

# Passieve microgolven waarnemingen van de dijkbekleding bij Kattendijke, Zeeland.

*Een vervolg studie naar de mogelijkheden van de toepasbaarheid van mobiele L-band radiometrie voor dijkinspectie.*



Juli 2011

The logo for miramap, featuring a small globe icon above the letter 'i' in the word 'miramap', which is written in a blue, lowercase, sans-serif font.

Dit onderzoek is uitgevoerd door

Miramap B.V. (Roland Haarbrink)  
Toendrameer 57  
3994 JC Houten

Transmissivity (dr. Richard de Jeu)  
Donizettihof 9  
2151 ND Nieuw Vennepe

in samenwerking met:

Rijkswaterstaat Projectbureau Zeeweringen (Yvo Provoost, Klaas Kaslander)  
Kanaalweg 1  
4337 PA Middelburg

Foto voorkant: Microgolfmetingen over de dijk bij Kattendijke met een Utility Quad.

## **Dankwoord**

Dank gaat uit naar de uitvoerende tak van Rijkswaterstaat die ons de mogelijkheid hebben geboden om de dijk bij Kattendijke te meten en Bram Schouwenaar voor het verrichten van de boringen.

## Samenvatting

Miramap B.V. heeft samen met Rijkswaterstaat Projectbureau Zeeweringen en Transmissivity een vervolg studie uitgevoerd naar de mogelijkheden om passieve microgolf radiometrie in te zetten om meer inzicht te krijgen in de ruimtelijke variatie van dijkbekleding.

Uit voorafgaande studies was al gebleken dat de microgolven sensor holle ruimtes, natte plekken en plotselinge variaties in de dijkbekleding kon detecteren. De hoofdvraag binnen dit onderzoek gaat weer iets verder en is gericht op de vraag in hoeverre we vochtvariaties in de dijkbekleding kunnen determineren en wat dat betekent in relatie tot de interne structuur van de bekleding.

Een dijktraject nabij Kattendijke was gekozen voor dit onderzoek omdat hier de interne structuur van de dijkbekleding sterk varieert over een relatieve korte afstand en er werden daardoor ook grote verschillen in bodemvocht verwacht.

Verschillende transecten van ongeveer 2000 m werden ingemeten met een duo radiometer systeem die bevestigd was aan een Utility Quad. Met dit systeem kon er simultaan in horizontale en verticale polarisatie gemeten worden waardoor technisch gezien de temperatuur invloed op de metingen kunt minimaliseren en daardoor nauwkeurigere informatie over de ondergrond kunt verkrijgen.

Na de analyse van deze transect zijn er op 8 locaties boringen verricht op plekken waarbij er een sterke anomalie te zien was in het microgolven signaal. Uit de boringen bleek dat de microgolven radiometer in staat is om variaties in de bekleding te detecteren. Zo werd bijvoorbeeld een stuk waar de vlijlaag ontbrak duidelijk door de scanner opgepikt.

Verder bleek dat het heel goed mogelijk is om bodemvocht schattingen te maken van de interne lagen met een coherent model waardoor je een goed overzicht krijgt over de waterhuishouding van de dijk. Zo bleek uit dit onderzoek dat externe omstandigheden (zoals de vorm van de kustlijn, maar ook het aanwezig zijn van een pier) een dominante impact hebben op de bodemvochtverdeling binnen in de dijkbekleding.

Uit deze resultaten kunnen we daarom ook voorzichtig concluderen dat je met microgolven radiometrie een techniek in handen hebt die je informatie kan geven over zowel de interne variatie van de bekleding als de variatie in vocht.

Tenslotte is met dit onderzoek ook aangetoond dat het gebruik van de Utility Quad een groot aantal voordelen met zich meebrengt. Met de Quad is het namelijk mogelijk om grote afstanden af te leggen in een relatieve korte tijd (+/- 5 km per uur). Daarnaast is het ook mogelijk om met dit duo systeem in twee polarisaties te meten wat de meetkwaliteit met betrekking tot de determinatie van bodemvocht en interne variatie sterk verhoogt.

Aan de hand van de verschillende studies die de afgelopen twee jaar zijn uitgevoerd in samenwerking met Rijkswaterstaat, projectbureau Zeeweringen kan nu wel worden gezegd dat je met microgolven op een zeer snelle manier

- Bodemvocht / algemene waterhuishouding
- bekleding variaties
- Lucht/vocht pockets

van de dijkbekleding in kaart kunt brengen. Hierbij moet men wel rekening houden met het feit dat deze techniek gelimiteerd is tot plus minus de 1 m van de dijkbekleding.

## Inhoudsopgave

1.	Inleiding .....	5
2.	Theorie en Technologie .....	6
2.1.	Theoretische Achtergrond.....	6
2.2.	L-band Radiometer .....	8
3.	Methodologie .....	8
4.	Studiegebied.....	9
5.	Resultaten en Interpretatie .....	9
5.1.	Dijkmetingen.....	9
5.2.	Transect 1: van A naar A' .....	11
5.3.	Transect 2: van B naar B' .....	11
5.4.	Transect 3: van C naar C' .....	11
5.5.	Transect 4: van D naar D' .....	11
5.6.	Transect 5: van E naar E' .....	12
5.7.	Transect 6: van F naar F' .....	12
5.8.	Transect 7: van G naar G' .....	12
5.9.	Transect 8: van H naar H' .....	12
6.	Conclusies en Aanbevelingen .....	13
	Referenties .....	14
	Appendix A: Boringen .....	15
	Appendix B: Profielen .....	16



## 1. Inleiding

De afgelopen jaren zijn er verschillende tests uitgevoerd met een L-band radiometer om uit te zoeken of deze nieuwe technologie een toegevoegde waarde heeft ten opzichte van huidige meetmethoden voor dijkinspectie. Uit het lopende onderzoek is al gebleken dat je met L-band radiometrie informatie kunt verkrijgen over variaties in de ondergrond tot +/- 1 m. In [1] wordt een samenvatting gegeven van de mogelijkheden over microgolven radiometrie en daaruit blijkt dat het mogelijk is om holle ruimtes op te sporen, kwelzones in kaart te brengen, en plotselinge laagvariaties binnen de bekleding te detecteren.

De hoofdvraag binnen dit onderzoek gaat iets verder en kijkt in hoeverre we vochtvariaties in de dijkbekleding kunnen determineren en wat dat betekent in relatie tot de interne structuur van de bekleding. Daarnaast willen we kijken wat de potentiële meerwaarde is van het gebruik van een utility quad voor het inmeten van de dijken. Zeeland heeft meer dan 300 km zeekeringen en het gebruik van een quad kan er voor zorgen dat er op een snelle en adequate manier ingemeten kan worden.

De afgelopen tijd zijn er veel verschillende technieken ontwikkeld om de kwaliteit van de Nederlandse dijken in kaart te brengen. De meeste studies waren gericht op veendijken en wat in mindere mate op zeekeringen. Zo zijn er onlangs technieken ontwikkeld die gebruik maken van laser antimetrie of satelliet radar interferometrie [2] om dijkvervormingen te registreren. Thermische metingen worden momenteel ingezet bij veendijken om natte plekken te vinden, en verschillende geofysische opsporingsmethoden om de stabiliteit van de ondergrond beter te begrijpen [3]. De stichting toegepast onderzoek waterbeheer (STOWA) is hier ook al een aantal jaar mee bezig en [3] geeft een goed overzicht van de verschillende innovatieve technieken.

Voor kwaliteitsinspectie zeekeringen zijn helaas een aantal van deze technieken niet geschikt omdat je te maken hebt met een zout milieu en een "harde" bekleding (zoals beton, of basaltblokken). Dit maakt verschillende geofysische opsporingsmethode ongeschikt voor dijkinspectie.

Passieve microgolven observaties zijn op zich niet gevoelig voor een zout milieu en kunnen door droge materialen heen kijken, wat ze geschikt maakt voor dit type onderzoek.

