

**Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und
Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen
(Pilotuntersuchung)**

**A relationship between the dielectric properties of asphalt pavements
and the present condition of the road**

**Relation entre les propriétés diélectriques des revêtements routiers et
leur condition**

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Johannes Hugenschmidt, Dipl.-Geophysiker, MBA

**Forschungsauftrag VSS2005/701 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen-
und Verkehrsfachleute (VSS)**

November 2009

1265

Inhalt

1	Zusammenfassung	4
2	Résumé	5
3	Summary	6
4	Zielsetzung	7
5	Georadar	8
6	Projekt und Methodik	16
7	Durchführung der Radarmessungen	17
8	Durchführung der IRI-Messungen	22
9	Ergebnisse international	23
10	Ergebnisse Schweiz	27
11	Durchführung der MLS Messungen	32
11.1	Beschreibung MLS 10	32
11.2	Vorbereitung und Durchführung der Messungen	34
11.3	Belagsaufbau im Messfeld	38
11.4	Vergleich vor, während und nach einer Million Zyklen	39
12	Schlussfolgerungen	43
13	Dank	44
14	Literatur	45
15	Beilagen	46
15.1	Beschreibung des APL Gerätes	46
15.2	IRI-Ergebnisse.....	51

1 Zusammenfassung

Georadar wird seit vielen Jahren erfolgreich für strukturelle Untersuchungen von Verkehrsbauwerken eingesetzt. Die Eignung des Verfahrens für die Untersuchung vieler Fragestellungen wie beispielsweise Schichtdicken oder die Lokalisierung von Einbeuten in Betonteilen ist bewiesen. Heute gibt es Bestrebungen darüber hinaus mit Georadar auch direkt Veränderungen von Materialeigenschaften zu untersuchen. Während des hier dokumentierten Forschungsprojektes wurde die Frage geklärt, inwieweit ein Zusammenhang zwischen den dielektrischen Eigenschaften von Asphaltbelägen und dem Alter bzw. Zustand der Strasse besteht. Da dielektrische Eigenschaften mit Georadar einfach zu messen sind, könnte ein derartiger Zusammenhang den Weg für die Optimierung von Unterhaltmassnahmen auf ganzen Strassennetzen eröffnen. In grösseren Zeitabschnitten durchgeführte Radaruntersuchungen könnten Bereiche identifizieren, wo in naher Zukunft Probleme zu erwarten sind, oder wo eine detailliertere Betrachtung sinnvoll ist.

Die erforderlichen Daten wurden durch Messungen in Finnland, Griechenland und der Schweiz aufgezeichnet. Die Partner für diese Messungen waren die Firma Roadscanners aus Finnland und die Technische Universität Athen, wo auch die internationale Auswertung der Daten vorgenommen wurde. Zusätzlich wurden die in der Schweiz aufgenommenen Daten durch die Empa detailliert ausgewertet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass durchaus gewisse Trends bzgl. des Zusammenhangs zwischen den dielektrischen Eigenschaften des Strassenbelages und dem Alter der Strassen festzustellen sind. Diese Trends sind aber weder eindeutig noch konsistent genug um für die Untersuchung ganzer Strassennetze anwendbar zu sein.

2 Résumé

Le Géoradar à été utilisé depuis de nombreuses années dans le cadre de l'inspection structurelle des infrastructures routières. Il à été démontré que le Géoradar est capable d'apporter des solutions à de nombreux problèmes tels que la détermination de l'épaisseur de revêtements ou la localisation d'objets dans des structures en béton. De nos jours, l'analyse des changements de propriétés des matériaux est devenue un sujet de recherche important. Le projet de recherche décrit dans ce rapport, avait pour objectif l'analyse d'une possible relation entre les propriétés diélectrique de chaussées en asphalte et leur âge ainsi que leur état. L'analyse des propriétés diélectriques de matériaux étant aisée, la relation liant la condition du revêtement à ces dernières peut offrir une solution d'optimisation dans la maintenance des infrastructures routières. Des inspections régulières au Géoradar pourraient ainsi identifier et cibler des portions de routes problématiques nécessitant une inspection approfondie.

