Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Uw partner voor duurzame wegen

Ontwikkeling van de grondradartechniek voor wegconditieonderzoek

Researchverslag

RV 46

Sinds 1952 staat het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW) als onpartijdig onderzoekscentrum ten dienste van alle partners in de Belgische wegenbranche. Duurzame ontwikkeling door innovatie is de leidraad voor alle activiteiten in het Centrum. Het OCW deelt zijn kennis met professionals uit de wegenbranche onder meer door middel van zijn publicaties (handleidingen, synthesen, researchverslagen, meetmethoden, informatiebladen, OCW Mededelingen en Dossiers, activiteitenverslag). Onze publicaties worden in het binnen- en buitenland op ruime schaal verspreid bij centra voor wetenschappelijk onderzoek, universiteiten, openbare instellingen en internationale instituten. Meer informatie over onze publicaties en activiteiten: *www.ocw.be*.

Researchverslag RV 46

Ontwikkeling van de grondradartechniek voor wegconditieonderzoek

Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Instelling erkend bij toepassing van de besluitwet van 30 januari 1947
Brussel
2018

Auteurs

Colette Grégoire, Audrey Van der Wielen, Carl Van Geem, Jean-Pierre Drevet (ISSeP)

Dankbetuiging

Onze dank gaat naar het Bureau voor Normalisatie (NBN) voor de financiële steun aan het prenormatieve onderzoek *Développement de la technique géoradar en auscultation de routes* (overeenkomsten CCN/NBN/PN 13A04, 13B04, 15A05 en 15B05), dat in samenwerking met het *Institut Scientifique de Service Public* (ISSeP) werd uitgevoerd.

Voorts bedanken wij iedereen die ons de mogelijkheid heeft geboden om op verschillende locaties grondradarmetingen uit te voeren, in het bijzonder Martial Bovy (stad Ottignies-Louvain-la-Neuve) en Robert Tison (AWV).

Ook danken wij de grondradargebruikers die metingen op ons proefvak in Waver hebben uitgevoerd: de Belgische gebruikers (UCL, UGent, AWV en SPW) en de leden van de Frans-Belgische gebruikersgroep (Cerema en IFSTTAR). De bijeenkomsten en gedachtewisselingen met deze operatoren waren zeer nuttig.

Ten slotte bedanken we onze hoofdoperator Yves Pollet (OCW) voor zijn enthousiasme en zin voor initiatief, evenals alle collega's in het OCW die aan de uitvoering van dit project hebben bijgedragen.

Bericht aan de lezer

Dit researchverslag bevat de praktische resultaten die op een specifiek gebied zijn verkregen, met vermelding van de hiertoe gebruikte wetenschappelijke methoden en/of verrichte informatiestudie.

Hoewel deze publicatie met de grootst mogelijke zorg is opgesteld, zijn onvolkomenheden nooit uit te sluiten. Het OCW en de personen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, kunnen geenszins aansprakelijk worden gesteld voor de verzamelde en verstrekte informatie, die louter als documentatie en zeker niet voor contractueel gebruik is bedoeld.

Ontwikkeling van de grondradartechniek voor wegconditieonderzoek / Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw. – Brussel : OCW, 2018, 132 blz. – (Researchverslag, ISSN 1376-9367 ; 46).

Wettelijk depot: D/2018/0690/12

© OCW – Alle rechten voorbehouden

Inhoud

	Woord vooraf	1
1	Principe van de methode	3
2	Proefvak in Waver	7
2.1	Beschrijving van het proefvak	7
2.2	Radarmetingen na de aanleg van het proefvak	8
2.3	Schatting van de snelheden op basis van de laagdikten	10
2.4	Schatting van de snelheden op basis van uitsluitend de radarmetingen	11
2.4.1	Schatting met de Radansoftware	11
2.4.2	Schatting op basis van de aan het oppervlak gereflecteerde amplitude	13
2.4.3	Invloed van de meetparameters op de schatting van de snelheid	15
2.5	*Full-waveform inversion*	*15*
2.6	Modellering met eindige differenties	16
2.7	Conclusies	17
3	Proefblokken in Sterrebeek	19
3.1	Betonplaat	19
3.1.1	Beschrijving van het proefstuk	19
3.1.2	Resultaten en conclusies	20
3.2	Waterinjectieproef	21
4	Diktebepaling	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Radar- en FWD-metingen op een autosnelweg – Terugberekeningen	23
4.2.1	Radarmetingen	23
4.2.1.1	Algemene analyse – Homogene zones	23
4.2.1.2	Plaatselijke analyse – Boorkernen	25
4.2.2	Terugberekening uit de deflectiemetingen	27
4.2.3	Conclusies	29
4.3	Radar- en FWD-metingen op een gemeentelijke weg	29
4.3.1	Inleiding	29
4.3.2	Verwerking	30
4.3.3	Analyse van de snelheden en bepaling van de laagdikten	30
4.3.4	Metingen met de valgewichtdeflectiemeter	32
4.3.5	Conclusies	33
4.4	Diktemetingen op de verharding van de parking te Sterrebeek	33
4.4.1	Inleiding	33
4.4.2	Beschrijving van de locatie	33
4.4.3	Visualisatie van de resultaten – Opbouw van de wegconstructie	34
4.4.3.1	Luchtgekoppelde antenne van 2 GHz	34
4.4.3.2	Contactantennes	35
4.4.4	Schatting van de laagdikten: resultaten en conclusies	35
4.5	Dikten van betonplaten – Totaalstation en tomograaf	36
4.5.1	Algemene waarnemingen	37
4.5.2	Schatting van de snelheid in het beton	37
4.5.2.1	Schatting op basis van de referentiepunten (2 GHz)	37
4.5.5.2	Schatting op basis van de oppervlakreflectie (2 GHz)	38
4.5.2.3	Schatting op basis van migratie (900 MHz)	39
4.5.2.4	Schatting op basis van de referentiepunten (900 MHz)	40
4.5.2.5	Overzicht van de geschatte snelheden	40

4.5.3	Schatting van de dikten	40
4.5.4	Conclusies en aanbevelingen	41
4.6	Conclusies	42
4.6.1	Snelheidsbepaling met destructieve kalibratie (boorkernen)	42
4.6.2	Diktebepaling met niet-destructieve methoden	43
5	Beoordeling van homogeniteit	45
5.1	Inleiding	45
5.2	Evaluatie van het wegennet – Homogene zones	45
5.3	Radarmetingen op een rotonde – Variatie in de wegopbouw	46
5.4	Conclusies	47
6	Opsporen van holten	49
6.1	Holten onder een betonweg	49
6.2	Holten onder een betonplaat – Frankrijk	50
6.3	Conclusies	52
7	Opsporen van ankerstaven en deuvels	53
7.1	Opsporen van ankerstaven in een weg met doorgaand beton	53
7.2	Opsporen van deuvels in een weg met betonplaten	53
8	Opsporen van vochtplekken	55
8.1	Vochtplekken in een fundering	55
8.2	Inspectie van de afdichtingslaag van een kunstwerk	55
8.3	Conclusies	57
9	Opsporen van nutsleidingen	59
9.1	Inleiding	59
9.2	Mogelijke storende factoren en moeilijkheden bij de interpretatie van radarmetingen	59
9.2.1	Net van dieper liggende nutsleidingen	59
9.2.2	Wanden of verdere aanvulling van de sleuf	60
9.2.3	Aanwezigheid van een bovenliggende gewapend-betonplaat	60
9.2.4	Andere elektromagnetische bronnen in de omgeving	60
9.2.5	Geleidingsvermogen en vochtigheid van omgevende materialen	61
9.2.6	Onvoldoende diëlektrisch permittiviteitscontrast	61
9.3	Conditieonderzoek van nutsleidingen – Verwerking	61
9.4	Standaardvoorbeelden van verrichte radaronderzoeken	63
9.4.1	Onderzoek van de proefsleuf te Waver met een multifrequente antenne (300 tot 700 MHz)	63
9.4.2	Opsporen van een verstopte drainageleiding	65
9.4.3	Opsporen van optische vezelleidingen in een trottoir	66
9.4.4	Opsporen van metalen leidingen van 10 cm doorsnede	67
9.4.5	Opsporen van een onderhoudsgang met nutsleidingen onder een hellende weg	67
9.5	Conclusies	68

10 Casestudy: Scheldelaan te Antwerpen 71
10.1 Metingen vóór de eerste fase van de werkzaamheden 71
10.2 Metingen vóór de tweede fase van de werkzaamheden (Lillo Fort) 73
10.2.1 FWD-metingen 73
10.2.2 Kernboringen 73
10.2.3 Analyse van de deflectiemetingen – Terugberekening 74
10.2.3.1 Berekeningen met *Alizé Recherche* en de meetresultaten van de curviameter 74
10.2.3.2 Berekeningen met *Alizé Recherche* en de meetresultaten van de FWD 77
10.2.3.3 Berekeningen met *Qualidim* en de meetresultaten van de FWD 77
10.2.3.4 Conclusies 78
10.2.4 Radarmetingen 78
10.2.5 Metingen met een 3D-Radarantenneset 80
10.3 Metingen in september op de fundering 82
10.4 Metingen in september tijdens het aanbrengen van de nieuwe verharding 84
10.5 Metingen in februari 2017, na de werkzaamheden 85
10.6 Schatting van de dikten 86
10.6.1 Dikteschatting op de toplaag 86
10.6.2 Schatting van de dikte van de twee asfaltonderlagen 86
10.7 Conclusies 88

11 Casestudy: renovatie van een gewestweg 89
11.1 Inleiding 89
11.2 Metingen met de radar van 2 GHz 89
11.3 Metingen met de radar van 900 MHz 90
11.4 Dikte van de bitumineuze verharding 91
11.5 Conclusies 92

12 Conclusies en vooruitzichten 93

Bijlage 1 Radarbeelden van het proefvak 95

Bijlage 2 *Picking* van de verschillende contactvlakken in het radarsignaal 101
B2.1 Inleiding 101
B2.2 Modellering 101
B2.3 Proeven 106
B2.3.1 Beschrijving van de resultaten 107
B2.3.2 Zichtbaarheid van de contactvlakken 111
B2.3.3 Effecten van filters en verwerkingen 112
B2.4 Conclusies 112

Bijlage 3 Numerieke validering van geavanceerde methoden voor de karakterisering van een een- of tweelaags medium op basis van de reflectiecoëfficiënt 115

Literatuur 117

Lijst van de figuren

Figuur 1.1 – Maken van een profiel met behulp van een radarantenne 3
Figuur 1.2 – Vergelijking van de werking van een contactantenne (a) en een hoornantenne (b) 4
Figuur 2.1 – Schematische doorsnede van het proefvak 7
Figuur 2.2 – Profielen van de proefsleuf, gemeten met de luchtgekoppelde 2 GHz-antenne van het OCW 8
Figuur 2.3 – Profielen van de proefsleuf, gemeten met de 400 MHz-contactantenne van ISSeP 8
Figuur 2.4 – Beelden van de verschillende metingen op de proefsleuf in Waver 9
Figuur 2.5 – Schatting van de laagdikten met Radan, op basis van de metingen met de hoornantenne van 2 GHz 12
Figuur 2.6 – Bepaling van een kalibratiebestand op basis van de kalibratiemeting 13
Figuur 2.7 – Vergelijking tussen gesimuleerde en met de oppervlakreflectiecoëfficiënten-methode geschatte waarden voor de permittiviteit ($\varepsilon'_{r,1}$) en de dikte (h_1) van de toplaag, voor alle beschouwde tweelagensituaties en enkel voor de toepasselijke gevallen 14
Figuur 2.8 – Snelheden in toplaagmaterialen, geschat uit de amplitude van de oppervlakreflectie 14
Figuur 2.9 – Verschillen in snelheden berekend uit de amplitude van de oppervlakreflectie, naargelang van de verwerkings- en berekeningsmethode 15
Figuur 2.10 – Modellering van de proefsleuf in Waver met eindige differenties. (a) Geometrie van het model; (b) Gesimuleerd radargram voor een antenne van 2 GHz; (c) Werkelijke metingen met de antenne van 2 GHz 17
Figuur 3.1 – Beschrijving van het proefvak 19
Figuur 3.2 – Beeld van de betonplaat bij 2,6 GHz: onbewerkt signaal, met omgekeerde polarisatie gemeten signaal en signaal na verwerking (voornamelijk een hoogdoorlaatfilter van 2,3 GHz) 20
Figuur 3.3 – Deel van het 2,6 GHz-profiel na migratie en 3D-beeld van de onderzochte plaat 21
Figuur 3.4 – Aanbrengen van buizen (diameter: 17 mm) en vastzetten met hars (a). Gieten van de afdichtingslaag op het glasvlies (b) 21
Figuur 3.5 – Voor, tijdens en na waterinjectie op de proefplaat gemeten radarsignalen 22
Figuur 4.1 – Vergelijking van metingen aan de hand waarvan homogene zones kunnen worden bepaald: bij 2 GHz en 400 MHz gemeten profielen, schijnbare reflectietijden, met Radan geschatte snelheden en met de FWD bepaalde homogene zones. De boorkernen zijn aangeduid met groene stippellijnen, de grenzen van de homogene zones met oranje 24
Figuur 4.2 – 2 GHz-profielen (bovenaan) en 400 MHz-profielen (onderaan) die met de drie boorkernen overeenstemmen 25
Figuur 4.3 – Schatting van de diepte van de verschillende lagen op basis van de aan boorkernen gekalibreerde radarmetingen 27
Figuur 4.4 – Boorkern uit en beeld van de locatie 30
Figuur 4.5 – Radarprofiel, linkerzijde 30
Figuur 4.6 – Diktes geschat met Radan berekende snelheden (linkerzijde van de rijstrook) 31
Figuur 4.7 – Maximale deflectie 32
Figuur 4.8 – Cumulatieve afwijking van de deflecties 32
Figuur 4.9 – Homogene zones 33
Figuur 4.10 – Radarprofiel in het midden van het proefvak en plaatsen waar de kernen werden geboord. De vier boorkernen zijn met stippellijnen aangeduid 34
Figuur 4.11 – Boorkern (CR-2) uit het proefvak, met de lagen in de opbouw van de wegconstructie (van links naar rechts: AB-4C, AB-3B, gebonden steenslagfundering) 34
Figuur 4.12 – Metingen met de antennes van 2,6 GHz en 400 MHz 35
Figuur 4.13 – Vergelijking van door middel van radar geschatte dikten met aan boorkernen gemeten dikten 36
Figuur 4.14 – Aanpassing van de registratietijd voor 900 MHz-metingen 37
Figuur 4.15 – 2 GHz-profiel 37

Figuur 4.16 – Geschatte snelheden, gebaseerd op de oppervlakreflectie tijdens de twee reeksen metingen 38
Figuur 4.17 – Schatting van de snelheid op basis van migratie van 900 MHz-metingen 39
Figuur 4.18 – Dikten, geschat aan de hand van de verschillende profielen uit de tweede reeks metingen 41
Figuur 4.19 – Vergelijking tussen met de radar (900 MHz, tweede reeks) en met de tomograaf en het totaalstation gemeten dikten 41
Figuur 5.1 – Metingen met de antenne van 2 GHz 46
Figuur 5.2 – Metingen met de antenne van 400 MHz 46
Figuur 6.1 – Uitsnede uit het 900 MHz-profiel (links) en het 2 GHz-profiel (rechts) 49
Figuur 6.2 – Voorbeeld van krachtige reflecties (900 MHz) 49
Figuur 6.3 – Opsporen van holten onder een betonplaat 50
Figuur 6.4 – Radarmetingen op de betonplaat (2,6 GHz met normale polarisatie, 2,6 GHz met omgekeerde polarisatie en 2 GHz luchtgekoppeld) 51
Figuur 6.5 – Kartering op basis van radarmetingen 51
Figuur 7.1 – Foto van de meetlocatie – Radarprofielen: 2,6 GHz en 400 MHz 53
Figuur 7.2 – Vóór het betonstorten werden deuvels gelegd op de plaatsen waar de dwarsvoegen moesten komen (a) en op de onderliggende bitumineuze laag bevestigd (b) 54
Figuur 7.3 – Vergelijking van de langs de dwarsvoegen of in de lengterichting gemeten 900 MHz-profielen, met juiste en verkeerde eindpositie van de deuvels 54
Figuur 8.1 – Opsporen van een vochtplek in een wegfundering 55
Figuur 8.2 – Radarprofiel tussen de twee rijstroken, met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz 56
Figuur 8.3 – Beeld van de brugconstructie, gemaakt met de antenne van 2,6 GHz 56
Figuur 8.4 – Aanwezigheid van water in de constructie 56
Figuur 8.5 – Krachtige reflectie die op aanwezigheid van water kan wijzen 57
Figuur 9.1 – Typische sleuf in een weg in stedelijk gebied 59
Figuur 9.2 – Voorbeelden van superpositie van de reflectiehyperbolen van de wanden van een sleuf, die de leesbaarheid van de onderliggende echo's beperkt of verstoort 60
Figuur 9.3 – Voorbeeld van sterke reflecties van een betonlaag, die de aanwezigheid van een onzichtbare onderliggende nutsleiding langs een trottoir verraden 60
Figuur 9.4 – Voorbeeld van te sterke ruisgeneratie (boven 20 ns) door de kenmerken van het rond een nutsleiding aanwezige materiaal 61
Figuur 9.5 – De betonplaat (aangegeven door de gele rechthoek) is onzichtbaar, want ze is ingestort in een betonlaag (met hetzelfde diëlektrische gedrag) boven een holte (duidelijk contrast) 61
Figuur 9.6 – Rechtlijnige echo in een 2D-bestand, afkomstig van een elektriciteitskabel op 0,75 m diepte 62
Figuur 9.7 – Voorziening met niet-metalen "looprails" om het grondvlak van de antenne en de codering van afstanden te regulariseren 63
Figuur 9.8 – Lengteprofiel van het midden van de proefsleuf van het OCW (na *background removal* en migratie), verkregen met de Cobragrondradar 64
Figuur 9.9 – Radargram en detailtekening ter hoogte van de zone met dwarse nutsleidingen 64
Figuur 9.10 – Detailopnamen: de LS 4G25- en de HS 3*35-kabels vormen de sterkste reflectoren in het lengteprofiel 65
Figuur 9.11 – Visualisatie van de boven- en de onderrand van een ronde leiding 65
Figuur 9.12 – Aanbrengen van optische vezelleidingen 60 tot 70 cm diep in een trottoir in stedelijke omgeving 66
Figuur 9.13 – Detailopname van een lege mantelbuis voor optische vezelleidingen 66
Figuur 9.14 – Bundel mantelbuizen met optische vezelleidingen met plastic beschermband en zandafdekking, op een diepte van 0,7 m 66
Figuur 9.15 – Detectie van een bundel mantelbuizen met optische vezelleidingen in een sleuf onder een trottoir, op ongeveer 60 cm diepte (multifrequente antenne) 66
Figuur 9.16 – Opsporen van twee metalen leidingen (10 cm diameter) in een sleuf, op meer dan een meter diepte (multifrequente antenne) 67

Figuur 9.17 – Voorbeeld van sterke reflecties van een lege, rechthoekige betonnen onderhoudsgang in een hellend terrein, waarin zich nutsleidingen bevinden die onzichtbaar blijven (multifrequente antenne) 68
Figuur 10.1 – Luchtopname van de bouwplaats 71
Figuur 10.2 – Met de curviameter gemeten deflecties (in honderdsten van een mm) 72
Figuur 10.3 – Radarprofiel tussen 12,7 km en 13 km: homogene zone, met weinig deflectie 72
Figuur 10.4 – Radarprofiel tussen 12,4 km en 12,7 km: zone met veel deflectie 72
Figuur 10.5 – Resultaten van deflectiemetingen met de curviameter (rood) en de FWD (groen) 73
Figuur 10.6 – Radarprofielen (2 GHz, 900 MHz, 400 MHz) 78
Figuur 10.7 – 400 MHz-radarprofielen waarop leidingen zichtbaar zijn 80
Figuur 10.8 – Configuratie van de 3D-Radarantenneset 80
Figuur 10.9 – Vak 1, rijstrook 1: radarprofiel (boven), oppervlakpermittiviteit (midden) en dikte van de eerste laag (onder) 81
Figuur 10.10 – Tijddoorsneden (7 tot 10 ns) voor zone 3 82
Figuur 10.11 – Metingen over de eerste 120 m van het recyclingwerk, met enkel de fundering 83
Figuur 10.12 – Metingen over de eerste 120 m van het recyclingwerk, op de onderste asfaltonderlaag 84
Figuur 10.13 – Metingen over de eerste 120 m van het recyclingwerk, op de twee asfaltonderlagen 84
Figuur 10.14 – Snelheidsanalyse op basis van de oppervlakreflectie (antenne van 2 GHz) 85
Figuur 10.15 – 2 GHz-radarprofiel op de toplaag 85
Figuur 10.16 – Schatting van de dikte van de onderste asfaltonderlaag 87
Figuur 10.17 – Schatting van de dikte van de bovenste asfaltonderlaag 87
Figuur 11.1 – 2 GHz-metingen naar Ottenburg toe 90
Figuur 11.2 – 2 GHz-metingen naar Ottenburg toe, ter hoogte van de boorkernen F1 (46 m), F4 (198 m), F7 (636 m) en F9 (849 m) 90
Figuur 11.3 – Uitsnede uit de 900 MHz-metingen – gemiddeldeberekening (naar Ottenburg toe) 91
Figuur 11.4 – Dikte van de bitumineuze verharding (naar Ottenburg toe), geschat met de Radansoftware 92
Figuur B1.1 – Profielen van de proefsleuf, gemeten met de antennes van het OCW 96
Figuur B1.2 – Profielen van de proefsleuf, gemeten met de antennes van ISSeP 96
Figuur B1.3 – Profielen van de proefsleuf, gemeten met de antennes van SPW 97
Figuur B1.4 – Profiel van de proefsleuf, gemeten met de antenne van AWV 98
Figuur B1.5 – Verwerkte metingen, verricht door de ORBit-onderzoeksgroep (UGent). GSSI-antenne 300 MHz + 800 MHz en 3D-Radar *step frequency*-contactantenne: centraal profiel en tijddoorsnede op 2,33 ns (ongeveer 10 cm) 98
Figuur B1.6 – Metingen door verschillende teams van Cerema (Rouen en Angers), met antennes met frequentieverspringingen 99
Figuur B2.1 – Visuele weergave van de meetpunten op de schematische doorsnede van het proefvak 101
Figuur B2.2 – Geometrie van de gemodelleerde meerlaagse verhardingen 102
Figuur B2.3 – Door de modellering verkregen signalen voor de verschillende configuraties 103
Figuur B2.4 – Door de modellering verkregen amplitudescans voor de verschillende configuraties 104
Figuur B2.5 – Schatting van de meettijden van de verschillende contactvlakken en vergelijking met de tijd berekend aan de hand van de bij de modellering gebruikte permittiviteiten 105
Figuur B2.6 – Visuele weergave van de meetpunten op de verschillende profielen 107
Figuur B2.7 – Detailbeelden van de metingen en *picks* voor meetpunt 2 (asfalt op schraal beton) 108
Figuur B2.8 – Detailbeelden van de metingen en *picks* voor meetpunt 4 (beton op schraal beton) 108
Figuur B2.9 – Metingen in lucht met elke contactantenne 109
Figuur B2.10 – Schatting van de meettijden van de verschillende contactvlakken in de laboratoriumproeven en vergelijking met de gemiddelde tijd berekend uit de metingen 110
Figuur B2.11 – Schatting van de meettijden van de verschillende contactvlakken in de laboratoriumproeven met de antenne van 2 GHz en vergelijking met de gemiddelde tijd berekend uit de metingen 111

Lijst van de tabellen

Tabel 2.1 – Zichtbaarheid van de verschillende contactvlakken naargelang van de gebruikte antenne 9
Tabel 2.2 – Snelheden (in cm/ns) in de lagen, berekend aan de hand van de nominale dikten 10
Tabel 2.3 – Bepaling van de snelheden in en permittiviteiten van de verschillende lagen met Radan, op basis van enkel de radarmetingen 12
Tabel 2.4 – Parameters voor de modellering 16
Tabel 4.1 – Vergelijking van snelheden (in cm/ns), met de georadar geschat op basis van de oppervlakreflecties of door gebruik te maken van de aan de boorkernen gemeten dikten 26
Tabel 4.2 – Vergelijking van de enkel door de grondradar geschatte dikten (cm) met de aan de boorkernen gemeten dikten en met de nominale dikten 26
Tabel 4.3 – Aannamen voor de terugberekening op de E42 28
Tabel 4.4 – Deflecties en belasting door de FWD in een punt op de derde rijstrook van de E42 28
Tabel 4.5 – Terugberekening met variatie van de laagdikten 28
Tabel 4.6 – Dikten van de drie lagen (boorkernen en Radan) 31
Tabel 4.7 – Uit de boorkernmetingen afgeleide en met Radan berekende snelheden 31
Tabel 4.8 – Snelheden van radargolven, berekend uit de met de 2 GHz-antenne gemeten voortplantingstijd en de topografisch gemeten dikten 38
Tabel 4.9 – Met de verschillende methoden geschatte snelheden in de betonplaat 40
Tabel 10.1 – Plaatsen en dikten van de kernen 74
Tabel 10.2 – Vijf homogene zones, afkomstig van de interpretatie van de curviametermetingen 75
Tabel 10.3 – Opbouw van de wegconstructie en resultaten van de terugberekening voor de eerste homogene zone 75
Tabel 10.4 – Opbouw van de wegconstructie en resultaten van de terugberekening voor de tweede homogene zone 76
Tabel 10.5 – Opbouw van de wegconstructie in homogene zone 5, afgeleid uit de kernboringen 8bis en 9 en uit informatie van AWV, en resultaten van de terugberekening 76
Tabel 10.6 – Opbouw van de weg ten behoeve van berekeningen met *Qualidim* en de meetresultaten van de FWD 77
Tabel 10.7 – Resultaten van terugberekeningen met *Qualidim* en de meetresultaten van de FWD 77
Tabel 10.8 – Vergelijking van de aan de boorkernen gemeten dikten met de uit de 2 GHz-metingen afgeleide dikten 79
Tabel 10.9 – Vergelijking van de aan boorkernen gemeten dikten met de uit de 3D-Radar-metingen afgeleide dikten 81
Tabel 10.10 – Geschatte dikten op basis van radarmetingen 86
Tabel 10.11 – Geschatte dikten op basis van radarmetingen – Vergelijking met boorkernen 87
Tabel 11.1 – Snelheden berekend aan de hand van de *pickings* op de 900 MHZ-metingen en de boorkernen 91
Tabel 11.2 – Dikten geschat aan de hand van de gegevens van de 2 GHz-radar (tussen haakjes: vergelijking met de boorkernen) 92
Tabel B1.1 – Overzicht van de metingen 95
Tabel B2.1 – Eigenschappen van de verschillende materialen, voor de modellering 102
Tabel B2.2 – Inschatting van de fouten met de verschillende methoden 106
Tabel B2.3 – Heen-en-terugloopijden, met de verschillende antennes op elk contactvlak gemeten 110
Tabel B3.1 – Fouten (*root-mean square percentage error*) in de bepaling van de permittiviteit van een homogeen medium, gemaakt met de verschillende beschouwde varianten 115
Tabel B3.2 – Fouten (*root-mean square percentage error*) in de bepaling van de verschillende parameters van een tweelaags medium, gemaakt met het eenvoudige en het verbeterde model 116

Woord vooraf

Dit onderzoek vond plaats binnen een prenormatief project met subsidies van het Bureau voor Normalisatie (NBN), in partnerschap met het *Institut Scientifique de Service Public* (ISSeP).

In België en op Europees niveau ontbreken vooralsnog richtlijnen of normen voor het gebruik van radar in wegconditieonderzoek. De manier waarop gewerkt wordt, steunt uitsluitend op de ervaring van de gebruiker en is dus niet optimaal. Bovendien is het moeilijk voor de opdrachtgever om te oordelen over de kwaliteit van de uitvoering van radarmetingen en de interpretatie van de meetgegevens.

Deze prenormalisatiestudie had tot doel de methodieken voor het gebruik van grondradar te bepalen om, eventueel in combinatie met andere methoden zoals geotechnisch onderzoek (sonderingen, kernboringen, enz.) of deflectiemetingen (valgewichtdeflectiemeter of curviameter), een beter inzicht in de opbouw van een wegconstructie te verwerven. In deze context verscheen in 2016 de publicatie "Gebruik van grondradar voor wegconditieonderzoek – Methodieken" van het OCW (MN 91/16 [1]). Hiervan zijn een Nederlandse en een Franse versie op papier en elektronisch verkrijgbaar, en een Engelse elektronisch.

Het partnerschap met ISSeP heeft beide organisaties in staat gesteld hun ervaring te verrijken, meer bepaald wat radarmaterieel (hoogfrequentere antennes voor het OCW en laagfrequentere antennes voor ISSeP) en toepassingen (oppervlak voor het OCW, diepere voor ISSeP) betreft.

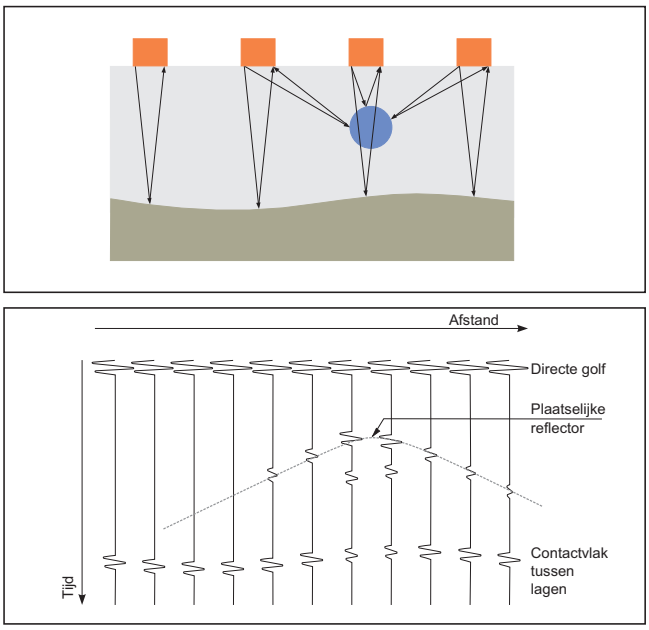
Tijdens dit onderzoek heeft het OCW zijn contacten met radargebruikers in België (UCL, UGent, AWV, SPW) versterkt. Ook zijn internationale contacten heeft het kunnen uitbreiden, door actief deel te nemen aan COST-actie TU1208 "*Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*" en aan de vergaderingen van de *Groupe Radar* (Frans-Belgische groep van Franssprekende gebruikers).

De Engelse vertaling van MN 91/16 is bezorgd aan de partners in COST-actie TU1208, die onder meer tot doel heeft *guidelines* voor gebruik van grondradar op te stellen.

Dit verslag beschrijft de resultaten van vier jaar onderzoek (van 1 november 2013 tot 31 oktober 2017), evenals de praktijkgevallen aan de hand waarvan de methodieken konden worden uitgeschreven en op een recyclingwerk worden toegepast.

Hoofdstuk 1
Principe van de methode

Grond- of georadar is een niet-destructieve geofysische techniek die steunt op voortplanting en reflectie van elektromagnetische golven met een frequentie die bij de gangbare commerciële modellen van 20 MHz tot 3 GHz gaat. Ze reageert op veranderingen in de elektromagnetische eigenschappen van een medium (permittiviteit, geleidingsvermogen en magnetische gevoeligheid). In het frequentiegebied dat voor onze toepassingen relevant is, en voor de geleidingsvermogens van wegmaterialen, geldt dat de snelheid van radargolven direct verband houdt met de permittiviteit van het materiaal. Radargolven gaan sneller in een medium zoals lucht (relatieve permittiviteit: 1) en langzamer in water (relatieve permittiviteit: 81). De onderzoeken worden meestal uitgevoerd door de antenne over het oppervlak te verplaatsen, al of niet in contact met de grond. De impulsen worden met regelmatige intervallen verzonden, wat het mogelijk maakt snel een beeld van de ondergrondse opbouw te verkrijgen (figuur 1.1).



Figuur 1.1 – *Maken van een profiel met behulp van een radarantenne*

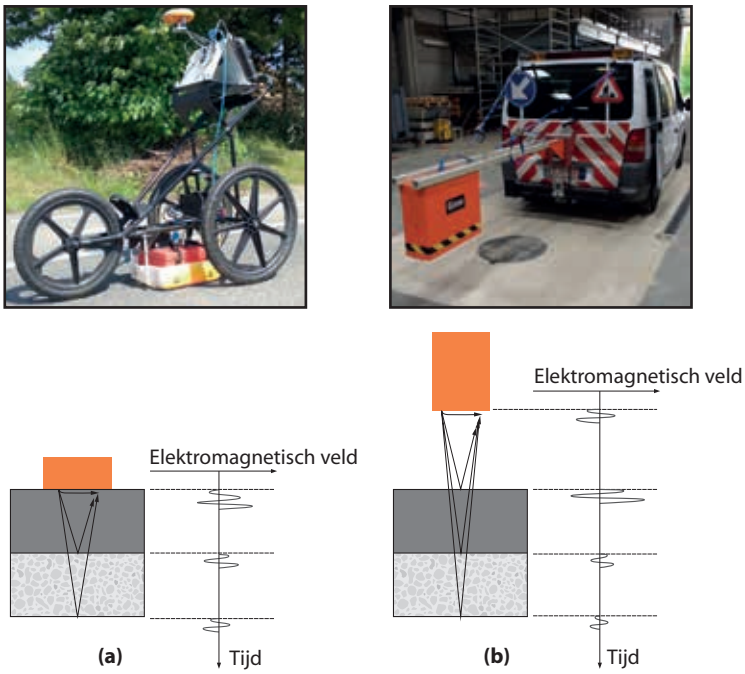
De radartechniek is ontwikkeld in de jaren 1960 en wordt tegenwoordig onder meer aangewend in de geologie (voor de detectie van grond- of moedergesteente, specifieke geologische formaties, breuken, karstverschijnselen, enz.), in de archeologie (om verborgen archeologische vindplaatsen in kaart te brengen), in de hydrogeologie (om het grondwaterpeil te bepalen en verontreinigde zones op te sporen) en bij civieltechnische werkzaamheden (voor de inspectie van betonconstructies, wegen, spoorwegen en andere ondergrondse constructies).

Op het vlak van wegconditieonderzoek heeft de techniek haar deugdelijkheid bewezen als hulpmiddel om laagdikten te detecteren of de kwaliteit (holten, enz.) van een verharding te beoordelen. Met grondradar kunnen ook veranderingen in wegconstructies visueel worden weergegeven (bepaling van homogene zones en heterogeniteiten). Zo kunnen geschikte locaties voor kernboringen of proefsleuven worden bepaald. In combinatie met deflectiemetingen en kernboringen maakt grondradartechniek het mogelijk de dikte en ruimtelijke spreiding van lagen in een wegconstructie nauwkeuriger te schatten, zodat bij terugberekeningen betrouwbaarder modulussen worden verkregen.

Er zijn verschillende soorten van radarantennes. Men onderscheidt **hoorn- of luchtgekoppelde antennes *(air-coupled horn antennas)***, die enkele tientallen centimeters boven de grond worden opgehangen, en **contact- of grondgekoppelde antennes *(ground-coupled antennas)***, die over het oppervlak worden voortgesleept. Er bestaan ook boorantennes, die in boorgaten worden ingevoerd. Deze laatste soort is niet geschikt voor toepassing in de wegenbouw.

De meeste grondradars werken in het tijdsdomein. Ze meten het tijdsverschil tussen het verzenden van zeer korte elektromagnetische impulsen (van de grootteorde van enkele nanoseconden) en het ontvangen van het gereflecteerde signaal (geïllustreerd in figuur 1.2 voor een contact- en een hoornantenne). Het overeenkomstige signaal omvat een brede band van frequenties in het frequentiedomein. De centrale frequentie is de frequentie met de grootste amplitude. Andere radars (*stepped frequency*, of getrapte frequentie) zenden continue sinusoïdale golven met verschillende frequenties uit en reconstrueren nadien eventueel het signaal in het tijdsdomein met behulp van een omgekeerde Fouriertransformatie.

Voor weginspecties worden bij voorkeur **hoornantennes** met een tijdgerelateerde radar en relatief hoge frequenties (1 tot 2 GHz) gebruikt (figuur 1.2 (b)). Ze kunnen namelijk op een voertuig worden gemonteerd, zodat metingen in verkeer kunnen worden uitgevoerd (met een snelheid tot 120 km/h voor sommige toestellen). Ze verdienen ook de voorkeur als **laagdikten** moeten worden bepaald. Deze antennes worden op een bepaalde hoogte boven de grond opgehangen, waardoor een groot deel van de golf aan het oppervlak wordt gereflecteerd en niet in de constructie dringt. Daardoor is de indringingsdiepte beperkt.



Figuur 1.2 – *Vergelijking van de werking van een contactantenne (a) en een hoornantenne (b)*

Contactantennes (figuur 1.2 (a)) moeten zich tijdens metingen zo dicht mogelijk tegen de grond bevinden. Ze worden vaak op een wagentje geplaatst dat door de operator te voet wordt voortgeduwd. Voor weginspecties kunnen ze ook worden voortgetrokken door een voertuig, dat langzaam rijdt om schade aan de antenne tijdens het meten te vermijden. In vergelijking met hoornantennes dringen de golven dieper in het medium, zodat voor een gegeven diepte een betere resolutie wordt verkregen.

Met contactantennes kan de constructie gerichter in een specifiek punt worden onderzocht, zodat wapening en plaatselijke gebreken beter in beeld kunnen worden gebracht. Ze zijn echter gevoeliger voor ruwheden en oneffenheden in het oppervlak en de contactvlakken. Hoornantennes meten een signaal over een grotere oppervlakte, waardoor (zelfs ruwe) contactvlakken visueel beter kunnen worden waargenomen.

Sommige merken bieden ook antennesets (*antenna arrays*) met verschillende zend- en ontvangantennes aan. Hiermee kunnen verschillende profielen tegelijk worden gemeten en kunnen ook sneller dwarsprofielen en bovenaanzichten worden gereconstrueerd. Ten slotte kunnen met dergelijke sets ook onderzoeken met variabele afstanden tussen de zend- en ontvangantennes worden verricht, waarbij de permittiviteit van het medium gemakkelijker kan worden geschat uit een zogenoemde *Common Midpoint* (CMP)-analyse.

Voor elke soort van grondradar bestaat ook nog een brede waaier van antennes met verschillende frequenties. De frequentie moet worden gekozen naargelang van de beoogde toepassing. Een hogere frequentie geeft een betere resolutie, maar een geringere indringingsdiepte; bij een lagere frequentie is de indringingsdiepte groter, maar de resolutie minder goed. Deze voor- en nadelen moeten tegen elkaar worden afgewogen en de gekozen frequentie zal dus een bij eerste benadering gesloten compromis zijn.

De keuze van de parameters voor de gegevensinzameling wordt uitvoerig toegelicht in de publicatie "Gebruik van grondradar voor wegconditieonderzoek – Methodieken" [1].

Hoofdstuk 2
Proefvak in Waver

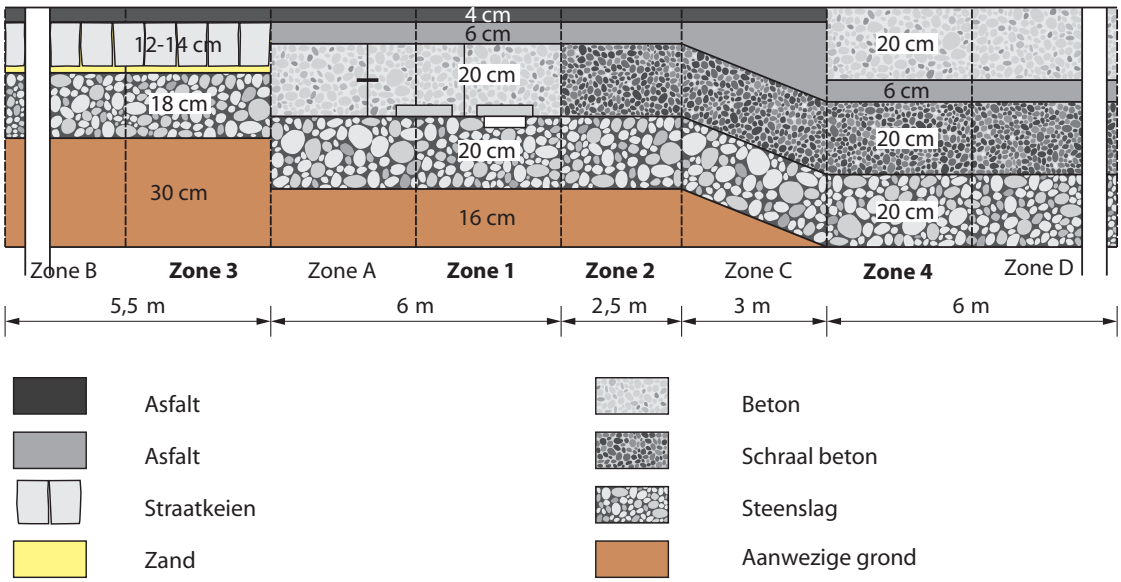
2.1 Beschrijving van het proefvak

Voor dit onderzoek is in de hal van het OCW te Waver een proefvak aangelegd met vier wegconstructies die in België veel voorkomen, om hierop radarmetingen in gecontroleerde omstandigheden te verrichten en de antennes te kalibreren. De sleuf die voor dit proefvak werd gegraven, was 23 m lang, 2,7 m breed en 3,10 m diep. Deze afmetingen werden onder meer bepaald door de mogelijkheden en beperkingen van de radarantennes (randeffecten vermijden). Ze moesten ook ruimte bieden om een representatief proefriool en een bitumineuze verharding aan te brengen.

Nadat het riool was gelegd, werd de sleuf aangevuld met de oorspronkelijk aanwezige grond, tot een hoogte die varieerde met de aan te brengen wegconstructies.

Er werden vier wegconstructies met een verschillende opbouw aangebracht:

- een betonplatenverharding (met een gedeuvelde en een niet-gedeuvelde voeg) met een asfaltoverlaag (zone 1);
- een asfaltverharding op een fundering van schraal beton (zone 2);
- een natuursteenbestrating met een asfaltoverlaag (zone 3);
- een betonverharding op een onderlaag van asfalt en een fundering van schraal beton (zone 4).



Figuur 2.1 – *Schematische doorsnede van het proefvak*

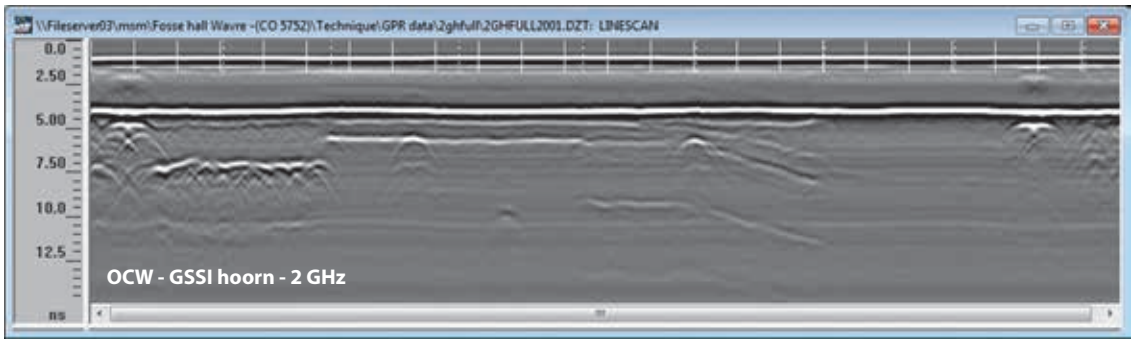
De zones B, A, C en D zijn overgangszones die hebben gediend om de zones 1, 2, 3 en 4 gelijkmatig uit te voeren. Deze technische zones zijn met verschillende sensoren uitgerust. Er zijn ook gebreken aangebracht: holte onder de betonplaat, geen hechting tussen twee asfaltlagen. Op de grens tussen de zones 3 en A zijn nutsleidingen (kabels en buizen) onder de verharding gelegd.

Tijdens de aanbrenging van de opeenvolgende lagen werden al radarmetingen verricht op de lagere niveaus van de constructie. Dit heeft het mogelijk gemaakt de radarsignaturen van de verschillende lagen voor en na de aanbrenging van de bovenliggende lagen te vergelijken.

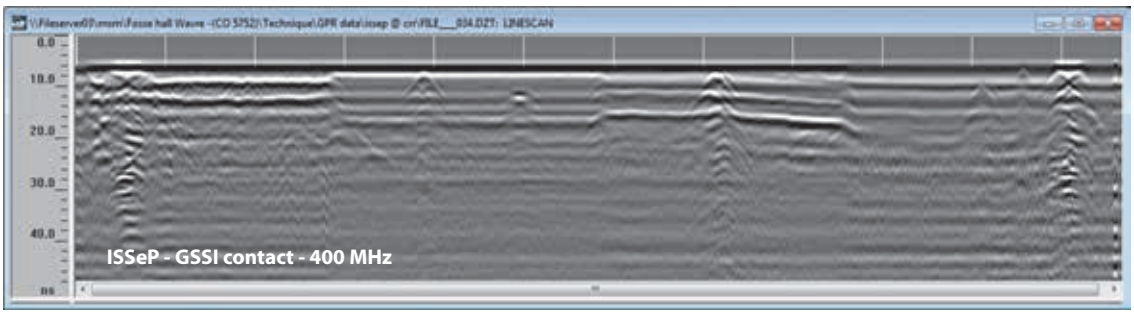
Tijdens de aanleg van het proefvak werden geotechnische proeven verricht, evenals dichtheidsmetingen op de funderingen en op de bitumineuze verharding.

2.2 Radarmetingen na de aanleg van het proefvak

Toen het proefvak klaar was, werden er metingen op verricht met de drie antennes (2 GHz, 1 GHz en 400 MHz) waarover het OCW destijds beschikte en met de twee antennes (400 MHz en 200 MHz) van ISSeP. De metingen met de luchtgekoppelde 2 GHz-antenne van het OCW en met de 400 MHz-contactantenne van ISSeP zijn weergegeven op figuur 2.2 en figuur 2.3. In beide gevallen werden de gegevensinzamelingsparameters en de visuele versterking gekozen om het profiel beter zichtbaar te maken.



Figuur 2.2 – *Profielen van de proefsleuf, gemeten met de luchtgekoppelde 2 GHz-antenne van het OCW*



Figuur 2.3 – *Profielen van de proefsleuf, gemeten met de 400 MHz-contactantenne van ISSeP*

Later zijn op het proefvak ook met tal van andere antennes metingen verricht. Zo heeft het OCW tijdens het project twee extra contactantennes gekocht, met een frequentie van 900 MHz en 2,6 GHz. Voorts zijn vier andere Belgische instellingen (SPW, AWV, UGent en UCL) met hun apparatuur metingen op het proefvak komen verrichten (figuur 2.4). Nog andere metingen zijn uitgevoerd door medewerkers van het Franse Cerema, toen de *Groupe Radar* naar het OCW kwam. De radarprofielen van de proefsleuf die door ons zijn gemaakt of die ons zijn bezorgd door externe radargebruikers die met verschillende antennes werken, zijn weergegeven in bijlage 1.

Bij deze metingen met verschillende antennes op eenzelfde constructie konden de werkmethoden van de verschillende uitvoerders worden geobserveerd. Ook konden de detectiemogelijkheden van elke antenne en de radarsignatuur van de verschillende constructies worden vergeleken, naargelang van de frequentie. Tabel 2.1 somt de verschillende contactvlakken in het proefvak op en beoordeelt voor elke antenne de kwaliteit van de detectie.

Figuur 2.4 – *Beelden van de verschillende metingen op de proefsleuf in Waver*

Diepte	Hoornantennes			Contactantennes					
	2 GHz GSSI	1 GHz GSSI	1 GHz Euradar	2,6 GHz GSSI	2 GHz GSSI	1,5 GHz GSSI	900 MHz GSSI	400 MHz GSSI	200 MHz GSSI
Contactvlak asfalt-straatkeien (4 cm)	+	-	- -	+	-	-	- -	- -	- -
Contactvlak straatkeien-steenslag-fundering (18 cm)	++	++	+	+	+	+	++	++	-
Contactvlak steenslagfundering-ondergrond onder straatkeien (34 cm)	+	+	- -	-	-	-	++	++	-
Contactvlak tussen de twee asfaltlagen	+	- -	- -	-	-	- -	- -	- -	- -
Contactvlak asfalt-beton (10 cm)	++	+	-	++	+	+	- -	- -	- -
Contactvlak beton-aggregaten (30 cm)	-	- -	- -	- -	- -	- -	+	+	-
Luchtholte (26 cm)	++	+	+	++	++	++	++	++	++
Contactvlak schraal beton-steenslagfundering (30-46 cm)	++	+	-	++	++	++	+	+	-
Contactvlak steenslagfundering-ondergrond (50-66 cm)	-	-	-	??	??	??	++	++	-
Asfaltlaag in beton (20 cm)	-	-	- -	- -	-	- -	+	+	-
Contactvlak schraal beton-steenslagfundering onder beton (46 cm)	- -	- -	- -	- -	- -	-	+	+	-
Contactvlak steenslagfundering-ondergrond onder beton (66 cm)	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -

++: zichtbaar en zeer duidelijk
+: zichtbaar in vergelijking met andere reflecties
-: merkbaar als de aanwezigheid van het contactvlak bekend is
- -: niet merkbaar
??: geen signaal op die diepte gemeten

Tabel 2.1 – *Zichtbaarheid van de verschillende contactvlakken naargelang van de gebruikte antenne*

Met de hoogfrequente antennes (1 GHz en meer) kan het contactvlak tussen asfalt en beton (10 cm) worden onderscheiden. De luchtgekoppelde antenne van 2 GHz is het doeltreffendst om de twee asfaltlagen (4 en 6 cm) te onderscheiden, want de reflectie op het oppervlak is korter dan de directe golf van de contactantennes. Voor de contactvlakken met beton kunnen de resultaten door de datum van de meting zijn beïnvloed, omdat jong beton vochtiger is en radargolven dus sterker afzwakt. De plaatselijke objecten (zoals de holte) zijn op alle profielen zichtbaar. De antennes van 1 GHz geven teleurstellende resultaten, te wijten aan een te hoog ruisniveau (dit probleem deed zich vooral bij de metingen in de proevenhal voor).

