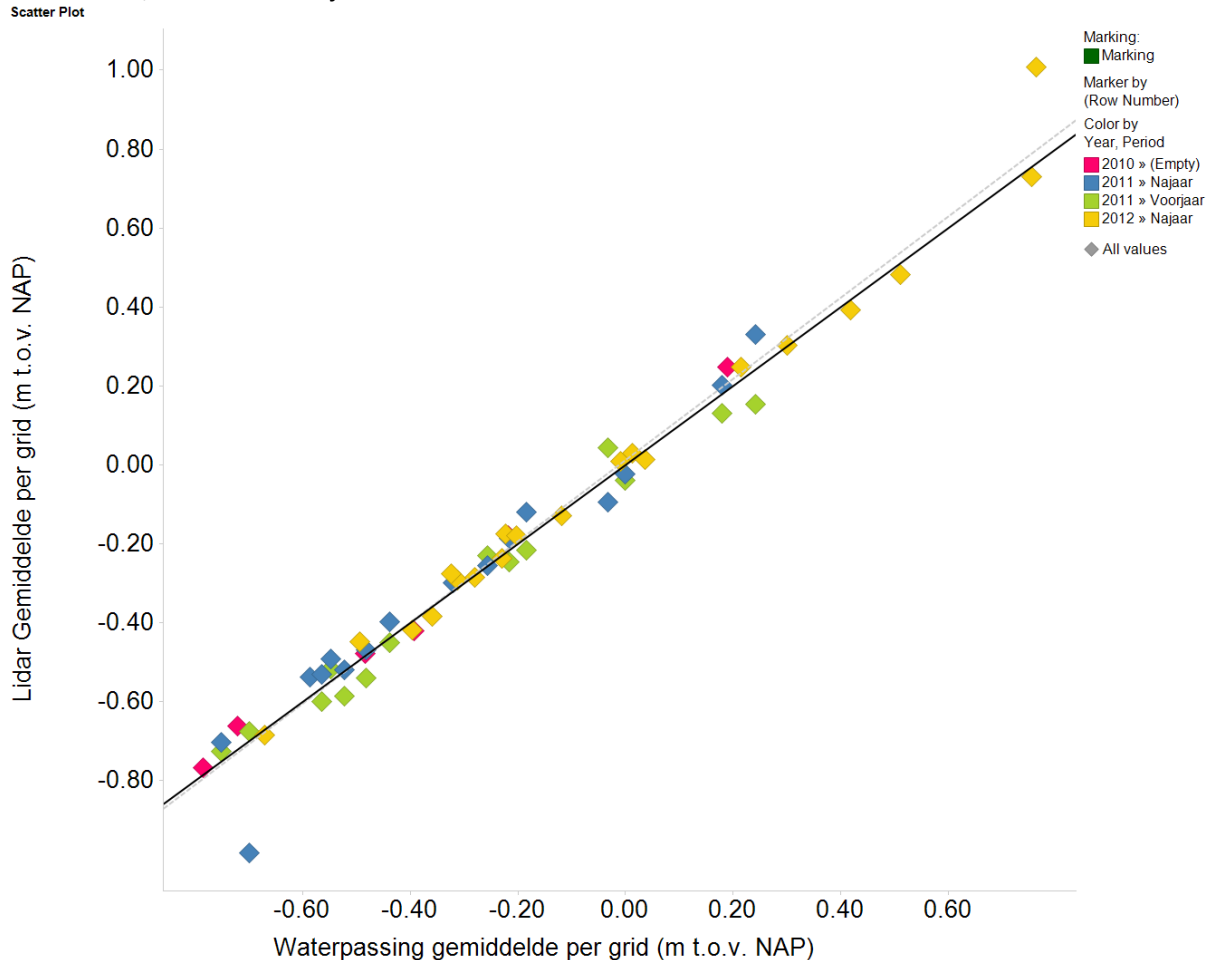


Fig.4.23 Correlatieplot tussen waterpasmeting en Lidar, met gemiddelde waarden voor een grid nabij GPS peilmerkcluster. X-waarde van waterpasmeting, y-waarde van Lidar. Rood: 2010, groen: voorjaar 2011, blauw: najaar 2011, geel: 2012

Vervolgens wordt in onderstaande grafiek de correlatie van de sedimentatie snelheden weergegeven, met de x-waarde de snelheid op basis van de gemiddelde waterpassing hoogtewaarden en een y-waarde de snelheid op basis van de gemiddelde Lidar hoogtewaarden. Aangezien er per jaar 1 waterpasmeting is uitgevoerd en in 2011 2 Lidarmetingen is voor beide 2011 metingen (voorjaar en najaar) een vergelijk met de waterpasdata getoond.

Lidar data is opgenomen resp. voorjaar 2010, voor-en najaar 2011 en najaar 2012.

Waterpassingen zijn uitgevoerd in resp. najaar 2010, voorjaar 2011 en voorjaar 2012

Deze vergelijking is uiteraard alleen mogelijk voor grids, welke in meerdere jaren gemeten zijn.

Uitleg: Indien marker onder de $y=x$ lijn ligt, betekent dat, dat de waarde voor sedimentatie snelheid groter is voor de WP metingen. Andersom, wanneer de marker boven de $y=x$ lijn ligt, is de waarde voor sedimentatiesnelheid van Lidar hoger. Negatieve waarde betekent erosie, positieve waarde is sedimentatie.

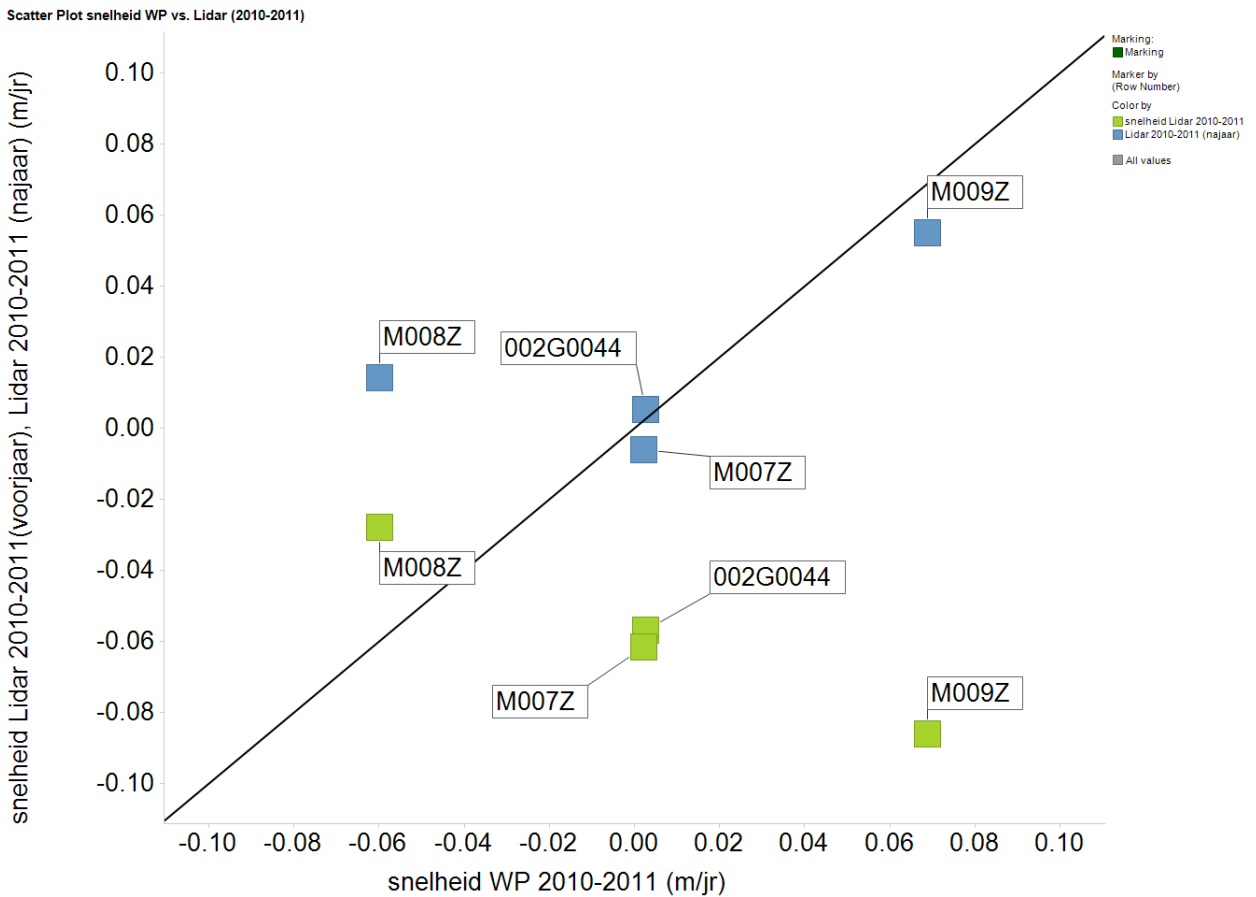


Fig.4.24 Correlatieplot sedimentatiesnelheden 2010-2011 (m/jr) op basis van gemiddelde waarden per grid.

X-waarde snelheid op basis van waterpasmeting, y-waarde op basis van Lidar.
 Groen: Lidar opname voorjaar 2011, blauw: Lidar opname najaar 2011.

Uit bovenstaande grafiek blijkt, dat er volgens waterpasdata zowel erosie (6cm/jaar) als sedimentatie (7cm/jaar) voorkomt. Volgens Lidar is erosie waargenomen (3-9cm/jaar) tussen 2010 (voorjaar) en 2011 (voorjaar). Echter tussen 2010 (voorjaar) en 2011 (najaar) wordt meer sedimentatie (0-6cm/jaar) waargenomen. Voor 1 grid geldt dat er met Lidar erosie (1cm/jaar) plaatsvindt.

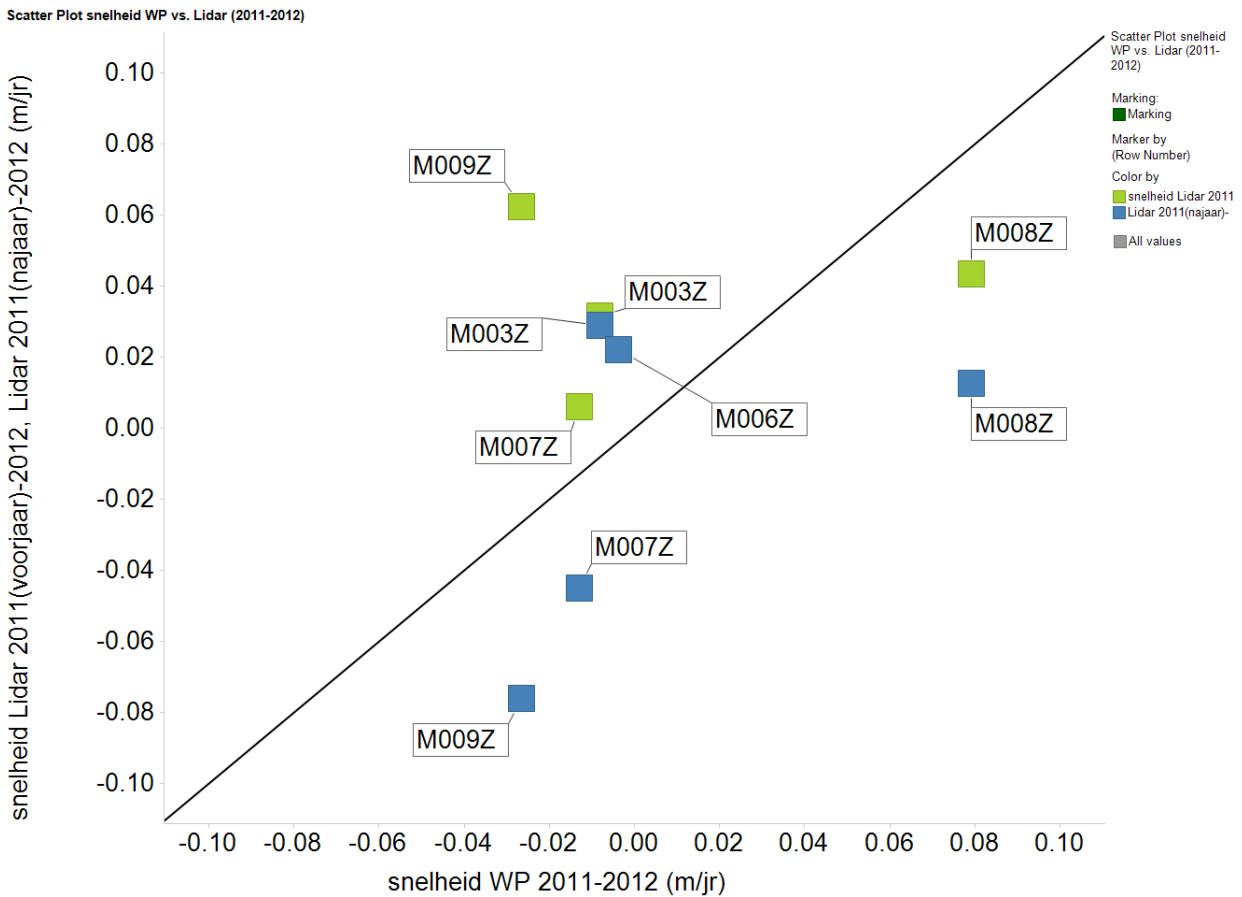


Fig.4.25 Correlatieplot sedimentatiesnelheden 2011-2012 (m/jr) op basis van gemiddelde waarden per grid.