Les données utilisées dans cette étude on été récoltées en Finlande, en Grèce et en Suisse. Les participants à cette étude sont Roadscanners (Finlande) et l'Université Technique d'Athènes où l'analyse des données à eu lieu. En outre, les données provenant de Suisse on été traitées et analysées par L'Empa.

Les résultats de cette étude montrent qu'il semble avoir une faible relation entre les propriétés diélectriques et l'âge des chaussées. Cette relation n'apparaît pas suffisamment consistante pour permettre une inspection des réseaux routiers.

3 Summary

Ground Penetrating Radar has been used for many years for the structural investigation of traffic infrastructure. It has been proved that many problems such as the inspection of layer thicknesses or localizing the positions of fittings within concrete structures can be solved with GPR. Today, the investigation of changes in material properties has become an important research subject. The research project described in this report aimed at the investigation of a possible relationship between the dielectric properties of asphalt pavements and their age and condition. As dielectric properties can be investigated easily such a relationship could offer a way for the optimization of maintenance on a network level. Repeated GPR inspections could then identify road sections where problems have to be expected or where a detailed inspection is advisable.

The datasets used for this study were acquired in Finland, Greece and Switzerland. The partners involved were Roadscanners from Finland and the Technical University of Athens where the processing of the international data was performed. In addition, data from Switzerland were analyzed in detail by Empa.

The results of this study show that there seems to be a loose relationship between the dielectric properties and the age of pavements. However, this relationship is neither unambiguous nor consistent enough for being used for the inspection on a network level.

4 Zielsetzung

Im Rahmen des im vorliegenden Bericht dokumentierten Projektes wurde untersucht, inwieweit ein Zusammenhang zwischen den dielektrischen Eigenschaften von Belägen und dem Zustand des Belages bzw. der Strasse besteht. Da dielektrische Eigenschaften mit Georadar einfach zu messen sind, könnte ein derartiger Zusammenhang den Weg für die Optimierung von Unterhaltmassnahmen auf ganzen Strassennetzen eröffnen. In grösseren Zeitabschnitten durchgeführte Radaruntersuchungen könnten Bereiche identifizieren, wo in naher Zukunft Probleme zu erwarten sind, oder wo eine detailliertere Betrachtung sinnvoll ist.

5 Georadar

Unter Georadar versteht man ein elektromagnetisches Wellenverfahren. Andere gebräuchliche Bezeichnungen dieses Verfahrens sind Bodenradar, Ground Penetrating Radar (GPR), Surface Penetrating Radar und Elektromagnetisches Reflektionsverfahren (EMR). Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

