Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw

Uw partner voor duurzame wegen

Gebruik van grondradar voor wegconditieonderzoek – Methodieken

Werkwijze

MN 91 / 16

Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw

Brussel

Gebruik van grondradar voor wegconditieonderzoek – Methodieken

Meetmethode MN 91/16

Uitgegeven door het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Instelling opgericht bij toepassing van de besluitwet van 30 -1-1947

Woluwedal 42 – 1200 BRUSSEL

Alle rechten voorbehouden

Auteurs

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

Dankbetuiging

Onze dank gaat uit 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 en 13B04), dat in samenwerking met het *Institut Scientifique de Service Public* (ISSeP) werd uitgevoerd.

Ook danken wij de grondradargebruikers die deze meetmethode hebben nagelezen en met nuttige informatie aan de verbetering ervan hebben bijgedragen: Margo Briessinck (AWV), Sébastien Lambot (UCL), Simon Dirix en Eric Dondonné (SPW).

Ten slotte bedanken wij de grondradargebruikers die metingen op ons proefvak in Waver hebben uitgevoerd.

Inhoud

	Lijst van de tabellen	ii
	Lijst van de figuren	iii
	Inleiding	v
1	**Metingen**	1
1.1	Keuze van de uitrusting	1
1.1.1	Soort van antenne	1
1.1.2	Systeem voor gegevensinzameling	3
1.1.3	Frequentie	3
1.1.4	Meting van de afstand	7
1.2	Keuze van de parameters voor de metingen	8
1.2.1	Meetstap	8
1.2.2	Bemonsteringsinterval	8
1.2.3	Registratietijd	9
1.2.4	Aantal monsters (of punten) per meetspoor	9
1.2.5	Gemiddeldeberekening (*stacking*)	10
1.2.6	Versterking	10
1.2.7	Filter	10
1.3	Voorbereiding van de metingen	11
1.3.1	Opwarmingstijd	11
1.3.2	Kalibratie van de antenne	11
1.3.3	Kalibratie van de hodometer	12
1.4	Uitvoering van de metingen	12
2	**Gegevensverwerking**	15
2.1	Correctie van de nultijd	15
2.2	Filteren van het signaal	17
2.3	Versterking	18
2.4	Migratie	18
2.5	*Stacking* als naverwerking	18
2.6	*Stretching*	18
2.7	Weergave/Kleurenschaal	20
2.8	Tijd-diepteconversie	20
	Literatuur	22

Bijlage I – Schatting van de laagdikten op basis van de reflectieamplitude en de voortplantingstijd 24

I.1 Algemeen principe 24
I.2 Kalibratieprocedure 24
I.3 Schatting van de kenmerken van de eerste laag 25
I.4 Schatting van de kenmerken van de tweede laag 26

Bijlage II – Bepaling van homogene zones 28

II.1 Doelstellingen 28
II.2 Lengte van homogene zones 28
II.3 Bepaling van homogene zones 29

Lijst van de tabellen

1. Kenmerkende waarden voor de diëlektrische permittiviteit ε'_r en bijbehorende snelheid v bij 100 MHz voor verschillende wegenbouwmaterialen (gewijzigd volgens Daniels, 2004) 4
2. Schatting volgens frequentie van de verticale resolutie, de indringingsdiepte en de kleinste detecteerbare afmeting van heterogene elementen voor een weinig geleidend materiaal 5
3. Keuze van de centrale frequentie van de antennes als functie van de gewenste indringingsdiepte (Annan en Cosway, 1992) 6
4. Indringingsdiepte van radarantennes volgens de ervaring van het OCW 6
5. Afstand tussen metingen als functie van de soort van antenne en de gewenste horizontale resolutie 8
6. Bemonsteringsinterval voor de verschillende antennes 9
7. Gebruikelijke registratietijden voor weginspectie 9
8. Door het OCW toegepaste filters voor weginspectie 10
9. Voorbeelden van grensfrequenties volgens de soort van antenne 17

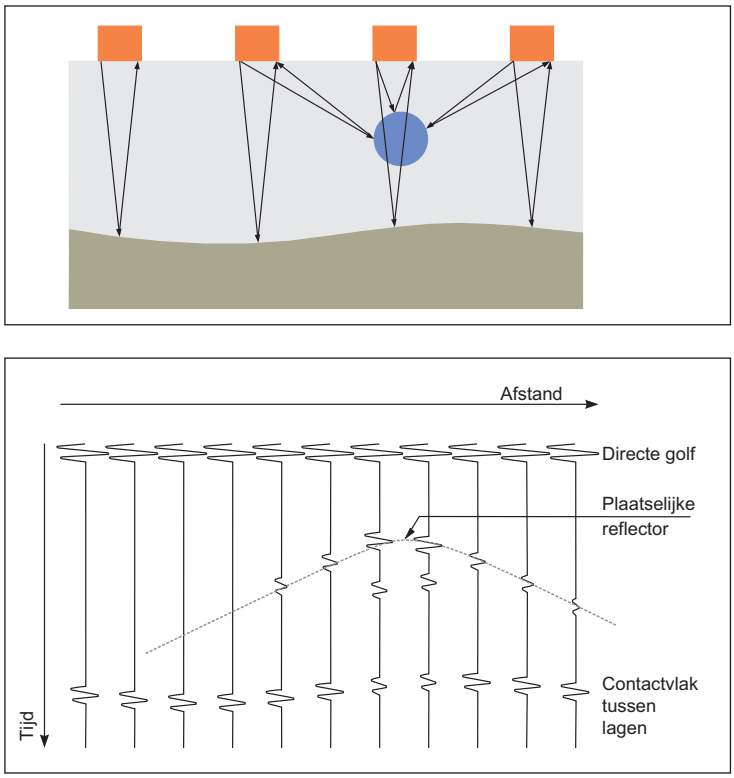
Lijst van de figuren

1. Maken van een profiel met behulp van een radarantenne v
2. Vergelijking van de werking van een contactantenne (a) en een hoornantenne (b) 1
3. Invloed van de soort van antenne (hoornantenne (a) of contactantenne (b)) op de beeldweergave van ruwe contactvlakken 2
4. Vergelijking van de signalen van een contactantennemeting met drie verschillende frequenties. De gemeten zone bestaat hier uit betonplaten met een asfaltoverlaging en plaatselijke heterogeniteit (holte, deuvels, sensor). 3
5. Uitrusting voor afstandsmetingen bij grondradartechniek: op het wagentje voor contactantennes (a); op een voertuigwiel voor hoornantennes (b); gps-antenne op het voertuigdak (c) 7
6. Continue meting met een 2 GHz-hoornantenne tijdens en na de opwarming (a): piek-tot-piekamplitude van de reflectie tijdens en na de opwarming (b) 11
7. Vergelijking van profielen gemeten met een 2,6 GHz-contactantenne, respectievelijk in de hoofdrichting (a) en met een verdraaiing van 90° (b) 13
8. Profiel gemeten met een 2 GHz-hoornantenne voor (a) en na (b) automatische correctie van de nultijd. Het oppervlak en de onderliggende lagen die door het overrijden van een opsluitband vrij onregelmatig worden weergegeven verkrijgen zo een horizontaal aanzien. 15
9. Vergelijking van een signaal gemeten in lucht (a) en op gewapend beton (b). Schatting van de vertrektijd van de directe golf. 16
10. Effect van een FIR-filter op een 2,6 GHz-radarprofiel. Door toepassing van de hoogdoorlaatfilter kunnen de brede oscillaties die het signaal volledig bedekken worden verminderd en wordt de horizontale reflector zichtbaar. 17
11. Migratie van een gemeten radarsignaal op een gewapend-betonplaat en invloed van de gekozen snelheid 19
12. Radarprofiel weergegeven in zwart-witschaal (a) en in kleurenschaal (b) 20
13. Principeschets van CMP-metingen: proefopstelling (a), verloop van de voornaamste golven (b); overeenkomstige meettijden (c) 21
14. Uitvoering van de kalibratie (a); gemeten profiel tijdens de kalibratie (b); resulterend kalibratiebestand (c) 25
15. Vergelijking van een gemeten spoor met een kalibratiespoor met dezelfde aankomsttijd voor de reflectie 25
16. Zichtbaar maken van de reflectie onderaan de eerste laag door van de meting het geschaalde meetspoor af te trekken 26
17. Homogene zone met een onregelmatig gedeelte dat zich over 10 m uitstrekt 29
18. Homogene zone met een onregelmatig gedeelte dat zich over 100 m uitstrekt 29
19. Voorbeeld van een gemeenteweg (*rue de la Limite* in Ottignies) met een groot aantal homogene zones 30
20. Voorbeeld van een weggedeelte met een homogene zone (zone 2) waarin een polariteitswissel optreedt (*avenue des Combattants* in Ottignies) 30
21. Voorbeeld van radarsignaal waarbij de verschillende homogene zones aan de hand van de oppervlaktesnelheid (berekend op basis van de amplitude van de oppervlaktereflectie) kunnen worden onderscheiden 30
22. Radarsignaal (400 MHz) dat een dikteschommeling in het oppervlaktemateriaal als gevolg van een vochtige zone zichtbaar maakt 31
23. Radarsignaal (2,6 GHz) dat een holte onder een betonplaat aan het licht brengt 31

Inleiding

Dit document richt zich tot de gebruikers van grondradar voor wegconditieonderzoek. Het doet praktische aanbevelingen voor de keuze van de uitrusting en voor het inzamelen, verwerken en interpreteren van meetgegevens.

De grond- of georadar (*Ground-Penetrating Radar* – GPR) is een instrument voor niet-destructief geofysisch onderzoek dat steunt op de voortplanting en reflectie van elektromagnetische golven (van 20 MHz tot 3 GHz). Dit instrument reageert op elektromagnetische veranderingen in een medium (permittiviteit, geleidingsvermogen en magnetische gevoeligheid). De metingen worden meestal uitgevoerd door de antenne over het oppervlak te verplaatsen (al of niet in contact met de grond). De impulsen worden met geregelde intervallen verzonden, wat het mogelijk maakt snel een beeld van de ondergrondse opbouw te verkrijgen (figuur 1).



Figuur 1 *Maken van een profiel met behulp van een radarantenne*

De techniek is ontwikkeld in de jaren 1960 en wordt onder meer aangewend in de geologie (voor de detectie van grond- of moedergesteente, specifieke geologische formaties, breuken, karstfenomenen, 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 zijn deugdelijkheid bewezen als hulpmiddel om de laagdikten of de kwaliteit (holten, enz.) van een constructie te beoordelen. Met grondradar kunnen ook veranderingen in wegconstructies visueel worden weergegeven (bepaling van de homogene zones). Zo kunnen geschikte locaties voor kernboringen of proefsleuven worden bepaald. In combinatie met deflectiemetingen en kernboringen maakt grondradartechniek het mogelijk om de dikte en ruimtelijke spreiding van lagen in een wegconstructie nauwkeuriger te schatten, zodat door terugberekening betrouwbaardere modulussen worden verkregen.

Een goede beheersing van de techniek is onmisbaar om meetcampagnes tot een goed einde te brengen. De juiste keuze van de soort van grondradar en antenne (inclusief het frequentiebereik of de centrale frequentie) maakt het mogelijk de kwaliteit van de verworven gegevens te optimaliseren. Voorts vereisen ook de keuze van de meetparameters en de verwerking en interpretatie van de ingezamelde gegevens enige ervaring van de gebruiker.

Sinds de aanschaf van een eerste antenne in 2010 heeft het OCW tijdens diverse metingen op het terrein (voor veranderingen in de wegopbouw, de bepaling van homogene zones, de bepaling van laagdikten voor terugberekening op basis van deflectiemetingen, de detectie van holten, kabels en leidingen, enz.) ervaring met de uitrusting opgedaan. Hoewel deze werkzaamheden doorgaans zeer vruchtbaar waren, ontbrak vaak precieze informatie over de onderzochte site. De resultaten en de nauwkeurigheid ervan konden daardoor niet altijd goed worden gevalideerd.

Er was dan ook nood aan een referentiesite, waar metingen in gecontroleerde omstandigheden kunnen worden uitgevoerd. Daarom is in het kader van een door het Bureau voor Normalisatie (NBN) gesubsidieerd prenormatief onderzoek in de hal van de OCW-vestiging te Waver een proefstrook aangelegd. Ze is opgebouwd uit deelvakken met verschillende soorten van klassieke wegopbouw, gebreken (holten, gebrekkige hechting) en leidingen (simulatie van ondergrondse nutsvoorzieningen). Om de prestaties en beperkingen van de apparatuur voor de detectie van de lagen in een wegconstructie en de bepaling van de laagdikten na te gaan, heeft het OCW er vergelijkende tests met verscheidene antennes verricht. Daarnaast hebben ook teams van verschillende instellingen (AWV, CEREMA, ISSeP, SPW, UCL en UGent) met eigen apparatuur metingen op de proefstrook uitgevoerd.

De ervaring die het OCW tijdens de metingen op de proefstrook en op wegen heeft opgedaan, vormt de grondslag voor dit document, dat een hulpmiddel voor grondradargebruikers wil zijn. In het eerste hoofdstuk wordt de uitvoering van de metingen beschreven. In het tweede hoofdstuk komt de gegevensverwerking aan bod. Er zijn twee aanvullende bijlagen, respectievelijk over de schatting van de laagdikten op basis van de reflectieamplitude en de voortplantingstijd en over de bepaling van homogene zones.

Hoofdstuk 1

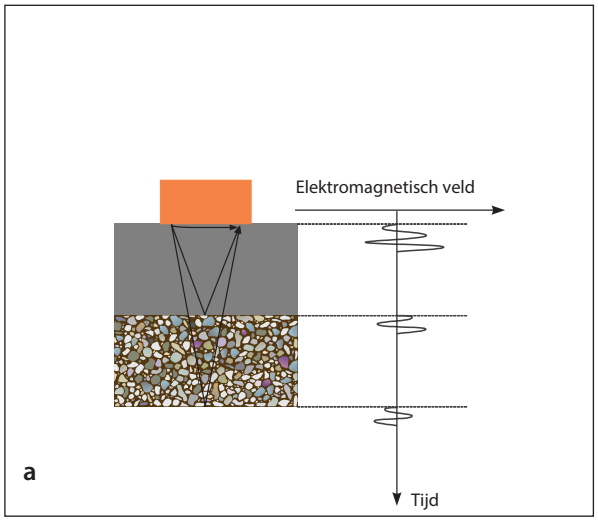
Metingen

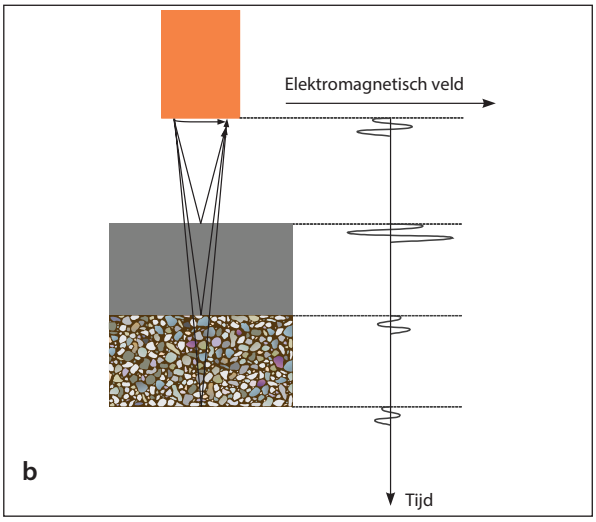
1.1 Keuze van de uitrusting

1.1.1 Soort van antenne

Er zijn verschillende soorten van antennes. 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 verschil van de tijd tussen het verzenden van zeer korte elektromagnetische impulsen (van de orde van grootte van enkele nanoseconden) en het ontvangen van het gereflecteerde signaal (figuur 2). Het overeenkomstig signaal omvat een brede band van frequenties in het frequentiedomein. De centrale frequentie is de frequentie met de grootste amplitude. Andere radars (*stepped frequency*) zenden continue sinusoïdale golven met verschillende frequenties uit en reconstrueren nadien eventueel het signaal in het tijdsdomein met behulp van een omgekeerde Fouriertransformatie.



