

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 dijkinspectie.



Amsterdam/Culemborg, December 2009

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

The logo for Vrije Universiteit Amsterdam, featuring a stylized blue bird 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, Lodewijk Biemond, Robert Parinussa)
Afdeling Hydrologie en Geo-Wetenschappen
De Boelelaan 1085
1081 HV Amsterdam

Foto voorkant: De mobiele L-band passieve microgolven scanner op de dijk bij Colijnsplaat

Dankwoord

Dank gaat uit naar de uitvoerende tak van Rijkswaterstaat en de verschillende aannemersbedrijven die ons allemaal openhartig hebben ontvangen en geholpen hebben met het verkrijgen van de dijkprofielen en verschillende materialen van de dijkbekleding.

Samenvatting

Miramap B.V. heeft samen met Rijkswaterstaat Projectbureau Zeeweringen en de Vrije Universiteit Amsterdam als een follow up studie de potentiële mogelijkheden van een nieuwe microgolf radiometrie scanner onderzocht om anomalieën en laagdiktes van de dijkbekleding te detecteren.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de microgolf radiometer scanner in staat is om

- 1) verschillen in laagdiktes en materialen in de dijkbekleding te determineren
- 2) luchtgaten te traceren
- 3) verschillen in bodemvocht condities te meten.
- 4) de basis van de kleilaag te schatten

Het direct kwantificeren van de dikte van alle lagen binnen in de dijkbekleding is echter nog beperkt mogelijk omdat de variatie van bodemvocht binnen in de bekleding een dominante rol speelt en een sterke impact heeft op de directe kwantificatie van de laagdikte. Geadviseerd wordt om de dijkbekleding repeterend te monitoren onder verschillende hoeken met een L-band radiometer, en bodemvocht en temperatuur sensoren. Op deze manier is het mogelijk om de impact van bodemvocht op de schatting van de laagdikte te minimaliseren. Bodemvocht is namelijk sterk tijdsafhankelijk en door een dijkbekleding onder verschillende condities te monitoren is het mogelijk om het dynamische karakter van bodemvocht eruit te filteren.

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	5
1.1 Algemeen.....	5
1.2 Hoofdvragen.....	6
2 Theorie en Technologie.....	7
2.1 Theoretische Achtergrond.....	7
2.2 L-band Radiometer.....	9
3. Methodologie.....	10
4 Studie gebieden.....	11
4.1. Overzicht.....	11
4.2 Colijnsplaat.....	11
4.3 Ouwerkerk.....	12
4.4 Baarland.....	13
5. Resultaten en Discussie.....	14
5.1 Colijnsplaat.....	14
5.2 Ouwerkerk.....	16
5.3 Baarland.....	17
5.4 Bepaling van de klei basis.....	19
6. Conclusies en Aanbevelingen.....	20
Referenties.....	21

1. Inleiding

1.1 Algemeen

Het projectbureau Zeeweringen (www.Zeeweringen.nl) renoveert alle onvoldoende getoetste (steen)bekledingen op dijken met een totale lengte van ongeveer 300 kilometer in Zeeland langs de Westerschelde, de Oosterschelde en de Noordzee. Het projectbureau is sinds 10 jaar op zoek naar een methode om de dikte van de bekleding te kunnen bepalen zonder al te veel breekwerk en met een veel grotere zekerheid dan nu het geval is.

Bij het bepalen van de dikte van de bekleding bestaan twee problemen. Het eerste is het verkrijgen van een goed beeld van de dikte van de (natuur)stenen toplaag op de dijk. Dit is bijna onmogelijk zonder hand- en breekwerk. Het probleem is dat deze stenen (basalt, ingegoten basalt, en/of betonzuilen) meestal op een filterlaag van puin of steenslag liggen, wat dus nagenoeg van hetzelfde materiaal is. Het tweede is het verkrijgen van een goed beeld van de dikte van de kleilaag onder de stenen toplaag. Ook de kleilaag speelt een belangrijke rol in het proces van de dijkveiligheid en een betrouwbare schatting van de dikte van deze laag is ook zeer gewenst.

Tijdens de uitvoering van het aanbrengen van dijkbekleding blijkt dat de aangenomen, steekproefsgewijs gemeten, dikte regelmatig niet overeenkomt met de werkelijke dikte. Het projectbureau Zeeweringen heeft al ervaring met ondermeer valgewichtdeflectie (VGD) metingen en radarmetingen. De laatste techniek bleek geschikt voor het zoeken naar holle ruimtes onder de dijkbekleding. Het probleem bij alle meetmethodes tot nu toe is echter het zoute milieu waarin gewerkt wordt. Het projectbureau is dus nog steeds op zoek naar een methode om de dikte van de bekleding te kunnen bepalen zonder al te veel breekwerk en met een veel grotere zekerheid dan nu het geval is.

Het gebruik van passieve microgolven radiometers voor wetenschappelijke doeleinden is de laatste jaren sterk in opkomst. Zo worden er in de wetenschap radiometers toegepast om op verschillende schalen bodemvocht [1] sneeuw en ijsdikte [2], neerslag [3] en vegetatie [4] te meten. In de industrie wordt er nog op een zeer beperkte schaal gebruik van gemaakt. Dit komt met name door de onbekendheid van deze technologie en het tot voor kort ontbreken van handzame L-band radiometers.

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.% [5]. 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 gemonteerd op een kar, waarmee op een dijk detailmetingen worden uitgevoerd (Zie Foto in Figuur 1).



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

1.2 Hoofdvragen

Het doel van dit project is het analyseren van de toepasbaarheid van passieve microgolf technologie bij dijkinspectie. Om dit doel te bereiken zijn drie deelvragen opgesteld:

- 1) Kunnen we met L-band radiometrie verschillen in opbouw van de ondergrond waar nemen en eventueel zwakke plekken in de dijk registreren?
- 2) Is het in de praktijk mogelijk om uit L-band observaties de dikte van de steen- en daaronder liggende kleilaag af te leiden?
- 3) Kan de Miramap techniek holle ruimtes in breuksteen die is ingegoten met asfalt in kaart brengen? Dit was een extra verzoek van Rijkswaterstaat Projectbureau Zeeweringen dat tijdens de start van het project naar voren kwam.