Miramap ([www.miramap.com](http://www.miramap.com)) heeft onlangs speciaal voor water- en waterkeringenbeheerders in Nederland, een duo passieve microgolf scanner systeem ontwikkeld die het mogelijk maakt om op een zeer snelle manier variaties binnen de dijkbekleding in kaart te brengen. Dit systeem is voor dit onderzoek op een quad geïnstalleerd en getest om te kijken het mogelijk is om met een snelheid van plus minus 5 km per uur een dijk in te meten. Figuur 1 laat zien hoe zo iets er in de praktijk uit ziet. Je kunt zo op een niet destructieve manier snel ruimtelijke informatie verkrijgen over de toestand van de dijkbekleding.

In dit rapport beschrijven we de resultaten van de metingen die zijn verricht in Kattendijke. We hebben ons bij deze studie ook met name gericht op de interpretatie van de metingen, waarbij we willen aantonen wat de mogelijkheden en beperkingen zijn van zo'n systeem.



*Figuur 1: Een duo microgolven scanner systeem is gemonteerd op een utility quad waardoor je op een snelle manier een dijk kunt inmeten, zoals hier te zien is tijdens de meting op maandag 11 April 2011 bij Kattendijke, Zeeland.*

## 2. Theorie en Technologie

### 2.1. Theoretische Achtergrond

Een L-band radiometer meet de natuurlijke uitstraling van het grondoppervlak in het microgolvenbereik. Het is een passieve sensor en voor een L-band radiometer meet hij de uitstraling bij een golflengte van 21 cm. De radiometer drukt deze uitstraling uit in helderheidtemperaturen ( $T_b$ , wat staat voor brightness temperatures).

Voor een dijkbekleding kan de helderheidtemperatuur observatie van de L-band radiometer wiskundig worden beschreven als

$$Tb_p = \sum_{i=1}^n f_i T_i \quad (1)$$

waarin  $f$  de fractie energie is die door laag  $i$ ,  $p$  de polarisatie (horizontaal of vertikaal),  $T_i$  de effectieve temperatuur van laag  $i$  en  $n$  de totale hoeveelheid lagen. De effectieve reflectiviteit ( $R_{eff[p]}$ ) van de dijkbekleding kan dan worden beschreven als

$$R_{eff[p]} = 1 - \sum_{i=1}^n f_i \quad (2)$$

De waarde van  $f$  is direct gerelateerd aan de diëlectrische constante van de laag en kan eenvoudig worden uitgerekend aan de hand van de Maxwell vergelijkingen [4]. De diëlectrische constante is een fysische grootheid die beschrijft hoe een elektrisch veld een medium beïnvloedt en erdoor beïnvloed wordt.

De diëlectrische constante is gedefinieerd als een complex getal opgedeeld in een reële eenheid en imaginaire eenheid. Het reële gedeelte bepaald de propagatie karakteristieken van de energie als deze omhoog beweegt door het materiaal. Het imaginaire gedeelte bepaalt het energieverlies.

Elk materiaal heeft een unieke diëlectrische constante en er is met name een zeer groot verschil tussen droog materiaal zoals bijvoorbeeld zand en water. Het reële gedeelte van de diëlectrische constante van zand bijvoorbeeld bedraagt ongeveer 3 tot 5 en water heeft een waarde van 80, waardoor een vochtige zandige bodem een diëlectrische constante van 20 of hoger kan bereiken. Deze verschillen maken de passieve microgolven radiometer tot een belangrijk hulpmiddel om verschillen in de bodem te bepalen.

Twee jaar geleden zijn de diëlectrische constante van verschillende materialen die bij de dijkbekleding worden aangetroffen bepaald in het laboratoire de l'integration du materiau au systeme (IMS) in Pessac Frankrijk. Tabel 1 geeft de diëlectrische constante aan van de verschillende materialen onder droge en natte condities en in [5] is het uitgebreide verslag te vinden van deze analyse. Wat sterk opvalt is dat de diëlectrische constante van verschillende materialen relatief laag zijn en dat ze ook nauwelijks variëren bij verschillende vochtcondities. Dit betekent eigenlijk dat deze materialen min of meer 'semi' transparant zijn in het microgolven bereik. Klei is dit niet. De diëlectrische constante van klei is namelijk hoger en veel meer afhankelijk van bodemvocht omdat ze simpelweg meer water kunnen opnemen dan de andere dijkbekleding materialen. De diëlectrische constante van klei kan goed geschat worden met het Wang-Schmugge dielectric mixing model [6] en varieert gemiddeld van  $9.7+0.76i$  (droog) tot  $29.1+2.82i$  (nat).

*Tabel 1: Diëlectrische constante van verschillende materialen die worden aangetroffen in de dijkbekleding. Deze constante zijn bepaald bij 1.2 GHz (vgl met L-band observaties) onder droge en verzadigde condities*

Materiaal	Droog		Nat	
	Reëel ( $\epsilon'$ )	Imaginaire ( $\epsilon''$ )	Reëel ( $\epsilon'$ )	Imaginaire ( $\epsilon''$ )
Doornik	4.945	0.097	4.827	0.145
Vilvoorde	5.568	0.062	5.808	0.093
Nieuw Beton	4.375	0.085	5.335	0.203
Oud Beton	4.254	0.076	4.980	0.188
Vlijsteen	3.245	0.116	7.578	0.196
Fosforslakken	4.819	0.026	5.156	0.183
Staalslakken	8.580	0.684	8.688	0.668
Basalt	6.031	0.143	6.063	0.133
Poreuze lavasteen	3.872	0.054	5.060	0.086
Waterbeton	4.739	0.111	5.043	0.138
Asfalt	3.903	0.057	3.936	0.053

Kort samengevat kan dus worden geconcludeerd dat een observatie van een L-band radiometer een functie is van materiaal eigenschappen in de ondergrond, de temperatuur en het bodemvochtgehalte. Om de temperatuur invloeden te elimineren kan er gebruikt gemaakt worden van een polarisatie ratio index. Er wordt dan zowel in horizontale als verticale polarisatie gemeten en de ratio tussen deze twee wordt dan gebruikt om materiaal eigenschappen te analyseren. Een polarisatie ratio die vaak gebruikt wordt is de Microwave Polarization Difference Index (MPDI) en die is gedefinieerd als:

$$MPDI = \frac{T_{bv} - T_{bh}}{T_{bv} + T_{bh}} \quad (3)$$

De kracht van deze index is dat het temperatuur effect geminimaliseerd is en de index alleen maar een functie is van materiaal eigenschappen en bodemvocht condities.

## 2.2. L-band Radiometer

Tijdens deze studie is gebruik gemaakt van een door Miramap ontwikkelde passieve microgolven scanners. Deze scanner registreert de natuurlijke uitstraling bij 1.4 GHz (L-band). Dit komt overeen met een golflengte van 21 cm. De sensor registreert de observaties in helderheidstemperaturen met een nauwkeurigheid van 1 K. Voor deze studie is er gebruik gemaakt van twee scanners. Een in een horizontale polarisatie positie en de ander in een verticale polarisatie positie. Op deze manier kon er simultaan in de horizontale en verticale modus gemeten worden. De radiometers waren geïnstalleerd op een utility quad in een kijkhoek van 40 graden.

De radiometer werd voor de meting gekalibreerd en kan zonder additionele stroomvoorzieningen 3 uur meten. Elke meting werd voorzien van een GPS locatie en opgeslagen op een SD kaart.

De observaties snelheid van de sensor is 1 seconde met een ruimtelijke resolutie van om en nabij 1 m. De quad reed ongeveer 5 km per uur wat resulteerde in een meting per 1.4 m. Figuur 1 laat zien hoe de radiometer aan de quad bevestigd was tijdens de meetcampagne bij Kattendijke.

## 3. Methodologie

Voor het analyseren van de toepasbaarheid van deze nieuwe technologie voor dijkinspectie zijn er met de quad verschillende transecten gereden van ongeveer 2000 m over de dijk bij Kattendijke. Dit is een stuk dijk waarbij er bekend is dat de dijkbekleding sterk varieert. Na de microgolven metingen zijn er 8 locaties boringen gezet op waar de microgolf data sterk afweek. Deze boringen zijn geanalyseerd en vergeleken met de microgolven observaties.