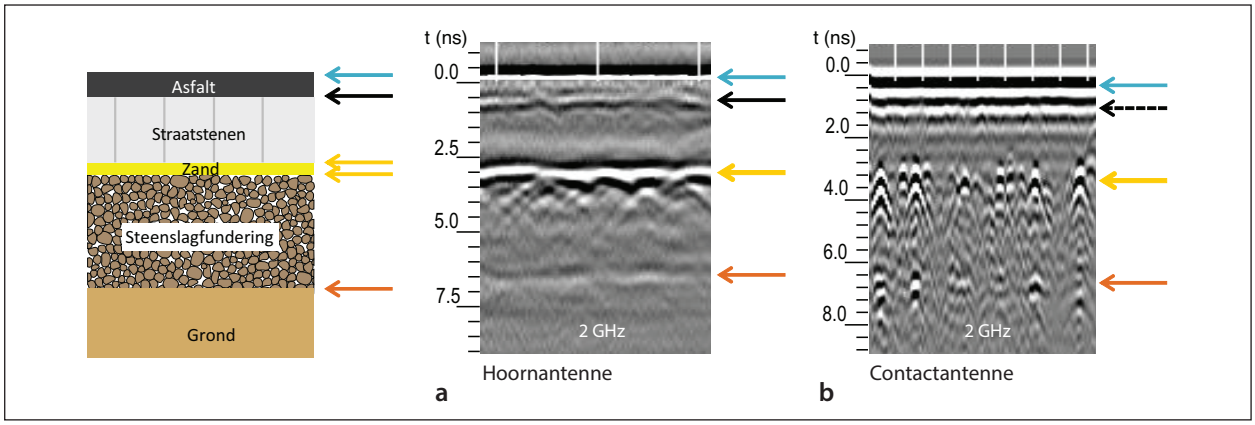


Figuur 2 *Vergelijking van de werking van een contactantenne (a) en een hoornantenne (b)*

Voor weginspectie worden bij voorkeur **hoornantennes** met een tijdgerelateerde radar en relatief hoge frequenties (1 tot 2 GHz) (figuur 2 (b), blz. 1) gebruikt. Ze kunnen op een voertuig worden gemonteerd, zodat metingen in het 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 indringt. Daarom is de indringingsdiepte beperkt. De antenne moet goed worden bevestigd, om plotselinge verschuivingen als gevolg van oneffenheden of stroefheid van het wegoppervlak te vermijden.

Contactantennes (figuur 2 (a), blz. 1) moeten zich tijdens metingen zo dicht mogelijk tegen de grond bevinden. Ze worden vaak op een wagentje geplaatst dat door de operator tijdens het stappen wordt voortgeduwd. Voor weginspectie 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 in, zodat voor een gegeven diepte een betere resolutie wordt verkregen.

Met contactantennes kan de constructie gerichter in een specifieke punt worden onderzocht, zodat wapeningen en plaatselijke gebreken visueel beter kunnen worden waargenomen. 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 beter visueel kunnen worden waargenomen. Dit wordt geïllustreerd op figuur 3. Met een 2 GHz-hoornantenne wordt de onderzijde van vrij onregelmatige straatstenen als een contactvlak weergegeven (figuur 3 (a)) en met een 2 GHz-contactantenne als een opeenvolging van plaatselijke reflectoren (hyperbolen) (figuur 3 (b)).



Figuur 3 *Invloed van de soort van antenne (hoornantenne (a) of contactantenne (b)) op de beeldweergave van ruwe contactvlakken*

Contactantennes zijn minder geschikt om de dikte van verhardingslagen in wegconstructies met vereenvoudigde berekeningswijzen te bepalen. De vrij lange golf aan het oppervlak bedekt vaak de eerste reflectie (voor asfaltwegen) en omdat de directe golf en meervoudige oppervlaktereflectie onlosmakelijk verbonden zijn, is de nultijd zonder specifieke verwerking moeilijk te bepalen. Deze antennes zijn meestal geblindeerd, om de reflectie op voorwerpen boven het oppervlak en interferenties met elektromagnetisch omgevingsgeluid (gsm, radiogolven, enz.) te vermijden. Bovendien beschermt de blindering de operator tegen straling van het toestel.

Sommige merken bieden ook antennenetwerken *(antenna arrays)* met verschillende zend- en ontvangantennes aan. Op die manier kunnen verschillende profielen tegelijk worden gemeten en kunnen dwarsprofielen en bovenaanzichten sneller worden gereconstrueerd. Bovendien maken de variabele afstanden tussen de zend- en ontvangstantennes het mogelijk om de permittiviteit van het medium te schatten met behulp van een zogenoemde *Common Midpoint* (CMP)-analyse (figuur 13, blz. 21).

In de literatuur (Leng et al., 2009) worden aanbevelingen gedaan voor de keuze van de antenne volgens de verhardingssoort. Voor bitumineuze verhardingen worden 2 GHz-hoornantennes aanbevolen, of 1 GHz-antennes voor een indringingsdiepte van meer dan 40 cm. Voor betonverhardingen worden bij voorkeur contactantennes gebruikt, met een frequentie van meer dan 1,5 GHz wanneer de te onderzoeken plaat minder dan 20 cm dik is. Voor gemengde verhardingen zal een radarsysteem met verscheidene kanalen, antennes en frequenties (bijvoorbeeld een 2 GHz-hoornantenne en een 900 MHz-contactantenne) de beste resultaten leveren (Leng et al., 2009).

1.1.2 Systeem voor gegevensinzameling

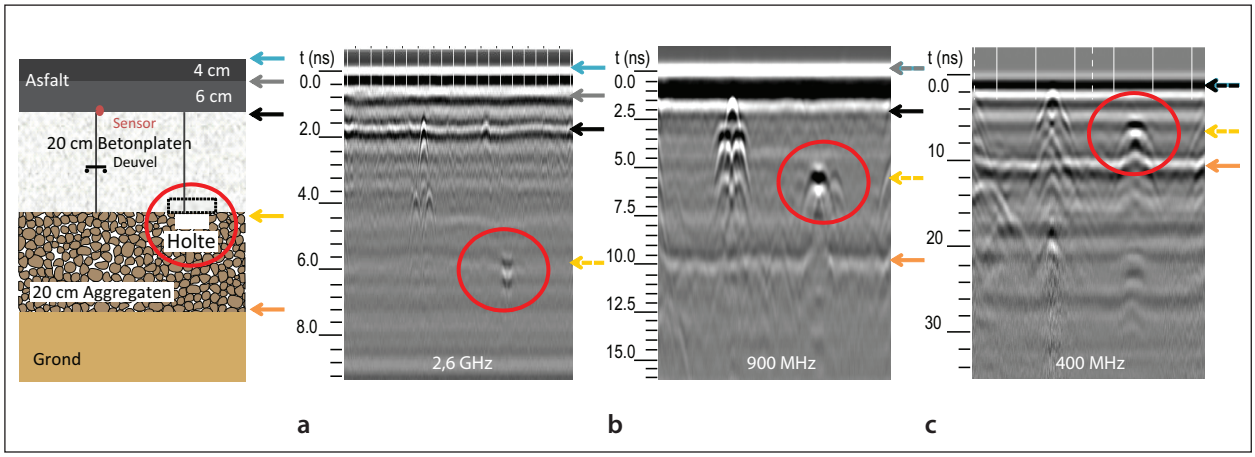
De radarantennes zijn verbonden met een systeem voor gegevensinzameling (regeleenheid), dat de signalen van de zend- en ontvangantennes synchroniseert, om bemonsterde golven te verkrijgen en de gereflecteerde radarimpulsen op te vangen.

Elke fabrikant biedt verschillende systemen aan. Bij de keuze van het systeem dient met de volgende parameters rekening te worden gehouden:

- het frequentiebereik of de centrale werkingsfrequentie van antennes die compatibel zijn met het gegevensinzamelingssysteem;
- de stabiliteit van het signaal, in het bijzonder bij temperatuurschommelingen;
- de snelheid van gegevensinzameling en signaalverwerking;
- de autonomie en de omvang van de uitrusting;
- de gevoeligheid en de signaal-ruisverhouding;
- de mogelijkheid om metingen met verschillende antennes tegelijk uit te voeren;
- het onmiddellijk in beeld brengen van de resultaten. Vaak is naast het systeem voor gegevensinzameling ook een pc nodig;
- de mogelijkheid om tijdens het inzamelen van gegevens een eerste, ruwe verwerking uit te voeren.

1.1.3 Frequentie

Voor elke soort van grondradar zijn een reeks antennes met verschillende frequenties beschikbaar. De keuze van de frequentie hangt af van het beoogde gebruik. Een hogere frequentie geeft een betere resolutie, maar een geringere indringingsdiepte; bij een lagere frequentie is de indringingsdiepte groter, maar de resolutie minder goed. De voor- en nadelen van deze kenmerken moeten tegen elkaar worden afgewogen en vaak dient een compromis te worden gesloten. Bij wijze van voorbeeld toont figuur 4 de signalen van een contactantennemeting op betonplaten met asfaltoverlaging en plaatselijke heterogeniteit (holte, deuvels) voor drie frequenties: 2,6 GHz (a), 900 MHz (b) en 400 MHz (c).



Figuur 4 *Vergelijking van de signalen van een contactantennemeting met drie verschillende frequenties. De gemeten zone bestaat hier uit betonplaten met een asfaltoverlaging en plaatselijke heterogeniteit (holte, deuvels, sensor).*

Een hogere frequentie (kortere golflengte van het uitgezonden signaal) levert een betere resolutie op, waardoor twee dichter bij elkaar gelegen contactvlakken kunnen worden onderscheiden. Als de golflengte te groot is (d.w.z. te lage frequentie) in verhouding tot de afstand tussen twee contactvlakken, interfereren de twee reflecties en is op het radarprofiel slechts één reflectie zichtbaar. De resolutie wordt doorgaans geschat op een kwart van de golflengte in het medium (Annan, 2005).

Een gekozen frequentie f (in GHz) moet voldoen aan de vergelijking:

$$f \geq \frac{v}{4\Delta z} = \frac{7{,}5}{\Delta z\sqrt{\varepsilon'_r}}$$

Δz = de afstand tussen twee contactvlakken, in cm.
ε'_r = de relatieve diëlektrische permittiviteit van het materiaal.
v = de voortplantingssnelheid, in cm/ns.

De snelheid v kan worden berekend met de vergelijking:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_r}}$$

c = de lichtsnelheid (30 cm/ns).

In tabel 1 is ter informatie de permittiviteit en de snelheid van verschillende materialen voor wegenbouw weergegeven.

Materiaal	ε'_r	v **(cm/ns)**
Lucht	1	30
Water	81	3,3
Droog asfalt	2 - 5	13,4 - 21,2
Vochtig asfalt	6 - 12	8,7 - 12,2
Droog beton	4 - 8	10,6 - 15
Vochtig beton	8 - 15	7,7 - 10,6
Bitumen	2,7	18,3
Droog zand	2,5 - 6	12,2 - 21,2
Vochtig zand	10 - 25	5,5 - 9,5
IJs	2,5 - 4	15
Droge grond	4 - 10	9,5 - 15
Vochtige grond	10 - 30	5,5 - 9,5
Bevroren grond	4 - 8	10,6 - 15
Droge kalksteen	7	11,3
Vochtige kalksteen	8	10,6

Tabel 1 *Kenmerkende waarden voor de diëlektrische permittiviteit ε'_r en bijbehorende snelheid v bij 100 MHz voor verschillende wegenbouwmaterialen (gewijzigd volgens Daniels, 2004)*

Vaak moet de onderzoeksfrequentie worden beperkt om een voldoende indringingsdiepte te bereiken. Naast de frequentie hangt de indringingsdiepte ook van andere parameters af zoals het elektrisch geleidingsvermogen van het medium, de configuratie en het richtvermogen van de (lucht- of grondgekoppelde) antenne en de dynamica van de radar. In een eerste benadering kan het criterium voor de frequentie (in MHz) om een gegeven indringingsdiepte *D* (in m) te bereiken als volgt worden geschreven (Annan en Cosway, 1992):

$$f < \frac{1200\sqrt{\varepsilon'_r - 1}}{D}$$

In een heterogeen medium kan de keuze voor een lagere frequentie door een andere parameter worden ingegeven, namelijk de *clutter* (storing of ruis). Als het signaal een voldoende hoge frequentie heeft om de heterogene elementen in de constructie (aggregaten, enz.) te detecteren, genereert elk heterogeen element een reflectiehyperbool. Deze hyperbolen kunnen de reflectie op het beoogde doel in het radarprofiel maskeren. Het criterium om de *clutter* te beperken, wordt als volgt geschreven (Annan en Cosway, 1992):

$$f < \frac{30}{\Delta L\sqrt{\varepsilon'_r}}$$

ΔL = de afmeting van de heterogene elementen in het materiaal, in m.

In tabel 2 is voor verschillende onderzoeksfrequenties en een gemiddeld wegenbouwmateriaal (ε'_r = 6,25) de indringingsdiepte, de verticale resolutie (de minimale afstand om twee verticaal gealigneerde contactvlakken te onderscheiden) en de kleinste detecteerbare afmeting van heterogene elementen weergegeven. De waarden die met de voornoemde vergelijkingen zijn berekend, zijn indicatief.

Frequentie (MHz)	Verticale resolutie (m)	Indringingsdiepte (m)	Kleinste afmeting heterogeniteit (m)
2 600	0,012	1,06	0,0046
2 000	0,015	1,37	0,006
1 000	0,03	2,75	0,012
900	0,033	3,06	0,013
400	0,075	6,87	0,03
200	0,15	13,75	0,06
100	0,3	27,50	0,12

Tabel 2 *Schatting volgens frequentie van de verticale resolutie, de indringingsdiepte en de kleinste detecteerbare afmeting van heterogene elementen voor een weinig geleidend materiaal*

Deze waarden gelden voor een weinig geleidend materiaal. Bij een sterk geleidend materiaal (bijvoorbeeld kleihoudende grond of dooizout) wordt de doorgezonden golf afgezwakt en is de indringingsdiepte kleiner. De golf die in het materiaal doordringt, is zwakker voor hoornantennes en hoogfrequentieantennes omdat de emissie vaak minder sterk is dan bij laagfrequentieantennes.

De literatuur vermeldt ook veel kleinere indringingsdiepten van antennes waarmee de staat van materialen kan worden onderzocht (tabel 3).

In tabel 4 zijn de grenswaarden weergegeven die volgens onze praktijkervaring meestal in de wegenbouw en de geotechniek worden bereikt.

Indringingsdiepte (m)	Centrale frequentie (MHz)
50	10
30	25
10	50
7	100
2	200
1	500
0,5	1 000

Tabel 3 *Keuze van de centrale frequentie van de antennes als functie van de gewenste indringingsdiepte (Annan en Cosway, 1992)*

Soort en frequentie van de antenne	Indringingsdiepte (m)
Contactantenne 2 600 MHz	0,35
Contactantenne 2 000 MHz	0,5
Hoornantenne 2 000 MHz	0,5
Hoornantenne 1 000 MHz	0,8
Contactantenne 1 000 MHz	1
Contactantenne 900 MHz	1
Contactantenne 400 MHz	2,5
Contactantenne 200 MHz	5
Contactantenne 100 MHz	25

Tabel 4 *Indringingsdiepte van radarantennes volgens de ervaring van het OCW*

De indringingsdiepte voor een gegeven antenne hangt af van de meetlocatie. Vóór elk onderzoek dient een radarmeting ter plaatse te worden uitgevoerd om de indringingsdiepte te toetsen.