Sommige antennes met betrekkelijk lage frequenties (900 of 400 MHz) geven zeer interessante resultaten voor de diepere lagen in de wegconstructie of voor oneffen lagen zoals straatkeien, die als contactvlakken en niet als een reeks hyperbolen op het scherm verschijnen. Dit geldt niet voor de antenne van 200 MHz, die een te lage resolutie heeft om de verschillende reflecties werkelijk van elkaar te onderscheiden.

2.3 Schatting van de snelheden op basis van de laagdikten

Aangezien de dikten van de verschillende lagen (op de toelaatbare maatafwijkingen na) bekend zijn, kan de snelheid van radargolven in elk van deze lagen met een goede nauwkeurigheid worden geschat uit de voortplantingstijd. Wanneer die snelheid (in cm/ns) bekend is, kan de relatieve permittiviteit van elke laag, ε'_r, worden bepaald als:

$$\varepsilon'_r = \left(\frac{30}{v}\right)^2 \quad (1)$$

Deze schatting wordt enkel gemaakt voor de vier gelijkvormige zones en voor de antennes waarmee de twee contactvlakken van elke laag zichtbaar zijn (tabel 2.1). Omdat de zichtbaarheid van het ondervlak van de laag beton onder het asfalt erg beperkt was, werd de reflectie op de luchtholte gebruikt om dit contactvlak te lokaliseren.

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de gevonden snelheidswaarden, met de overeenkomstige gemiddelden en variatiebreedten.

Laag	Dikte (cm)	Hoorn-antennes		Contactantennes						
		2 GHz GSSI	1 GHz GSSI	2,6 GHz GSSI	2 GHz GSSI	1,5 GHz GSSI	900 MHz GSSI	400 MHz GSSI	Gemiddelde	Variatiebreedte
Asfaltlaag op straatkeien	**4**	11,87		13,65	13,21				12,91	1,78
Straatkeien	**12-14**	11,94		11,29	11,20				11,48	0,74
Steenslagfundering onder straatkeien	**18**	10,59	9,60		10,18	8,53	9,31	10,38	9,77	2,06
Asfalt op beton	**10**	11,57	10,89	11,77	11,38	11,38	12,19		11,53	1,30
Beton	**20**	10,04	10,45	9,80	9,99	10,04	10,24		10,09	0,65
Steenslagfundering onder beton	**20**						8,82	7,36	8,09	1,46
Asfalt op schraal beton	**10**	10,83	10,45	11,25	11,01	10,78			10,87	0,80
Schraal beton	**20**	11,77		11,57	11,63	11,90			11,72	0,33
Steenslagfundering onder schraal beton	**20**						9,57	10,67	10,12	1,10
Toplaag van beton	**20**						10,67	11,23	10,95	0,56

Tabel 2.2 – *Snelheden (in cm/ns) in de lagen, berekend aan de hand van de nominale dikten*

Deze waarden tonen een vrij grote variatie in de snelheden naargelang van de antennes. Deze variatie kan verband houden met de betrekkelijk subjectieve *picking* van de contactvlakken doordat de impulsen verschillen naargelang van de frequentie, en aan fouten in de nultijdberekening. Dit aspect werd nader bestudeerd en in bijlage 2 worden aanbevelingen voorgesteld. Als de berekende snelheden gebruikt worden om dikten te bepalen in het eigenste profiel dat werd gebruikt om ze te berekenen, zouden de begane fouten beperkt moeten blijven, omdat deze parameters onveranderd blijven.

De resultaten variëren ook voor eenzelfde antenne, maar ditmaal naargelang van de beschouwde wegopbouw. Zo geeft de steenslagfundering zeer variabele snelheden naargelang van de zone waarin gemeten wordt. Dit verschil kan te wijten zijn aan krachtige of minder krachtige verdichting, of aan een verschil tussen de werkelijke en de nominale dikte van de verharding. De maatafwijkingen van de werkelijk aangebrachte dikten worden door de aanbrenger op 0,5 cm geschat. Een dergelijke afwijking kan voor de dunste lagen tot fouten van meer dan 1 cm/ns leiden.

Deze resultaten illustreren de nauwkeurigheid die, zonder specifieke gegevensverwerking, met radarmetingen en nominale dikten haalbaar is.

2.4 Schatting van de snelheden op basis van uitsluitend de radarmetingen

Een van de voordelen van hoornantennes boven contactantennes is de mogelijkheid om de permittiviteit ε'_r van de eerste laag te bepalen aan de hand van de amplitude van de aan het oppervlak gereflecteerde golf. Steunend op deze permittiviteit kan de dikte van deze laag, d, aan de hand van formule (2) worden afgeleid uit de reflectietijd op het ondervlak ervan ($t_{overdracht}$);

$$d = \frac{t_{overdracht} * v}{2} = \frac{t_{overdracht} * c}{2 * \sqrt{\varepsilon'_r}} = \frac{t_{overdracht} * 15}{\sqrt{\varepsilon'_r}} \qquad (2)$$

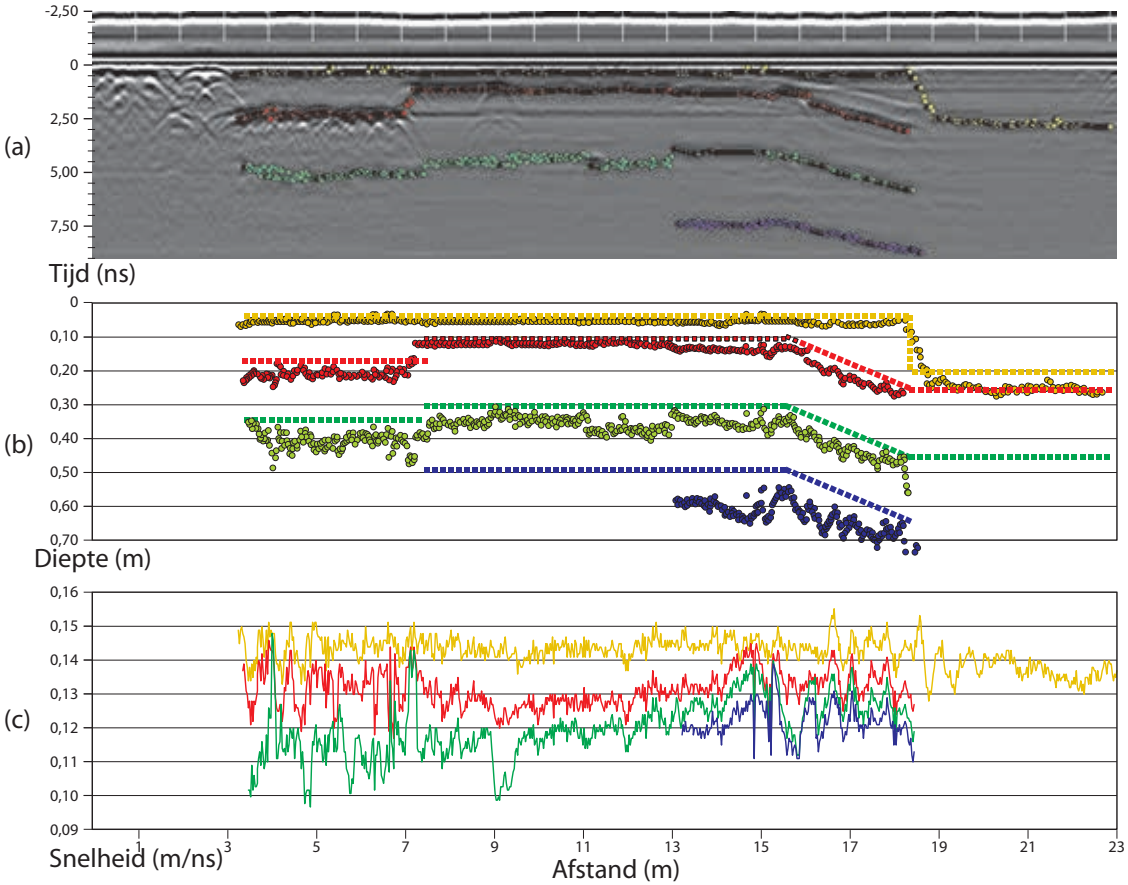
waarin c de lichtsnelheid (30 cm/ns) is.

Deze schatting kan ook voor de dieper liggende lagen worden gemaakt, maar de afzwakking van het signaal in het materiaal wordt in de berekeningen verwaarloosd. Schattingen van permittiviteit en dikte worden dus bij elk volgend contactvlak minder nauwkeurig.

2.4.1 Schatting met de Radansoftware

Met de Radansoftware kunnen dikten en permittiviteiten van lagen automatisch worden geschat uit de amplituden en aankomsttijden van elke reflectie. Wij hebben deze mogelijkheid beproefd op de meting met de 2 GHz-antenne op het proefvak (figuur 2.5 (a)).

De berekende dikten zijn weergegeven in figuur 2.5 (b), waaraan ter vergelijking de werkelijke dikten van de overeenkomstige lagen in stippellijnen zijn toegevoegd. De snelheden die de software gebruikt om de dikten van de eerste drie lagen te bepalen, zijn eveneens weergegeven (figuur 2.5 (c)).



Figuur 2.5 – *Schatting van de laagdikten met Radan, op basis van de metingen met de hoornantenne van 2 GHz*

Het blijkt dat de resultaten vrij nauwkeurig zijn voor de eerste asfaltlaag, hoewel ze erg dun is (4 cm). Voor de betonverharding is de schatting minder nauwkeurig. Deze onzekerheid zou te wijten kunnen zijn aan het feit dat de eigenschappen van beton in de dikte variëren, of aan onnauwkeurigheden in de *picking* van het bovenste deel van de tussenlaag van asfalt.

Voor de volgende lagen stapelen de fouten zich op. De schatting van de snelheden wordt steeds minder nauwkeurig en alle laagdikten worden overschat. Bovendien blijkt dat de geschatte snelheden enkel dalende snelheden zijn, wat altijd het geval zal zijn als de gebruiker enkel de positieve amplituden kiest.

Tabel 2.3 geeft een overzicht van de snelheden en de overeenkomstige permittiviteiten die met de software zijn geschat.

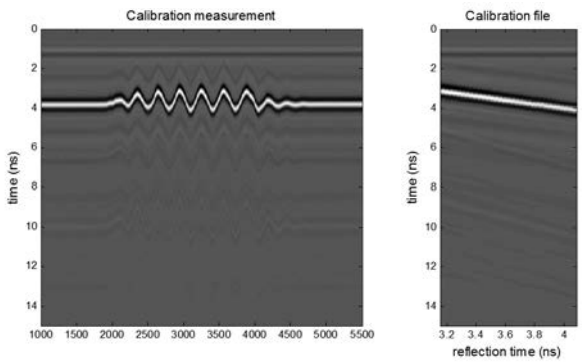
Laag	Snelheid (cm/ns)	Permittiviteit	*Snelheden gemeten op basis van de nominale dikten*
Toplaag van asfalt	14,0-15,0	4,0-4,6	*12,9*
Toplaag van beton	13,0-14,5	4,3-5,3	*11,0*
Straatkeien	12,0-14,0	4,6-6,3	*11,5*
Onderlaag van asfalt	12,0-13,5	4,9-6,3	*11,2*
Betonplaten	11,0-13,0	5,3-7,4	*10,1*

Tabel 2.3 – *Bepaling van de snelheden in en permittiviteiten van de verschillende lagen met Radan, op basis van enkel de radarmetingen*

Deze snelheden zijn allemaal hoger dan op basis van de nominale dikten was gemeten, wat de overschatting van de laagdikten verklaart. Met deze methode kunnen de snelheid in en de dikte van de eerste laag vrij nauwkeurig worden geschat. Voor de volgende lagen zal kalibratie aan een boorkern nodig zijn om voldoende nauwkeurigheid te bereiken.

2.4.2 Schatting op basis van de aan het oppervlak gereflecteerde amplitude

De reflectie op het oppervlak van de constructie kan vrij eenvoudig worden gebruikt om de permittiviteit van het materiaal te schatten. Daartoe dient een kalibratiemeting op een metalen plaat te worden gebruikt, om een gemiddeld kalibratiebestand aan te maken (met het gemiddelde van alle signalen die voor elke aankomsttijd van de reflectie zijn gemeten) (figuur 2.6).



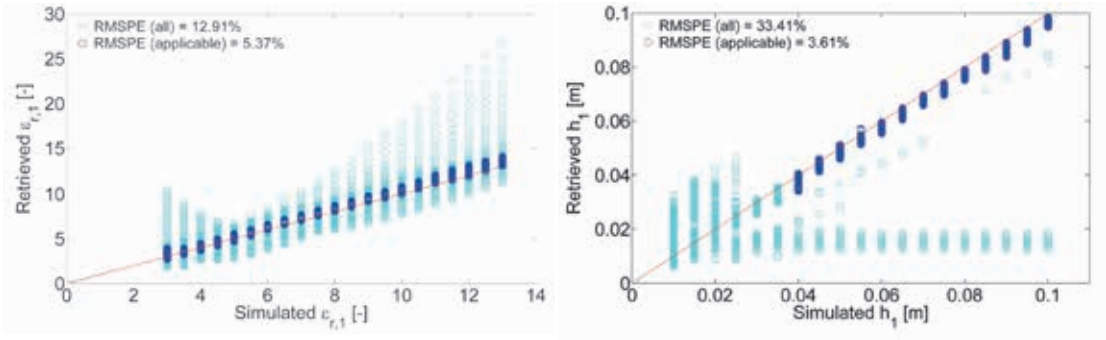
Figuur 2.6 – *Bepaling van een kalibratiebestand op basis van de kalibratiemeting*

De permittiviteit wordt berekend aan de hand van de reflectiecoëfficiënt, volgens de formule:

$$\varepsilon'_r = \frac{(R - 1)^2}{(R + 1)^2} \qquad (3)$$

In [1] wordt deze methode nader beschreven.

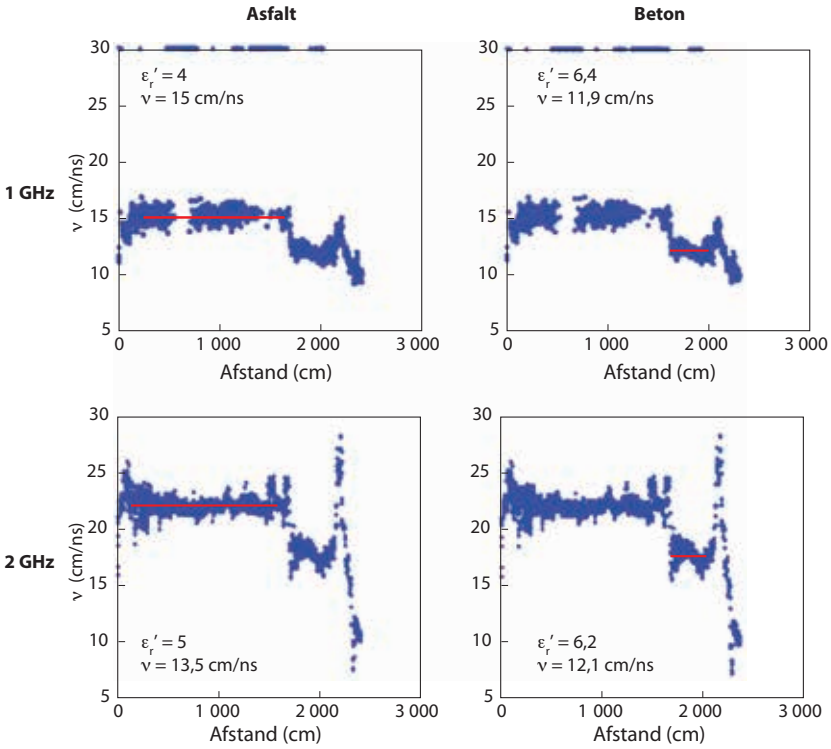
Er werd een numerieke studie [3] verricht om de nauwkeurigheid van de methode te toetsen aan resultaten bij numerieke simulaties met eindige differenties. In een oneindig medium werd voor de permittiviteit een fout van 4,38 % RMSPE (*root-mean-square percentage error)* gevonden. In een tweede studie werd een medium bestaande uit een laag van een eerste materiaal op een oneindig medium gesimuleerd. Deze proeven wezen uit dat de methode slechts geldige resultaten gaf als de twee materialen voldoende van elkaar verschilden (met een permittiviteitscontrast groter dan 1,25 of kleiner dan 0,8 en een dikte groter dan 4 cm). In deze omstandigheden bedroegen de meetfouten (in RMSPE uitgedrukt) 5,37 % voor de permittiviteit van de eerste laag, 3,61 % voor de dikte van deze laag en 8,78 % voor de permittiviteit van de tweede laag (figuur 2.7).



Figuur 2.7 – *Vergelijking tussen gesimuleerde en met de oppervlakreflectiecoëfficiënten-methode geschatte waarden voor de permittiviteit ($\varepsilon'_{r,1}$) en de dikte (h_1) van de toplaag, voor alle beschouwde tweelagensituaties en enkel voor de toepasselijke gevallen*

Dit bevestigt de relatieve nauwkeurigheid die voor toplagen kan worden verwacht, en de afnemende nauwkeurigheid van de methode voor dieper gelegen lagen. Voor die laatste maken de zeer korte rekentijd en de betrekkelijk eenvoudige vergelijkingen van de methode een doeltreffende, geheel niet-destructieve tool als een fout van 5 % in de dikteschattingen aanvaardbaar is. In bijlage 3 worden twee varianten voorgesteld om deze fout te verkleinen: rekening houden met de invalshoek van de directe golf in de berekening van de oppervlakreflectiecoëfficiënt, en de reflectiecoëfficiënt in het frequentiedomein berekenen.

De oppervlakreflectiemethode is ook toegepast op de metingen in het proefvak met de antennes van 2 GHz en 1 GHz. Hierbij werd een onderscheid gemaakt tussen de zones met een asfalttoplaag en zone 4 met een betonverharding. Figuur 2.8 geeft de resultaten weer.



Figuur 2.8 – *Snelheden in toplaagmaterialen, geschat uit de amplitude van de oppervlakreflectie*

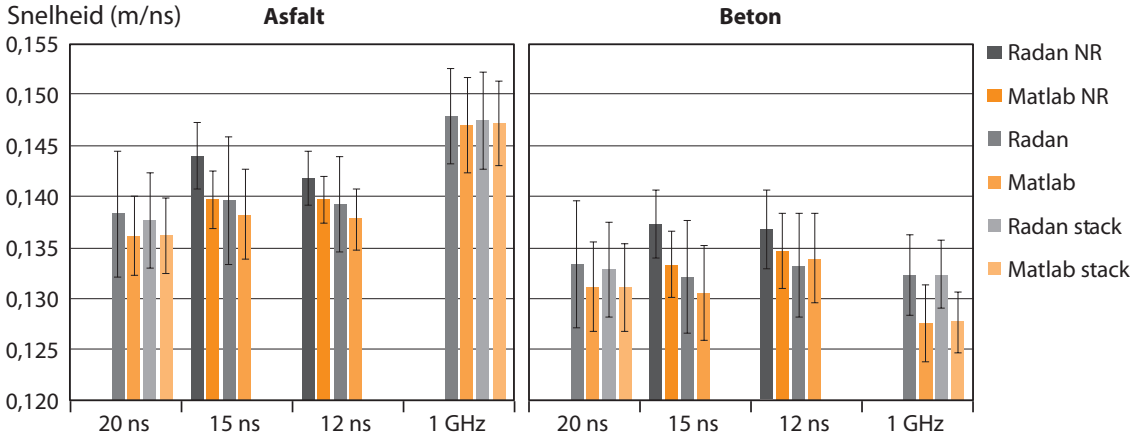
De hiermee berekende permittiviteiten zijn vergelijkbaar met de waarden die doorgaans in de betrokken materialen voorkomen. Evenals bij schattingen met Radan zijn de snelheden groter dan die op basis van de laagdikten. Voor beton kan dit aan droging van het materiaal toe te schrijven zijn, waardoor er bovenin minder water is dan gemiddeld over de hele dikte.

Het verschil in snelheid en permittiviteit tussen de metingen met de 1 GHz- en de 2 GHz-antenne op asfalt blijft vrij groot, te meer aangezien de metingen dezelfde dag werden uitgevoerd. Misschien is de golflengte van het signaal bij 1 GHz wat te groot voor metingen op een eerste laag die slechts 4 cm dik is.

2.4.3 Invloed van de meetparameters op de schatting van de snelheid

Er werd een studie verricht om de met de twee methoden geschatte oppervlaksnelheden te vergelijken naargelang van de antenne (1 of 2 GHz) en de gekozen meetparameters (ruisonderdrukkingsfilter, tijdvenster en gemiddeldeberekening *(stacking)*). Tussen de twee methoden werd een verschil van 1 cm/ns waargenomen. De ruisonderdrukkingsfilter lijkt tot een hogere geschatte snelheid te leiden, hoewel hij de standaardafwijking van de metingen verkleint. Ook *stacking* per acht verkleint deze standaardafwijking. Algemeen geldt dat berekening van snelheden met de vergelijkingen (1) en (3) in plaats van met Radan tot een lagere snelheidsschatting met een kleinere standaardafwijking leidt.

De gedetailleerde resultaten zijn gepresenteerd in [2].



Figuur 2.9 – *Verschillen in snelheden berekend uit de amplitude van de oppervlakreflectie, naargelang van de verwerkings- en berekeningsmethode*

2.5 *Full-waveform inversion*

Volledige golfvormomkering (FWI of *Full Waveform Inversion*) is een geavanceerder methode om materiaaleigenschappen te bepalen, die sinds een aantal jaren door verschillende onderzoeksteams wordt ontwikkeld. In deze methode wordt in plaats van enkel de amplitude de gehele vorm van elke reflectie geanalyseerd. Hierdoor kan nauwkeuriger informatie over de verschillende lagen worden verkregen.

Voor volledige golfvormomkering moeten meestal radars met frequentieverspringing worden gebruikt, die nauwkeuriger zijn dan de in de handel verkrijgbare antennes, en moet de antenne strikt worden gekalibreerd. In dit project zijn twee teams met hun systemen met frequentieverspringing metingen op het proefvak komen verrichten: Cerema (Rouen en Angers) en UCL.

Wanneer zij op een stel kunstmatige gegevens (simulatie van een tweelagensysteem) wordt toegepast, geeft de FWI-methode betere resultaten dan de oppervlakreflectiemethode, met vrijwel geen fouten in de permittiviteit en de dikte van de eerste laag. De prijs voor deze nauwkeurigheid is echter dat de rekentijd veel langer is (in het beschouwde geval 300 maal zo lang).

Beide methoden zijn toegepast op radargegevens die met een in de handel verkrijgbare, luchtgekoppelde antenne van 2 GHz waren verkregen op het proefvak van het OCW (zones 1 en 2). Beide berekenden voor de eerste laag dikten die overeenstemden met de nominale dikte (4 cm). De resultaten zijn gepubliceerd in [3].

2.6 Modellering met eindige differenties

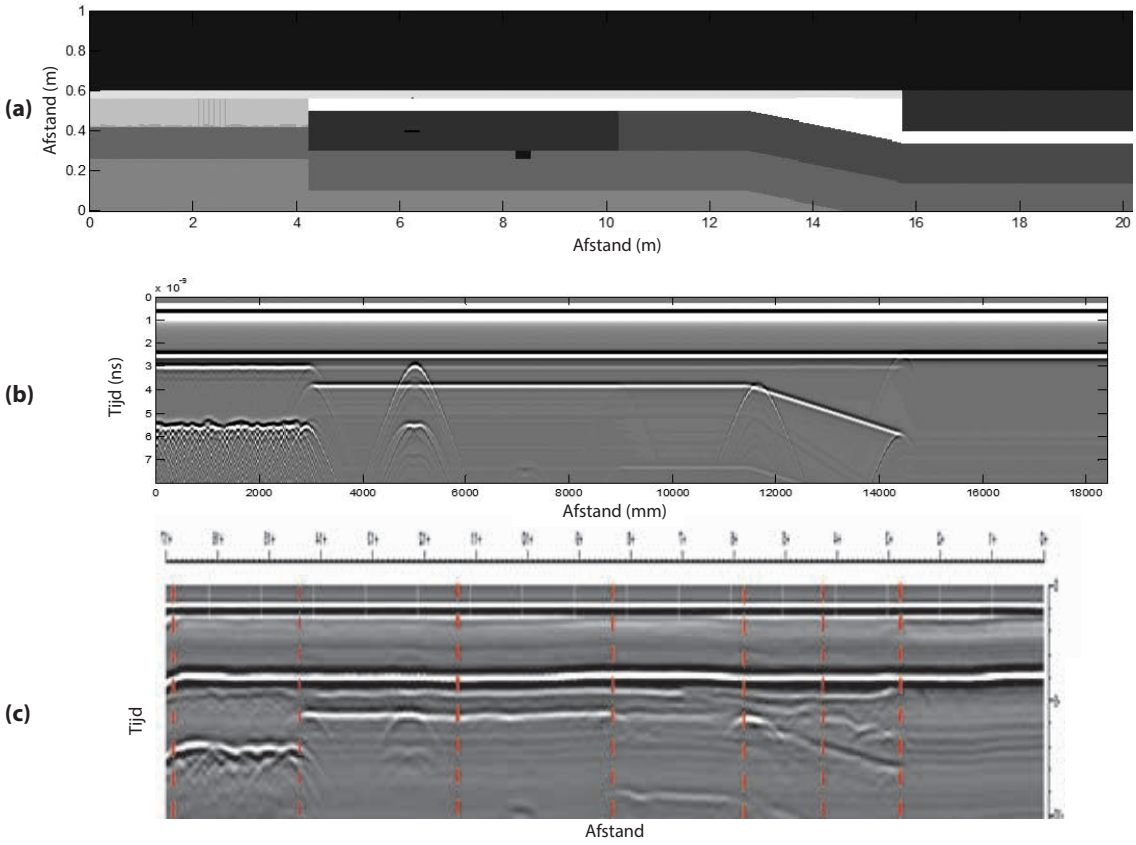
De bovenste 60 cm van de proefsleuf werden gemodelleerd met eindige differenties, met behulp van de GprMax-software [4]. In deze simulaties kunnen radargrammen worden gesimuleerd voor verschillende frequenties, met de mogelijkheid om de geometrie en de permittiviteiten van de materialen te variëren. Deze methode maakt het mogelijk:

- de voor de verschillende materialen geschatte permittiviteiten en geleidingsvermogens visueel te valideren, door het radargram met de werkelijk gemaakte beelden te vergelijken;
- de antennekeuze optimaal af te stemmen op een bekende situatie;
- te anticiperen op het radarbeeld op de locatie, om de interpretatie ervan in situ te vergemakkelijken.

Voor de eerste modelleringsproef werden de permittiviteiten en geleidingsvermogens van de materialen (tabel 2.4) geschat door de waarnemingen uit de eerste metingen (tabel 2.2) te combineren met de klassieke waarden voor de betrokken materialen [1]. Het model dat gemaakt werd om de proefsleuf in Waver weer te geven, is afgebeeld op figuur 2.10 (a). Het radargram dat de simulaties voor een frequentie van 2 GHz opleverden (figuur 2.10 (b)), kan worden vergeleken met het radargram dat in werkelijkheid met onze hoornantenne van 2 GHz werd gemeten (figuur 2.10 (c)).

Materiaal	Permittiviteit	Geleidingsvermogen	Snelheid
Beton	7,1	0,12	11,26
Schraal beton	6,9	0,04	11,42
Aggregaten	9	0,0001	10
Ondergrond	11	2	9,04
Zand	4	0,001	15
Steen	8	0,001	10,61
Asfalt 1 (toplaag)	3,5	0,0001	16,04
Asfalt 2	4	0,0001	15

Tabel 2.4 – *Parameters voor de modellering*



Figuur 2.10 – *Modellering van de proefsleuf in Waver met eindige differenties. (a) Geometrie van het model; (b) Gesimuleerd radargram voor een antenne van 2 GHz; (c) Werkelijke metingen met de antenne van 2 GHz*

Op het eerste gezicht lijken de bij de modellering gehanteerde permittiviteiten de werkelijke permittiviteiten van de materialen goed te benaderen. De golflengte van onze antenne lijkt echter aanzienlijk groter dan bij de modellering, doordat de effectieve frequentie van onze antenne wellicht aanzienlijk lager is dan de in lucht gemeten 2 GHz.

2.7 Conclusies

De radarmetingen op het proefvak hebben het mogelijk gemaakt de verschillende radarantennes en de mogelijkheden om de verschillende lagen te detecteren, te beoordelen.

Schattingen van de snelheden in de verschillende lagen op basis van de voortplantingstijden en de nominale dikten variëren met het gebruikte signaal en met de betrokken constructie. De nauwkeurigheid blijft dus beperkt. Dit aspect werd nader bestudeerd en in bijlage 2 worden aanbevelingen voorgesteld.

Laagdikteberekeningen waarbij gebruik wordt gemaakt van oppervlakreflectie geven meestal goede resultaten voor de eerste laag, maar de nauwkeurigheid neemt af naarmate de lagen dieper liggen. De dikten die voor de eerste laag met de vergelijkingen voor de oppervlakreflectiecoëfficiënt werden berekend, waren iets kleiner dan die uit automatische berekeningen met Radan. Uit een algemene vergelijking kwam naar voren dat ook andere meetparameters de resultaten beïnvloedden.

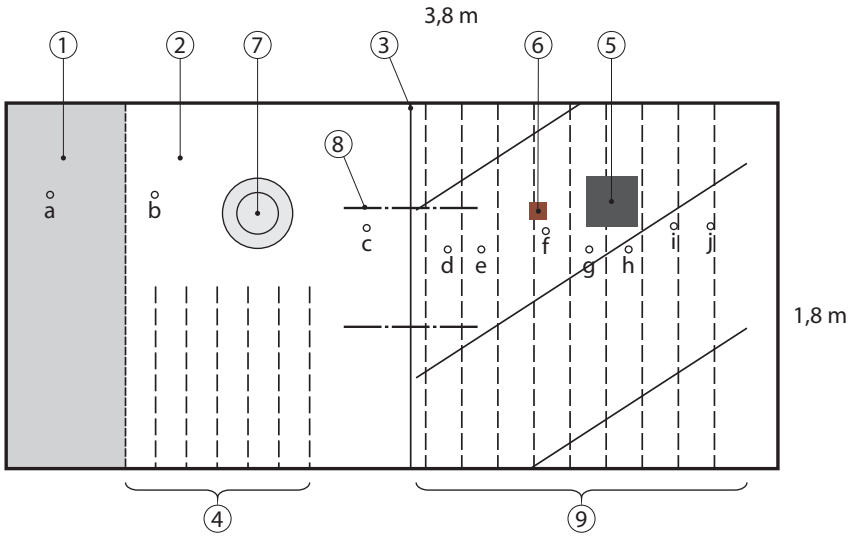
Ten slotte werd een numerieke simulatie van het profiel uitgevoerd. Met deze modellering kan worden nagegaan of de werkelijke waarden voor de betrokken materialen wel degelijk benaderen. Zij kan ook op voorhand aangeven of een signaal met een gegeven frequentie voldoende reflectie zal genereren om bepaalde contactvlakken in een te onderzoeken constructie te detecteren.

Hoofdstuk 3
Proefblokken in Sterrebeek

3.1 Betonplaat

3.1.1 Beschrijving van het proefstuk

Deze proeven hebben tot doel de prestaties van drie radarantennes (2,6 GHz, 1 GHz en 400 MHz) te beoordelen voor metingen op een betonnen element met bekende geometrie, waarin elementen zoals deuvels, ankerstaven, een asfaltblok en een houten blok zijn verwerkt.



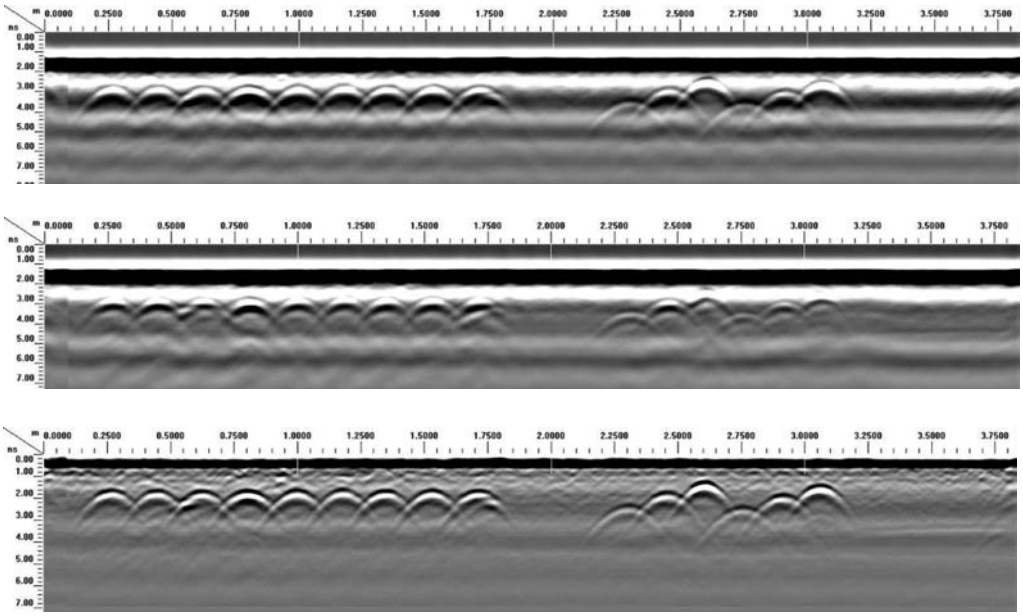
Zone	Element	Specificaties
1	Dunne plaat	190 mm
2	Dikke plaat	230 mm
3	Voeg	/
4	Wapeningsstaven van verschillende diameters, op verschillende diepten	3* Ø 16 mm + 3* Ø 12 mm Diepten: 80, 110 en 140 mm
5	Asfaltblok	250*250*45 mm
6	Houten blok	/
7	Oneffenheid	Ongeveer 35 mm hoog
8	Deuvel	/
9	Schuine wapening Dwarswapening	Ø 20 mm, om de 180 mm Ø 16 mm, om de 70 mm, 120 mm diep

Figuur 3.1 – *Beschrijving van het proefvak*

De metingen vinden om de 10 cm plaats, in beide richtingen. Daarna wordt een aantal profielen opgenomen met de omgekeerde polarisatie (antenne 90° gedraaid ten opzichte van haar klassieke stand). De gekozen bemonstering is 400 meetsporen per meter, wat gezien de loopsnelheid van de operator een absoluut maximum vormt en bijgevolg een zeer lage voortbewegingssnelheid nodig maakt.

3.1.2 Resultaten en conclusies

Figuur 3.2 toont enkele voorbeelden van resultaten met de antenne van 2,6 GHz.

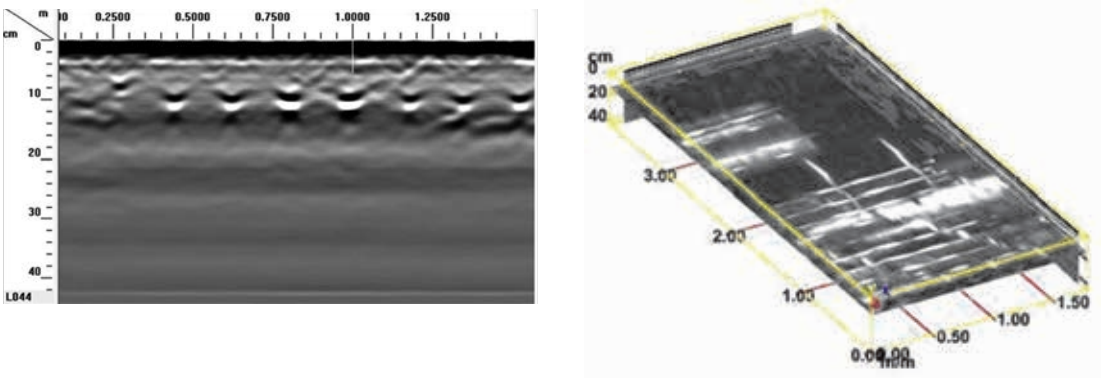


Figuur 3.2 – *Beeld van de betonplaat bij 2,6 GHz: onbewerkt signaal, met omgekeerde polarisatie gemeten signaal en signaal na verwerking (voornamelijk een hoogdoorlaatfilter van 2,3 GHz)*

Het onbewerkte signaal vertoont kennelijk veel oppervlakresonantie, waardoor frequentiefilters moeten worden gebruikt. De reflectie op het ondervlak van de plaat is maar ten dele zichtbaar.

De meting met omgekeerde polarisatie (figuur in het midden) maakt het mogelijk de hyperbolen in te korten en de reflectie op het ondervlak van de plaat aan het einde van het profiel beter zichtbaar te maken.

Na de filteringsfase kunnen de signalen worden verwerkt door middel van migratie, om de energie van elke hyperbool in de top ervan te concentreren. Alle signalen kunnen worden verzameld om driedimensionale beelden van de verwerkte zone te vormen. De verschillende elementen in het blok zijn duidelijk zichtbaar (figuur 3.3).



Figuur 3.3 – *Deel van het 2,6 GHz-profiel na migratie en 3D-beeld van de onderzochte plaat*

De profielen met de antennes van 400 MHz en 1 GHz blijken niet concludent. Met de 1 GHz-antenne zijn de wapeningsstaven duidelijk zichtbaar, maar de hyperbolen vermengen zich met de directe golf. Gepaste filtering (*background removal*) kan dit probleem verlichten, maar het resultaat blijft onvolmaakt. De antenne van 400 MHz biedt onvoldoende resolutie voor een dergelijke meting.

3.2 Waterinjectieproef

Een van de problemen die zich geregeld bij het onderzoek van kunstwerken voordoet, is het opsporen van waterinfiltratie in brugdekken onder de afdichtingslaag. Omdat radartechniek in dit verband antwoorden kan geven, ondernam de *Groupe Radar* een gecontroleerd experiment.

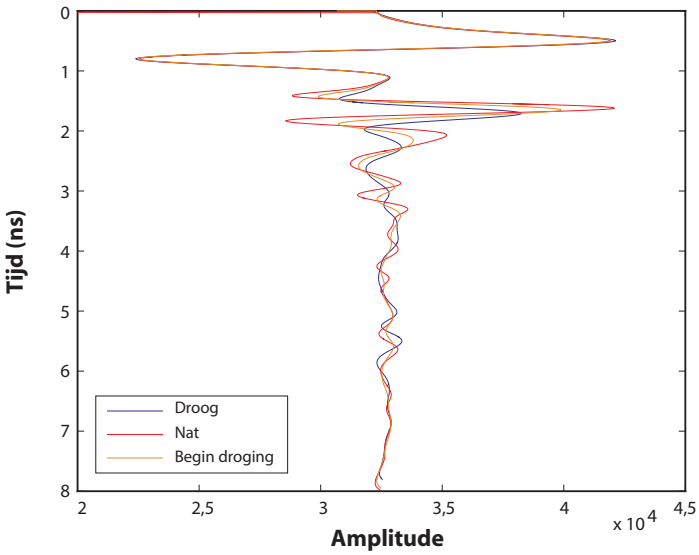
(a) **(b)**

Figuur 3.4 – *Aanbrengen van buizen (diameter: 17 mm) en vastzetten met hars (a). Gieten van de afdichtingslaag op het glasvlies (b)*

Het OCW en SPW ontwierpen een vierkante proefplaat met zijden van 80 cm, bestaande uit een betonplaat, een laag gietasfalt en twee lagen asfaltmortel. Tussen het beton en het asfalt werd een geotextielmembraan aangebracht, om gebrekkige hechting, waardoor het beton vochtig kan worden, te simuleren (figuur 3.4 (b)). Daartoe werden van aan de onderzijde van de plaat vier buizen door het beton aangebracht, waarmee het geotextiel en bijgevolg het beton konden worden bevochtigd (figuur 3.4 (a)).

De bevochtiging over de dikte van het beton werd op verschillende tijdstippen nagegaan. Er vonden metingen plaats vóór de bevochtiging en na verzadiging, en daarna regelmatig tijdens de droging.

Figuur 3.5 vergelijkt de meetsporen met een antenne van 2,6 GHz in het midden van de plaat, in verschillende fasen van de proef. Het blijkt dat de reflectie op het contactvlak groter is wanneer het beton vochtig is. De hoogste reflectiepiek treedt ook aanzienlijk vroeger op. Voor de reflectie op het ondervlak, die later en door de aanwezigheid van water met een kleinere amplitude optreedt, zijn de conclusies andersom.



Figuur 3.5 – *Voor, tijdens en na waterinjectie op de proefplaat gemeten radarsignalen*

Aan de UCL zijn verdere analysen verricht, met volledige golfvormomkering. De definitieve resultaten moeten nog worden gepubliceerd.

Hoofdstuk 4
Diktebepaling

4.1 Inleiding

Tijdens het project zijn radarmetingen gebruikt om laagdikten – vooral verhardingsdikten – in wegconstructies te bepalen. Op sommige locaties werden ook deflectiemetingen en kernboringen uitgevoerd. De voornaamste resultaten worden in dit deel toegelicht.

4.2 Radar- en FWD-metingen op een autosnelweg – Terugberekeningen

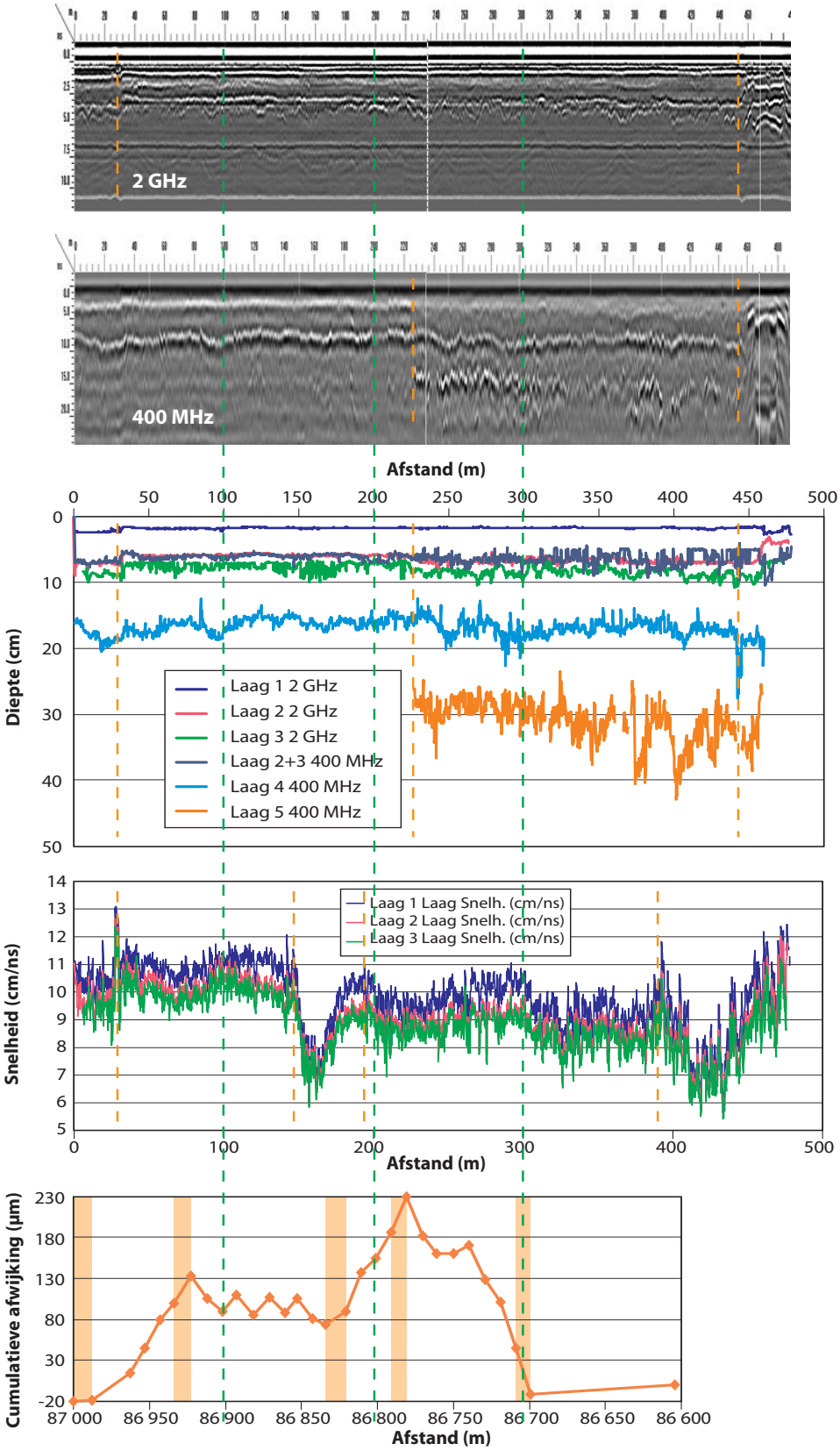
De metingen vonden plaats op 31 augustus 2015, op een autosnelweg met oorspronkelijk twee rijstroken waaraan begin de jaren 2000 een derde rijstrook was toegevoegd.

Volgens de plannen bestond de wegconstructie uit een bitumineuze verharding in drie lagen op een fundering en een onderfundering van discontinu gegradeerd steenslag. Eén van de boorkernen bracht echter de aanwezigheid van een gebonden materiaal in de fundering aan het licht.

4.2.1 Radarmetingen

4.2.1.1 Algemene analyse – Homogene zones

In figuur 4.1 is de informatie samengebracht waarmee homogene zones kunnen worden bepaald. Zo zijn de bij 2 GHz en 400 MHz gemeten profielen, de schijnbare reflectietijden die met de twee antennes zijn verkregen, de met Radan geschatte snelheden in de eerste drie lagen en de resultaten (cumulatieve afwijking) van de *Falling Weight Deflectometer* onder elkaar weergegeven. De drie boorkernen zijn aangeduid met groene stippellijnen en de grenzen van de homogene zones die uit elke methode zouden kunnen worden afgeleid met oranje.



Figuur 4.1 – *Vergelijking van metingen aan de hand waarvan homogene zones kunnen worden bepaald: bij 2 GHz en 400 MHz gemeten profielen, schijnbare reflectietijden, met Radan geschatte snelheden en met de FWD bepaalde homogene zones. De boorkernen zijn aangeduid met groene stippellijnen, de grenzen van de homogene zones met oranje*

Op elk van de radarprofielen zijn twee veranderingen in de opbouw van de wegconstructie te zien. De eerste, die alleen met de antenne van 2 GHz kon worden gedetecteerd, doet zich voor op 32 m van het beginpunt: de dikte van het asfalt neemt af, evenals die van de fundering, waardoor de reflectie een grotere amplitude krijgt. De tweede verandering in hetzelfde profiel treedt na ongeveer 456 m op, waar de eigenlijke weg in een gewapend-betonconstructie overgaat. Ook de antenne van 400 MHz merkt deze verandering op; bovendien brengt zij nog een grote verandering aan het licht op 225 m, waar een diepere reflector (wellicht het ondervlak van de onderfundering) op het beeld verschijnt. Door de informatie van de twee profielen te combineren, kunnen dus vier homogene zones worden bepaald.

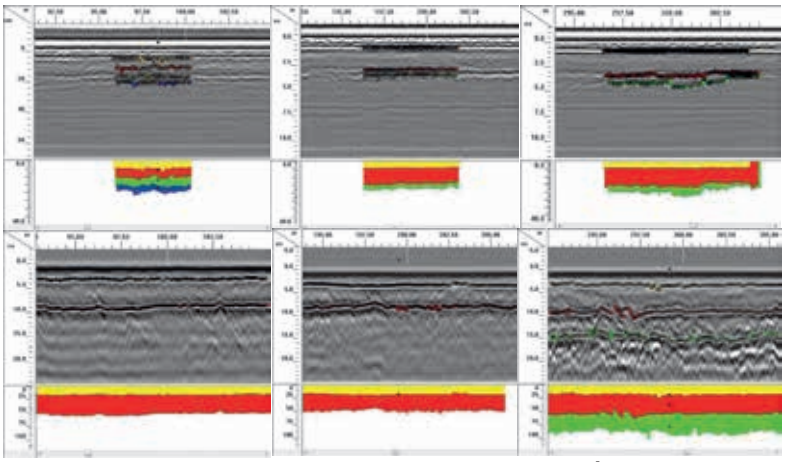
Het valt op dat de reflectietijden van het ondervlak van het asfalt, verkregen met respectievelijk de antennes van 2 GHz en 400 MHz, mooi samenvallen. Wel onderscheidt de antenne van 2 GHz meervoudige reflecties aan het ondervlak van het asfalt, en die van 400 MHz maar één.