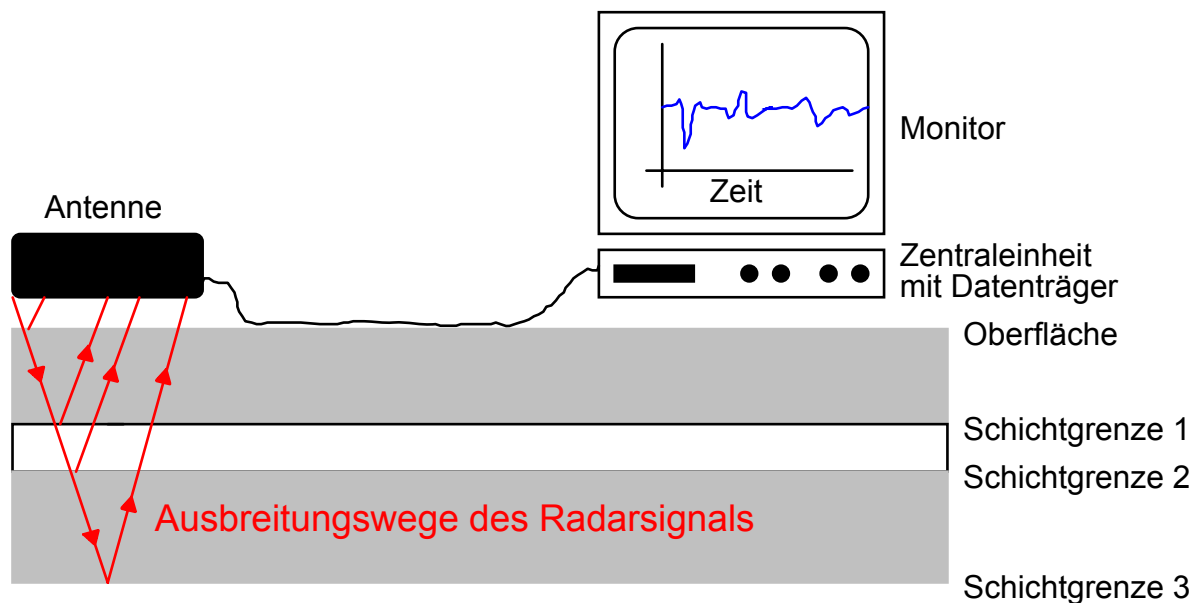


Abbildung 5-1: Funktionsprinzip des Georadar Verfahrens

Ein elektromagnetisches Signal wird von der Antenne abgestrahlt und an verschiedenen Grenzflächen reflektiert. Das reflektierte Signal wird von der Antenne empfangen und kann, nach Aufbereitung durch die Zentraleinheit, auf einem Monitor dargestellt und zur weiteren Bearbeitung auf einem PC auf Datenträger abgespeichert werden. Eine einzelne derartige Messung bestehend aus Messwerten über eine bestimmte Zeit an einem Ort wird als Spur, Einzelspur oder Scan bezeichnet. Diese Zeitreihe kann auf verschiedene Arten dargestellt werden. Im Wiggle-Modus wird eine Kurve geplottet, bei der vielfach die zwischen der Kurve und dem Nullpunkt liegenden Flächen eingefärbt sind. (siehe Abbildung 5-2, links). Eine andere übliche Darstellung ist die Codierung der Signalstärke in Farben oder Graustufen (Abbildung 5-3, Mitte).

Das Prinzip der Einzelmessung an einem Ort ist schematisch in der Abbildung 5-2 (rechts dargestellt).

