

Determinatie van interne variaties in de Dijkbekleding bij Sint Philipsland met behulp van Passieve Microgolven Radiometrie

Een vervolgstudie naar de mogelijkheden van de toepasbaarheid van mobiele L-band radiometrie voor dijkinspectie.



Amsterdam en Houten, Oktober 2010

The logo for miramap, featuring a small globe icon above the word "miramap" in a blue, lowercase, sans-serif font.

The logo for Vrije Universiteit Amsterdam, featuring a stylized blue bird or wing icon above the text "vrije Universiteit" and "amsterdam" in a smaller, lowercase, sans-serif font.

Dit onderzoek is uitgevoerd door

Miramap B.V. (Roland Haarbrink)
Pascalweg 23
4104 BE Culemborg

in samenwerking met:

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

Vrije Universiteit Amsterdam (dr. Richard de Jeu en Robert Parinussa)
Afdeling Hydrologie en GeoMilieuWetenschappen
De Boelelaan 1085
1081 HV Amsterdam

Foto voorkant: Dijk nabij Sint Philipsland, Zeeland

Dankwoord

Dank gaat uit naar de uitvoerende tak van Rijkswaterstaat die ons de mogelijkheid hebben geboden om de dijk bij Sint Philipsland te meten en ons extra informatie hebben gegeven van de dijk.

Samenvatting

Miramap B.V. heeft samen met Rijkswaterstaat Projectbureau Zeeweringen en de Vrije Universiteit Amsterdam een studie uitgevoerd naar de mogelijkheden van een nieuwe microgolf radiometrie scanner om variaties binnen in de dijkbekleding te determineren. Uit een synthetische studie binnen dit project, en uit de resultaten van eerder uitgevoerde projecten in Zeeland is namelijk gebleken dat de microgolven observaties zowel gevoelig zijn voor bodemvocht als voor variaties in laagdikte als voor luchtgaten. De hoofdvraag binnen dit onderzoek is gericht op de interne laagdiktes en stelt de vraag of het mogelijk is om met behulp van microgolven radiometrie verschillen in laagdiktes te kunnen determineren.

Een dijktraject nabij Sint Philipsland was gekozen voor dit onderzoek omdat hier de interne structuur van de dijk sterk varieert over een relatieve korte afstand. Drie transecten van ongeveer 2000 m waren gelopen over deze dijk. Na de analyse van deze transecten zijn er vier boringen verricht op plekken waarbij er een sterke anomalie te zien was in het microgolven signaal. Uit de boringen bleek dat er vooral een variatie in bodemvocht gehalte te zien was. Verder bleek ook dat alleen de lage MPDI observaties geschikt waren voor het voorspellen van laagdiktes.

Uit deze resultaten kunnen we daarom ook voorzichtig concluderen dat de variatie die gemeten werd door de radiometer, in dit geval voor een groot deel bepaald wordt door de variatie in bodemvocht en in mindere mate door de variatie in lagen. Op beperkte schaal was het mogelijk om de laagdikte te bepalen. Met een numeriek 3 lagen model hebben we voor de lage MPDI waarden de minimale diepte van het kleipakket bepaald. Dit was over het algemeen rond de 1.5 m diep. De eerste resultaten zien er veelbelovend uit, zeker omdat ze direct vanuit de theorie te onderbouwen zijn. Nadere ontwikkeling blijft echter nog nodig om de bodemvocht component verder te isoleren om zo tot een meer uitgekristalliseerde methode te komen waarbij we de laagdiktes kunnen determineren.

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	5
2 Theorie en Technologie.....	6
2.1 Theoretische Achtergrond.....	6
2.2 L-band Radiometer.....	7
3. Methodologie.....	8
4 Studiegebied.....	8
5. Resultaten en Discussie.....	9
5.1 Synthetische Analyse.....	9
5.2 Dijkmetingen.....	11
5.3 Boringen.....	13
5.4 Bepaling van de Kleibasis.....	13
6. Conclusies en Aanbevelingen.....	14
Referenties.....	16

1. Inleiding

De afgelopen twee jaar 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 dijk inspectie. Uit het lopende onderzoek is al gebleken dat je met L-band radiometrie informatie kunt verkrijgen over variaties in de ondergrond tot +/- 1 m en dat het mogelijk is om lucht gaten te determineren [1].