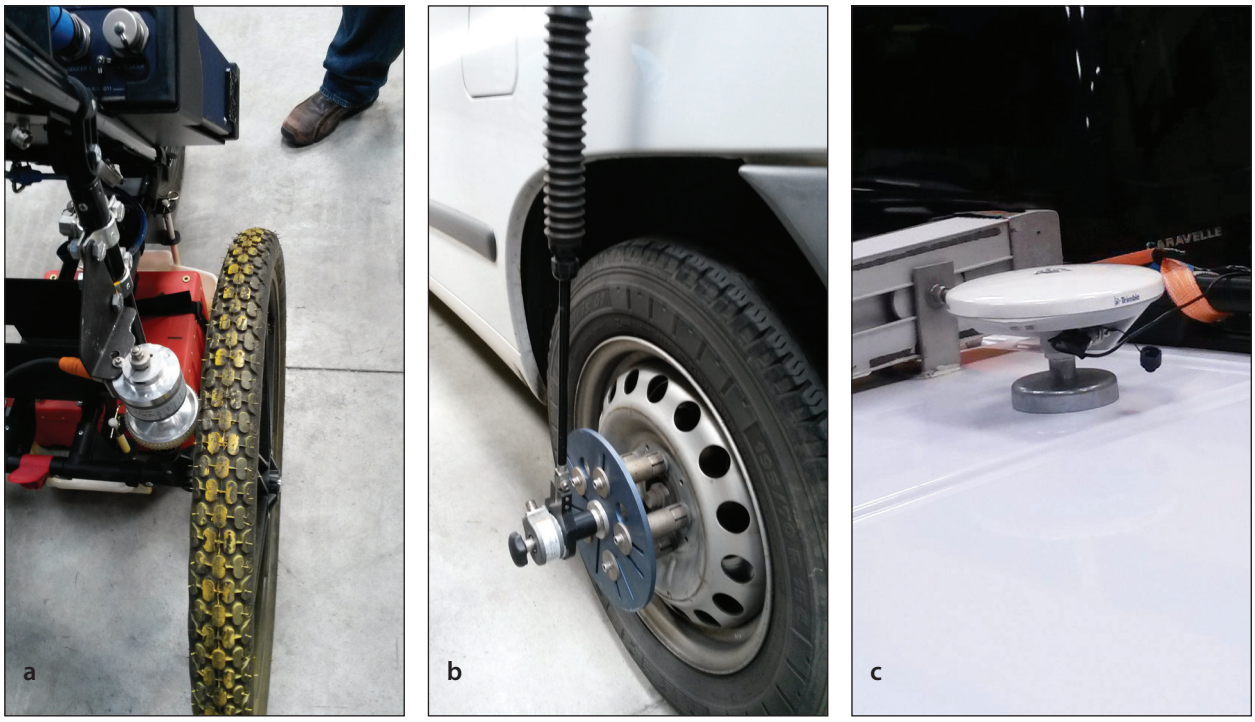
1.1.4 Meting van de afstand

Er zijn verschillende systemen om de afstand die tijdens een proef door de antenne wordt afgelegd, te meten.

Het gangbaarste systeem is een afstandsmeter op wiel die aan de antenne of het wagentje wordt bevestigd (figuur 5 (a)).

Als de antenne op een voertuig wordt bevestigd, kan een voertuigwiel met een aangepaste uitrusting als hodometer dienst doen (figuur 5 (b)).

In andere gevallen wordt gebruik gemaakt van een gps-systeem (figuur 5 (c)), waardoor geolokalisatie van de verrichte metingen mogelijk is en de meetgegevens onmiddellijk in kaart kunnen worden gebracht. Voor heel wat toepassingen kunnen gps- en plaatselijke metingen (afstandsmeter op wiel) worden gecombineerd, om tot een optimale verwerking en weergave van de resultaten te komen.



Figuur 5 *Uitrusting voor afstandsmetingen bij grondradartechniek: op het wagentje voor contactantennes (a); op een voertuigwiel voor hoornantennes (b); gps-antenne op het voertuigdak (c)*

1.2 Keuze van de parameters voor de metingen

De keuze van de parameters is van essentieel belang voor de kwaliteit van de meetgegevens. Sommige parameters kunnen later worden bijgestuurd, maar in andere gevallen kan een onzorgvuldige keuze een onomkeerbaar ongunstig effect op de kwaliteit van de meetgegevens hebben.

Parameters zijn niet onafhankelijk van alle andere. Een belangrijke beperking is de meet-, transmissie- en registratiesnelheid van het systeem voor gegevensinzameling. Om verzadiging van het systeem tegen te gaan, zal een compromis moeten worden gesloten tussen verschillende parameters: het aantal monsters per meetspoor, de registratietijd (*time range*), de meetstap of tijdsfrequentie (meetspoor/m of meetspoor/s), de snelheid van gegevensinzameling, de bemonsteringsfrequentie en de parameters voor gemiddeldeberekening (*stacking*). Al deze parameters worden in de hiernavolgende paragrafen uitgebreid beschreven.

Over het algemeen is het verkieslijk de parameters voor gegevensinzameling in te stellen op het medium waar de meeste metingen plaatsvinden. Bijvoorbeeld, als 90 % van de metingen op asfalt en 10 % op beton wordt uitgevoerd, is het aanbevolen de parameters op een asfaltoppervlak in te stellen. Voor gedetailleerd onderzoek kan het nuttig zijn de metingen op te splitsen en de parameters op elke soort van te onderzoeken medium afzonderlijk in te stellen.

1.2.1 Meetstap

De afstand tussen metingen hangt af van de gewenste horizontale resolutie voor het onderzoek en van de vereiste minimale meetsnelheid. In tabel 5 zijn ter informatie enkele waarden voor weginspectie weergegeven. Als tijdens de gegevensinzameling geen afstand wordt gemeten, wordt een tijdsfrequentie (meetspoor/s) bepaald.

Soort van antenne	Frequentie van de antenne	Meetstap
Hoornantennes Weginspectie (bovenlagen)	2 GHz	10 meetsporen/m – Gewoon onderzoek 20 meetsporen/m – Gedetailleerd onderzoek
	1 GHz	10 meetsporen/m – Gewoon onderzoek 20 meetsporen/m – Gedetailleerd onderzoek
Contactantennes (ondergrondse kabels en leidingen)	400 MHz	50 meetsporen/m – Gewoon onderzoek 100 meetsporen/m – Gedetailleerd onderzoek

Tabel 5 *Afstand tussen metingen als functie van de soort van antenne en de gewenste horizontale resolutie*

1.2.2 Bemonsteringsinterval

Het bemonsteringsinterval is het interval in de tijd tussen twee opeenvolgende punten van een meetspoor. Deze parameter dient bij de gegevensinzameling correct te worden ingesteld, om het gediscretiseerde signaal zonder informatieverlies te kunnen reconstrueren. Volgens de stelling van Nyquist moet het bemonsteringsinterval kleiner zijn dan de helft van het interval voor de hoogste frequentie van het signaal. Voor een radarsignaal wordt aangenomen dat de hoogste frequentie in het signaal ongeveer tweemaal hoger is dan de centrale frequentie. In de praktijk is het aanbevolen een marge te voorzien. Zo kiest men het interval dat overeenstemt met tienmaal de centrale frequentie. In tabel 6 is de aldus berekende bemonsteringsintervallen weergegeven. Het zijn maximumwaarden, die niet mogen worden overschreden. Ter informatie wordt ook de lengte van een meetspoor van 512 punten (§ 1.2.4) voor deze intervallen gegeven.

De aldus berekende registratietijden zijn aanzienlijk hoger dan deze die doorgaans voor de overeenkomstige antennes worden toegepast (tabellen 6 en 7). In de praktijk doen zich dan ook weinig bemonsteringsproblemen voor.

Noot: bij sommige software wordt deze parameter als bemonsteringsfrequentie uitgedrukt. Dat is het omgekeerde van het bemonsteringsinterval.

Centrale frequentie	Maximaal bemonsteringsinterval	Registratietijd voor 512 punten per meetspoor
2 GHz	0,05 ns	25 ns
1 GHz	0,10 ns	51 ns
400 MHz	0,25 ns	128 ns
200 MHz	0,50 ns	256 ns

Tabel 6 *Bemonsteringsinterval voor de verschillende antennes*

1.2.3 Registratietijd

De registratietijd (*time range*) moet overeenstemmen met de duur waarvoor de signaal-ruisverhouding aanvaardbaar is of, bij ontstentenis, met de tijd die nodig is om zeker te zijn dat het onderzochte evenement geregistreerd is. De registratietijd moet groot genoeg zijn om alle informatie te exploiteren, maar mag niet te groot zijn (onbruikbare registratie van ruis). Deze parameter hangt af van de gebruikte frequentie (neemt af naarmate de frequentie toeneemt) en van de elektrische kenmerken van het medium.

In een eerste benadering kan worden aangenomen dat voor elke nanoseconde (ns) onder het oppervlak 5 cm van de constructie kan worden onderzocht.

Ter informatie zijn in tabel 7 de registratietijden voor radarsystemen voor weginspectie weergegeven.

Centrale frequentie	Registratietijd
2 GHz	12 - 15 ns
1 GHz	20 ns
400 MHz	60 ns
200 MHz	150 ns

Tabel 7 *Gebruikelijke registratietijden voor weginspectie*

Vóór elk onderzoek dient een test te worden uitgevoerd, om een optimale instelling van deze parameter te garanderen.

1.2.4 Aantal monsters (of punten) per meetspoor

Het aantal monsters of punten per meetspoor hangt af van de twee voorgaande parameters (bemonsteringsinterval en registratietijd). Deze parameter is gelijk aan de registratietijd, gedeeld door het bemonsteringsinterval.

Bij sommige systemen (bijvoorbeeld GSSI-systemen) kiest de gebruiker deze parameter in plaats van het bemonsteringsinterval. In de praktijk wordt vaak als waarde 512 of 1 024 toegepast, omdat sommige apparaten uit numerieke overwegingen (in het bijzonder de Fouriertransformatie voor de filters) een macht van 2 vereisen.

Bij andere systemen kiest de gebruiker de bemonsteringsfrequentie en de registratietijd. De software leidt er het aantal monsters per spoor uit af.

1.2.5 Gemiddeldeberekening (*stacking*)

Sommige radarsystemen bieden de mogelijkheid om gegevens te registreren met het *stacken* van signalen. Elk geregistreerd meetspoor is dan het gemiddelde van een bepaald aantal meetsporen, waardoor de signaal-ruisverhouding verbetert. Deze functie vertraagt de gegevensinzameling echter aanzienlijk en wordt dan ook weinig gebruikt als de ruis beperkt is. Dat is het geval bij ondiepe toepassingen. *Stacking* kan ook nadien bij de verwerking van de signalen worden toegepast, met hetzelfde positieve effect voor ruisvermindering. Omdat *stacking* het aantal meetsporen vermindert, dienen dan bij het meten voldoende meetsporen te worden geregistreerd.

1.2.6 Versterking

Om de zichtbaarheid van het signaal tijdens de gegevensinzameling te optimaliseren, dient vaak een versterking te worden toegepast. De versterkingsfactor kan een constante, lineaire of exponentiële functie zijn (§ 2.3, blz. 18). Bij sommige software gaat het om een visuele versterking (*display gain*), waarmee het signaal enkel tijdens de weergave wordt versterkt. Bij andere software is de versterking permanent. Ze mag dan niet te groot zijn, om verzadiging van het geregistreerde signaal en informatieverlies te vermijden.

Exponentiële of lineaire versterkingsfuncties worden toegepast om de visuele weergave van dieper liggende contactvlakken te verbeteren zonder echter het signaal met de directe golf te verzadigen. Daarbij dient de nodige omzichtigheid in acht te worden genomen, want ze veroorzaken mogelijk kunstmatige amplitudewisselingen die ten onrechte als grote diëlektrische contrastveranderingen zouden kunnen worden geïnterpreteerd.

Bij hoornantennes wordt meestal voor een constante versterking gekozen, met een amplitude die wordt bepaald op basis van de intensiteit van de oppervlaktereflectie. Idealiter is deze reflectie gelijk aan ongeveer 50 % van de maximale amplitude. Tijdens het kalibreren van de antenne op een metalen plaat dient te worden nagegaan of de versterking geen aanleiding geeft tot verzadiging van het signaal.

Bij contactantennes wordt doorgaans een lineaire versterking toegepast. Om ervoor te zorgen dat de geregistreerde gegevens de maximale amplitude niet overtreffen, is het aanbevolen om een versterkingsfunctie te kiezen met een amplitude van de directe golf die gelijk is aan 2/3 van die maximale waarde.

1.2.7 Filter

Bij sommige systemen kan tijdens de gegevensinzameling een frequentiefilter (FIR) worden toegepast, om bij het meten een beter beeld van de resultaten te verkrijgen. Ook hier kan de versterking tijdelijk (zonder invloed op de geregistreerde gegevens) of permanent (met invloed op de geregistreerde gegevens) zijn.

Over het algemeen strekt het nuttige frequentiebereik zich uit van ongeveer een kwart van de centrale frequentie tot het dubbele ervan. Ter informatie zijn in tabel 8 de hoog- en laagdoorlaatfilters weergegeven die het OCW voor weginspectie toepast. Een spectraalanalyse maakt het mogelijk de filters te verfijnen, om de signaal-ruisverhouding te verbeteren.

Voor sommige antennes hebben de fabrikanten speciale filters ontwikkeld, om ruis te minimaliseren.

Hoornantenne 2 GHz	Hoogdoorlaatfilter: 250 MHz Laagdoorlaatfilter: 5 000 MHz Eventueel door de fabrikant geleverde interferentiefilter
Hoornantenne 1 GHz	Hoogdoorlaatfilter: 250 MHz Laagdoorlaatfilter: 3 000 MHz
Contactantenne 400 MHz	Hoogdoorlaatfilter: 100 MHz Laagdoorlaatfilter: 800 MHz

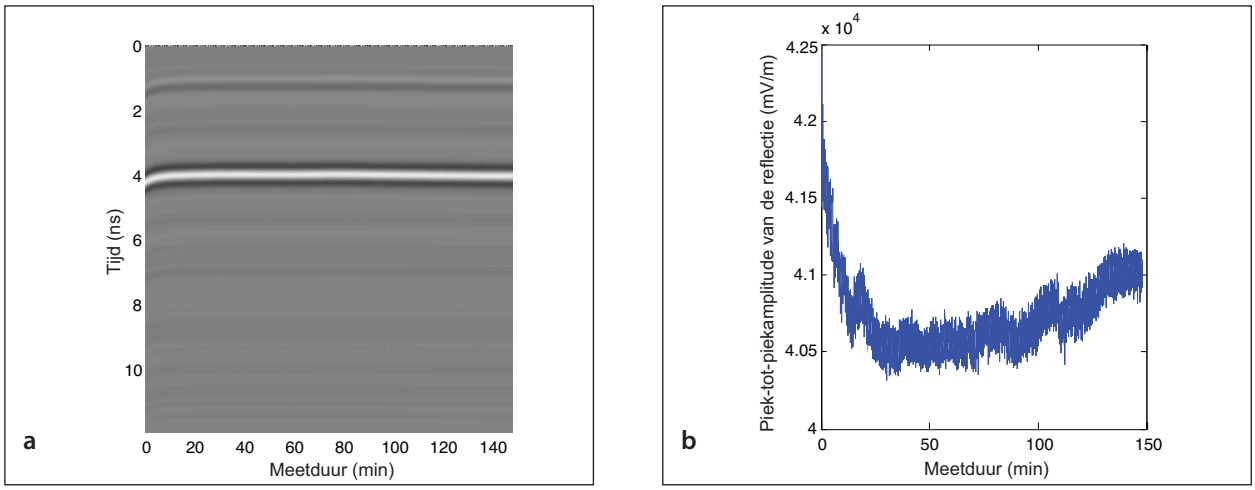
Tabel 8 *Door het OCW toegepaste filters voor weginspectie*

1.3 Voorbereiding van de metingen

1.3.1 Opwarmingstijd

Voordat de metingen worden gestart, moeten de antennes worden opgewarmd totdat de amplitudes en de aankomsttijd van de signalen voldoende zijn gestabiliseerd. De opwarmingstijd hangt af van het systeem, de omgevingstemperatuur en de beoogde toepassing (uitgebreide analyse van de amplitudes). Aanbevolen wordt hierover informatie bij de fabrikant in te winnen en zelf enkele tests uit te voeren.

Bij wijze van voorbeeld wordt op figuur 6 (a) een continue meting met een 2 GHz-hoornantenne vanaf het inschakelen getoond. De verandering van de aankomsttijd van de directe golf is met het blote oog te zien. De piek-tot-piekamplitude van deze reflectie verandert eveneens (figuur 6 (b)). Na de eerste dertig minuten wordt de verandering kleiner, maar de piek-tot-piekamplitude stabiliseert zich nooit volledig.



Figuur 6 *Continue meting met een 2 GHz-hoornantenne tijdens en na de opwarming (a): piek-tot-piekamplitude van de reflectie tijdens en na de opwarming (b)*

Deze resultaten tonen aan dat voor deze antenne steeds een opwarmingstijd van ten minste vijfentwintig tot dertig minuten nodig is. Sommige fabrikanten bevelen bij koud weer een langere opwarmingstijd aan. Uit onze metingen met deze antenne is echter niet naar voren gekomen dat dit nuttig zou zijn. Als de metingen enige tijd worden onderbroken (verifiëren van gegevens, middagpauze, verplaatsen van het voertuig zonder gegevensinzameling), wordt aanbevolen opnieuw enige opwarmingstijd in acht te nemen vooraleer de gegevensinzameling opnieuw te starten.