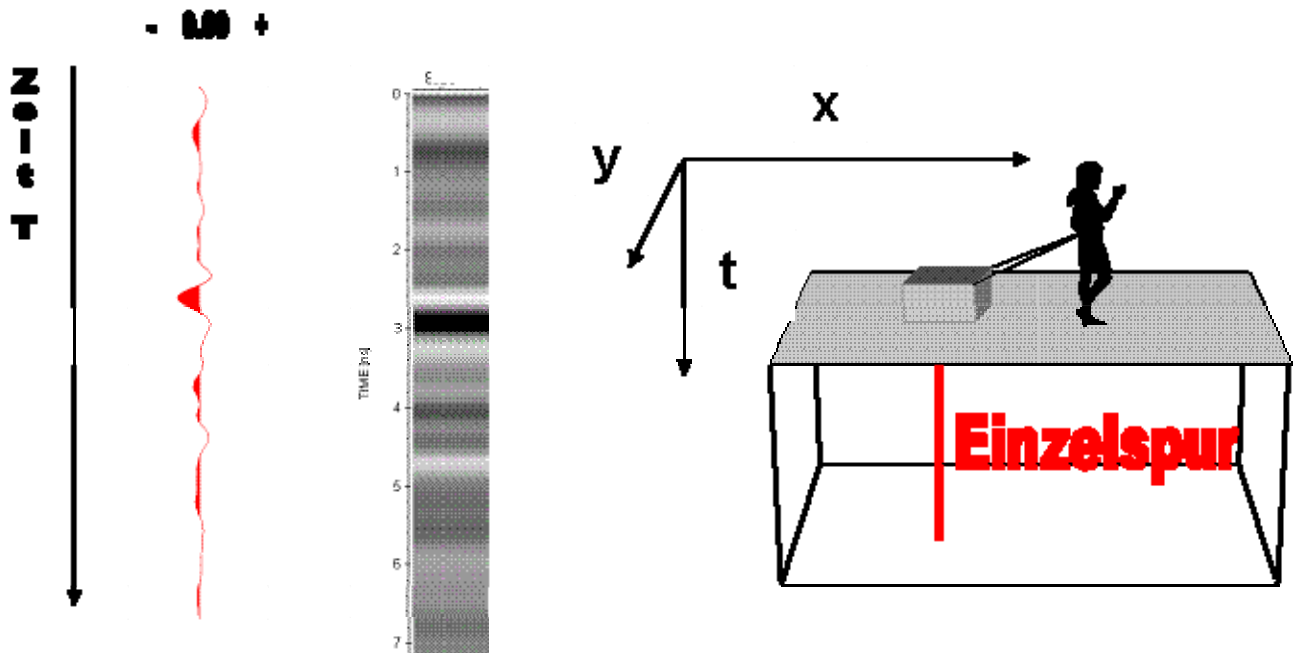


Abbildung 5-2: Einzelspur im Wiggle-Modus (links), in Graustufendarstellung (Mitte) und schematische Darstellung der Einzelmessung an einem Ort (rechts)

Radardaten werden meist entlang von Linien als Serie von Einzelspuren aufgezeichnet. Werden viele dieser Spuren nebeneinander geplottet, so ergibt sich ein Bild, welches durch Eigenschaften des Untergrundes bestimmt wird. Ein Beispiel derartiger Darstellungen, aufgezeichnet auf einer bewehrten Betonplatte zeigt Abbildung 5-3. Eine derartige Darstellung wird als Radargramm oder Radarprofil bezeichnet. Eine schematische Darstellung des Zustandekommens eines Radargramms ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

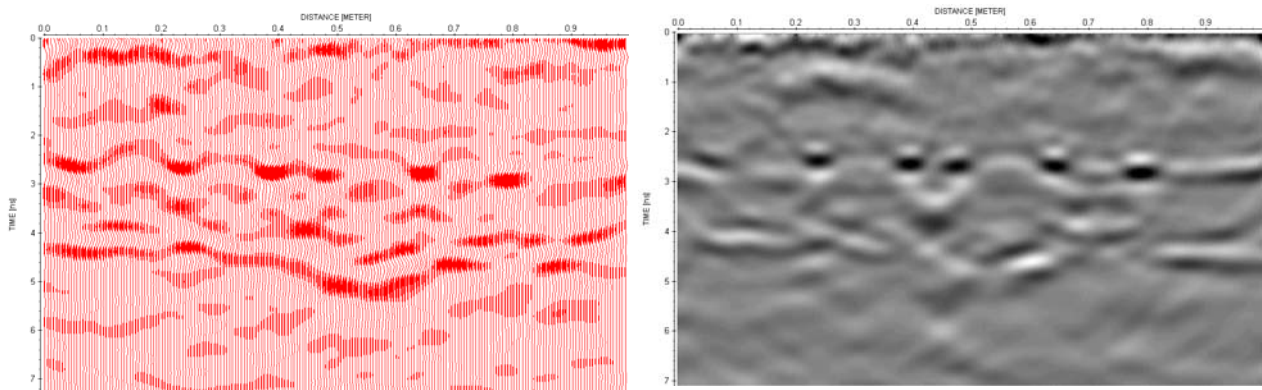


Abbildung 5-3: Radarprofil in Wiggle Darstellung (links) und in Graustufen (rechts)