Om antwoord te krijgen op deze vragen is gebruik gemaakt van verschillende meetlocaties in Zeeland. Deze locaties worden beschreven in de volgende secties. De theoretische achtergrond, technologie en methodologie worden eerst besproken en na de locatie beschrijving volgen resultaten, conclusies en aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

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

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

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 [6].

De dielectrische constante is een fysische grootte 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 bepaald 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.

Voor dit onderzoek zijn de dielectrische 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 dielectrische constante aan van de verschillende materialen onder droge en natte condities. Dielectrische constanten van klei en zand zijn meer afhankelijk van bodemvocht omdat ze simpelweg meer water kunnen opnemen dan de andere dijkbekleding materialen. De dielectrische constante van deze materialen zijn in het verleden veel onderzocht en kunnen geschat worden met het Wang-Schmugge dielectric mixing model [7]. Een klei varieert gemiddeld van $9.7+0.76i$ (droog) tot $29.1+2.82i$ (nat) en een zand van $3.8+0.14i$ (droog) tot $31.6+3.08i$ (nat).

Materiaal	Droog		Nat	
	Reëel (ϵ')	Imaginaire (ϵ'')	Reëel (ϵ')	Imaginaire (ϵ'')
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
Fosforlakken	4.819	0.026	5.156	0.183
Staalakken	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

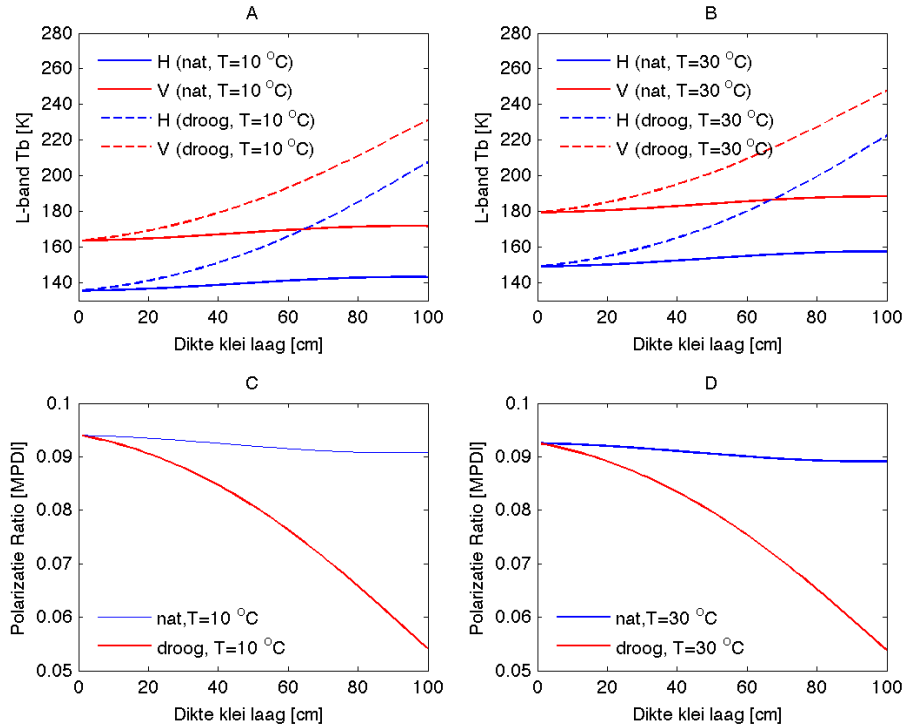
Tabel 1: Dielectrische Constante van verschillende materialen die worden aangetroffen in de dijkbekleding. Deze constante zijn bepaald bij 1.2 GHz (vgl met L-band observaties) onder droge en verzadigde condities.

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 de materiaal eigenschappen en bodemvocht condities.

Variaties in dikte van verschillende lagen en variaties in bodemvocht kunnen geregistreerd worden met een L-band radiometer. Als we de ondergrond mathematisch beschrijven met behulp van vergelijking 1 en 2 waarbij we uitgaan van een 40 cm dikke droge betonlaag waaronder we de dikte van een kleilaag (nat en droog) variëren boven een natte zandlaag onder verschillende temperatuur condities, zien we duidelijk de gevoeligheden van een L-band radiometer (Zie figuur 2). In dit plaatje zijn verschillende effecten te onderscheiden. Figuur 2 A laat duidelijk zien dat de horizontaal gepolariseerde observatie zo'n 20 graden lager is dan de vertikaal gepolariseerde observatie. Verder kan ook duidelijk worden waargenomen dat de L-band radiometer gevoeliger is in het detecteren van de dikte van een droge kleilaag ten opzichte van een natte kleilaag. Daarnaast is ook zichtbaar dat de temperatuur van de lagen invloed hebben op het signaal (Figuur 2 A en 2 B) en dat deze invloed verdwijnt als de MPDI wordt gebruikt (Figuur 2C en 2 D).



Figuur 2: Simulatie van helderheids temperaturen waarbij de dikte van een kleilaag wordt gevarieerd onder 40 cm beton. Onder de kleilaag bevindt zich een natte zandlaag. A laat de helderheids temperaturen zien onder 10 °C, B onder 30 °C, C en D geven de response van de MPDI aan. Hierbij valt op dat het temperatuur effect verdwijnt wanneer de MPDI wordt gebruikt.

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 is gemobiliseerd op een buggy zoals te zien is in Figuur 3. De radiometer is bevestigd op een paal en meet de ondergrond onder een kijkhoek van 30 graden. Aan de achterkant van de buggy is een handvat gemonteerd waaraan de radiometer kan worden voortgetrokken over de dijk.



Figuur 3: De handzame L-band radiometer bij Colijnsplaat

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 zijn studie gebieden uitgezocht om zo antwoord te krijgen op de wetenschappelijke hoofdvragen. De gebieden zijn 1) Colijnsplaat, 2) Ouwerkerk en 3) Baarland. Baarland heeft een variatie van dijkbekleding aan het oppervlak, Colijnsplaat heeft variatie van dijkbekleding onder het oppervlak en in de dijkbekleding van Ouwerkerk zijn luchtgaten geconstateerd. Deze drie studie gebieden vormen de basis van de analyse en worden in meer detail besproken in de volgende sectie.