De hoofdvraag binnen dit onderzoek gaat iets verder en kijkt of het mogelijk is om met behulp van microgolven radiometrie plotselinge verschillen in laagdiktes te kunnen determineren. Daarnaast willen we kijken of het mogelijk is om laagdiktes te bepalen met microgolven observaties.

Tot nu toe wordt de kwaliteit van dijken meestal steekproefwijs gecontroleerd en vaak wordt dit gedaan met een visuele inspectie en eventueel een locale analyse [2]. Voor het visueel inspecteren van een dijk is kennis en ervaring nodig. De inspecteurs die deze inspectie uitvoeren worden hiervoor opgeleid en hebben een kader waarmee zij de inspecties uitvoeren. Voordelen van zo'n inspectie is dat ze snel en doelgericht zijn, een nadeel is dat de rapportage sterk persoonsafhankelijk zijn en daardoor ze ook een mate van subjectiviteit bevatten. Daarnaast zijn de resultaten soms wat moeilijk te vergelijken met andere observaties.

Wanneer de visuele inspectie niet voldoende is, kan er gekozen worden voor een locale analyse. Verschillende meettechnieken kunnen dan gekozen worden, waaronder simpele boringen, sonderingen, valgewicht-deflectie, vinproeven, elektrische sonderingen en waterhoogte metingen. Al deze verschillende methoden geven je informatie over de ondergrond, maar dan wel van 1 locatie.

Met behulp van remote sensing kun je wel ruimtelijke informatie verkrijgen in een korte tijd. Het is een meetmethode waarbij je informatie verzamelt zonder dat je in contact komt met het onderzoeksobject. Voor dijkinspectie zijn er al een aantal remote sensing technieken in omloop. Zo maakt men gebruik van grondradar om variaties in de ondergrond te bepalen [3], en laseraltimetrie [4] en radar interferometrie [5] om vervormingen van dijken te determineren.

De potentiële mogelijkheden van passieve microgolven radiometrie komen de laatste jaren steeds meer in de belangstelling, mede door het veelvuldig gebruik van radiometrie voor wetenschappelijke doeleinden. Zo worden er in de wetenschap radiometers toegepast om op verschillende schalen bodemvocht [6] sneeuw en ijsdikte [7], neerslag [8] en vegetatie [9] te meten.

Miramap (www.miramap.com) heeft met ondersteuning van de Business Incubator van de European Space Agency in Noordwijk, speciaal voor water- en waterkeringenbeheerders in Nederland, een passieve microgolf scanner ontwikkeld die vanuit een vliegtuig de droogtevariaties in de grond nauwkeurig in beeld brengt. Uit recent onderzoek is ondermeer gebleken dat L-band radiometrie vanuit vliegtuigen een bijdrage kan leveren aan de verbetering van hydrologische modellen en zeer nauwkeurig bodemvocht kan registreren van een afstand met een

nauwkeurigheid binnen de 3 Vol.% [10]. Het systeem van Miramap is operationeel en meet op afstand nauwkeurig bodemvocht met een resolutie van +/- 65 m.

Voor het meten van de dijkbekleding heeft Miramap een handzame L-band radiometer ontwikkeld. Deze is voor deze studie bijvoorbeeld gemonteerd op een auto (zie Figuur 1), maar kan ook met de hand of via een karretje gemeten worden. Deze flexibiliteit demonstreert ook gelijk het grote voordeel van microgolven radiometrie ten opzichte van andere technieken; Je kunt op een niet-destructieve manier snel ruimtelijke informatie verkrijgen over de toestand van de dijkbekleding.



Figuur 1: De Mobiele L-band microgolven scanner van Miramap op de dijk bij Sint Philipsland

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 polarizatie (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 dielectrische constante van de laag en kan eenvoudig worden uitgerekend aan de hand van de Maxwell vergelijkingen [11].

De dielectrische 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 dielectrische 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 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.

Kort samengevat kan dus worden geconcludeerd dat een observatie van een L-band radiometer een functie is van de 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 de 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 scanner. 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. De observaties zijn gemeten in zowel horizontale polarisatie en verticale polarisatie. Om van de horizontale polarisatie over te schakelen naar de verticale, dient het kijkgedeelte van de radiometer een kwartslag te worden gedraaid.