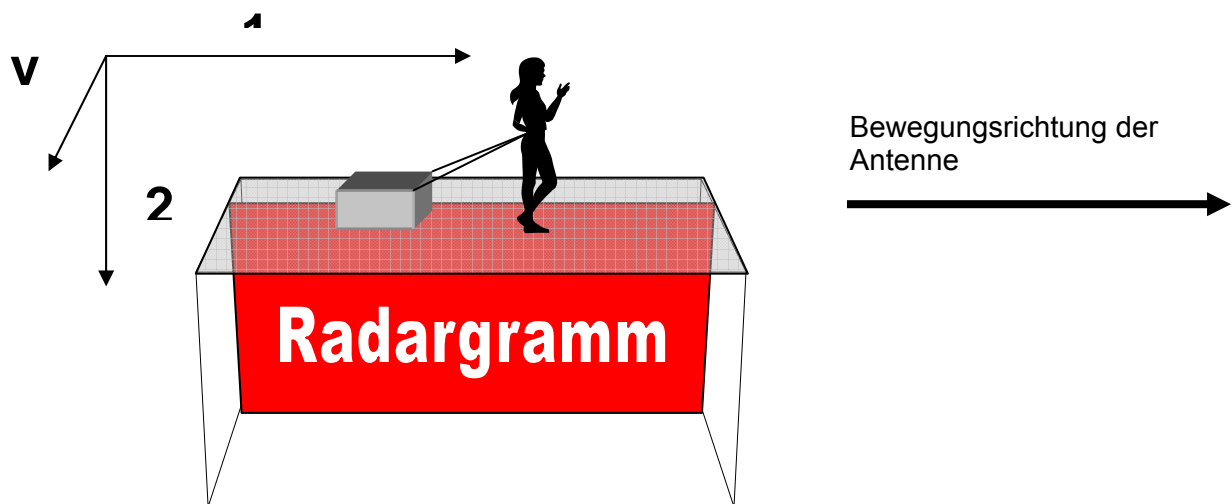


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung zur Aufzeichnung eines Radargramms

Ein derartiges Radarprofil gibt zwar Charakteristika des Untergrundes bzw. des untersuchten Mediums wieder, stellt jedoch keinen Schnitt durch dieses Medium dar. Für diesen Sachverhalt sind verschiedene Effekte verantwortlich, zwei davon sollen an einem Beispiel verdeutlicht werden.

Die Abbildung 5-5 stellt schematisch eine Radarmessung über einem aus zwei Schichten aufgebauten Untergrund dar. In der oberen Schicht befindet sich ein punktförmiger Störkörper. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals in der oberen Schicht soll deutlich geringer sein als in der unteren. Die Radarantenne wird entlang einer geraden Linie über die Oberfläche bewegt.

Das dieser Situation entsprechende Radarprofil ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Der punktförmige Störkörper verursacht eine Reflexion in Form einer Hyperbel, weil die Antenne nicht nur senkrecht nach unten sondern auch seitlich abstrahlt bzw. empfängt. Dadurch wird nicht nur direkt über dem Körper (Pos. 1) sondern auch davor bzw. danach (Pos. 1 und 3) eine Reflexion registriert. Da der Weg des Signals zum Störkörper und zurück in den Positionen 1 und 3 länger ist als in Pos. 2, benötigt das Radarsignal mehr Zeit und wird deshalb zu einem späteren Zeitpunkt registriert.

Die horizontalen Schichtgrenzen S1 und S2 innerhalb des Mediums (Abbildung 5-6) erscheinen im Messergebnis als horizontale Reflexionen. Da die Geschwindigkeit in der unteren Schicht deutlich höher ist als im oberen, benötigt das Signal für die Durchquerung weniger Zeit, weshalb die Reflexion an Schichtgrenze S2 im Radarprofil "nach oben verschoben" erscheint.