Uit de microgolven observaties is de MPDI bepaald (vgl 3) en bodemvocht met behulp van een coherent twee lagen model, waarbij de diëlectrische constante van de toplaag werd vastgezet met waarden van Tabel 1. De basis van dit model is beschreven in [7] en waar het ook laat zien dat het bodemvocht kan oplossen met een nauwkeurigheid van ongeveer  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Het bodemvocht van de onderliggende laag werd uitgerekend in volumetrisch waarden in  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  en kan gezien worden als een “bulk bodemvocht waarde die representatief is voor de eerste tientallen centimeters onder de toplaag.

## 4. Studiegebied

Voor dit onderzoek zijn er metingen verricht in Zeeland op een dijk ten noorden van Kattendijke. De metingen zijn allemaal verricht op maandag 11 April 2010 bij droge omstandigheden. Op de dijk zijn een aantal transecten gereden met een utility quad. Figuur 2 geeft een detail kaart van de locatie. Na analyse zijn er daarna de volgende dag op 8 locaties boringen verricht tot 2 m diepte. De resultaten van de boringen zijn te vinden in Appendix A en de resultaten van de metingen in combinatie met de boringen worden besproken in de volgende sectie.



*Figuur 2: Detailkaart van de meetlocatie bij Kattendijke*

## 5. Resultaten en Interpretatie

### 5.1. Dijkmetingen

Figuur 3 geeft een algemeen beeld van de metingen op de dijk bij Kattendijke. Hier is op een Google Earth beeld de microgolven observaties geprojecteerd (aangegeven in MPDI waarden). Daarnaast zijn ook de locatie van de boringen aangegeven. De metingen zijn verder in detail geanalyseerd en alleen de noord zuid transect metingen die midden over de dijk liepen zijn gebruikt omdat de zuid noord metingen last hadden van de invloed van de zon. Dit heet sunglint en zorgt ervoor dat de metingen onverwacht hoog zijn als de zon (in)direct in de sensor schijnt.

Het kleuren patroon in MPDI geeft aan dat er in de microgolven metingen een zeer sterke variatie gevonden is. Om het signaal beter te begrijpen hebben we 8 profielen van +/- 300 m gemaakt en deze worden stuk voor stuk afzonderlijk besproken, inclusief interpretatie. De positie van deze profielen is te ook te vinden in Figuur 3. De figuren van de afzonderlijke profielen zijn te vinden in Appendix B.





*Figuur 3: overzichtskaart van de Kattendijkse metingen geprojecteerd een Google Earth beeld. De microgolvenmetingen zijn aangegeven in MPDI waarden, waarbij over het algemeen de hoge waarden (nat) gerelateerd kunnen worden aan een natte ondergrond en de lage waarde aan een droge ondergrond. Verder zijn ook de locaties van de acht verschillende profielen weergegeven en de locaties van de 8 boringen.*

## **5.2. Transect 1: van A naar A'**

In dit transect zie je van noord naar zuid de variaties in zowel MPDI (aangegeven in rood) als wel bodemvocht (aangegeven in blauw) van de tweede laag (Zie Figuur 4). Wat in dit profiel opvalt is met name de sterke variatie in bodemvocht, die van hoog naar laag en dan weer omhoog gaat. Deze variatie is waarschijnlijk te danken aan de pier die ervoor zorgt dat een deel van de dijk in de luwte staat waardoor het minder gevoed wordt bij hoogtij dan andere plekken. De verandering van bodemvocht ten zuiden van de pier loopt ook geleidelijk op (en niet abrupt) wat ook meer verwijst naar een natuurlijk proces dan naar een materiaal verandering in de dijkbekleding. Dit wordt ook min of meer bevestigd door Figuur 3 waar duidelijk ten zuiden van de pier de zandbank een lichtere kleur heeft wat duidt op een droger stuk. Onze hypothese is dan ook dat over dit traject de eerste meter de bekleding niet wezenlijk verandert.

## **5.3. Transect 2: van B naar B'**

Bij het profiel tussen B en B' zie je van noord naar zuid langzaam een droge zone ontstaan (Figuur 5). In de boringen zien we niet een significant verschil in dijkbekleding. Alhoewel het niet helemaal duidelijk is of er een vlijlaag aanwezig is bij boring 6 denken we dat de droge zone hier in het zuidelijke gedeelte van dit profiel komt door een oude dijk die nog doorloopt in de zandbank. Deze oude dijk is duidelijk zichtbaar in de zandbank bij Figuur 3. Deze oude dijk kan ook voor luwte zorgen bij hoogtij waardoor ook hier dit deel van de dijk minder sterk gevoed wordt waardoor we hier lagere bodemvocht waarden vinden.

## **5.4. Transect 3: van C naar C'**

Bij dit profiel (Figuur 6) zie je dat het bodemvocht van droog naar nat gaat, maar dat ook dat de MPDI in het latere gedeelte heel sterk begint te fluctueren. We denken dat het droge stuk in het begin (in het noorden) komt door de luwte werking van de oude dijk. Daarna krijgen we vrij abrupt een wat nattere zone; dit kan duiden op een verandering in de dijkbekleding. De overgang is duidelijk te zien tussen 100 en 150 m. Daarna valt op dat met name de MPDI heel sterk fluctueert (en in mindere mate bodemvocht). Dit zijn duidelijk variaties in materialen en we verwachten op dit stuk een hele sterke materiaalvariatie in de dijkbekleding. Dit komt in alle waarschijnlijkheid door de resten van de oude dijk.

## **5.5. Transect 4: van D naar D'**

Figuur 7 geeft de transect weer van D naar D'. In dit profiel zien we veel variaties. De eerste 100 m zien we nog een rommelige zone waarna we net voor de 100 m een abrupte verandering zien in zowel de MPDI als bodemvocht. Tussen 100 en 130 m zien we een natte zone, die door het abrupte karakter, waarschijnlijk een gevolg is van verandering in dijkbekleding. We denken dat hier de vlijlaag ontbreekt, maar er is hier helaas geen boring gezet. Daarna zien we net voor 150 m weer een sterke verandering in bodemvocht en MPDI, waarin we in een droge zone terecht zijn gekomen. We denken dat we hier te maken hebben met de opeenvolging die we in boring 4b (zie appendix A) zijn tegengekomen. Daarna zien we een zeer natte zone. Uit de boringgegevens blijkt dat in dit stuk de vlijlaag ontbreekt en de haringmanblokken

direct op de kleilaag staan. Dit werd direct opgepikt door de radiometers. Na 200 stopt deze natte zone weer heel snel. We denken dat hier de vlijlaag weer terug is, maar hebben geen boring om deze hypothese te bevestigen. Toch is het duidelijk dat de radiometer over dit traject vrij gemakkelijk belangrijke variaties, zoals het ontbreken van een vlijlaag, in de dijkbekleding in kaart brengt.

## **5.6. Transect 5: van E naar E'**

Figuur 8 laat de 300 m transect van E naar E' zien. Dit profiel begint met het stuk waar de vlijlaag ontbreekt. Achtereenvolgens krijgen we tot 150 meter een relatief droge zone waar het signaal nog droger wordt na 150 m. Hierdoor denken we dat we voor de 150 m te maken hebben met een andere opeenvolging dan na 150 m. Na 150 m zien we een opeenvolging in boring 3 die aangeeft dat er onder de haringmanblokken grind en mijnsteen ligt. Daarna gaat het bodemvocht geleidelijk omhoog over een afstand van 100 m. Of deze verandering het gevolg is van verandering in bekleding of veroorzaakt wordt door natuurlijke variatie door het toedoen van de aanwezigheid van zandbanken in combinatie met de natuurlijke kustlijn is onbekend.