Behalve de eerste stemmen de zo bepaalde zones niet overeen met duidelijke veranderingen in de met Radan geschatte snelheden. Voorts valt op te merken dat de gemeten snelheden aanzienlijk variëren voor een wegconstructie die er aan het oppervlak homogeen uitziet en dat de snelheden voor asfalt zeer laag zijn (8-11 cm/ns, terwijl de waarden voor asfalt op een droge ondergrond vaak tussen 13 en 15 cm/ns liggen). Dit laat vrezen dat er zich vocht of onzuiverheden aan het oppervlak bevonden, wat heel aannemelijk is omdat de rijstrook tijdens de proef als tijdelijke werkweg werd gebruikt.

Omgekeerd stemmen de zonegrenzen die op basis van de profielen werden bepaald wel degelijk overeen met hellingveranderingen in de kromme van de cumulatieve afwijking volgens de FWD-metingen. Anderzijds zijn sommige veranderingen (op 77 m en 166 m) die de FWD-metingen in homogene zones aangaven op de radarprofielen niet te zien.

4.2.1.2 Plaatselijke analyse – Boorkernen

Figuur 4.2 geeft de profielen weer die met de drie boorkernen overeenstemmen.



Figuur 4.2 – *2 GHz-profielen (bovenaan) en 400 MHz-profielen (onderaan) die met de drie boorkernen overeenstemmen*

Het blijkt dat de 2 GHz-profielen allemaal vergelijkbaar zijn (behalve dat het contactvlak tussen de twee lagen van het onderliggende asfalt op het eerste profiel beter zichtbaar is), terwijl het 400 MHz-profiel voor de derde boorkern zich sterk van de andere twee onderscheidt: het ondervlak van de onderfundering is hier duidelijk zichtbaar. De snelheden, geschat op basis van de dikten in de boorkernen en op basis van de amplitude van de verschillende reflecties, zijn samengebracht in tabel 4.1. De dikten die op basis van de berekende snelheden zijn geschat, worden in tabel 4.2 vergeleken met de dikten in de boorkernen en met de nominale dikten.

	Zone 1			Zone 2			Zone 3		
Laag	**2 GHz Radan**	**400 MHz + kalibr. boorkern**	**2 GHz + kalibr. boorkern**	**2 GHz Radan Opp.-refl.**	**400 MHz + kalibr. boorkern**	**2 GHz + kalibr. boorkern**	**2 GHz Radan Opp.-refl.**	**400 MHz + kalibr. boorkern**	**2 GHz + kalibr. boorkern**
Asfalt ***Asfalt toplaag*** ***Asfalt onderlaag***	10,92 *11,07* *10,87*	10,00	11,16-11,51 *11,18* *11,10-11,60*	9,65 *10,34* *9,36*	9,60-11,73	10,75 *11,23* *10,51*	10,07 *11,01* *9,72*	9,85	10,34 *11,11* *10,08*
Fundering					5,38-6,73				

Tabel 4.1 – *Vergelijking van snelheden (in cm/ns), met de georadar geschat op basis van de oppervlakreflecties of door gebruik te maken van de aan de boorkernen gemeten dikten*

	Zone 1			Zone 2			Zone 3			
Laag	**2 GHz Radan**	**400 MHz (10 cm/ns)**	**Boorkern**	**2 GHz Radan**	**400 MHz (10 cm/ns)**	**Boorkern**	**2 GHz Radan**	**400 MHz (10 cm/ns)**	**Boorkern**	**Nominale dikten**
Asfalt ***Asfalt toplaag*** ***Asfalt onderlaag***	15,93 *5,14* *10,79*	16,5	16,3-16,8 *5,2* *11,1-11,6*	14,19 *4,19* *10*	16,5	15,85 *4,6* *11,25*	16,27 *4,46* *11,81*	17	16,75 *4,5* *12,25*	17
Tussenlaag	3,38	---		2,19	---	± 3,5	3,96			/
Fundering		27,85			26	± 14		28,3		25
Onderfundering								32,25		30

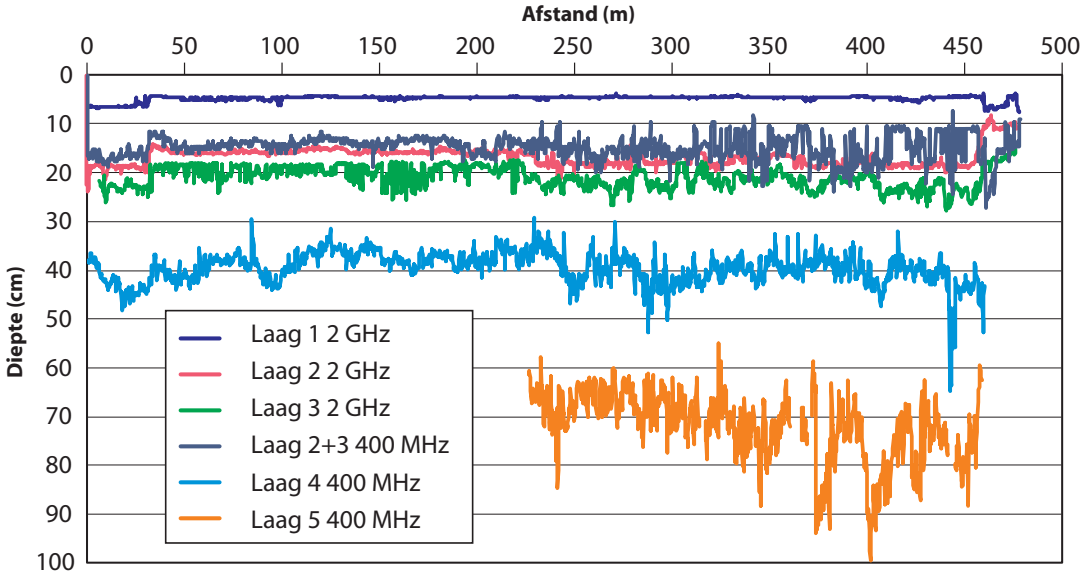
Tabel 4.2 – *Vergelijking van de enkel door de grondradar geschatte dikten (cm) met de aan de boorkernen gemeten dikten en met de nominale dikten*

De berekende snelheden in de asfalttoplaag ter hoogte van de boorkernen liggen dicht bij elkaar. De uit de reflecties berekende waarden zijn iets lager, maar de orde van grootte is correct.

De snelheid in de fundering, voor slechts één boorkern berekend, is uiterst laag. Het materiaal zag er in het onderste gedeelte gebonden uit, maar niet in het bovenste. Niets wijst erop dat onder deze boorkern nog een andere, ongebonden laag zat. Dit zou dan betekenen dat het ondervlak van de fundering waarvoor de reflectie werd waargenomen niet met het uiteinde van de genomen boorkern overeenstemde.

Voor een dikte van 25 cm zou de snelheid ongeveer 9 cm/ns moeten bedragen, wat overeenstemt met de permittiviteit die voor een steenslagfundering verwacht wordt.

Door de gemiddelden van de aan de boorkernen gemeten (of voor de fundering: afgeleide) waarden te gebruiken, wordt een gemiddelde snelheid bepaald van 11,17 cm/ns voor de asfalttoplaag, 10,53 cm/ns voor het onderliggende asfalt, 10,79 cm/ns voor het gewogen gemiddelde van het asfalt, 9,56 cm/ns voor de tussenlaag en 9 cm/ns voor de fundering. Door deze informatie te combineren, kan een schatting van de diepte van de verschillende lagen worden verkregen (figuur 4.3).



Figuur 4.3 – *Schatting van de diepte van de verschillende lagen op basis van de aan boorkernen gekalibreerde radarmetingen*

Hier blijkt dat de met de 400 MHz-antenne gemeten diepte van het ondervlak van het asfalt niet meer helemaal overeenstemt met de diepte volgens de metingen met de 2 GHz-antenne. Een kleine fout in de nultijdbepaling voor de antenne van 400 MHz (er werd geen rekening gehouden met de afstand tussen antennes) zou aan de oorsprong van dit verschil kunnen liggen. In bijlage 2 worden hiervoor aanbevelingen gedaan.

4.2.2 Terugberekening uit de deflectiemetingen

Terugberekening is een optimaliseringsberekening die met daartoe bestemde software wordt uitgevoerd. De gebruiker moet een meerlagenmodel van de wegconstructie en een eerste schatting van de elasticiteitsmoduli van de lagen invoeren. De software zoekt dan een stel moduluswaarden die betrekkelijk dicht bij de door de gebruiker geschatte moduli liggen en tevens een gesimuleerde deflectiekromme geven die de (bijvoorbeeld met de curviameter of de valgewichtdeflectiemeter) gemeten deflectiekromme dicht benadert. Het model van de wegconstructie wordt doorgaans gekarakteriseerd door de gebruikte materialen (uitgedrukt in een "coëfficiënt van Poisson" voor elke laag), de dikten van de lagen en de hechting tussen deze lagen. Omdat het slechts om een mathematische optimaliseringsberekening gaat, kunnen de waarden die voor de elasticiteitsmoduli worden verkregen soms fysisch onrealistisch blijken. Na de berekening moet de gebruiker dan ook een beroep doen op zijn expertise voordat hij de resultaten accepteert, en de berekeningen eventueel laten overdoen met andere invoergegevens of met een beperking van het aantal moduli dat de software tijdens de optimaliseringsberekening mag wijzigen.

In 2011 waren met de curviameter deflectiemetingen verricht op hetzelfde vak van de E42. De rechterrijstrook (of strook 1) en de middenstrook (of strook 2) waren toen onderzocht. Omdat de laagdikten niet goed bekend waren, was de terugberekening in het kader van dat onderzoek verricht met verschillende aannamen voor de dikte van de fundering.

De eerste berekeningen gaven een onrealistische waarde voor E2 (de modulus van de fundering). Door vervolgens E3 (de modulus van de onderfundering) en de dikte van de fundering vast te leggen, werden realistischer waarden verkregen. Wel was de overeenstemming tussen gemeten en berekende deflectiekrommen bij deze resultaten minder goed. Dit voorbeeld maakt duidelijk welke moeilijkheden

zich kunnen voordoen in een praktijkgeval waarin elementaire informatie over de aanwezige wegconstructie ontbreekt.

De radarmetingen, FWD-metingen en kernboringen die in 2015 op de derde rijstrook zijn uitgevoerd, hebben het mogelijk gemaakt deze resultaten aan te vullen.

Ter illustratie geven wij de resultaten van de terugberekening voor KP 86,902 (gemeten deflectiewaarden in tabel 4.4) en de wegopbouw in de derde rijstrook, daarbij gebruikmakend van de met de radar geschatte dikten in de overeenkomstige "zone 1" (tabel 4.2). De aannamen voor de berekening zijn samengebracht in tabel 4.3 en de resultaten van de terugberekening in tabel 4.5. De eerste rij geeft de resultaten van de berekeningen met de uit de radarmetingen afgeleide dikten. Op de volgende rijen staan de resultaten die worden verkregen door deze dikten wat te laten variëren.

Laag	Materiaal	Dikte (mm)	Coëfficiënt van Poisson	Hechting tussen de lagen
1	Asfalt	163	0,35	
				0,5
2	Steenslagfundering	278,5	0,40	
				0,5
3	Ondergrond		0,50	

Tabel 4.3 – *Aannamen voor de terugberekening op de E42*

Punt (KP)	D(0) (in µm)	D(300) (in µm)	D(600) (in µm)	D(900) (in µm)	D(1200) (in µm)	D(1500) (in µm)	D(1800) (in µm)	D(2100) (in µm)	D(2400) (in µm)	Kracht (in kN)
86,902	**232**	**173**	**112**	**75**	**54**	**42**	**34**	**29**	**25**	**47,7**

Tabel 4.4 – *Deflecties en belasting door de FWD in een punt op de derde rijstrook van de E42*

Punt (KP)	Dikte asfalt-pakket (in mm)	Dikte funde-ring (in mm)	Elasticiteits-modulus E1 (in N/mm²): asfalt	Elasticiteits-modulus E2 (in N/mm²): fundering	Elasticiteits-modulus E3 (in N/mm²): ondergrond
86,902	163	278,5	7 836	328	196
86,902	159,3	278,5	8 207	336	196
86,902	165	278,5	7 648	324	197
86,902	168	278,5	7 381	318	197
86,902	170	250	7 204	330	196
86,902	170	550	7 326	249	200
86,902	163	260	7 823	341	196
86,902	163	283	7 839	326	196

Tabel 4.5 – *Terugberekening met variatie van de laagdikten*

Ondanks de ouderdom van de wegconstructie geven de eventuele onnauwkeurigheden in de laagdikten geen significant verschillend resultaat bij de terugberekening. De grondradar heeft geholpen om de dikte van de asfaltverharding en de fundering beter in te schatten, wat de terugberekening beter maakt. Op te merken valt dat de dikte van de fundering niet kon worden bepaald door kernen te boren (ongebonden korrelvormig materiaal). De verkregen moduli passen bij een dergelijke wegconstructie en de ouderdom ervan.

4.2.3 Conclusies

De proeven vonden plaats op een ingewikkelde wegconstructie die een verbreding had ondergaan. De radar- en de FWD-metingen bevestigden dat er grote variaties voorkwamen, ook in eenzelfde rijstrook. Zo kon met de antenne van 400 MHz het ondervlak van de onderfundering in de tweede helft van het profiel worden weergegeven, terwijl het in het eerste deel onzichtbaar bleef. Omgekeerd werden met de antenne van 2 GHz verscheidene reflectoren in de fundering gevonden. Deze reflectoren zijn wellicht het gevolg van heterogeniteit van de fundering, die in sommige punten gebonden is, maar niet over de hele laagdikte. De homogene zones volgens het radaronderzoek werden vergeleken met de homogene zones die op grond van de helling van de kromme van de cumulatieve afwijkingen volgens de FWD-metingen waren bepaald. Een aantal verschillen die met de FWD waren waargenomen, kon met de radar niet worden aangetoond.

De proeven bevestigen dat het voor gedetailleerde onderzoeken nodig is verscheidene antennes te combineren en dat het voordelen heeft een kalibratie voor de laagdikten uit te voeren – aan boorkernen of, als dat niet kan, door gebruik te maken van de amplitude van de reflecties. Deze laatste, geheel niet-destructieve methode gaf voor de drie genomen boorkernen een nauwkeurigheid van ongeveer 10 %. De informatie die uit boorkernen kan worden gehaald, blijft echter vaak beperkt tot de verhardingslagen, meer bepaald wanneer de fundering ongebonden is. In zulke gevallen kan enkel met radarmetingen worden gewerkt om de dikten van de onderliggende lagen te schatten.

De terugberekening uit de deflectiemetingen werd beter met de invoer van de laagdikten uit de radarmetingen.

4.3 Radar- en FWD-metingen op een gemeentelijke weg

4.3.1 Inleiding

Met de 2 GHz-antenne zijn op een gemeentelijke weg radarmetingen verricht. Daarbij zijn twee profielen geregistreerd, respectievelijk links en rechts in de betrokken rijstrook.

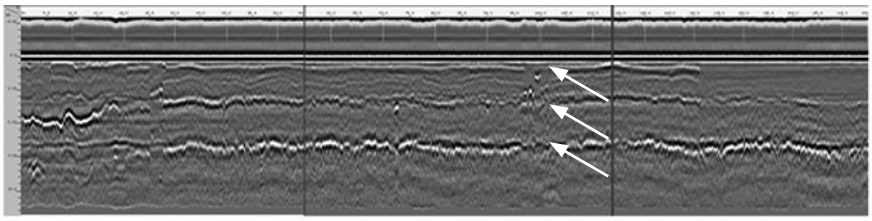
De metingen vonden plaats net voor de asfalttoplaag werd afgeschaafd.

SPW nam enkele boorkernen. Ze zijn niet in bijster goede staat. Boorkern 3, die ter hoogte van een benzinestation (op ± 143 m) werd genomen, laat verschillende lagen zien, met een dikte van 16 cm en 15 cm (de toplaag van 4 cm was afgeschaafd).

Figuur 4.4 – *Boorkern uit en beeld van de locatie*

4.3.2 Verwerking

Nadat de twee profielen met de Radansoftware waren verwerkt, werd een manuele *picking* van de drie onderscheiden contactvlakken verricht, om hieruit de aankomsttijden voor elk van deze contractvlakken af te leiden.



Figuur 4.5 – *Radarprofiel, linkerzijde*

4.3.3 Analyse van de snelheden en bepaling van de laagdikten

Uit de analyse van de twee profielen met de Radansoftware kan de gemiddelde dikte van de verschillende lagen worden afgeleid, evenals de snelheid in die lagen. De twee profielen geven gelijksoortige resultaten (tabel 4.6).

	Boorkern op 143 m (cm)	Profiel 1 Dikte (cm)	Profiel 1 Snelheid (cm/ns)	Profiel 2 Dikte (cm)	Profiel 2 Snelheid (cm/ns)
Laag 1	4	**4,9**	14,2	**5,2**	14,4
Laag 2	16	**17**	13,9	**17**	14
Laag 3	15	**24**	13,7	**27**	13,9

Tabel 4.6 – *Dikten van de drie lagen (boorkernen en Radan)*

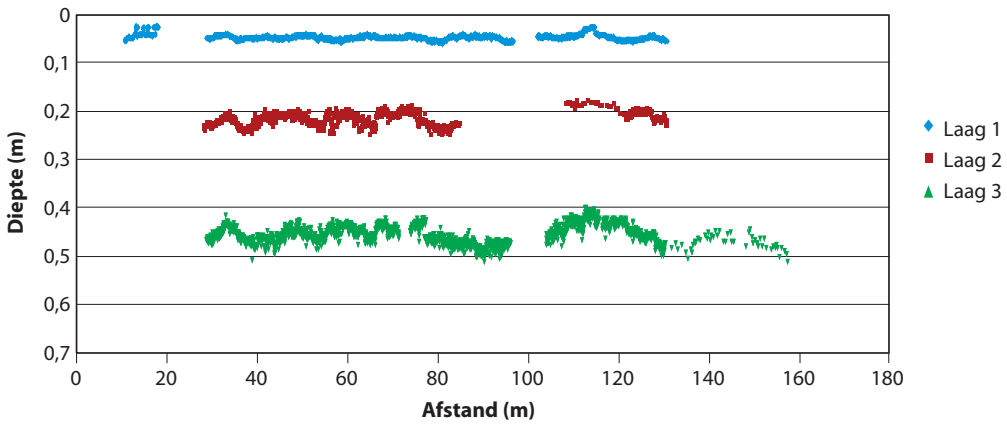
Voor de eerste twee lagen stemmen de met Radan berekende dikten vrij goed overeen met de dikten van de afgeschaafde laag en in de genomen boorkern. Voor de derde laag geeft Radan een aanmerkelijk grotere dikte. Misschien is de boorkern niet tot helemaal onderin genomen.

Uit de aankomsttijden van de reflecties van profiel 2 kunnen, gebruikmakend van de informatie van de boorkern, de snelheden in elke laag worden herberekend. Voor profiel 1 werd deze analyse niet uitgevoerd, omdat de reflectie op het eerste contactvlak in dit profiel zeer afgezwakt was. Voor de tweede laag is de op de boorkern gebaseerde snelheid iets lager dan met Radan. Voor laag 3 is de op de boorkern gebaseerde snelheid aanzienlijk lager dan volgens Radan, wellicht doordat de boorkern niet volledig is.

	Boorkern op 143 m (cm)	Profiel 2 Snelheid boorkern (cm/ns)	Profiel 2 Snelheid Radan (cm/ns)
Laag 1	4	**11,59**	**14,4**
Laag 2	16	**13,33**	**14**
Laag 3	15	**7,75**	**13,9**

Tabel 4.7 – *Uit de boorkernmetingen afgeleide en met Radan berekende snelheden*

Figuur 4.6 toont de diepten van de verschillende lagen, berekend met de Radansoftware. Dezelfde weergave was mogelijk geweest met de op basis van de boorkern geschatte snelheden voor de lagen 1 en 2.

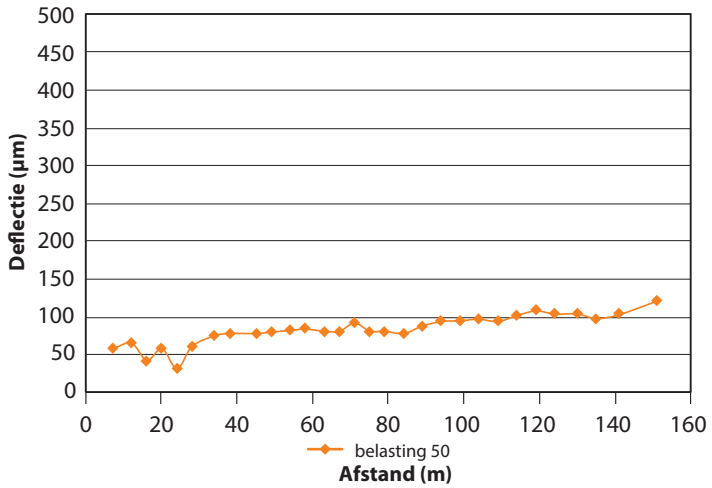


Figuur 4.6 – *Diktes geschat met Radan berekende snelheden (linkerzijde van de rijstrook)*

4.3.4 Metingen met de valgewichtdeflectiemeter

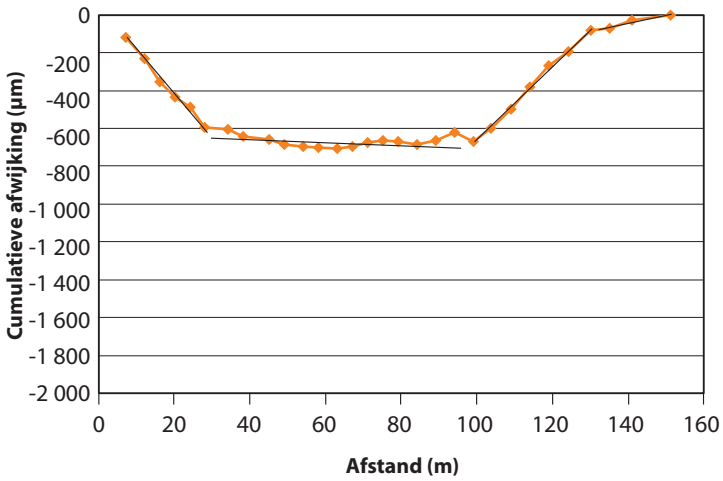
Aan de linkerzijde van de rijstrook zijn valgewichtdeflectiemetingen verricht, met een belasting van 50 kN en een tussenafstand van 5 m.

Behalve in de eerste 30 m is de maximale deflectie groot (vooral in het laatste gedeelte).



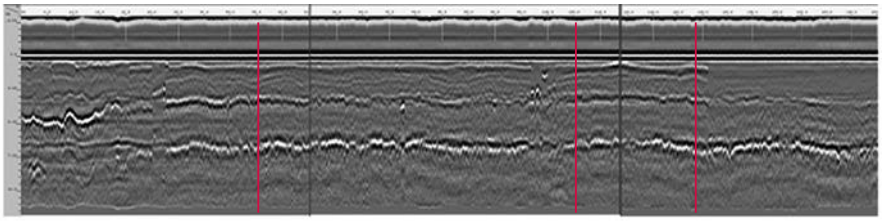
Figuur 4.7 – *Maximale deflectie*

De homogene zones worden bepaald aan de hand van veranderingen in de deflecties. Er tekenen zich vier homogene zones af.



Figuur 4.8 – *Cumulatieve afwijking van de deflecties*

Er wordt een goede overeenkomst gevonden tussen homogene zones die uit de deflectie- en uit de radarmetingen kunnen worden afgeleid.



Figuur 4.9 – *Homogene zones*

De deflectie op 900 mm van het valpunt (D900) geeft informatie over de stijfheid van de onderliggende lagen (onderfundering of zelfs ondergrond). De verkregen deflecties zijn vrij groot, wat erop wijst dat de stijfheid van de onderliggende lagen niet zo goed is.

4.3.5 Conclusies

Uit de gecombineerde radar- en FWD-metingen kan worden afgeleid waar de homogene zones zich in het onderzochte wegvak bevinden.

Uit de radarmetingen kunnen met een bevredigende nauwkeurigheid de dikten van de eerste twee lagen worden afgeleid (het verschil is ongeveer 1 cm, wat neerkomt op een afwijking van 20 % voor de laag van 4 cm en van 6 % voor de laag van 16 cm). Voor de derde laag strookt de gevonden dikte niet met wat aan de boorkern zichtbaar is. Misschien was de boorkern niet volledig.

De analyse van de deflecties brengt lage stijfheden in de onderzochte constructie aan het licht.

4.4 Diktemetingen op de verharding van de parking te Sterrebeek

4.4.1 Inleiding

Op het proefvak van de parking te Sterrebeek zijn grondradarmetingen verricht om zones met gebrekkige hechting op te sporen, de verschillende lagen in de opbouw van de wegconstructie te visualiseren en de nauwkeurigheid van niet-destructieve dikteschattingen te beoordelen. Voor de toetsing van de dikteschattingen werden vier kernen uit het proefvak geboord, op plaatsen die gekozen werden op grond van de radarmetingen met de antenne van 2 GHz.

De metingen werden verricht met drie contactantennes van 2,6 GHz, 1 GHz en 400 MHz en met één luchtgekoppelde antenne van 2 GHz.

4.4.2 Beschrijving van de locatie

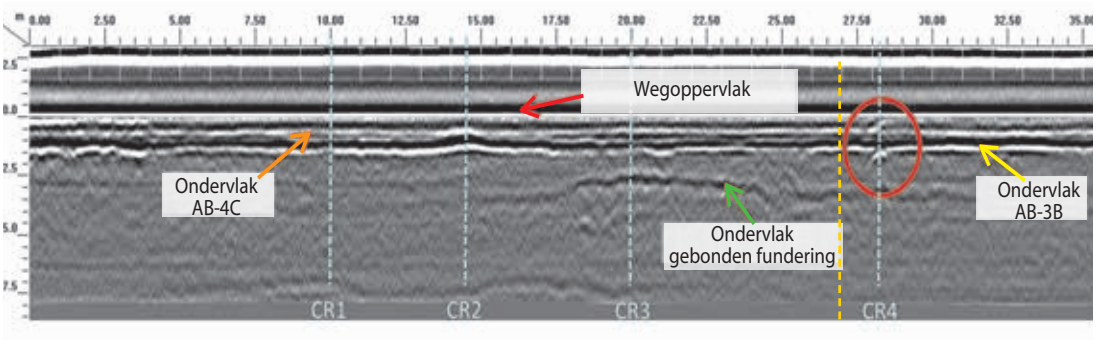
In de lengterichting werden, over de breedte van de weg verdeeld, drie profielen geregistreerd, met een lengte van 35 m. Boven op de achtenveertig boorkernen die aan het oppervlak waren genomen om verschillende reparatiemethoden te vergelijken, werden vier diepe kernen geboord voor de kalibratie van de radarmetingen.

Omdat de metingen met de contactantennes na de kernboringen plaatsvonden, konden zij niet op exact dezelfde plaats worden uitgevoerd als voor de eerder bepaalde profielen. Ze werden daarom in het linkerrijspoor en in het midden tussen de rijsporen verricht.

4.4.3 Visualisatie van de resultaten – Opbouw van de wegconstructie

4.4.3.1 Luchtgekoppelde antenne van 2 GHz

De radarmetingen met deze antenne (figuur 4.10) brachten twee asfaltlagen aan het licht, over de hele lengte van de profielen. In de tweede helft van de profielen lieten de metingen ook het ondervlak van de fundering zien, waarnaar het in de eerste helft enkel gissen was. Met de Radanverwerkingssoftware konden de snelheden in en de dikten van de verschillende lagen worden berekend, op basis van een *pick* door de operator en een kalibratie vooraf van de antenne. Voor de eerste twee asfaltlagen werd een gemiddelde dikte van respectievelijk 3,9 en 4,3 cm berekend. De gemiddelde dikte van de fundering werd op 10,2 cm geschat.



Figuur 4.10 – *Radarprofiel in het midden van het proefvak en plaatsen waar de kernen werden geboord. De vier boorkernen zijn met stippellijnen aangeduid*

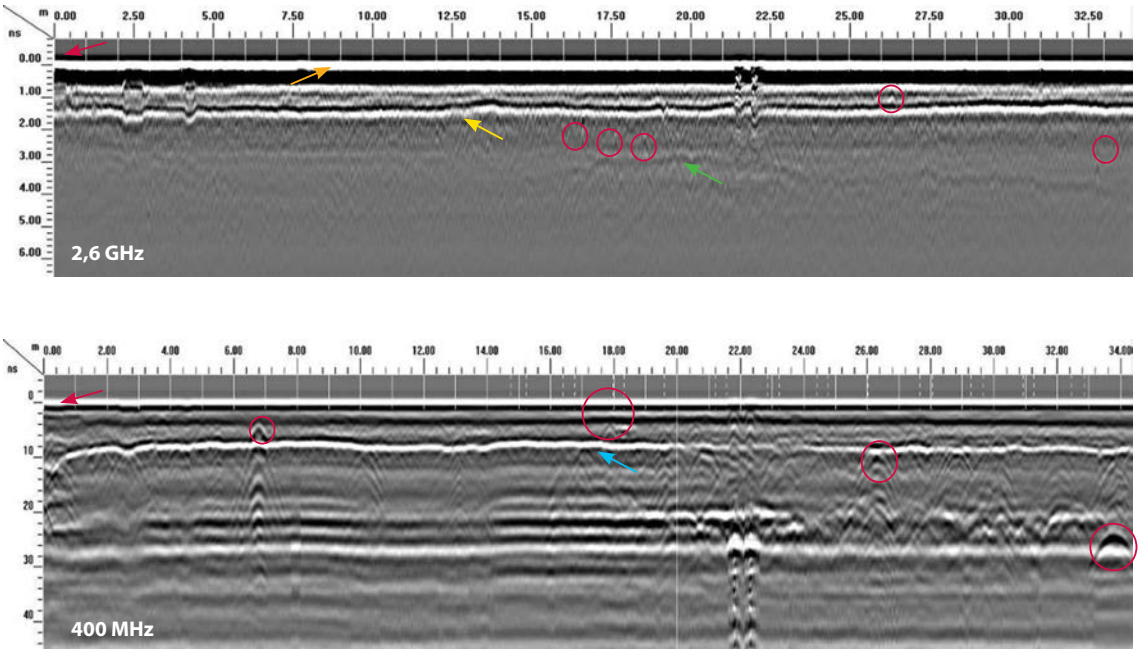
In de reflectie die overeenstemt met het contactvlak tussen de twee asfaltlagen, waar hechtverliezen werden vermoed, konden geen anomalieën worden gevonden. Wel zijn op het radarprofiel zones te zien waar de reflectie op het contactvlak tussen asfalt en fundering minder krachtig is. In andere zones verschijnen ook hyperbolen, die op plaatselijke gebreken kunnen wijzen.

Er werden vier kernen geboord, waarvan drie op plaatsen met veranderlijke reflectieamplituden op het contactvlak tussen asfalt en fundering (CR1-CR3). De laatste boorkern (CR4) werd boven een diffractie-hyperbool genomen. Deze kernen bevestigden de aanwezigheid van twee asfaltlagen en een dunne fundering (figuur 4.11). Anderzijds kon bij een eerste analyse geen verband worden gelegd tussen de kracht van de reflectie en de hechting tussen de lagen.

Figuur 4.11 – *Boorkern (CR-2) uit het proefvak, met de lagen in de opbouw van de wegconstructie (van links naar rechts: AB-4C, AB-3B, gebonden steenslagfundering)*

4.4.3.2 Contactantennes

De metingen met de antennes van 400 MHz en 2,6 GHz zijn weergegeven in figuur 4.12. Ze werden iets meer naar links toe verricht, wegens het boren van kernen. De verschillende contactvlakken zijn met gekleurde pijlen aangeduid in de profielen waarop ze zichtbaar zijn. Op 22 m zijn ook twee reflecties te zien die van een voertuigteller afkomstig zijn.



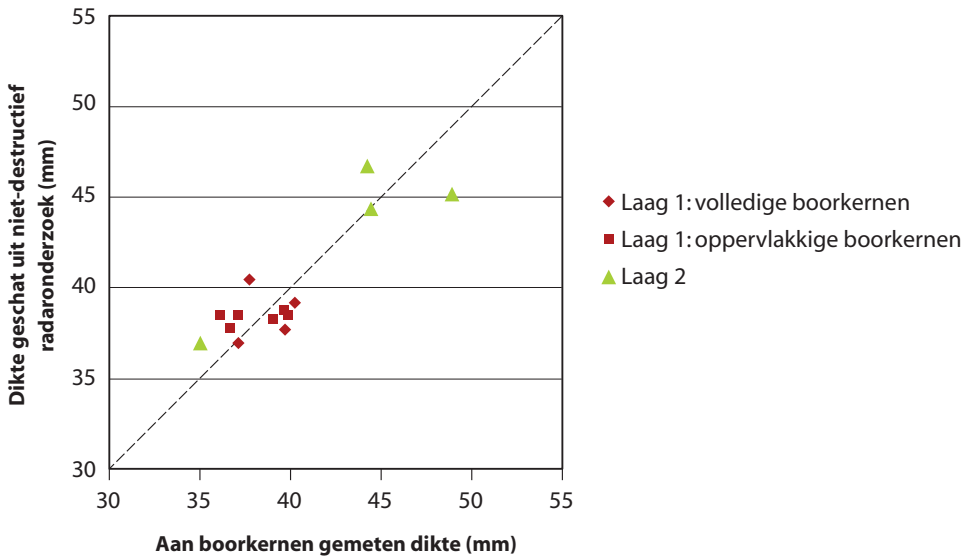
Figuur 4.12 – *Metingen met de antennes van 2,6 GHz en 400 MHz*

De antenne van 2,6 GHz is voor deze toepassing veel minder geschikt dan de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz. De directe oppervlakgolf, die langer is dan een gewone reflectie, maskeert immers gedeeltelijk de eerste reflectie op ongeveer 1 ns. Bovendien is de indringingsdiepte kleiner.

De antenne van 400 MHz toont ons resultaten die zeer complementair zijn aan die van de antennes van 2 GHz en 2,6 Hz. De verschillende asfaltlagen en zelfs het ondervlak van de gebonden fundering zijn weliswaar vrij moeilijk te onderscheiden, maar het ondervlak van de ongebonden fundering (10 ns) is zeer duidelijk te zien. Dieper in het profiel, op 26 ns, verschijnt een zeer sterke hyperbool. Wellicht stemt deze overeen met een leiding. Jammer genoeg treden tussen 20 en 30 ns op sommige plaatsen resonanties op zoals dat soms met deze antenne gebeurt.

4.4.4 Schatting van de laagdikten: resultaten en conclusies

De aan boorkernen gemeten dikten van de eerste en de tweede asfaltlaag worden in figuur 4.13 vergeleken met de dikten die plaatselijk door Radan zijn bepaald.



Figuur 4.13 – *Vergelijking van door middel van radar geschatte dikten met aan boorkernen gemeten dikten*

In de regel blijken de resultaten goed overeen te stemmen, zonder te grote systematische fouten. De dikten die voor de eerste laag zijn gemeten, zijn vrij constant en schommelen tussen 36,2 mm en 40,3 mm. Deze kleine variatie zou een verklaring kunnen zijn voor de zwakke correlatie tussen de gemeten en de geschatte dikte (de gemiddelde fout blijft echter klein, zie verderop). Voor de tweede laag vertoont één boorkern (CR2) een veel kleinere dikte dan de drie andere en dit verschil is ook in de schattingen terug te vinden.

De gemiddelde fout bedraagt voor de eerste laag 3,6 % (1,4 mm) en voor de tweede laag 4,7 % (2,1 mm). De grootste fout is respectievelijk 7 en 8 % (2,7 en 3,9 mm). Deze resultaten zijn bemoedigend, te meer omdat de plaatsen voor de kernboringen gekozen werden om hechtingsgebreken op te sporen en niet om dikteschattingen te optimaliseren. Wellicht hadden de resultaten nog beter kunnen zijn als de kernen in zones met minder horizontale variaties waren geboord. Voor de tweede laag zou de nauwkeurigheid kunnen worden verbeterd door de gegevens van de 2,6 GHz-antenne te gebruiken en de op basis van een meting in lucht bepaalde t_0 aan te passen (zie de aanbevelingen in bijlage 2).

Wij hebben de volumieke massa, het luchtgehalte en het bindmiddelgehalte van het asfalt vergeleken met de radarsnelheden. De enige parameter waarmee enige correlatie waar te nemen valt, is het bindmiddelgehalte. Dit aspect moet op andere locaties nader worden onderzocht.

4.5 Dikten van betonplaten – Totaalstation en tomograaf

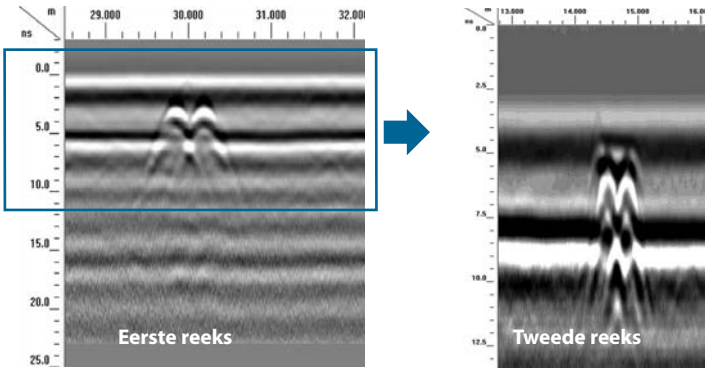
Op een betonweg zijn radarmetingen verricht om de dikten van het beton te schatten en ze te toetsen aan topografische gegevens die voor en na de aanbrenging van de betonverharding waren opgenomen. Daarbij werden verschillende methoden toegepast om snelheden te bepalen op basis van radarsignalen (tijd-topografische gegevens, oppervlakreflectie, migratie). Ter vergelijking werden ook metingen met een ultrasone tomograaf uitgevoerd.

Er vonden twee reeksen metingen plaats, met antennes van 2 GHz (SIR 20) en 900 MHz (SIR 4000).

Tijdens de eerste reeks, op 14 juli 2016, was de verharding vochtig door een recente regenbui.

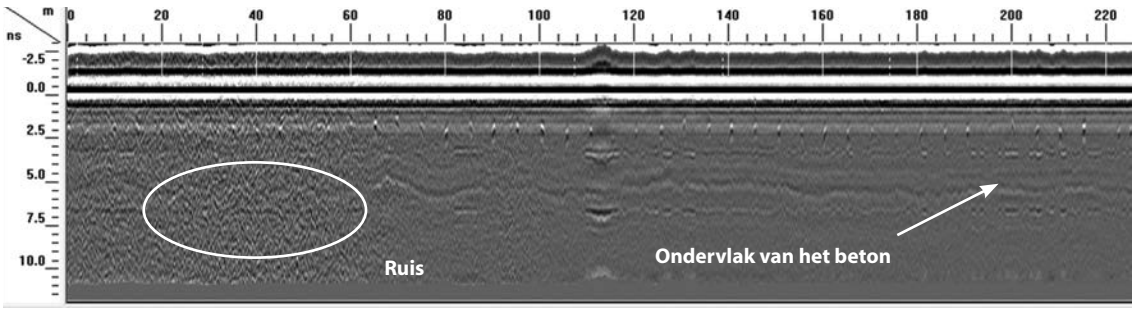
4.5.1 Algemene waarnemingen

Met de antenne van 900 MHz is de reflectie op het ondervlak van de plaat heel duidelijk. Alle nuttige informatie zit in de eerste 12 ns. Daarom werd de registratietijd tijdens de tweede reeks metingen verkort tot 15 ns.



Figuur 4.14 – *Aanpassing van de registratietijd voor 900 MHz-metingen*

Met de antenne van 2 GHz is de reflectie op het ondervlak van de plaat veel vager. In de eerste 66 m, waar veel ruis optreedt, is ze nagenoeg onzichtbaar.



Figuur 4.15 – *2 GHz-profiel*

4.5.2 Schatting van de snelheid in het beton

4.5.2.1 Schatting op basis van de referentiepunten (2 GHz)

Omdat het signaal tot 66 m veel ruis vertoont, zijn de eerste topografische metingen op de radarmetingen niet bruikbaar en worden zij hierna niet weergegeven. De snelheden van de radargolven zijn berekend uit de met de 2 GHz-antenne gemeten voortplantingstijd en de topografisch gemeten dikten, en opgenomen in tabel 4.8.

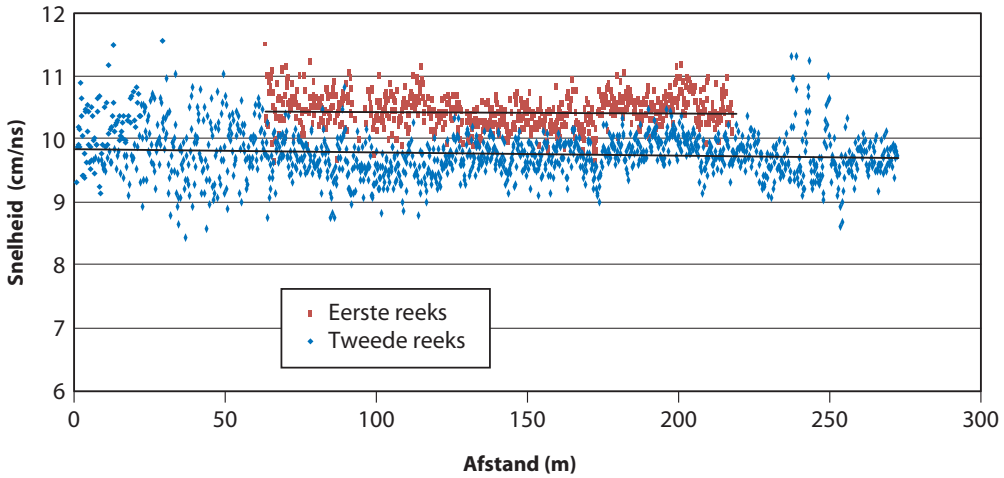
Referentienummer meetpunt	Dikte (cm) volgens totaalstation	Tijd (ns) 1e reeks	Berekende snelheid (cm/ns) 1e reeks	Tijd (ns) 2e reeks	Berekende snelheid (cm/ns) 2e reeks
85	20,8	5,64	7,37	5,33	7,8
95	22,5			4,88	9,22
104	20,5	5,35	7,66	4,88	8,4
110	20,5			5,18	7,91
116	22,8			5,45	8,36
124	22,3	5,91	7,55	5,33	8,36
133	22,9			5,42	8,45
GEMIDDELDE			**7,52**		**8,36**

Tabel 4.8 – *Snelheden van radargolven, berekend uit de met de 2 GHz-antenne gemeten voortplantingstijd en de topografisch gemeten dikten*

De berekende gemiddelde snelheid is 7,52 cm/ns voor de eerste reeks metingen en 8,36 cm/ns voor de tweede. Dat de snelheid tijdens de tweede reeks groter was, is logisch, want het oppervlak was tijdens de eerste metingen vochtiger en het beton tijdens de tweede reeks rijper. Toch blijven de snelheden voor beton nog laag.

4.5.5.2 Schatting op basis van de oppervlakreflectie (2 GHz)

De snelheid in het materiaal werd automatisch geschat met de Radansoftware, op basis van de oppervlakreflectie. De resultaten zijn voor beide reeksen metingen uitgezet in figuur 4.16.



Figuur 4.16 – *Geschatte snelheden, gebaseerd op de oppervlakreflectie tijdens de twee reeksen metingen*

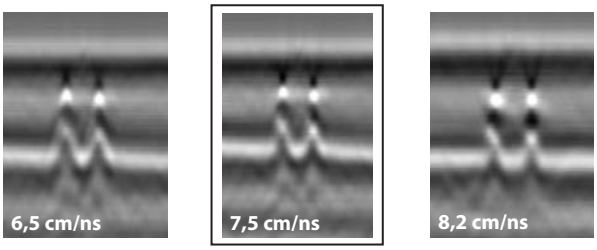
De gemeten gemiddelde snelheid is 9,8 cm/ns voor de eerste reeks en 10,5 cm/ns voor de tweede, wat in beide gevallen met vochtig beton overeenstemt. De waarden werden tijdens de eerste reeks over een grotere afstand geschat; hierdoor komt een grotere variabiliteit aan het licht over de eerste 60 m, waar het signaal zichtbaar meer ruis vertoont; dit geldt ook voor enkele welbepaalde punten rond 250 m.

De geschatte snelheid ligt duidelijk boven de aan de hand van de referentiepunten gemeten snelheid. Ook voor de tweede reeks metingen, toen het oppervlak droog was, is dat zo. Dit verschil tussen gemeten en geschatte snelheid kan eventueel worden toegeschreven aan het feit dat het beton tijdens de metingen nog betrekkelijk jong was. Onder in de betonplaat kan dus meer water hebben gezeten dan bovenin. Niettemin tonen deze verschillen aan dat metingen met een snelheidsschatting die enkel op oppervlakreflecties is gebaseerd, onzeker zijn.

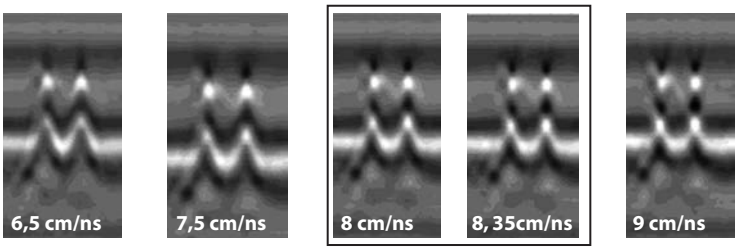
4.5.2.3 Schatting op basis van migratie (900 MHz)

Een andere methode om radarsnelheden in beton te schatten, is migratie. Zij vergt geen kalibratie om doeltreffend te zijn, maar wel de aanwezigheid van wapening die mooie reflectiehyperbolen genereert. De snelheid van het materiaal is die waarmee alle energie van een hyperbool geconcentreerd wordt in de top ervan. Op die manier zijn bij elke reeks metingen verschillende snelheden beproefd (figuur 4.17).

Eerste reeks:



Tweede reeks:



Figuur 4.17 – *Schatting van de snelheid op basis van migratie van 900 MHz-metingen*

Uit de bovenstaande resultaten blijkt dat de snelheid tijdens de eerste reeks metingen duidelijk tussen 6,5 en 8,2 cm/ns lag, en tijdens de tweede wellicht in het interval van 8 tot 8,35 cm/ns.

Deze methode is maar op 0,5 cm/ns na nauwkeurig, maar de bij benadering bepaalde snelheden van 7,5 en 8,2 cm/ns stemmen zeer goed overeen met die gebaseerd op de referentiedikten met de antenne van 2 GHz.

4.5.2.4 Schatting op basis van de referentiepunten (900 MHz)

De nultijd voor de 900 MHz-metingen werd gecorrigeerd aan de hand van een meting in lucht, volgens de procedure die in bijlage 2 wordt uitgelegd. De reflectietijd op het ondervlak van de plaat werd gemeten op basis van de eerste reflectiepiek (zwarte piek). Aan de hand van de negen topografische referentiepunten konden dus de snelheden worden geschat.

De geschatte gemiddelde snelheid is 7,98 cm/ns. Dit is iets lager dan volgens de 2 GHz-metingen (8,35 cm/ns). Misschien is dit verschil toe te schrijven aan de dunne profileerlaag van asfalt onder het beton. De twee contactvlakken die deze dunne laag begrenzen, zouden door de antenne van 900 MHz als één kunnen worden gezien. Als de dikten met dezelfde antenne worden geschat als bij de kalibratie, zouden de fouten niettemin beperkt moeten blijven.

4.5.2.5 Overzicht van de geschatte snelheden

De snelheden die met de verschillende methoden zijn geschat, staan samengevat in tabel 4.9.

	Antenne	**Snelheden Reeks 1 (cm/ns)**	**Snelheden Reeks 2 (cm/ns)**
Oppervlakreflectiecoëfficiënt	2 GHz	9,8	10,5
Kalibratie met behulp van referentiepunten		7,5	8,4
	900 MHz	7,9	8,0
Migratie		7,3 – 7,8	7,9 – 8,4

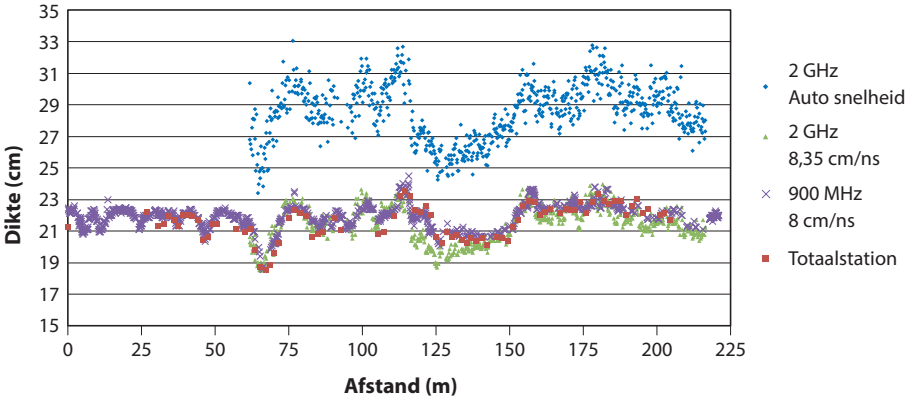
Tabel 4.9 – *Met de verschillende methoden geschatte snelheden in de betonplaat*

De op basis van oppervlakreflectie geschatte snelheden blijken zeer hoog te zijn. Ze kunnen als foutief worden beschouwd, want ze leiden niet tot een correcte schatting van de dikte. De snelheid was tijdens de tweede reeks metingen hoger dan tijdens de eerste. Dit is logisch, omdat het beton rijper en ook droger was. De op basis van kalibratie geschatte snelheden verschillen licht tussen de twee antennes. In de toekomst moet worden nagegaan of deze verschillen systematisch zijn. De door middel van migratie geschatte snelheden missen precisie, maar zijn te verenigen met de snelheden op basis van referentiepunten. Voor gewapend beton lijkt migratie dus een betere methode om snelheden te schatten dan gebruik maken van oppervlakreflectie.