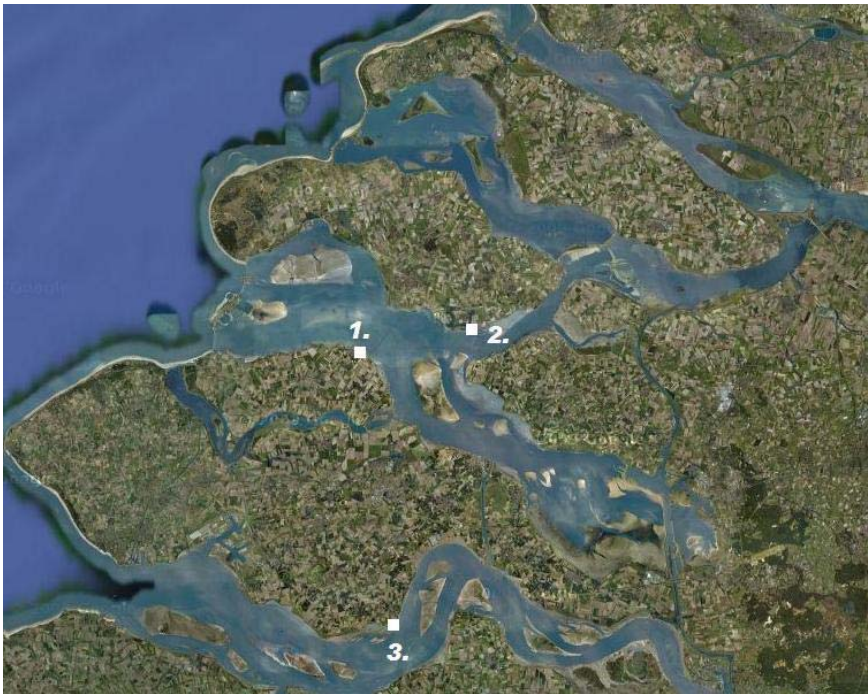
Op alle drie de dijken zijn transects gelopen met de L-band radiometer om zo helderheidstemperaturen te verkrijgen in zowel horizontale als in verticale polarisatie. De MPDI van deze transects zijn uitgerekend en geanalyseerd met behulp van additionele gegevens van dijkprofielen.

Met behulp van vgl 1 en 2 is het mogelijk om de dikte van 1 laag binnen in de bekleding te bepalen als je informatie over de dikte en dielectrische constante van de andere lagen hebt. Je kunt namelijk vgl 1 uitschrijven voor horizontale polarisatie en verticale polarisatie en deze twee vgl oplossen voor de dielectrische constante en dikte van de onbekende laag. Deze techniek zal worden toegepast om de basis van de kleilaag te bepalen voor een locatie in Colijnsplaat en twee locaties in Baarland.

4. Studie gebieden

4.1 Overzicht

Voor dit onderzoek is gemeten op drie verschillende locaties in Zeeland. De metingen zijn allemaal verricht bij droge omstandigheden in het voorjaar en zomer van 2009. In Figuur 4 zijn de verschillende locaties aangegeven met de cijfers 1 tot en met 3. Locatie 1 betreft de dijk ten noorden van het plaatsje Colijnsplaat. De dijk is gelegen op het eiland Noord-Beveland aan de zuidzijde van de Oosterschelde. Locatie 2 betreft de dijk ten zuiden van het plaatsje Ouwerkerk. Deze dijk is gelegen op het eiland Schouwen-Duiveland aan de noordzijde van Oosterschelde. Tot slot locatie 3, welke de dijk ten oosten van het plaatsje Baarland betreft. Deze dijk is gelegen op Zuid-Beveland aan de noordzijde van de Westerschelde.



Figuur 4: Overzichtkaart meetlocaties in Zeeland met 1.Colijnsplaat; 2.Ouwerkerk en 3.Baarland

4.2 Colijnsplaat

De meting is verricht op de dijk ten westen van het dorpje Colijnsplaat. De precieze locatie en de gelopen meettrajecten zijn terug te vinden in Figuur 5. De gemeten trajecten hebben een afstand van 370 meter en zijn gemeten langs de waterlijn en iets hoger op het talud.

De dijk bevat halverwege deze meettrajecten een scherpe overgang. Tussen dijkpaal 1832 en 1834 is over een vernieuwde dijk gelopen. Vanaf dijkpaal 1834 tot en met dijkpaal 1836 is over een nog niet vernieuwde, oude dijk, gelopen. De oude en nieuwe dijk verschillen significant van opbouw. De oude dijk heeft een opbouw met aan het dijkoppervlak haringmanblokken, met daaronder een laag grind gevolgd door mijnsteen en klei. De vernieuwde dijk heeft een opbouw met aan het dijkoppervlak betonzuilen, gevolgd door steenslag gelegen op een laag geotextiel met daaronder klei.

Om te testen of de radiometer in het signaal duidelijk een dergelijke overgang kan waarnemen, ligt deze overgang midden in de gelopen meettrajecten.



Figuur 5: Detailkaart met begin- en eindpunten van de meettrajecten op de Colijnsplaatdijk evenals de locaties van de dijkpalen

4.2 Ouwerkerk

De dijk bij Ouwerkerk is interessant vanwege de opbouw in de bovenste lagen van de dijk. De opbouw bestaat uit een laag basaltblokken welke zijn ingegoten met gietasfalt. Onder deze laag bevindt zich een dun laagje met afdekkend geotextiel. Het is de bedoeling dat het gietasfalt alle lege ruimtes tussen de basaltblokken opvult, zodat er tot aan de laag geotextiel geen open ruimtes aanwezig zijn. Het interessante aan deze meetlocatie is, dat er wordt vermoed dat het gietasfalt een te hoge viscositeit heeft en dat er te weinig gietasfalt is gebruikt, met als gevolg dat niet alle lege ruimtes zijn opgevuld. De aanwezigheid van holle ruimtes betekent dat de dijk op deze plek verzwakt is. Omdat dit niet aanvaardbaar is zijn er op dit dijktraject boringen gezet om te kijken of er daadwerkelijk holle ruimtes aanwezig zijn onder het dijkoppervlak. Er zijn enkele boringen gezet om dit te controleren.