1.3.2 Kalibratie van de antenne

Om na de metingen bepaalde functies voor signaalverwerking te kunnen toepassen, dient meestal een kalibratie van de antenne te worden uitgevoerd. Dat is het geval voor de beoordeling van de permittiviteit van het oppervlak als de metingen met een hoornantenne zijn uitgevoerd (bijlage I) of voor correctie van de nultijd (§ 2.1). De kalibratie dient te worden herhaald voor elke meetcampagne en bij elke wijziging van de positie van de antenne of van de parameters voor gegevensinzameling. De werkwijze verschilt naargelang van het systeem. Daarom wordt aanbevolen informatie bij de leverancier in te winnen. Men onderscheidt verschillende soorten van kalibraties:

- **dynamische kalibratie** op een voldoende grote metalen plaat. Zo wordt een totaalreflectie gemeten voor alle posities van de antenne die zich in werkelijkheid zullen voordoen (bijlage I.2);
- **statische kalibratie** op een voldoende grote metalen plaat, op verschillende hoogten;
- **kalibratie in lucht**, waarbij enkel het directe signaal wordt gemeten.

Als de metingen enige tijd worden onderbroken (verifiëren van de gegevens, middagpauze, verplaatsen van het voertuig zonder gegevensinzameling), dienen de antennes opnieuw te worden gekalibreerd. Om de stabiliteit van het systeem na te gaan, kan het ook nuttig zijn op het einde van de metingen opnieuw een kalibratie uit te voeren.

1.3.3 Kalibratie van de hodometer

De hodometer wordt gekalibreerd door een gegeven afstand nauwkeurig te meten. Een dergelijke kalibratie dient geregeld (ten minste om de drie maanden) en zeker bij elke verandering aan het voertuig te worden uitgevoerd. Sommige parameters (belading van het voertuig, druk of slijtage van de banden, enz.) kunnen immers aanleiding geven tot foutieve afstandsmetingen.

1.4 Uitvoering van de metingen

Tijdens metingen in het verkeer dienen de nodige voorzorgsmaatregelen te worden genomen, om de veiligheid van de weggebruikers, de operators en de radaruitrusting te garanderen.

Aanbevolen wordt, geen metingen uit te voeren bij regenweer of op een nat wegdek (grotere afzwakking van het signaal, grotere oppervlaktereflectie en vochtigheidsgradiënten waardoor lagen niet als homogeen kunnen worden beschouwd). In sommige specifieke gevallen (bijvoorbeeld detectie van gebreken in een afdichtingsmembraan of van holten) kan de aanwezigheid van water in de wegconstructie echter het contrast van de permittiviteit met het omringende materiaal vergroten en dus ook de detecteerbaarheid.

Vorst doet de indringingsdiepte van de radargolven toenemen en vormt dus geen belemmering voor radarmetingen. Niettemin moet worden vermeden metingen uit te voeren wanneer de constructie gedeeltelijk bevroren of ontdooid zou kunnen zijn. Het vriesfront kan dan extra, kunstmatig gevormde contactvlakken doen ontstaan, die overeenstemmen met plaatselijke permittiviteitswisselingen van anders homogene lagen. Bovendien zou dan eventueel een langere opwarmingstijd voor de antennes nodig zijn (§ 1.3.1).

Mobiele telefoons kunnen niet te verwaarlozen elektromagnetische storingen veroorzaken. Operators schakelen hun toestel dan ook het best uit.

Idealiter wordt alle praktische informatie in verband met de metingen (plaats, datum, gebruikte antennes, bestandsnamen en -mappen, weersomstandigheden, waarnemingen, operators, enz.) in een logboek genoteerd. In de bestandskop dient minimale informatie (plaats, datum, antennes) te worden vermeld.

Het begin- en het eindpunt van een meting dienen nauwkeurig te worden aangeduid met behulp van een vast referentiepunt op de weg (kilometerpaal, woningen, enz.) of een markering met onuitwisbare verf. Ook op het voertuig moet een referentiepunt worden gekozen. Dat kan het middelpunt van de antenne, het voorste wiel van het voertuig of de plaats van de bestuurder zijn. In de twee laatste gevallen dient de afstand van het gekozen referentiepunt tot het midden van de antenne te worden gemeten.

Tijdens de gegevensinzameling is het nuttig op het radarprofiel merktekens (verandering in het oppervlak, brug, enz.) aan te brengen. De overeenstemmende waarnemingen worden in het logboek genoteerd. Deze werkwijze is eenvoudiger te volgen als er twee operators zijn.

Het kan ook nuttig zijn het wegoppervlak en de antenne te filmen, om de interpretatie van de meetgegevens en de positie van de merktekens ten opzichte van de zichtbare referentiepunten op het traject te vergemakkelijken.

Met hoornantennes worden de metingen doorgaans in de lengterichting uitgevoerd, in het midden van een rijstrook. Naargelang van de weg worden ze vaak in de andere rijrichting en op elke rijstrook herhaald. Als zijdelingse veranderingen in de wegopbouw worden vermoed, kunnen verschillende meetovergangen over dezelfde rijstrook met telkens een andere positie van de antenne nuttig zijn. Als het mogelijk is, worden enkele dwarsprofielen gerealiseerd, met een contact- of hoornantenne, naargelang van de beschikbare ruimte. Apparatuur met een antennenetwerk is een mogelijk alternatief. Als de radarmetingen in combinatie met andere metingen (kernboringen, valgewichtdeflectiemetingen, enz.) worden uitgevoerd, is het belangrijk dat ze in dezelfde as worden uitgevoerd.

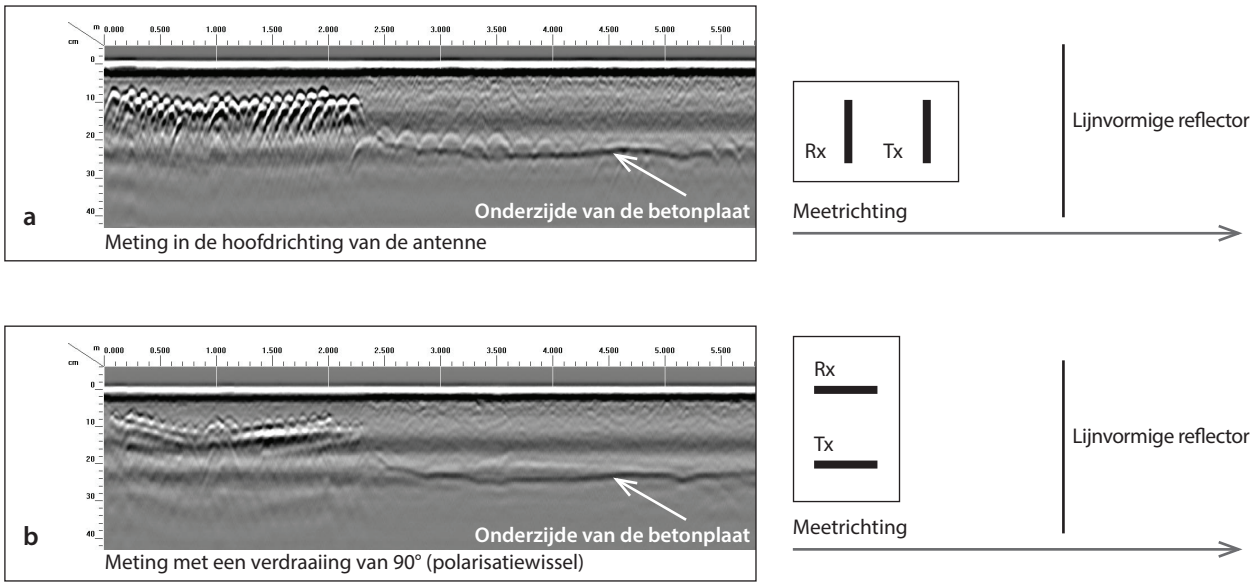
Contactantennes kunnen ook worden gebruikt om een bepaalde zone (lengte- en dwarsprofielen) langs de lijnen van een raster te bemonsteren. De afmetingen van het raster worden gekozen als functie van de grootte van de gezochte afwijking. De antenne wordt dan bevestigd op een wagentje met meetwiel dat door de operator wordt voortgeduwd. Op die manier kan de onderzochte zone driedimensionaal in beeld worden gebracht en kan de ruimtelijke omvang van afwijkingen beter worden bepaald.

Contactantennes kunnen ook door een langzaam rijdend voertuig worden voortgetrokken. Op die manier blijft het contact tussen antenne en grond behouden en kan een groot aantal sporen per meter worden geregistreerd.

De oriëntatie van de antenne is een parameter die de meetresultaten kan beïnvloeden, in het bijzonder de zichtbaarheid van lijnvormige reflectoren zoals wapeningen. De antenne is gevoeliger voor reflectoren die evenwijdig zijn aan de dipolen van de zend- en ontvangstantenne en zich dus loodrecht op de as van de antenne bevinden. Bij een klassiek onderzoek zal de radarantenne gemakkelijker deze reflectoren detecteren, die dan als hyperbolen zullen verschijnen.

Als de antenne ten opzichte van de hoofdrichting 90° wordt gedraaid, zullen reflecties op wapeningen worden geminimaliseerd. Deze oplossing kan bijvoorbeeld nuttig zijn wanneer men eerder informatie over de onderzijde van de betonplaten dan over de wapeningen wil verkrijgen.

Dit wordt geïllustreerd op figuur 7. Hetzelfde profiel werd gemeten met de antenne in de hoofdrichting en vervolgens met een verdraaiing van 90°. Door de draaiing van de antenne zijn de hyperbolen van de wapening onderaan de betonplaat haast onzichtbaar, waardoor de reflectie op de onderzijde beter waarneembaar is.



Figuur 7 *Vergelijking van profielen gemeten met een 2,6 GHz-contactantenne, respectievelijk in de hoofdrichting van de antenne (a) en met een verdraaiing van 90° (b)*

Hoofdstuk 2

Gegevensverwerking

Het doel van gegevensverwerking is de kwaliteit van het geregistreerde radarbeeld te verbeteren en interessante reflectoren boven kunstmatig gevormde elementen, resonanties en ruis te doen uitkomen. Daarbij worden de volgende klassieke fasen doorlopen:

- correctie van de nultijd (verticale verspringing van meetsporen voor de correctie van de nultijd, zodat daarna met behulp van een schatting van de snelheid in het materiaal een tijd-diepteconversie kan worden uitgevoerd);
- filteren van laagfrequente ruis en horizontale resonanties (horizontale of verticale hoogdoorlaatfilter, *background removal*);
- filteren van hoogfrequente ruis (verticale laagdoorlaatfilter, horizontale laagdoorlaatfilter, *stacking*);
- versterking (toename van de amplitude van het signaal met de diepte).

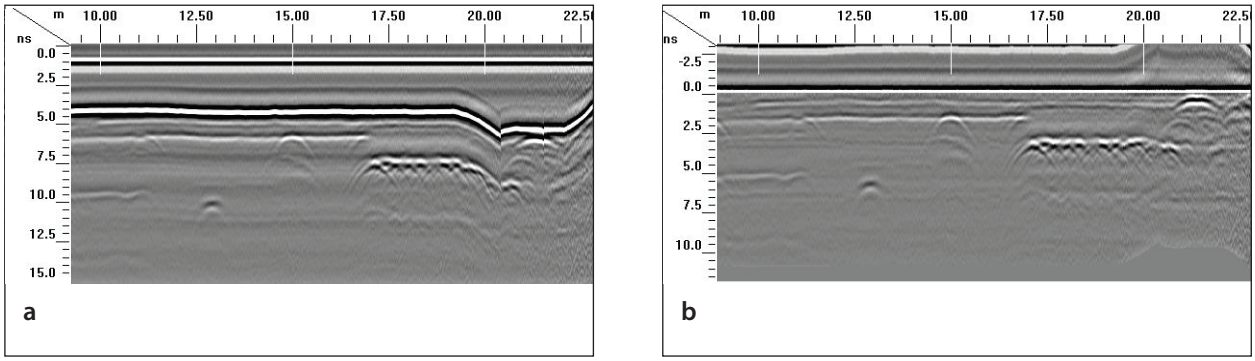
Eventueel zijn ook nog twee bijkomende fasen mogelijk (weinig toegepast bij metingen op de weg):

- migratie (schrappen van diffractiehyperbolen en corrigeren van hellende reflectoren);
- deconvolutie (verbeteren van de resolutie en schrappen van meervoudige reflectie (*multiples*)).

Hierna worden aanbevelingen voor de keuze van de parameters gedaan.

2.1 Correctie van de nultijd

Bij sommige systemen wordt voor bepaalde fasen van de gegevensverwerking een bestand voor de kalibratie van de antennes gebruikt (speciale meting op een metalen oppervlak of in lucht, naargelang van de voorschriften). Bijvoorbeeld, voor GSSI-hoornantennes wordt het kalibratiebestand (verkregen op een metalen plaat op verschillende afstanden van de antenne) gebruikt om een deel van de resonanties uit te schakelen en de reflectie aan het wegoppervlak terug op nul te brengen (figuur 8). De informatie uit het bestand wordt gebruikt voor de analyse van de voortplantingssnelheid van de golven.



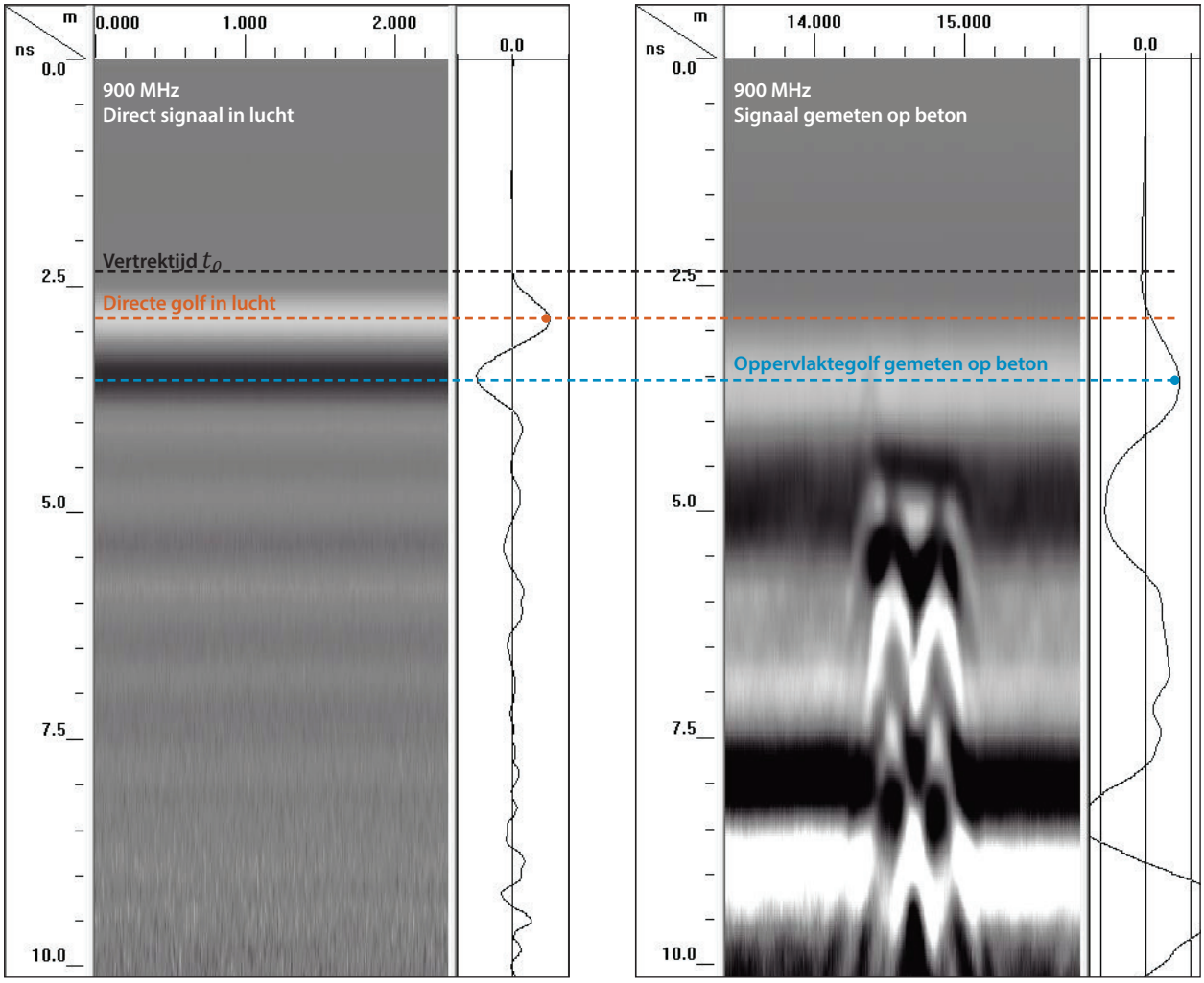
Figuur 8 *Profiel gemeten met een 2 GHz-hoornantenne voor (a) en na (b) automatische correctie van de nultijd. Het oppervlak en de onderliggende lagen die door het overrijden van een opsluitband vrij onregelmatig worden weergegeven verkrijgen zo een horizontaal aanzien.*

Als geen kalibratie op een plaat is uitgevoerd, kan de reflectietijd aan het oppervlak bij benadering terug op nul worden gebracht door de hoofdpiek van de reflectie te bepalen. In dat geval worden de verschillende signalen gewoon verschoven in de tijd, zonder resonanties in de antenne uit te schakelen.