Voor elke meting moet de radiometer gecalibreerd worden om een range te bepalen. Dit wordt gedaan door een observatie van het water (cold load) te nemen en van je lichaam (hot load). Over het algemeen zit de natuurlijke emissie tussen deze twee uiterste en zorgt deze calibratie voor een goede schatting van de werkelijke helderheidstemperaturen. De radiometer is geschikt voor het meten van trajecten over dijken doordat deze kan gemobiliseerd op een buggy of een auto zoals te zien is in Figuur 1. Gezien de lengte van het terrein is in dit geval de radiometer gemonteerd aan een Auto.

De radiometer zelf bevat een simpele aan/uit knop waarmee de meting start en stopt. De radiometer schrijft elke seconde een meetwaarde weg en slaat deze op, op een SD geheugen kaart. Verder zit ook een GPS ingebouwd welke automatisch ook de precieze locatie opslaat op de SD kaart.

Na de meting wordt de SD kaart verwijderd uit de radiometer en ingelezen op een pc. De gemeten data wordt dan via de pc omgezet naar helderheidstemperaturen met de betreffende GPS-locatie erbij.

3. Methodologie

Voor het analyseren van de toepasbaarheid van deze nieuwe technologie om te kijken of hij gevoelig genoeg is om laagdiktes te determineren zijn er drie transecten gelopen van ongeveer 2000 m over de dijk bij Sint Philipsland. Dit is een stuk dijk waarvan de gelaagdheid en het materiaal voor de dijkbekleding voor een groot deel bekend is en ook sterk fluctueert. Na de transect zijn er vier boringen gezet op locaties waar de microgolf data sterk fluctueerden. Deze boringen zijn geanalyseerd en vergeleken met de microgolven observaties.

4. Studiegebied

Voor dit onderzoek zijn er metingen verricht in Zeeland op de dijk ten zuiden van Sint Philipsland (aangegeven in Figuur 2) tussen dijkpalen 682 en 701. De metingen zijn allemaal verricht op dinsdag 18 mei 2010 bij droge omstandigheden. Op de dijk zijn 3 transects gelopen met een afstand van ongeveer 2000 m. De transect bovenaan de dijk is deels ingemeten met de auto (zie Figuur 1). De transecten midden op de dijk en onderaan de dijk zijn ingemeten met een karretje. Na analyse zijn er op 1 september 2010 vier boringen verricht tot 1 m diepte verricht (zie Figuur 3). Twee boringen rondom de dijkpalen 685 en 686 en twee rondom dijkpaal 690. Tijdens de boringen zijn er ook met de radiometer metingen verricht ter vergelijking.



Figuur 2: Detailkaart van de meetlocatie bij Sint Philipsland.



Figuur 3: Boring op locatie bij dijkspaal 690. In dit geval is er geboord door 16 cm fixstone bekleding. Daaronder werd droog zand aangetroffen.