4.5.3 Schatting van de dikten

De dikten zijn geschat aan de hand van de resultaten van de tweede reeks metingen. De condities voor de gegevensinzameling (nultijdmeting, verkort tijdvenster, betere positionering van het 2 GHz-profiel, enz. waren namelijk toen al geoptimaliseerd naar aanleiding van de eerste reeks metingen.

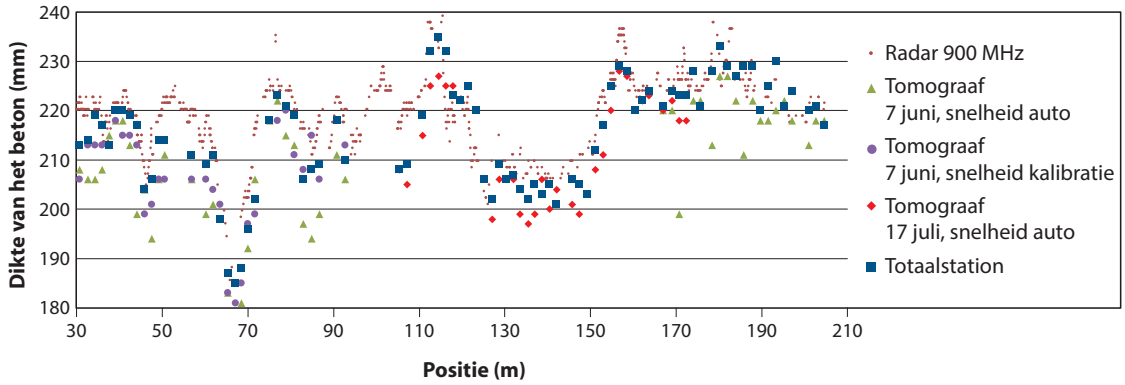
Figuur 4.18 vergelijkt de dikten die aan de hand van de verschillende profielen zijn geschat. De dikten zijn berekend door enerzijds gebruik te maken van de automatisch uit de oppervlakreflectie berekende snelheid en anderzijds van de snelheid van 8,35 cm/ns, geschat op basis van kalibratiepunten. Voor de 900 MHz-metingen werd de snelheid van 8 cm/ns gebruikt.



Figuur 4.18 – *Dikten, geschat aan de hand van de verschillende profielen uit de tweede reeks metingen*

Zonder kalibratie liggen de fouten in de grootteorde van 6 cm (30 %), wat onaanvaardbaar is. Met een snelheid van 8,35 cm/ns en het 900 MHz-profiel worden de dikten ongeveer 1 cm (5 %) overschat, wat veel redelijker is.

Figuur 4.19 maakt een vergelijking tussen die dikten die bij de tweede reeks metingen met de antenne van 900 MHz zijn geschat en de dikten die met de tomograaf en het totaalstation zijn gemeten.



Figuur 4.19 – *Vergelijking tussen met de radar (900 MHz, tweede reeks) en met de tomograaf en het totaalstation gemeten dikten*

Met de radar zijn kennelijk meer metingen mogelijk en de nauwkeurigheid lijkt vergelijkbaar als de ultrasone snelheid op basis van kalibratiepunten is bepaald. Als de snelheid automatisch is bepaald met de tomograaf, leidt dat in verscheidene punten tot grotere fouten (1 tot 2 cm). Verdere studies zouden kunnen uitwijzen hoe groot de fouten met deze of gene methode zijn.

4.5.4 Conclusies en aanbevelingen

Een antenne van 900 MHz kan een goede keuze zijn om de dikte van betonplaten te schatten, maar dan moeten wel bepaalde voorzorgen worden genomen:

- een profiel in lucht meten, om de nultijd te schatten;
- het aantal punten vergroten en/of de *time range* verkorten, om de resolutie te verbeteren.

Combineren met een luchtgekoppelde antenne van 2 GHz kan het mogelijk maken de voortplantingstijd in het medium nauwkeuriger te schatten, dankzij het kortere golfje en de verre-veldmeting.

Snelheidsschatting op basis van oppervlakreflectie is in dit wegvak met recentelijk aangebracht beton te onnauwkeurig gebleken. Op dergelijk materiaal kunnen dus beter andere methoden worden toegepast als dat mogelijk is (totaalstation voor en na metingen, migratie, ultrasone tomograaf, kernboring), om snelheidsschattingen te valideren.

4.6 Conclusies

4.6.1 Snelheidsbepaling met destructieve kalibratie (boorkernen)

De gangbaarste methode om verhardingsdikten uit radarmetingen te bepalen bestaat in een manuele *picking* van de contactvlakken in het radarprofiel en een kalibratie van de snelheden aan een of meer boorkernen.

Als de gebruiker voor de referentiesporen dezelfde nultijd en dezelfde *picking* hanteert als voor het hele profiel, kan hij nagaan of er geen te grote systematische fouten worden begaan die met deze parameters verband houden. Met deze methode kan de gemiddelde relatieve fout in dikteschattingen op minder dan 5 % worden gehouden als de meetomstandigheden gunstig zijn:

- radarmeting op exact dezelfde plaats als de kernboringen, voordat deze worden uitgevoerd (in de praktijk is dit niet altijd gemakkelijk haalbaar, vooral als de meting in verkeer wordt uitgevoerd);
- betrekkelijk homogeen materiaal. Er wordt immers geen rekening gehouden met snelheidsverschillen tussen de verschillende punten in het wegvak (die bijvoorbeeld aan verschillende verdichting of een variërend watergehalte te wijten kunnen zijn);
- goed zichtbaar ondervlak van de laag. Met luchtgekoppelde antennes zal de kwaliteit van dikteschattingen voor materialen zoals jong beton, die het signaal sterk afzwakken, matig zijn. Ook moet de elektromagnetische omgevingsruis bij de beschouwde frequenties beperkt blijven;
- voldoende aantal boorkernen om de invloed van een plaatselijke verandering in een eigenschap, of van een boorkern die genomen is op een plaats waar een dikteverandering onzekerheden in de geschatte snelheid brengt, te beperken.

Bij contactantennes is het belangrijk de nultijd van de meting goed te bepalen, door middel van een meting in lucht. De nauwkeurigheid van de *picking* kan worden verbeterd door het aantal monsters per spoor te vergroten of door het tijdvenster voor de gegevensinzameling te verkleinen. In bijlage 2 worden daarvoor gedetailleerde aanbevelingen gedaan.

Als de proeven op een wegenwerk in uitvoering worden verricht, bieden topografische metingen voor en na de aanbrenging van de verharding een voordeel boven kernboringen, doordat verscheidene kalibratiedikten beschikbaar worden zonder destructief te werk te moeten gaan.

Als de omstandigheden niet ideaal zijn, kan worden gesteld dat de fouten voor kleine laagdikten (< 5 cm) niet groter zullen zijn dan 20 % en voor grotere laagdikten niet groter dan 10 %.

4.6.2 Diktebepaling met niet-destructieve methoden

Als het niet mogelijk is kernen uit de onderzochte verharding te boren, moeten niet-destructieve methoden worden aangewend om de golfsnelheid in en de dikten van de verschillende lagen te schatten. Voor ongebonden funderings- en onderfunderingslagen, waaruit geen kernen kunnen worden geboord, zijn deze technieken trouwens de enige die voorhanden zijn. Bovendien bieden zij de mogelijkheid rekening te houden met een plaatselijke of geleidelijke verandering van de snelheid in het materiaal.

Als luchtgekoppelde antennes worden gebruikt, kan de snelheid worden geschat op basis van de reflectie op het oppervlak van het materiaal. Deze schatting kan worden gemaakt met behulp van de Radansoftware of door gebruik te maken van de vergelijkingen in onze methodieken. De resultaten met deze twee methoden zijn gelijklopend, ook al kan, afhankelijk van de gekozen parameters voor de gegevensinzameling, een variatie van 5 % in de snelheidsschattingen optreden. Zo lijkt het erop dat toepassing van een ruisonderdrukkingsfilter tot een lichte overschatting van snelheden leidt als de profielen met Radan worden verwerkt.

Omdat schatting van snelheden in onderliggende lagen ingewikkelder berekeningen vergt, wordt er vaak de voorkeur aan gegeven de Radansoftware te gebruiken. Toch is voorzichtigheid met de zo bepaalde snelheden geboden en moet worden nagegaan of ze te verenigen zijn met de snelheden die vaak in het materiaal worden waargenomen. Ook de keuze die de gebruiker voor de polariteit van het signaal maakt (positief of negatief), heeft een zeer grote invloed op de geschatte snelheden.

De snelheidsschattingen gaven zeer uiteenlopende resultaten naargelang van de casestudy. Zo varieerden de gemiddelde relatieve fouten van 3,6 % voor de verharding van de parking te Sterrebeek tot 28,7 % voor een nieuwe betonverharding, met een grote systematische fout. Uit de verrichte proeven kon niet worden opgemaakt of de fouten bij jong beton systematisch waren. Bij twijfel is het dan ook belangrijk ten minste één kern te kunnen boren of de radarmeting te kunnen combineren met een andere, niet-destructieve methode om dikten te schatten (bijvoorbeeld de ultrasone tomograaf), om de antenne voor diktebepaling te kalibreren.

Bij gewapend beton biedt gebruik van de migratiesnelheid een interessant alternatief voor gebruik van de oppervlakreflectie met een luchtgekoppelde antenne.

Hoofdstuk 5
Beoordeling van homogeniteit

5.1 Inleiding

Beoordeling van homogeniteit bestaat er voornamelijk in de veranderingen in de wegopbouw en de beschadigde zones te bepalen. Ze maakt het mogelijk bepaalde plaatselijke acties zoals kernen boren, een sleuf graven, FWD-metingen, enz., te optimaliseren. Een betere kennis van de opbouw van de wegconstructie leidt tot een betere interpretatie van deflectiemetingen.

Doorgaans spoort een operator homegene zones op nadat metingen zijn uitgevoerd. Hij doet dit door de informatie (soort verharding, aanwezigheid van gebreken, enz.) die tijdens de meting in situ is verzameld te combineren met een visuele inspectie van het radarsignaal.

Bij de bepaling van homogene zones kunnen verschillende factoren een rol spelen:

- het aantal zichtbare contactvlakken;
- de diepte waarop ze zich bevinden;
- de amplitude en polariteit van de reflectie op elk contactvlak;
- de amplitude van de oppervlakreflectie (bij luchtgekoppelde antennes);
- de signaal-ruisverhouding;
- de oppervlakoscillaties.

In dit hoofdstuk worden enkele voorbeelden van bepaling van homogene zones en/of veranderingen in wegopbouw toegelicht. Voor een gemakkelijker begrip van de tekst zijn de locaties waar zowel homogeniteit werd beoordeeld als dikten werden bepaald, beschreven in hoofdstuk 4 (autosnelweg, gemeentelijke weg). Ook in de casestudy van de Scheldelaan zijn homogene zones bepaald (zie Hoofdstuk 10).

5.2 Evaluatie van het wegennet – Homogene zones

Wanneer een wegbeheerder een beeld wenst te krijgen van het draagvermogen en de restlevensduur van de wegvakken in een deel van of over het volledige wegennet, kunnen deflectiemetingen worden uitgevoerd. De interpretatie van deflectiemetingen vraagt echter ook enige kennis van de wegopbouw. Vooral bij een verouderend wegennet beschikt de wegbeheerder niet altijd over de bestaande opbouw van de wegconstructie of ontbreekt informatie over lokale ingrepen die in het verleden zijn uitgevoerd. In dergelijke gevallen is het nuttig over een grotere afstand GPR-metingen uit te voeren en daaruit het begin en het einde van een bepaalde wegopbouw te bepalen.

Zo kreeg het OCW in de zomer van 2015 van een beheerder van een industriezone de opdracht een structurele analyse van de staat van het wegennet te maken. Voor deze opdracht hebben we eerst het hele wegennet opgemeten met de GPR en daarmee "homogene zones" bepaald waarbinnen de variatie van de wegopbouw beperkt bleef. Vervolgens werd in elke homogene zone een voldoende aantal deflectiemetingen uitgevoerd met de FWD. Voor elke homogene zone werd de gemiddelde waarde bepaald voor de indicator "*Tragfähigheitszahl* (Tz)", waarmee het draagvermogen van een flexibele of halfstijve wegconstructie op eenvoudige wijze kan worden geëvalueerd.

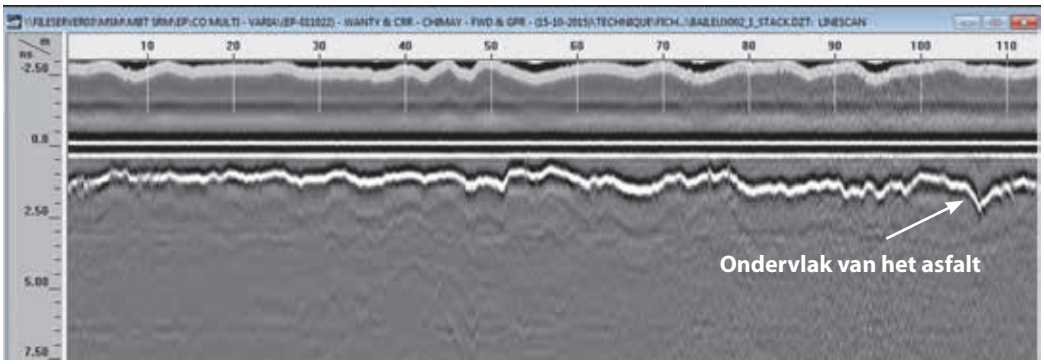
5.3 Radarmetingen op een rotonde – Variatie in de wegopbouw

Naar aanleiding van gebreken in het draagvermogen van de fundering zijn op een rotonde radarmetingen verricht, in combinatie met valgewichtdeflectiemetingen. De radarmetingen hadden tot doel de veranderingen in de wegopbouw (veranderingen in asfaltdikte, diepte van de onderfundering en van het grond- of moedergesteente) aan het licht te brengen. Zij werden verricht met de hoornantenne van 2 GHz en de contactantenne van 400 MHz.

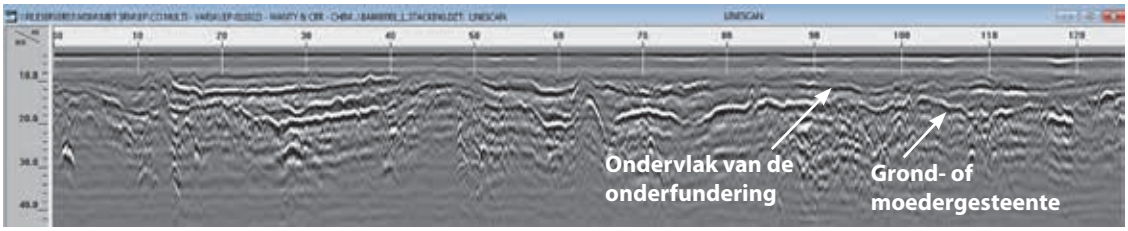
Met de antenne van 2 GHz konden de veranderingen in de asfaltdikte worden gevisualiseerd. Diepere contactvlakken kunnen er niet mee zichtbaar worden gemaakt.

Op deze locatie dringen de signalen van de 400 MHz-antenne ongeveer 1,50 m diep. Het ondervlak van de fundering en het bovenvlak van het grond- of moedergesteente zijn zichtbaar. Deze antenne is echter niet nauwkeurig genoeg om veranderingen in de asfaltdikte te visualiseren.

De twee antennes vullen dus, wat deze locatie betreft, elkaar aan.



Figuur 5.1 – *Metingen met de antenne van 2 GHz*



Figuur 5.2 – *Metingen met de antenne van 400 MHz*

Aan de hand van de informatie uit de radarmetingen zijn de plaatsen voor FWD-metingen en inspectiesleuven bepaald.

5.4 Conclusies

Voor de verschillende bestudeerde gevallen maakt combineren van deflectiemetingen met radarmetingen het mogelijk homogene zones in de onderzochte wegvakken af te bakenen. De radarprofielen en de deflecties stemmen meestal goed overeen. Toch zijn sommige overgangen in de deflectiemetingen merkbaar en op de radarprofielen niet, en omgekeerd.

Als de moduli van de lagen door terugberekening worden bepaald, kan deze bepaling met behulp van de informatie uit de radarmetingen (laagdikten en aantal lagen) worden verbeterd. Voor de terugberekening wordt elke zone apart beschouwd.

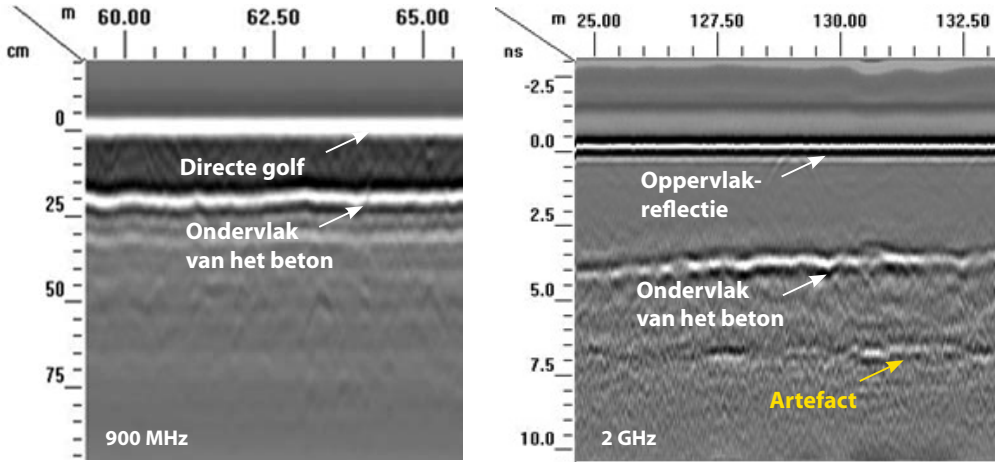
Hoofdstuk 6
Opsporen van holten

6.1 Holten onder een betonweg

Er werden radarmetingen verricht om eventuele holten op te sporen onder de betonplaten van een gemeentelijke weg met tweemaal één rijstrook. Daarvoor werden de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz en de contactantenne van 900 MHz gebruikt. Om de radarmetingen beter te kunnen interpreteren, werden vijf kernen geboord.

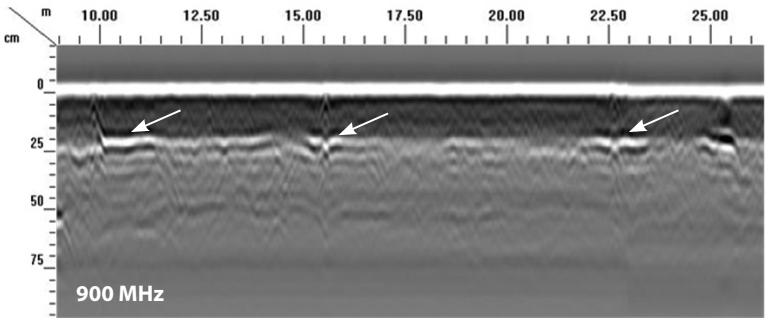
De reflectie op 3 ns (± 20 cm) stemt overeen met het ondervlak van het beton. Dit ondervlak is op het radargram meestal (95 % van de 900 MHz-metingen en 85 % van de 2 GHz-metingen) goed te zien. Als de reflectie op het ondervlak van het beton goed zichtbaar is, kan de dikte van de plaat worden geschat door de snelheid van de radargolven aan de hand van de boorkernen te kalibreren.

De diepere lagen zijn bij de 900 MHz-metingen zichtbaar, maar bij de 2 GHz-metingen niet. Op het radargram van de 2 GHz-antenne is een artefact (meervoudige reflectie op het oppervlak, die niet met een reëel object overeenstemt) waar te nemen.



Figuur 6.1 – *Uitsnede uit het 900 MHz-profiel (links) en het 2 GHz-profiel (rechts)*

Op sommige plaatsen, onder meer ter hoogte van de voegen, is de reflectie op 3 ns krachtiger; misschien komt dit door de aanwezigheid van water of van holle ruimte.



Figuur 6.2 – *Voorbeeld van krachtige reflecties (900 MHz)*

Deze reflectie op 3 ns doet zich op bepaalde punten in de profielen met langere aankomsttijden voor. Ook zijn zones waar te nemen waar deze reflectie niet te onderscheiden valt, evenals zones waar de profielen veel meer ruis vertonen.

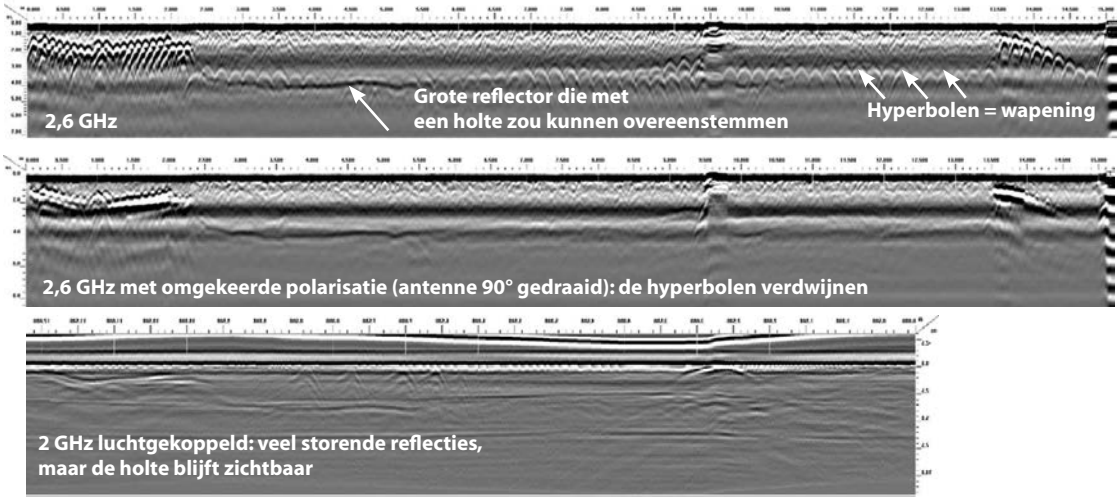
In zones die op grond van de radarmetingen waren gekozen, zijn vijf kernen geboord, om holten op te sporen. Sommige kernen zakten 1 tot 2 cm in tijdens het boren, maar dat kan zowel aan een plaatselijke zwakte van de fundering (waardoor zij tijdens het boren werd uitgespoeld) als aan de aanwezigheid van een holte te wijten zijn. De radarmetingen hebben dus niet kunnen bevestigen of er holten onder de betonplaten zitten. Het beton dat onder sommige platen was geïnjecteerd om ze te stabiliseren, kon op de radargrammen evenmin duidelijk worden onderkend.

6.2 Holten onder een betonplaat – Frankrijk

Het OCW werd gevraagd om holten op te sporen onder een industriële betonverharding in Frankrijk. Op een licht gewapende betonplaat van 20 cm dik zijn metingen verricht om holten onder deze plaat, ontstaan door plaatselijk opzwellen van de fundering, te detecteren. Daarvoor werden de contactantennes van 2,6 GHz (twee verschillende polarisaties), 1 GHz en 400 MHz gebruikt, evenals de hoornantenne van 2 GHz.

Figuur 6.3 – *Opsporen van holten onder een betonplaat*

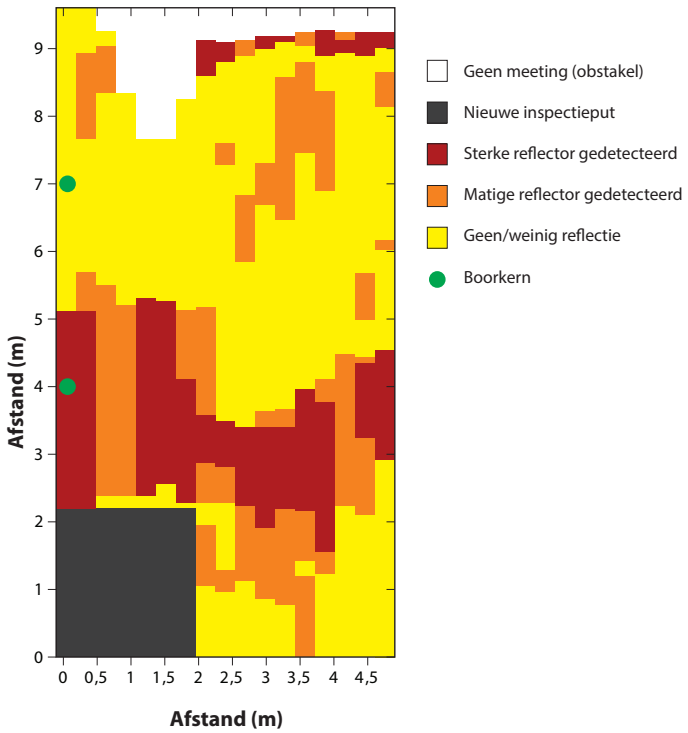
Tijdens de metingen werden inderdaad holten ontdekt. De beste resultaten werden verkregen met de antenne van 2,6 GHz. Op de radargrammen van figuur 6.4 is een holte te zien als een grote reflector op het ondervlak van de plaat. Door de polarisatie van de antenne om te keren, kan de zichtbaarheid van de contactvlakken worden geminimaliseerd en kunnen de hyperbolen van de wapening worden gemaskeerd.



Figuur 6.4 – *Radarmetingen op de betonplaat (2,6 GHz met normale polarisatie, 2,6 GHz met omgekeerde polarisatie en 2 GHz luchtgekoppeld)*

Ook met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz zijn de holten te onderscheiden, maar de vele storende oppervlakreflecties veroorzaken ruis in het resultaat. Het terrein helde vrij sterk (waterafvloeiing), maar wij weten niet waarom deze reflecties niet verdwijnen wanneer de kalibratie wordt gebruikt.

Die zones waarin wellicht holten voorkomen (waar een grote reflector zichtbaar is), zijn over een oppervlak van 5 x 10 m in kaart gebracht. Nog dezelfde dag zijn drie kernen geboord, om de lokalisering van holten te bekrachtigen. De twee kernen uit een zone waar vermoedelijk holten zaten, hebben inderdaad de aanwezigheid van holten (2 en 7 cm) aangetoond, terwijl de boorkern uit een gaaf geachte zone geen holten vertoonde.



Figuur 6.5 – *Kartering op basis van radarmetingen*

6.3 Conclusies

Uit de verrichte proeven blijkt dat het vaak niet eenvoudig is holten met grondradar op te sporen. De aanwezigheid van wapening en eventuele vulling van de holten kunnen de onderkenning van deze holten op het radarbeeld bemoeilijken. Als de holten bovendien niet erg open zijn en het onderliggende materiaal rul is, zal kernen boren mogelijk evenmin de aanwezigheid van een holte onder de verharding kunnen bevestigen of logenstraffen.

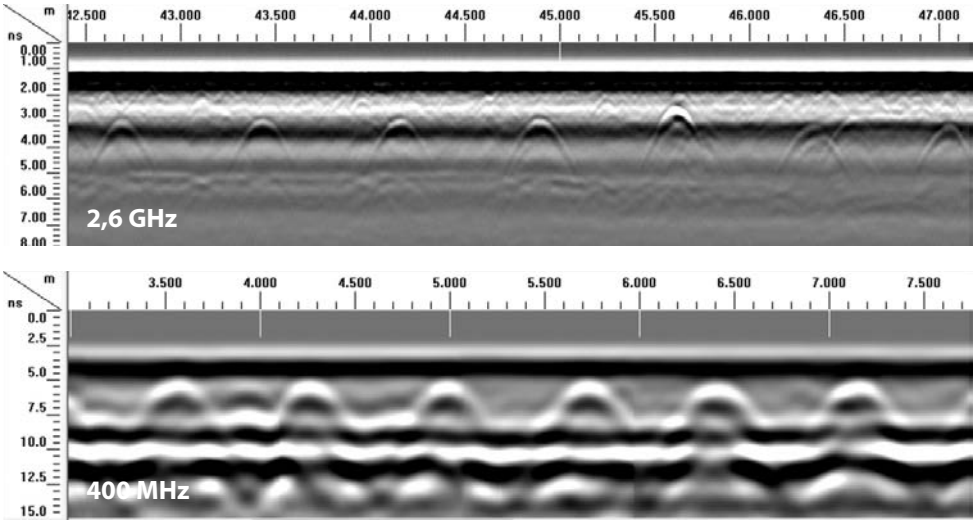
Niettemin konden holten onder een betonplaat bij metingen in gunstiger omstandigheden (licht gewapende plaat, open holte van verscheidene centimeters) wél doeltreffend worden gelokaliseerd. De beste resultaten werden verkregen met de hoogfrequente antennes, vooral met de contactantenne.

Hoofdstuk 7
Opsporen van ankerstaven en deuvels

7.1 Opsporen van ankerstaven in een weg met doorgaand beton

Op een betonnen autosnelweg zijn radarmetingen verricht om de ankerstaven tussen de twee rijstroken te lokaliseren. Daarvoor werden de contactantennes van 400 MHz en 2,6 GHz gebruikt. De ankerstaven konden met beide antennes worden gedetecteerd en gelokaliseerd.

De antenne van 400 MHz biedt voor deze toepassing voldoende nauwkeurigheid. De antenne van 2,6 GHz was gevoeliger voor de aanwezigheid van de langsvoeg tussen de twee rijstroken, zodat wij er ver genoeg van verwijderd moesten blijven.

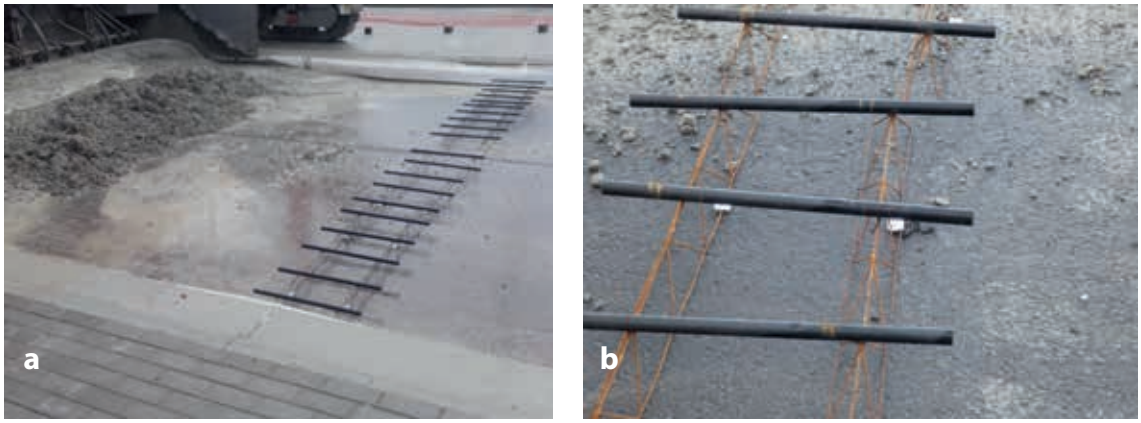


Figuur 7.1 – *Foto van de meetlocatie – Radarprofielen: 2,6 GHz en 400 MHz*

7.2 Opsporen van deuvels in een weg met betonplaten

Het beproefde wegvak was 250 m lang. De weg is verhard met ongewapende betonplaten, met deuvels in de dwarsvoegen. De platen hebben een nominale dikte van 20 cm en zijn 5 m lang. De betonverharding werd gestort op een bitumineuze laag, waarop de deuvels tevoren waren bevestigd (figuur 7.2).

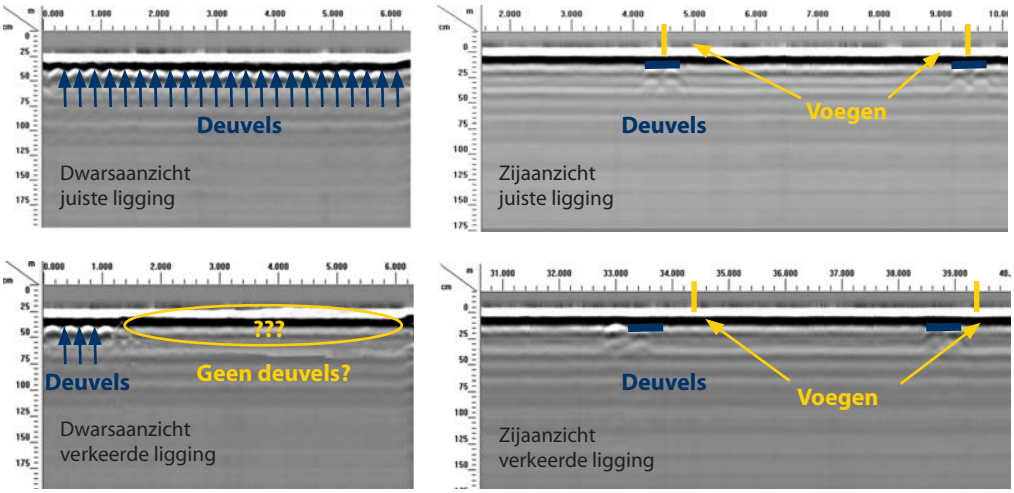
Omdat de opdrachtgever vermoedde dat sommige deuvels tijdens het betonstorten verschoven waren, vroeg hij om niet-destructieve metingen met de GPR en met de ultrasone tomograaf, om de positie van de deuvels na te gaan.



Figuur 7.2 – *Vóór het betonstorten werden deuvels gelegd op de plaatsen waar de dwarsvoegen moesten komen (a) en op de onderliggende bitumineuze laag bevestigd (b)*

De plaats van de deuvels werd met de contactantenne van 900 MHz bepaald, zes weken nadat het beton was gestort. De metingen werden langs de voegen en langs lengteprofielen over het hele wegvak (één in elke richting) uitgevoerd. De gezamenlijke metingen namen minder dan 1 h 40 min in beslag.

De GPR-metingen brachten aan het licht dat de deuvels tijdens het betonstorten in twintig van de vijftig voegen verschoven waren en zich buiten de dwarsvoegen bevonden (figuur 7.3). In die voegen zullen de deuvels, die verticale bewegingen van de betonplaten moeten voorkomen, minder of zelfs helemaal niet werkzaam zijn.



Figuur 7.3 – *Vergelijking van de langs de dwarsvoegen of in de lengterichting gemeten 900 MHz-profielen, met juiste en verkeerde eindpositie van de deuvels*

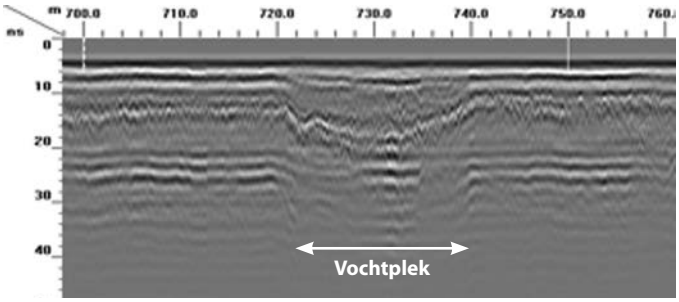
Ook met ultrasone tomografie werden de deuvels met succes gelokaliseerd, maar deze methode is voor een dergelijke toepassing minder doeltreffend omdat zij geen continue metingen mogelijk maakt.

Hoofdstuk 8
Opsporen van vochtplekken

8.1 Vochtplekken in een fundering

Met de antenne van 400 MHz is op een gewestweg met plaatselijke verzakkingen onderzoek verricht om na te gaan of er nog andere holten in de fundering zaten.

Op de radarprofielen waren geen holten te bespeuren; wel brachten zij de aanwezigheid van een vochtplek in de fundering aan het licht. Zulk een plek kenmerkt zich namelijk door een lagere voortplantingssnelheid en bijgevolg door een visuele verzakking van het ondervlak van de laag op het radargram (figuur 8.1). Een kijkvenster bevestigde deze diagnose.

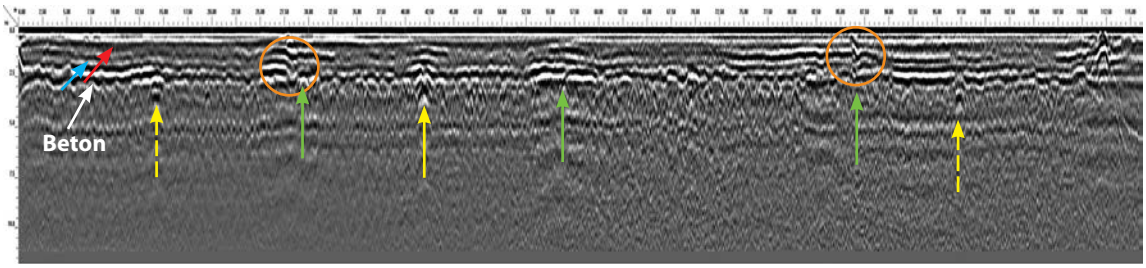


Figuur 8.1 – *Opsporen van een vochtplek in een wegfundering*

8.2 Inspectie van de afdichtingslaag van een kunstwerk

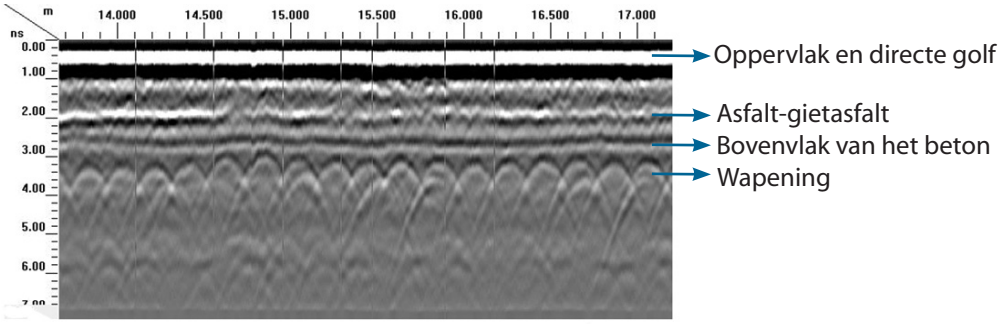
Op een onlangs gerenoveerde brug van een gewestweg, waarop zich problemen voordeden met stilstaand water en verzakkingen, zijn radarmetingen verricht. Deze metingen hadden tot doel te bepalen waar er zich water in de constructie bevond, en tot welke diepte. De wegconstructie bestaat uit twee asfaltlagen van 4 cm dik, een beschermingslaag van 3 cm gietasfalt en een afdichtingslaag van 1,5 cm gietasfalt. Deze lagen rusten op de betonnen brugconstructie.

De metingen werden verricht met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz en een contactantenne van 2,6 GHz. De profielen die met de luchtgekoppelde antenne zijn gemaakt, geven een algemeen beeld van de brug (figuur 8.2). Het bovenvlak van het beton en het contactvlak tussen asfalt en gietasfalt (blauwe pijl) zijn goed zichtbaar. Op bepaalde plaatsen valt ook het ondervlak van de eerste asfaltlaag te onderscheiden (rode pijl). De brugconstructie is op de radarprofielen goed te onderkennen: pijlertoppen (in het groen) en dwarsliggers (in het geel). Op het profiel dat tussen de twee rijstroken is gemeten, zijn twee zones met krachtige reflecties boven een pijler te onderscheiden. Op die plaats valt aan het oppervlak ook een verzakking waar te nemen. De verzakkingen aan het oppervlak lijken samen te vallen met de posities van de pijlers en de dwarsliggers.



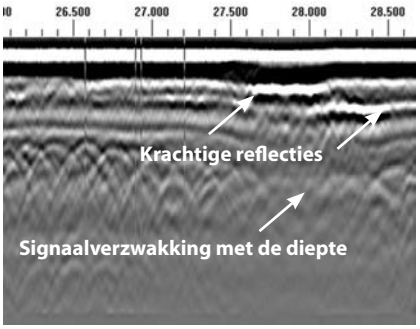
Figuur 8.2 – *Radarprofiel tussen de twee rijstroken, met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz*

De metingen met de contactantenne van 2,6 GHz bieden een betere resolutie en maken meer details van de constructie zichtbaar. Het contactvlak tussen asfalt en gietasfalt genereert reflecties met variabele energie, doordat op bepaalde plaatsen water zit. Het bovenvlak van het beton is goed zichtbaar, maar vertoont variaties in aankomsttijd en amplitude. De wapening wordt goed gedetecteerd en op sommige plaatsen zijn verschillen in betondekking merkbaar. Het contactvlak tussen de twee asfaltlagen wordt gemaskeerd door de directe golf die zich tussen de zender en de ontvanger voorplant.



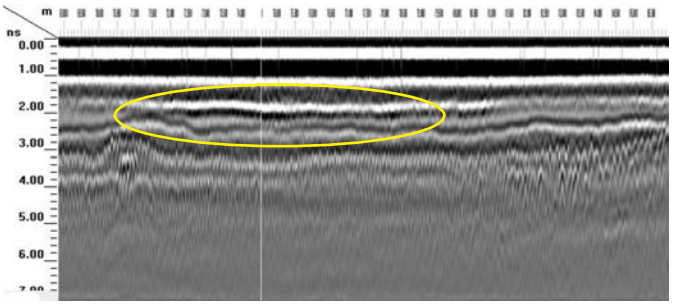
Figuur 8.3 – *Beeld van de brugconstructie, gemaakt met de antenne van 2,6 GHz*

Op één plaats is de aanwezigheid van een grote hoeveelheid water heel duidelijk. Dicht bij het oppervlak treden krachtige reflecties op en het signaal wordt zwakker naarmate de diepte toeneemt (figuur 8.4). Op die plaats werd een verzakking waargenomen. Het bovenvlak van het beton wordt verzwakt weergegeven, maar geeft een langere aankomsttijd – een teken dat er water aanwezig is.



Figuur 8.4 – *Aanwezigheid van water in de constructie*

Op sommige plaatsen is ook de reflectie op het contactvlak tussen asfalt en gietasfalt krachtiger. Dit zou op de aanwezigheid van water kunnen wijzen – zij het in beperkte hoeveelheid, aangezien er geen signaalverzwakking met de diepte optreedt (figuur 8.5).



Figuur 8.5 – *Krachtige reflectie die op aanwezigheid van water kan wijzen*

De dwarsprofielen lieten zien dat de beschadigde zone niet groot was. Toch kwam uit de interpretatie van de metingen naar voren dat het beter zou geweest zijn ze met kleinere afstanden tussen de dwarsprofielen uit te voeren.

8.3 Conclusies

De metingen hebben de doeltreffendheid van georadar om vochtplekken op te sporen bevestigd. Zowel in een fundering als in een brugdek konden de plekken waar vermoedelijk water zat worden gelokaliseerd en kon de grootte ervan worden gemeten. Ook maakten de metingen het mogelijk plekken te onderscheiden waar de aanwezige hoeveelheid water beperkt of aanzienlijk was.

De interpretatie van de radarmetingen werd gemakkelijker gemaakt door de informatie (plannen, dikten en aard van de verschillende lagen) die vóór het onderzoek was verstrekt. Om in het geval van het brugdek nog een beter inzicht in de oorzaken van het probleem te krijgen, zou het nuttig zijn geweest over nog gedetailleerder informatie over de brugconstructie en de uitvoering ervan te beschikken.

Hoofdstuk 9
Opsporen van nutsleidingen

9.1 Inleiding

Met "nutsleidingen" worden alle ondergrondse buisleidingen of kabels bedoeld: elektriciteit, gas, water, telefoon, riolering, kabeltelevisie, enz. Zelfs als er plannen van de diverse nutsleidingen bestaan en inspectieputten en/of putdeksels aan het oppervlak de aanwezigheid ervan verraden, is het soms moeilijk het verloop van de verschillende leidingen nauwkeurig te bepalen. Bovendien staan de diepte en omvang van deze objecten niet altijd op de plannen of tekeningen aangegeven en is de aangegeven positie vaak slechts een "vermoedelijke positie".

In zulke gevallen kan radaronderzoek een nuttige aanvulling vormen op de puntgebonden informatie waarover de aannemer bij het uitzetten van toekomstig grondwerk in een weg beschikt. Om naar nutsleidingen in een wegconstructie te zoeken, kunnen hoog-, midden- en laagfrequente radarantennes worden gebruikt. Deze leidingen kunnen uit verschillende soorten van materialen met diverse functies bestaan (al of niet metalen vloeistof- of gasleidingen, al of niet metalen kabels voor energie- of informatietransport). De moeilijkheid ligt in deze verscheidenheid van objecten, grootten en materialen en de uiteenlopende diepten waarop ze zitten.

In de loop van dit project is in verschillende gevallen naar nutsleidingen gezocht. In eerste instantie ging het om de proefsleuf in Waver en beoogde de studie een vergelijking van de doeltreffendheid waarmee verschillende (mono- en multifrequente) systemen leidingen detecteren. In tweede instantie werden diverse locaties op nutsleidingen onderzocht en ging het om typische voorbeelden die zich in de praktijk voordoen.

9.2 Mogelijke storende factoren en moeilijkheden bij de interpretatie van radarmetingen

Tal van factoren kunnen radardetectie van nutsleidingen in de ondergrond van wegen bemoeilijken. In deze paragraaf worden zij kort toegelicht.

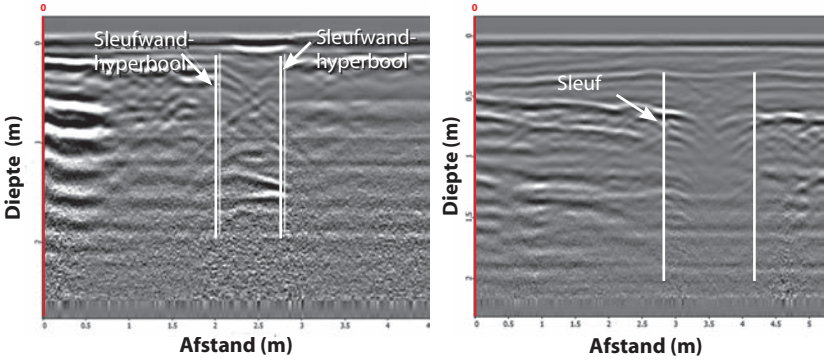
9.2.1 Net van dieper liggende nutsleidingen

Het kan moeilijk blijken de bedoelde leiding in een waar net – of knooppunt – van kabels en leidingen te lokaliseren. De vele verschillende echo's die op het scherm verschijnen, zijn niet gemakkelijk van elkaar te onderscheiden.

Figuur 9.1 – *Typische sleuf in een weg in stedelijk gebied*

9.2.2 Wanden of verdere aanvulling van de sleuf

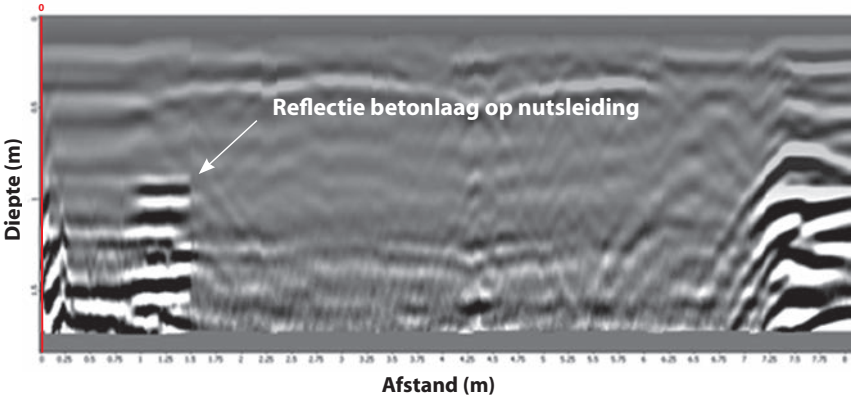
De wanden van de sleuf waarin de nutsleiding is gelegd, veroorzaken zelf karakteristieke echo's (figuur 9.2), die de onderliggende echo's, waaronder die van de nutsleiding zelf, kunnen maskeren.



Figuur 9.2 – *Voorbeelden van superpositie van de reflectiehyperbolen van de wanden van een sleuf, die de leesbaarheid van de onderliggende echo's beperkt of verstoort*

9.2.3 Aanwezigheid van een bovenliggende gewapend-betonplaat

Sommige nutsleidingen kunnen plaatselijk beschermd zijn met een betonplaat die zo dicht gewapend is, dat radargolven er moeilijk doorheen komen (figuur 9.3). Deze platen of deze gebetonneerde leidingen bevatten vaak een grote holte, waarvan de aanwezigheid verraden wordt door de omkering van de gereflecteerde radargolf (figuur 9.17).