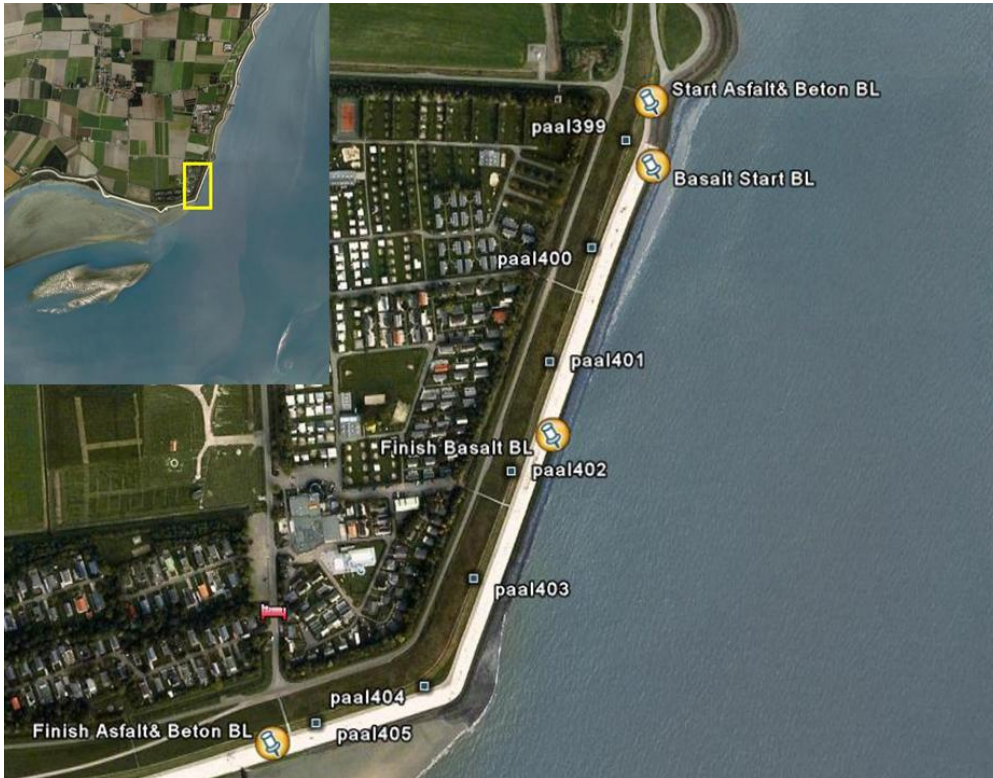
De meting betreft een traject van 310 meter, gemeten tussen dijkpaal 299 en 303. In Figuur 6 is een overzichtskaartje te zien met de locatie van de meting. In dit figuur is ook in detail het gelopen meettraject te zien evenals de locaties van de dijkpaaltjes en boringen. Er zijn 7 boringen gedaan binnen het gelopen traject, te weten boring nummer 6 tot en met 12. Het doel van deze meting is om te kijken of mogelijke luchtgaten in de dijk te achterhalen zijn uit de meetresultaten van de radiometer. Deze resultaten kunnen worden vergeleken met de boringresultaten.



Figuur 6: Detailkaart met begin- en eindpunt van het meettraject op de Ouwerkerkdijk evenals de boorlocaties en locaties van de dijken

4.3 Baarland

De meting is verricht ten oosten van het plaatsje Baarland. In Figuur 7 is de precieze locatie te zien. In dit Figuur is ook het begin- en eindpunt van de meettrajecten weergegeven die met de radiometer zijn gelopen. Er zijn op deze dijk 3 trajecten parallel aan elkaar gelopen; één over asfaltbekleding, één over betonbekleding en één over basalt bekleding. Het begin- en eindpunt van de trajecten over beton en over asfalt zijn gelijk en zijn gemeten tussen dijkpaal 398 en 406 over een afstand van 700 meter. Het traject betreffende de meting over basalt is een stuk korter en beslaat een afstand van 250 meter.



Figuur 7: Detailkaart met begin- en eindpunten van de meettrajecten op de Baarlanddijk evenals de locaties van de dijkpalen

De dijk nabij Baarland is interessant vanwege de verschillen in opbouw van de dijk. De dijk bevat een scherpe overgang waarin de dikte van de bovenliggende betonzuilen verspringt van 40 cm naar 50 cm. Het is interessant om te zien of de radiometer deze overgang kan registreren.