5. Resultaten en Discussie

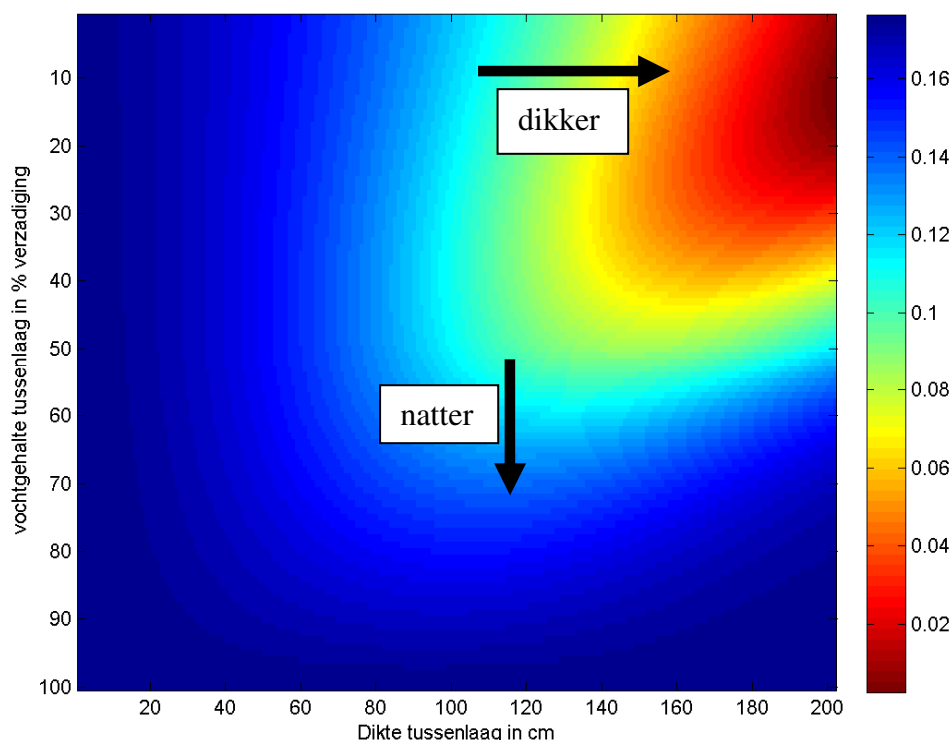
5.1. Synthetische Analyse

De vraag of passieve microgolf radiometrie geschikt is om laagdiktes te determineren kan beantwoord worden met een synthetische analyse. Als we de ondergrond mathematisch beschrijven met behulp van vergelijking 1 en 2 waarbij we uitgaan van een dijklichaam met drie lagen; bijvoorbeeld een 20 cm dikke betonlaag op de top,

een tussenlaag die varieert in dikte en vocht en een natte dikke kleilaag aan de basis, dan kunnen we MPDI's simuleren als functie van

- tussenlaagdikte en
- bodemvocht

We gaan uit van 0 tot 100 % verzadiging. Figuur 4 geeft de MPDI matrix, als resultaat van deze analyse. Hier valt op te maken dat zowel laagdikte als bodemvocht een impact hebben op de MPDI. De MPDI gaat omhoog als het nat wordt (vertikale pijl in Figuur 4). En de MPDI gaat naar beneden als de droge tussenlaag dikker wordt (horizontale pijl in Figuur 4). Deze twee processen maken de interpretatie van de MPDI die boven de dijk met de radiometer meten ingewikkeld omdat zowel laagdikte variatie als bodemvocht een impact hebben op de MPDI. Wat verder opvalt is dat bij hoge MPDI's je zeer veel mogelijkheden hebt (en dus nauwelijks een oplossing) maar bij lage MPDI's worden de mogelijkheden sterk gereduceerd tot een kleine bodemvocht en laagdikte range. Dit maakt deze range zeer interessant voor dijkonderzoek want als de MPDI bijvoorbeeld kleiner is dan 0.05 (het rode gebied in Figuur 4) zijn er in deze simulatie veel minder oplossingen mogelijk. In dit geval moet het vocht tussen de 0 en 30 % verzadiging zitten en de dikte van de tussenlaag moet dan minstens 1.5 m zijn.