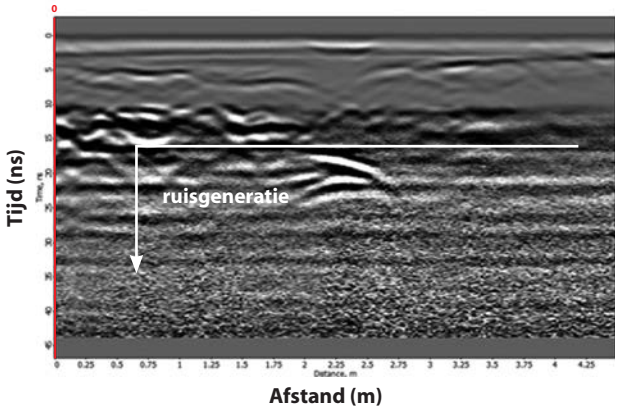
Figuur 9.3 – *Voorbeeld van sterke reflecties van een betonlaag, die de aanwezigheid van een onzichtbare onderliggende nutsleiding langs een trottoir verraden*

9.2.4 Andere elektromagnetische bronnen in de omgeving

Onder- of bovengrondse elektrische geleiders die energie transporteren of golven uitzenden waarvan de frequentie dicht bij die van de radargolven ligt, kunnen interferenties veroorzaken.

9.2.5 Geleidingsvermogen en vochtigheid van omgevende materialen

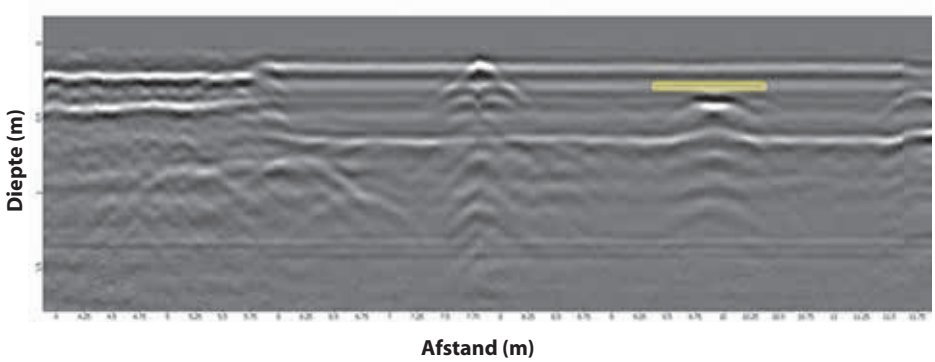
Door het geleidingsvermogen van de materialen, dat vaak met vochtigheid verband houdt, zwakt het radarsignaal sterk af (figuur 9.4).



Figuur 9.4 – *Voorbeeld van te sterke ruisgeneratie (boven 20 ns) door de kenmerken van het rond een nutsleiding aanwezige materiaal*

9.2.6 Onvoldoende diëlektrisch permittiviteitscontrast

De intensiteit van reflecties tussen twee onderscheiden materialen hangt vooral van het diëlektrische contrast tussen beide af. Als de diëlektrische parameters van de nutsleiding en de grond eromheen dicht bij elkaar liggen, kan het contactvlak tussen beide onzichtbaar blijven, tenzij ze van elkaar gescheiden worden door een laag of een holte met sterk verschillend diëlektrisch gedrag (figuur 9.5).



Figuur 9.5 – *De betonplaat (aangegeven door de gele rechthoek) is onzichtbaar, want ze is ingestort in een betonlaag (met hetzelfde diëlektrische gedrag) boven een holte (duidelijk contrast)*

9.3 Conditieonderzoek van nutsleidingen – Verwerking

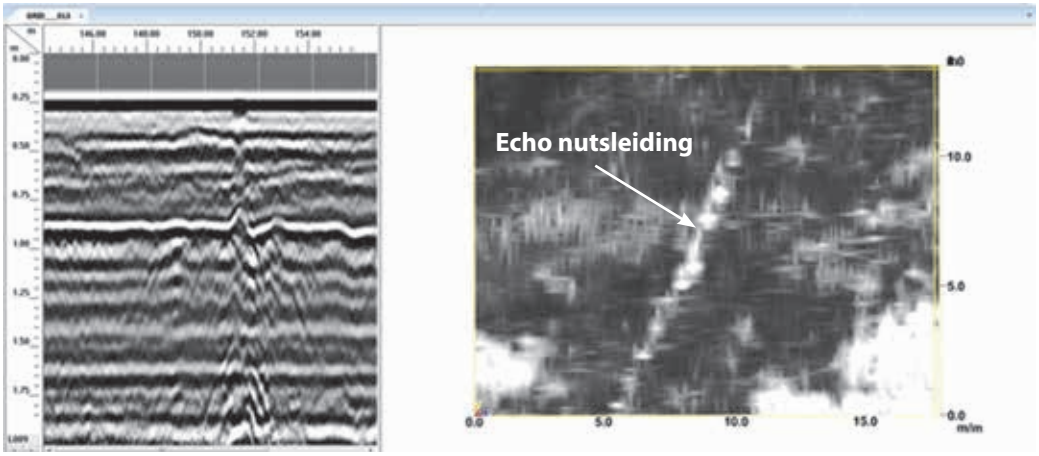
De belangrijke aspecten van en de praktijken voor radaronderzoek en de verwerking van de resultaten ervan zijn beschreven in de methodieken [1]. Hierna volgen enkele aspecten die specifiek voor nutsleidingen gelden.

Als de aanwezigheid en de ligging van een nutsleiding vermoed worden, kan ze het gemakkelijkst worden teruggevonden door de betrokken zone af te tasten volgens een aantal rechtlijnige profielen haaks op het vermoede verloop van de leiding. Hoewel plannen en technische tekeningen met de ligging van diverse nutsleidingen vaak slechts indicatief zijn, bieden zij een grote hulp om het radaronderzoek ideaal op het terrein uit te tekenen.

Vooreerst dient een basislijn te worden bepaald (een referentielijn evenwijdig met de vermoedelijke aslijn van de te lokaliseren nutsleiding), die als uitgangspunt zal dienen voor de verschillende profielen dwars op de te detecteren leiding. De afstand tussen deze dwarsprofielen zal in hoofdzaak van de homogeniteit van de materialen in de wegconstructie afhangen, en van de diameter, de diepteligging, de dekking en de regelmatigheid van de loop van de nutsleiding. **Als naar een grote leiding van zowat een meter doorsnede op een diepte van 2 m wordt gezocht, zullen profielen om de meter volstaan.** Als de gezochte leiding maar 1 cm doorsnede heeft en minder dan 1 m diep ligt, zal de afstand tussen de profielen kleiner moeten zijn.

In eenzelfde homogene zone met een recht lopende leiding (bijvoorbeeld een bestraat gedeelte van 5 tot 6 m in een asfaltweg) worden minstens twee of drie dwarsprofielen aanbevolen, als er geen vermoeden is dat de nutsleiding zelf van richting verandert.

Als er weinig of geen informatie over het tracé van een kabel of een leiding voorhanden is, moet volgens een **rasterpatroon** worden gewerkt. Achteraf kunnen dan de rechtlijnige afwijkingen uit de gemeten echo's worden gehaald (zie bijvoorbeeld de metingen die op een parking zijn uitgevoerd, figuur 9.6). De beste resultaten worden verkregen wanneer de kabel of leiding schuin onder de lijnen van het raster ligt.



Figuur 9.6 – *Rechtlijnige echo in een 2D-bestand, afkomstig van een elektriciteitskabel op 0,75 m diepte*

Nauwkeurige lokalisatie van de referentiepunten op het terrein is uiterst belangrijk voor een goede positiebepaling van de afwijkingen die bij de interpretatie in de verzamelde gegevens worden geconstateerd.

Bij recente toestellen kunnen de radargegevens aan **geolokalisatie (gps)** worden gekoppeld. Dit maakt een snellere scanning van het terrein mogelijk, zonder ter plaatse nauwgezet een welbepaald raster te moeten uittekenen. Gelijktijdige registratie van radarscans en gps-lokalisatie is echter pas interessant als deze lokalisatiegegevens nauwkeurig zijn (op 1 cm na), en slechts mogelijk bij voldoende gps-ontvangst (dus niet onder een bladerdek of in nauwe straten). De gekoppelde gegevens kunnen vervolgens met 2D- of 3D-visualisatiesoftware worden ingelezen, voor een gemakkelijker interpretatie.

De meeste radarantennes voor het opsporen van nutsleidingen (tussen 0,5 m en 3 m diep) zijn gemonteerd op een wagentje met twee, drie of vier wielen. Bij oppervlakken die sterk ongelijk liggen of met kleine obstakels bezaaid zijn, gaat de voorkeur naar een getrokken wagentje met twee wielen of naar een wagentje met drie grote wielen (meer dan 0,3 m doorsnede). Dit voorkomt dat het codeerwiel aan de grootste stenen blijft steken of over een plaatselijke verzakking heen gaat zonder een signaal te laten optekenen. Een wagentje met vier wielen biedt dan weer een betere stabiliteit voor het "grondvlak" van de antenne en een grotere compactheid, waardoor dichter langs muren of obstakels kan worden gemeten. Er kan ook geschikt toebehoren worden gebruikt om een regelmatige, stabiele scanning mogelijk te maken (figuur 9.7).

De operator dient na te gaan of het codeerwiel gekalibreerd is op een oppervlak waarvan de stroefheid vergelijkbaar is met die van het oppervlak van de onderzochte constructie.

Figuur 9.7 – *Voorziening met niet-metalen "looprails" om het grondvlak van de antenne en de codering van afstanden te regulariseren*

Naast de klassieke verwerkingstechnieken [1] kan een *background removal* nuttig blijken om meervoudige echo's of horizontale resonanties te verwijderen. Door middel van migratie kunnen hyperbolen (die kenmerkend zijn voor plaatselijke reflectoren) in één punt worden geconcentreerd.

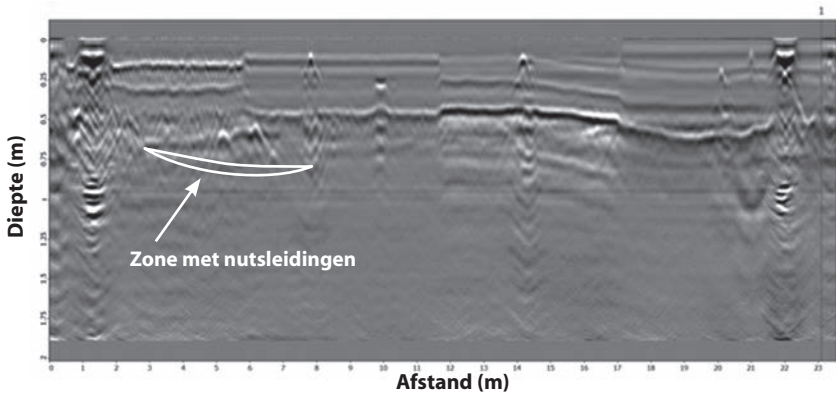
9.4 Standaardvoorbeelden van verrichte radaronderzoeken

9.4.1 Onderzoek van de proefsleuf te Waver met een multifrequente antenne (300 tot 700 MHz)

Deze multifrequente radarantenne onderscheidt zich van de andere GPR-toestellen door de breedte van de frequentieband die ze bij de inzameling van gereflecteerde elektromagnetische signalen gebruikt. Deze radar vervangt als het ware vijf conventionele radars van 300, 400, 500, 600 en 700 MHz, maar werkt eigenlijk in een bandbreedte van 50 tot 1050 MHz. Dit uit zich in een behoorlijk gepast antwoordsignaal op zowel kleine objecten dicht bij het oppervlak als dieper zittende objecten (tot enkele meters diep, naargelang van de terreinomstandigheden).

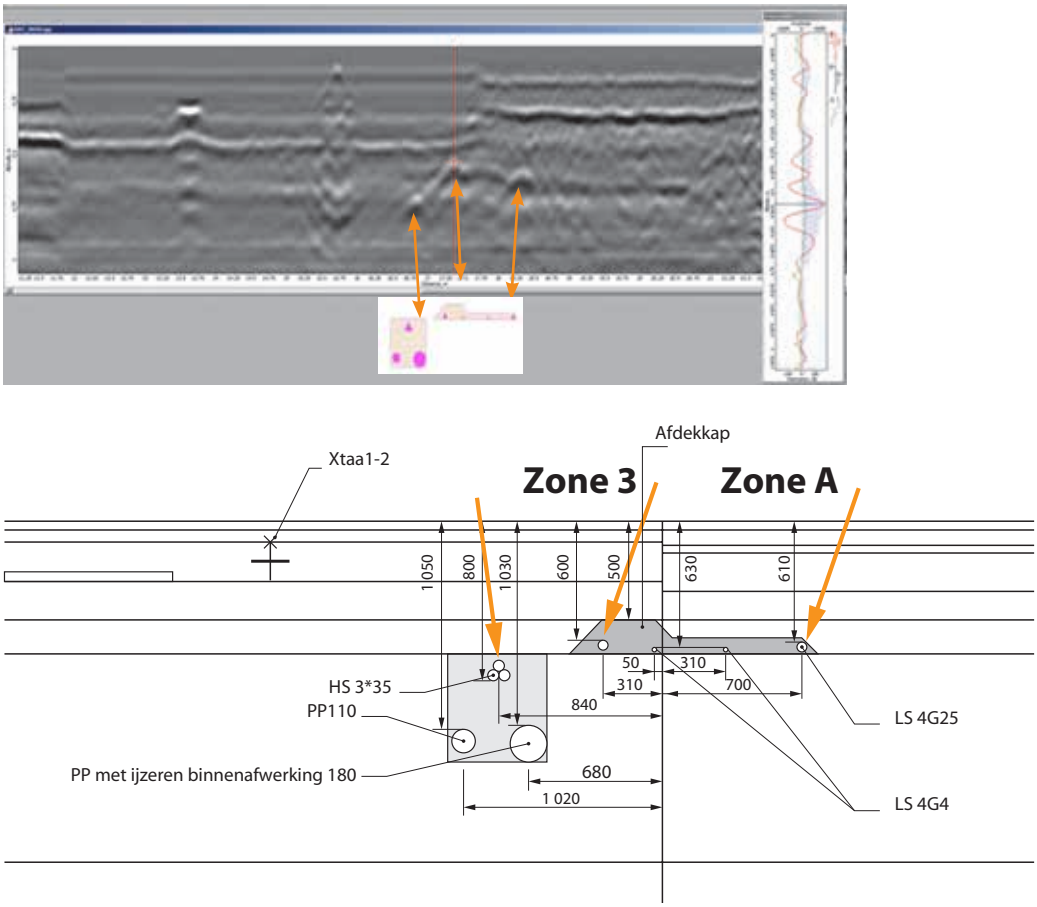
Deze betrekkelijk compacte uitrusting, die goed geschikt is om nutsleidingen op te sporen, is getest op de proefsleuf van het OCW, om het radarbeeld dat ze geeft te vergelijken met de resultaten die al met andere uitrusting waren verkregen.

De resultaten (figuur 9.8) tonen zowel een goede scheiding van de verschillende aanwezige lagen als goed afleesbare plaatselijke echo's die verraden dat op verschillende diepten kleine objecten zijn ingegraven.



Figuur 9.8 – *Lengteprofiel van het midden van de proefsleuf van het OCW (na* background removal *en migratie), verkregen met de Cobragrondradar*

Bij inzoomen op deze zone met nutsleidingen (op een diepte tussen 0,5 en 1,2 m, figuur 9.9) worden drie hyperbolen duidelijker zichtbaar, ter hoogte van de metalen kabels en niet van de buizen. Op te merken valt echter dat de buizen zich in dit geval onder het triplet van kabels (HS 3*35) bevinden en in de eerste echo van deze reflector verloren gaan. Hieruit kan dus nog niet worden afgeleid dat zij onder gelijke omstandigheden een minder goede reflector zouden zijn dan de metalen kabels.



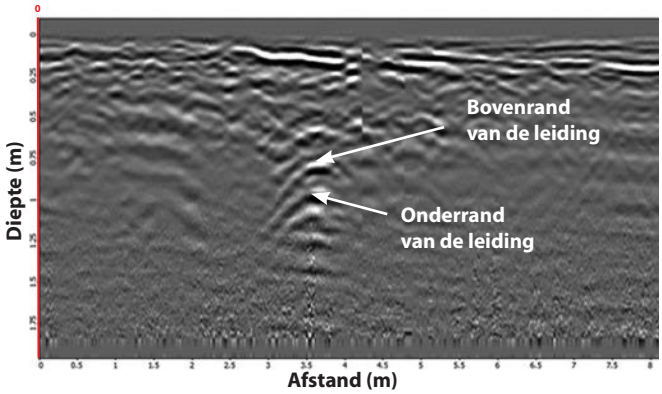
Figuur 9.9 – *Radargram en detailtekening ter hoogte van de zone met dwarse nutsleidingen*

Figuur 9.10 – *Detailopnamen: de LS 4G25- en de HS 3*35-kabels vormen de sterkste reflectoren in het lengteprofiel*

9.4.2 Opsporen van een verstopte drainageleiding

Bij het zoeken naar bepaalde niet-metalen leidingen (bijvoorbeeld van asbestcement) die niet meer worden gebruikt, kan worden bepaald of zij volledig verstopt zijn (met water of afzettingen) dan wel of zij een hol gedeelte bevatten.

Als de permittiviteit van het vulmateriaal bekend is, kan de diameter van de leiding worden bepaald. Op het radargram van figuur 9.11 bijvoorbeeld, dat op een cementleiding is gemeten, zijn de reflecties van de boven- en de onderrand van de leiding gemakkelijk te onderscheiden en kan hieruit (in de aanname van een permittiviteit van 13 voor het vulmateriaal) worden afgeleid dat ze een diameter van 200 mm heeft. In dit geval is dat slechts mogelijk door de geringe diepte waarop het object zich bevindt, de grootte ervan en het (niet-metalen) materiaal waarmee het bedekt is. De amplitude van de reflecties van een metalen leiding zou deze meting zeer twijfelachtig of zelfs onmogelijk hebben gemaakt, omdat de totale reflectie van radargolven op het bovenvlak de onderliggende reflecties zou hebben gemaskeerd.



Figuur 9.11 – *Visualisatie van de boven- en de onderrand van een ronde leiding*

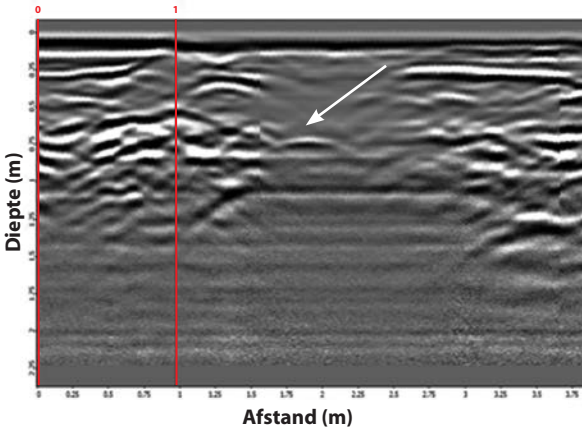
9.4.3 Opsporen van optische vezelleidingen in een trottoir

Figuur 9.12 – *Aanbrengen van optische vezelleidingen 60 tot 70 cm diep in een trottoir in stedelijke omgeving*

Bij werkzaamheden aan stadswegen worden steeds vaker op een diepte van 0,6 tot 0,7 m optische vezelleidingen ingegraven, onder of boven andere kabels of leidingen. De mantelbuizen om deze leidingen (figuur 9.13), die uit plastische polymeren zijn vervaardigd en een diameter van enkele centimeters hebben, geven slechts zeer weinig contrast, vooral op de gebruikelijke ingraafdiepten. Als zij met eveneens plastic beschermbanden in bundels worden samengebonden (figuur 9.14), bieden zij echter een beter reflectieoppervlak en geven zij wellicht ook betere contrasten, door de holten tussen de mantelbuizen. Dit is momenteel de enige manier om ze efficiënter te kunnen opsporen, in afwachting van metalen reflectoren of andere beschermingsmiddelen die op deze diepte betere contrasten geven.

Figuur 9.13 – *Detailopname van een lege mantelbuis voor optische vezelleidingen*

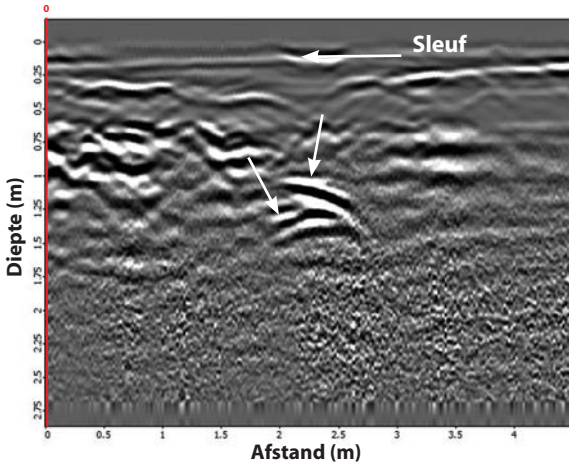
Figuur 9.14 – *Bundel mantelbuizen met optische vezelleidingen met plastic beschermband en zandafdekking, op een diepte van 0,7 m*



Figuur 9.15 – *Detectie van een bundel mantelbuizen met optische vezelleidingen in een sleuf onder een trottoir, op ongeveer 60 cm diepte (multifrequente antenne)*

9.4.4 Opsporen van metalen leidingen van 10 cm doorsnede

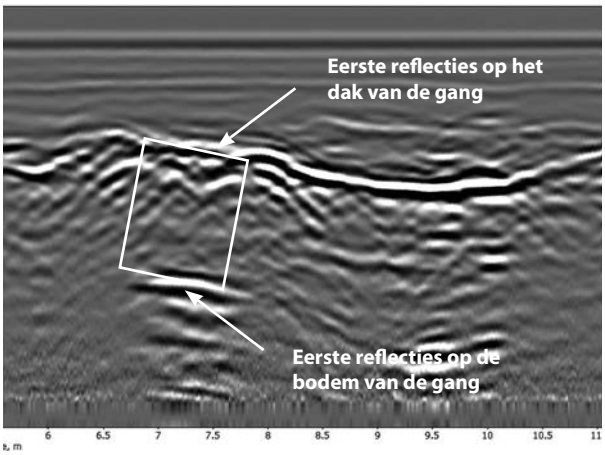
Op het onderstaande radargram is de aanwezigheid te zien van twee metalen leidingen van 10 cm doorsnede in het midden van een sleuf in grond met kenmerken die niet zo gunstig zijn voor de transmissie van radargolven (hoog vochtgehalte, sterke ruis). Omdat de grond het signaal fel afzwakt, moeten zware versterkingen worden toegepast, met toenemende ruis als gevolg. Hier overstijgen de twee metalen leidingen plaatselijk de ruis door hun afmetingen en door het contrast van het metaal.



Figuur 9.16 – *Opsporen van twee metalen leidingen (10 cm diameter) in een sleuf, op meer dan een meter diepte (multifrequente antenne)*

9.4.5 Opsporen van een onderhoudsgang met nutsleidingen onder een hellende weg

Kabels en leidingen worden soms goed beschut in onderhoudsgangen aangebracht, diep onder de grond of dichter bij het oppervlak. Meestal zijn er nauwkeurige plannen die de plaats ervan aangeven en zijn ze via luiken toegankelijk. Toch blijft het soms moeilijk het precieze verloop ervan op het terrein aan te geven en het oppervlak van de verschillende soorten uitrusting in de betonnen gang te detecteren. Opsporen met GPR geeft zeer wisselvallige resultaten, te meer omdat de kabels of leidingen heel vaak aan de muren en niet aan het plafond zijn bevestigd. Niettemin blijft het betonnen dak van zulke onderhoudsgangen, als het niet dieper zit dan 5 m, vaak zichtbaar door de contrasten tussen beton en grond, door de metalen wapeningsstaven en door de holte van de gang. In het voorbeeld op figuur 9.17 lijkt de gang, die zich in een hellend terrein bevindt, schuin te zitten, doordat de interpretatiesoftware het topografische oppervlak niet heeft gecorrigeerd.



Figuur 9.17 – *Voorbeeld van sterke reflecties van een lege, rechthoekige betonnen onderhoudsgang in een hellend terrein, waarin zich nutsleidingen bevinden die onzichtbaar blijven (multifrequente antenne)*

9.5 Conclusies

Grondradar biedt nieuwe mogelijkheden in conditieonderzoek, evaluatie en niet-destructief opsporen van verschillende objecten of weglagen in het algemeen en van nutsleidingen in het bijzonder. Deze constatering is veelbetekenend, te meer omdat de technieken snel evolueren – zowel wat apparatuur als interpretatieprogrammatuur betreft.

Daarnaast gelden tegenwoordig nieuwe aanbevelingen en reglementen om de problematiek van werkzaamheden aan of voor nutsleidingen aan te pakken en zo de vele ongemakken door het toenemende aantal bouwplaatsen en de rampzalige gevolgen van beschadiging van leidingen door foute lokalisering of gebrek aan informatie te voorkomen.

Gebruik van radar voor het opsporen van allerlei uitrusting op geringe diepte (van 0 tot 3 m) in de grond is een verrijking van het bestaande arsenaal van detectiemiddelen, maar moet omzichtig en oordeelkundig gebeuren. Dit multidisciplinaire detectiemiddel biedt inderdaad tal van mogelijkheden om kabels, kokers, mantelbuizen en al of niet metalen leidingen te lokaliseren, maar de gebruiker moet de beperkingen ervan kennen, die onder meer verband houden met de gebruikte soorten van antennes en de frequentie ervan. De grootte van de objecten, het materiaal waaruit ze bestaan, de permittiviteitscontrasten tussen materialen, de diepteligging, de aanwezigheid van vocht en de fysicochemische kenmerken van de grond zijn allemaal parameters waarmee rekening moet worden gehouden om een resultaat voor te stellen of tot een constatering te komen.

Om alle troeven in handen te houden, zouden de beheerders van de verschillende soorten ondergrondse uitrusting idealiter zich niet tot klassiek lokalisatiebeheer op plannen mogen beperken, maar bovendien het aanvulwerk moeten kunnen uitvoeren op een manier die zich beter leent voor plaatsbepaling achteraf in situ, waardoor het opsporen van uitrusting in de toekomst gemakkelijker wordt. In de praktijk bestaan daartoe al tal van mogelijkheden zoals omhullen met gekleurde mantelbuizen die metalen reflectoren of zelfs een RFID-tag bevatten, maar er blijven nog technisch-economische obstakels.

Een sleufaanvulling met zand is gunstig voor radaronderzoek. In de praktijk wordt echter ook met steenslag of ZUM's (zelfverdichtende uitgraafbare materialen) aangevuld. Ook op een oppervlak dat voldoende ondoorlatend is gemaakt, waardoor het vochtgehalte van het onderliggende materiaal beperkt blijft, is radar goed te gebruiken. Afhankelijk van de toepassing is het echter niet altijd volstrekt nodig de sleuf af te dekken.

In goede handen is radar een doeltreffend detectiemiddel, maar het blijft een aanvulling op andere apparatuur die voor een gegeven object of een gegeven functie soms beter geschikt is.

Hoofdstuk 10
Casestudy: Scheldelaan te Antwerpen

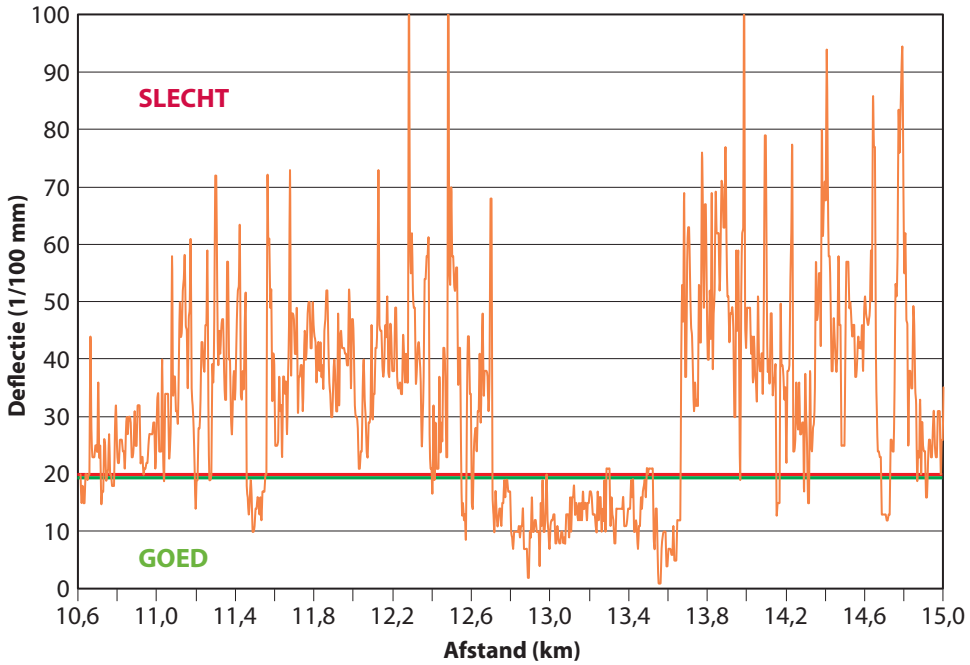
In opdracht van AWV zijn op een drukke weg met tweemaal twee rijstroken in de industriezone van de Antwerpse haven werkzaamheden uitgevoerd om de bitumineuze verharding te vervangen. De fundering werd ter plaatste met cement behandeld. De bouwplaats was in totaal ongeveer 2 km lang en de werkzaamheden werden in fasen uitgevoerd, van mei tot september 2016.

Figuur 10.1 – *Luchtopname van de bouwplaats*

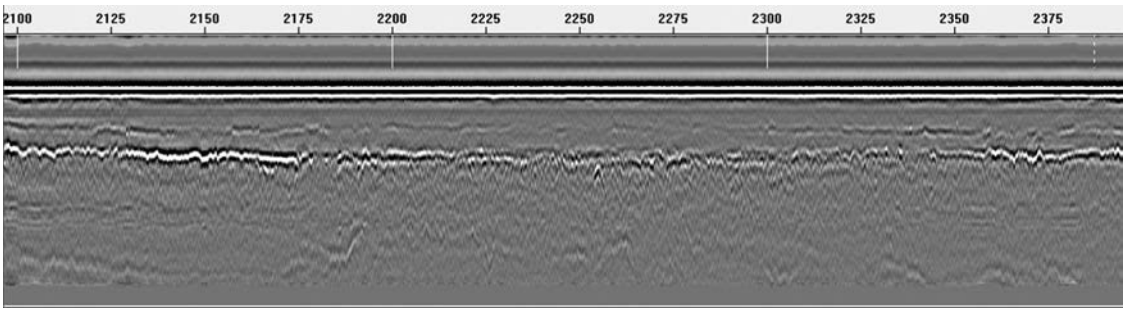
Op de te renoveren weg werden vóór de eerste fase van de werkzaamheden, in april 2016, radarmetingen met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz verricht, evenals deflectiemetingen met de curviameter. In mei 2016 volgden zeer volledige metingen (radar met verschillende antennes, 3D-radar, valgewichtdeflectiemeter en boorkernen) over een korter gedeelte van de te renoveren weg (vóór de tweede fase van de werkzaamheden, nabij Fort Lillo). In september werden in hetzelfde vak meermaals radarmetingen verricht op de fundering en op elk van beide asfaltlagen nadat zij waren aangebracht. Na de voltooiing van de werkzaamheden werden radarmetingen uitgevoerd op de toplaag (februari 2017).

10.1 Metingen vóór de eerste fase van de werkzaamheden

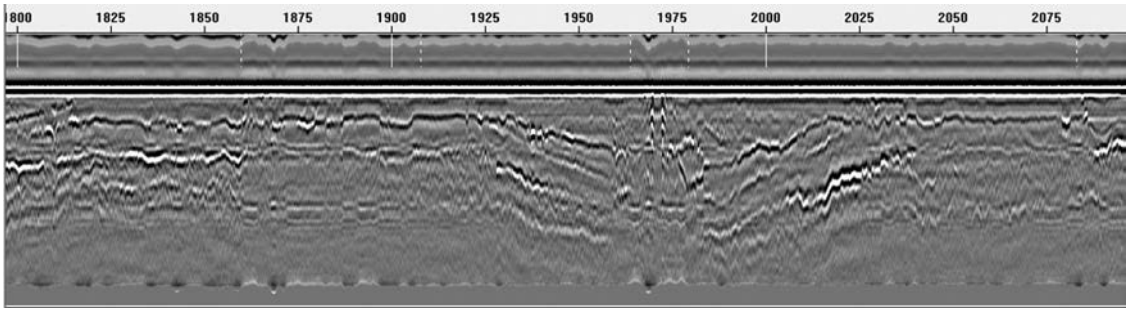
Op 25 april 2016, vóór de eerste fase van de werkzaamheden, werden met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz radarmetingen en met de curviameter deflectiemetingen verricht over de hele lengte van de te renoveren weg, in het rechterrijspoor op de eerste rijstrook. Deze metingen wezen uit dat de wegconstructie zeer heterogeen was opgebouwd (figuur 10.2 tot figuur 10.4).



Figuur 10.2 – *Met de curviameter gemeten deflecties (in honderdsten van een mm)*



Figuur 10.3 – *Radarprofiel tussen 12,7 km en 13 km: homogene zone, met weinig deflectie*



Figuur 10.4 – *Radarprofiel tussen 12,4 km en 12,7 km: zone met veel deflectie*

De metingen met de curviameter gaven zeer variabele deflectiewaarden, die vaak groter waren dan 0,20 mm (een grenswaarde die het hier mogelijk maakt de zones die in "slechte" en "goede" staat verkeren duidelijk van elkaar te onderscheiden). In de zones waar de deflecties beperkt zijn en kleiner dan 0,20 mm (tussen 11,4-11,6 km en 12,7-13,6 km) laten de radarprofielen aan het oppervlak een homogener opbouw zien (het ondervlak van het asfalt is duidelijk zichtbaar), die minder verstoord wordt door oppervlakreparaties of -gebreken (figuur 10.3). In de zones met veel deflectie is het radarprofiel heterogeen, met veel oppervlakgebreken (reparaties, enz.) (bv. figuur 10.4).

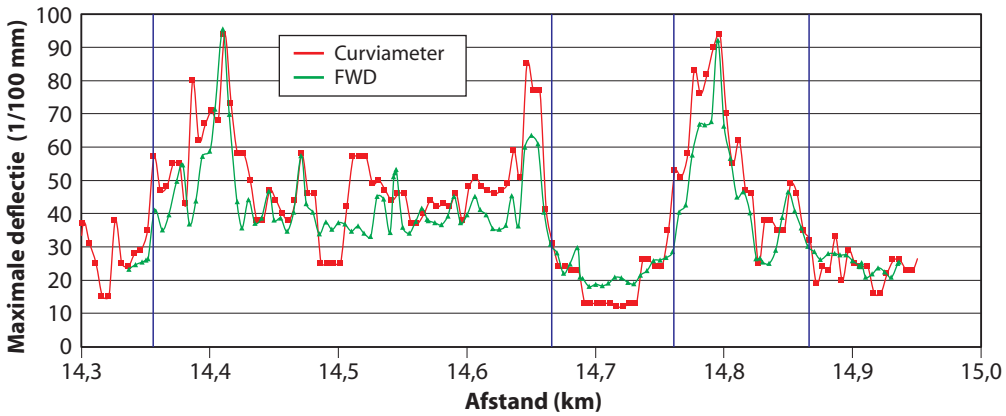
Op grond van deze eerste radarmetingen konden de plaatsen worden gekozen voor de kernboringen die net vóór de tweede fase van de werkzaamheden moesten plaatsvinden.

10.2 Metingen vóór de tweede fase van de werkzaamheden (Lillo Fort)

10.2.1 FWD-metingen

Vanaf kilometerpunt 14,327 werden met de FWD deflectiemetingen verricht, vooral op rijstrook 1.

De resultaten stemmen goed overeen met die van de curviametermetingen in april 2016 (figuur 10.5). De verschillen zijn voornamelijk te verklaren door een verandering van temperatuur, de plaats van de meetpunten en de belastingen die eigen zijn aan elk apparaat. Deze meetresultaten worden gebruikt voor terugberekeningen.



Figuur 10.5 – *Resultaten van deflectiemetingen met de curviameter (rood) en de FWD (groen)*

10.2.2 Kernboringen

Het OCW boorde kernen. De plaatsen voor deze kernboringen werden vooral op grond van de radarmetingen van april 2016 bepaald. Tabel 10.1 geeft een overzicht, met de dikten van de verschillende lagen.

Kernboring	Met een meetwiel bepaalde afstand vanaf KP 14,327 (m)	Laag 1 (cm)	Laag 2 (cm)	Laag 3 (cm)	Laag 4 (cm)	Gemiddelde totale lengte (cm)
1	13	6,6	9,7	4,3		20,6
2	88	4,6	11,1	4,5		20,2
3	148	5,0	10,1	5,4		20,5
4	208	De kern is in twee stukken gebroken en er ontbreekt een deel. Er is een scheur zichtbaar.				
5	233	3,8	6,3	9,3		19,4
6	353	4,5	6,1	13,1		23,7
7	493	4,2	6,2	6,4	8,8	25,6
8	573	4,3	6,7	4,2	7,1	22,3
9	603	4,0	6,7	4,7	8,7	24,1

Tabel 10.1 – *Plaatsen en dikten van de kernen*

De verschillende kernen bestaan uit drie of vier lagen. De dikte van de eerste laag varieert van 3,8 tot 6,6 cm, die van de tweede laag tussen 6,1 en 11,1 cm. In de eerste 200 m van het vak zijn de dikten duidelijk groter. De totale lengte van de boorkernen schommelt tussen 19,4 en 26,6 cm.

10.2.3 Analyse van de deflectiemetingen – Terugberekening

Op grond van de metingen met de curviameter konden vijf homogene zones worden afgebakend in het vak van ± 850 m (KP 14,161 tot KP 15,014) ter hoogte van Lillo Fort (figuur 10.5 en tabel 10.2). De homogene zones 3 en 4 lijken respectievelijk op de zones 5 en 2. Bij de terugberekeningen beperken we ons daarom tot de zones 1, 2 en 5.

De terugberekening werd uitgevoerd met de resultaten van de deflectiemetingen met de curviameter (april 2016) en die van de metingen met de valgewichtdeflectiemeter (metingen van 27 mei 2016).

10.2.3.1 Berekeningen met Alizé Recherche *en de meetresultaten van de curviameter*

N 101, Scheldelaan, fase 2 van het eerste deel van de werkzaamheden (ter hoogte van Lillo Fort)

Tabel 10.2 geeft een overzicht voor de vijf homogene zones die met de meetresultaten van de curviameter zijn afgebakend.

					Maximale deflectie			Kromtestraal	
Nr.	KP begin	KP einde	Lengte	Aantal meet-stations	Gemid-delde	Stan-daard-afwij-king	Karakte-ristieke	Gemid-delde	Stan-daard-afwijking
(km)					(1/100 mm)			(m)	
1	14,161	14,351	0,190	39	32	13	57	924	444
2	14,356	14,661	0,305	62	50	14	78	434	155
3	14,666	14,757	0,091	19	20	7	34	1,224	338
4	14,762	14,862	0,100	21	56	19	94	525	310
5	14,867	15,014	0,147	30	25	5	35	1,047	213

Tabel 10.2 – *Vijf homogene zones, afkomstig van de interpretatie van de curviametermetingen*

De software *Alizé Recherche* maakt het mogelijk in één keer terugberekeningen te doen voor een hele reeks meetstations. curviametermetingen geven resultaten in een heleboel meetstations, die elkaar opvolgen met een afstand van slechts 5 m. We hebben dus berekeningen uitgevoerd met de resultaten in alle meetstations en vervolgens een analyse gemaakt, om uit te maken welke terugberekende elasticiteitsmoduli de meest realistische en betrouwbaarste zijn.

De succesvolste terugberekeningen worden verkregen door gebruik te maken van punten op de deflectiekromme die niet verder dan 0,9 m van de maximale deflectie gemeten werden en wanneer de wegconstructie gemodelleerd werd zonder hechting tussen asfalt en steenslagfundering. Voor de drie zones werden dezelfde punten op de deflectiekromme genomen.

HZ1: eerste homogene zone

De opbouw van de weg in deze zone werd afgeleid uit kernboring 1 en de informatie van AWV. Tabel 10.3 geeft de resultaten van de terugberekening zonder hechting tussen asfalt en steenslagfundering weer. Met de *Alizé*software kan op de ondergrens van het model *(stratum)* een onbegrensd medium worden bepaald. Doordat laag 4 dik is, heeft de toevoeging van het *stratum* de resultaten van de terugberekening niet beïnvloed.

	Opbouw van de wegconstructie				Moduli (MPa) zonder hechting tussen asfalt en steenslagfundering		
					Meetpunt		
Laag-nummer	Beschrijving	Laagdikte (m)	Coëfficiënt van Poisson	Start-modulus (MPa)	KP 14,316-Station 31	KP 14,331-Station 34	KP 14,341-Station 36
1	Enrobé	0,206	0,35	5 000	14 047	14 863	8 605
2	Empier-rement non lié	0,250	0,50	800	1 772	991	593
3	Gravier (avec tuyau)	0,300	0,50	200	311	33,8	173,2
4	Sol	4,500	0,50	150	190	115,1	102,5
5	*Stratum*	∞	0,25	55 000	91 281	570	70 055
				Nauwkeurigheid	**0,033**	**0,037**	**0,037**

Tabel 10.3 – *Opbouw van de wegconstructie en resultaten van de terugberekening voor de eerste homogene zone*

HZ2: tweede homogene zone

De opbouw van de wegconstructie in deze zone werd afgeleid uit de kernboringen 2, 3 en 5 en uit informatie van AWV, en wordt in tabel 10.4 gegeven. De berekende gemiddelde moduli staan eveneens in deze tabel.

Laagnummer	Beschrijving	Laagdikte (m)	Coëfficiënt van Poisson	Startmodulus (MPa)	Gemiddeld berekende moduli (MPa)
1	Asfalt	0,200	0,35	6 000	3 996
2	Ongebonden steenslag	0,250	0,50	500	70
3	Grind (met buis)	0,300	0,50	50	40
4	Ondergrond	4,500	0,50	50	91
5	*Stratum*	∞	0,50	50	80

Tabel 10.4 – *Opbouw van de wegconstructie en resultaten van de terugberekening voor de tweede homogene zone*

Besluit voor de terugberekening in HZ2: voor de tweede homogene zone geven de berekeningen met goede hechting tussen asfalt en fundering vaker een realistischer resultaat dan de berekeningen zonder hechting tussen asfalt en fundering. Dit neemt niet weg dat we kunnen besluiten dat zowel het asfalt als de fundering zeer lage E-moduli lijken te hebben en dus in slechte staat verkeren.

HZ5: vijfde homogene zone

De kromtestraal is nog steeds niet erg groot, wat kan wijzen op slechte hechting tussen asfalt en fundering. De dikte van het asfalt bedraagt volgens de twee kernboringen (8 en 9) rond 22 tot 24 cm. We kiezen voor de terugberekening een dikte van 23 cm.

Laagnummer	Beschrijving	Laagdikte (m)	Coëfficiënt van Poisson	Startmodulus (MPa)	Gemiddeld berekende moduli (MPa)
1	Asfalt	0,230	0,35	6 000	9 012
2	Ongebonden steenslag	0,250	0,50	500	1 104
3	Grind (met buis)	0,300	0,50	50	162
4	Ondergrond	4,500	0,50	50	162
5	*Stratum*	∞	0,50	50	129

Tabel 10.5 – *Opbouw van de wegconstructie in homogene zone 5, afgeleid uit de kernboringen 8bis en 9 en uit informatie van AWV, en resultaten van de terugberekening*

Besluit voor de terugberekening in HZ5: we maakten terugberekeningen voor alle stations waar in deze zone gemeten werd. Als we de gemiddeld berekende E-moduli (voorgesteld in de laatste kolom van tabel 10.5, zonder rekening te houden met de onbetrouwbare resultaten van het laatste meetpunt in de homogene zone) nemen, komen we uit op waarden die erop wijzen dat het asfalt nog van goede kwaliteit is, de fundering niet erg verzwakt is en de grindlaag en de ondergrond nog een redelijke E-modulus vertonen.

10.2.3.2 *Berekeningen met* Alizé Recherche *en de meetresultaten van de FWD*

Voor dezelfde zones (1, 2 en 5) hebben we ook terugberekeningen gemaakt met de meetresultaten van de FWD. Ook hier beschikken we over resultaten van een heleboel meetstations en hebben we dus berekeningen uitgevoerd met de meetresultaten van alle meetstations. Vervolgens hebben we een analyse gemaakt van welke terugberekende elasticiteitsmoduli de meest realistische en betrouwbaarste zijn.

Voor die zones zijn de resultaten van de terugberekening het best wanneer we aannemen dat de hechting tussen asfalt en steenslagfundering slecht is.

De conclusies voor het restdraagvermogen van de verschillende lagen in de wegconstructie blijken dezelfde te zijn, ongeacht of we de analyse baseren op metingen met de curviameter of met de FWD.

10.2.3.3 *Berekeningen met* Qualidim *en de meetresultaten van de FWD*

Met de gebruikersinterface van de *Qualidim*software kan de informatie per meetstation enkel manueel worden ingevoerd. We hebben ons daarom beperkt tot negen terugberekeningen, elk in de buurt van een van de kernboringen.

Het gebruikte model van de wegopbouw was steeds hetzelfde, op de dikte van de asfaltlaag na. Die dikte werd aangepast naargelang van de totale laagdikte van alle aanwezige asfaltlagen die aan de betrokken kern was gemeten (tabel 10.1).

De opbouw van de wegconstructie was dus steeds zoals weergegeven in tabel 10.6.

Laagnummer	Beschrijving	Laagdikte (m)	Coëfficiënt van Poisson	Startmodulus (MPa)
1	Asfalt	Cf. kern	0,35	6 000
2	Ongebonden steen-slag	0,250	0,50	500
3	Grind (met buis)	0,300	0,50	50
4	Ondergrond	∞	0,50	50

Tabel 10.6 – *Opbouw van de weg ten behoeve van berekeningen met* Qualidim *en de meetresultaten van de FWD*

De resultaten van de terugberekeningen voor de elasticiteitsmoduli (in MPa) van de verschillende lagen in het model van de wegopbouw worden gegeven in tabel 10.7.

Kern	1	2	3	4	5	6	7	8bis	9
E1	9 711	10 547	3 521	5 732	6 742	4 917	4 489	5 661	5 296
E2	331	172	247	501	91	35	100*	70	130
E3	169	443	126	39	261	370	75	237	50*
E4	258	254	240*	240*	200	200*	204	197	199

*Vastgelegd voor de berekening

Tabel 10.7 – *Resultaten van terugberekeningen met* Qualidim *en de meetresultaten van de FWD*

We kunnen hieruit evengoed besluiten dat de fundering en onderfundering in slechte staat zijn. Wel dient te worden opgemerkt dat de resultaten, al zijn ze gelijksoortig als die uit de berekeningen met *Alizé Recherche*, toch minder geloofwaardig overkomen.

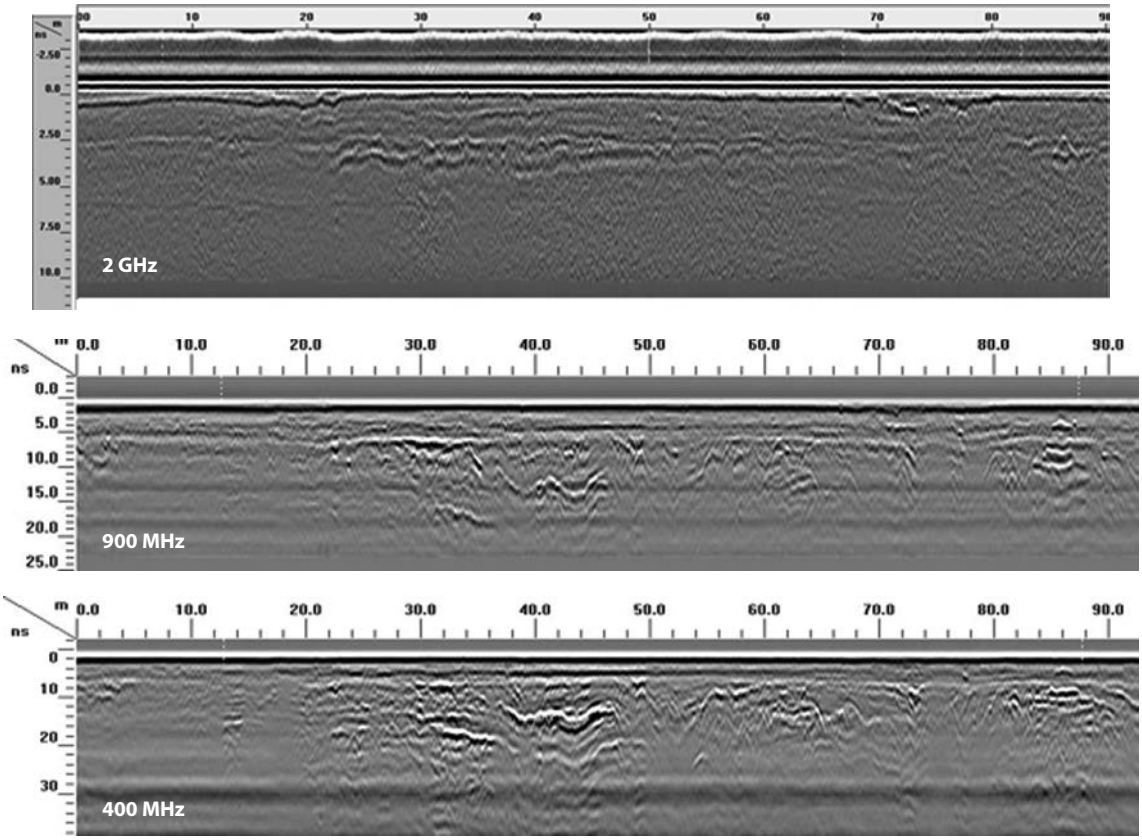
10.2.3.4 Conclusies

De analysen aan de hand van met de curviameter en de FWD gemeten deflecties geven gelijksoortige resultaten voor het restdraagvermogen van de verschillende lagen in de wegopbouw. Uit de terugberekeningen kwam naar voren dat de fundering in de zones 1 en 2 en het asfalt in zone 2 in slechte staat verkeren (lage moduli).