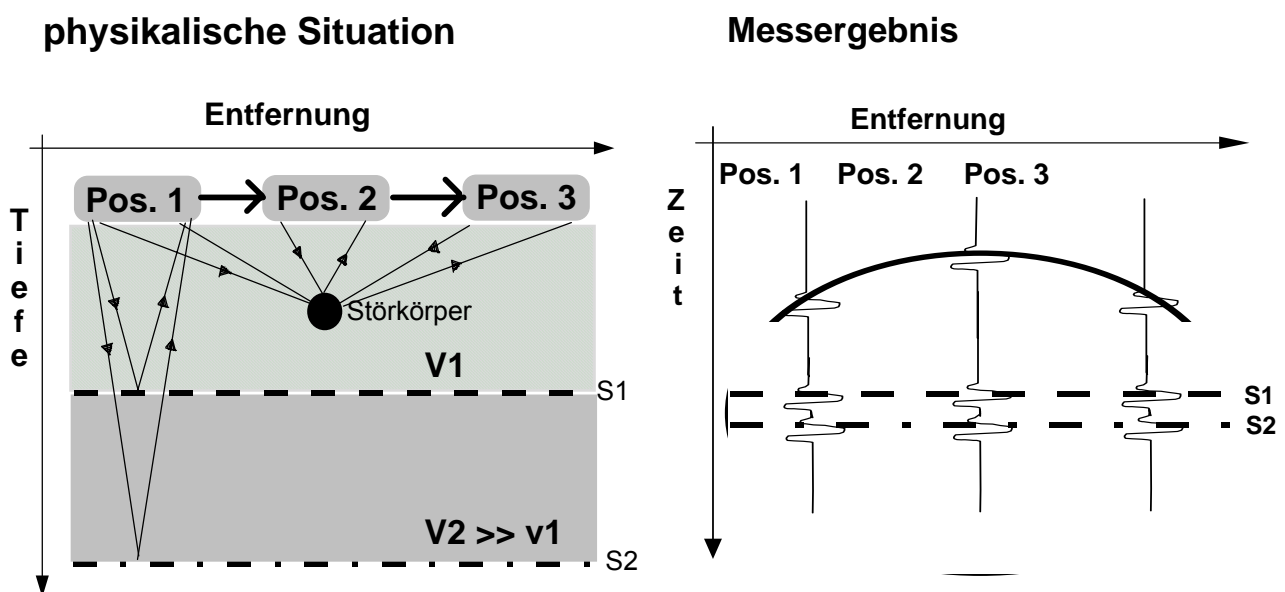


Abbildung 5-5: physikalische Situation

Abbildung 5-6: Messergebnis

Weitere Effekte, die bewirken, dass man mit einem Radarprofil zunächst keinen Schnitt durch den Untergrund erhält sind beispielsweise die Dämpfung des Signals und der Einfluss von neben dem Profil liegenden unter- oder oberirdischen Strukturen.

Durch eine geeignete Datenverarbeitung können die oben genannten Effekte zu einem grossen Teil korrigiert werden, so dass in Verbindung mit einer sachkundigen Interpretation im allgemeinen detaillierte und zuverlässige Informationen über den Aufbau des untersuchten Objektes gewonnen werden können.

Radardaten können nicht nur entlang von Linien sondern auch flächig aufgezeichnet werden, beispielsweise durch die Aufzeichnung entlang vieler paralleler Linien. Dies ermöglicht flächige oder dreidimensionale Darstellungen. Eine Zeitscheibe stellt die Radardaten einer bestimmten Zeit oder Zeitspanne dar. Die Abbildung 5-7 zeigt ein auf einem bewehrten Betonboden aufgezeichnetes Beispiel, die durch die einzelnen Bewehrungseisen verursachten Reflexionsmaxima zeichnen sich deutlich ab. Das Prinzip der Zeitscheibe ist schematisch in der Abbildung 5-8 verdeutlicht.