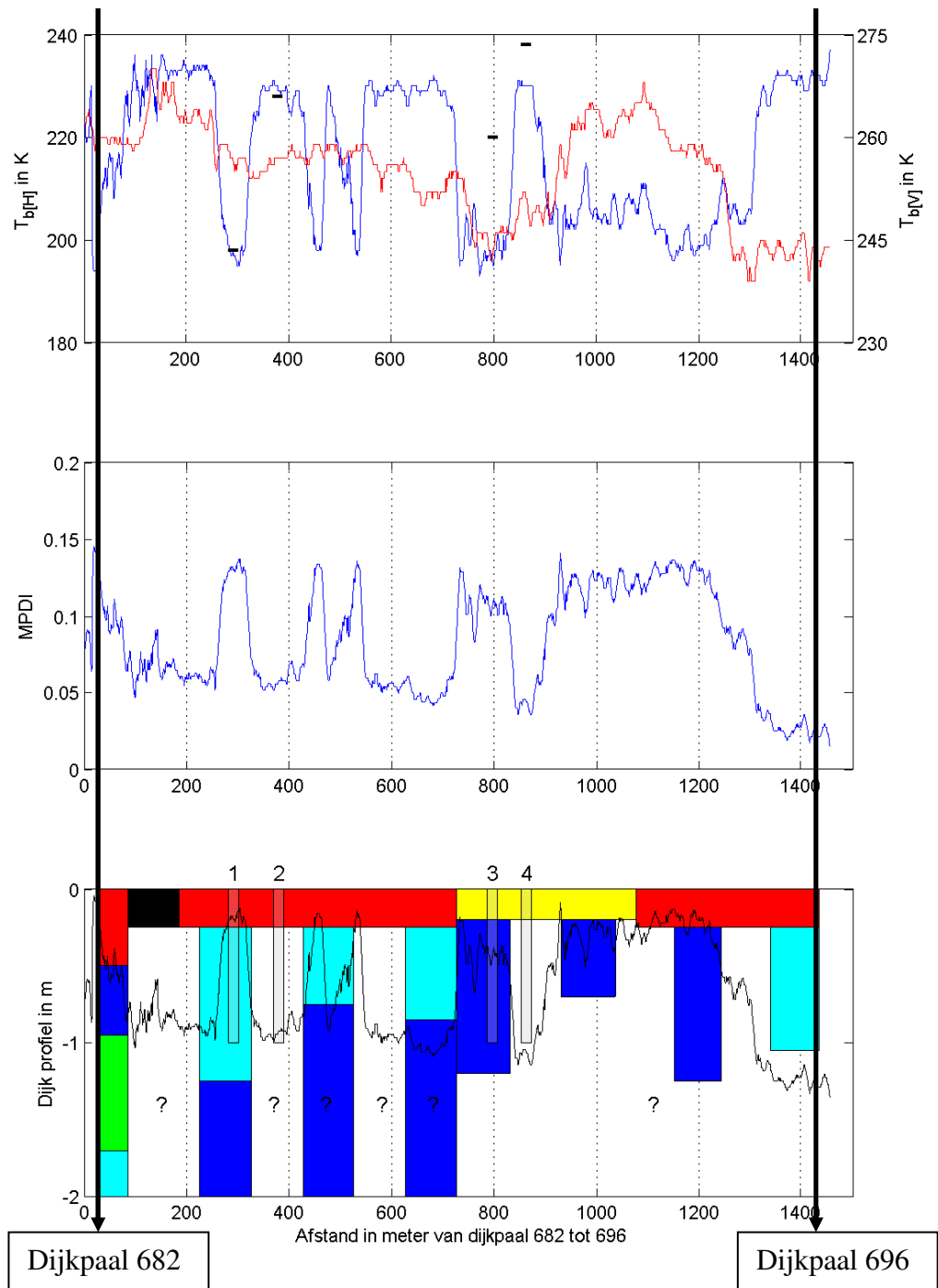
Figuur 4. Resultaat van een numerieke simulatie met het microgolven model waarbij we de MPDI simuleren over de gehele vocht range en voor variërende diktes van de tussenlaag tussen 0 en 200 cm. In deze simulatie zijn we uitgegaan van een 25 cm toplaag van droog beton en een verzadigde kleilaag als basis.

5.2. Dijkmetingen

Figuur 5 geeft de resultaten weer van de metingen op de dijk bij Sint Philipsland. Deze transect beschrijft een de transect midden op de dijk. De gelopen transect boven aan de dijk was te sterk beïnvloed door de overgroeide vegetatie waardoor het signaal te sterk gedempt was om er nog informatie over laagdikte uit te halen. Deze transect hebben we daarom binnen dit project buiten beschouwing gelaten. We focussen ons hier op de betrouwbare meting midden over de dijk tussen dijkpalen 682 en 696. Als we naar Figuur 5 kijken zien we een aantal bijzonderheden.

We zien een zeer sterke dynamiek in de horizontaal gepolariseerde helderheids temperatuur van 40 K wat resulteert in een range van 0.1 voor de MPDI. Wat verder opvalt, als we het signaal van links naar rechts nalopen is een enigszins sterkere fluctuatie in MPDI als we over de basaltbekleding lopen. Tussen dijkpalen 684 en 685 is de ondergrond waarschijnlijk een stuk natter. Een relatief droge zone wordt daarna afgewisseld door twee natte delen rondom dijkpalen 686 en 687 bij de haringmanblokken. Er is een scherpe overgang in de metingen wanneer we bij dijkspaal 689 van haringman naar fixstone gaan. Op dit raakvlak schiet de MPDI omhoog van 0.06 naar 0.13. De overgang lijkt hier in alle waarschijnlijkheid te komen door de verandering in de ondergrond (bij de fixstone zit het kleipakket heel ondiep) omdat later de overgang van fixstone naar beton na dijkspaal 692 minder sterk is. Op één droger stuk daargelaten - tussen dijkpalen 690 en 691 - blijft de MPDI hoog tot dijkspaal 695. Dan neemt hij geleidelijk af tot droger 0.03 op het laatste stuk.