X-waarde snelheid op basis van waterpasmeting, y-waarde op basis van Lidar.

Groen: Lidar opname voorjaar 2011-najaar 2012, blauw: Lidar opname najaar 2011-najaar 2012.

Uit bovenstaande grafiek blijkt, dat volgens waterpasdata er lichte erosie plaatsvindt voor 4 grids en sedimentatie voor 1 grid. Volgens Lidar is sedimentatie waargenomen tussen 2011 (voorjaar) en 2012 (najaar). Tussen 2011 (najaar) en 2012 (najaar) wordt zowel erosie als sedimentatie waargenomen.

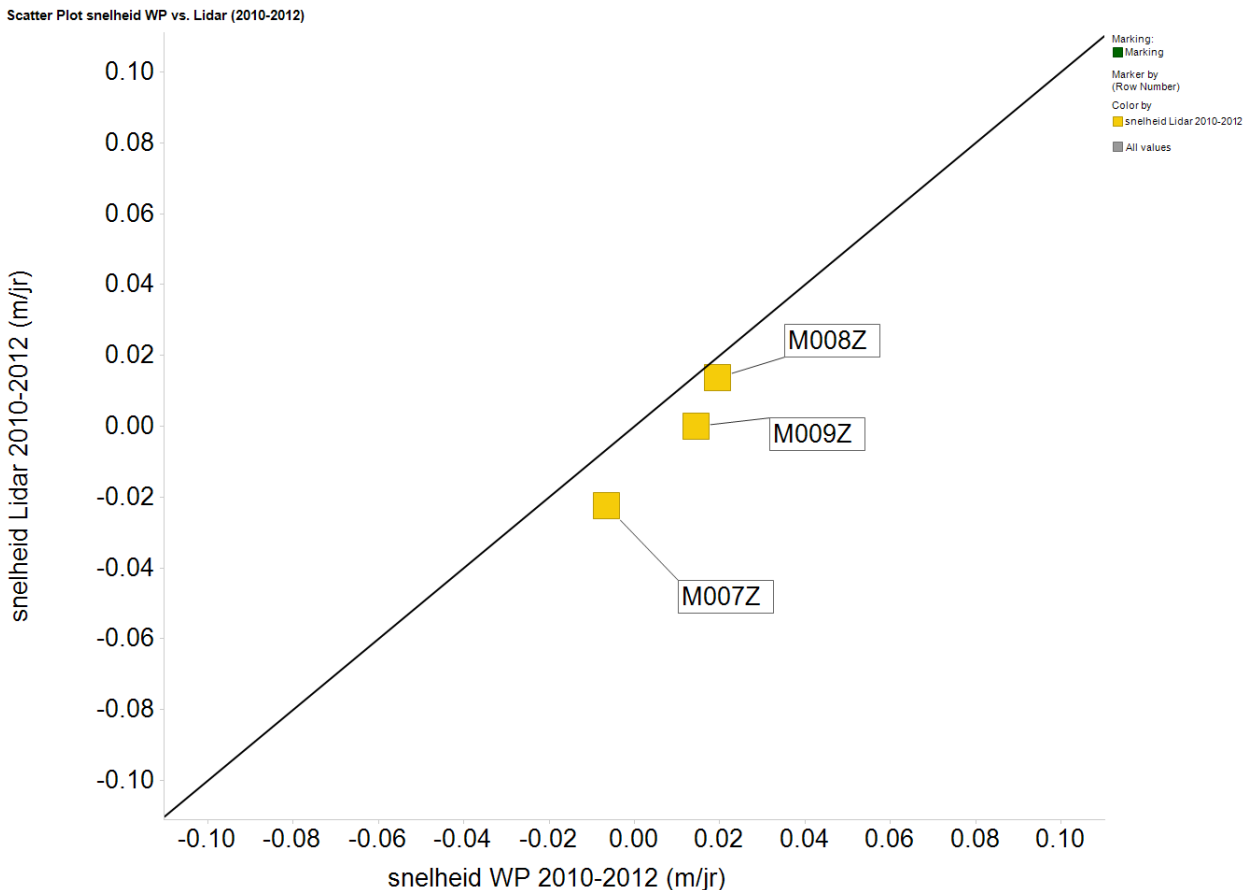


Fig.4.26 Correlatieplot sedimentatiesnelheden 2010-2012 (m/jr) op basis van gemiddelde waarden per grid.

X-waarde snelheid op basis van waterpasmeting, y-waarde op basis van Lidar.

Uit bovenstaande grafiek blijkt, dat volgens waterpasdata er zowel erosie (1cm/jaar) als sedimentatie (1-2cm/jaar) plaatsvindt. Ook volgens Lidar is zowel erosie (2cm/jaar) als sedimentatie (1cm/jaar) waargenomen. Voor 1 grid is de sedimentatie snelheid 0 cm/jaar.

4.2 Productie

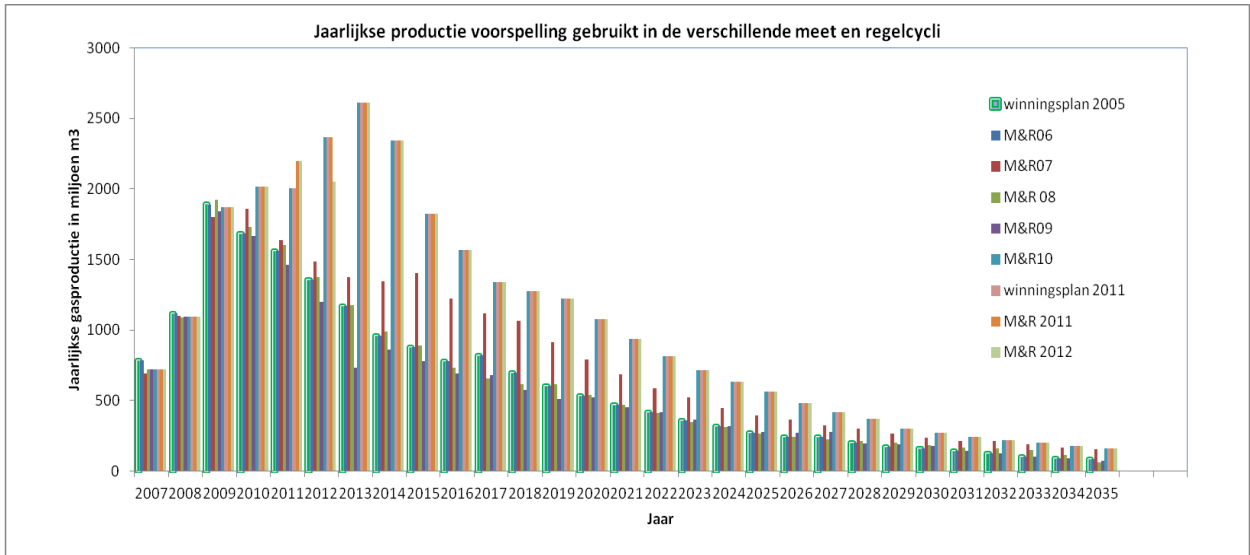
De verwachte productie voor de Waddenzee velden is beschreven in het winningsplan. De historische productie en de nog te verwachten productie wordt jaarlijks in de rapportage van de Meet- en Regelcyclus vermeld. In Figuur 4.27 is de totale Waddenzee productie getoond zoals gerapporteerd in de betreffende Meet- en Regelcyclus. Deze sectie geeft een korte beschrijving van de wijzigingen in het productie profiel.

In 2008 is om de geplande totale productie van de Waddenzee velden, zoals aangegeven in het winningsplan 2006, in 2009 te halen, een gedeelte van de productie, die gepland was voor de Lauwersoog velden, geproduceerd door de velden Nes en Moddergat.

In 2011 is het winningsplan gewijzigd. Hiervoor zijn de geologische modellen van de gasvelden Ameland, Ezumazijl, Vierhuizen, Anjum, Metslawier, Nes, Moddergat en Lauwersoog-C, -W en -O herzien en aangepast. Gedetailleerde dynamische reservoir simulatie modellen zijn opnieuw gebouwd en met de gemeten gasproductie, reservoirdrukgegevens en geodetische informatie gekalibreerd. Ook is de geomechanische modellering gewijzigd en opnieuw gekalibreerd. Kalibratie met de gemeten bodemdaling sinds de start van de productie in 1997 in Anjum is uitgevoerd voor het hele gebied,

waarbij de metingen in de Waddenzee boven de velden Nes, Moddergat en Lauwersoog-C, -O en -W ook zijn meegenomen. Uit deze modellering bleek dat een hogere productie binnen de gebruiksruimte uitvoerbaar was. Deze verhoogde productie is vanaf de Meet- en Regelcyclus 2010 toegepast en als gevolg hiervan is er tot en met 2012 meer geproduceerd dan volgens het winningsplan 2006.

De Meet- en Regelcyclus van 2007 laat een hogere productieprofiel zien dan het winningsplan 2006 omdat de productiescenario's waren aangepast naar aanleiding van de hogere gasreserves. Aangetoond werd echter dat de resulterende belasting niet zou leiden tot overschrijding van de gebruiksruimte.