## **5.7. Transect 6: van F naar F'**

Bij Figuur 9 zien we dat we eerst een hele droge zone hebben die sterk omhoog schiet na 50 m. Dan hebben we tot 300 m een stabiele zone. We verwachten dat in deze zone er nauwelijks variatie is in de dijkbekleding. Op 400 m zien we opeens een sterke daling in bodemvocht. Een directe verklaring voor deze anomalie hebben we niet, maar gezien het feit dat we niet direct een aanwijzing zien met betrekking tot een natuurlijke variatie in bodemvocht door het toedoen van zandbanken of variatie in kustlijn, denken we dat deze anomalie door een verandering in de dijkbekleding komt. Er is echter geen boring gezet hier, dus kunnen we deze hypothese niet bevestigen.

## **5.8. Transect 7: van G naar G'**

Bij Figuur 10 beginnen we met een droge zone. Deze zone ligt in een bocht en is duidelijk veroorzaakt door de verandering van de kustlijn. Dit stuk dijk ligt duidelijk in de luwte en krijgt minder vocht tijdens hoogtij. Na de bocht gaat het bodemvocht en MPDI omhoog. Na 150 m zie je duidelijk ook weer een verandering in het signaal. Dit wordt bevestigd met het feit dat de toplaag verandert van haringmanblokken naar vilvoordse. Na 150 m kunnen we een onderverdeling maken van 3 zones. Zone 1 is nat, daarna een droge gevolgd door een natte zone. De variatie hier komt in alle waarschijnlijkheid door veranderingen in de bekleding want er zijn niet direct aanwijzingen te vinden die een natuurlijke variatie kunnen bevestigen.

## **5.9. Transect 8: van H naar H'**

In het laatste transect zien we over het algemeen een langzame daling over het 300 m lange profiel met een abrupte variatie rondom 150 m. De langzame daling in bodemvocht komt waarschijnlijk door de morfologie van de kustlijn en de knik in de kustlijn aan het einde van dit profiel. De abrupte variatie rondom 150 m komt in alle



waarschijnlijkheid door een sterke variatie in de bekleding. Met name de sterke gradient in vocht en MPDI verwijst naar een abrupte materiaal verandering.

## 6. Conclusies en Aanbevelingen

Uit dit onderzoek is gebleken dat passieve microgolven data gedetailleerd inzicht kan geven in de opbouw van de dijkbekleding in de dijk bij Kattendijke Zeeland. Het laat zien dat het mogelijk is om

- de waterhuishouding van de bekleding inzichtelijk te maken
- ontbrekende vlijlagen te traceren
- plotselinge veranderingen in de bekleding in kaart te brengen.

Bij Kattendijke had de kustlijn, zandbanken en de pier een significant invloed op het vochtgehalte en deze werden door de radiometer scherp in kaart gebracht. Variaties in dijkbekleding, waaronder resten van een oude dijk en het ontbreken van een vlijlaag werden goed opgepikt. De Microgolven Polarizatie Difference Index (MPDI) en een gemodelleerd bodemvocht product zijn bleken alle twee prima proxies te zijn om deze variaties in te meten.

Toch is de radiometer meer gevoelig voor bodemvochtvariaties dan voor bekledingvariaties, dit komt door het feit dat bodemvocht variaties een sterkere range hebben in dielectrische constante ten op zichte van verschillende bekleding materialen. De radiometer laat duidelijk zien waar het droog/nat is onder de bovenste laag van de bekleding. Deze informatie laat ook duidelijk zien wat de waterhuishouding van een dijk is en wat de invloed is van externe factoren zoals zandbanken, kustlijn en de aanwezigheid van een pier. Deze informatie kan desgewenst ook gebruikt worden bij het ontwerp van nieuwe dijken. Je kunt hier immers uit afleiden welke gedeelten van de dijk vaker vochtiger zijn dan andere gedeelten. Hier kan de materiaalkeuze en structuur van de bekleding op afgestemd worden.

Het gebruik van een utility quad voor het inmeten van de dijk zorgt voor een zeer snelle meting. Met een snelheid van ongeveer 5 km per uur kon een dijk ingemeten worden. Wel moet men er voor zorgen dat er niet direct in de zon gemeten wordt want dan wordt het signaal sterk verstoord. Dit heet sunglint en is vooral een probleem bij zeer zonnige dagen.

Het gebruik van twee radiometers bij het inmeten heeft ook veel voordelen. Je kunt daardoor de temperatuur invloeden minimaliseren waardoor er een nauwkeuriger signaal overblijft die je direct kunt relateren aan bodemvocht en dijkbekleding variaties.

Een nadeel van passieve microgolven radiometrie blijft echter wel de geringe penetratie diepte. Alleen variaties van de eerste meter kunnen geregistreerd worden.

Concluderend kan wel gezegd worden dat je met passieve microgolven radiometrie op een zeer snelle manier de toestand van de eerste meter van de dijkbekleding in kaart

kunt brengen zonder breekwerk te verrichten. Met een utility quad is het mogelijk om per dag 10 talen kilometers in te meten. Het signaal is echter wel complex dus zullen er wel boringen nodig zijn om de interpretatie van de metingen verder te ondersteunen.

## Referenties

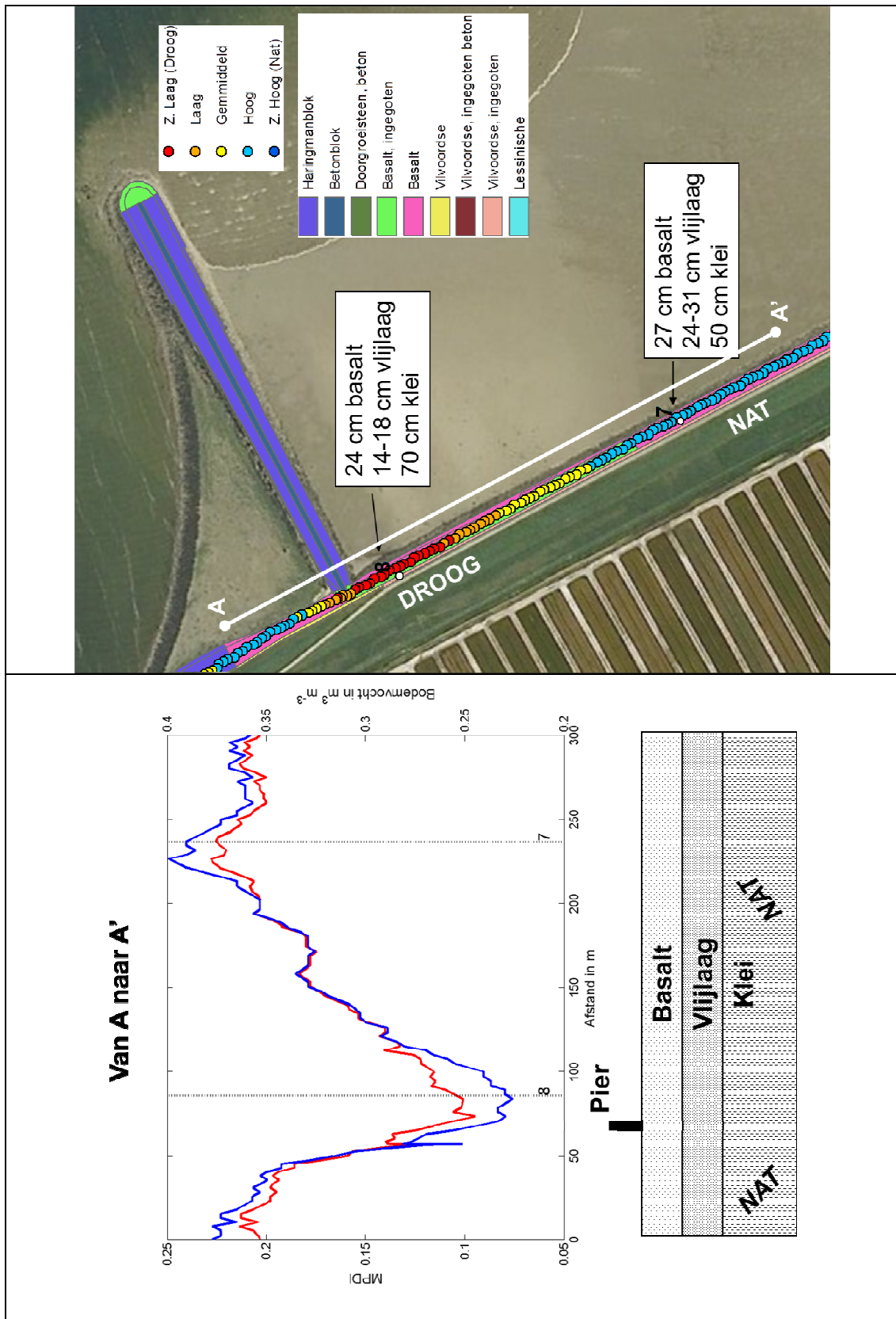
- [1] RAM de Jeu, R Haarbrink, en Y Provoost, Passieve microgolven radiometer houdt de dijken in de gaten, *Land en Water*, Aug 2011
- [2] LMTh. Swart, 2007, Remote Sensing voor inspectie van waterkeringen, Swartvast in opdracht voor Rijkswaterstaat, Delft, 140 pp, ISBN 978-90-79331-01-7
- [3] Stichting toegepast onderzoek waterbeheer, 2006, Een overzicht van meettechnieken, Dienst Weg en Waterbouwkunde Rijkswaterstaat (DWW-RWS) Delft, 106 pp, ISBN 90-577-3328-5
- [4] TT Wilheit, Radiative Transfer in a Plane Stratified Dielectric," *IEEE. Trans. Geosc. Electr.*, vol. 16, pp. 138-143, 1978.
- [5] Miramap, Determinatie van de toestand van dijkbekleding met behulp van Passieve microgolven Technologie, Een studie naar de mogelijkheden van de toepasbaarheid van mobiele L-band radiometrie voor dijksinspectie, Technisch rapport voor Rijkswaterstaat projectbureau Zeeweringen, December 2009.
- [6] JR Wang and TJ Schmugge (1980). An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 18:288-295
- [7] RAM de Jeu, TRH Holmes, R Panciere and JP Walker, Parameterization of the land parameter retrieval model for L band observations, using the NAFE05 dataset, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol.6, pp. 630-634, 2009