Op verschillende plekken op de dijk was er informatie bekend over de dijkbekleding. Dit was informatie die verkregen was uit een steentoets. Deze informatie is toegevoegd in het onderste plaatje van Figuur 5. Hier valt op dat er in principe weinig relatie schijnt te zijn tussen de MPDI metingen en de gegevens van de steentoets. Om het gedrag van MPDI beter te begrijpen is er besloten om vier boringen uit te voeren waar we een sterke anomalie hebben gemeten in de MPDI. Twee locaties werden gekozen onder de haringman blokken, waarvan één met een hoge MPDI van 0.15 en één met een lage MPDI van 0.05. Verder zijn er ook twee locaties geselecteerd bij de fixstone bekleding. Hier ook één met een hoge MPDI van 0.13 en één met een lage MPDI van 0.05.



Figuur 5. De gemeten helderheidstemperaturen en berekende MPDI voor het middelste transect. Het bovenste figuur geeft de helderheids temperaturen waarbij horizontaal gepolariseerde helderheidstemperaturen zijn aangegeven met blauw and de verticale met rood. De metingen van de horizontaal gepolariseerde helderheids temperaturen tijdens de boringen zijn aangegeven met dikke horizontale streepjes. Het middelste figuur geeft de MPDI en onderin de MPDI +extra gegevens van de ondergrond die door Rijkswaterstaat zijn aangeleverd. Rood = beton, geel=fixstone, lichtblauw=mijnsteen, donkerblauw=klei en groen=zand. Verder zijn de locatie van de vier boringen aangegeven in het onderste figuur.

5.3. Boringen

Op 1 september 2010 zijn deze vier boringen verricht en de resultaten van deze boringen zijn te vinden in Tabel 1. Naast de boringen zijn er ook microgolven observaties gedaan en de resultaten van de horizontaal gepolariseerde observaties zijn te vinden in de onderste figuur van Figuur 5 in de vorm van de dikke horizontale streepjes.

Wat direct opvalt is dat er niet echt grote verschillen zitten tussen de verschillende profielen, maar dat er ook geen klei maar zand wordt aangetroffen. Het profiel wat de steentoets aangaf was significant anders dan de boringen. Wat verder opviel was dat de horizontale polarisatie observaties overeenkwamen voor boring 1 en 2 maar significant hoger waren voor 3 en 4, wat daar dus duidt daar op vochtveranderingen tussen 18 mei en 1 september. Verder bleek dat boring 4 enigszins droger was dan boring 3. Dit versterkt ons vermoeden dat de hoge MPDI waarden met name wordt veroorzaakt door natte zones in het dijklichaam en in dit geval in mindere mate door veranderingen in gelaagdheid. Daarnaast blijkt ook uit de synthetische analyse dat er een heel scala aan combinaties mogelijk zijn om een hoge MPDI te produceren (zie Figuur 4). Interessanter is het daarom ook om juist naar de lage MPDI waarden te kijken.