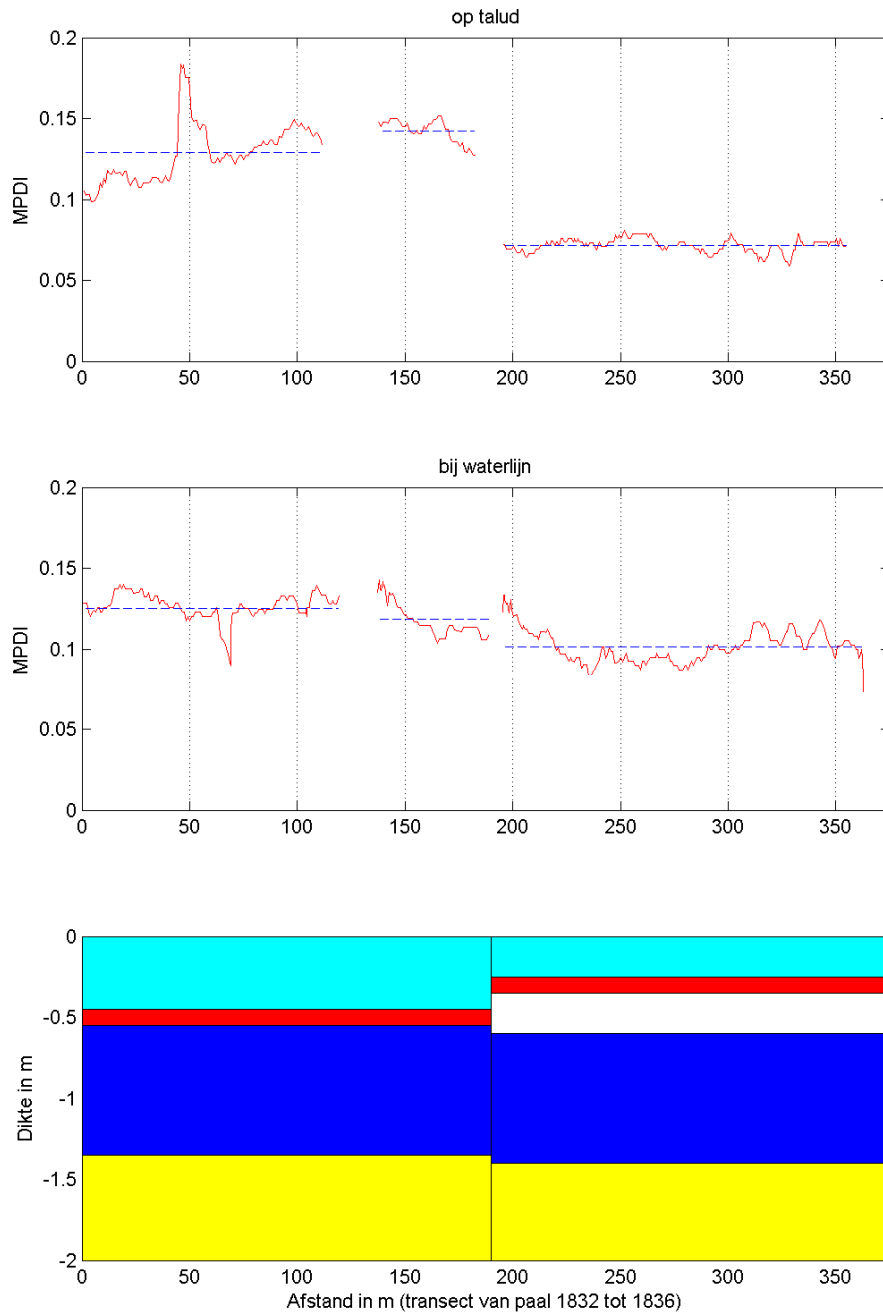
5. Resultaten en Discussie

5.1 Colijnsplaat

Figuur 8 geeft de resultaten weer van de metingen op de Colijnsplaatdijk. In het figuur zijn de MPDIs en het diepteprofiel van het meettraject weergegeven. De metingen zijn gedaan op het talud en dicht bij de waterlijn.

Het diepteprofiel kent een scherpe overgang op een afstand van 190 meter van het beginpunt van de metingen. De opeenvolging van 0 tot 190 meter afstand (de nieuwe dijkopbouw) is als volgt: De bovenste 45 cm bestaat uit betonzuilen (cyaan) met daaronder een 10 cm dikke laag bestaande uit steenslag met fosforslakken (rood). Deze steenslaglaag ligt op een enkele cm's dikke laag geotextiel, gevolgd door 80cm klei (blauw). Tot minimaal 2 meter diepte volgt tot slot een zandlaag (geel).

Na de scherpe overgang op 190 meter afstand volgt een andere opeenvolging. Deze opeenvolging van 190 tot 370 meter (de oude dijkopbouw) is als volgt: De bovenste 25 cm bestaat uit haringmanblokken (cyaan) met daaronder een 10 cm dikke laag grind (rood). Deze grindlaag ligt op een 25 cm dikke laag mijnsteen (wit), gevolgd door 80 cm klei (blauw). Tot minimaal 2 meter diepte volgt tot slot een zandlaag (geel).



Figuur 8: De gemeten MPDI van de talud en waterlijn traject bij Colijnsplaat samen met het diepteprofiel.

De gemeten MPDI's zijn boven het diepteprofiel weergegeven met dezelfde lengteschaal (Figuur 8). Op het meettraject bevonden zich een trap en een hek. Hier is bij de meting omheengelopen. Deze twee stukken zijn niet representatief voor het meetresultaat en daarom niet meegenomen in het profiel. Dit is te zien aan de

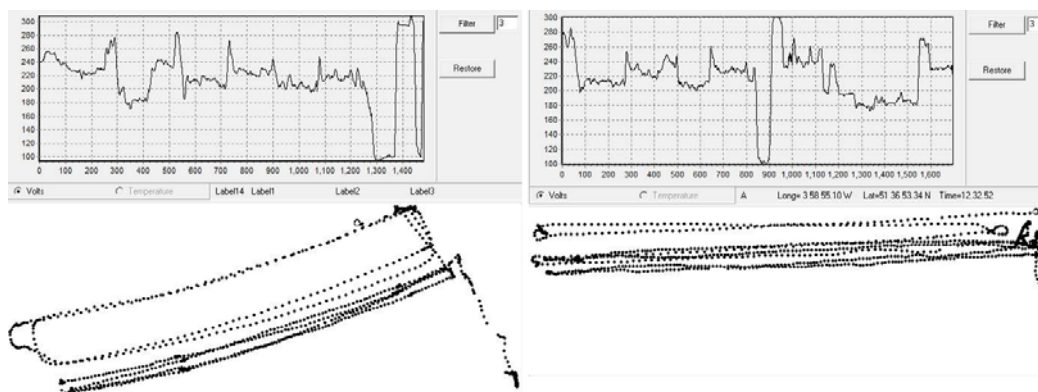
onderbreking in het signaal in het Figuur van de talud- en waterlijnmeting.

De MPDI van de metingen geven een sterke dynamiek in het signaal weer. De taludmeting heeft op de nieuwe dijkbekleding een minimale waarde van 0.1, een maximale waarde van 0.18 en een gemiddelde waarde van 0.135. Op de oude dijkbekleding heeft de Taludmeting een minimale waarde van 0.06, een maximale waarde van 0.09 en een gemiddelde waarde van 0.075. De waterlijnmeting heeft op de nieuwe dijkbekleding een minimale waarde van 0.08, een maximale waarde van 0.14 en een gemiddelde waarde van 0.125. Op de oude dijkbekleding heeft de waterlijnmeting een minimale waarde van 0.07, een maximale waarde van 0.13 en een gemiddelde waarde van 0.1.