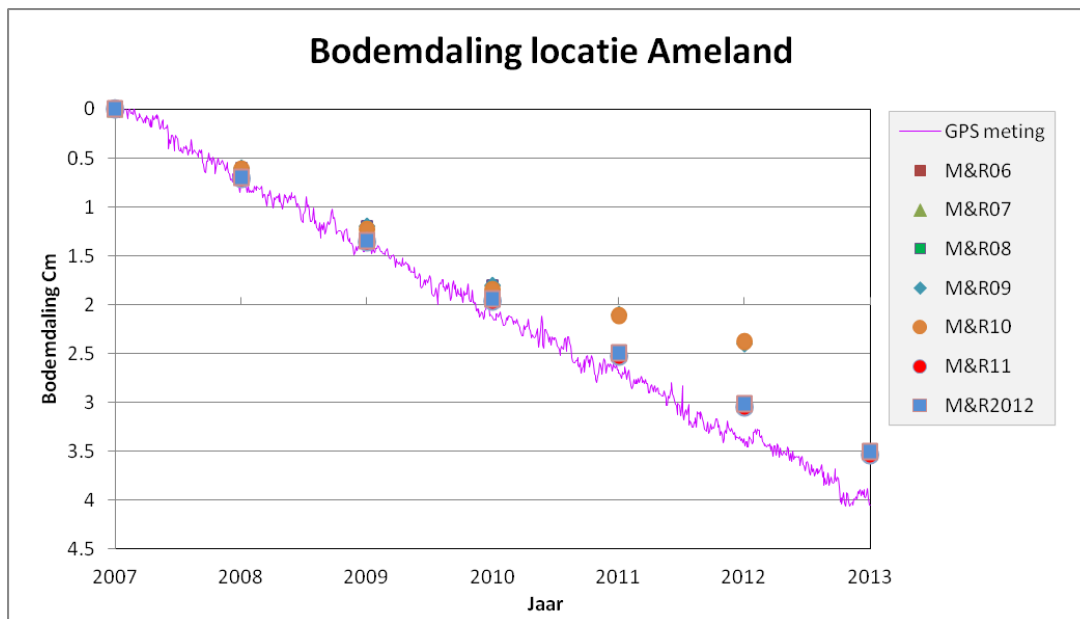


Figuur 4.27, Jaarlijkse productie voorspelling zoals vermeld in het winningsplan en meet- en regelcycli

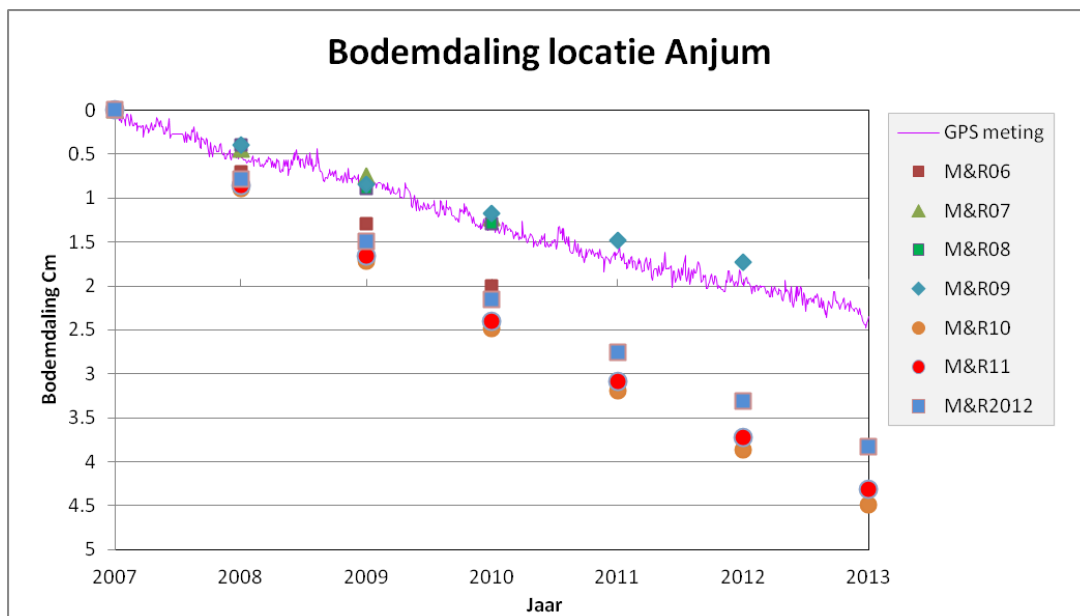
4.3 GPS meting versus gemodelleerde bodemdaling door de jaren heen.

Als onderdeel van het Meet- en regel protocol worden continue GPS metingen uitgevoerd op de locaties AME en Moddergat. Daarnaast heeft NAM ook een continue GPS meetinstallatie geïnstalleerd op de locatie Anjum. Deze metingen hebben een signaalfunctie voor het bepalen van de noodzaak voor aanvullende vlakdekkende metingen.

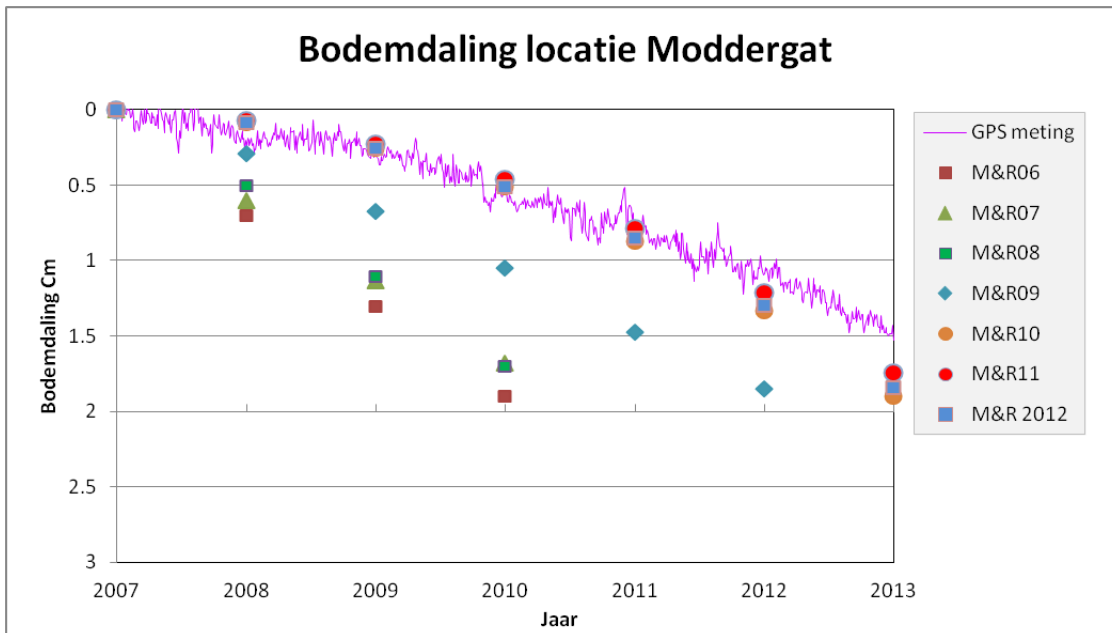
Deze metingen worden vergeleken met de gemodelleerde bodemdaling. Hierbij moet worden vermeld dat de passing van het model wordt geoptimaliseerd mbv alle beschikbare meetpunten. Hierdoor zullen de individuele meetpunten (inclusief de GPS meetpunten) niet altijd passend zijn met het model. In Figuur 4.28, Figuur 4.29 en Figuur 4.30 zijn deze GPS metingen met de modellering uit de verschillende Meet en Regelcycli getoond. Te zien is dat na het vernieuwen van het Winningsplan voor Ameland de bodemdalingsmodellering op de GPS locatie sterk is verbeterd. Voor Anjum geldt dat de modellering meer gaat overschatten. Voor de Moddergat locatie, het dichtst bij de Waddenzee gelegen, geldt dat de opeenvolgende herzieningen van het model steeds een betere passing geven.



Figuur 4.28, Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469) voor de diverse Meet- en Regelcycli.



Figuur 4.29, Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931.145, Y-RD: 598546.039) voor de diverse Meet- en Regelcycli.



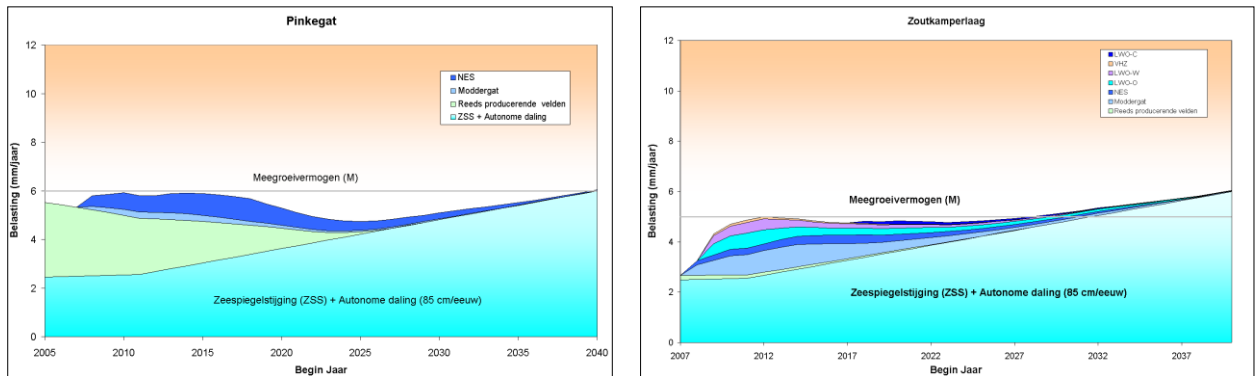
Figuur 4.30, Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794) voor de diverse Meet- en Regelcycli.

4.4 Belasting

Elk jaar wordt de Meet- en Regelcyclus doorlopen. Aan de hand van nieuwe metingen en modelinzichten is als gevolg hiervan het belastingplaatje aangepast. De veranderingen hiervan worden in de volgende secties kort samengevat.

4.4.1 Winningsplan 2006

De belasting zoals getoond in het winningsplan Waddenzee 2006 en in de M&R 2006 is getoond in Figuur 4.31.



Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Pinkegat

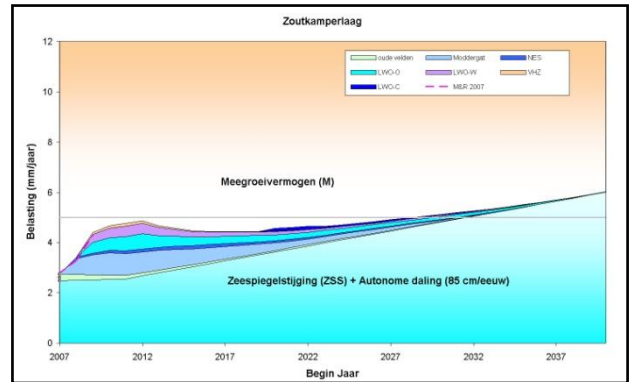
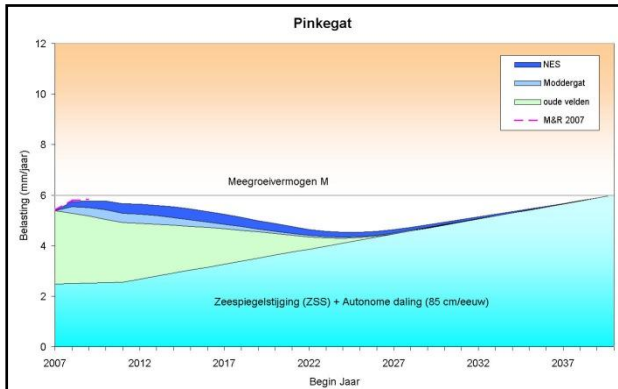
Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag.

Figuur 4.31, Belasting inclusief Zeespiegelstijging volgens het M&R 2006

4.4.2 Rapportage Meet- en Regelcyclus 2008

Voor de velden Nes en Moddergat zijn in 2008, na twee jaar productie, meer gedetailleerde dynamische reservoir simulatie modellen (MoReS) gemaakt, die zijn gekalibreerd met de gemeten gasproductie- en reservoirdrukgegevens. Deze modellen resulteren tevens in een betere modellering van de drukdaling in de watervoerende lagen. Deze verbetering is beperkt gezien de korte productietijd van de velden. De korte productie historie heeft er tevens toe geleid dat de reservoir simulatiemodellen voor de velden Lauwersoog-Oost en -West niet zijn vernieuwd.

De initiële productie en drukdata van de velden Lauwersoog –Oost en –West geven aan dat de aangesloten gasreserves en productie capaciteit van de putten minder is dan oorspronkelijk aangenomen. Om de geplande totale productie van de Waddenzee velden, zoals aangegeven in het winningsplan uit 2006, in 2009 te halen, is een gedeelte van de productie, die gepland was voor de Lauwersoog velden, geproduceerd door de velden Nes en Moddergat. De belasting volgens dit vernieuwde model is getoond in Figuur 4.32



Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Pinkegat. Voor de modellering van de bodemdaling tengevolge van de gaswinning van Ameland is het geomechanische model (WP2003) toegepast

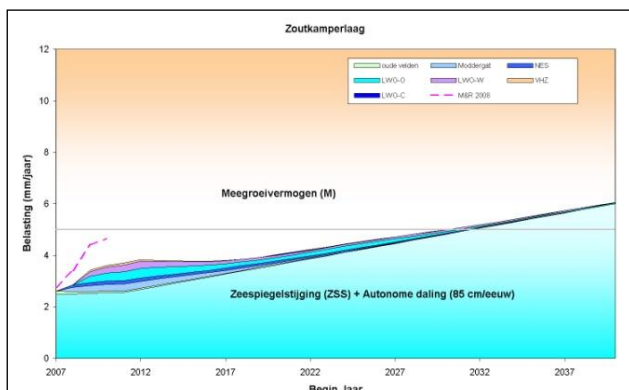
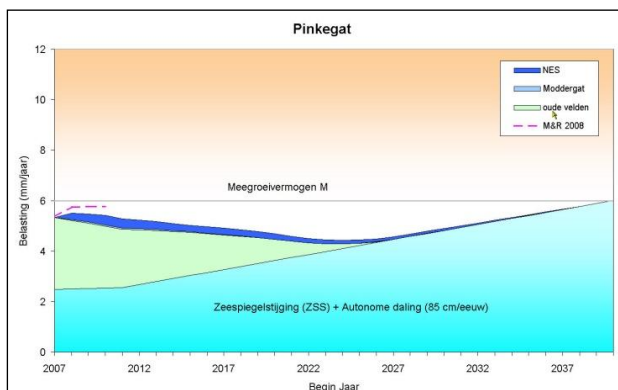
Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag.