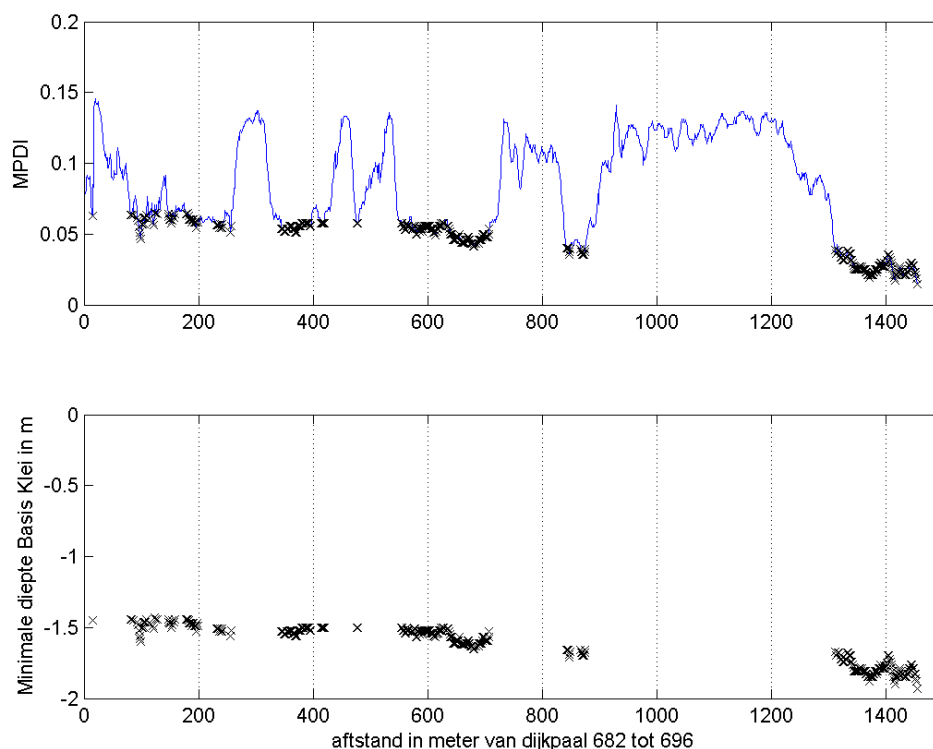
No.	X (RD) in m	Y (RD) in m	Profiel	Extra Info
1	69143	403419	0-20 cm Haringman blokken dun laagje grind 20-40 cm mijnsteen 40-55 cm zand 55-90 cm mijnsteen 90-100 cm nat zand	Dijkpaal 685-34m Haringman blokken waren van goede kwaliteit
2	69231	403406	0-20 cm Haringman blokken 20-40 cm vochtig mijnsteen 40-100 cm droog mijnsteen daaronder nat zand	Dijkpaal 686-43m Haringman blokken waren van slechte kwaliteit.
3	69647	403361	0-16 cm Fixstone 16-100 cm droog zand	Dijkpaal 690-30m
4	69706	403370	0-19 cm Fixstone 19-100 cm droog zand	Dijkpaal 690+31m

Tabel 1. Profiel beschrijving van de vier gezette boringen

5.4. Bepaling van de Kleibasis

Als we de dijk simplificeren in 3 lagen waarbij we een aannemen dat de top 20 cm uit beton bestaat, een onbekend dikke tussenlaag (met een onbekend vochtgehalte) en een verzadigde kleibasis kunnen we de minimale diepte van de kleilaag modelleren met behulp van een numerieke simulatie. Voor het geval van de transect van midden op de dijk nemen we verder aan dat alle hoge MPDI waarden te wijten zijn aan bodemvocht fluctuaties en alleen de lage MPDI waarden worden geselecteerd omdat voor lage MPDI waarden de vrijheidsgraden veel kleiner zijn (Zie figuur 6). Een MPDI matrix zoals Figuur 4 wordt geproduceerd en de minimale diepte van de basis van de kleilaag wordt aan de hand van deze matrix dan bepaald. Dit levert na modellering voor onze

dataset kleilaag dieptes van rond de 1.5 m op voor een groot deel van het transect. Dit lijkt in eerste instantie niet goed te kloppen met de meeste gegevens van de steentoets, maar uit de boringen is al gebleken dat we voorzichtig moeten zijn met de steentoets omdat de boringen ook een ander verhaal gaven. Het blijkt echter spijtig dat de boringen maar tot 1 m diep gingen.



Figuur 6. Bepaling van de kleibasis uit modellering van lage MPDI waarden

6. Conclusies en Aanbevelingen

Uit het beschreven onderzoek om door middel van het gebruik van passieve radiometrie (L-Band) meer inzicht te krijgen in het bepalen van laagdiktes binnen in het dijklichaam bij Sint Philipsland is gebleken dat we in principe in staat zijn om met behulp van een drielagen model de basis van de onderste te laag te schatten. Dit werkt echter alleen met lage MPDI velden. De hoge MPDI velden die we gemeten hebben in Sint Philipsland zijn waarschijnlijk de veroorzaakt door vochtige zones (en in mindere mate door het verspringen van lagen). De vier boringen hebben dit min of meer geverifieerd. De synthetische analyse bevestigt ook duidelijk dat alleen de lage MPDI waarden geschikt zijn voor het schatten van laagdiktes.