De scherpe overgang van lagen (op 190 meter) valt samen met de gemiddelde waarden van de talud- en waterlijnmeting. Bij de laagovergang (van nieuwe naar oud) daalt bij beide metingen de gemiddelde signaalwaarde met respectievelijk 0.05 en 0.025. Deze observatie laat helder zien dat de microgolven radiometer verschillen in lagenopbouw registreert. De hogere vochtconcentratie bij de waterlijn meting is verantwoordelijk voor de kleinere sprong in de laagovergang.

5.2 Ouwerkerk

Bij deze meting is met name gekeken naar de impact van luchtgaten op de microgolven waarneming. Een traject van 300 m is gelopen over een dijk waarbij de bovenste 40 cm bestaat uit een combinatie van basalt, waterbouwbeton en kalksteen dat ingegoten is met gietasfalt. Daaronder ligt een enkele cm's dikke geotextiellaag, gevolgd door een kleilaag (blauw) tot minimaal 2 meter diepte. Figuur 9a toont de ruwe geo-gerefereerde helderheidstemperaturen van de metingen in Ouwerkerk.



Figuur 9a: De Ruwe Helderheidstemperaturen Ouwerkerk.

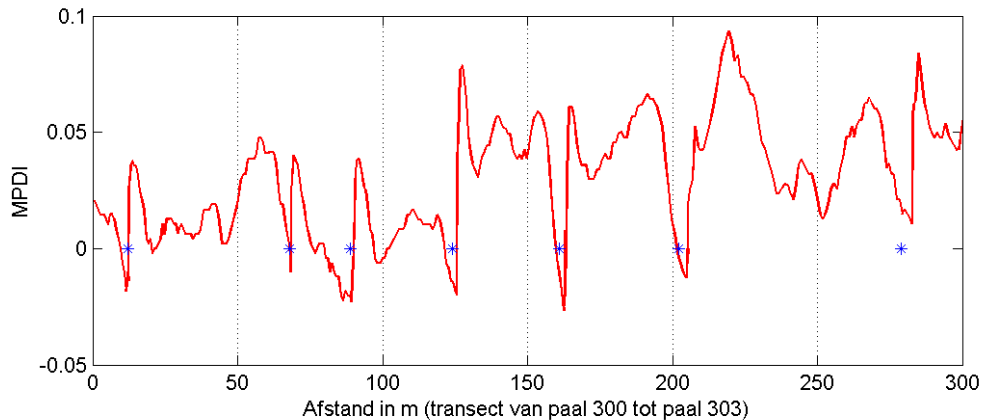
De gemeten MPDI's zijn weergegeven in Figuur 9b samen met de locaties waar een vermoeden was dat het gietasfalt niet alle gaten volledig gevuld had. Op deze locaties zijn later boringen gezet om te verifiëren of er lucht gaten zaten. Bij 4 van de 7 locaties zijn met een boring luchtgaten aangetroffen.

De meting zelf heeft een sterke fluctuatie met een minimale waarde van -0.02, een maximale waarde van 0.1 en een gemiddelde waarde van 0.04.

Opvallend aan deze meting is het samenvallen van de boorlocaties met (diepe) dalen in het signaal. Ook is de meting op te delen in twee verschillende trajecten, met elk

een eigen gemiddelde waarde. De meting tussen 0 en 130 meter heeft een gemiddelde waarde van 0.01 waar de meting tussen 130 en 320 meter een gemiddelde waarde van 0.05 heeft.

Uit deze transect blijkt heel helder dat de L-band radiometer sterk gevoelig is voor luchtgaten en deze ook zeer goed kan detecteren. Dit komt omdat de dielectrische constante van lucht ($\epsilon=1+0i$) significant anders is dan de omgeving. Daardoor is een L-band radiometer erg gevoelig voor deze anomalieën.



Figuur 9b: De MPDI van de meting bij Ouwerkerk. In blauw zijn boorlocaties aangegeven waar men een vermoeden had dat het gietasfalt niet alle gaten gevuld had.

5.3 Baarland

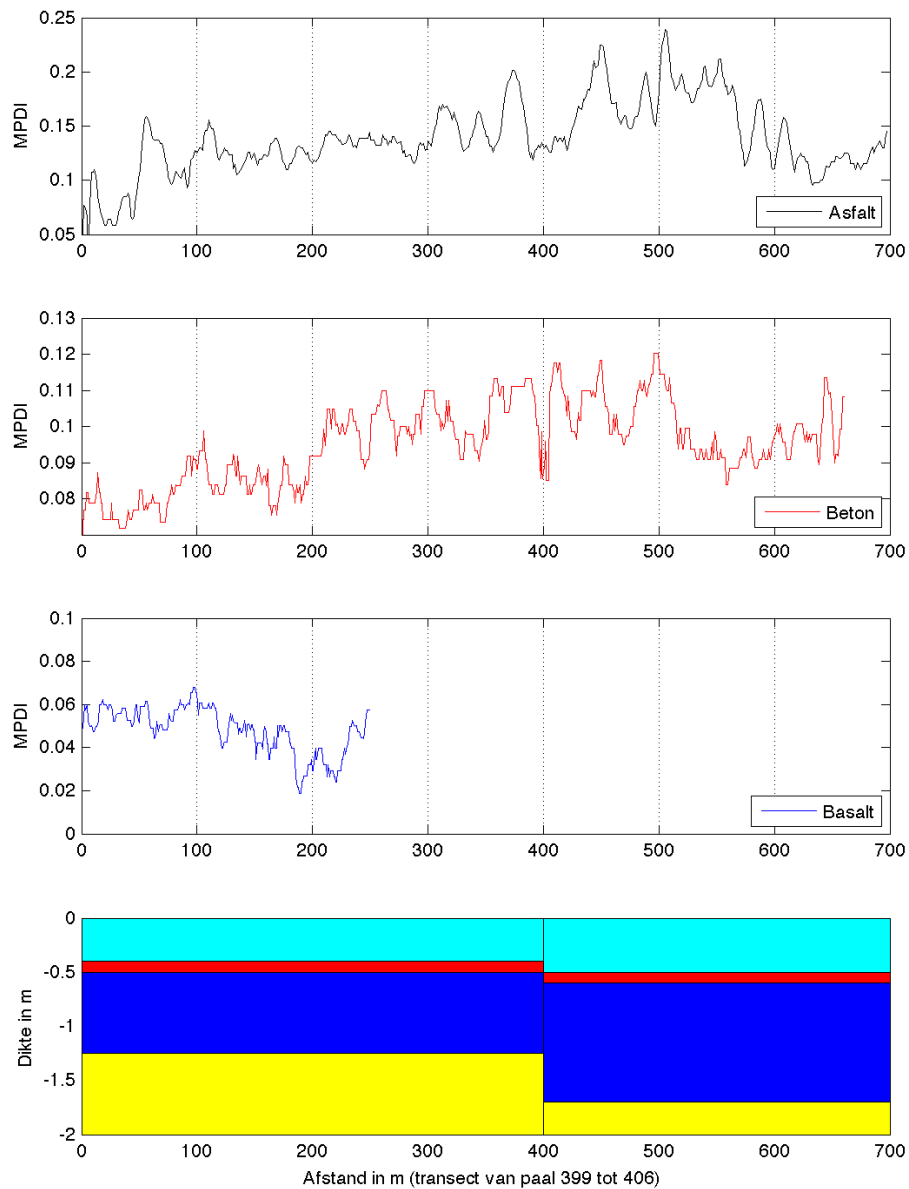
Figuur 10 geeft de resultaten weer van de metingen bij Baarland. De radartoren in Baarland heeft geen storend effect op de metingen.