10.2.4 Radarmetingen

Met de antennes van 2 GHz, 900 MHz en 400 MHz werden radarmetingen verricht vanaf kilometerpunt 14,327 m, over een lengte van ongeveer 620 m.

De radarbeelden vertonen veel ruis, wellicht doordat de weg zich dicht bij een industrieterrein bevindt. Aan het oppervlak en dieper zijn veel veranderingen te onderscheiden. De antenne van 2 GHz kijkt niet dieper dan de bovenste lagen (30 of 40 cm), terwijl die van 400 MHz een diepgaander onderzoek (1,50 tot 2 m diep) mogelijk maakt. Met deze laatste kunnen nutsleidingen worden opgespoord.



Figuur 10.6 – *Radarprofielen (2 GHz, 900 MHz, 400 MHz)*

Een analyse van de oppervlakreflecties bij 2 GHz-metingen geeft een vrij veranderlijke snelheidsverdeling van de elektromagnetische golven, wellicht deels aan omgevingsruis te wijten. Niettemin valt rond het 220 m-punt een verandering van verharding te onderscheiden. Vóór dit afstandspunt variëren de gemiddelde snelheden tussen 10 en 14 cm/ns, met aanzienlijke verschillen tussen de zones; vanaf dat punt stabiliseren zij zich rond 13,2 cm/ns, met een variatie-interval tussen 12 en 14 cm/ns.

Uit de meettijden met de antenne van 2 GHz en de met deze antenne afgeleide snelheden kunnen de dikten van de eerste laag worden geschat. Tabel 10.8 geeft een overzicht van deze dikten.

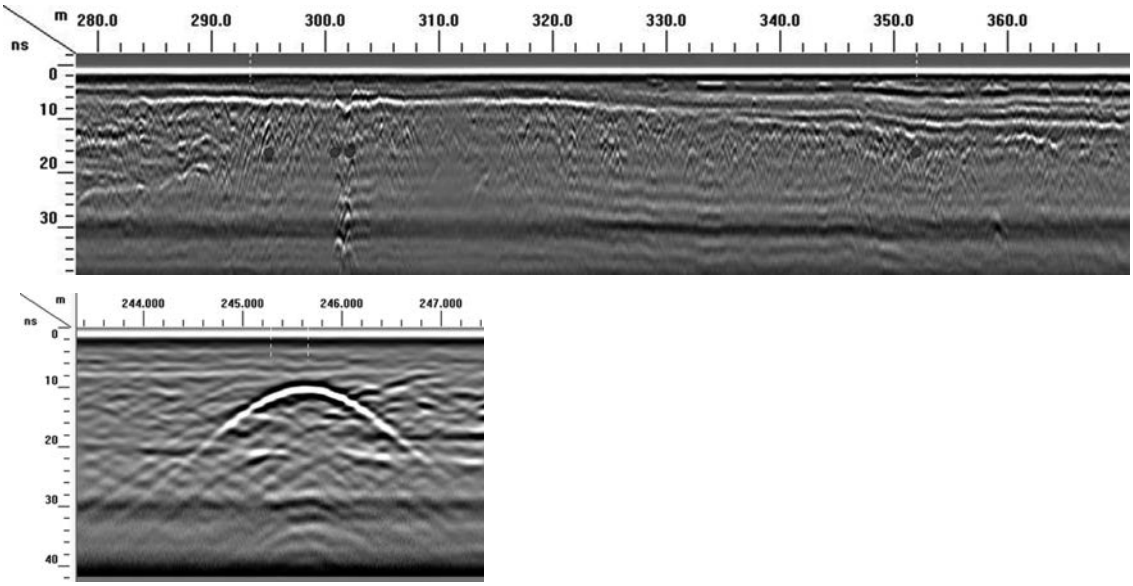
Boorkern nr.	T1 (2 GHz)	V1 (cm/ns) (2 GHz-metingen)	Dikte uit radar-metingen (cm)	Dikte 1e laag boorkern (cm)	Fout in dikte 1e laag (%)
1	0,94	12	5,6	**6,6**	15
2	0,81	13	5,3	**4,6**	15
3	0,81	12	4,9	**5,0**	2
4	0,53	13	3,4	**/**	/
5	1,6	13	10,4	**3,8**	174
6	1,67	13	10,9	**4,5**	142
7	0,45	13	2,9	**4,2**	31
8	0,46	13	3,0	**4,3**	30
9	0,4	12	2,4	**4,0**	40

Tabel 10.8 – *Vergelijking van de aan de boorkernen gemeten dikten met de uit de 2 GHz-metingen afgeleide dikten*

De overeenstemming tussen boorkernen en meettijden is niet zo bevredigend (behalve voor de eerste drie kernen, waarvoor de fout in de berekende dikte < 20 %). Voor de boorkernen 5 en 6 lijkt het erop dat de radar het eerste contactvlak tussen de asfaltlagen niet onderscheidt en de twee lagen als één ziet.

Onder het onderzochte vak lopen veel nutsleidingen door. Enkele leidingen zijn aan het oppervlak aangeduid; de locatie ervan is opgetekend en op de verschillende radarprofielen aangegeven.

Andere nutsleidingen, zoals buisleidingen, zijn niet aan het oppervlak aangeduid. Zij verschijnen al of niet op de radarprofielen. De 400 MHz-metingen geven veel hyperbolen te zien, die overeenstemmen met leidingen dwars onder de weg. Deze antenne is op de gegeven locatie veruit het best geschikt om nutsleidingen op te sporen.

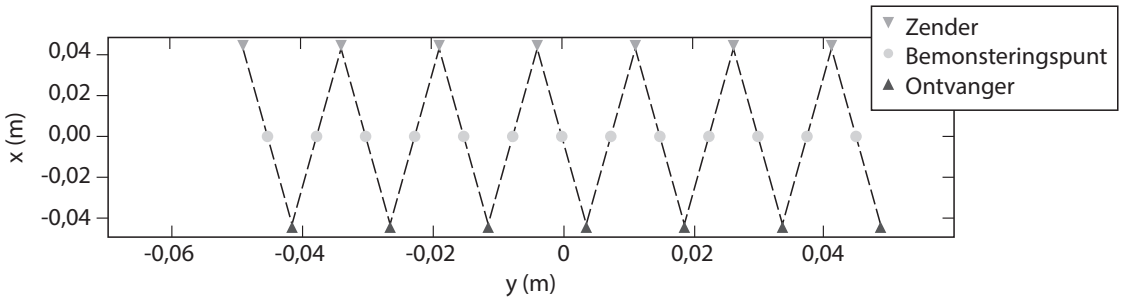


Figuur 10.7 – *400 MHz-radarprofielen waarop leidingen zichtbaar zijn*

10.2.5 Metingen met een 3D-Radarantenneset

Op hetzelfde wegvak vanaf kilometerpunt 14,327 heeft de UGent metingen uitgevoerd met een antenneset. Het gebruikte systeem is een GeoScope GS3F met een antenneset VX1213 van het merk 3D-Radar. Deze antenne bestaat uit zeven zenders en zeven ontvangers. Met die configuratie kunnen dertien metingen tegelijk worden verricht, met een tussenafstand van 7,5 cm. De metingen worden in het frequentiedomein uitgevoerd, in een frequentie-interval van 50 MHz tot 3 000 Hz. De voorbewegingssnelheid bij de metingen is maximaal 3,5 km/h. Het voordeel is dat in één meetgang een vak van 90 cm wordt onderzocht.

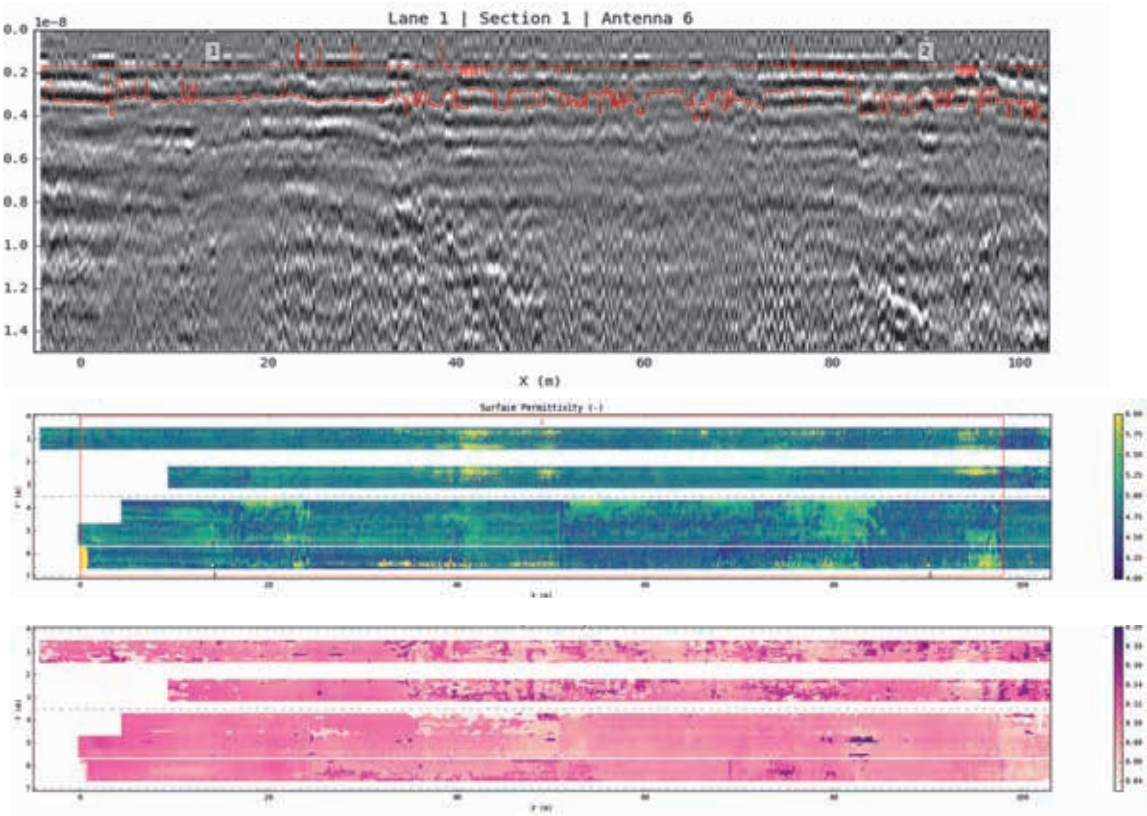
Figuur 10.8 toont de configuratie van de antenne.



Figuur 10.8 – *Configuratie van de 3D-Radarantenneset*

Voor de analyse van deze radarmetingen werd het meetvak in vier zones verdeeld. Aan de hand van de oppervlakreflectie kon de oppervlakdoorlatendheid worden bepaald. Uit de analyse van de eerste reflectie kon de dikte van de eerste asfaltCouche worden afgeleid. De dikten variëren van de ene zone tot de andere. Volgens deze metingen bedragen zij in zone 2 (van 100 m tot ongeveer 225 m) ongeveer 5 cm. In zone 1 (eerste 100 m) liggen zij tussen 8 en 11 cm. In de zones 3 (van 225 m tot ongeveer 500 m) en 4 (van 500 m tot ongeveer 600 m) variëren zij tussen 12 en 16 cm.

Figuur 10.9 toont doorsneden van de oppervlakpermittiviteit en de dikte van de eerste Couche, voor de eerste zone. Tabel 10.9 bevat de uit de diagrammen afgeleide permittiviteits- en diktegegevens op de plaatsen waar de kernen werden geboord (voor de vier zones uit de metingen met de antenneset) en vergelijkt ze met de aan de boorkernen gemeten dikten.



Figuur 10.9 – *Vak 1, rijstrook 1: radarprofiel (boven), oppervlakpermittiviteit (midden) en dikte van de eerste laag (onder)*

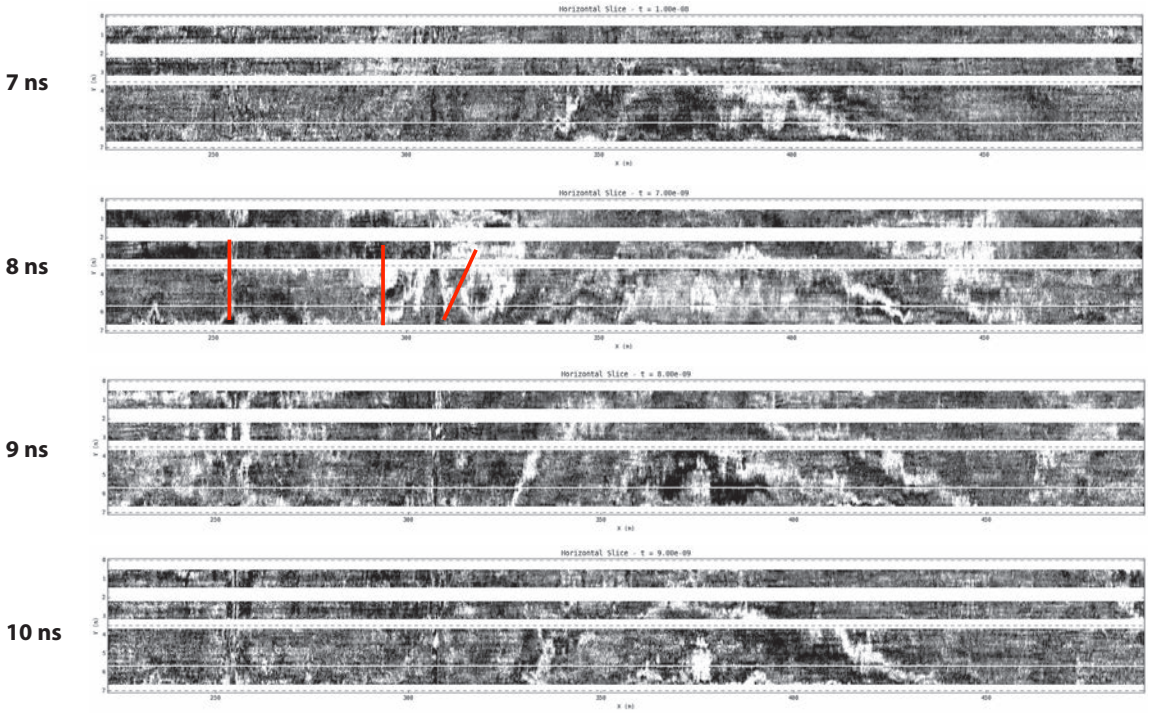
	3D-Radarmetingen			Aan boorkernen gemeten dikten		
Boorkern nr.	**Permittivi-teit**	**Snelheid (cm/ns)**	**Geschatte dikte (cm)**	**Laag 1 boorkernen (cm)**	**Lagen 1 + 2 boorkernen (cm)**	**Lagen 1 + 2 + 3 boorkernen (cm)**
1	4,7	13,8	12	6,6	16,3	
2	4,6	14,0	9	4,6	15,7	
3	4,6	14,0	8	5	15,1	
4	4,75	13,8	8			
5	4,6	14,0	14	3,8	10,1	
6	4,45	14,2	21	4,5	10,6	**23,7**
7	4,5	14,1	12	4,2	**10,4**	
8	4,6	14,0	16	4,3	11	**15,2**
9	4,6	14,0	16	4	10,7	**15,4**

Tabel 10.9 – *Vergelijking van de aan boorkernen gemeten dikten met de uit de 3D-Radarmetingen afgeleide dikten*

De overeenstemming tussen gemeten dikten (boorkernen) en geschatte dikten (radarmetingen) is vrij matig. Voor de boorkernen **1, 2, 3 en 5** kan de schatting de gemeten dikte niet tot minder dan 2 cm benaderen – noch voor de eerste Couche, noch voor een combinatie van de volgende lagen. Voor de boorkernen **6 en 7** kan worden aangenomen dat de geschatte dikte overeenstemt met een combinatie van respectievelijk de eerste drie (23,7 cm) en de eerste twee lagen (10,4 cm), maar ook die overeenstemming is weinig overtuigend. Enkel voor de laatste twee boorkernen, **8 en 9**, is het resultaat van de

vergelijking bevredigend: hier is de gezamenlijke dikte van de eerste drie lagen respectievelijk 15,2 cm en 15,4 cm, wat vrij dicht bij de 16 cm volgens de radarmetingen ligt. Deze onbevredigende resultaten zijn wellicht te wijten aan de heterogeniteit van de wegopbouw: de oppervlakpermittiviteit is niet representatief voor de onderliggende lagen.

De metingen met de antenneset maken tijddoorsneden mogelijk. Figuur 10.10 geeft ze weer voor zone 3, voor looptijden tussen 7 en 10 ns. De nutsleidingen zijn zeer goed te onderscheiden.

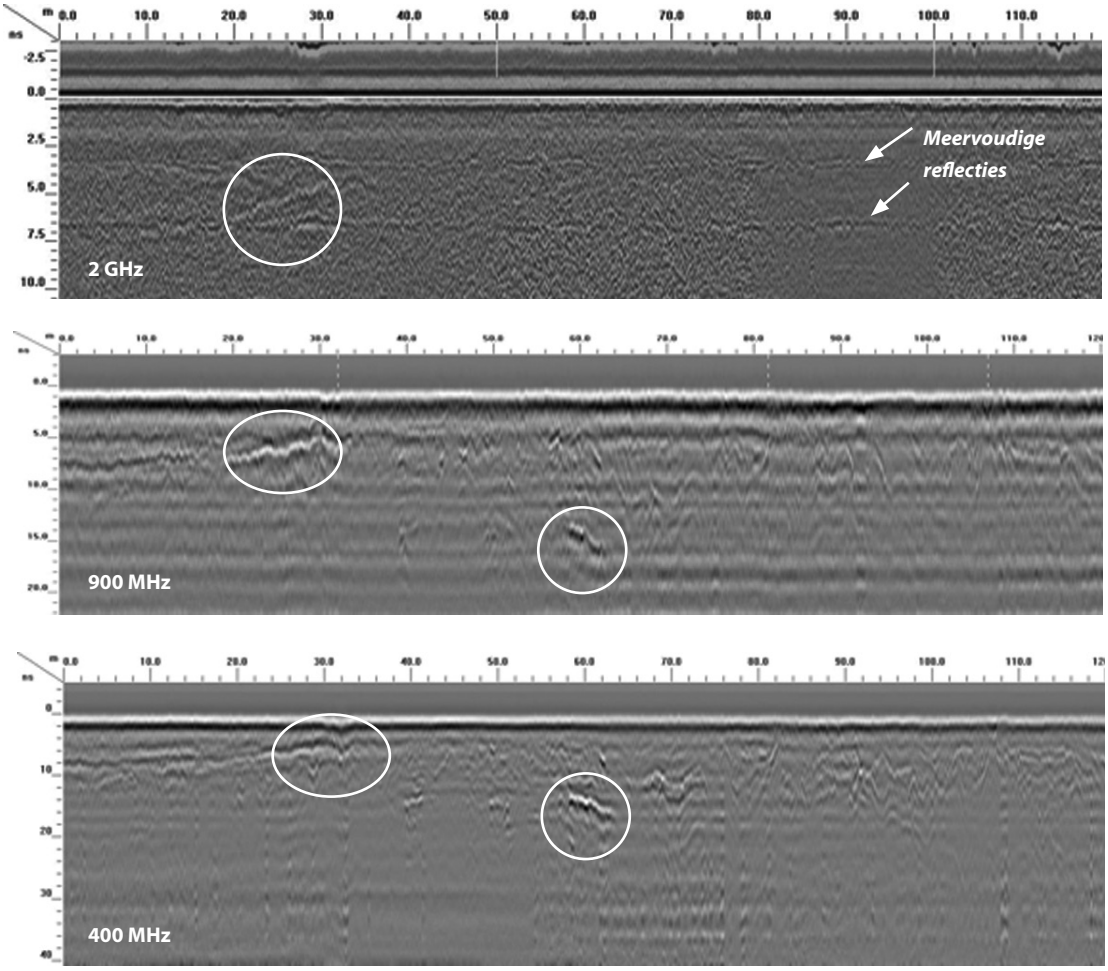


Figuur 10.10 – *Tijddoorsneden (7 tot 10 ns) voor zone 3*

10.3 Metingen in september op de fundering

Nadat de bitumineuze verharding verwijderd was, zijn op 15 september 2016 over een lengte van ongeveer 600 m vanaf kilometerpunt 14,327 radarmetingen verricht op de fundering van 30 cm, voordat de nieuwe verharding werd aangebracht.

Figuur 10.11 toont de meetresultaten over de eerste 120 m, voor de drie antennes.



Figuur 10.11 – *Metingen over de eerste 120 m van het recyclingwerk, met enkel de fundering*

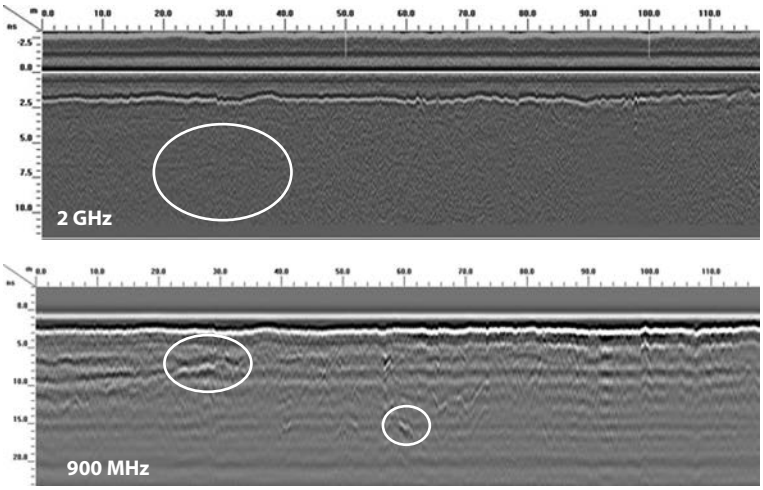
Het ondervlak van de gerecyclede fundering is op geen van de profielen zichtbaar. De reflectie is niet krachtig genoeg ten opzichte van de omgevingsruis.

Het 2 GHz-profiel vertoont ruis. De meervoudige oppervlakreflecties *(multiples)* zijn zichtbaar. Op 30 m is in de diepte een verandering in de wegopbouw waar te nemen (tussen 5 en 7,5 ns, wat met ongeveer 30 cm overeenstemt).

Deze reflectie is ook zichtbaar in de 900- en de 400 MHz-profielen, waarin bovendien op ongeveer 15 ns een tweede reflectie te onderscheiden valt. In andere delen van het profiel met de antenne van 400 MHz zijn ook nog diepere reflecties (tot 30 ns, d.i. ongeveer 1,5 m) zichtbaar.

10.4 Metingen in september tijdens het aanbrengen van de nieuwe verharding

De profielen van figuur 10.12 stemmen overeen met de 2 GHz- en de 900 MHz-metingen op de onderste asfaltonderlaag, in het rechterrijspoor op de eerste rijstrook (23 september).

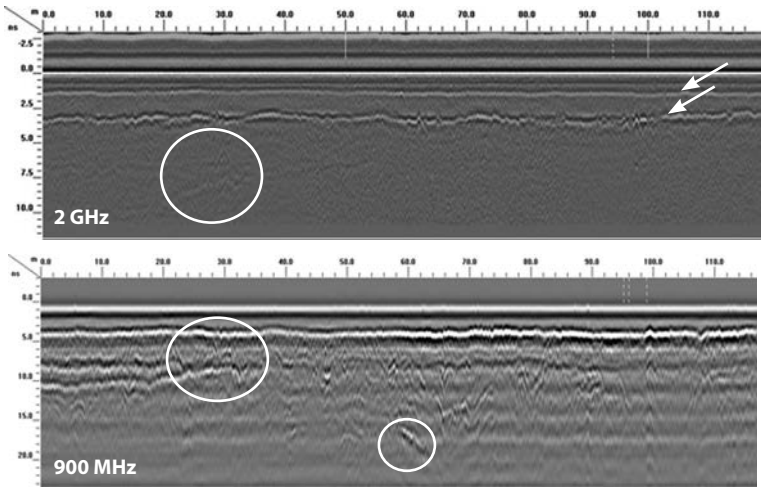


Figuur 10.12 – *Metingen over de eerste 120 m van het recyclingwerk, op de onderste asfaltonderlaag*

Het 2 GHz-profiel vertoont ruis, maar het ondervlak van de onderste asfaltonderlaag is in de buurt van 2 ns duidelijk zichtbaar. Deze reflectie is ook met de antenne van 900 MHz zichtbaar, hoewel zij de neiging heeft zich te vermengen met de oppervlakreflectie.

De geschatte snelheden op basis van de oppervlakreflectie van de luchtgekoppelde antenne variëren tussen 8 en 16 cm/ns. De gemiddelde snelheid is 12,2 cm/ns. Voorbij het 450 m-punt is de spreiding minder groot en variëren de snelheden tussen 10 en 14 cm/ns.

Figuur 10.13 toont de 2 GHz- en de 900 MHz-profielen op de bovenste asfaltonderlaag, in het rechterrijspoor op de eerste rijstrook.

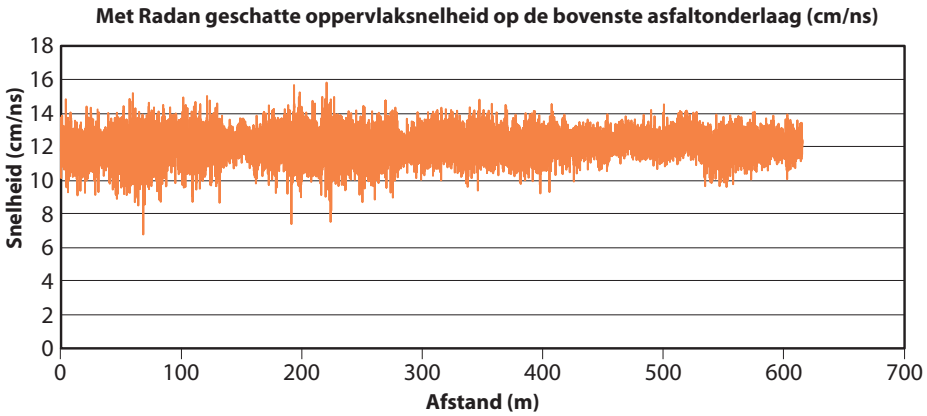


Figuur 10.13 – *Metingen over de eerste 120 m van het recyclingwerk, op de twee asfaltonderlagen*

De ondervlakken van beide lagen zijn op het radarprofiel van 2 GHz goed te zien, rond 1,4 en 3,4 ns. De bovenste asfaltonderlaag is dus ongeveer 30 % dunner dan de onderste. Op het 900 MHz-profiel daarentegen zijn de twee lagen niet van elkaar te onderscheiden. De reflectie die hier verschijnt, is nog

steeds die van het ondervlak van de eerst aangebrachte laag, maar ze verschijnt nu ongeveer 1,3 ns later dan in het vorige profiel. Deze verschuiving in de looptijd stemt wel degelijk overeen met de dikte van de bovenste laag, gemeten met de antenne van 2 GHz.

Analyse van de oppervlakreflectie leidt tot een snelheidsverdeling die in hoofdzaak tussen 10 en 14 cm/ns ligt. De spreiding is kleiner dan voor de eerste laag en neemt af voorbij 400-450 m.



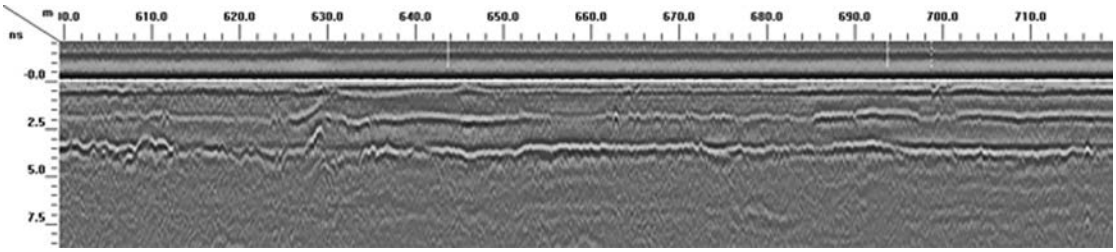
Figuur 10.14 – *Snelheidsanalyse op basis van de oppervlakreflectie (antenne van 2 GHz)*

Voordat de toplaag werd aangebracht, boorde AWV kernen, enkel uit de twee asfaltonderlagen. De gegevens worden gebruikt bij dikteberekeningen.

10.5 Metingen in februari 2017, na de werkzaamheden

In februari 2017 werden met de 2 GHz-antenne vanaf ongeveer KP 13,5 metingen verricht op de toplaag met een aangekondigde dikte van 3 cm. Per rijstrook werd één profiel gemaakt (rechterrijspoor in de rechterrijstrook en midden op de inhaalstrook). De metingen vonden in verkeer plaats.

De analyse van de oppervlaksnelheden met Radan geeft een gemiddelde snelheid van 12,82 cm/ns voor de rechterrijstrook en 12,33 cm/ns voor de inhaalstrook.



Figuur 10.15 – *2 GHz-radarprofiel op de toplaag*

10.6 Schatting van de dikten

Om de dikten van de verschillende asfaltlagen te bepalen, werden in september 2016 en februari 2017 op de voltooide weg radarmetingen verricht en geëxploiteerd.

De *picking* van de aankomsttijden werd uitgevoerd op de plaatsen waar AWV in september 2016 kernen had geboord.

10.6.1 Dikteschatting op de toplaag

Voor de *picking* van de reflectie is het moeilijk op voorhand te weten of de positieve of de negatieve piek moet worden genomen. Waarschijnlijk wordt een deel van de reflectie gecamoufleerd door de oppervlakreflectie. Tabel 10.10 geeft de dikten die bij manuele *picking* van de positieve piek zijn berekend, uitgaande van de gemiddelde snelheid volgens berekeningen met Radan. De afgeleide dikten variëren tussen 1,2 cm en 3 cm. Er zat geen toplaag in de boorkernen. De meegedeelde nominale dikte is 3 cm.

AWV-boorkernen rechterrijstrook	Berekende dikte (cm)
C1	3,0
C4	2,0
C6	2,0
C7	1,2
C18	1,8
C15	1,5

Tabel 10.10 – *Geschatte dikten op basis van radarmetingen*

10.6.2 Schatting van de dikte van de twee asfaltonderlagen

De dikten werden geschat uit radarmetingen op elk van beide onderlagen.

Voor de onderste asfaltonderlaag is de dikte die met de gemiddelde snelheid volgens Radan (12,14 cm/ns) is berekend iets (tussen 10 en 20 %) groter dan de dikte die aan de boorkern werd gemeten.

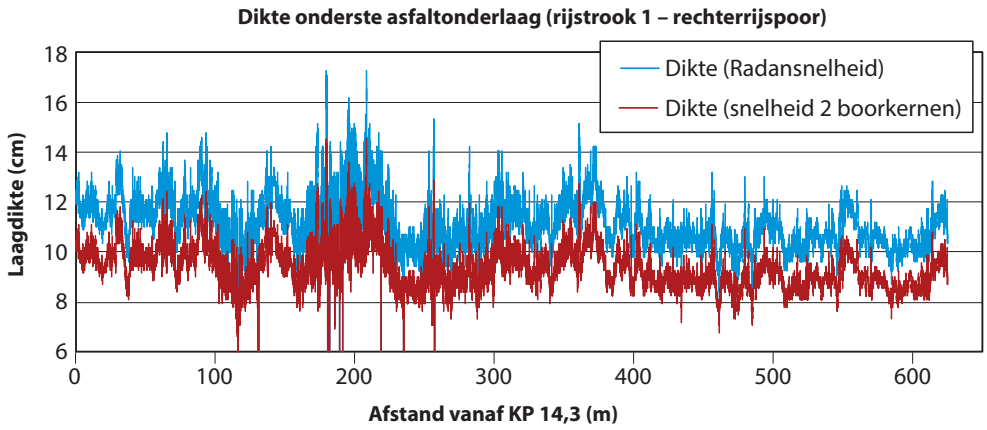
Voor de bovenste asfaltonderlaag is de dikte die met de gemiddelde snelheid volgens Radan (12,12 cm/ns) is berekend iets groter dan de dikte volgens de boorkern. De schatting is beter dan voor de onderste asfaltonderlaag.

		Berekend (mm)	Boorkern (mm)
Onderste asfaltonderlaag	C18	109	96
	C15	104	84
Bovenste asfaltonderlaag	C18	88	86
	C15	94	86

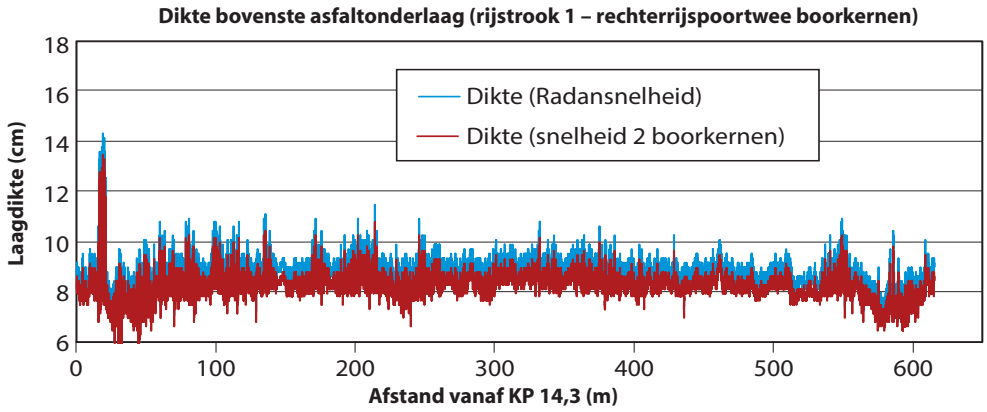
Tabel 10.11 – *Geschatte dikten op basis van radarmetingen – Vergelijking met boorkernen*

Door de snelheden op basis van de *picks* en de boorkernen opnieuw te berekenen, worden waarden van 10,2 cm/ns en 11,4 cm/ns gevonden, respectievelijk voor de onderste en bovenste asfaltonderlaag. Deze snelheden zijn minder hoog dan volgens de berekeningen met Radan. Dit verklaart waarom de met Radan berekende dikten groter zijn dan die in de boorkernen. Het verschil is het duidelijkst voor de onderste onderlaag.

In figuur 10.16 en figuur 10.17 zijn dikten uitgezet die met halfautomatische *picks* zijn berekend en waarbij de gemiddelde snelheid volgens Radan en de uit boorkernen afgeleide snelheden zijn gebruikt.



Figuur 10.16 – *Schatting van de dikte van de onderste asfaltonderlaag*



Figuur 10.17 – *Schatting van de dikte van de bovenste asfaltonderlaag*

10.7 Conclusies

De radar- en deflectiemetingen op de Scheldelaan brachten een vaak heterogene wegopbouw aan het licht. De dikteschatting voor de eerste laag van de te renoveren wegconstructie op basis van 2 GHz-radargegevens is niet bevredigend. Hetzelfde geldt voor de 3D-radar. De contactantennes van 900 MHz en 400 MHz hebben onvoldoende resolutie om de eerste asfaltlaag van de rest van de wegconstructie te onderscheiden.

De antenne van 400 MHz en de 3D-radar zijn doeltreffend gebleken om nutsleidingen op te sporen.

De metingen op de fundering laten enkele dieper zittende structuren zien, terwijl het ondervlak van de fundering niet zichtbaar is. De luchtgekoppelde antenne van 2 GHz kan de drie asfaltlagen in de nieuwe verharding van elkaar onderscheiden, wat met de antenne van 900 MHz niet mogelijk is. De antenne van 2 GHz is die waarmee de dikten in de nieuwe verharding het best kunnen worden bepaald. Ook met deze antenne worden de dikten echter vaak overschat (maximaal 10 of 20 %, naargelang van de beschouwde laag), als er geen kalibratie met behulp van boorkernen heeft plaatsgevonden. Een dergelijke kalibratie blijft dus nodig als een goede nauwkeurigheid vereist is.

De analyse van de curviameter- en de FWD-gegevens heeft uitgewezen in welke zones de verharding en de fundering in slechte staat verkeerden.

De plaatsaanduiding van de boorkernen op de radarprofielen is niet altijd nauwkeurig, vooral indien de metingen in verkeer zijn verricht. Ideaal zou zijn dat de plaatsen waar kernen moeten worden geboord op het wegdek worden aangeduid voordat de radar passeert, en dat het voertuig kort stilstaat om de plaats op de radarmetingen aan te geven. De kernen zouden in principe na de radarmetingen moeten worden geboord.

Hoofdstuk 11
Casestudy: renovatie van een gewestweg

11.1 Inleiding

In maart 2017 zijn radarmetingen (met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz en de contactantenne van 900 MHz) verricht vóór de eerste fase van de werkzaamheden voor de rehabilitatie van de *rue des Collines* te Waver, tussen de rotonde ter hoogte van de N4 en de rotonde naar Ottenburg toe. Deze metingen hadden tot doel de homogeniteit van de wegopbouw te beoordelen en de dikte van de verharding te bepalen. De gegevens van boorkernen uit 2011 zijn beschikbaar, evenals die uit deflectiemetingen met de curviameter in 2013.

De tien boorkernen geven aan dat het betrokken wegvak uit twee onderscheiden deelvakken bestaat.

In het eerste deelvak bestaat de wegconstructie uit:

- een bitumineuze verharding van 17 ± 4 cm dik;
- een fundering van steenslag met grijs zand (20 tot 30 cm dik);
- een onderfundering van steenslag (20 cm dik);
- een ondergrond van geel zand.

In het tweede deelvak bestaat zij uit:

- een bitumineuze verharding van 20 ± 3 cm dik;
- een fundering van schraal beton, 20 cm dik (twee boorkernen geven 10 of 11 cm aan);
- een onderfundering van steenslag met geel zand (20 cm dik);
- een ondergrond van geel zand.

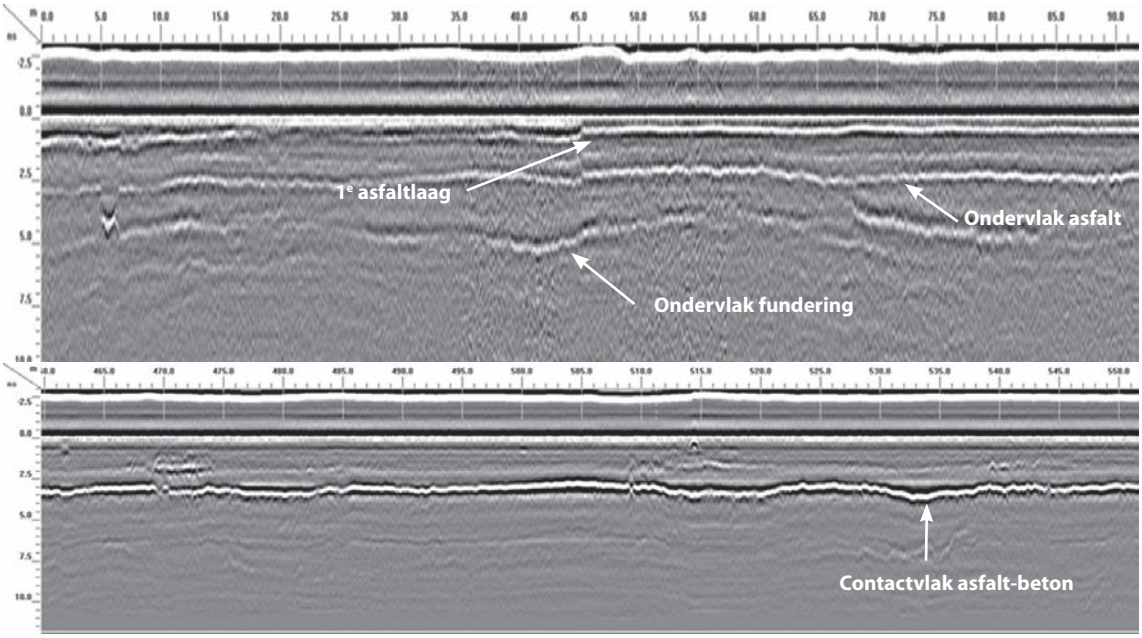
11.2 Metingen met de radar van 2 GHz

Op het 2 GHz-profiel naar Ottenburg toe is de verandering van wegopbouw duidelijk zichtbaar (op afstandspunt 412 m).

In het eerste deelvak is op ± 0,5 ns een reflector waar te nemen, die overeenstemt met de eerste asfaltlaag. Op 2,5 ns is nog een andere reflector te zien, wellicht overeenstemmend van het contactvlak tussen bitumineuze verharding en fundering. De diepste reflector varieert in diepte; wellicht gaat het om het ondervlak van de fundering.

In het tweede deelvak is de reflector dicht bij het oppervlak minder krachtig. Op 3 ns komt een krachtiger reflector voor, waarschijnlijk het contactvlak tussen bitumineuze verharding en beton. Rond het afstandspunt 950 m (dicht bij de rotonde naar Ottenburg toe) is opnieuw een verandering waar te nemen.

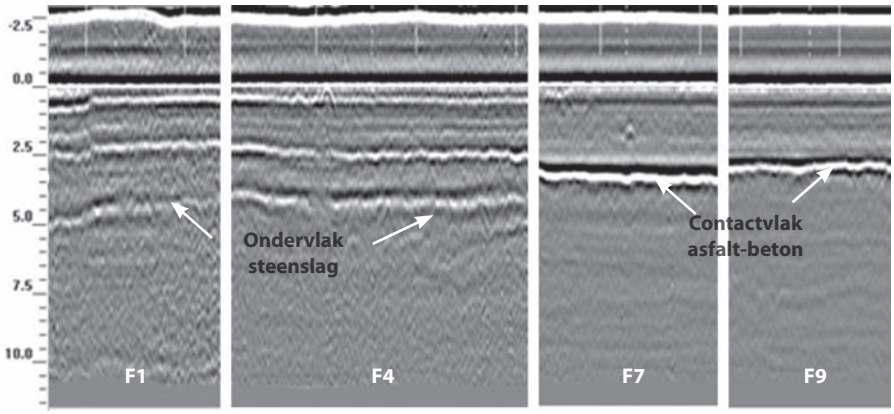
Figuur 11.1 toont een uitsnede uit de 2 GHz-metingen, waarop twee verschillende wegconstructies te onderscheiden zijn.



Figuur 11.1 – *2 GHz-metingen naar Ottenburg toe*

Dezelfde opbouwen zijn ook op het profiel in de andere richting, naar de N4 toe, waar te nemen.

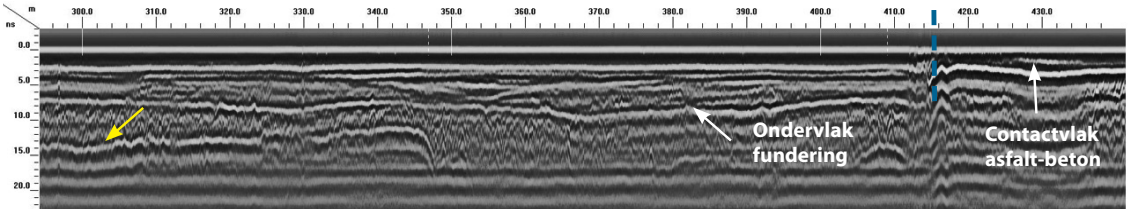
Figuur 11.2 toont de delen der hoogte van de kernboringen in het profiel naar Ottenburg toe. Er kan een lichte verschuiving optreden, door de snelheid van het voertuig tussen het event en de werkelijke positie van de boorkernen. De kernen F7 en F9 zijn uit het fietspad geboord, waar het voertuig niet overheen is gegaan. De gegevens van de kernboringen maken het mogelijk de lagen te identificeren.



Figuur 11.2 – *2 GHz-metingen naar Ottenburg toe, ter hoogte van de boorkernen F1 (46 m), F4 (198 m), F7 (636 m) en F9 (849 m)*

11.3 Metingen met de radar van 900 MHz

De 900 MHz-metingen brengen vooral de diepere reflectoren (10 ns, of zelfs 15 ns) aan het licht: funderingen, onderfunderingen en onderliggende lagen. De verschillende lagen bitumineus materiaal zijn niet te onderscheiden. De verandering in de bovenbouw rond afstandspunt 415 m (meetrichting naar Ottenburg toe) is duidelijk zichtbaar. Soms is het contactvlak tussen bitumineuze verharding en fundering te onderscheiden (in het tweede deel heel duidelijk). De diepere lagen zijn heterogener dan de bovenliggende. De diepte waarop zij zich bevinden is, evenals de intensiteit van de reflectie, variabel.



Figuur 11.3 – *Uitsnede uit de 900 MHz-metingen – gemiddeldeberekening (naar Ottenburg toe)*

Door gebruik te maken van de aankomsttijden van de verschillende reflecties op de 900 MHz-profielen en de dikten van de boorkernen, zijn gemiddelde snelheden berekend (tabel 11.1).

		Ondervlak bitumineuze verharding Snelheid (cm/ns)	Ondervlak fundering Snelheid (cm/ns)	Ondervlak onderfundering Snelheid (cm/ns)
1e deel	**F1 (naar Ottenburg toe)**		14,67	
	F4 (naar Ottenburg toe)		11,16	9,07
	F6	12,5 of 10,51	14,21	10
2e deel	**F7 (naar Ottenburg toe)**	14,11		13,90
	F8	12,67		12,84

Tabel 11.1 – *Snelheden berekend aan de hand van de* pickings *op de 900 MHZ-metingen en de boorkernen*

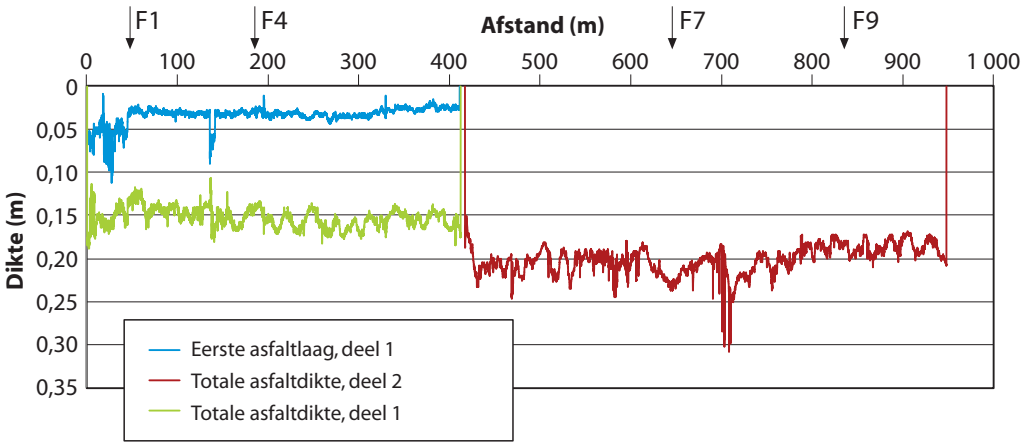
De berekende snelheden variëren door heterogeniteit van de wegopbouw, vooral in de funderings- en onderfunderingslagen. Op de 900 MHz-gegevens werd geen systematische *picking* van de dieper liggende reflectoren uitgevoerd.

11.4 Dikte van de bitumineuze verharding

Voor deze analyse werden de twee lange 2 GHz-profielen genomen, respectievelijk naar Ottenburg en naar de N4 toe.

Elk profiel werd in twee delen gesplitst, voor de twee verschillende opbouwen. In het eerste deel (ongeveer 400 m) werden twee reflectoren *gepickt*. De eerste stemt overeen met de eerste asfaltlaag en de tweede met het contactvlak tussen asfalt en fundering. Tussen beide is nog een andere reflector te onderscheiden, maar die is niet duidelijk genoeg voor een nauwkeurige *picking*. In het tweede deel werd één reflector *gepickt*. Hij stemt overeen met het contactvlak tussen asfalt en fundering.

De Radansoftware berekende de snelheden in elke laag. Voor elke laag hebben wij het gemiddelde genomen. Zo zijn de verkregen waarden voor het profiel naar Ottenburg toe respectievelijk 13,8 cm/ns (reflector 1, deel 1), 12,4 cm/ns (reflector 2, deel 1) en 13,1 cm/ns (reflector 1, deel 2). Figuur 11.4 geeft de dikten weer die aan de hand van de *pickings* in het radarprofiel naar Ottenburg toe zijn geschat door uit te gaan van de gemiddelde snelheden in elke laag. De dikte van de bitumineuze verharding varieert met enkele centimeters.