Uit de boringen is verder gebleken dat de gemeten profielen heel sterk afwijken van de steentoets en dat met name bij boring 3 en 4 nu de passieve microgolven signaal significant hoger was, wat duidt op recente vochtveranderingen.

Met een numerieke analyse voor een simplistisch 3 lagen model is de basis van de kleilaag gesimuleerd uit de lage geobserveerde MPDI data. De minimale diepte van de kleibasis is geschat op gemiddeld 1.5 m.

Concluderend kan worden gezegd dat het gebruik van passieve radiometrie potentieel heeft om de basis van de kleilaag te bepalen, mits de constructie van de dijk simpel is en droog. Alleen lage MPDI waarden zijn dan te bruikbaar voor deze schatting, wat dus betekent dat je niet overal een schatting kunt maken (zeker niet als het vochtig is). Met de passieve microgolven kun je dus de toestand van de dijkbekleding beter in kaart te brengen zonder breekwerk te verrichten. De radiometer is compact en kan onder verschillende voertuigen gemonteerd worden waardoor het mogelijk is om grote stukken dijk in een relatief korte tijd te inspecteren. Desalniettemin moeten we toch voorzichtig zijn met deze resultaten omdat met name, de bepaling van het basis klei nog in ontwikkeling is. Het meerdere malen meten van een dijk en het zorgvuldig kalibreren van de radiometer kan ervoor zorgen dat we de nauwkeurigheid van de bepaling van laagdiktes significant omhoog kunnen schroeven. Voor microgolven is er echter wel de beperking van 3 lagen. Voor meer lagen zal extra informatie van andere meetmethoden noodzakelijk zijn.

Referenties

- [1] RAM de Jeu, R Parinussa, L Biemond, R Haarbrink, A Shutko, F Demontoux, and Y Provoost, Safety inspection of levees with L-band Radiometry, In proceedings, Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad) 2010, 96-98, doi: 10.1109/MICRORAD.2010.5559583
- [2] Technische Adviescommissie voor de waterkeringen, 2002, Technisch rapport asfalt voor waterkeringen. Dienst Weg en Waterbouwkunde Rijkswaterstaat (DWW-RWS) Delft, 342 pp, ISBN 90-369-5519-X
- [3] Rijkswaterstaat, 2005, Veiligheidsbeoordeling van Asfaltdijkbekledingen - Achtergrondrapport bij het toetsen van asfaltdijkbekledingen volgens het voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV),
- [4] L.M.Th. Swart, 2007, Remote Sensing voor inspectie van waterkeringen, Swartvast in opdracht voor Rijkswaterstaat, Delft, 140 pp, ISBN 978-90-79331-01-7
- [5] Stichting toegepast onderzoek waterbeheer, 2006, Een overzicht van meettechnieken, Dienst Weg en Waterbouwkunde Rijkswaterstaat (DWW-RWS) Delft, 106 pp, ISBN 90-577-3328-5
- [6] R. A. M. de Jeu, W. Wagner, T. R. H. Holmes, A. J. Dolman, N. C. van de Giesen, and J. Friesen, "Global Soil Moisture Patterns Observed by Space Borne Microwave Radiometers and Scatterometers," *Surveys in Geophysics*, vol. 29, pp. 399-420, 2008.
- [7] A. T. C. Chang, J. L. Foster, M. Owe, D. K. Hall, and A. Rango, "Passive and Active Microwave Studies of Wet Snowpack Properties," *Nordic Hydrology*, vol. 16, pp. 57-66, 1985.
- [8] F. J. Wentz, L. Ricciardulli, K. Hilburn, and C. Mears, "How much more rain will global warming bring?," *Science*, vol. 317, pp. 233-235, 2007.
- [9] T. J. Jackson and T. J. Schmugge, "Vegetation effects on the microwave emission of soils," *Remote Sensing of Environment*, vol. 36, pp. 203-212, 1991.
- [10] R. A. M. de Jeu, T. R. H. Holmes, R. Panciera, and J. P. Walker, "Parameterization of the Land Parameter Retrieval Model for L-Band Observations Using the NAFE'05 Data Set," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, pp. 630-634, 2009.
- [11] T. T. Wilheit, "Radiative Transfer in a Plane Stratified Dielectric," *IEEE-Trans. Geos. Electr.*, vol. 16, pp. 138-143, 1978.