Bij contactantennes bepaalt de operator de verschuiving in de tijd die op de meetsporen moet worden toegepast om de nultijd in te stellen. In tegenstelling met hoornantennes wordt de eerste piek van de oppervlaktereflectie hier als de nultijd beschouwd. Dit houdt echter het risico in dat de diepte van de contactvlakken schromelijk wordt onderschat. Het gaat hier eigenlijk om een superpositie van verscheidene golven, waarvan de voornaamste zijn: een golf die zich door de lucht direct van de ene naar de andere antenne voortplant, een golf die zich door de lucht voortplant, maar reflecteert op het oppervlak voordat ze de andere antenne bereikt, en een golf die zich door het oppervlaktemateriaal voortplant. De som van deze componenten hangt dan ook af van heel wat moeilijk te kwantificeren parameters (stroefheid van het oppervlak, materiaal, wagentje, enz.).

Om een betrouwbare referentie te verkrijgen, wordt idealiter voor of na de radarmetingen een meting in lucht uitgevoerd (de antenne wordt daarbij ver genoeg van elke reflector opgesteld). Om de nultijd te berekenen, wordt de voortplantingstijd (in lucht) tussen de twee antennes van de aankomsttijd van de eerste piek afgetrokken. De afstand tussen de zend- en ontvangstantennes wordt doorgaans door de fabrikant meegedeeld.

Figuur 9 toont een voorbeeld. De eerste piek die met de 900 MHz-antenne wordt gemeten, verschijnt op 3,5 ns. Bij een meting in lucht met dezelfde antenne is de aankomsttijd 2,8 ns. Aangezien voor dit model de afstand tussen de antennes in hun doos 15 cm bedraagt, mag worden aangenomen dat het tijdsverschil tussen het verzenden en het ontvangen van de golf gelijk is aan 0,5 ns. De gekozen nultijd is dan 2,3 ns, d.w.z. meer dan 1 ns voordat de eerste piek in de metingen verschijnt.



a b

Figuur 9 *Vergelijking van een signaal gemeten in lucht (a) en op gewapend beton (b). Schatting van de vertrektijd van de directe golf.*

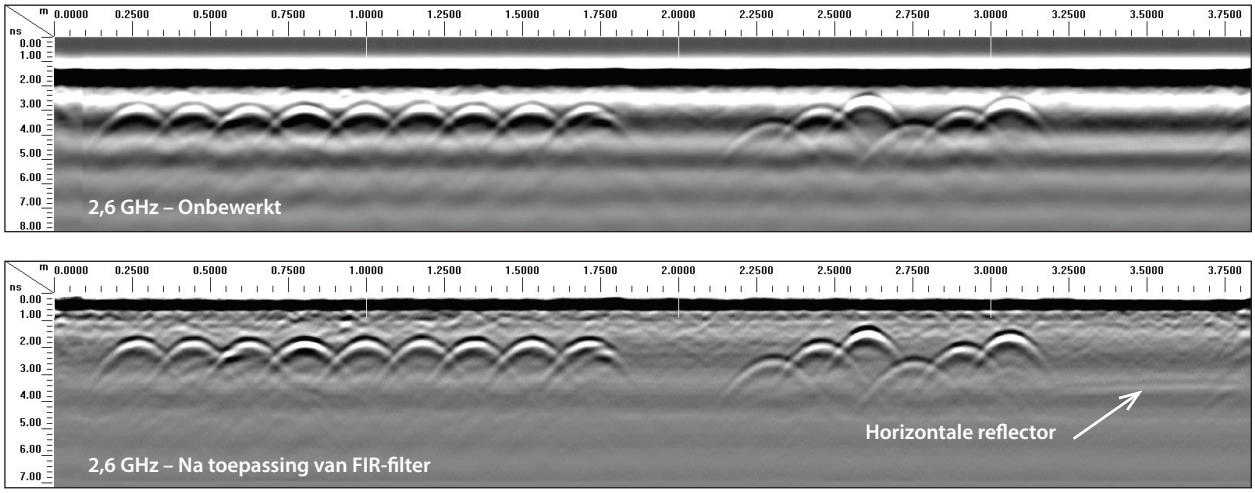
2.2 Filteren van het signaal

De meest gebruikte filter is de **FIR-filter** (*Finite Impulse Response*) van het type *boxcar*. Een FIR-filter is een rechthoekige filter bepaald door de hoogdoorlaat- en laagdoorlaatfrequenties. Het gedeelte van het spectrum tussen deze twee frequenties blijft ongewijzigd. Dergelijke filters worden hoofdzakelijk gebruikt om ruis en interferenties zoveel mogelijk te beperken en het signaal leesbaarder te maken zonder fasewisseling. Ze zijn vergelijkbaar met de filters die tijdens de metingen worden gebruikt (§ 1.2.7) en maken het mogelijk de weergegeven frequenties af te stemmen op de gemeten profielen. Bij wijze van voorbeeld vermelden we hier dat met de grensfrequenties (*cut-off frequencies*) in tabel 9 het signaal zeer algemeen kan worden gefilterd zonder significant nuttige signalen uit te schakelen.

Hoornantenne 2 GHz	Boxcar: • hoogdoorlaatfrequentie: 250 MHz; • laagdoorlaatfrequentie: 5 000 MHz. Eventueel door de fabrikant geleverde interferentiefilter
Hoornantenne 1 GHz	Boxcar: • hoogdoorlaatfrequentie: 250 MHz; • laagdoorlaatfrequntie: 3 000 MHz.
Contactantenne 400 MHz	Boxcar: • hoogdoorlaatfrequentie: 100 MHz; • laagdoorlaatfrequentie: 800 MHz.
Contactantenne 200 MHz	Boxcar: • hoogdoorlaatfrequentie: 30 MHz; • laagdoorlaatfrequentie: 400 MHz.

Tabel 9 *Voorbeelden van grensfrequenties volgens de soort van antenne*

Als voorbeeld van het gebruik van een FIR-filter toont figuur 10 hoe door toepassing van een hoogdoorlaatfilter (2,3 GHz) op een signaal van een 2,6 GHz-antenne de gemeten hyperbolen kunnen worden verscherpt en ook de laagfrequentieruis aanzienlijk kan worden verminderd. In dit voorbeeld kon zo een haast onzichtbare horizontale reflectie op 3 ns rechts in het beeld zichtbaar worden gemaakt.



Figuur 10 *Effect van een FIR-filter op een 2,6 GHz-radarprofiel. Door toepassing van de hoogdoorlaatfilter kunnen de brede oscillaties die het signaal volledig bedekken worden verminderd en wordt de horizontale reflector zichtbaar.*

Er zijn ook **IIR-filters** (*Infinite Impulse Response*). Ze zenden een signaal uit dat exponentieel afneemt zonder echter nul te bereiken. De grensfrequenties worden horizontaal bepaald in aantal meetsporen en verticaal in frequentie.

IIR-filters kunnen worden gebruikt om plaatselijke reflectiesignaturen van in de grond aanwezige elementen of eigen aan de antenne weg te wissen. Ze hebben echter als nadeel dat ze een faseverschuiving van de gegevens of instabiliteit kunnen veroorzaken of plaatselijke reflecties kunnen uitschakelen.

De ***background removal*** is een horizontale hoogdoorlaatfilter, waarmee horizontale resonanties kunnen worden uitgeschakeld (eerder voor contactantennes). De filter wordt ingesteld door een parameter uitgedrukt in aantal meetsporen. De filter moet relatief lang zijn en wordt gekozen als functie van het aantal geregistreerde meetsporen per meter. Hij schakelt de directe (horizontale) golf en de bijbehorende resonanties uit, maar ook alle constante horizontale reflectoren. Hij kan nuttig zijn om gelokaliseerde reflectoren beter zichtbaar te maken. Hij geeft echter vaak aanleiding tot het doen verschijnen van kunstmatig gevormde elementen.

De operator kan ook een luchtgekoppelde meting uitvoeren en het verkregen meetspoor van de radargegevens aftrekken.

2.3 Versterking

Een versterking wordt toegepast om de effecten van een afgezwakt signaal te compenseren. De amplitude van een signaal neemt immers af met de voortplantingsafstand (sferische divergentie) en het elektrisch geleidingsvermogen van het medium. De toegepaste versterking moet interessante reflecties boven kunstmatig gevormde elementen en inwendige resonanties in de antenne doen uitkomen.

Bij sommige software is een visuele versterking (***display gain***) mogelijk. Signalen worden dan enkel bij de weergave versterkt.

Een **versterkingsfunctie** is een tijdsfunctie (constant, lineair of exponentieel), bepaald door één of meer punten waarmee elk meetspoor wordt vermenigvuldigd. Een lineaire of exponentiële functie compenseert de afzwakking die het gevolg is van de afstand en van de afzwakking in het medium waarin het signaal zich voortplant. Met een exponentiële functie kan het einde van het signaal nog meer worden versterkt.

Een automatische versterking **AGC** (*Automatic Gain Control*) versterkt de delen van het signaal met een lage amplitude en zwakt te sterke delen van het signaal af. Om de versterking te berekenen, voert de operator het aantal te beschouwen punten (berekende versterking langs het meetspoor) en het aantal scans toe.

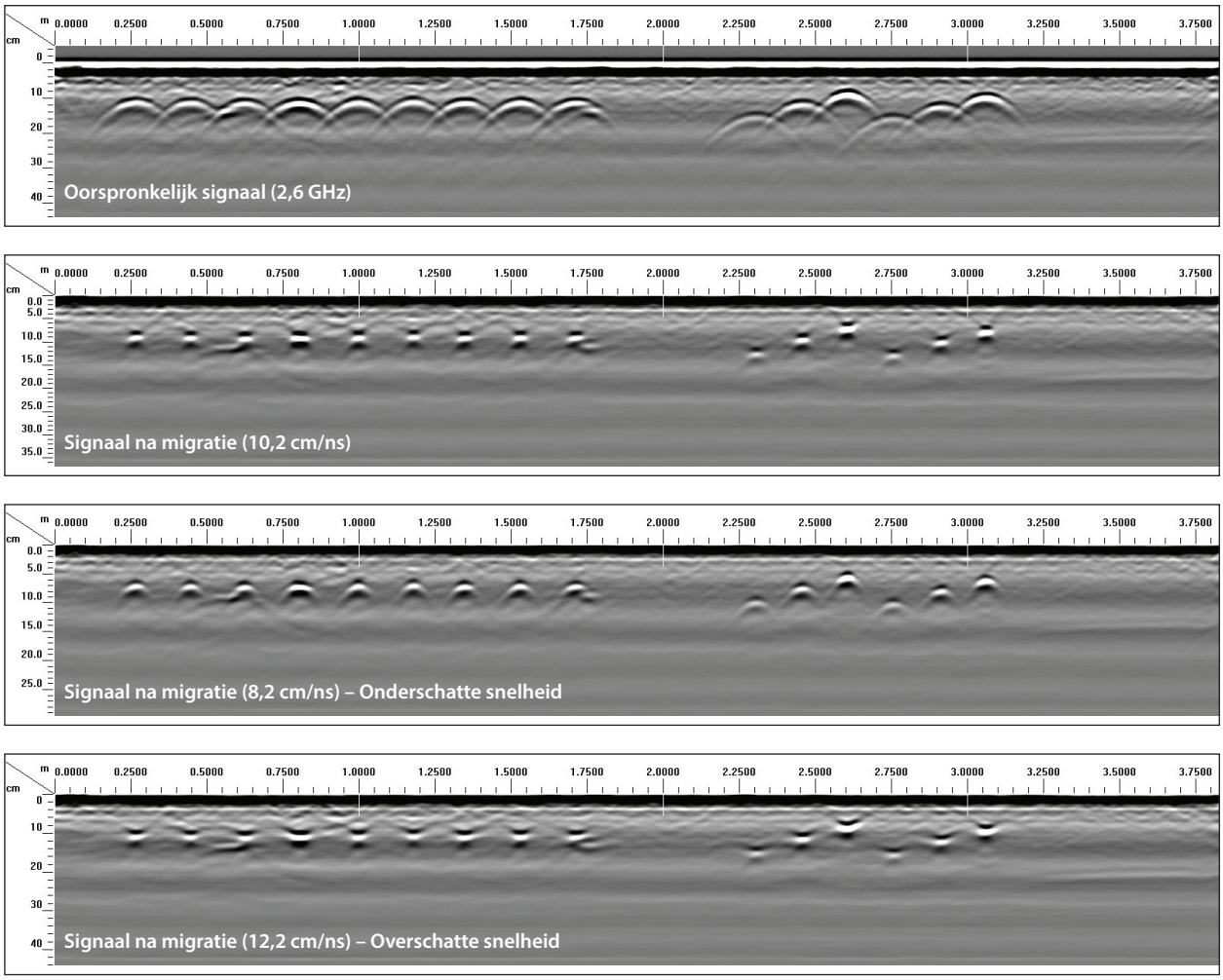
2.4 Migratie

Op een radarprofiel worden plaatselijke reflectoren die ten opzichte van de golflengte van het signaal klein zijn (bijvoorbeeld een wapening, een holte of een oneffenheid in het contactvlak) als hyperbolen weergegeven. Migratie is een bewerking om de energie van deze hyperbolen in hun top te concentreren (figuur 11). Plaatselijke reflectoren worden dan in het signaal als punten in plaats van hyperbolen zichtbaar, zodat het verkregen beeld beter met de werkelijkheid overeenstemt. Deze bewerking is noodzakelijk als 3D-reconstructie van de gemeten signalen wordt overwogen. Zo kunnen ook door hyperbolen gemaskeerde evenementen zichtbaar worden of kan de helling van schuine reflectoren worden gecorrigeerd.

Om doeltreffend te zijn, dient de migratie na correctie van de nultijd te worden uitgevoerd. De migratieberekening houdt verband met de snelheid van de golven in het oppervlaktemedium. Als de geschatte snelheid lager dan de werkelijke snelheid is, worden de hyperbolen afgezwakt maar ze blijven zichtbaar. Als de snelheid overschat wordt, worden de hyperbolen omgedraaid. In een medium met veel hyperbolen (bijvoorbeeld gewapend beton) kan migratie worden toegepast om de snelheid in het medium en dus de diepte van de wapeningen te schatten.

2.5 *Stacking* als naverwerking

Stacking berekent een gemiddeld meetspoor op basis van een bepaald aantal meetsporen. Zo kan de signaal-ruisverhouding worden verbeterd. Deze techniek doet dus ook een horizontale afvlakking, waardoor enkele plaatselijke doelen verloren kunnen gaan. Bij sommige software is het aantal meetsporen na *stacking* verminderd, tenzij een *stretching* wordt toegepast. Een waarde van 8 is courant.