Figuur 11.4 – *Dikte van de bitumineuze verharding (naar Ottenburg toe), geschat met de Radansoftware*

Tabel 11.2 vergelijkt de aan de hand van de radarprofielen geschatte dikten met de aan de boorkernen gemeten dikten (cursief). De verhardingsdikten zijn meestal onderschat, terwijl de dikten van de onderlaag meestal de neiging hebben licht overschat te zijn. De fout is in elk geval kleiner dan 1 cm voor de verharding en kleiner dan 15 % voor de onderliggende lagen.

Boorkernen (naar Ottenburg toe)	**F1**	**F4**	**F7 (fietspad)**	**F9 (fietspad)**
	3,1 cm *(3,5)*	3,3 cm *(4)*		
	14 cm *(13)*	15,9 cm *(14)*	22,2 cm *(23,5)*	20,4 cm *(20,5)*
Boorkernen (naar de N4 toe)	**F10 (fietspad)**	**F8 (fietspad)**	**F6**	**F3**
	18 cm *(19)*	17,5 cm *(18,5)*	3,6 cm *(3,5)*	3,2 cm *(4)*
			16,9 cm *(18,5)*	16,3 cm *(15)*

Tabel 11.2 – *Dikten geschat aan de hand van de gegevens van de 2 GHz-radar (tussen haakjes: vergelijking met de boorkernen)*

11.5 Conclusies

De radarmetingen hebben in het onderzochte wegvak veranderingen in de wegopbouw aan het licht gebracht. Bij metingen met 900 MHz kunnen de dieper liggende contactvlakken (ondervlak van de fundering en de onderfundering) worden gedetecteerd. Bij metingen met 2 GHz kunnen de dikteveranderingen van de verharding visueel worden weergegeven. Daarbij is soms het ondervlak van de fundering zichtbaar.

De beschikbare boorkernen maken het mogelijk de radarreflecties beter te duiden. *Picking* van de reflectoren in de metingen bij 900 MHz ter hoogte van de kernboringen wijst uit dat de wegopbouw naar de diepte toe heterogeen is. De afgeleide snelheden in de funderings- en onderfunderingslagen zijn vrij variabel. De uit de 2 GHz-gegevens geschatte dikten stemmen overeen met de dikten in de boorkernen.

Hoofdstuk 12
Conclusies en vooruitzichten

Dit onderzoeksproject, dat vier jaar duurde, heeft ons in staat gesteld onze kennis te verdiepen en onze ervaring uit te breiden in tal van domeinen van de inspectie van wegconstructies door middel van georadar. Zo hebben wij in Waver een proefvak aangelegd om ons materieel en onze analysemethoden op bekende wegconstructies te testen. Wij zijn ook veel partnerschappen aangegaan met Belgische en buitenlandse deskundigen. Met de opgedane ervaring hebben wij een naslagwerk voor de gebruikers opgesteld, met methodieken voor het gebruik van georadar voor wegconditieonderzoek [1].

Aan de hand van verscheidene casestudy's in het veld konden wij onze methoden toepassen en verfijnen, maar soms ook de praktische beperkingen ervan ontdekken. Dit researchverslag bundelt een aantal voorbeelden van resultaten die in de praktijk zijn verkregen. Sommige daarvan zijn overtuigend en andere minder, maar in hun geheel geven zij een beeld van de informatie die kan worden verzameld met de apparatuur waarover wij beschikken.

In de meeste profielen dienen eerst de homogene zones te worden bepaald. Op grond daarvan kunnen plaatsen worden gekozen om kernen te boren, kunnen dikten worden geschat of kan de residuale modulus van de verschillende lagen worden berekend in delen van de weg met een vergelijkbare opbouw.

Laagdikten schatten is wellicht de meest verspreide toepassing in wegconditieonderzoek. Gecombineerd met kalibratie aan boorkernen geven deze schattingen zeer goede resultaten, vooral als de opbouw van de wegconstructie betrekkelijk homogeen is. Methoden zonder kalibratie geven meer wisselende resultaten: soms presteren zij zeer goed, maar soms leiden zij ook tot grote fouten. Er zouden aanvullende proeven kunnen worden verricht om ons beter in staat te stellen de nauwkeurigheid van deze metingen van tevoren in te schatten.

Holten opsporen is geen gemakkelijke toepassing van radar in wegconditieonderzoek. Holten zijn namelijk op een radarprofiel slechts zichtbaar als zij voldoende open zijn. Bovendien ligt het niet altijd voor de hand om de aanwezigheid van deze holten door middel van kernboring aan te tonen. Het water dat bij een kernboring wordt gebruikt, spoelt immers ongebonden onderliggend materiaal uit, waardoor het niet gemakkelijk is te bevestigen dat er vóór de boring een tussenruimte bestond. Niettemin hebben wij aangetoond dat het mogelijk is de aanwezigheid van holten onder betonplaten in kaart te brengen als de omstandigheden daartoe gunstig zijn (voldoende open holten, homogene wegopbouw en geen te dichte wapening).

Ankerstaven en deuvels met grondradar opsporen is een toepassing waarvoor contactantennes veel beter presteren dan luchtgekoppelde antennes. Wapening kan direct ter plaatse worden gelokaliseerd, met antennes van 400 MHz of hogere frequenties. Na verwerking van de gegevens is ook 3D-kartering van wapening mogelijk, mits voor een voldoende meetdichtheid en frequentie is gekozen.

Grondradar kan ook een doeltreffend middel zijn om water in wegconstructies op te sporen. Tijdens dit project hebben wij een zone kunnen vinden waar water in een fundering was gedrongen, evenals een plaatselijk probleem met de afdichting van een brugdek. Toch ligt het niet altijd voor de hand om water dat zich boven de afdichtingslaag bevindt te onderscheiden van water in de onderliggende betonplaat. Daarom wordt nog doorgegaan met analysen van metingen op een proefblok dat in Sterrebeek voor infiltratieonderzoek is vervaardigd.

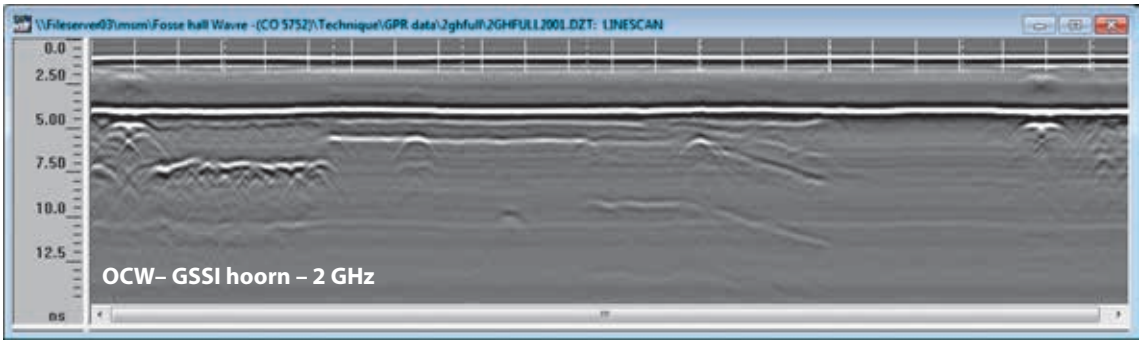
Met radar kunnen ook nutsleidingen (kabels, buisleidingen, enz.) worden opgespoord, maar de doeltreffendheid hiervan is afhankelijk van factoren zoals de grootte of diepteligging van de nutsleidingen, de breedte van de sleuf, de kenmerken van het aanvulmateriaal of de aangetroffen permittiviteitscontrasten.

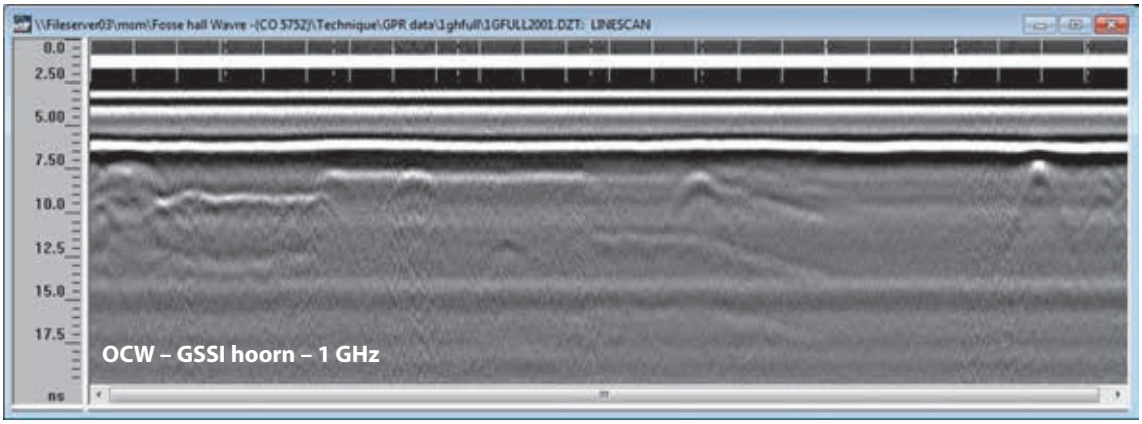
Bijlage 1
Radarbeelden van het proefvak

Deze bijlage trekt een representatieve steekproef uit de radargrammen die op het proefvak in Waver zijn gemeten. Met uitzondering van de metingen door de UGent en die waarvoor antennes met frequentie-verspringingen *(stepped frequency)* zijn gebruikt, zijn de hier getoonde beelden vrij onbewerkt en geven zij bijgevolg een overzicht van wat in het veld kan worden waargenomen. Tabel B1.1 geeft een lijst van de verrichte metingen; in de figuren B1.1 tot B1.6 komen de meeste ervan aan bod. Als eenzelfde antenne meermaals of door verschillende instellingen is gebruikt, wordt alleen het eerste radargram weergegeven.

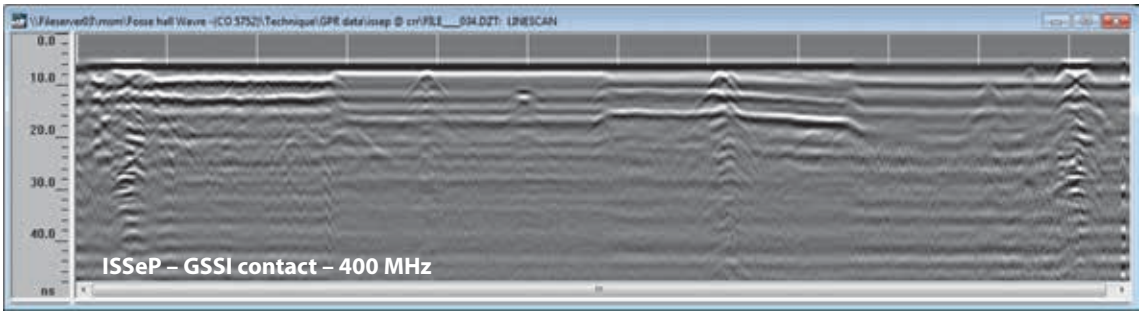
Organisatie (datum van de eerste metingen)	**Soort antenne**	**Frequenties**							
SPW (27/05/2014)	GSSI contact			900 MHz		1,5 GHz	2 GHz	2,6 GHz	
AWV (25/06/2014)	Euradar hoorn				1 GHz				
OCW (10/07/2014)	GSSI hoorn				1 GHz		2 GHz		
	GSSI contact		400 MHz	900 MHz				2,6 GHz	
ISSeP (24/07/2014)	GSSI contact	200 MHz	400 MHz						
UCL - Université de Louvain (10/09/2014)	GSSI contact			900 MHz				2,6 GHz	
	Custom hoorn	*Stepped frequency*							
Universiteit Gent (02/09/2014)	3D-Radar hoorn	*Stepped frequency* 0,05-3 GHz							
	3D-Radar contact	*Stepped frequency* 0,05-3 GHz							
	GSSI contact		300 + 800 MHz						
Cerema (30/03/2016)	Rouen A5				*Stepped frequency* 1,4-15 GHz				
	Rouen A3			*Stepped frequency* 0,78-10 GHz					
	Angers A4		*Stepped frequency* 0,4-6 GHz						

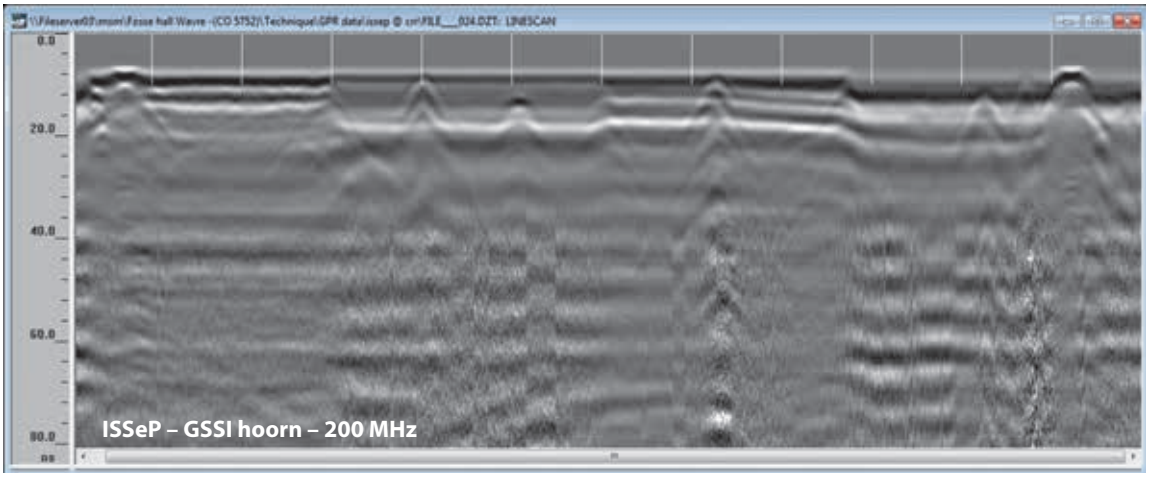
Tabel B1.1 – *Overzicht van de metingen*



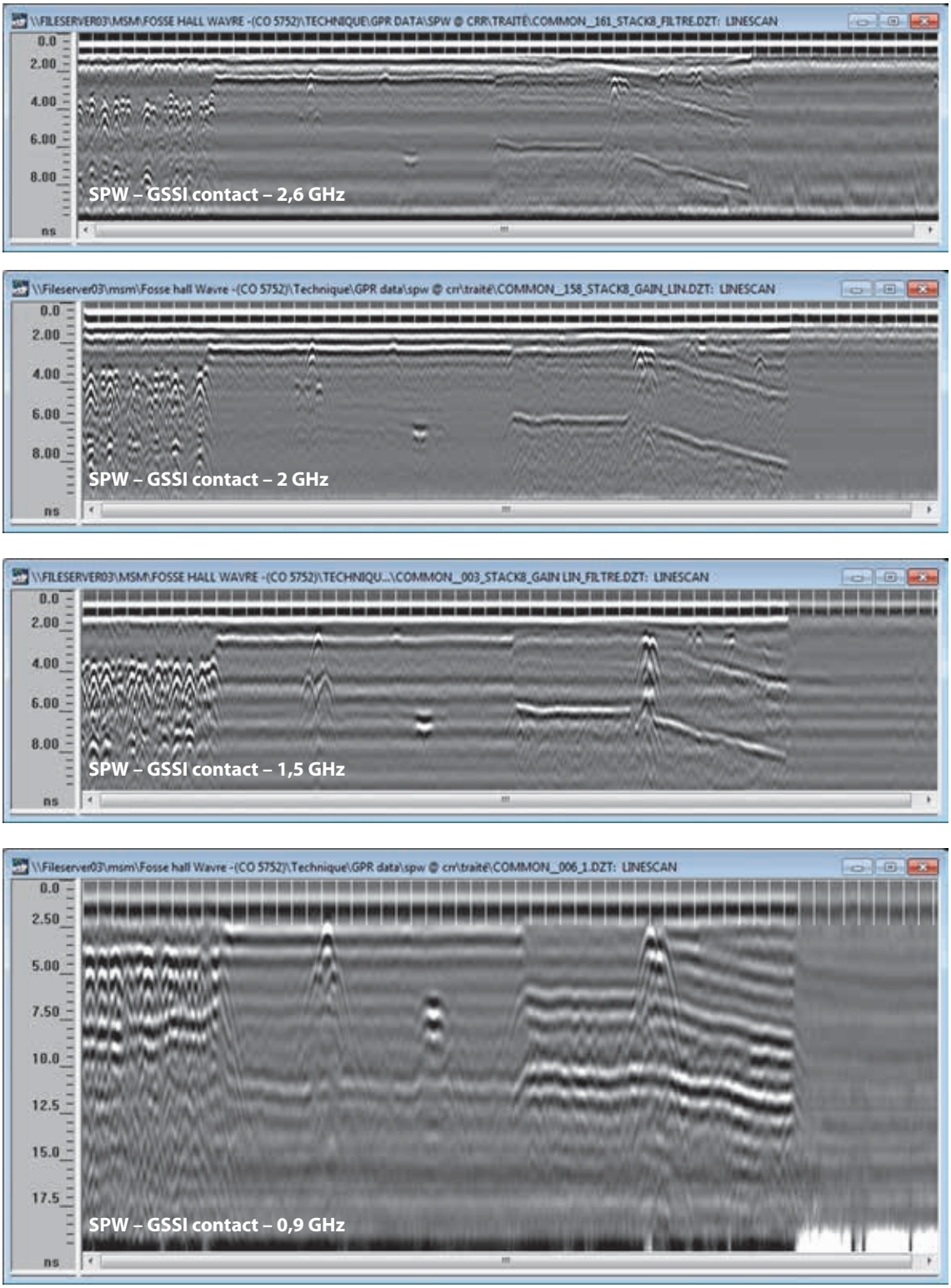


Figuur B1.1 – *Profielen van de proefsleuf, gemeten met de antennes van het OCW*

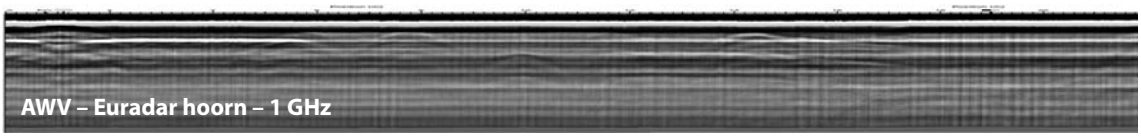




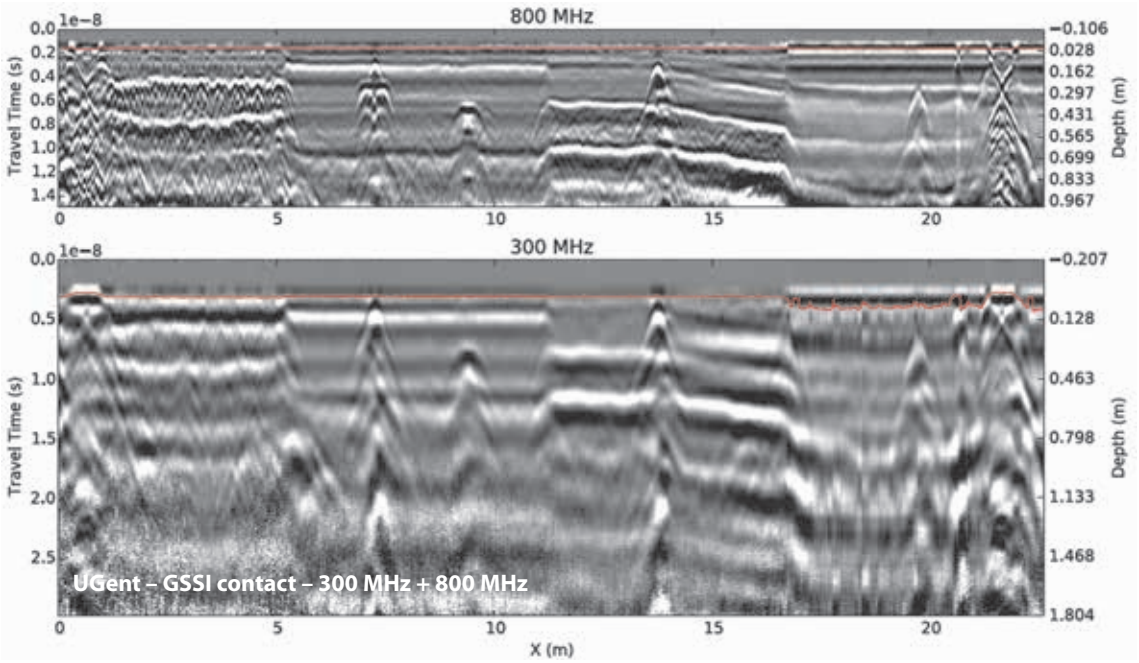
Figuur B1.2 – *Profielen van de proefsleuf, gemeten met de antennes van ISSeP*

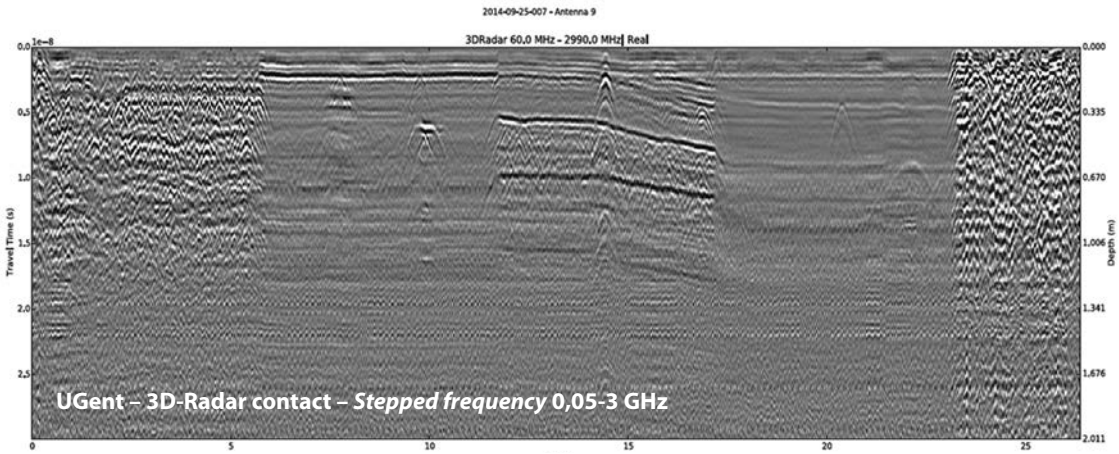


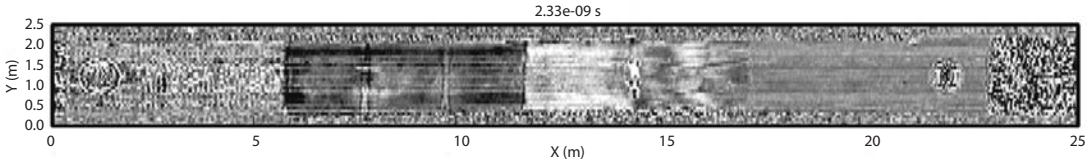
Figuur B1.3 – *Profielen van de proefsleuf, gemeten met de antennes van SPW*



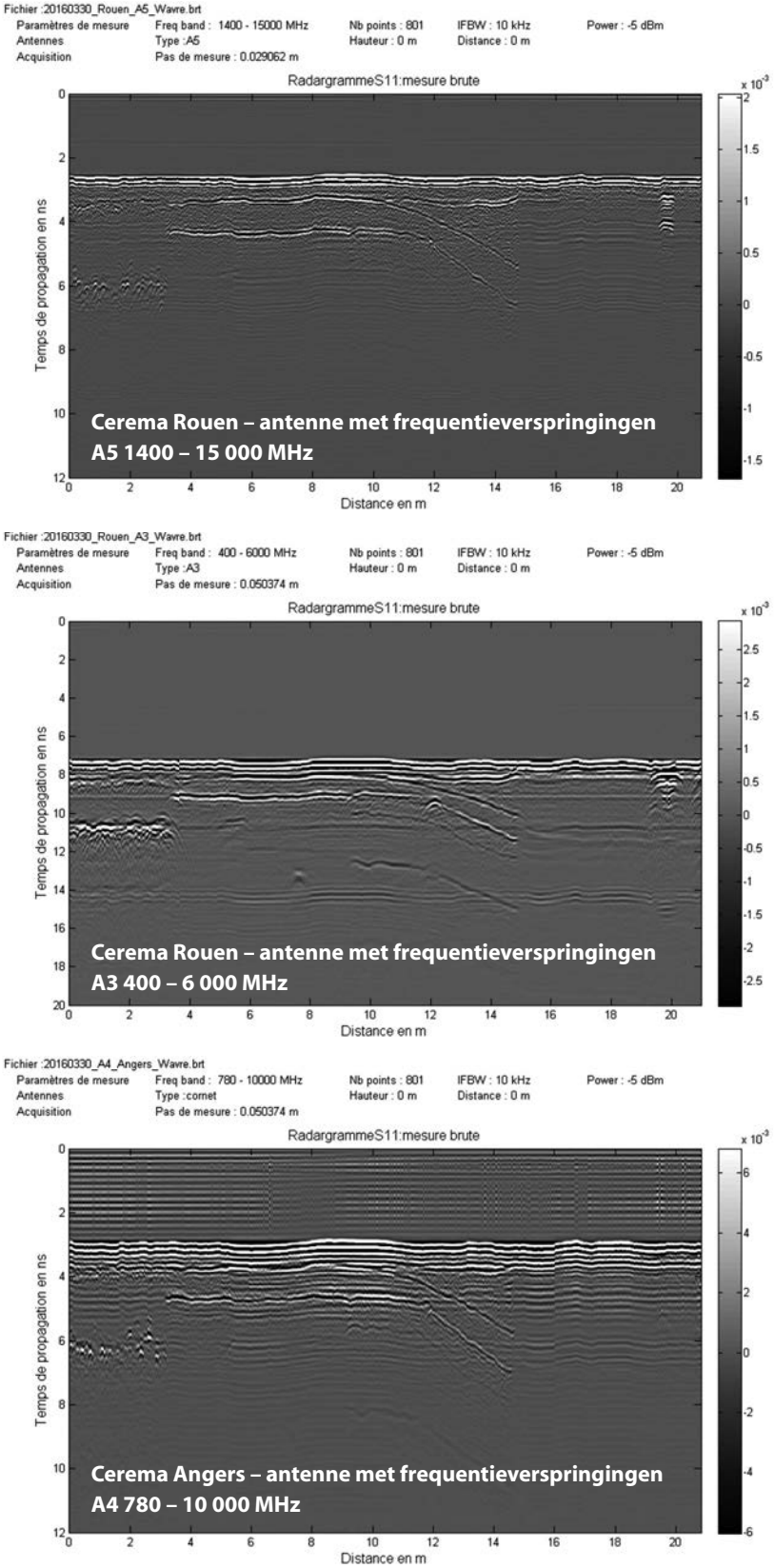
Figuur B1.4 – *Profiel van de proefsleuf, gemeten met de antenne van AWV*







Figuur B1.5 – *Verwerkte metingen, verricht door de ORBit-onderzoeksgroep (UGent). GSSI-antenne 300 MHz + 800 MHz en 3D-Radar* step frequency*-contactantenne: centraal profiel en tijddoorsnede op 2,33 ns (ongeveer 10 cm)*



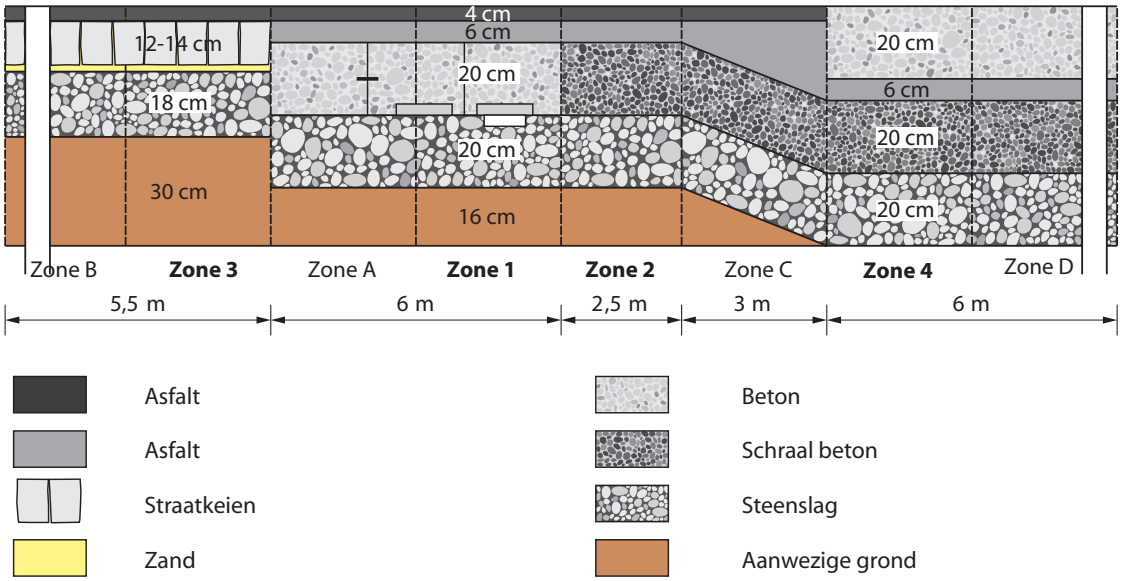
Figuur B1.6 – *Metingen door verschillende teams van Cerema (Rouen en Angers), met antennes met frequentieverspringingen*

Bijlage 2
Picking van de verschillende contactvlakken in het radarsignaal

B2.1 Inleiding

Deze bijlage heeft tot doel, na te gaan in welke mate de opties die bij de meting en berekening voor de nultijd en de *pick* van de lagen zijn genomen, de tijd- en dikteschattingen beïnvloeden. Daartoe zijn twee wegstructuren in de proefsleuf gekozen. Hierin werden signalen gemeten – fysisch, maar ook digitaal via modelleringen met antennes van verschillende frequenties (de drie contactantennes van 2,6 GHz, 900 MHz en 400 MHz en de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz). Uit een vergelijking van de verschillende verkregen signalen kan worden opgemaakt welke meet- en verwerkingsparameters de dikteschattingen het meest beïnvloeden.

Er werden twee referentiepunten gekozen, respectievelijk in zone 2 (4 cm asfalt, 6 cm asfalt, 20 cm schraal beton) en zone 4 (20 cm beton, 6 cm asfalt, 20 cm schraal beton). De meetplaatsen worden in figuur B2.1 aangeduid op de schematische doorsnede van het proefvak.



Figuur B2.1 – *Visuele weergave van de meetpunten op de schematische doorsnede van het proefvak*

B2.2 Modellering

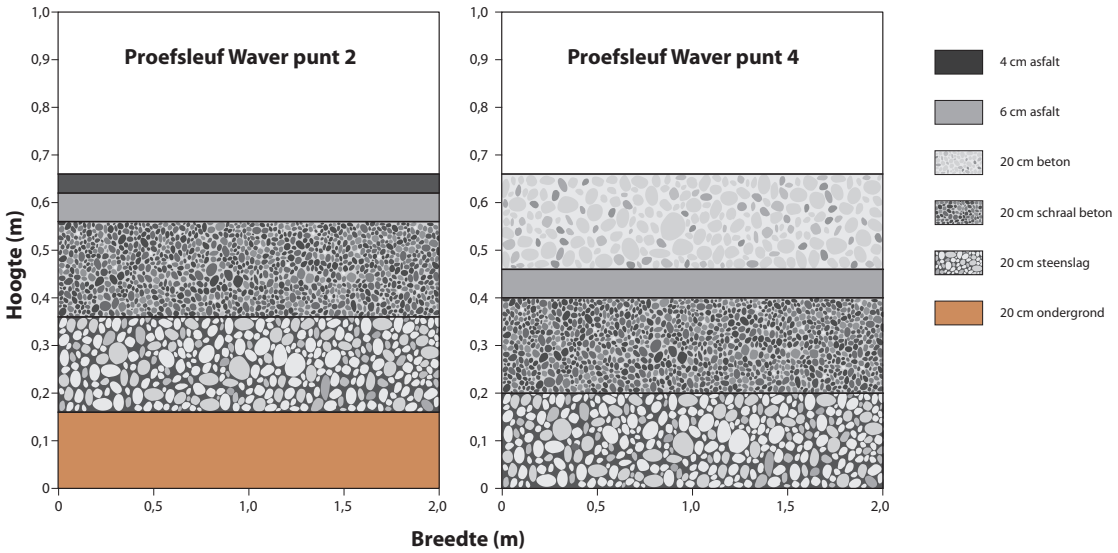
Er werd een modellering uitgevoerd om de toegepaste procedure voor de berekening van de nultijd in een voor 100 % gecontroleerde situatie (dikte, permittiviteit) te valideren en de resterende fouten die met de verschillende antennefrequenties werden gemaakt, te schatten.

Daartoe werden de geometrieën van de zones 2 en 4 gemodelleerd. De eigenschappen die voor de verschillende lagen werden gehanteerd, staan in tabel B2.1. Figuur B2.2 geeft de algemene geometrie weer.

Materiaal	Permittiviteit [-]	Geleidingsvermogen [S/m]
Lucht	1	0
Beton	7,1	0,12
Schraal beton	6,9	0,04
Aggregaten	9	10^{-4}
Asfalt van de toplaag	3,5	10^{-4}
Onderliggend asfalt	4	10^{-4}

Tabel B2.1 – *Eigenschappen van de verschillende materialen, voor de modellering*

Het gemodelleerde medium is een oneindig meerlaags medium van 2 m breed en 1 m hoog. Voor elke antenne werd ook een modellering uitgevoerd in een medium dat enkel met lucht was gevuld, om de directe golf te meten.



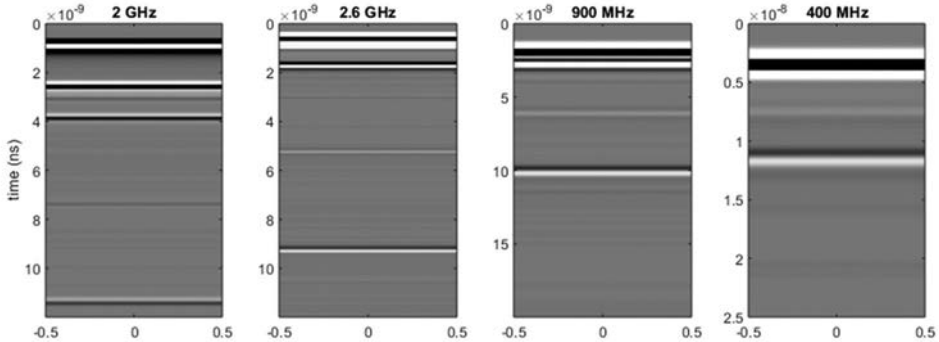
Figuur B2.2 – *Geometrie van de gemodelleerde meerlaagse verhardingen*

De verzonden impuls is een Rickergolf en de antennes zijn lijnbronnen (wat bij tweedimensionale modellering steeds het geval is). De contactantennes worden precies op het oppervlak geplaatst, met tussenafstanden die overeenstemmen met die van de werkelijke antennes (4 cm voor die van 2,6 GHz, 15 cm voor die van 900 MHz en 16 cm voor die van 400 MHz).

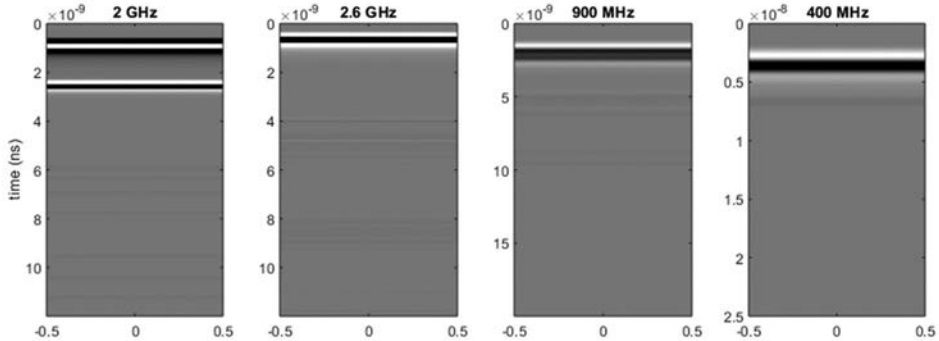
Om binnen de domeingrenzen te blijven, wordt de antenne van 2 GHz op een hoogte van 30 cm geplaatst. De werkelijke hoogte tijdens metingen is ongeveer 45 cm, waaraan 7,5 cm hoogte in de behuizing moet worden toegevoegd. Om dezelfde invalshoek te behouden, wordt de afstand tussen de antennes, die normaal 20 tot 21 cm bedraagt, bij de beperkte meethoogte van 30 cm voor de modelleringen verkleind tot 11 cm.

Figuur B2.3 toont de signalen die met beide configuraties en in lucht werden verkregen, en figuur B2.4 de overeenkomstige amplitudescans. De signalen van de antenne van 2 GHz werden omgekeerd, om overeen te stemmen met het signaal van een antenne zonder filter.

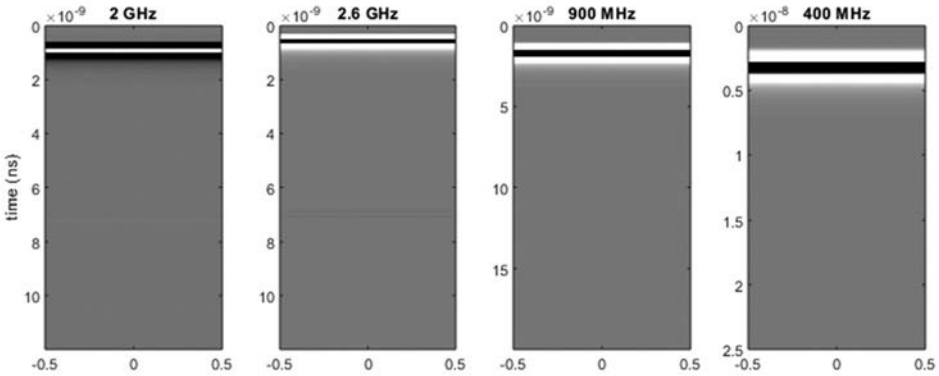
Meetpunt 2: asfalt op schraal beton



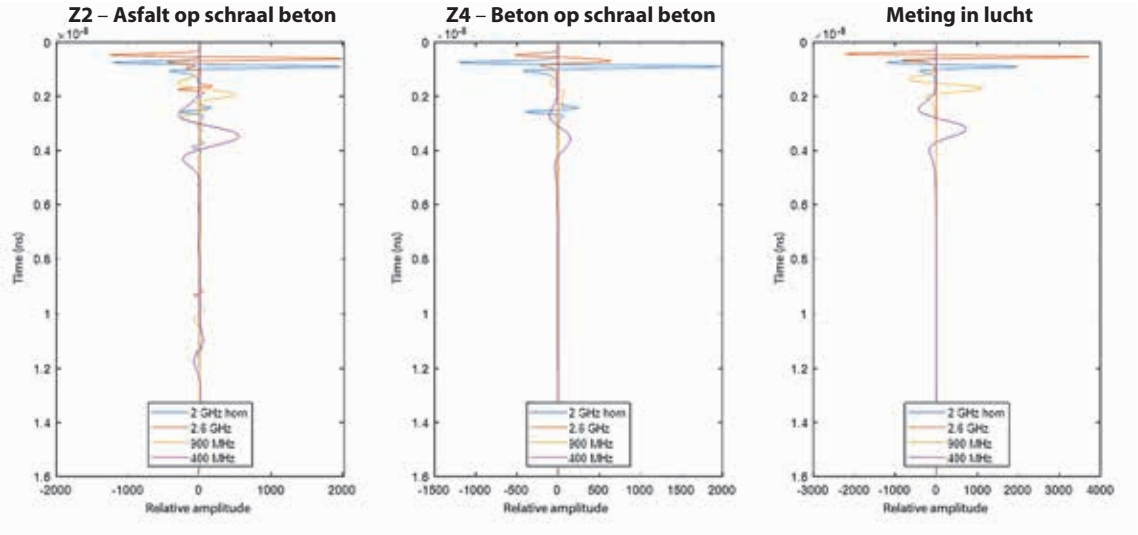
Meetpunt 4: beton op schraal beton



Metingen in lucht



Figuur B2.3 – *Door de modellering verkregen signalen voor de verschillende configuraties*



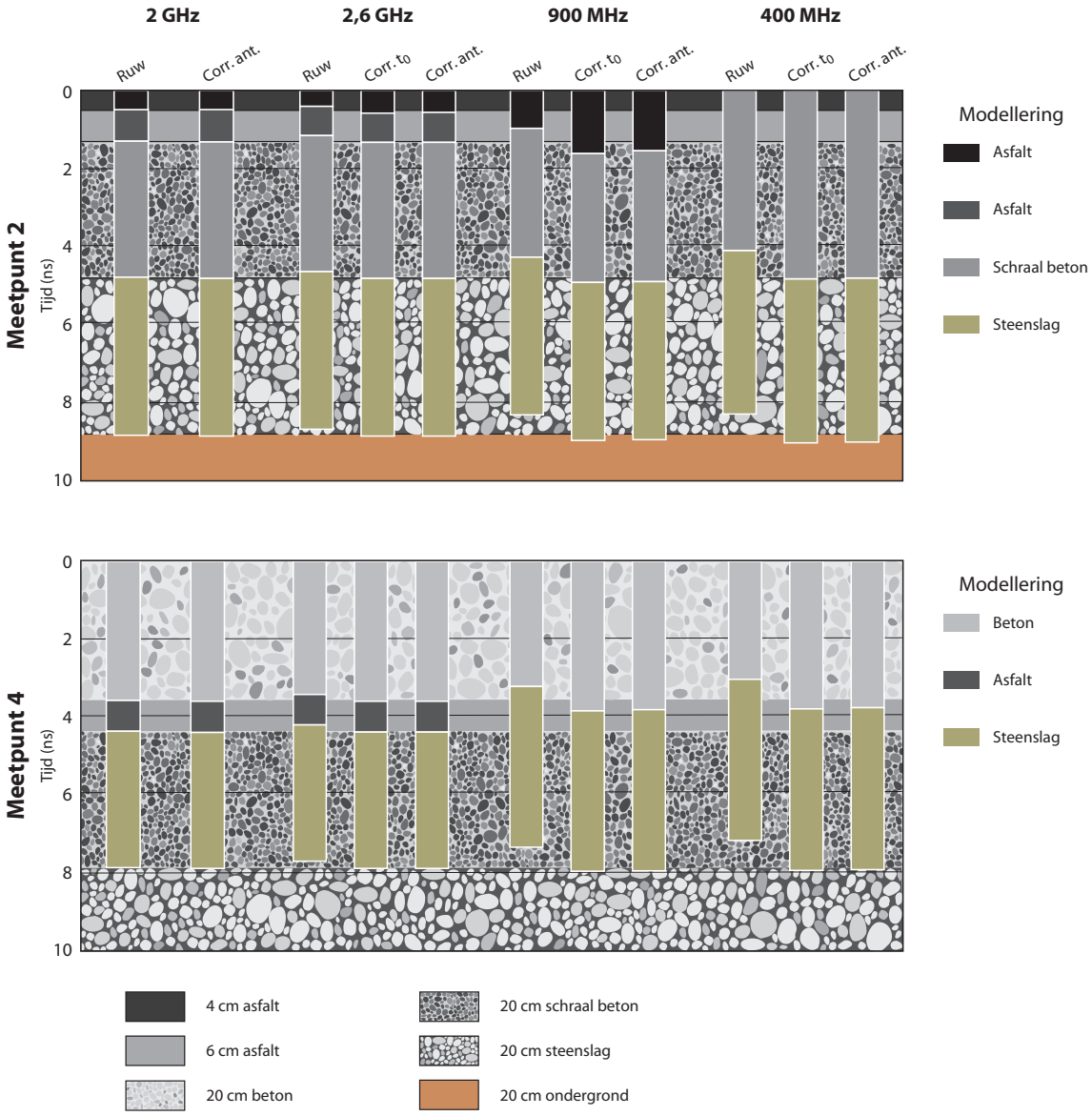
Figuur B2.4 – *Door de modellering verkregen amplitudescans voor de verschillende configuraties*

Voor de bepaling van de voortplantingstijden die op de radargrammen zijn aangegeven, werden drie verschillende methoden gebruikt om de nultijd te berekenen en rekening te houden met de geometrie van de antennes:

- de "ruwe" methode, waarbij de oppervlakgolf als nultijd werd gebruikt en de afstand tussen de antennes verwaarloosd werd;
- de methode met nultijdcorrectie door gebruik te maken van een meting in lucht en de afstand tussen de antennes (§ 2.1 in [1]);
- de methode met nultijdcorrectie én een vereenvoudigde correctie voor de verlenging van de voortplantingstijd door de afstand tussen de antennes, ten opzichte van een verticaal traject (waarbij de hoekveranderingen door diffractie werden verwaarloosd, wat vanaf de tweede laag tot een lichte overschatting van dikten kan leiden).

Voor de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz verschilt de oppervlakgolf van de directe golf. De eerste twee methoden zijn dus hetzelfde.

Omdat het om een modellering zonder toegevoegde ruis gaat, kunnen reflecties van zeer geringe amplitude worden waargenomen. Hierdoor kunnen reflecties die in de reële gegevens onzichtbaar blijven hier met een goede nauwkeurigheid worden gedetecteerd. Figuur B2.5 vergelijkt de meettijden van de verschillende contactvlakken voor elke antenne en elke methode met de theoretische tijden, berekend aan de hand van de permittiviteiten die bij de modellering werden gebruikt.



Figuur B2.5 – *Schatting van de meettijden van de verschillende contactvlakken en vergelijking met de tijd berekend aan de hand van de bij de modellering gebruikte permittiviteiten*

Tabel B2.2 geeft een overzicht van de fouten die, bij toetsing aan de theoretische voortplantingstijden in het medium met bekende permittiviteit, bij de verschillende frequenties werden gemaakt.

	Contactvlak	2 GHz		2,6 GHz			900 MHz			400 MHz		
		Ruw	Corr. an-tenne	Ruw	Corr. t_0	Corr. an-tenne	Ruw	Corr. t_0	Corr. an-tenne	Ruw	Corr. t_0	Corr. an-tenne
Meet-punt 2	asfalt 1–asfalt 2	-3,8 %	-2,5 %	-18,8 %	15,9 %	12,8 %						
	asfalt 2–schraal beton	0,1 %	1,1 %	-10,7 %	2,7 %	2,1 %	-25,3 %	24,7 %	18,6 %			
	schraal beton–steenslag	-0,2 %	0,3 %	-3,2 %	0,5 %	0,4 %	-11,1 %	2,5 %	1,9 %	-14,6 %	0,6 %	0,0 %
	ondervlak steenslag	0,4 %	0,7 %	-1,3 %	0,7 %	0,7 %	-5,5 %	1,9 %	1,8 %	-5,7 %	2,6 %	2,4 %
Meet-punt 4	beton–asfalt	0,2 %	1,0 %	-4,0 %	1,1 %	1,1 %	-9,6 %	7,8 %	6,9 %	-15,0 %	6,5 %	5,4 %
	asfalt–schraal beton	0,1 %	0,7 %	-3,5 %	0,7 %	0,7 %						
	schraal beton–steenslag	-0,1 %	0,3 %	-2,0 %	0,4 %	0,3 %	-6,7 %	1,2 %	1,0 %	-8,8 %	0,9 %	0,6 %

Tabel B2.2 – *Inschatting van de fouten met de verschillende methoden*

Enkel met de antennes van 2 en 2,6 GHz zijn de twee asfaltlagen van elkaar te onderscheiden. De antenne van 400 MHz maakt zelfs de overgang tussen asfalt en beton niet zichtbaar.