## Appendix A: Boringen

No.	X (RD) in m	Y(RD) in m	Dijkpaal	Profiel	Extra
1a (b)	55165	394191	1623(-20m)	25 cm Vilvoordse/beton 25 cm vlijlaag 40 cm klei 50 cm zand > 110 cm zanderige klei	De klei onder de vlijlaag had verschillende kleuren. Wat duidt op sterke temporele bodemvocht variaties
1b (o)				25 cm Vilvoordse/beton 25 cm vlijlaag 30 cm klei 50 cm zand 45 cm klei 15 cm zand > 40 cm klei	Waterpeil 110 cm onder bekleding
2a (b)	54960	394078	1625(+15m)	25 cm Vilvoordse/beton 20 cm vlijlaag 40 cm klei 50 cm zanderig klei 5 cm zand > 65 cm klei	
2b (o)				25 cm Vilvoordse/beton 25 cm vlijlaag 15 cm zanderige klei 90 cm zand > 95 cm klei	Waterpeil 110 cm onder bekleding
3	54350	394297	1634	25 cm haringmanblokken 14 cm grind 105 cm mijnsteen > 95 cm zand	Waterpeil 110 cm onder bekleding
4a	54229	394472	1636	25 cm haringmanblokken 95 cm klei > 125 cm zanderig klei	Deze boring is verricht op 22 April 2008
4b			1636+10	25 cm Vilvoordse/beton 25 cm vlijlaag 120 cm klei 70 cm zanderige klei > 15 cm zanderige klei/zand	Bovenste 70 cm klei geel, daaronder grijs
5	54191	394527	1637(-25m)	25 cm Vilvoordse/beton 15 cm vlijlaag 100 cm klei > 100 cm zanderig klei	
6	54022	394819	1640(+10m)	25 cm basalt ? cm vlijlaag 50 cm klei 35 cm kleig zand 10 cm klei 15 cm zanderig klei > 65 cm zand	
7	53920	395014	1642(+40m)	25 cm basalt 25 cm vlijlaag 50 cm klei 35 cm zand 20 cm klei > 85 cm zand	
8	53847	395146	1644(-15m)	25 cm basalt 18 cm vlijlaag 70 cm klei 15 cm zanderig klei 10 cm zand 60 cm klei > 40 cm zand	

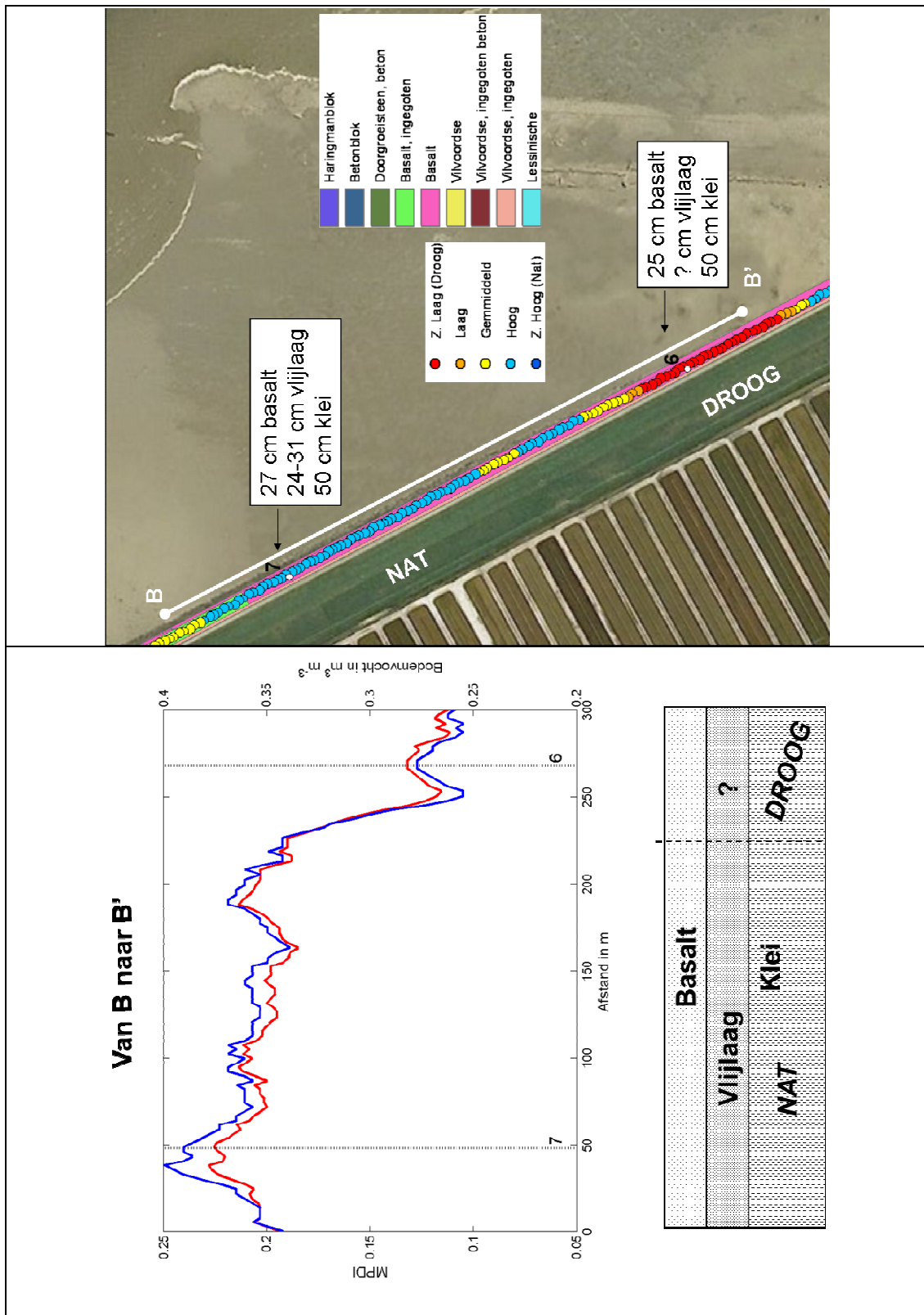
Tabel II: profiel beschrijving van de gezette boringen. (b) staat voor boven en (o) voor onder aan de dijk.