In het figuur zijn de polarizatiëratio's (MPDI) evenals het diepteprofiel onder het beton van het meettraject weergegeven. Het diepteprofiel kent een scherpe overgang op een afstand van 400 meter van het beginpunt van de metingen. De opeenvolging van 0 tot 400 meter afstand is als volgt: De bovenste 40 cm bestaat uit betonzuilen (cyaan) met daaronder een 10 cm dikke laag bestaande uit steenslag (rood). Deze steenslaglaag ligt op een enkele cm's dikke laag geotextiel gevolgd door 75cm klei (blauw). Tot minimaal 2 meter diepte volgt tot slot een zandlaag (geel).

Na de scherpe overgang op 400 meter afstand volgt een andere opeenvolging. Deze opeenvolging van 400 tot 700 meter is als volgt: De bovenste 50 cm bestaat uit betonzuilen (cyaan) met daaronder een 10 cm dikke laag bestaande uit steenslag (rood). Deze steenslaglaag ligt op een enkele cm's dikke laag geotextiel, gevolgd door 110 cm klei (blauw). Tot minimaal 2 meter diepte volgt tot slot een zandlaag (geel).

De gemeten MPDIs zijn boven het diepteprofiel weergegeven met dezelfde lengteschaal. De MPDI laten voor zowel het asfalt, beton en basalt een sterke fluctuatie zien over het gehele traject. Dat duidt erop dat de L-band door de toplaag van beton, basalt en asfalt heen kijkt, anders zou de MPDI vlak moeten lopen. Hoewel alle drie een sterke dynamiek bevatten is de dynamiek tussen de drie metingen verschillend. Opvallend is met name het gemiddelde verschil in absolute

waarde van de MPDI. Het asfalt heeft een minimale waarde van 0.05, een maximale waarde van 0.23 en een gemiddelde waarde van 0.15. Beton heeft een minimale waarde van 0.05, een maximale waarde van 0.12 en een gemiddelde waarde van 0.10. Basalt heeft een minimale waarde van 0.02, een maximale waarde van 0.07 en een gemiddelde waarde van 0.05.



Figuur 10: De gemeten MPDI van de verschillende trajecten evenals het diepteprofiel van de Baarland meting onder het beton.

Verder is het patroon in de MPDI op het traject van 0 tot 200 meter vergelijkbaar te noemen voor de beton- en basaltmeting. De overeenkomsten met de asfaltmeting zijn minder duidelijk aanwezig.

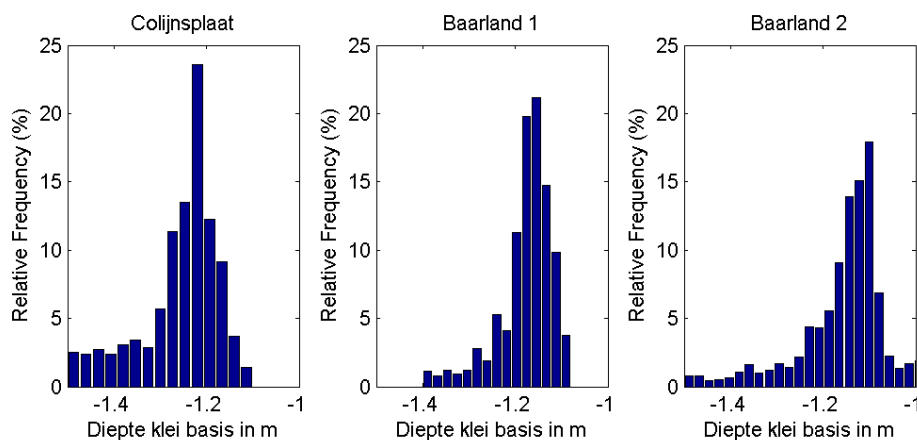
De betonmeting is op te delen in drie regio's met een verschillende gemiddelde waarde. Een regio van 0 tot 200 meter met een gemiddelde waarde van +/- 0.085, een regio van 200 tot 520 meter met een gemiddelde waarde +/- 0.105 en een regio van 520 tot 650 meter met een gemiddelde waarde van +/- 0.095. Het asfalt signaal geeft deze opdeling een stuk minder duidelijk aan.

Tot slot valt de scherpe overgang van lagen (op 400 meter) bij de betonmeting samen met een diep dal in het signaal. Ook het asfaltsignaal toont op dit punt een vrij lage waarde.

5.4 Bepaling van de klei basis

Voor drie locaties waar de dielectrische constante van het materiaal van de ondergrond voor een groot deel bekend is, is de diepte van de klei basis bepaald. Drie stroken van 100 m zijn gebruikt om de gemiddelde basis te bepalen. Bij Colijnsplaat is gekozen voor een strook tussen paal 1833 en 1834. Bij Baarland tussen paal 401 en 402 (Baarland 1) en tussen paal 404 en 405 (Baarland 2). Voor alle drie de locaties zijn de droge waarden van de dielectrische constante van het beton en fosforlaag gebruikt en is de dielectrische constante van het zand gezet op $\epsilon = 31.6 + 3.08i$. Met deze gegevens is door het oplossen van vgl 1 numeriek de dikte van het kleipakket bepaald. Figuur 11 en Tabel II demonstren de resultaten van deze techniek. De basis wordt bij alle drie rond de 1.2 geschat en twee komen goed overeen met de waarden volgens de officiële profielbeschrijvingen. Alleen Baarland 2 wijkt significant af met een verschil van 55 cm tussen de geschatte basis en de profiel gegevens.