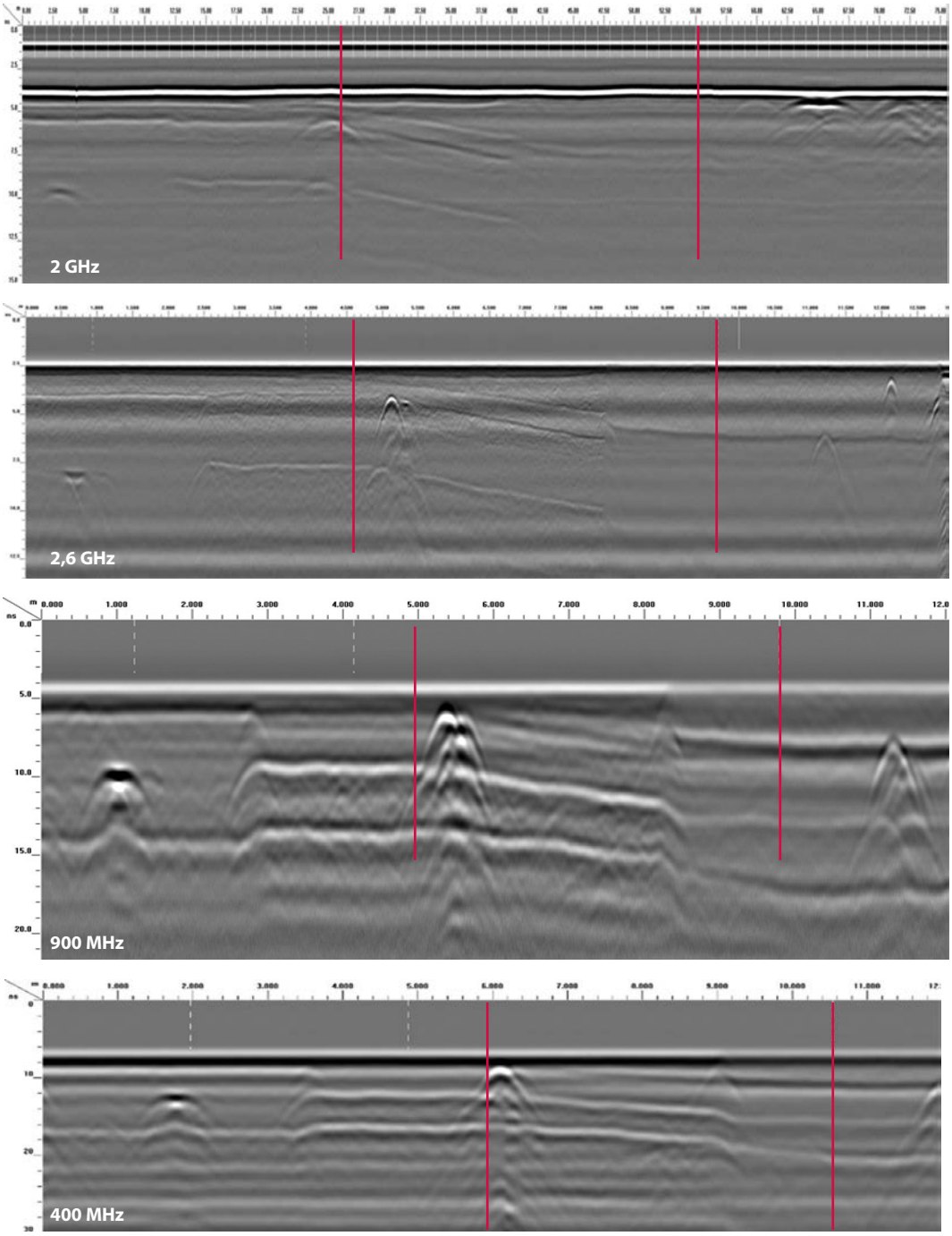
Met de antennes van 900 MHz en 400 MHz is de tussenlaag van asfalt niet te onderscheiden. De reflectie op deze laag verschijnt als één contactvlak, iets later dan de reflectie die op het asfalt zou moeten verschijnen. Als de gebruiker niet weet dat hij een dunne laag aan het inspecteren is, loopt hij dan ook het gevaar dat hij de dikte van het beton overschat of de golfsnelheid in dat beton onderschat.

Voor de contactantennes heeft de nultijdcorrectie een gunstige invloed op de resultaten, doordat zij de begane fout verkleint. De tijden na correctie hebben echter de neiging licht overschat te zijn, terwijl zij vóór de correctie onderschat werden. De correctie voor de antenne maakt deze overschatting aanzienlijk kleiner, maar het effect blijft beperkt, wellicht doordat het effect van de diffractie onderschat wordt.

Voor de luchtgekoppelde antennes brengt de correctie voor de antennes geen duidelijke verbetering in de resultaten. De benaderingen die worden gemaakt door de diffractiehoeken te verwaarlozen, zijn namelijk van dezelfde grootteorde als de benaderingen waarbij de afstand tussen de antennes wordt verwaarloosd. Een "ruwe" analyse van de reflectietijden in het signaal kan dus volkomen verantwoord zijn.

B2.3 Proeven

In elke zone werden met de drie contactantennes (2,6 GHz, 900 MHz en 400 MHz) en met de luchtgekoppelde antenne (2 GHz) statische metingen verricht. Voor de luchtgekoppelde antenne werd de meting met en zonder GSSI-ruisonderdrukkingsfilter uitgevoerd. Met elke antenne werd een meting in lucht verricht, om de nultijd te bepalen. Figuur B2.6 geeft de profielen over het hele proefvak weer.



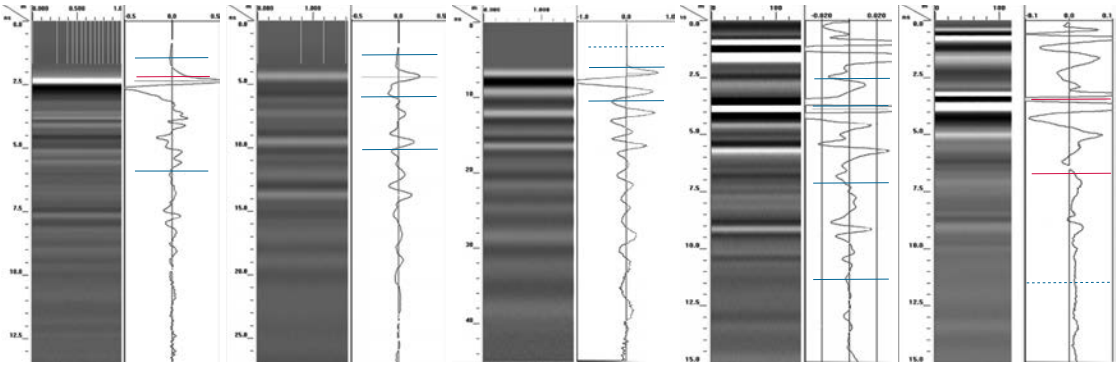
Figuur B2.6 – *Visuele weergave van de meetpunten op de verschillende profielen*

B2.3.1 Beschrijving van de resultaten

De eerste fase in de bepaling van de voortplantingstijden bestaat in een *picking* van de met de contactvlakken overeenstemmende reflecties op de onbewerkte metingen. Deze reflecties bestaan doorgaans uit drie pieken. De *picks* worden weergegeven op figuur B2.7 (positieve pieken in het blauw, negatieve pieken in het rood). Zij stemmen overeen met de tweede piek in de reflectie, die de krachtigste is. Op te merken valt dat de gefilterde en de ongefilterde 2 GHz-metingen tegengestelde polariteiten vertonen.

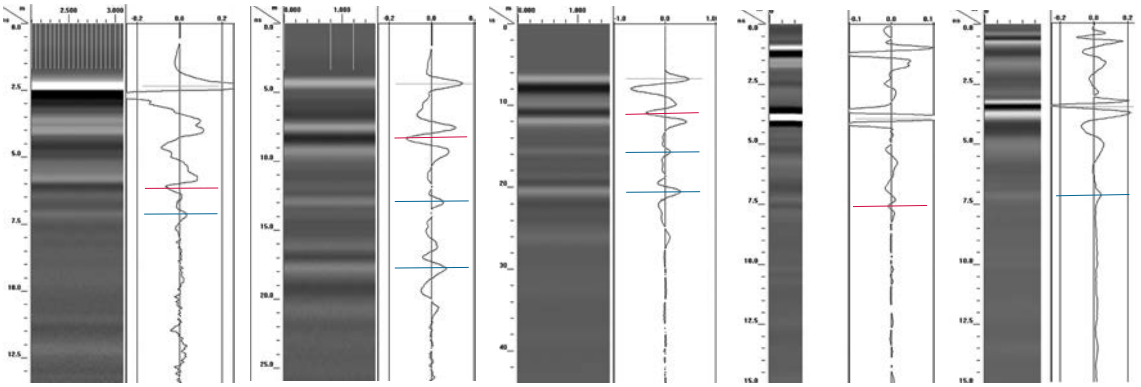
Voor de contactantennes (2,6 GHz, 900 MHz et 400 MHz) en voor de 2 GHz-antenne met filter werden de positieve reflectiepieken *gepickt*. Uitzonderingen hierop zijn het contactvlak tussen beton en asfalt (in meetpunt 4) en het contactvlak tussen asfalt en schraal beton (in meetpunt 2, 2,6 GHz), waarvoor de negatieve piek werd genomen. In dit laatste geval verschilt de *pick* dus voor de twee hoogfrequente antennes. Het is zeer waarschijnlijk dat met de antenne van 2 GHz de juiste *pick* is verricht, want er is weinig kans dat de permittiviteit onder het asfalt afneemt. De *pick* voor de antenne van 2,6 GHz werd echter niet gewijzigd: de vorm van de reflectie is zo duidelijk, dat de meeste operatoren dezelfde piek zouden hebben gekozen.

De directe oppervlakgolven, die in figuur B2.8 met een groene stippellijn zijn aangeduid, werden eveneens *gepickt*. Voor alle antennes, behalve voor de antenne van 2 GHz zonder filter, werd de eerste positieve piek gekozen.



2,6 GHz **900 MHz** **400 MHz** **2 GHz gefilterd** **2 GHz ongefilterd**

Figuur B2.7 – *Detailbeelden van de metingen en* picks *voor meetpunt 2 (asfalt op schraal beton)*

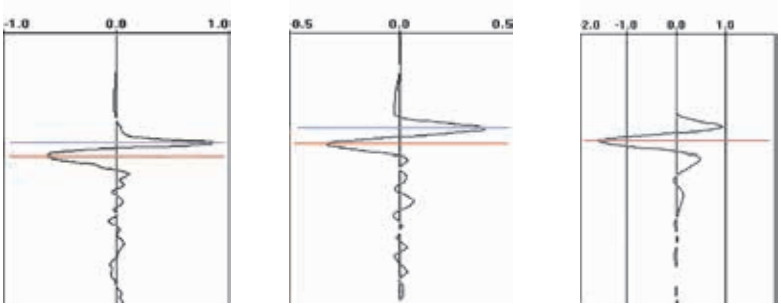


2,6 GHz **900 MHz** **400 MHz** **2 GHz gefilterd** **2 GHz ongefilterd**

Figuur B2.8 – *Detailbeelden van de metingen en* picks *voor meetpunt 4 (beton op schraal beton)*

De tweede fase bestaat erin, de nultijd voor elke antenne te bepalen aan de hand van metingen in lucht (figuur B2.9). Zoals bij de modelleringen werden voortplantingstijden verkregen die rekening houden met de werkelijke nultijd ('Corr. $t^{0'}$), door de tijden voor het golftraject tussen de zend- en de ontvangstantenne af te trekken van de op de metingen in lucht *gepickte* tijden. In tegenstelling tot reflecties is de golf in lucht van de antennes van 2,6 GHz en 900 MHz uit twee hoofdpieken samengesteld. De tweede piek lijkt vervormd, wellicht door interactie van het signaal met onderdelen van de behuizing. De golf in lucht van de antenne van 400 MHz vertoont drie pieken, zoals de reflecties op de contactvlakken. De tweede piek is de krachtigste.

Op de meting in lucht werd dus voor de antenne van 400 MHz de tweede (negatieve) piek *gepickt*. Voor de andere twee antennes werden respectievelijk de eerste en de tweede piek genomen, om de weerslag op de heen-en-terugloop tijden voor de verschillende contactvlakken na te gaan.

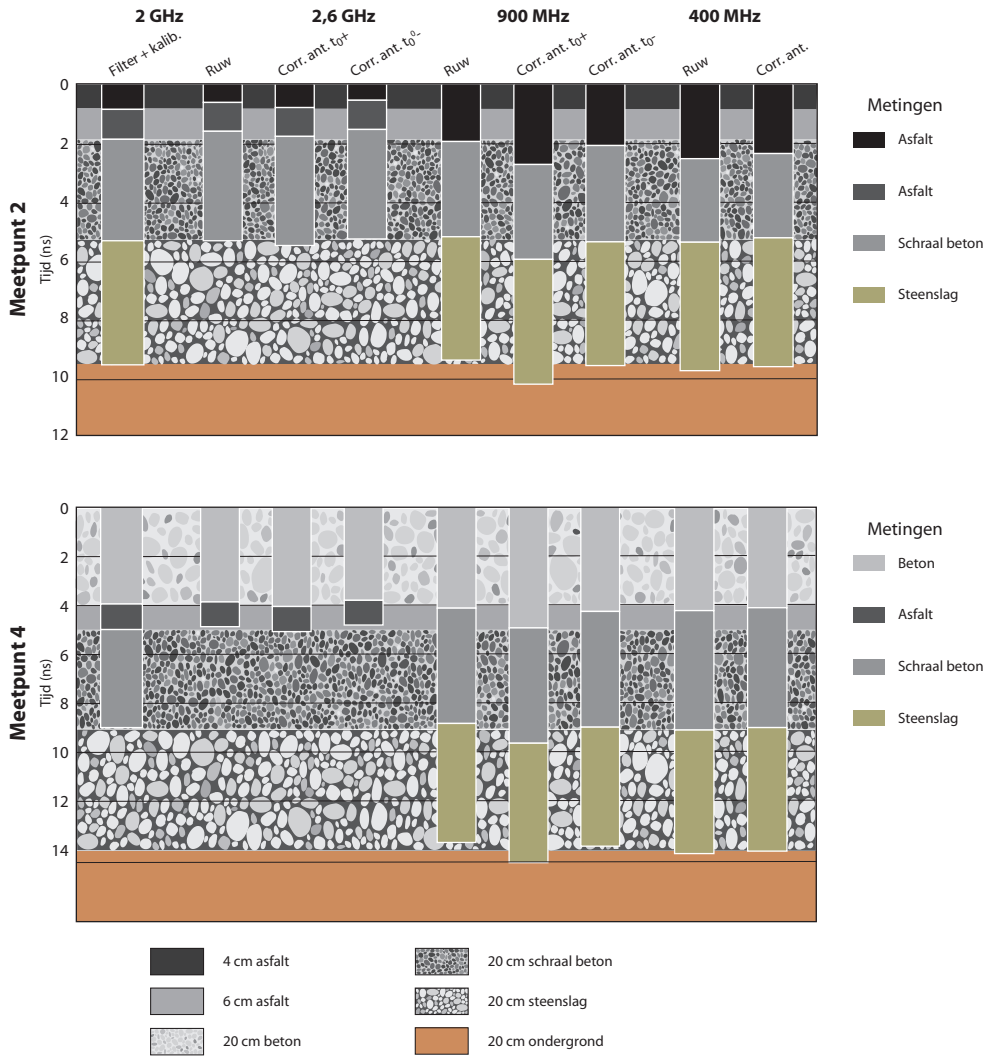


2,6 GHz **900 MHz** **400 MHz**

Figuur B2.9 – *Metingen in lucht met elke contactantenne*

Zoals bij de modelleringen werd ook op de heen-en-terugloop tijden een correctie toegepast, om rekening te houden met de afstand tussen de antennes ('tijd Corr. antenne'). Deze correctie is op haar beurt slechts voor de eerste laag helemaal juist. Zoals de modelleringen hebben uitgewezen, verbetert deze methode de voortplantingstijden aanzienlijk, maar is het verschil met de metingen waarbij enkel de nultijd werd gecorrigeerd zeer gering.

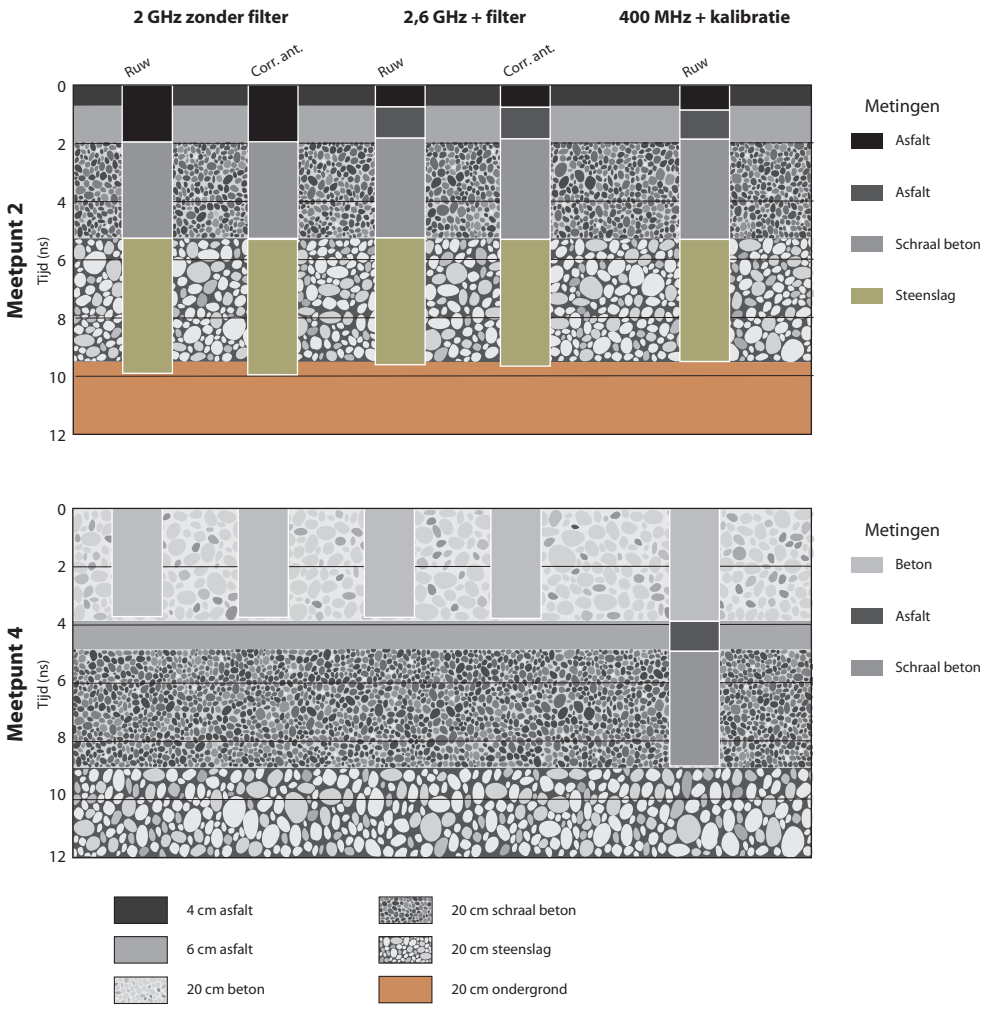
Tabel B2.3 geeft de gecorrigeerde heen-en-terugloop tijden voor elke antenne weer. Voor de antennes van 2,6 GHz en 900 MHz gaat het om de tijden die verkregen zijn door de positieve en de negatieve piek van de golf in lucht te *picken*. Deze resultaten zijn ook uitgezet in figuur B2.10, die de onbewerkte en de gecorrigeerde gegevens met elkaar vergelijkt. De referentietijden op de achtergrond van de diagrammen stemmen overeen met de tijd die met de luchtgekoppelde antenne van 2 GHz werd gemeten (met GSSI-ruisonderdrukkingsfilter en met Radanverwerking op basis van de kalibratie). Zij kunnen niet als een absolute referentie worden beschouwd, zoals dat bij de modelleringen het geval was. Figuur B2.11 toont alle resultaten die met de antenne van 2 GHz zijn verkregen: met en zonder toepassing van de filter, de verwerking en de correctie voor de geometrie van de antennes.



Figuur B2.10 – *Schatting van de meettijden van de verschillende contactvlakken in de laboratoriumproeven en vergelijking met de gemiddelde tijd berekend uit de metingen*

		2 GHz kalibratie	2,6 GHz (nul pos. piek)	2,6 GHz (nul neg. piek)	900 MHz (nul pos. piek)	900 MHz (nul neg. piek)	400 MHz (nul neg. piek)
Meetpunt 2	**Ondervlak asfalt (4 cm)**	0,86	0,79	0,54			
	Ondervlak asfalt (10 cm)	1,87	1,77	1,53	2,72	2,08	2,35
	Ondervlak schraal beton	5,31	5,47	5,25	5,95	5,35	5,21
	Ondervlak steenslag	9,52			10,18	9,54	9,58
Meetpunt 4	**Ondervlak beton**	3,86	3,96	3,72	4,81	4,15	4,00
	Onvervlak asfalt	4,88	4,96	4,70			
	Ondervlak schraal beton	8,80			9,43	8,79	8,80
	Ondervlak steenslag				14,21	13,55	13,75

Tabel B2.3 – *Heen-en-terugloop tijden, met de verschillende antennes op elk contactvlak gemeten*



Figuur B2.11 – *Schatting van de meettijden van de verschillende contactvlakken in de laboratoriumproeven met de antenne van 2 GHz en vergelijking met de gemiddelde tijd berekend uit de metingen*

B2.3.2 Zichtbaarheid van de contactvlakken

Anders dan bij de modelleringen brengt de antenne van 2,6 GHz de dunne laag van 4 cm asfalt aan het licht (hoewel de reflectie door een interferentie met de directe golf niet duidelijk is, wat ertoe leidt dat een verkeerde polariteit wordt *gepickt*). Ook is het met de antenne van 400 MHz mogelijk het ondervlak van de toplaag te raden, wat bij de modelleringen niet het geval was. Door de ruis die op de reële gegevens zit, zijn met de hoogfrequente antennes de diepliggende contactvlakken vaak niet te onderscheiden. Meer bepaald worden met de antenne van 2 GHz bij toepassing van een filter en een gepaste verwerking meer contactvlakken in meetpunt 4 zichtbaar.

Bij de laagfrequente antennes geeft de *pick* van de reflectie op de asfalttussenlaag opnieuw tijden die tussen de tijden van de *picks* op de hoogfrequente metingen voor de twee contactvlakken in liggen, maar die tijden liggen dichter bij de *pick* van het eerste asfaltcontactvlak in het signaal van de antenne van 2 GHz indien de t_0 berekend is na *picking* van de negatieve piek van de golf in lucht.

B2.3.3 Effecten van filters en verwerkingen

Bij de antenne van 2 GHz blijkt toepassing van de aan de kalibratie gebonden verwerking of van de ruisonderdrukkingsfilter meer reflecties aan het licht te brengen. Ook wat de gemeten tijden betreft, hebben deze twee verwerkingen een lichte invloed op de resultaten. Zo komen de meeste reflecties in meetpunt 2 iets vroeger aan dan bij de onbewerkte metingen zonder filter. De invloed van de genoemde verwerkingen op de geschatte tijd is dus groter dan die van een correctie voor de antennes, die, evenals bij de modelleringen, nagenoeg geen verandering in de resultaten brengt.

Bij de contactantennes beïnvloedt nultijdcorrectie de resultaten, maar slechts in positieve zin als de juiste piek van de directe golf wordt geselecteerd. Bij de antenne van 400 MHz is dat de middelste (negatieve) piek. Bij die van 900 MHz gaat het eveneens om de negatieve piek, de tweede die zichtbaar is. Voor de antenne van 2,6 GHz zijn de resultaten minder overtuigend (voor het ondervlak van het asfalt in meetpunt 2 heeft het *gepickte* signaal niet dezelfde polariteit als het signaal dat voor de antenne van 2 GHz wordt *gepickt*, wat het resultaat vertekent). Toch verkiezen wij de tweede piek van de directe golf te *picken*, naar analogie van de resultaten met de antenne van 900 MHz. Voor de ondervlakken van het schrale beton en het steenslag liggen de heen-en-terugloop tijden na *picking* van de negatieve piek van de golf in lucht zeer dicht bij die welke met de luchtgekoppelde antenne zijn verkregen.

Voor de drie beproefde antennes geeft een ruwe interpretatie van de resultaten bij gebruik van de eerste positieve piek van de directe golf op de structuur aanvaardbare resultaten. Het ziet er immers naar uit dat de fouten die in de werkelijke zendtijd worden gemaakt en die welke het gevolg zijn van de dispersie die de vorm van het zich voortplantende golfje wijzigt, de neiging hebben elkaar op te heffen.

B2.4 Conclusies

De heen-en-terugloop tijden op contactvlakken die uit radarmetingen worden afgeleid, kunnen niet met reële waarden worden vergeleken, omdat noch de permittiviteiten van de verschillende lagen, noch de reële dikten nauwkeurig bekend zijn (onzekerheid ten aanzien van de nominale dikten). Deze waarden zijn bij modelleringen echter wél bekend, wat een inzicht verschaft in de mogelijkheden van de verschillende antennes in gecontroleerde omstandigheden.

Zo hebben de modelleringen uitgewezen:

- dat de contactantennes zonder nultijdcorrectie de neiging hebben de dikte van de eerste laag te onderschatten. Na correctie is er een neiging tot lichte overschatting. Correctie voor de antenne brengt slechts een heel lichte verbetering in de verkregen waarden;
- dat de antenne van 400 MHz er niet in slaagt de asfalttussenlaag of de asfaltverharding te onderscheiden. De antenne van 900 MHz ziet wel de grens tussen de asfaltverharding en het beton, maar niet de grens tussen de twee asfaltlagen en evenmin de tussenlaag.

Deze conclusies blijven meestel gelden als men naar de reële metingen kijkt. Toch vallen enkele verschillen op:

- anders dan bij de modelleringen kon het ondervlak van de asfaltverharding met de antenne van 400 MHz worden onderscheiden. De dikte lijkt echter overschat, wat bevestigt dat beter hoogfrequentere antennes kunnen worden gebruikt om verhardingsdikten te schatten;
- doordat er ruis op de reële gegevens zit, zijn sommige contactvlakken er niet in zichtbaar, vooral voor de hoogfrequente antennes. Zo zijn het ondervlak van het steenslag (in zone 2) en het ondervlak van het schrale beton (in zone 4) niet zichtbaar met de antenne van 2,6 GHz of in de onbewerkte gegevens van de antenne van 2 GHz. Bijkomende verwerkingen kunnen de zichtbaarheid van sommige lagen verbeteren;

- behalve met de antenne van 400 MHz hebben de golf in lucht (waaraan de nultijd kan worden bepaald) en de reflecties op de contactvlakken niet dezelfde vorm. Zij hebben respectievelijk twee en drie duidelijke pieken. Dit verschil maakt de keuze voor de *picks* moeilijker dan bij modellering. Voor de reflecties op de contactvlakken werd de tweede piek genomen, omdat deze piek de krachtigste en voor de gebruiker de best zichtbare was. Voor de golf in lucht van de 2,6 GHz- en de 900 MHz-antenne werden twee opties bekeken (*picking* van de eerste of de tweede piek), om het effect op de gecorrigeerde heen-en-terugloopijden te beoordelen. Voor de antenne van 400 MHz werd de negatieve piek van de golf in lucht geselecteerd om de nultijd te bepalen. Uit de resultaten is gebleken dat voor elk van deze antennes de fouten met de *picking* van de negatieve piek in lucht beperkt zijn;
- een "ruwe" analyse van de signalen, waarbij de positieve piek van de oppervlakgolf werd gebruikt om de nultijd te bepalen, leidde tot fouten die acceptabel bleven, wellicht doordat de gemaakte fouten de neiging hadden elkaar te compenseren.

Op grond van deze bevindingen bevelen wij aan de tweede piek van de golf in lucht te *picken* om de nultijd te bepalen, en de tweede piek van de reflecties op de contactvlakken te *picken*. Als er geen metingen in lucht beschikbaar zijn, is het daarentegen beter de eerste piek van de directe oppervlakgolf als referentienultijd te nemen (zonder de voorplantingstijd van de ene antenne tot de andere daarvan af te trekken).

Het blijft ideaal tegelijk hoog- en laagfrequente metingen uit te voeren. Hoge frequenties zijn geschikter voor dunne lagen (4 en 6 cm), terwijl met laagfrequente antennes dieper gelegen lagen kunnen worden opgespoord. Combinatie van beide soorten antennes maakt een betere bepaling mogelijk van het contactvlak dat met de *gepickte* reflectie overeenstemt. Een verwerking van het signaal tijdens of na de meting kan de kijkdiepte vergroten zonder de gemeten reflectietijden aanzienlijk te wijzigen.

Na correctie van de nultijd kunnen met de contactantennes doorgaans gelijksoortige dikten worden bepaald als met de luchtgekoppelde antenne, mits de dikten voldoende groot zijn ten opzichte van de antennefrequentie. De laagfrequente antennes hebben de neiging de dikten voor een gegeven snelheid te overschatten als de verharding betrekkelijk dun is of als zij rust op een dunne laag met een dikte die gering is ten opzichte van de antennefrequentie. Als in het onderzochte vak een kalibratie aan boorkernen wordt uitgevoerd, zou het effect van deze variaties op de dikteschatting evenwel beperkt moeten zijn.

Bijlage 3
Numerieke validering van geavanceerde methoden voor de karakterisering van een een- of tweelaags medium op basis van de reflectiecoëfficiënt

De numerieke studie met simulatie van radarsignalen op een- en tweelaagse media (§ 2.4.2) heeft uitgewezen dat de oppervlakreflectiecoëfficienten-techniek zoals beschreven in bijlage 1 bij de methodieken [1] het mogelijk maakt de dikte van de eerste verhardingslaag te schatten met een nauwkeurigheid van 3,61 %. Naar aanleiding van dit resultaat is een tweede numerieke studie verricht, om uit te maken welke parameters verbeterd zouden kunnen worden om de fouten die met deze methode worden gemaakt, te verkleinen. Er zijn twee varianten van het eerste programma ingevoerd om de reflectiecoëfficiënt te berekenen: rekening houden met de invalshoek in de berekening van de reflectiecoëfficiënt, en in het frequentiedomein werken.

In het gebruikte model, dat geacht wordt representatief te zijn voor de werkelijke configuratie van ons systeem, staan de antennes 20 cm uit elkaar en bevindt het zendcentrum ervan zich op 7,5 cm van de voet van de antenne. Doordat de simulaties met een antennehoogte van 49 cm worden uitgevoerd, bedraagt de invalshoek op het oppervlak dus 10°, wat dus een grotere reflectiecoëfficiënt zal geven als de nulinval die bij de eerste benadering werd aangenomen. Vergelijking (2) uit bijlage 1 bij de methodieken [1] wordt bijgevolg:

$$\varepsilon'_{r,1} = \sin^2\theta + \cos^2\theta * \frac{(R_0 - 1)^2}{(R_0 + 1)^2} = \sin^2\theta + \cos^2\theta * \left(\frac{1 + \dfrac{A_0}{A_{calib}}}{1 - \dfrac{A_0}{A_{calib}}} \right)^2$$

In het frequentiedomein werken maakt het mogelijk de gemiddelde reflectiecoëfficiënt over een geheel van frequenties te berekenen in plaats van enkel op basis van het tijdsignaal. Deze methode wordt geacht stabieler te zijn voor de schatting van de reflectiecoëfficiënt, omdat zij minder gevoelig is voor interferenties. Omdat het signaal rond 2 GHz gecentreerd is, worden de frequenties tussen 1,5 en 2,5 GHz in aanmerking genomen.

Deze varianten zijn in eerste instantie beproefd op een gelijkmatig samengesteld materiaal van oneindige dikte. Enkel de permittiviteit van het materiaal is dus onbekend. De fouten worden gekwantificeerd door de RMSPE (*root-mean square percentage error*) van de fouten voor elke permittiviteit. Tabel B3.1 vergelijkt de fouten die met het oorspronkelijke programma worden gemaakt met de fouten die de verschillende varianten geven.

	In het tijdsdomein berekende R	In het frequentiedomein berekende R
Verticale inval	4,38 %	2,97 %
Werkelijke inval	1,56 %	0,19 %

Tabel B3.1 – *Fouten (*root-mean square percentage error*) in de bepaling van de permittiviteit van een homogeen medium, gemaakt met de verschillende beschouwde varianten*

Uit deze resultaten blijkt dat de gemaakte fout efficiënt kan worden verkleind door rekening te houden met de invalshoek en door R in het frequentiedomein te berekenen. Het geleidingsvermogen van het materiaal, dat in de berekeningen verwaarloosd wordt, heeft weinig invloed, aangezien de restfout slechts 0,19 % bedraagt.

De programmaversie met beide bovengenoemde varianten is eveneens toegepast op het tweelaagse numerieke model dat in de eerder genoemde § 2.4.2 is beschreven, voor alle punten waarop de methode toepasselijk is. Tabel B3.2 vergelijkt de resultaten met die van de oorspronkelijke methode.

Beschouwde parameter	ε'_{r1}	h_1	ε'_{r2}
Eenvoudig model	5,37 %	3,61 %	8,78 %
Verbeterd model (werkelijke invalshoek en berekening van de reflectiecoëfficiënt in het frequentiedomein)	1,45 %	1,70 %	8,55 %

Tabel B3.2 – *Fouten (*root-mean square percentage error*) in de bepaling van de verschillende parameters van een tweelaags medium, gemaakt met het eenvoudige en het verbeterde model*

Het blijkt dat de resultaten voor de permittiviteit van de eerste laag duidelijk beter zijn. De fout in de dikte van de eerste laag is gehalveerd. De verbetering voor de permittiviteit van de tweede laag is echter veel beperkter. De fouten die in de berekening van deze parameter kunnen sluipen, zijn namelijk van veel diversere oorsprong. Zo kan de invloed van het geleidingsvermogen hier niet meer "straffeloos" worden verwaarloosd.

Op grond van deze proeven zullen de voorgestelde twee varianten, voor zover mogelijk, in de toekomst worden toegepast bij de verwerking van resultaten van metingen met luchtgekoppelde antennes.

Literatuur

[1] **Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW) (2016)**
Gebruik van grondradar voor wegconditieonderzoek : methodieken
Brussel : OCW. (Meetmethode, MN91), 32 p.
Online beschikbaar http://www.brrc.be/nl/artikel/mn9116, laatst geraadpleegd op 29/03/2018.

[2] **Van der Wielen, Audrey (2015)**
Thickness estimation of road pavement layers using ground penetrating radar
In Brussels : European Conference of the Transport Research Institutes (ECTRI), Young researchers seminar, Rome, June 17-19, 2015, 15 p.

[3] **De Coster, Albéric; Van der Wielen, Audrey; Grégoire, Colette Lambot, Sébastien (2018)**
Evaluation of pavement layer thicknesses using GPR : a comparison between full-wave inversion and the straight-ray method
In Construction and building materials, 168(2018), pp. 91-104.

[4] **Giannopoulos, Antonis (2005)**
Modelling ground penetrating radar by GprMax
In Construction and building materials, 19(2005)10, pp. 755-62.

Andere nuttige documenten

Ahmad, N.; Wistuba, M.; Lorenzl, H. (2012)
GPR as a crack detection tool for asphalt pavements : possibilities and limitations
In New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Proceedings of the 14th international conference on ground penetrating radar (GPR), Shanghai (China), June 4-8, 2012.

AL-Qadi , I.L.; Lahouar, S. (2005)
Measuring layer thicknesses with GPR : theory to practice
In Construction and building materials, 19(2005)10, pp. 763-72.

Chen, D.-H.; Scullion, T.; Xavier, Odile (2008)
Forensic investigations of roadway pavement failures
In Journal of performance of constructed facilities, 22(2008)1, pp. 35-44.

Dérobert, X.; Coffec, O. (2001)
Localisation des armatures des ouvrages d'art en béton armé ou précontraint par les techniques de radar
In Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (2001)230, pp. 57-65.

Grégoire, Colette; Van Geem, Carl (2013)
Use of radar in road investigation, BRRC experience
In s.l. : s.n., Seventh international workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR 2013), Nantes, July 2-5, 2013.

Grégoire, Colette; Van Geem, Carl (2013)
OCW stelt grondradaractiviteiten voor op IWAGPR 2013
In OCW Mededelingen, (2013)96, pp. 13-15.

Grégoire, Colette; Van Geem, Carl (2013)
Ontwikkeling van de grondradartechniek : oproep voor medewerking aan terreinmetingen
In OCW Mededelingen, (2013)97, p. 20.

Grégoire, Colette; Leuridan, Alain; Massart, Tim; Van Geem, Carl; Poelmans, Francis (2014)
Proefsleuf in OCW-vestiging te Waver voor prenormatief onderzoek naar grondradartechniek
In OCW Mededelingen, (2014)98, p. 6-8.

Grégoire, Colette; Van der Wielen, Audrey; Van Geem, Carl (2015)
Determination of velocities with radar in road layers
In s.l. : s.n., Eight international workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR 2015), Florence, July 7-10, 2015, 4 p.

Grégoire, Colette; Van Geem, Carl; Van der Wielen, Audrey; Drevet, Jean-Pierre (2018)
Radar for pavement surveys : research project in Belgium
In Proceedings of the seventh transport research arena (TRA 2018) on solutions for society, economy and environment, Vienna, April 16-19, 2018, 8 p.

Hildebrand, Gregers; van Ooijen, Wim; Chenevière, Philippe; Turtschy, Jean-Claude; Antunes, Maria de Lurdes; Domingos, Pedro; Fontul, Simona; Ferne, Brian; Sjögren, Leif; Andrén, Peter; Kokot, Darko (2005)
FORMAT : fully optimized road maintenance. Deliverable D17, application of high speed equipment in pavement maintenance planning
Ede : Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW), 70 p.

INFRASENSE; South Dakota Department of Transportation; Federal Highway Administration (FHWA) (2006)
Feasibility of using ground penetrating radar (GPR) for pavements, utilities, and bridges
Washington : Federal Highway Administration. (Report, N° SD2005-05-F).

Jendia, S. (1995)
Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen
Karlsruhe : Institut für Strassen und Eisenbahnwesen (ISE). (Veröffentlichungen des Institutes für Strassen und Eisenbahnwesen, 45 ; ISSN 0344-970X), 124 p.

Kenneth, M.; MacGrath, L.; Puccinelli, J. (2013)
Determining asphalt thickness using ground penetrating radar : a comparison of automated and manual methods using falling weight deflectometer back-calculation error correction
In s.l. : Akademika Publishing, Ninth international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields (BCRRA 2013), Trondheim (Norway), June 25-27, 2013, 10 p.

Lalagüe, Anne (2015)
Use of ground penetrating radar in quality assurance of new asphalt pavements.
Trondheim : Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Appendix A of PhD thesis, p. 188.

Lalagüe, Anne; Lebens, Matthew A.; Hoff, Inge (2014)
Accuracy of ground penetrating radar in pavement thickness evaluation : impact of interpretation errors
In Brussels : Conference of European Directors of Roads (CEDR), Fifth transport research arena 2014 (TRA 2014) [on] transport solutions : from research to deployment : innovate mobility, mobilise innovation!, Paris, April 14-17, 2014, 9 p.

Lambot, Sébastien; Slob, Evert; Van den Bosch, I.; Stockbroeckx, B.; Vanclooster, Marnik (2004)
Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties
In IEEE transactions on geosciences and remote sensing, 42(2004)11, pp. 2555-68.

Li, Yingfeng; Kraus, Edgar; Quiroga, Cesar (2013)
Benefits of subsurface utility engineering services in transportation projects
In Washington : Transportation Research Board (TRB), Ninety-second annual meeting [of the] Transportation Research Board, Washington, January 13-17, 2013, 17 p.

Litzka, Johann; Leben, Bojan; La Torre, Francesca; Weninger-Vycudil, Alfred; Antunes, Maria de Lurdes; Kokot, Darko; Mladenovic, Goran; Brittain, Stuart; Viner, Helen (2008)
COST Action 354, performance indicators for road pavements : the way forward for pavement performance indicators across Europe (final report)
Vienna : Austrian Transportation Research Association (FSV), 72 p.

Loizos, A.; Papavasiliou, V. (2006)
Evaluation of foamed asphalt cold in-place pavement recycling using nondestructive techniques
In Journal of transportation engineering, 132(2006)12, pp. 970-78.

Mahmoudzadeh, Mohammad Reza; Got, Jean-Baptiste; Lambot, Sébastien; Grégoire, Colette (2013)
Road inspection using full-wave inversion of far-field ground-penetrating radar data
In Nantes : French Institute of Science and Technology for Transport Developments and Networks (IFSTTAR), 7th International workshop on advanced ground penetrating radar, IWAGPR, Nantes, July 2-5, 2013, 6 p.

Maser, Ken (2008)
Automated Pavement Thickness Evaluation for FWD Backcalculation using GPR
s.l. : Infrasense, FWD Users Group meeting (FWDUG), s.l., October 5-7, 2008, 30 sl.
Online beschikbaar https://docs.google.com/file/d/0BwRtUOIxzlF4Vkw4SGdfQk54VWM/edit, laatst geraadpleegd op 02/07/2018.

Morcous, George; Erdogmus, Ece (2009)
Use of Ground Penetrating Radar for Construction Quality Assurance of Concrete Pavement
Lincoln (USA) : Nebraska Transportation Center (Report SPR-P1 (08) P307), 83 p.

Osman, Hesham; El-Diraby, Tamer (2007)
Evaluating the use of Subsurface Utility Engineering in Canada
In Washington : Transportation Research Board, 86th annual meeting [of the] Transportation Research Board, Washington, January 21-25, 2007.

Pajewski, L.; Benedetto, A.; Derobert, X.; Fontul, S.; Govedarica, M.; Grégoire, Colette; Loizos, A.; Perez-Gracia, V.; Plati, C.; Ristic, A.; Tosti, F.; Van Geem, Carl (2017)
COST Action TU1208 – Working Group 2 – GPR surveying of pavements, bridges, tunnels and buildings; underground utility and void sensing
In Münich : European Geosciences Union (EGU), EGU General Assambly 2017, Vienna, April 23-28, 2017 (EGU2017-16388-2)(Geophysical research abstracts, 19), 2 p.

Saarenketo, Timo; Scullion, Tom (2000)
Road evaluation with ground penetrating radar
In Journal of applied geophysics, 43(2000)2, pp. 119-38.

Saarenketo, Timo (2001)
GPR based road analysis – a cost effective tool for road rehabilitation – case history from highway 21, Finland
In Vermont South (Australia) : Australian Road Research Board (ARRB), Twentieth ARRB Transport Research Ltd Conference, Melbourne, March 19-21, 2001, 19 p.

Simonin, Jean-Michel; Kerzreho, Jean-Pierre; Hornych, Pierre; Gouy, Thierry (2013)
Comparison of NDT methods to detect debonded areas
In s.l. : Akademika Publishing, Ninth international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields (BCRRA 2013), Trondheim (Norway), June 25-27, 2013.

Sinha, Sunil K.; Thomas, H. Randolph; Wang, Mian C.; Jung, Yeun Jae (2007)
Subsurface utility engineering manual (final report)
Washington : Federal Highway Administration (FHWA) (FHWA Report PA-2007-027-510401-08), 136 p.

Van der Wielen, Audrey; Van Geem, Carl; Grégoire, Colette (2015)
GPR on roads : layer thickness estimation
In Rome : Aracne, Proceedings of the third general meeting of the COST Action TU1208 "civil engineering applications of ground penetrating radar", London, March 4-6, 2015. ISBN 978-88-548-8486-1, 8 p.

Van der Wielen, Audrey (2015)
Thickness estimation of road pavement layers using ground penetrating radar
In Brussels : European Conference of the Transport Research Institutes (ECTRI), Young researchers seminar, Rome, June 17-19, 2015, 15 p.

Van der Wielen, Audrey; Grégoire, Colette (2015)
Grondradarmetingen op OCW-asfaltproefvak in Sterrebeek
In OCW Mededelingen, (2015)103, p. 10.

Van der Wielen, Audrey; Grégoire, Colette; Van Geem, Carl (2017)
Développement de la technique géoradar en auscultation de routes
Brussel : Belgische Wegenvereniging (BWV), Drieëntwintigste Belgisch wegencongres, Brussel, oktober 4-6, 2017.

Van der Wielen, Audrey; Lybaert, Marijn; Grégoire, Colette (2017)
Combined GPR and ultrasonic tomography measurements for the evaluation of a new concrete pavement
In s.l. : s.n., Ninth international workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR 2017), Edinburgh, June 28-30, 2017, 6 p.

Van der Wielen, Audrey; Lybaert, Marijn; Grégoire, Colette (2017)
Mesures combinées au géoradar et par tomographie ultrasonore pour l'évaluation d'un revêtement en béton neuf
Brussel : Belgische Wegenvereniging (BWV), Drieëntwintigste Belgisch wegencongres, Brussel, oktober 4-6, 2017, 11 p.

Van Geem, Carl; Grégoire, Colette (2013)
Rehabilitation of roads containing cobblestone pavements covered with a bituminous layer
In s.l. : Akademika Publishing, Ninth international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields (BCRRA 2013), Trondheim (Norway), June 25-27, 2013, 10 p.

Van Geem, Carl (2017)
Reproducibility of Decisions for Rehabilitation of Existing Roads Based on Deflection Measurements with Curviameter or FWD
In Boca Raton (USA) : CRC Press, Proceedings of the tenth international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields (BRRCA 2017), Athens, June 28-30, 2017, pp. 615-22.

Vine, Kevin (2014)
Subsurface utility engineering (SUE) : avoiding 4 potential pitfalls to ensure a successful program
In Ottawa : Transportation Association of Canada (TAC), Hundreth Conference of the Transportation Association of Canada, Montréal, September 28-October 1, 2014.

Willett, David A.; Mahboub, Kamyar C.; Rister, Brad (2006)
Accuracy of ground-penetrating radar for pavement-layer thickness analysis
In Journal of transportation engineering, 132(2006)1, 8 p.

Ressorterende en steunende leden krijgen de nieuwe OCW-publicaties kosteloos toegestuurd. Alle publicaties zijn gratis downloadbaar na registratie op onze website *www.ocw.be*

Niet-leden kunnen tegen kostprijs een papieren versie bij het OCW bestellen.

Deze publicatie bestellen:
publication@brrc.be – Tel.: +32 (0)2 766 03 26

Kenmerk: RV 46 – Prijs: 18,00 €

Andere publicaties in de reeks "Researchverslag"

In de reeks "Researchverslag" verschijnen OCW-publicaties die de praktische resultaten bevatten die op een specifiek gebied zijn verkregen, met vermelding van de hiertoe gebruikte wetenschappelijke methoden en/of verrichte informatiestudie.

Kenmerk	Titel	Prijs
RV 45	Prestatie-eisen voor voegvullingsmaterialen in bestratingen met kleinschalige elementen	12,00 €
RV 44/07	Vergelijking van vier toestellen om de dichtheid van asfaltverhardingen in situ te meten	7,50 €
RV 43/07	Asfalt met verhoogde stijfheid (AVS): van ontwerp tot aanbrenging op de weg	25,00 €
RV 42/06	Temperatuurverloop in een pas aangebrachte asfaltlaag	16,00 €
RV 41/05	Proefvak tweelaags zeer open asfalt	16,00 €

Andere OCW-reeksen

- Aanbevelingen
- Meetmethode
- Synthese

Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Uw partner voor duurzame wegen

Instelling erkend bij toepassing van de besluitwet van 30 januari 1947
Woluwedal 42
1200 Brussel
Tel. : 02 775 82 20
www.ocw.be

Dit researchverslag vloeit voort uit een prenormatief project van vier jaar met subsidies van het Bureau voor Normalisatie (NBN), in partnerschap met het Institut Scientifique de Service Public (overeenkomsten CCN/NBN/PN 13*A*04, 13B04, 15*A*05 en 15B05).

Grond- of georadar (*Ground-Penetrating Radar* – GPR) is een niet-destructieve geofysische techniek die steunt op voortplanting en reflectie van hoogfrequente elektromagnetische golven. Deze techniek maakt het mogelijk om, eventueel in combinatie met andere methoden, een beter inzicht in de opbouw van een wegconstructie te verwerven (dikten, homogene zones, gebreken, wapeningen, nutsleidingen). De studie had tot doel de methodieken voor het inzamelen, verwerken en interpreteren van meetgegevens op te stellen (zie publicatie MN 91/16 [1]) en deze op een recyclingwerk te toetsen. Dit verslag beschrijft de praktijkgevallen aan de hand waarvan de methodieken konden worden uitgeschreven en gevalideerd.

Na een beschrijving van het principe van de methode (hoofdstuk 1) worden de proeven toegelicht die werden uitgevoerd, in gecontroleerde omstandigheden op het proefvak in de hal van de OCW-vestiging in Waver (hoofdstuk 2) en op proefblokken in Sterrebeek (hoofdstuk 3). Hoofdstuk 4 is gewijd aan de diktebepaling in verschillende gevallen (autosnelwegen, gemeentelijke wegen en betonwegen), in combinatie met andere methoden zoals deflectiemetingen, kernboringen, topografische metingen en metingen met de ultrasone tomograaf. In de volgende hoofdstukken worden praktijkgevallen beschreven voor de beoordeling van homogeniteit (hoofdstuk 5) en het opsporen van holten (hoofdstuk 6), van ankerstaven en deuvels (hoofdstuk 7), van vochtplekken (hoofdstuk 8) en van nutsleidingen (mogelijke storende factoren, behandeling en voorbeelden) (hoofdstuk 9). In hoofdstuk 10 worden de toepassing en de beoordeling van de methodieken op een recyclingwerk toegelicht. Hoofdstuk 11 beschrijft de metingen die voor de renovatie van een gewestweg zijn uitgevoerd om de heterogeniteit van de wegopbouw op te sporen en de laagdikten te bepalen. Er zijn drie aanvullende bijlagen. bijlage 1 trekt een representatieve steekproef uit de radargrammen die op het proefvak in Waver zijn gemeten (OCW, ISSeP en andere grondradargebruikers). In bijlage 2 worden aanbevelingen voor de *pick* van de verschillende contactvlakken gedaan. bijlage 3 beschrijft de numerieke validering van geavanceerde methoden voor de karakterisering van een een- of tweelaags medium op basis van de reflectiecoëfficiënt.

ITRD-trefwoorden

0177 – AANBEVELING ; 2955 – BAANLICHAAM ; 3361 – LEIDING ; 3420 – VERANKERING ; 3857 – CONDITIEONDERZOEK ; 3896 – DEUVEL ; 4530 – KABEL ; 5738 – HOLTE ; 5916 – HOMOGENITEIT ; 5920 – VOCHTGEHALTE ; 5921 – WATERDICHTHEID ; 6118 – GEORADAR ; 6226 – TER PLAATSE ; 8559 – ONDERZOEKSVERSLAG ; 9084 – GEBRUIK ; 9102 – METHODE