## Appendix B: Profiel A-A'



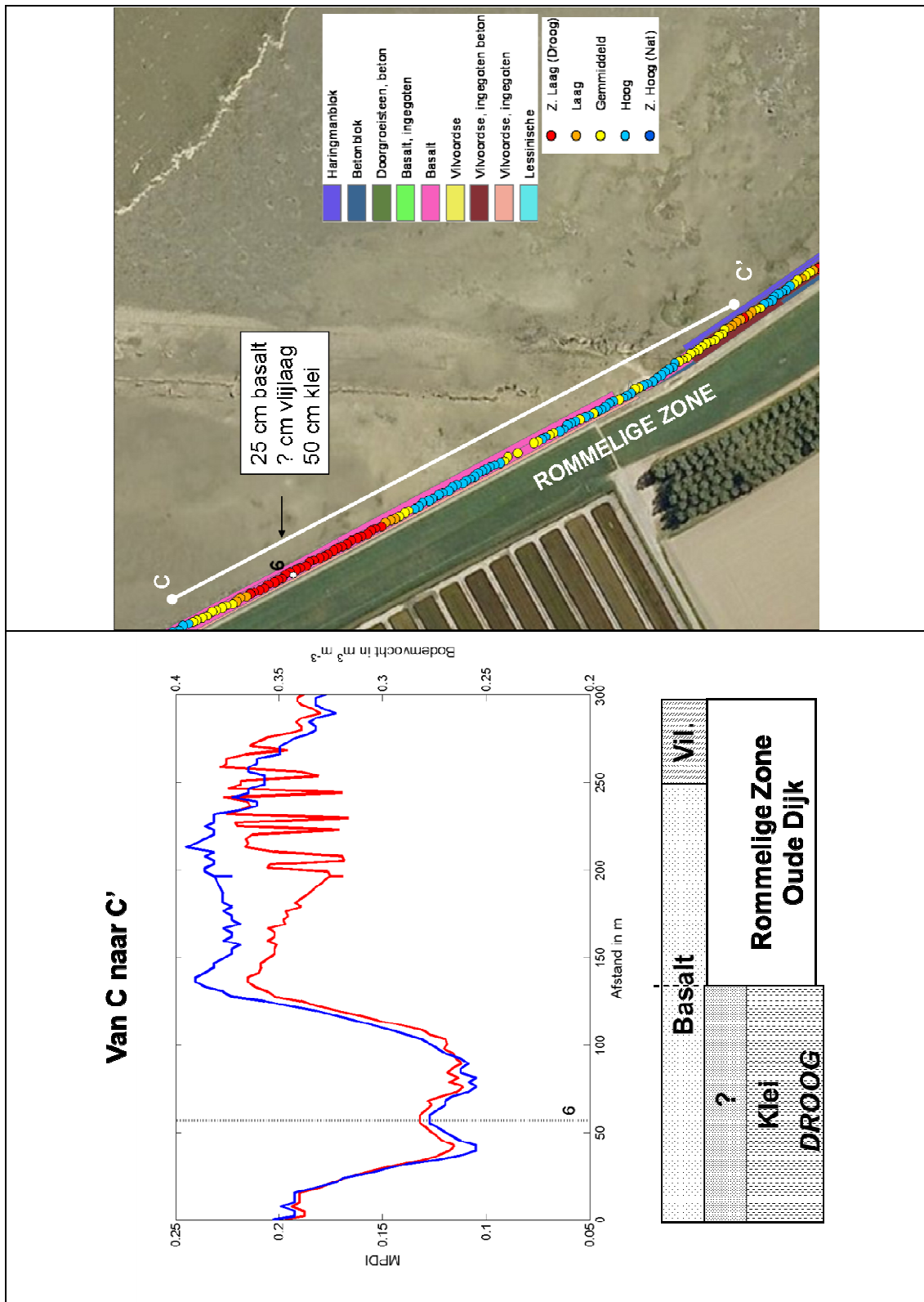
Figuur 4: Boven A-A' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.

## Appendix B: Profiel B-B'



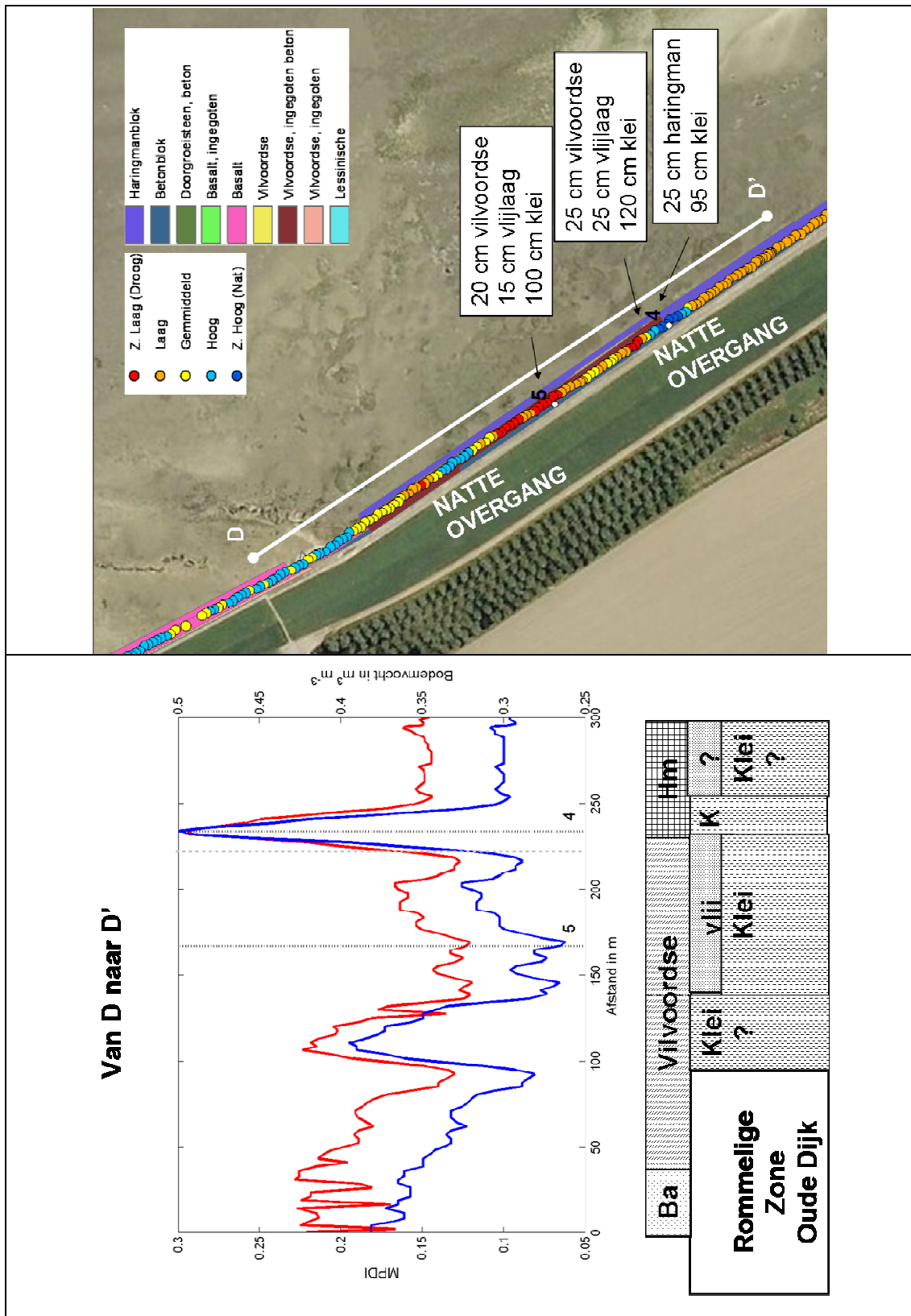
Figuur 5: Boven B-B' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.

## Appendix B: Profiel C-C'



Figuur 6: Boven C-C' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.