Figuur 4.32, Belasting inclusief Zeespiegelstijging volgens het M&R 2008

4.4.3 Rapportage Meet- en Regelcyclus 2009

In 2009 is de seismiek opnieuw geïnterpreteerd. Als gevolg hiervan zijn de geologische modellen van de gasvelden Anjum, Metslawier, Nes, Moddergat en Lauwersoog-C, -W en -O herzien en aangepast. Aan de hand hiervan zijn opnieuw gedetailleerde dynamische reservoir simulatie modellen gebouwd en met de gemeten gasproductie en reservoirdruk gegevens gekalibreerd. Deze modellen gaven een significante verbetering ten opzichte van voorgaande modellen aangezien nu ook de drukdaling in de watervoerende lagen beter kan worden gesimuleerd. Vervolgens is ook het geomechanische bodemdalingsmodel voor deze velden aangepast.

Het blijkt dat, op basis van de geringe gemeten waterproductie in Ameland en Anjum en geodetische informatie, de verbeterde reservoirsimulatie modellen aangeven dat de watervoerende lagen minder in druk dalen dan in eerdere modellen voorspeld. Als gevolg hiervan neemt de Belasting in de kombergingsgebieden af zoals getoond in Figuur 4.33.



Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Pinkegat. Voor de modellering van de bodemdaling tengevolge van de gaswinning van Ameland is het geomechanische model (WP2003) toegepast. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage 2008.

Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage 2008.

Figuur 4.33, Belasting inclusief Zeespiegelstijging volgens het M&R 2009

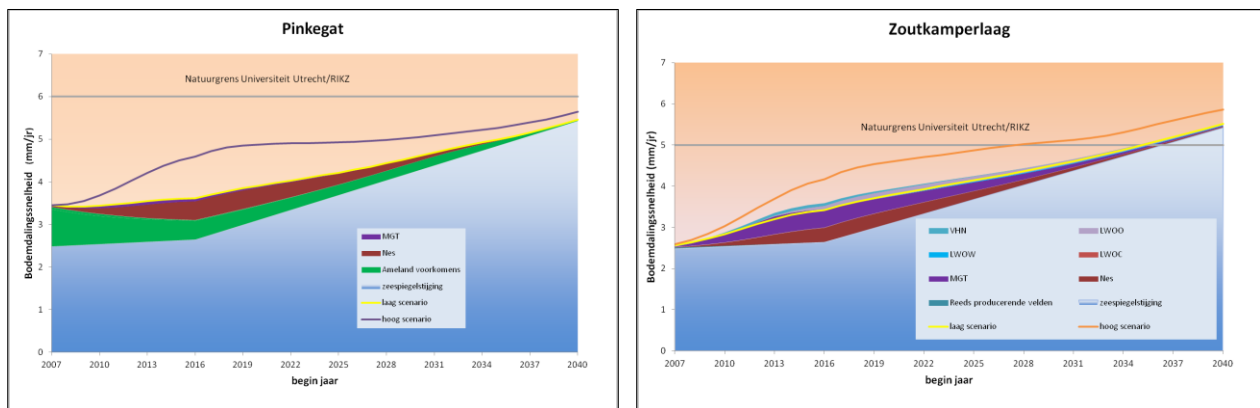
4.4.4 Rapportage Meet- en Regelcyclus 2010

In 2010 is gewerkt aan nieuwe winningsplannen voor Anjum, Ameland en de Waddenzeevelden. Aanleiding was de grotere hoeveelheid gas in de velden en de daarmee samenhangende verhoging van de gasproductie. De geologische modellen van de gasvelden Ameland, Ezumazijl, Vierhuizen, Anjum, Metslawier, Nes, Moddergat en Lauwersoog-C, -W en -O werden herzien en aangepast. Nieuwe gedetailleerde dynamische reservoir simulatie modellen zijn gebouwd en met de gemeten gasproductie, reservoirdrukgegevens en geodetische informatie gekalibreerd. Om het waargenomen tijdsafhankelijke gedrag van de bodemdaling beter te beschrijven, is ook de geomechanische modellering gewijzigd en opnieuw gekalibreerd. De wijzigingen in het geomechanische model betreffen het toepassen van het diffusiemodel (zie bijlage 8.1.2 diffusiemodel) en het meenemen van de invloed van de zoutlagen op de bodemdaling (zie bijlage 8.1.3 zoutkruip). Voor het meenemen van zoutkruip in de bodemdalingmodellering wordt gebruik gemaakt van Geomec (Referentie 3), waar voorheen werd volstaan met een analytisch model (SUBCAL).

Voor modellering van de bodemdaling veroorzaakt door de gasproductie van de Ameland voorkomens wordt het geomechanische bodemdalingsmodel volgens het gewijzigde winningsplan 2011 gebruikt. Dit geomechanisch model laat een goede passing zien tussen meting en model, zowel op het Ameland eiland als in de Waddenzee.

Voor het winningsplan van Ameland is ook gebruik gemaakt van waterpasmetingen die in de Waddenzee zijn gedaan. Hierdoor is meer inzicht verkregen in de depletie van de watervoerende lagen. Het blijkt dat de depletie van deze watervoerende lagen veel geringer is dan eerst (winningsplan 2003) is aangenomen waardoor de belasting in Pinkegat sterk afgenomen is.

De belasting van dit vernieuwde model is getoond in Figuur 4.34



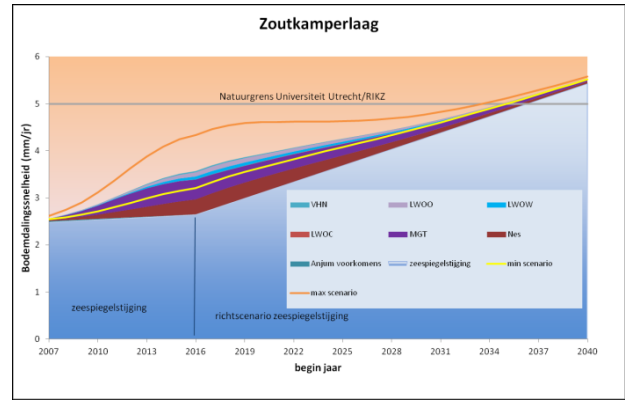
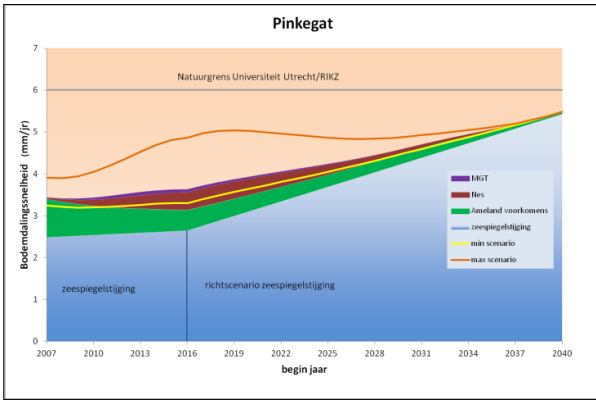
Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Pinkegat. Hoog en laag scenario's zijn als lijnen weergegeven.

Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Hoog en laag scenario's zijn als lijnen weergegeven.

Figuur 4.34, Belasting inclusief Zeespiegelstijging volgens het M&R 2010

4.4.5 Meet- en Regelcyclus 2011

Bij de Meet- en Regelcyclus 2011 zijn er slechts geringe aanpassingen gemaakt t.o.v. 2010. Hetzelfde model werd gebruikt met enkele aanpassingen in de minimum en maximum scenario's.



Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Pinkegat. Minimum en maximum scenario's zijn als lijnen weergegeven.

Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Minimum en maximum scenario's zijn als lijnen weergegeven.

Figuur 4.35, Belasting inclusief Zeespiegelstijging volgens het M&R 2011

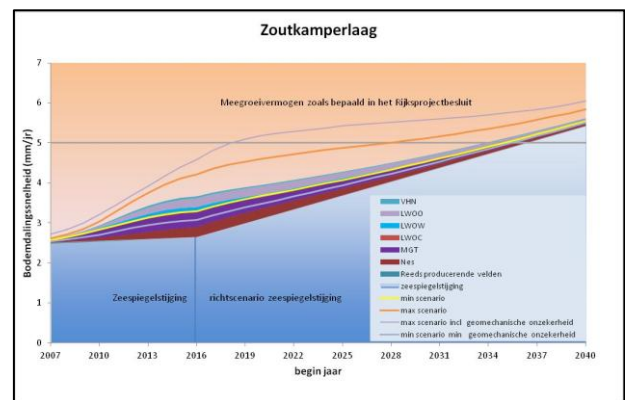
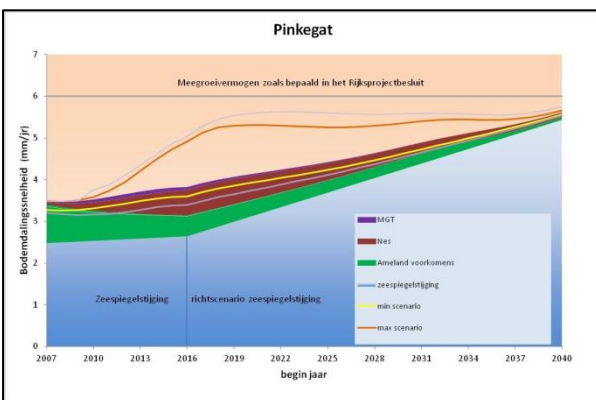
4.4.6 Meet- en Regelcyclus 2012

De meest recente Meet- en Regelcyclus bevat enkele geringe aanpassingen ten opzichte van de 2010 en 2011. Hetzelfde model als in de Meet- en Regelcyclus 2010 gebruikt, met opnieuw enkele aanpassingen voor het hoge en lage scenario, waarbij een onzekerheidsberekening voor de Geomechanische modellering voor deze scenario's is opgenomen.

De put die in Nes is geboord in 2012, laat zien dat de watervoerende laag deels depleteert, maar achterblijft in druk ten opzichte van de gasvoerende laag. Deze observatie wordt ondersteund door waterproductie die is gemeten in de put MGT-2. De vrije waterproductie in deze put is gestopt doordat de onderste watervoerende laag met cement is afgedicht tot aan de daarboven liggende slecht doorlaatbare kleilaag.

De onzekerheid in de bodemdalingsmodellering voor Nes is voornamelijk gerelateerd aan de toekomstige depletie van de watervoerende laag. In het hoge scenario depletieren de watervoerende lagen meer dan in het lage scenario.

Voor een betere passing met de bodemdalingsmetingen zijn de geomechanische parameters ten opzichte van de vorige Meet- en Regelcyclus in geringe mate aangepast. Voor een beschrijving van deze geomechanische parameters wordt verwezen naar referentie 11.



Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Pinkegat. Minimum en maximum scenario's zijn als lijnen weergegeven.

Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Minimum en maximum scenario's zijn als lijnen weergegeven.