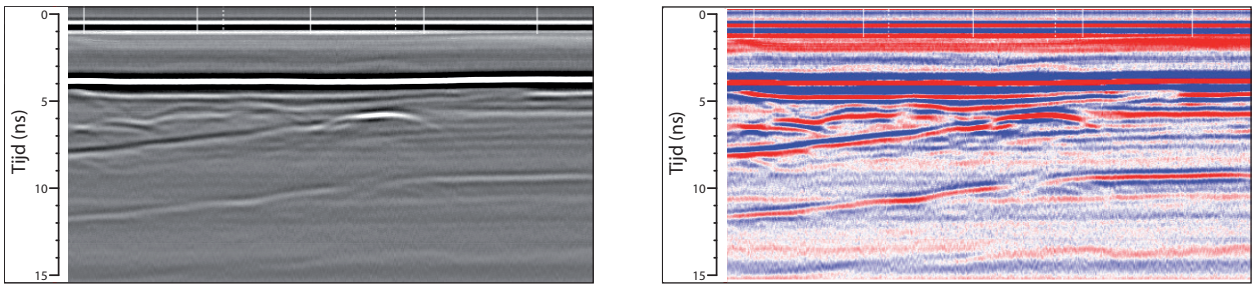
Figuur 11 *Migratie van een gemeten radarsignaal op een gewapend-betonplaat en invloed van de gekozen snelheid*

2.6 *Stretching*

Stretching voegt meetsporen toe door middel van interpolatie tussen nevenliggende meetsporen. Deze methode wordt soms toegepast om de zichtbaarheid van horizontale scans te verbeteren. Horizontale scans zijn een soort van digitale *zoom* op een horizontaal beeld. *Stretching* is echter niet aanbevolen omdat het niet-gemeten informatie op basis van de interpolatiehypothese toevoegt.

2.7 Weergave/Kleurenschaal

De keuze van de wijze van weergave is van essentieel belang om de leesbaarheid van het radarprofiel te verbeteren. Aanbevolen wordt de *LineScan*-weergave te kiezen, waarbij de amplitude van het radarsignaal door kleurvariaties wordt weergegeven (niet de *wiggle*-weergave). De continue zwart-witschaal geeft representatieve echoresultaten en blijft leesbaar bij monochrome uitdraai. Ook met andere kleurenschalen kan voor bepaalde gegevens een goed weergaveresultaat worden verkregen door bepaalde amplitudes efficiënt te contrasteren. Soms kunnen ze echter ook kunstmatig veranderingen doen verschijnen, met foutieve conclusies als gevolg (verstoring van de kleurenschaal). Het is aan de operator om de verschillende mogelijkheden uit te proberen.



a b

Figuur 12 *Radarprofiel weergegeven in zwart-witschaal (a) en in kleurenschaal (b)*

2.8 Tijd-diepteconversie

Na correctie van de nultijd en als de gemiddelde voortplantingssnelheid van de golven in het medium bekend is, kan een (meestal benaderende) tijd-diepteconversie worden uitgevoerd.

De snelheid in een medium kan met verschillende methoden worden bepaald:

- **schatting op basis van kenmerkende waarden van de materialen** (tabel 1, blz. 4). Op basis van de permittiviteit ε'_r kan de snelheid v (in cm/ns) worden berekend met de vergelijking:

  $$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_r}}$$

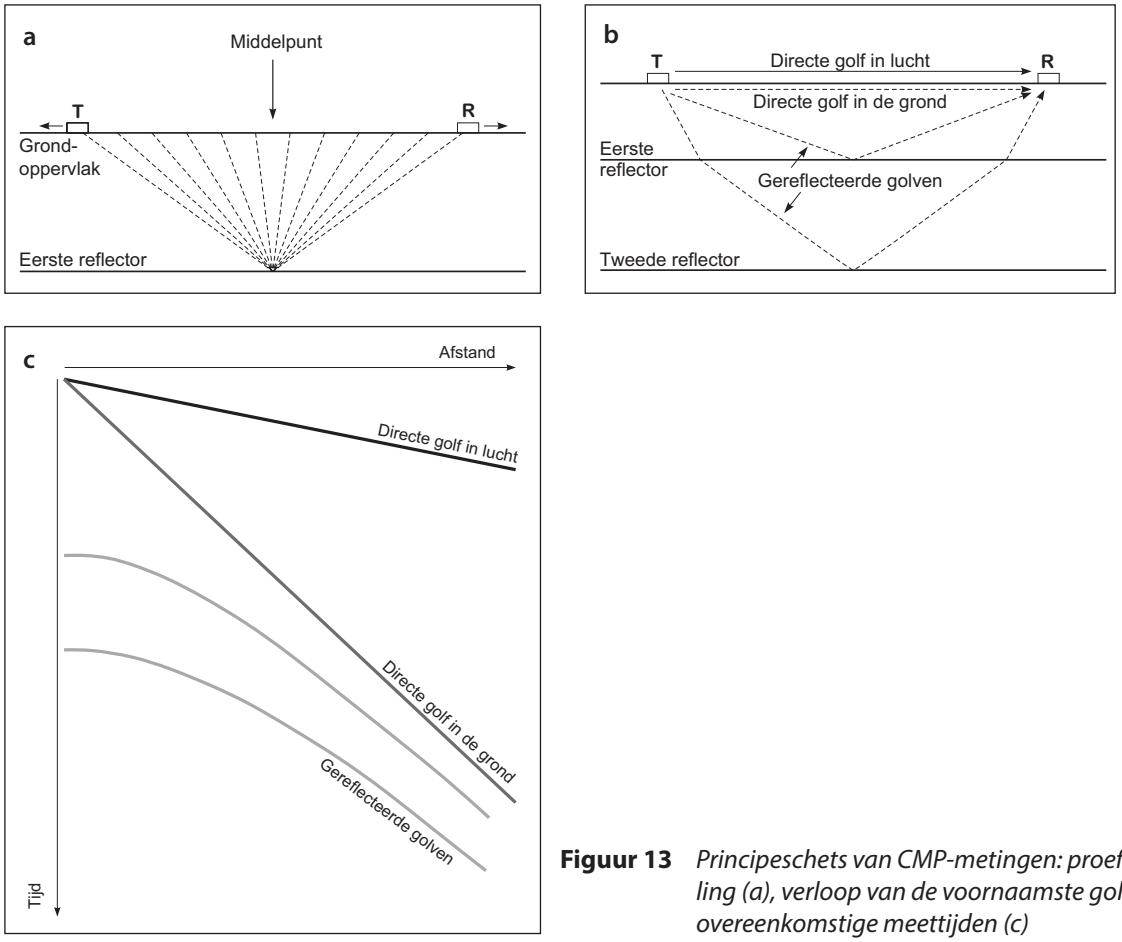
  c = de lichtsnelheid (30 cm/ns).

  Dit is een ruwe schatting want de permittiviteit van wegenbouwmaterialen verandert met de vochtigheid van het medium en het percentage holle ruimte.

- in geval van plaatselijke reflectoren, **schatting op basis van de vorm van de hyperbolen en de migratie van het signaal** (figuur 11, blz. 19);
- voor hoornantennes, **schatting op basis van de amplitude van de oppervlaktereflectie (bijlage I)**. Een dergelijke schatting is enkel mogelijk als tegelijk met de metingen ook een kalibratie van de antenne op een metalen oppervlak is uitgevoerd. Met elk contactvlak neemt de nauwkeurigheid af. Een dergelijke schatting kan met de infrastructuurmodule van de GSSI-verwerkingssoftware RADAN worden uitgevoerd;
- **plaatselijke meting door middel van kernboring**. Om onzekerheden in verband met de lokalisatie van de boorkern te beperken, moet de boring worden uitgevoerd in een representatief gedeelte van de onderzochte zone met weinig zijdelingse veranderingen (zodat de onzekerheid over de precieze locatie van de boorkern de interpretatie van de radarsignalen niet kan beïnvloeden).

Kalibraties met boorkernen zijn het nauwkeurigst. Ze verstrekken echter enkel gelokaliseerde informatie over de kenmerken van de materialen. Bovendien is het aantal vaak beperkt, want kernboringen veroorzaken verkeershinder, zijn eerder duur en beschadigen het wegdek. Idealiter worden ze gecombineerd met de tweede methode, waarmee zijdelingse permittiviteitswisselingen kunnen worden gedetecteerd en de locatie van kernboringen nauwkeuriger kan worden bepaald.

Ook met specifieke methoden voor gegevensinzameling kan de snelheid van het medium worden geschat. Bij gescheiden zend- en ontvangantennes leveren CMP-metingen (*Common Midpoint*) informatie over de snelheid van het medium. Bij dergelijke metingen wordt de afstand tussen de twee antennes van nul af geleidelijk verhoogd (figuur 13). Een horizontale reflector levert op het radarprofiel een hyperbool op, waarvan de vergelijking afhangt van de snelheid in de laag. Voor de eerste laag levert dit betrouwbare resultaten op. Vervolgens neemt de nauwkeurigheid af en moet voor de berekening van de snelheid in de volgende lagen met geavanceerdere rekenmodellen worden gewerkt.



Figuur 13 *Principeschets van CMP-metingen: proefopstelling (a), verloop van de voornaamste golven (b); overeenkomstige meettijden (c)*

Literatuur

[1] **Annan, A.P.; Cosway, S.W.**
Ground Penetrating Radar Survey Design
In Society of Exploration Geophysicists (Uitg.): Proceedings of the 4th Annual Symposium on Application of Geophysics Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Chicago, april, 1992, blz. 329-51
1992

[2] **Annan, A.P.**
Ground-Penetration Radar : Chapter 11
In Dwain K. Butler (Uitg.): Near-Surface Geophysics. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists (Investigations in Geophysics, 13), blz. 357-438
2005

[3] **Daniels, David J.**
Ground Penetrating Radar. 2e editie
Londen : Institution of Electrical Engineers (IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series ; 15)
2004

[4] **Grégoire, Colette; Van Geem, Carl**
OCW stelt grondradaractiviteiten voor op IWAGPR 2013
In OCW Mededelingen, 96, blz. 13-15
Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Juli-augustus-september 2013

[5] **Grégoire, Colette; Van Geem, Carl**
Ontwikkeling van de grondradartechniek : oproep voor medewerking aan terreinmetingen
In OCW Mededelingen, 97, blz. 20
Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Oktober-november-december 2013

[6] **Grégoire, Colette; Leuridan, Alain; Massart, Tim; Poelmans, Francis; Van Geem, Carl**
Proefsleuf in OCW-vestiging te Waver voor prenormatief onderzoek naar grondradartechniek
In OCW Mededelingen, 98, blz. 6-8
Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Januari-februari-maart 2014

[7] **Grégoire, Colette; Pollet, Yves; Van Geem, Carl**
Prenormatief onderzoek naar grondradartechniek : oproep voor medewerking aan metingen op proefvakken in de OCW-vestiging te Waver
In OCW Mededelingen, 99, blz. 14-15
Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
April-mei-juni 2014

[8] **Grégoire, Colette; Van der Wielen, Audrey**
Grondradarmetingen op OCW-asfaltproefvak in Sterrebeek
In OCW Mededelingen, 103, blz. 10
Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
April-mei-juni 2015

[9] **Van der Wielen, Audrey; Van Geem, Carl; Grégoire, Colette**
GPR on Roads : Layer Thickness Estimation
In I. Pajewski, A. Benedetto, A. Alani, Lambot S. (Uitg.): Proceedings of the 3rd General Meeting of the COST Action TU1208 "Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar", Londen, maart 4-6, 2015
Rome : Aracne
2015

[10] **Grégoire, Colette; Van der Wielen, Audrey; Van Geem, Carl**
Determination of Velocities with Radar in Road Layers
In Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Uitg.): 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2015, Florence, juli 7-10, 2015. 1 volume, blz. 1-4
2015

[11] **Grégoire, Colette; Van der Wielen, Audrey; Van Geem, Carl**
Bijeenkomst van grondradargebruikers uit Frankrijk en Wallonië in het OCW
In OCW Mededelingen, 107, blz. 7-8
Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
April-mei-juni 2016

[12] **Lambot, Sébastien; Weihermüller, Lutz; Huisman, Johan A.; Vereecken, Harry; Vanclooster, Marnik; Slob, Evert C.**
Analysis of Air-Launched Ground-Penetrating Radar Techniques to Measure the Soil Surface Water Content
In Water Resour. Res., 42 (11), 12 blz. DOI: 10.1029/2006WR005097
2006
Online raadpleegbaar http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006WR005097/full, laatst geraadpleegd in november 2016

[13] **Leng, Zhen; Al-Qadi, Imad L.; Baek, Jongeun; Lahouar, Samer**
Selection of Antenna Type and Frequency for Pavement Surveys Using Ground Penetrating Radar (GPR)
In Transportation Research Board (TRB) (Uitg.): Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC, januari 11-15, 2009, paper No. 09-1541
Washington DC : Transportation Research Board (TRB)
2009

[14] **Finnish Transport Agency; Swedish Transport Administration (TRAFIKVERKET); Norwegian Road Administration**
Recommendations for Guidelines for the Use of GPR in Road Construction Quality Control (Mara Nord Project)
Brussel : Europese Commissie
2011
Online raadpleegbaar http://maranord.ramk.fi/, laatst geraadpleegd in november 2016

[15] **Pollet, Yves**
GPR : radiografie van wegconstructies, steekkaart 7
In Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (Uit.): Instrumenten voor wegbeheerders : voor een objectieve en rationele totaalaanpak van wegbeheer (Synthese, N 48/14), blz. [61-70]
2014

Bijlage I

Schatting van de laagdikten op basis van de reflectie-amplitude en de voortplantingstijd

De methode die in deze bijlage wordt voorgesteld, maakt gebruik van de reflectieamplitude voor de verschillende contactvlakken die met de hoornantenne worden gemeten, om de permittiviteit van het oppervlakmateriaal en eventueel ook van onderliggende lagen te schatten. Deze niet-destructieve procedure kan in elk meetpunt worden toegepast en maakt het mogelijk om veranderingen (vochtigheid, minder goede verdichting) in een op het eerste gezicht homogeen materiaal te onderscheiden.

Voor deze methode dient vooraf een kalibratie op een metalen plaat te worden uitgevoerd. Aangezien ze de permittiviteit op basis van de oppervlaktereflectie beoordeelt, is de voorgestelde methode enkel toepasbaar als het oppervlakmateriaal dik genoeg is om deze reflectie te isoleren. De vereiste minimumdikte is ongeveer de helft van de golflengte. Voor een 2 GHz-antenne wordt een dikte van 4 cm voldoende geacht, naargelang van de permittiviteit van het medium. De geschatte oppervlaksnelheid is enkel geldig voor de gehele laag als ze over de gehele dikte homogene kenmerken vertoont. Als zich een gradiënt voordoet (bijvoorbeeld als het oppervlak aan het drogen is), zullen de berekende dikten op basis van de oppervlaktereflectie niet met de werkelijke dikten overeenstemmen.

De voorgestelde methode is strikt genomen enkel toepasbaar voor de eerste laag. Ze kan ook voor onderliggende lagen worden toegepast als aannamen worden gedaan, maar dat kan de nauwkeurigheid van de resultaten nadelig beïnvloeden.

I.1 Algemeen principe

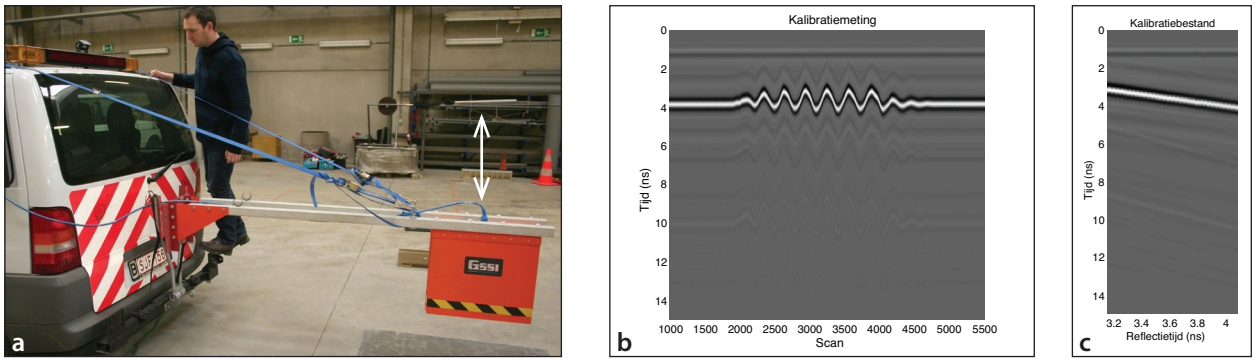
De reflectiecoëfficiënt is de hoeveelheid energie van een elektromagnetische golf die reflecteert wanneer ze een contactvlak raakt. Deze coëfficiënt hangt af van de invalshoek en het permittiviteitscontrast tussen de twee materialen. Voor inspecties met een hoornantenne kan met een invalshoek van 90° worden gerekend en de permittiviteit van het bovenliggende materiaal (de lucht) is bekend. De permittiviteit van het oppervlakmateriaal kan dus worden bepaald op basis van de reflectiecoëfficiënt van het oppervlak.