Een reden voor deze deviatie is moeilijk te bepalen. De penetratie diepte van microgolven is toch enigszins beperkt en het kan zijn dat hij niet gevoelig genoeg is om de basis te bepalen voor een kleilaag dieper dan 1.5 m. Verder kan het natuurlijk ook zo zijn dat hier de profielbeschrijving afwijkt ten opzichte van de werkelijkheid. Desalniettemin zijn de resultaten hoopgevend en is verder onderzoek nodig om de robuustheid van deze methodologie te verifiëren.



Figuur 11 Histogram van de schattingen van de diepte van de kleibasis volgens de microgolven waarnemingen over een 100 m transect.

Locatie	Geschatte Basis klei laag in m			Volgens profiel in m
	Gemiddelde	mediaan	std	
Colijnsplaat	-1.25	-1.23	0.08	-1.35
Baarland 1	-1.18	-1.17	0.06	-1.25
Baarland 2	-1.15	-1.14	0.09	-1.70

Tabel II: Samenvatting van de statische resultaten van de bepaling van de basis van de kleilaag met behulp van microgolven waarnemingen.

6. Conclusies en aanbevelingen

Uit het beschreven onderzoek om door middel van het gebruik van passieve radiometrie (L-Band) meer inzicht te krijgen in de opbouw van de dijkbekleding van een aantal dijken in Zeeland is gebleken dat met deze nieuwe technologie;

- Het mogelijk is om verschillende materialen en verandering in lagenopbouw te detecteren.
- Luchtgaten in het dijklichaam te traceren zijn
- De dikte van 1 laag (bijvoorbeeld de kleilaag) geschat kan worden als de dielectrische constante en dikte van de andere lagen bekend zijn.

De Microwave Polarization Difference Index (MPDI), waarbij je kijkt naar de polarisatie ratio van de observeerde helderheids temperatuur, blijkt een zeer handige index om anomalieën te detecteren omdat deze index niet gevoelig is voor temperatuur fluctuaties in de ondergrond. De MPDI blijkt prima in staat om luchtgaten en verandering in lagenopbouw te detecteren. Daarnaast is de MPDI erg gevoelig voor bodemvocht fluctuaties in de ondergrond.

De methodologie om de dikte van de kleilaag te bepalen ziet er veel belovend uit. Uit dit onderzoek blijkt dat we voor twee locaties de dikte binnen 10 cm nauwkeurig kunnen bepalen. Uit een andere locatie wijkt de methode 50 cm af van de beschreven profielen. Het kan zijn dat in dit geval de kleilaag te dik was om nog goed meetbaar te zijn, maar het kan ook zijn dat hier de beschreven profielen afwijken van de werkelijkheid. Verder onderzoek is nodig om de robuustheid van deze techniek te verifiëren. Dit kan door een dijk goed door te meten met bodemvocht en temperatuur sensors waardoor we ook meer inzicht krijgen in de bodem en temperatuur fluctuaties in tijd. Deze twee parameters hebben namelijk een sterke invloed op de nauwkeurigheid van de bepaling van de laagdikte.

Concluderend kan worden gezegd dat het gebruik van passieve radiometrie zeer veel potentieel heeft om de toestand van de dijkbekleding beter in kaart te brengen.

Toepasbaarheid is gebleken op het gebied van de detectie van luchtgaten en de bepaling van de dikte van de kleilaag. De technologie is nog niet zo ver om diktes van verschillende lagen te bepalen. Maar er zijn wel mogelijkheden om dit verder te ontwikkelen. Zo kan er bijvoorbeeld gekeken worden met verschillende kijkhoeken en kunnen er meer observaties over een plek gedaan worden. Hiermee krijg je uiteindelijk meer mogelijkheden om ook diktes van verschillende lagen te bepalen.

Referenties

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] T. J. Jackson and T. J. Schmugge, "Vegetation effects on the microwave emission of soils," *Remote Sensing of Environment*, vol. 36 %8 1991, pp. 203-212, 1991.
- [5] 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.
- [6] T. T. Wilheit, "Radiative Transfer in a Plane Stratified Dielectric," *IEEE~Trans.~Geos.~Electr.*, vol. 16(2) %8 1978, pp. 138-143, 1978.
- [7] J. R. Wang and T. J. Schmugge, "An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content," *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.*, vol. 18, pp. 288-295, 1980.

Verder:

- Shutko, A.M., 1982. Microwave radiometry of lands under natural and artificial moistening, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-20, 18-26.
- Shutko, A.M., 1986. *Microwave Radiometry of Water Surface and Grounds*, Nauka/Science Publ. House, Moscow (In Russian). English translation is available: FTD-ID (RS) T-0584-89, Microfiche NR: FTD 89C-000798 L, 1989.
- Shutko, A.M., 1987. Remote sensing of waters and land via microwave radiometry (The principles of method, problems feasible for solving, economic use). Proc. Study Week on Remote Sensing and Its Impact on Developing Countries, Pontifical Academy of Sciences, Vatican City, 413-441.
- Shutko, A.M., 1992. Soil-vegetation characteristics at microwave wavelengths, Chapter 5, *TERRA-1: Understanding the Terrestrial Environment. The Role of the Earth Observations from Space*, Taylor & Francis, London-Washington D.C., 53-66.
- Shutko, A.M., 1997. Remote sensing of soil moisture and moisture related parameters by means of microwave radiometry: instruments, data, and examples of application in hydrology, *NATO ASI Series, Series I:Global Environmental Change*, vol.46, *Land Surface Processes in Hydrology, Trials and Tribulations of Modeling and Measuring*, Ed. by S.Sorooshian, H.V.Gupta, J.C.Rodda, Springer, 263-273.