Figuur 4.36, Belasting inclusief Zeespiegelstijging volgens het M&R 2012

5 Conclusies

5.1 Geodetische meetresultaten

- ⇒ Relatie tussen diepe bodemdaling en plaathoogte veranderingen is met de huidige metingen niet te bepalen. Enerzijds heeft dit te maken met de (on)nauwkeurigheden van de meetdata, anderzijds met de morfologische dynamiek in dit gebied. Mogelijke trends zijn pas te bepalen, indien de absolute bodemdaling groter is, ofwel na langere tijd van aardgaswinning.
- ⇒ Vergelijking tussen waterpasmetingen nabij GPS peilmerkcluster en Lidar metingen toont aan, dat er weliswaar verschil in hoogtemeting en sedimentatiesnelheid wordt waargenomen, maar dat deze verschillen relatief klein zijn t.o.v. de meetruis.
Beide meetmethoden tonen aan, dat er zowel sedimentatie als erosie plaatsvindt, maar dat er in deze relatief korte meetperiode geen trend waarneembaar is.

5.2 Modellerings

- ⇒ Uit de aan de metingen gekalibreerde modellen blijkt dat de Gebruiksruimte niet wordt overschreden.
- ⇒ Er is een goede fit met de GPS locaties Ameland en Moddergat, de modellering laat een overschatting met de werkelijke daling in Anjum zien, maar over het algemeen is een goede passing met de vlakdekkende metingen te zien.
- ⇒ Uit de reservoir modellering, van de afgelopen 2 à 3 jaar, blijkt dat de watervoerende lagen minder depletieren dan eerder was aangenomen. Het gevolg hiervan is dat de gemodelleerde bodemdalingssnelheid afnam.
- ⇒ Na een aantal jaren van productie blijkt dat vooral hoeveelheid gas in Nes groter is dan alvorens werd verwacht. Ook blijkt Nes beter te produceren dan verwacht.
- ⇒ De Lauwersoog velden zijn kleiner en hebben een mindere reservoir kwaliteit dan in eerste instantie werd verwacht.
- ⇒ Grootste onzekerheid in de modellering blijft het gedrag van de watervoerende laag. In de eerste Meet- en Regelcyclus, toen er nog weinig informatie beschikbaar was, was deze “conservatief” gemodelleerd, d.w.z. dat een grote bijdrage aan de bodemdaling van deze laag werd verwacht. Later bleek uit de reservoirproductie, reservoirdrukken en bodemdalingmetingen dat deze bijdrage inderdaad zeer conservatief was. Het model is hierop aangepast. Hierdoor blijkt dat de bodemdalingssnelheid lager is dan oorspronkelijk aangenomen.
- ⇒ De gasreserves van de Waddenzeevelden blijken groter dan in eerste instantie werd verwacht.
- ⇒ De gemodelleerde bodemdaling voor Ameland in de Waddenzee liet in het begin een sterke overschatting van de bodemdaling zien. Studies naar de depletie van de watervoerende lagen lieten zien dat deze minder depletieren waardoor de gemodelleerde bodemdaling een betere passing laat zien met de gemeten daling.

6 Verbeteringen en Aanbevelingen

6.1 Verbeteringen

Tijdens het proces van meten en analyseren zijn er in de periode van 2007-2012 diverse verbeteringen toegepast.

- a. Luchtfoto's en analyse van deze beelden door een 3^e partij is vervangen door Lidar opnames van de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag door een 3^e partij en analyse daarvan door een andere onafhankelijke partij.
- b. Lokale spijkermetingen in de Waddenzee zijn vervangen door Terrestrische maaiveld metingen (waterpassingen) op de wadplaten, nabij de GPS clusters.
- c. In 2011 is een InSAR analyse uitgevoerd in het Lauwersmeergebied. Daarmee is aangetoond, dat waterpassing, GPS en InSAR vergelijkbare resultaten opleveren, terwijl deze geheel onafhankelijk van elkaar zijn.
- d. Reservoir- en Geomechanische modellen zijn verbeterd met het beschikbaar komen van bodemdalingsmetingen en productiegegevens.

6.2 Aanbevelingen

- a. Continuering van permanente GPS stations Ameland, Anjum en Moddergat.
- b. Continuering van GPS metingen in de Waddenzee en Lauwersmeer
- c. Continuering van terrestrische maaiveldmetingen nabij GPS peilmerkclusters
- d. Vervangen van waterpasmetingen rondom Lauwersmeergebied door InSAR analyse.
- e. Onderzoek mogelijkheden naar InSAR analyse op de Waddeneilanden Ameland en Schiermonnikoog (en aansluiting op vasteland).
- f. Gebruik terrestrische maaiveldmetingen nabij GPS peilmerkclusters ter signalering van erosie/sedimentatie en gebruik loding/Lidar opnames van Rijkswaterstaat voor vlakdekkende analyse, eventueel aangevuld met een aantal Lidar opnames van de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Daarbij zou het zinvol zijn om voor een groter gebied (wadplaat) een grid te bepalen en in dezelfde periode als de Lidar opname een 'ground truth' meting te doen, b.v. middels RTK-GPS.
- g. Onderzoek de mogelijkheden voor land/water scheiding en bepaling van areaal droogvallend Wad middels radar satelliet opnames (hiervoor is reeds contact geweest met Wageningen Universiteit en wordt er een haalbaarheidsstudie uitgevoerd).
- h. Onderzoek uitvoeren t.a.v. gebruik van zogenaamde groene (bathy) Lidar.
- i. Onderzoek naar de onderliggende fysische processen met diffusief gedrag en de verschillende modellen die het tijdsafhankelijke gedrag van de bodemdaling kunnen beschrijven en voorspellen.

7 Referenties

- Referentie 1 Advies actualisering beleidsscenario zeespiegelstijging voor bepaling gebruiksruimte voor gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, brief aan Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, dd 7 januari 2011
- Referentie 2. Geertsma J. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs. SPE papernr 3730 (1972).
- Referentie 3 de Witte F.C. & Kikstra W.P. DIANA finite element analysis. User's manual release 9. Gepubliceerd door TNO DIANA BV, Postbus 49, 2600 AA Delft, www.tnodiana.com
- Referentie 4. Opstal van G. The effect of subsidence due to reservoir compaction, paper submitted for presentation at 3rd international congress on Rock Mechanics, Denver Colorado
- Referentie 5 Bodemdaling door Aardgaswinning, Groningen veld en randvelden in Groningen, Noord Drenthe en het Oosten van Friesland, Statusrapport 2000 en Prognose tot het jaar 2050, maart 2000. NAM rapport 2000 02 000410
- Referentie 6 NAM rapport Geostatistische Analyse Spijkermetingen (EP200904215756), Stefan Kampshoff, 2009
- Referentie 7 Uitwerking Lodinggegevens RWS 2003-2008 (4e cyclus, incl. Lidardata). Nulsituatie voor de Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen winningen (publicatiedatum: mei 2010). Zie www.nam.nl.
- Referentie 8 Bodemdaling Groningen, satelliet radar interferometrie rapportage behorende bij het meetplan Groningen 2010, NAM EP201203202214" (zie www.nlog.nl, of deze directe link)
- Referentie 9 Deltares - Analyse Lidar data voor het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning publicatiedatum: mei 2010 (zie www.nam.nl)
- Referentie 10 Areeal Waddengebied op basis van luchtfotografie: nulsituatie 1-2008 Arcadis, september 2008 (zie www.nam.nl)
- Referentie 11 NAM (2012) Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen:Technische bijlage (bijlage 3) behorend bij het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol d.d. 1 april 2012. EP201201210893
- Referentie 12 Breunese, J.N., van Eijs, R.M.H.E., de Meer, S., Kroon, I.C Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution mining. The Barradeel Case, 2003

8 Bijlagen

8.1 Compactie Modellen

In 2010 is voor de modellering van de Waddenzeevelden, Anjum, Ameland overgestapt van een bi-linear compactie model naar een diffusiemodel. Deze bijlage geeft een korte beschrijving van beide modellen. Beide modellen geven een verklaring voor de observatie dat de bodemdaling in de beginfase enige vertraging heeft t.o.v. de drukkaling in het veld. Bij de metingen op Ameland is geobserveerd dat de bodemdaling in de eindfase, wanneer er bijna geen drukkaling meer is, nog enige tijd doorgaat. Dit laatste effect kan niet verklaard worden met een bi-linear compactie model en was aanleiding voor de ontwikkeling van een diffusiemodel.

Tevens is bij de introductie van het diffusiemodel ook het effect van deformatiegedrag van zoutlagen op de bodemdaling meegenomen. Dit wordt ook in deze bijlage beschreven.

8.1.1 Bi-linear compactiemodel

Voor de velden in Noord-Nederland is tot 2011 een bi-lineair compactie model toegepast. Hierbij verloopt de compactie vanaf het begin van de drukkaling in het reservoir lineair met de drukkaling in het reservoir (constante compactiecoëfficiënt C_{mpre}). Wanneer de reservoirdruk onder een bepaalde waarde daalt, het transitiepunt (P_{tran}), neemt de compactiesnelheid toe, waarna de compactie vervolgens weer lineair met de drukkaling in het reservoir verloopt (constante compactiecoëfficiënt C_{mpost}). Zowel voor als na het transitie punt wordt het lineaire compactiegedrag beschreven door:

$$\Delta H = C_m * H_0 * \Delta P$$

ΔH : Compactie (m)

C_m : Compactie Coëfficiënt (1/bar); functie van de porositeit van de reservoir formatie.

H_0 : Initiële Reservoir Dikte (m)

ΔP : Drukkaling (bar)

Voor het beschrijven van het compactie gedrag van het reservoir moeten de volgende waarden worden bepaald:

C_{mpre} : Initiële Compactie Coëfficiënt (1/bar) voor $\Delta P \leq (P_{ini} - P_{tran})$

C_{mpost} : Uiteindelijke Compactie Coëfficiënt (1/bar) voor $\Delta P > (P_{ini} - P_{tran})$

P_{tran} : Transitie punt (bar)

P_{ini} : Initiële reservoir druk (bar).

8.1.2 Diffusie model

De resultaten van bodemdalingmetingen op Ameland en in de Waddenzee laten zien dat de bodemdaling in de beginfase van de productie een zekere vertraging heeft ten opzichte van de drukkaling in het veld. Aan het einde van de productie lijkt het omgekeerde te gebeuren: de bodemdaling stopt niet direct bij beëindiging van de productie. Een mogelijke verklaring van deze observatie is dat er een diffusieproces optreedt in het reservoir.

De compactie bij gasproductie uit een reservoir wordt gestuurd door drie parameters: de dikte van het reservoir, de drukkaling in het reservoir en de compactiecoëfficiënt, welke een maat is voor de stijfheid van het reservoir. In een eerste benadering, wanneer geen rekening wordt gehouden met het bovengenoemde diffusiegedrag, wordt voor compactie modellering de drukkaling gebruikt, zoals berekend met het dynamische reservoirmodel. Dit model gaat echter uit van een gemiddelde permeabiliteit en zowel de hoge als de lage waarden van de permeabiliteit worden daardoor niet goed gerepresenteerd. In werkelijkheid zal het gas langzamer toestromen uit die delen van het reservoir waar de permeabiliteit lager is. In deze delen zal, i.v.m. de hogere poriedruk, de waarde voor de stijfheid van het gesteente hoger zijn dan in de delen waar het gas wel is weggestroomd. Daardoor gedraagt het reservoir zich in de beginfase van de productie stijver. In de eindfase van de productie zal de drukkaling

juist doorgaan in de delen met lage permeabiliteit. Dit veroorzaakt een doorgaande, maar afnemende, compactie terwijl het dynamische reservoirmodel geen (gemiddelde) drukdaling meer laat zien. In eerdere compactiemodelleringen werd een bi-lineair compactiemodel gebruikt. Dit model geeft een goede passing met de bodemdaling in de beginfase van de productie maar geeft geen goede passing met de langer doorgaande bodemdaling aan het einde van de productie, zoals nu waargenomen boven Ameland-Oost. Door toepassing van het diffusie mechanisme past zowel de beginfase als de eindfase. De diffusie komt uiteindelijk tot uitdrukking in de volumerek van het reservoirgesteente die, vervolgens, de bodemdaling veroorzaakt.