In de praktijk wordt de reflectiecoëfficiënt geschat door elke meting te vergelijken met een meting die in dezelfde omstandigheden (hoogte, filters) werd uitgevoerd op een metalen plaat, die een perfecte reflector is. De metingen op de metalen plaat worden uitgevoerd tijdens de kalibratie vóór of na de metingen op de weg.

I.2 Kalibratieprocedure

Voor de kalibratie wordt de antenne op een meetvoertuig bevestigd en worden dezelfde parameters voor gegevensinzameling als tijdens de meetcampagne ingesteld. Een continue gegevensinzameling wordt gestart. Een operator stapt in het meetvoertuig en voert daarbij een golvende beweging uit, om een verticale oscillatiebeweging in de antenne op te wekken (figuur 14 (a)). Het doel is referentiemetingen te realiseren voor alle grond-antenneafstanden die tijdens de meting kunnen voorkomen (figuur 14 (b)).

Voor elke aankomsttijd van de reflectie wordt een gemiddeld spoor berekend (figuur 14 (c)). De piek-tot-piekamplitude A_{calib} wordt beschouwd als de reflectieamplitude op een perfecte reflector. De piek-tot-piekamplitude wordt gemeten op basis van de hoofdpiek van de reflectie en de voorafgaande tegengestelde piek. Op die manier blijft de invloed van andere reflectoren nabij het oppervlak beperkt en stemt de gemeten amplitude systematisch met eenzelfde reflectiepiek overeen.

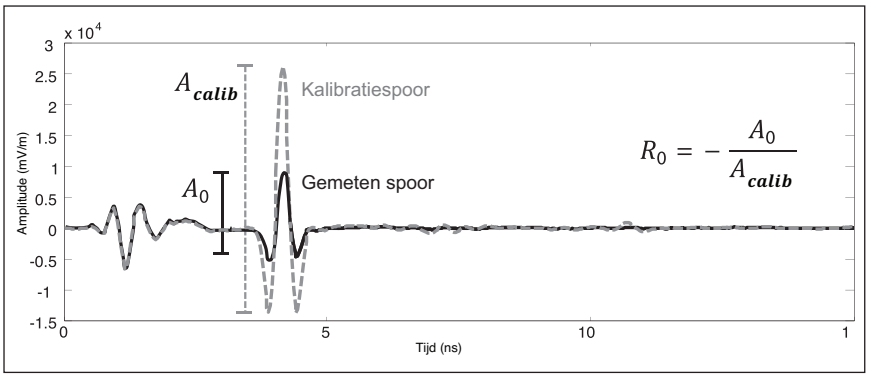


Figuur 14 *Uitvoering van de kalibratie (a); gemeten profiel tijdens de kalibratie (b); resulterend kalibratiebestand (c)*

I.3 Schatting van de kenmerken van de eerste laag

Na de metingen op de weg wordt voor elk meetspoor de amplitude van de oppervlaktereflectie A_0 geschat en vergeleken met de amplitude gemeten op een metalen plaat voor dezelfde aankomsttijd (A_{calib}) (figuur 15). De reflectiecoëfficiënt R_0 wordt verkregen door het quotiënt van deze deling te vermenigvuldigen met -1, om rekening te houden met de fasewisseling als gevolg van de reflectie op het metaal.

$$R_0 = -\frac{A_0}{A_{calib}} \tag{1}$$



Figuur 15 *Vergelijking van een gemeten spoor met een kalibratiespoor met dezelfde aankomsttijd voor de reflectie*

Op basis van de oppervlaktereflectiecoëfficiënt R_0 wordt de relatieve diëlektrische oppervlakpermittiviteit ε'_{r1} berekend uit vergelijking (2) (Al-Qadi en Lahouar, 2005) en (Lambot et al., 2006):

$$\varepsilon'_{r1} = \frac{(R_0 - 1)^2}{(R_0 + 1)^2} = \left(\frac{1 + \frac{A_0}{A_{calib}}}{1 - \frac{A_0}{A_{calib}}}\right)^2 \tag{2}$$

In deze relatie is de invalshoek van de golf ten opzichte van het oppervlak gelijk aan 90°. Dit is geldig voor hoornantennes, omdat de afstand tussen de zend- en ontvangstantenne verwaarloosbaar is ten opzichte van de hoogte van de antenne. Deze methode kan worden toegepast om de snelheid van elke meting af te leiden, op voorwaarde dat een kalibratiespoor voor de overeenkomstige grond-antenneafstand werd gemeten.

De snelheid van de eerste laag v_1 wordt dan berekend uit vergelijking (3):

$$v_i = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_{ri}}} \tag{3}$$

c = de lichtsnelheid (30 cm/ns).

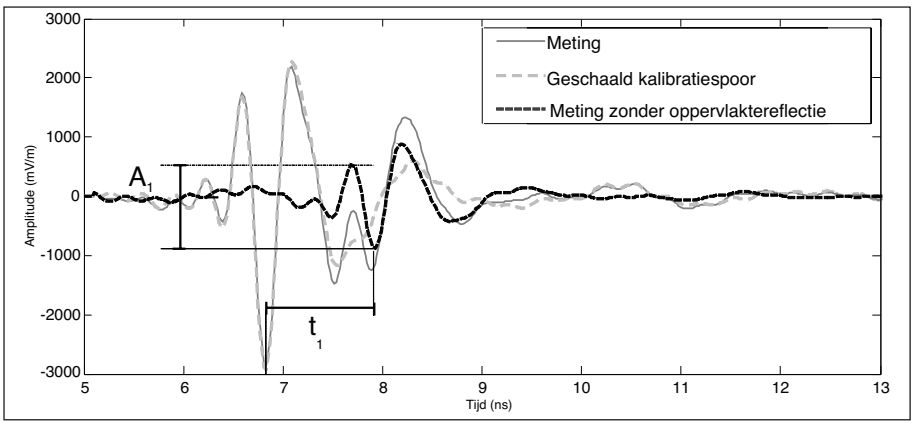
De laagdikte d_1 kan worden geschat door de gemeten voortplantingstijd in de laag (t_1) in de vergelijking (4) te brengen. De reflectie is zichtbaar als het permittiviteitscontrast tussen de twee materialen groot genoeg is.

$$d_i = \frac{t_i \, v_i}{2} \tag{4}$$

I.4 Schatting van de kenmerken van de tweede laag

De permittiviteit van de tweede laag wordt geschat met behulp van de reflectieamplitude in het contactvlak tussen de eerste en de tweede laag. Vaak kan deze amplitude niet direct op het radarbeeld worden gemeten, omdat ze door de oppervlaktereflectie wordt beïnvloed. Om de tweede reflectie te isoleren, kan de amplitude van de directe golf van de meting worden afgetrokken. Daartoe dient de oppervlaktereflectie te worden geschat door de overeenkomstige kalibratiemeting te vermenigvuldigen met de gemeten reflectiecoëfficiënt R_0 (figuur 16). Het resulterende maximum van het signaal zou dan moeten overeenstemmen met de hoofdpiek van de reflectie onderaan de eerste laag, gemeten met een tijd t_1 en waarop de piek-tot-piekamplitude van de reflectie op dit contactvlak kan worden geschat.

De verspreiding van de golven in de antenne en het materiaal kan de vorm van de gemeten golfjes aanzienlijk wijzigen. Het is dan ook mogelijk dat de piek van de grootste amplitude niet met de gezochte hoofdpiek overeenstemt. De gemaakte fout is dan des te groter omdat de verkeerdelijk gekozen piek meestal net vóór of na de hoofdpiek komt en dus een tegengesteld teken heeft. De fout in de schatting van de snelheid zal dan ook zeer groot zijn. Om fouten zo klein mogelijk te houden, is het aangewezen het signaal te bewerken voordat het maximum wordt gezocht. Dit kan door van elk punt de voorgaande en de volgende piekamplitudes af te trekken. Op die manier worden enkel pieken in aanmerking genomen die met pieken met tegengestelde tekens zijn omgeven.



Figuur 16 *Zichtbaar maken van de reflectie onderaan de eerste laag door van de meting het geschaalde meetspoor af te trekken*

Op basis van de parameters A_1 en t_1 kan de permittiviteit van de tweede laag ε'_{r2} worden geschat (Al-Qadi en Lahouar, 2005):

$$\varepsilon'_{r2} = \varepsilon'_{r1} \left(\frac{\left[1 - \left(\frac{A_0}{A_{calib}}\right)^2\right] e^{-\frac{\eta_0 \sigma_1 t_1 c}{2\varepsilon'_{r1}}} + \left[\frac{A_1}{A_{calib}}\right]}{\left[1 - \left(\frac{A_0}{A_{calib}}\right)^2\right] e^{-\frac{\eta_0 \sigma_1 t_1 c}{2\varepsilon'_{r1}}} - \left[\frac{A_1}{A_{calib}}\right]} \right)^2 \tag{5}$$

η_0 = de vacuümimpedantie ($\eta_0 \approx 120\pi$);
c = de lichtsnelheid (30 cm/ns);
σ_1 = het geleidingsvermogen van het eerste materiaal.

Het geleidingsvermogen mag niet op basis van gemeten sporen worden berekend, maar moet door de gebruiker worden geschat. Een waarde van 10^{-3} S/m benadert doorgaans goed het geleidingsvermogen van wegenbouwmaterialen in droge toestand.

De permittiviteit van de tweede laag kan dan worden gebruikt om de snelheid in de laag uit (3) en de dikte van de laag uit (4) te berekenen, nadat de aankomsttijd t_2 van de reflectie op het ondervlak van die laag is geïdentificeerd.

Naast het geleidingsvermogen beïnvloeden ook de fouten in de schattingen van ε'_{r1} en t_1 de schatting van ε'_{r2} in (5). Bovendien wordt de geometrische afzwakking verwaarloosd.

De voorgestelde methode kan voor alle onderliggende lagen worden toegepast (Al-Qadi en Lahouar, 2005), maar door de opeenvolgende schattingen en telkens meegenomen onnauwkeurigheden neemt de nauwkeurigheid van de resultaten met elke laag af.

Bijlage II

Bepaling van homogene zones

II.1 Doelstellingen

Er zijn diverse redenen om homogene zones in een radarprofiel te bepalen:

- in het kader van een vooronderzoek voor de **recycling van een weg**, om de hoeveelheid te recyclen materiaal te bepalen of om ondergrondse kabels en leidingen of andere materialen te detecteren die niet kunnen worden gerecycled of die apart worden gerecycled;
- voor de **schatting van de laagdikten**, om het resterend draagvermogen van een weg te bepalen (in combinatie met deflectiemetingen met de valgewichtdeflectiemeter (*Falling Weight Deflectometer* – FWD) of de curviameter) of om na het beëindigen van de werken de laagdikten te controleren;
- voor de **detectie van gebreken of van vochtige, verontreinigde of beschadigde zones**.

Om het beoogde doel te bereiken, worden radarmetingen vaak met plaatselijke kernboringen gecombineerd. Het radarsignaal kan dan worden benut om de **locatie van de kernboringen (of proefsleuven)** zo nauwkeurig mogelijk te bepalen. Een enkele kernboring of proefsleuf per homogene zone volstaat. Ook voor FWD-metingen worden vooraf radarmetingen uitgevoerd voor een optimale plaatsbepaling van deze metingen.

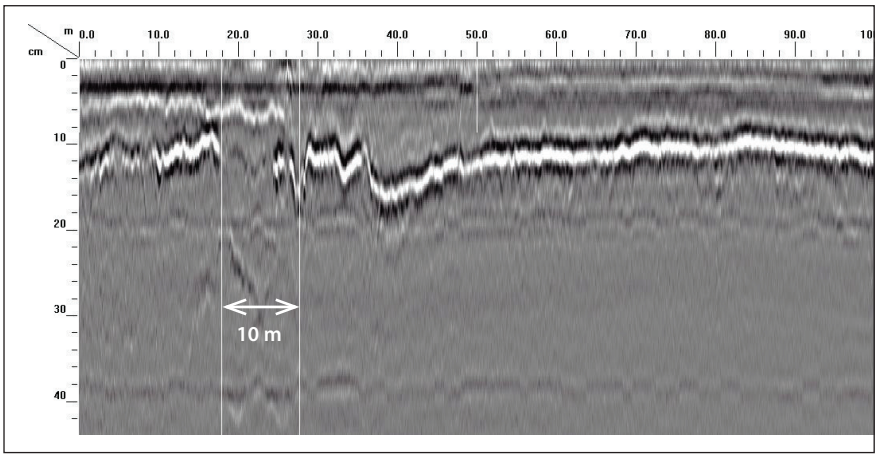
II.2 Lengte van homogene zones

De lengte van een homogene zone hangt af van het beoogde doel van het radaronderzoek, van de onderzochte weglengte en van de gewenste nauwkeurigheid. Ze verschilt naargelang een weggedeelte van enkele kilometers (bijvoorbeeld bij metingen van het hoofdwegennet) of van een honderdtal of een tiental meters wordt onderzocht. Ze mag niet te kort zijn ten opzichte van de onderzochte weglengte. Daarom is het nuttig voor elke toepassing de minimumlengte voor homogene zones te bepalen. Als de radarmetingen met plaatselijke deflectiemetingen (met de FWD) worden gecorreleerd, stemt de gebruiker de minimumlengte voor homogene zones af op de frequentie van de deflectiemetingen.

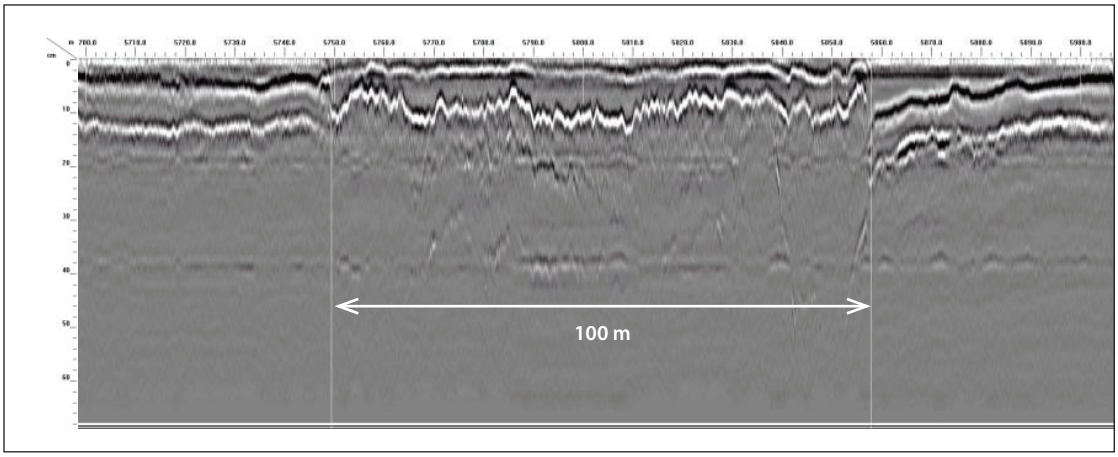
Soms wordt een homogene zone onderbroken door een overgangszone (bijvoorbeeld een ondergrondse kabel of leiding, een reparatie), die plaatselijk kan zijn of een bepaalde lengte heeft. In plaats van drie afzonderlijke homogene zones te bepalen, wordt dan eerder over een "homogene zone met plaatselijke verandering" gesproken.

De figuren 17 en 18 illustreren het begrip "lengte" in deze context. Wanneer men voor een toepassing detailgegevens in het radarbeeld over een weggedeelte wenst, worden situaties zoals op figuur 17 gezocht. Een onregelmatige zone van slechts 10 m lang is dan een belangrijke plaatselijke situatie. Voor dergelijke toepassingen wordt eerder met kleine homogene zones gewerkt.

Voor situaties zoals op figuur 18 is een onregelmatige zone van 100 m lang een relatief korte onderbreking in de homogeniteit van de wegconstructie, die vóór en na het evenement wordt waargenomen. Wanneer men informatie over de totaalprestatie van een wegconstructie wenst (bijvoorbeeld gecombineerd met deflectiemetingen), zal het gedeelte van 100 m lang worden onderzocht als een uitzonderlijke plaatselijke situatie ten opzichte van de homogene zone waarin het evenement zich voordoet. Voor dergelijke toepassingen wordt zoveel mogelijk met langere homogene zones (vaak van ten minste enkele honderden meters lang) gewerkt.