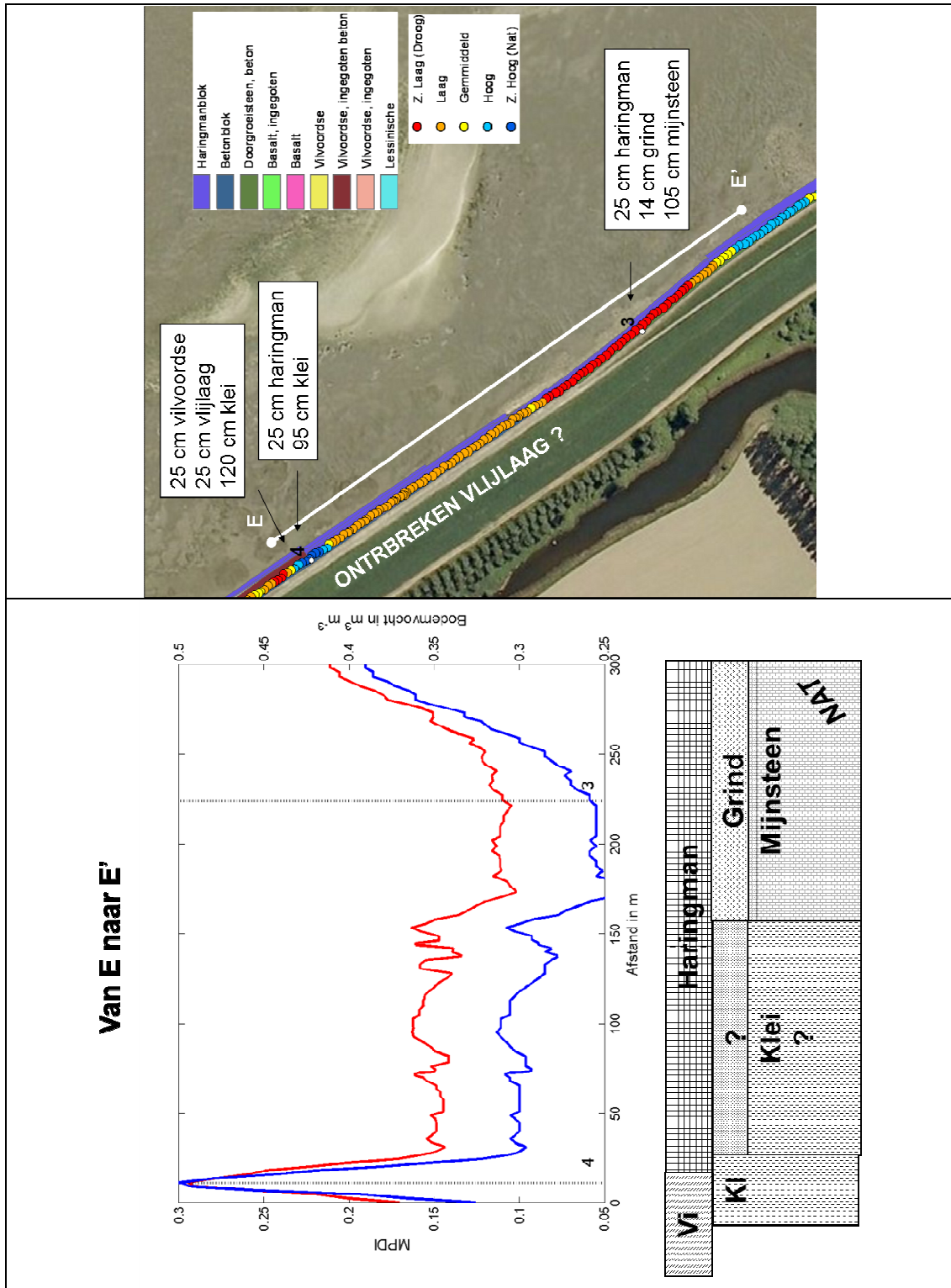
## Appendix B: Profiel D-D'



Figuur 7: Boven D-D' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.



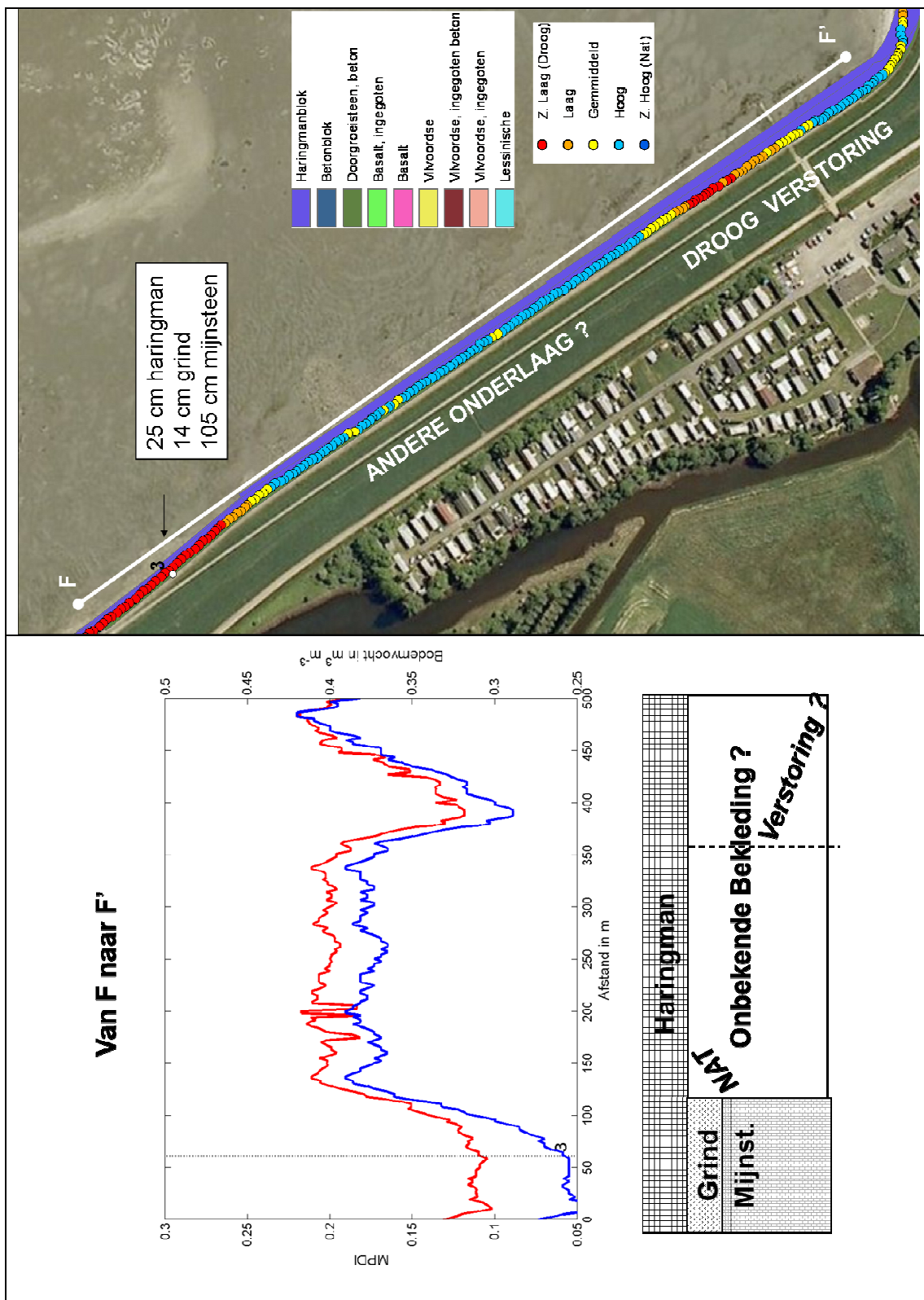
## Appendix B: Profiel E-E'



Figuur 8: Boven E-E' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.