De volumerek, e_{ii} , op een punt, \mathbf{x} , en tijdstip, t , in het reservoir kan dan worden beschreven door het product van de drukverandering, Δp , en de uniaxiale compactiecoëfficiënt, c_m , geconvolveerd in tijd, $*_t$, met een "time decay" functie: $\frac{1}{\tau} \exp\left[\frac{-t}{\tau}\right]$ met t in jaren en τ de "time decay" constante.

$$e_{ii}(\mathbf{x}, t) = \Delta p(\mathbf{x}, t) c_m(\mathbf{x}, t) *_t \frac{1}{\tau} \exp\left[\frac{-t}{\tau}\right]$$

8.1.3 Zoutkruip

Boven de gasvelden in Noord Nederland bevindt zich een dikke steenzoutlaag. Ditzelfde zout wordt gewonnen onder de bodem van Noord Friesland. Het is bekend dat steenzout onder differentiële belasting langzaam gaat stromen (of kruipen). Referentie 12 beschrijft de relatie tussen de zoutwinning en de bodemdaling, evenals de snelheid en de vorm van dit vloeigedrag. Gegevens uit deze studie zijn gebruikt om ook het vloeigedrag van het steenzout onder Ameland te beschrijven.

De reksnelheid van het zout wordt, gegeven de druk en geïnduceerde differentiële spanningen, gedomineerd door oplossingskruip en beschreven door de volgende formule:

$$\dot{\epsilon} \rightarrow A \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right)$$

Waarbij de waarde van de activatie energie gedeeld door de gasconstante (Q/R) gelijk is aan 3007 K. De waarde voor A ($1,69E-09 \text{ s}^{-1}$) is voor de voorkomens in en rondom de Waddenzee op basis van kalibratie bepaald.

8.2 Bijlage GPS Differentiëestaat

PNTNAME	X_RD	Y_RD	TYPE	h07_2006	h06_2007	h08_2008	h10_2008	h07_2009	h08_2010	h05_2011	h10_2011	h05_2012	h06_2012
000A2592	180070.00	606750.00	prim.	-6.309	-6.308			-6.305	-6.307				
000A2632	216190.00	588660.00	sec. 2008				-10.198						
000A2686	201440.00	601650.00	prim.	-10.331									
000A2688	216130.00	601040.00	sec. 2008				-4.711						
000A2689	211540.00	600330.00	prim.	-11.070				-11.067					
000A2691	205070.00	602130.00	prim.	-9.366				-9.373					
000A4025	208860.00	602780.00	prim.	-3.323				-3.324					
002C0026	188624.91	602828.98	prim.	-11.329				-11.326		-11.327			
002C0027	188625.51	602823.76	prim.	-11.237				-11.234		-11.235			
002C0028	188625.44	602813.78	prim.	-11.209				-11.206		-11.207			
002C0029	188454.52	604607.53	prim.	-11.241	-11.244			-11.244	-11.244	-11.243			
002C0030	188454.46	604602.67	prim.	-11.224	-11.228			-11.229	-11.229	-11.227			
002C0031	188454.30	604597.36	prim.	-11.168	-11.170			-11.171	-11.171	-11.169			
002C0033	188355.01	606473.65	prim.	-10.960	-10.964			-10.968		-10.973			
002C0034	188355.03	606468.58	prim.	-11.064	-11.068			-11.072		-11.076			
002C0035	188355.90	606458.98	prim.	-11.122	-11.126			-11.130		-11.135			
002C0064	184855.42	603078.74	prim.	-10.635				-10.635		-10.634			
002C0065	184855.42	603078.74	prim.	-10.607				-10.608		-10.606			
002C0066	184855.06	603063.37	prim.	-10.710				-10.711		-10.709			
002D0048	190431.45	607552.93	prim.	-10.570	-10.576			-10.586		-10.594			
002D0049	190432.62	607547.63	prim.	-10.646	-10.652			-10.662		-10.670			
002D0050	190433.15	607537.99	prim.	-10.654	-10.659			-10.670		-10.677			
002D0054	190472.88	602133.75	prim.	-11.235				-11.237		-11.238			
002D0055	190473.39	602128.44	prim.	-11.144				-11.145		-11.146			
002D0056	190473.56	602117.96	prim.	-11.145				-11.145		-11.146			

002D0059	199818.57	608020.59	prim.	-9.405				-9.405				-9.407	
002D0060	199818.46	608015.65	prim.	-9.234				-9.234				-9.237	
002D0061	199816.92	608005.16	prim.	-9.378				-9.377				-9.380	
002D0066	192539.52	603415.01	prim.	-10.808				-10.811		-10.812			
002D0067	192540.49	603410.21	prim.	-10.962				-10.964		-10.965			
002D0068	192543.39	603400.51	prim.	-10.961				-10.963		-10.963			
002D0079	190500.00	608830.00	prim.	-7.588	-7.595	-7.603							
002D0102	194665.75	603777.53	prim.	-11.367				-11.369		-11.370			
002D0103	194666.20	603771.54	prim.	-11.232				-11.233		-11.234			
002D0104	194666.65	603761.44	prim.	-11.255				-11.257		-11.258			
002D0105	191525.85	605371.30	prim.	-11.264									
002D0106	191528.57	605366.99	prim.	-11.346									
002D0107	191533.61	605358.20	prim.	-11.371									
002D0108	195800.40	605104.84	prim.	-10.632				-10.638		-10.641			
002D0109	195799.57	605099.95	prim.	-10.747				-10.759		-10.762			
002D0110	195800.02	605089.76	prim.	-10.662				-10.669		-10.672			
002G0042	202536.61	604116.12	prim.	-10.783		-10.784		-10.788	-10.790	-10.789			
002G0043	202536.90	604110.71	prim.	-10.764		-10.765		-10.769	-10.772	-10.771			
002G0044	202537.47	604100.14	prim.	-10.734		-10.735		-10.739	-10.741	-10.740			
002G0048	200137.70	605655.32	prim.	-11.035				-11.038				-11.043	
002G0049	200137.80	605649.95	prim.	-11.040				-11.042				-11.048	
002G0050	200137.94	605640.23	prim.	-11.139				-11.140				-11.145	
002G0124	205180.00	607390.00	prim.	-10.100				-10.105				-10.108	
002G0125	205180.00	607380.00	prim.	-10.206				-10.215				-10.218	
002G0126	205180.00	607360.00	prim.	-10.197				-10.202				-10.205	
002H0032	214816.01	602736.10	prim.	-11.207				-11.207				-11.207	
002H0033	214815.45	602731.20	prim.	-11.190				-11.189				-11.190	
002H0034	214815.50	602720.57	prim.	-11.230				-11.231				-11.232	
002H0035	217078.23	603911.06	prim.	-10.954				-10.951				-10.952	

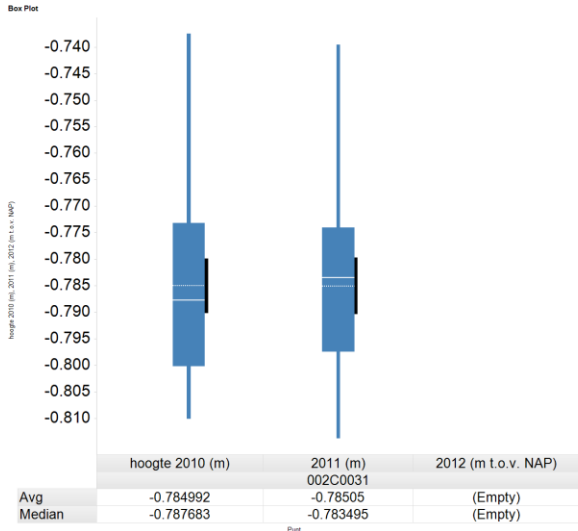
002H0036	217079.00	603905.73	prim.	-10.925				-10.924				-10.925
002H0037	217079.84	603895.50	prim.	-10.962				-10.959				-10.960
002H0038	211559.61	606175.59	prim.	-10.356				-10.357				-10.359
002H0039	211561.12	606170.66	prim.	-10.348				-10.350				-10.351
002H0040	211562.76	606165.90	prim.	-10.323				-10.325				-10.326
002H0042	212350.11	608280.89	prim.	-11.186				-11.184				-11.184
002H0043	212349.94	608275.70	prim.	-11.172				-11.170				-11.170
002H0044	212349.23	608265.69	prim.	-11.095				-11.093				-11.093
002H0048	214192.04	609217.41	prim.	-11.015								
002H0048M	214192.01	609212.71	sec. 2012									-11.013
002H0048N	214192.04	609217.41	sec. 2012									-11.004
002H0048Z	214191.92	609202.33	sec. 2012									-11.131
002H0057	216171.15	606338.08	prim.	-10.869				-10.869				-10.866
002H0058	216169.44	606333.44	prim.	-10.830				-10.829				-10.827
002H0059	216166.51	606324.92	prim.	-10.749				-10.748				-10.746
006B0021	198930.00	590320.00	sec. 2008				-5.149					
006E0193	205330.00	598560.00	prim.	-9.485								
006E0216	205380.00	598440.00	prim.	-10.439								
006E0239	205355.00	598500.00	prim.	-9.233			-9.241					
AME-2	186842.96	610897.75	prim.	18.892				18.879			18.867	
AWG-1	191779.00	611828.00	prim.	28.518				28.509			28.501	
GRK1	216356.28	588654.24	prim.	-8.749								
GRK2	216356.19	588662.22	prim.	-8.750								
GRK3	216356.09	588670.24	prim.	-8.749								
GRK4	216356.01	588678.23	prim.	-8.747								
L100	208080.01	602147.81	prim.	-10.946				-10.947				-10.948
L101	208197.82	599877.96	prim.	-10.939				-10.946				-10.950
L102	207909.22	598551.65	prim.	-10.904				-10.914				-10.921

L103	210682.91	596425.02	prim.	-11.016				-11.024					-11.028
L104	211295.35	594605.19	prim.	-9.822				-9.831					-9.836
L105	210076.07	593900.91	prim.	-9.927				-9.929					-9.932
L106	208413.82	594932.25	prim.	-11.135				-11.138					-11.138
L107	208345.58	596834.02	prim.	-11.060				-11.062					-11.066
M001M	189813.13	605613.79	prim.	-11.270				-11.277		-11.281			
M001N	189811.24	605618.47	prim.	-11.078				-11.083		-11.086			
M001Z	189816.22	605603.94	prim.	-11.242				-11.249		-11.253			
M002M	191025.11	606483.99	prim.	-11.103	-11.110			-11.115	-11.118	-11.119			
M002N	191022.96	606488.56	prim.	-11.265	-11.273			-11.279	-11.282	-11.283			
M002Z	191025.70	606473.77	prim.	-11.244	-11.256			-11.263	-11.267	-11.267			
M003M	197017.83	604177.18	prim.	-10.415				-10.424		-10.430			-10.431
M003N	197016.74	604181.74	prim.	-10.464				-10.474		-10.479			-10.481
M003Z	197020.05	604166.62	prim.	-10.515				-10.529		-10.534			-10.537
M004M	198928.67	609200.68	prim.	-10.145				-10.154					-10.159
M004N	198929.07	609205.69	prim.	-9.927				-9.927					-9.929
M004Z	198927.94	609190.63	prim.	-10.024				-10.029					-10.032
M005M	196483.89	606410.80	prim.	-10.132				-10.140		-10.144			
M005N	196483.35	606415.74	prim.	-10.176				-10.187		-10.191			
M005Z	196485.02	606399.88	prim.	-10.258				-10.263		-10.267			
M006M	198322.39	604850.54	prim.	-10.937				-10.940		-10.945			-10.947
M006N	198321.65	604855.91	prim.	-10.932				-10.936		-10.941			-10.943
M006Z	198322.79	604840.56	prim.	-11.012				-11.019		-11.024			-11.027
M007M	198456.88	603016.58	prim.	-10.694				-10.697	-10.700	-10.704			-10.709
M007N	198456.57	603022.04	prim.	-10.812				-10.823	-10.826	-10.830			-10.835
M007Z	198457.37	603006.31	prim.	-10.816				-10.822	-10.825	-10.829			-10.834
M008M	200842.51	603928.57	prim.	-10.842		-10.844		-10.846	-10.850	-10.849			-10.853
M008N	200843.40	603933.68	prim.	-10.766		-10.807		-10.811	-10.815	-10.815			-10.819
M008Z	200841.30	603918.50	prim.	-10.751		-10.760		-10.762	-10.766	-10.766			-10.771