Figuur 17 *Homogene zone met een onregelmatig gedeelte dat zich over 10 m uitstrekt*



Figuur 18 *Homogene zone met een onregelmatig gedeelte dat zich over 100 m uitstrekt*

II.3 Bepaling van homogene zones

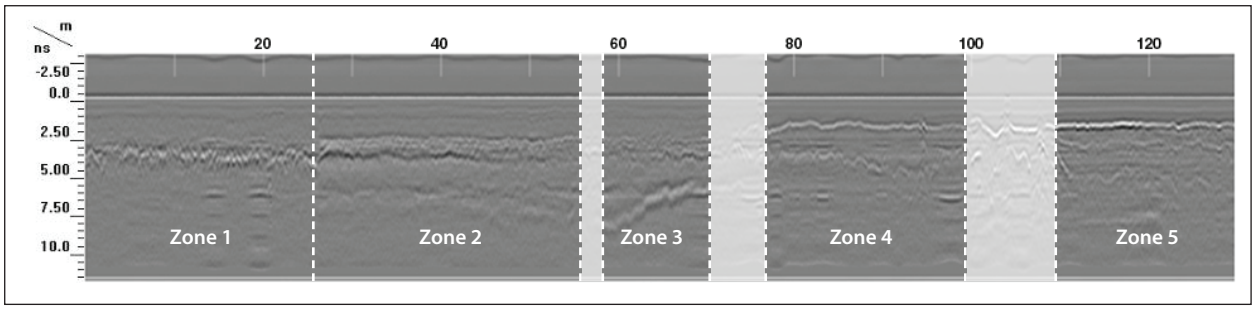
De homogene zones worden doorgaans na de metingen door een operator bepaald. Hij steunt daarvoor op de visuele waarnemingen op het terrein tijdens de metingen (soort van de verharding, aanwezige gebreken, enz.) en op een visuele inspectie van het radarprofiel in de lengterichting.

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

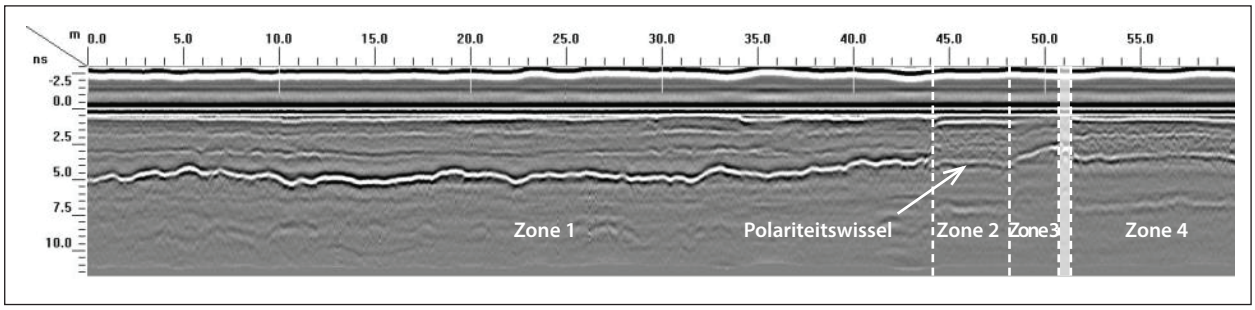
- het aantal zichtbare contactvlakken;
- de diepte van de zichtbare contactvlakken;
- de amplitude en de polariteit van de reflectie op elk contactvlak;
- de signaal-ruisverhouding.

Figuur 19 (blz. 30) toont als voorbeeld een relatief kort weggedeelte (130 m) met vijf als homogeen te beschouwen zones (eventueel gescheiden door overgangszones), gemeten in de *rue de la Limite* te Ottignies (België).

Figuur 20 (blz. 30) toont een voorbeeld van een amplitude- en polariteitswissel voor de hoofdreflectie op ongeveer 5 ns, gemeten in de *avenue des Combattants* te Ottignies. De polariteitswissel, die enkel in zone 2 voorkomt, wijst op een grote verandering in het materiaal op die plaats.



Figuur 19 *Voorbeeld van een gemeenteweg (rue de la Limite in Ottignies) met een groot aantal homogene zones*

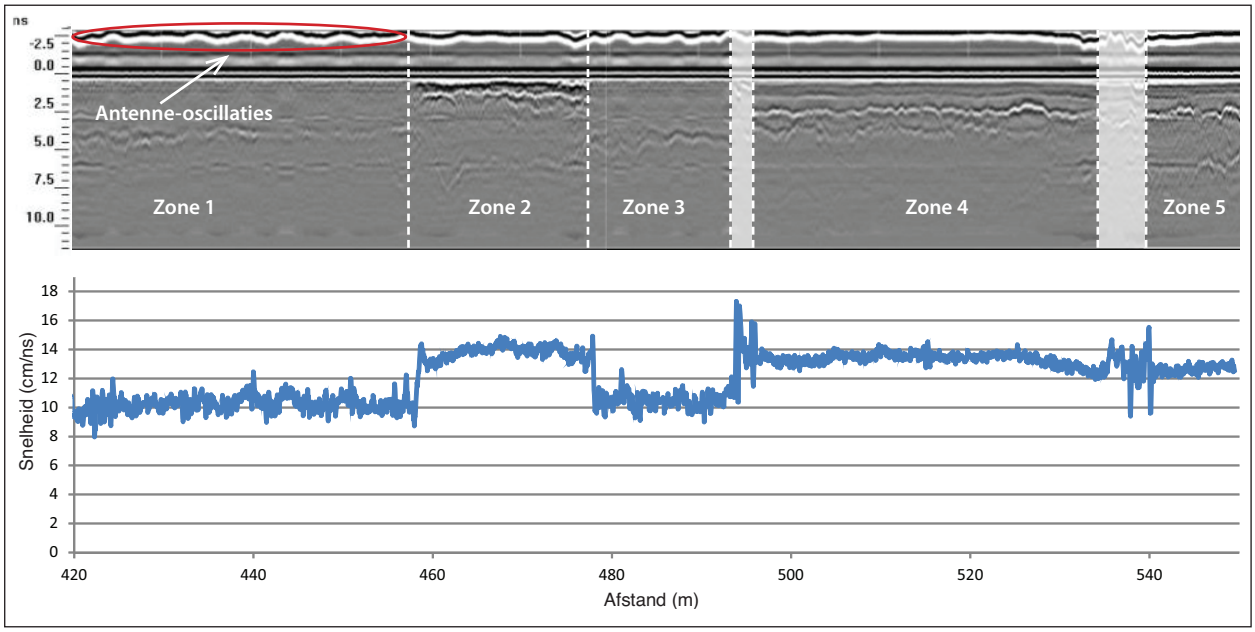


Figuur 20 *Voorbeeld van een weggedeelte met een homogene zone (zone 2) waarin een polariteitswissel optreedt (avenue des Combattants in Ottignies)*

Voor **hoornantennes** kunnen voor de bepaling van homogene zones twee extra parameters in rekening worden gebracht:

- de amplitude van de oppervlaktereflectie;
- de amplitude van de antennebewegingen ten opzichte van de grond.

De tweede parameter maakt het mogelijk zones in slechte staat (aanwezigheid van talrijke kippennesten of plaatselijke reparaties) te onderscheiden van zones die recenter werden aangelegd of die in betere staat verkeren. Dit wordt geïllustreerd op figuur 21, waar de oscillatieamplitude van de antenne ten opzichte van de grond groter is in de zones 1 en 3 dan in de zones 2 en 4. Op dezelfde figuur is te zien dat de oppervlaktesnelheid (automatisch berekend op basis van de amplitude van de oppervlaktereflectie) sterk verschilt in de verschillende homogene zones, waardoor ze gemakkelijk te onderscheiden zijn.

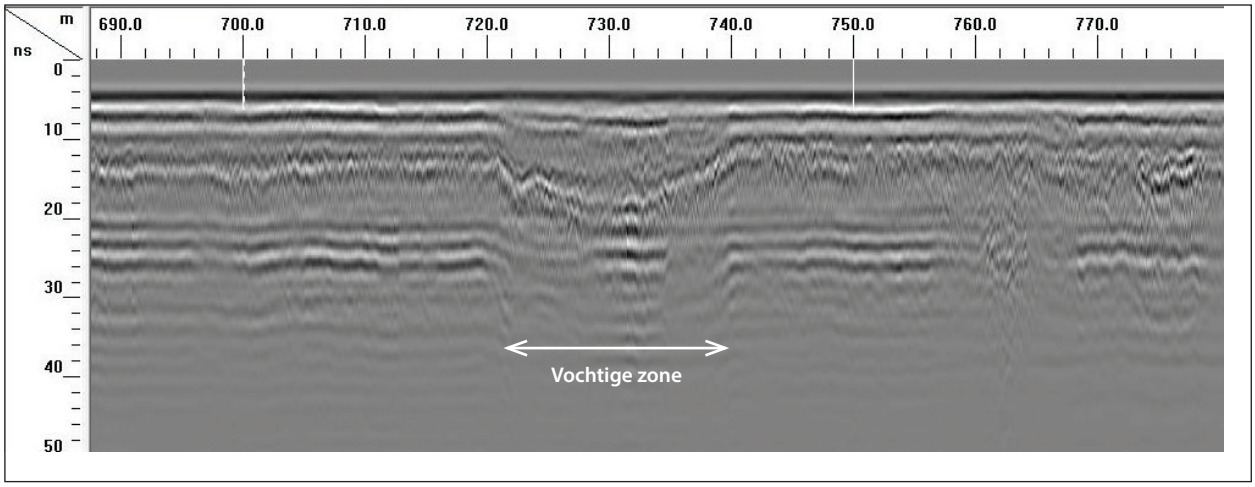


Figuur 21 *Voorbeeld van radarsignaal waarbij de verschillende homogene zones aan de hand van de oppervlaktesnelheid (berekend op basis van de amplitude van de oppervlaktereflectie) kunnen worden onderscheiden*

Aan te stippen valt, dat de diepte van de verschillende contactvlakken in eenzelfde homogene zone kan verschillen. Veranderingen in de kenmerken van het materiaal of de werkelijk aangebrachte laagdikten kunnen steeds voorkomen zelfs in een volgens het bestek als homogeen te beschouwen weggedeelte. Het gebruik van grondradar heeft overigens als doel met dergelijke wisselende dikten rekening te kunnen houden bij de terugberekening van de weg of bij de bepaling van de locaties voor kernboringen (die steeds in een zone zonder veranderingen worden gekozen, zodat kleine fouten in de lokalisatie geen invloed op de interpretatie van de meting hebben). In dergelijke gevallen wordt bij de bepaling van homogene zones enkel rekening gehouden met plotselinge of zeer grote dikteschommelingen.

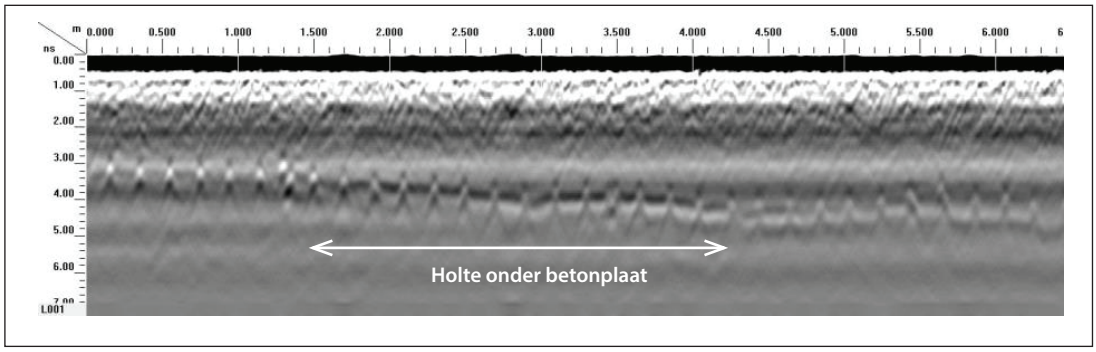
Als bepaling van de hoeveelheid recyclebaar materiaal het doel is, moet vooreerst voor elke homogene zone de dikte die kan worden verwijderd, worden geschat. Voorts moet worden nagegaan of en waar zich reflectoren in het betrokken weggedeelte bevinden, om beschadiging ervan (of van de bouwmachines) tijdens de werkzaamheden te voorkomen.

Als detectie van beschadigde zones het doel is, verschilt de procedure licht. In een als homogeen te beschouwen zone wordt naar signaalveranderingen gezocht. Zo kan men de diepteverschillen bij contactvlakken nagaan, die verband kunnen houden met de laagdikte, maar ook met de kwaliteit en de vochtigheid van de materialen (vertraging van de voortplanting en reproductie van een "valse" te grote dikte). Bij wijze van voorbeeld toont figuur 22 een signaalverandering die plaatselijke deflectie in een contactvlak als gevolg van een vochtige zone aan het licht brengt.



Figuur 22 *Radarsignaal (400 MHz) dat een dikteschommeling in het oppervlaktemateriaal als gevolg van een vochtige zone zichtbaar maakt*

Als detectie van beschadigde zones het doel is, dient ook op plaatselijke amplitude- en polariteitsveranderingen in contactvlakken te worden gelet. Bij wijze van voorbeeld toont figuur 23 hoe de veranderingen in de gereflecteerde amplitude onderaan een gewapende betonplaat de ligging en de omvang van een holte zichtbaar maken. Plaatselijke reflecties op geregelde afstand van elkaar stemmen overeen met een betonwapening.



Figuur 23 *Radarsignaal (2,6 GHz) dat een holte onder een betonplaat aan het licht brengt*

Meetmethode – MN 91/16 – 2016

Gebruik van grondradar voor wegconditieonderzoek – Methodieken / Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw.
- Brussel : OCW, 2016.
- 40 blz.
- (Meetmethode OCW, ISSN 1376-9316 ; 91).

Grond- of georadar (*Ground-Penetrating Radar – GPR*) is een niet-destructieve geofysische techniek waarmee veranderingen in wegconstructies kunnen worden gedetecteerd. Na passende verwerking en zorgvuldige interpretatie van de meetgegevens kunnen onvolkomenheden (holten, gebrekkige hechting), ondergrondse nutsvoorzieningen (kabels en leidingen) en wapeningen worden gedetecteerd. De resultaten kunnen ook dienen om homogene zones en geschikte locaties voor kernboringen of proefsleuven te bepalen. In combinatie met deflectiemetingen en kernboringen maakt grondradartechniek het mogelijk de dikte en ruimtelijke spreiding van lagen in een wegconstructie nauwkeuriger te schatten, zodat door terugberekening betrouwbaardere modulussen worden verkregen. De keuze en het gebruik van grondradartechniek vereist echter enige ervaring van de gebruiker.
Uit de ervaring die uit metingen in gecontroleerde omstandigheden op een proefstrook in de hal van de OCW-vestiging te Waver en op wegen is opgedaan, zijn dan ook praktische aanbevelingen gedistilleerd om grondradargebruikers te helpen bij de keuze van de uitrusting en het inzamelen, verwerken en interpreteren van meetgegevens. Het eerste hoofdstuk van deze OCW-publicatie beschrijft de uitvoering van de metingen. In het tweede komt de gegevensverwerking aan bod. Er zijn twee aanvullende bijlagen, respectievelijk over de schatting van de laagdikten op basis van de reflectieamplitude en de voortplantingstijd en over de bepaling van homogene zones.

ITRD-classificatie

50 Aanleg en controle op de uitvoering ; 60 Onderhoud

ITRD-trefwoorden

0177 RICHTLIJN ; 2778 PROEFWEG ; 2952 LAAG ; 2955 BAANLICHAAM ; 3471 WAPENING ; **3857 CONDITIEONDERZOEK** ; 5255 VERANDERING ; **5742 GEOFYSICA** ; 5916 HOMOGENITEIT ; 5926 WEERKAATSING ; 5933 DIKTE ; **6118 GEORADAR** ; 6136 METING ; **6155 MEETAPPARAAT** ; **6216 NIET DESTRUCTIEF** ; 6731 OVERDRACHT ; 8623 GEGEVENS VERZAMELEN ; 8655 INFORMATICA ; 9011 DIMENSIONERING ; 9020 SCHATTING

Bestelling

Kenmerk: MN 91/16 Prijs: 11,00 € (excl. 6 % btw) Fax: + 32 2 722 33 74
publication@brrc.be

Wettelijk depot: D/2016/0690/2
ISSN 1376-9316

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 - Fax: 02 772 33 74
www.ocw.be