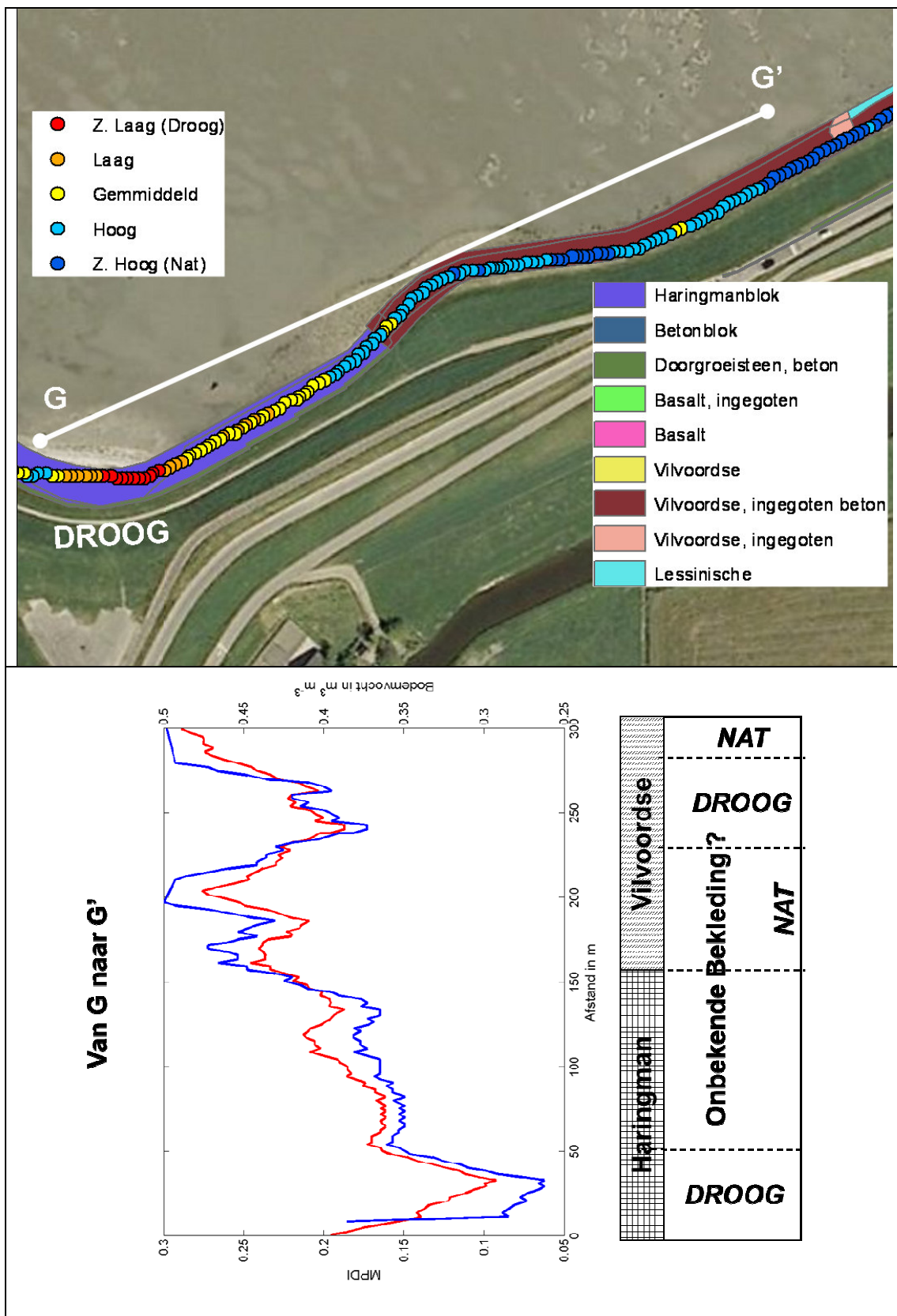


## Appendix B: Profiel F-F'



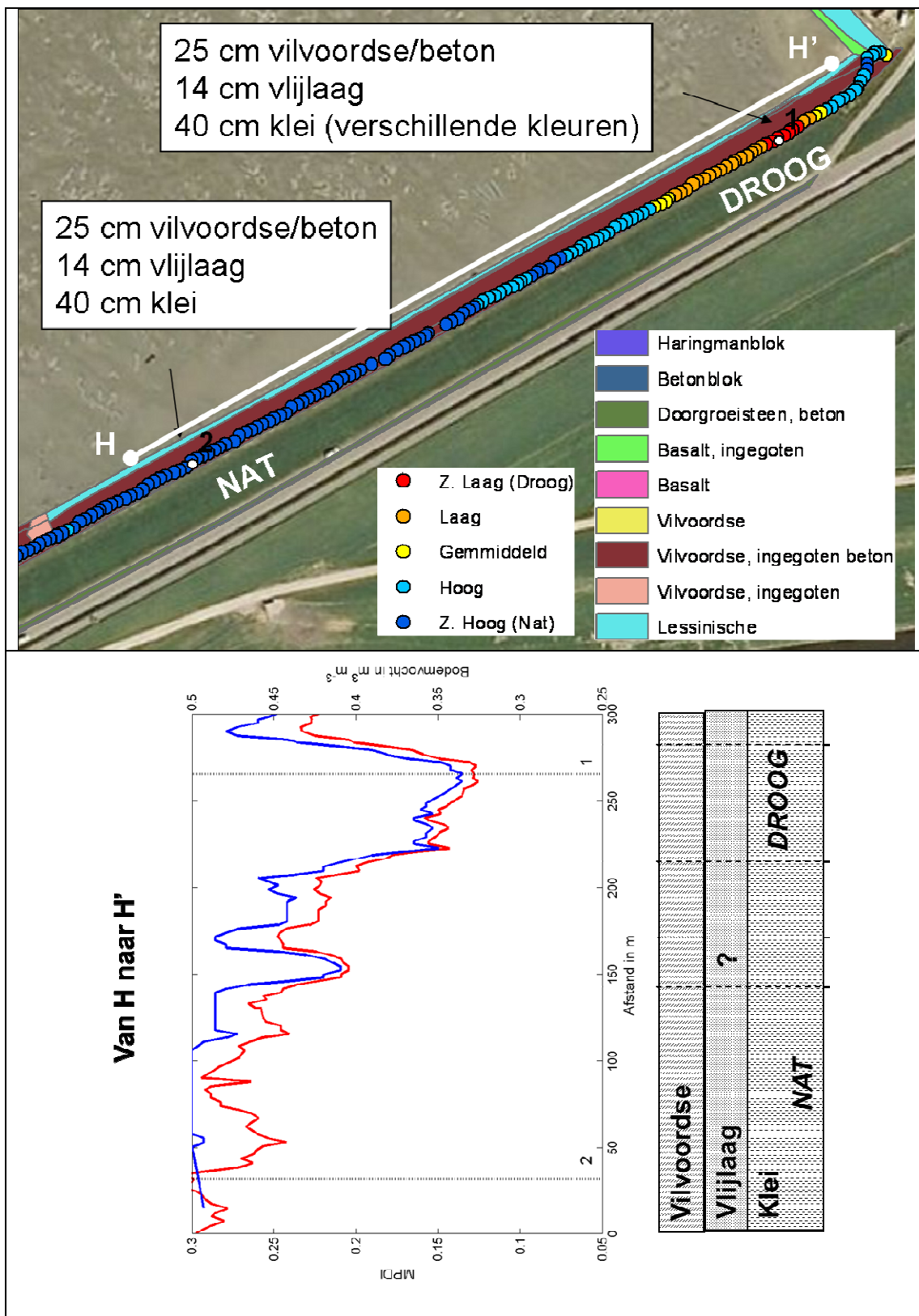
Figuur 9: Boven F-F' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.

## Appendix B: Profiel G-G'



Figuur 10: Boven G-G' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.

## Appendix B: Profiel H-H'



Figuur 11: Boven H-H' profiel meting van de MPDI gepresenteerd op een Google Earth image. Onder profiel meting van MPDI (rood) en bodemvocht (blauw) met daaronder een vrije interpretatie van de dijkbekleding. De boringen aangegeven met grijze lijnen.