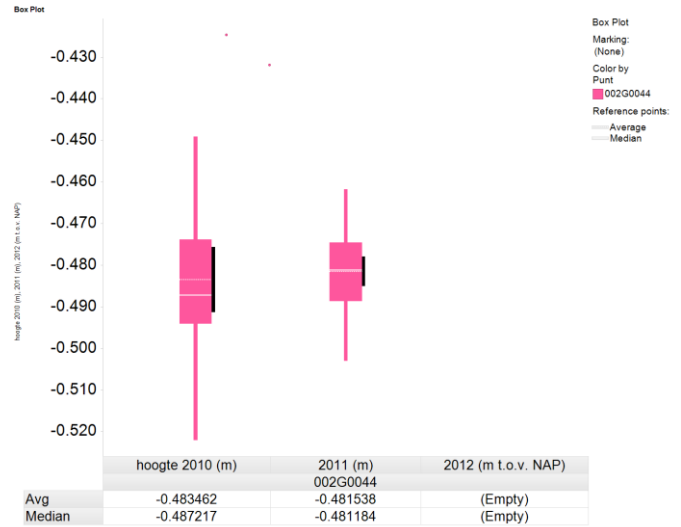
M009M	207493.38	606364.27	prim.	-10.577				-10.582	-10.583	-10.584		-10.582
M009N	207492.51	606369.35	prim.	-10.672				-10.682	-10.683	-10.684		-10.682
M009Z	207494.96	606354.35	prim.	-10.570				-10.576	-10.577	-10.578		-10.575
M010M	210169.00	605201.20	prim.	-10.971				-10.977				-10.978
M010N	210167.54	605235.96	prim.	-10.941				-10.945				-10.947
M010Z	210171.95	605191.45	prim.	-10.905				-10.911				-10.913
M011M	211529.91	606960.00	prim.	-10.193				-10.192				-10.194
M011N	211529.81	606965.06	prim.	-10.251				-10.251				-10.253
M011Z	211529.91	606949.87	prim.	-10.292				-10.298				-10.301
M012M	214107.45	605091.73	prim.	-10.594				-10.609				-10.607
M012N	214107.09	605096.95	prim.	-10.659				-10.672				-10.671
M012Z	214108.53	605081.57	prim.	-10.637				-10.645				-10.643
M013M	208614.28	605166.41	prim.	-11.357				-11.359				-11.357
M013N	208613.72	605171.27	prim.	-11.403				-11.414				-11.414
M013Z	208614.19	605155.87	prim.	-11.512				-11.519				-11.520
M015M	188715.37	605150.69	prim.	-11.001				-11.013		-11.019		
M015N	188715.37	605155.69	prim.	-10.900				-10.907		-10.913		
M015Z	188715.37	605140.69	prim.	-11.156				-11.159		-11.164		
M016M	204340.38	603946.08	prim.	-10.566		-10.570		-10.571				-10.578
M016N	204340.25	603950.07	prim.	-10.502		-10.508		-10.509				-10.516
M016Z	204339.93	603934.44	prim.	-10.614		-10.615		-10.616				-10.623

8.3 Bijlage Boxplots Griddata nabij GPS peilmerkclusters

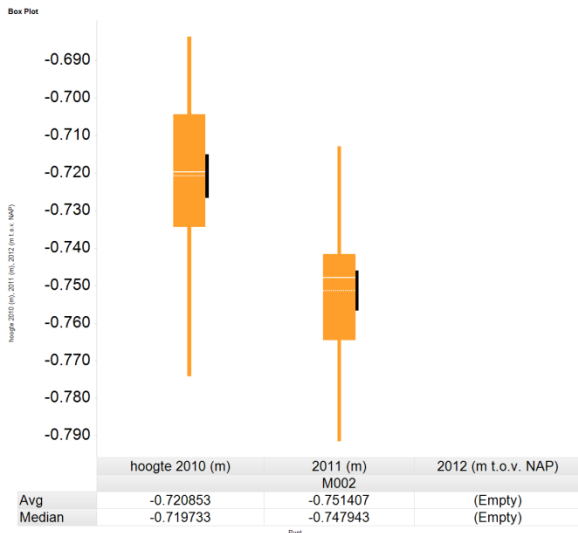
Zie beschrijving bij 4.1.2



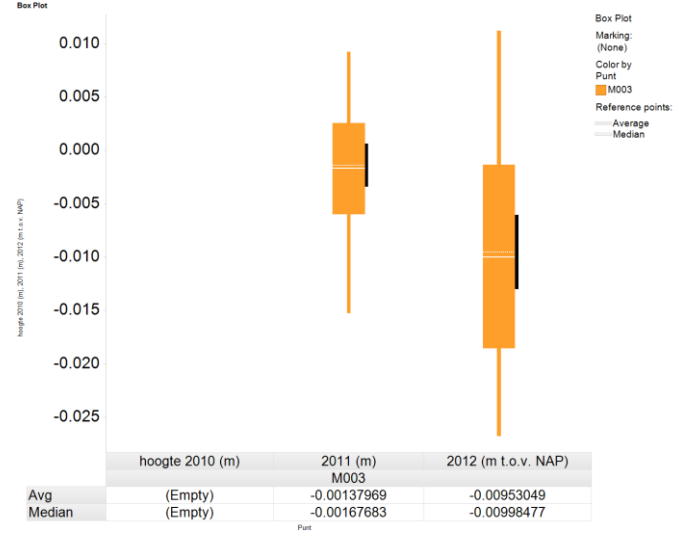
002C0031 (2010, 2011)



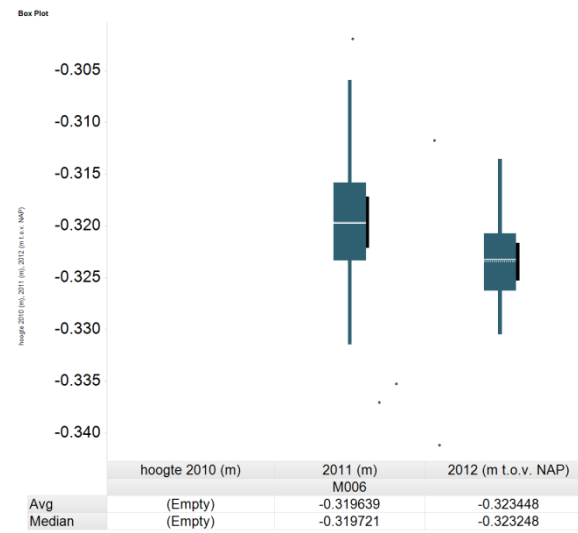
002G0044 (2010,2011)



M002 (2010, 2011)



M003 (2010, 2011)



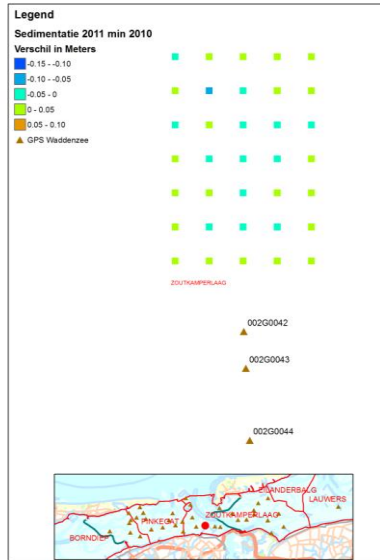
M006 (2011, 2012)

8.4 Bijlage Sedimentatie grids nabij GPS peilmerkclusters

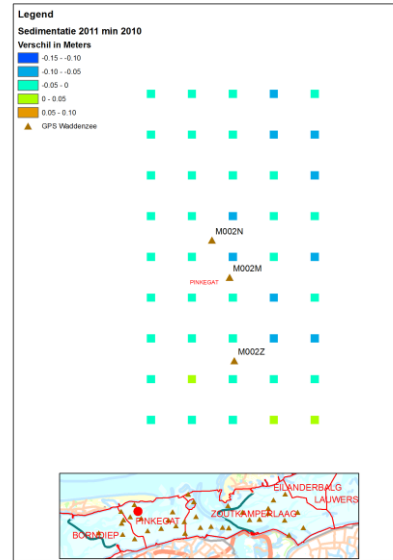
Hieronder zijn de hoogtemetingen per gridpunt vergeleken voor een aantal (GPS)clusters. Negatieve waarden betekenen daling voor betreffende periode (erosie), positieve waarden stijging (sedimentatie) (zie ook 4.1.2).



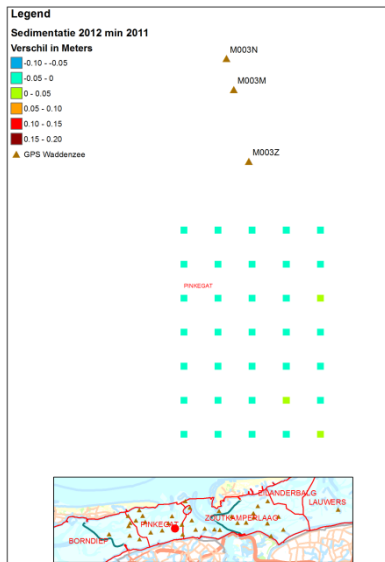
002C0031 (2011-2010)



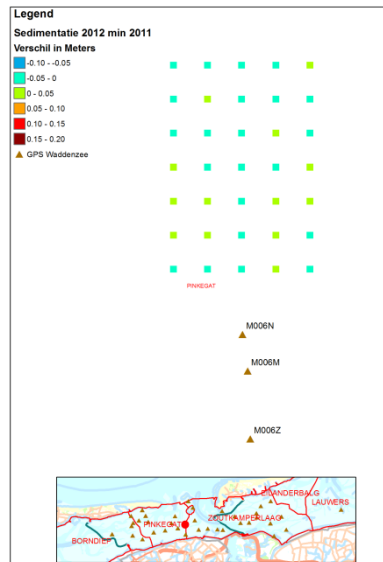
002G0044 (2011-2010)



M002 (2011-2010)

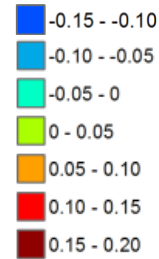


M003 (2012-2011)



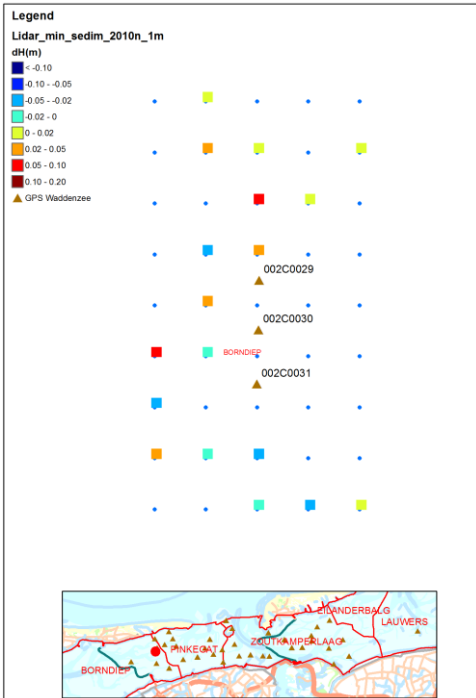
M006 (2012-2011)

Legenda:



8.5 Bijlage Vergelijk Terrestrische maaiveldmetingen en Lidar per grid

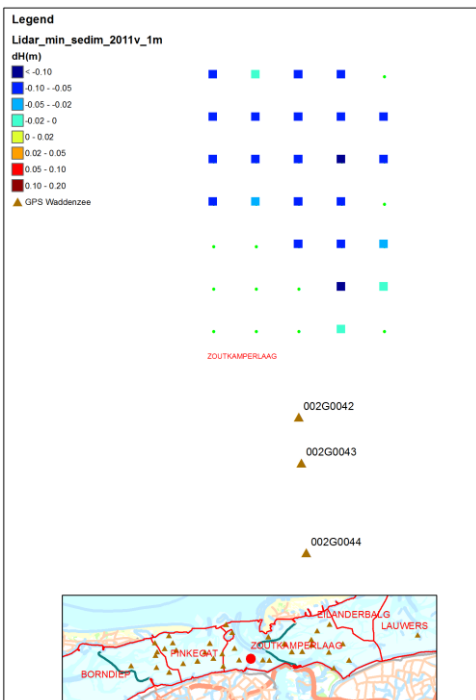
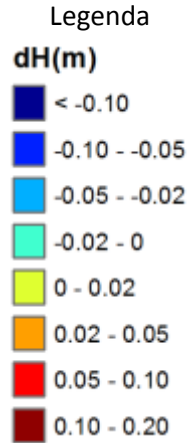
Onderstaande figuren geven het verschil tussen de met Lidar bepaalde hoogte en de gewaterpaste hoogte van de grids nabij de peilmerkclusters (zie ook 4.1.3). Negatieve waarde: Lidar hoogte is lager dan gewaterpaste hoogte
 Positieve waarde: Lidar hoogte is hoger.



002C0031 (2010)



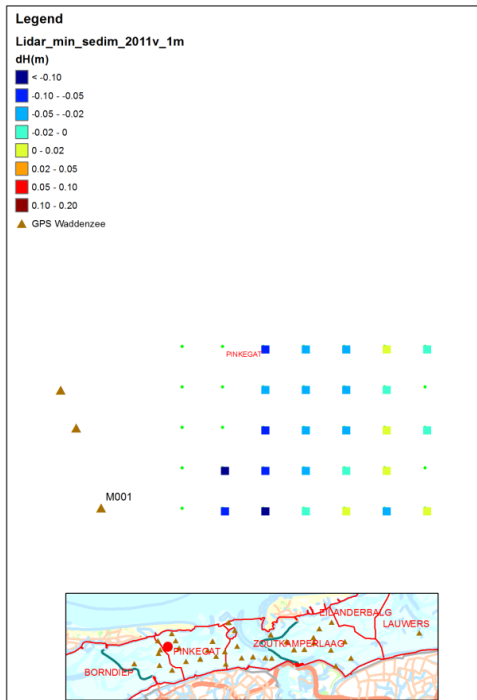
002G0044 (2010)



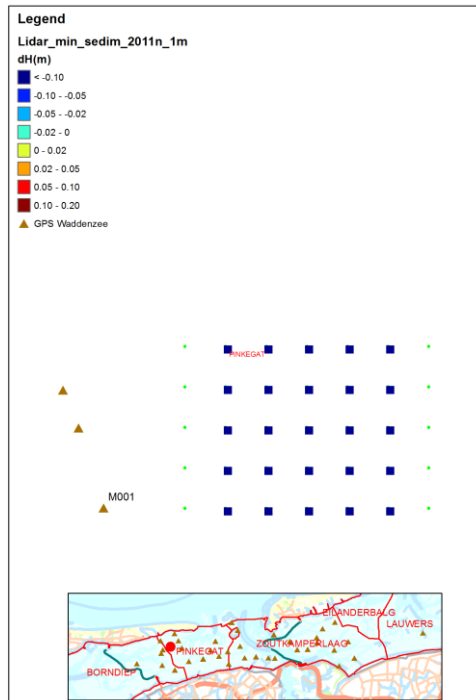
002G0044 (2011 voorjaar)



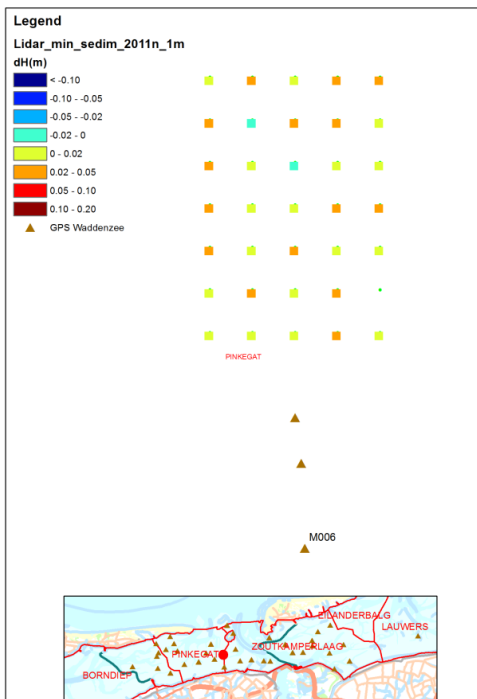
002G0044 (2011 najaar)



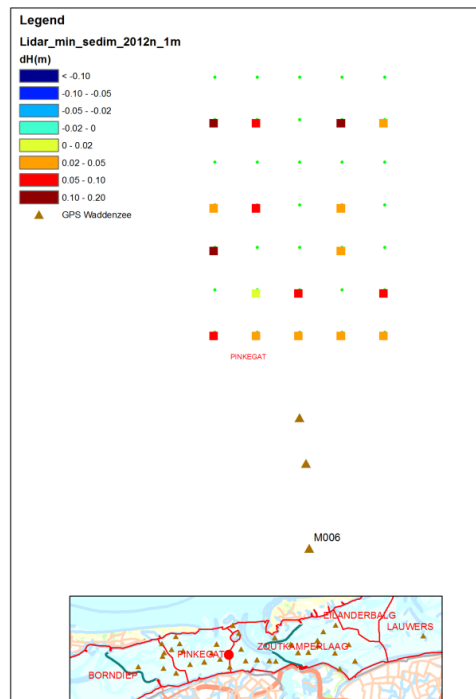
M001 (2011 voorjaar)



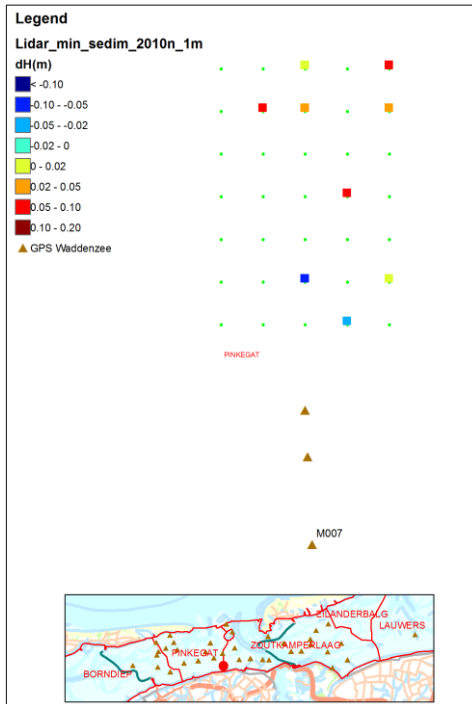
M001 (2011 najaar)



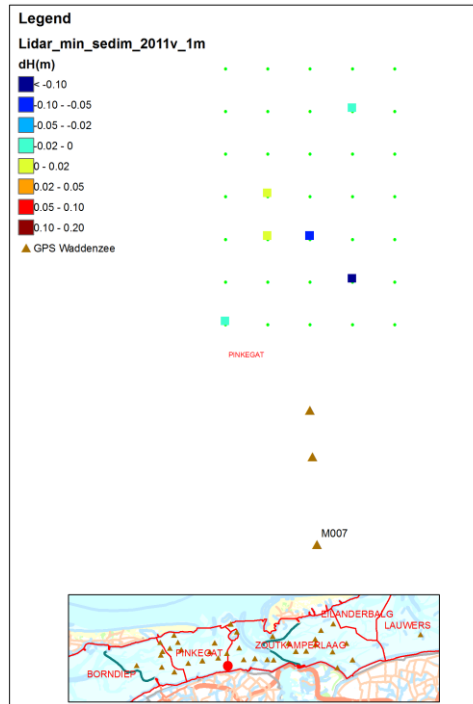
M006 (2011 najaar)



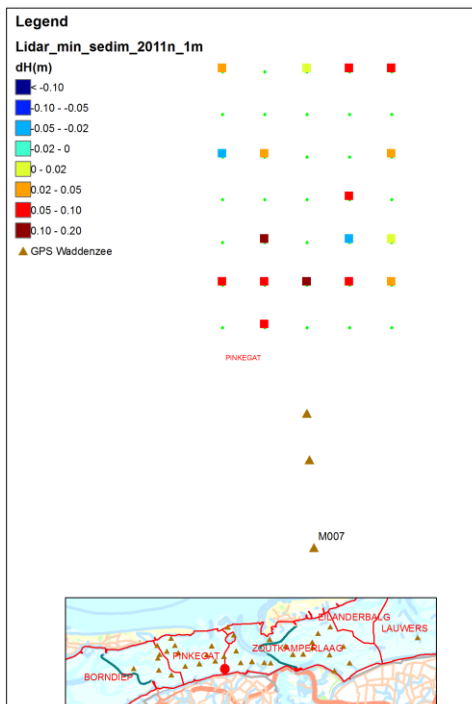
M006 (2012)



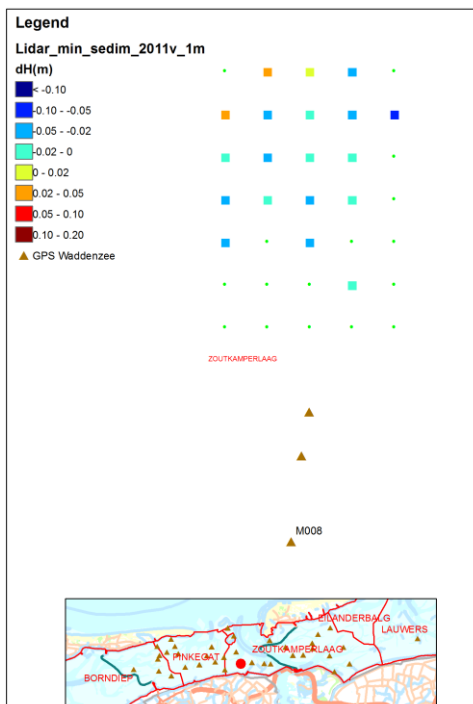
M007 (2010)



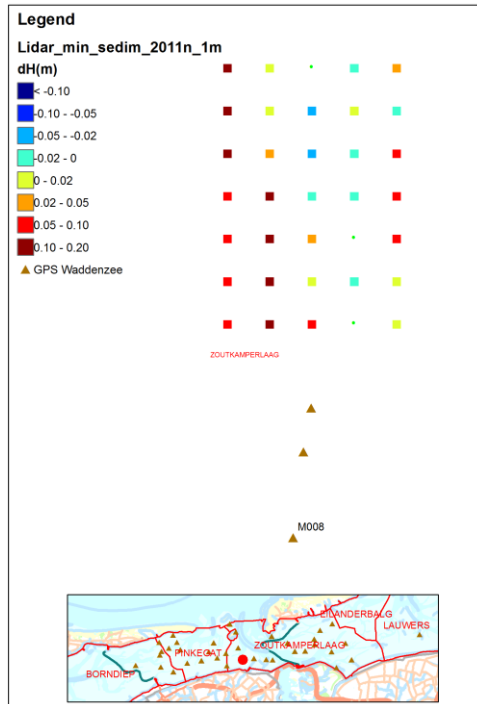
M007 (2011 voorjaar)



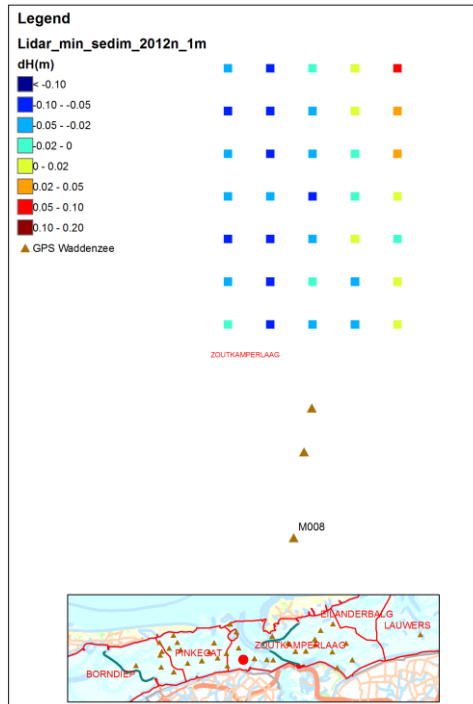
M007 (2011 najaar)



M008 (voorjaar)



M008 (2011 najaar)



M008 (2012)