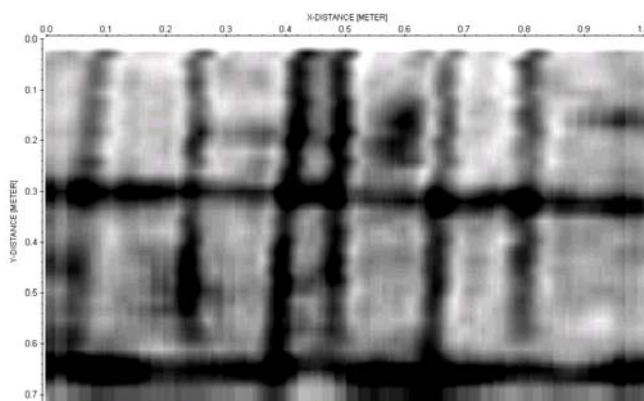


Abbildung 5-7: Zeitscheibe aus Datensatz aufgezeichnet auf bewehrtem Betonboden

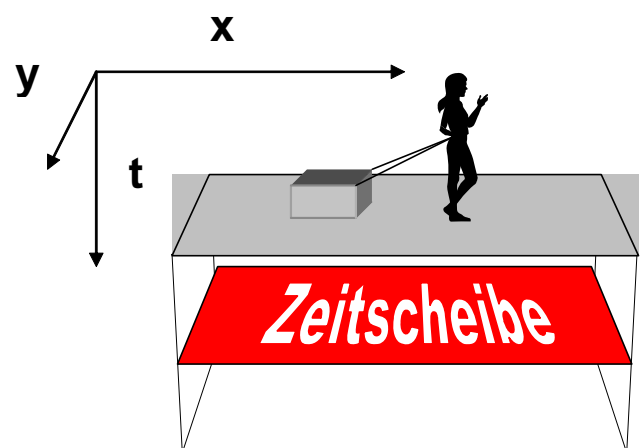


Abbildung 5-8: schematische Darstellung zum Prinzip der Zeitscheibe

Als weitere Möglichkeit können flächig erhobene Daten auch direkt als Datenkubus dargestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier Vereinfachungen erforderlich. So können beispielsweise nur diejenigen Daten dargestellt werden, die einen gewissen Grenzwert überschreiten. Ein derartiges Beispiel zeigt die Abbildung 5-9, wo wiederum die Daten des Betonfussbodens dargestellt sind. Eine Skizze des Prinzips zeigt die Abbildung 5-10.

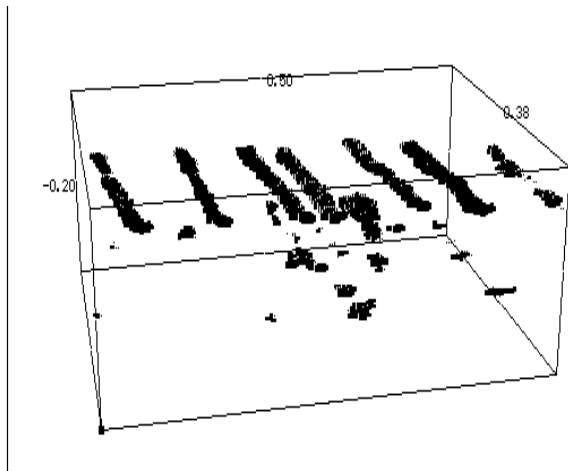


Abbildung 5-9: Datenkubus des auf dem Betonfussboden aufgezeichneten Datensatzes

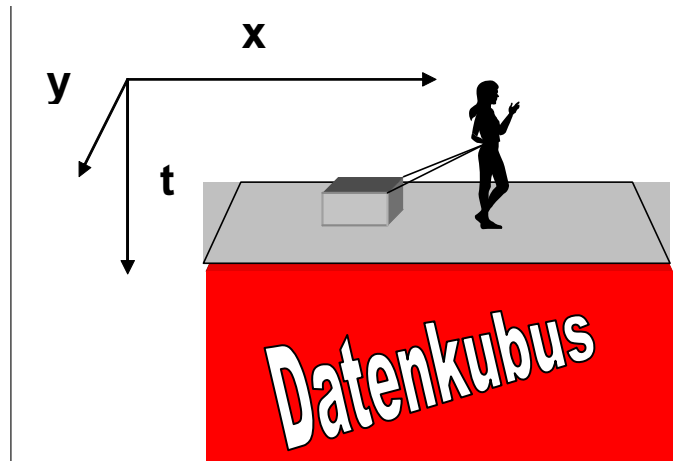


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung zum Datenkubus

Eine ausführliche Beschreibung des Georadar-Verfahrens findet sich bei David Daniels *Ground Penetrating Radar*, eine Beschreibung der Anwendung im Bauwesen in dem von der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung herausgegebenen Merkblatt B10, *Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*.

Die relative Dielektrizitätszahl, im Folgenden auch vereinfacht als Dielektrizitätszahl bezeichnet, ist eine Materialeigenschaft, welche auf die Ausbreitung des Radarsignals wesentlichen Einfluss hat. Einerseits gilt für praktische Anwendungen die vereinfachte Beziehung

$$v = c_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

wodurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit v direkt mit der Dielektrizitätszahl ϵ_r in Verbindung gebracht wird (Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 ist eine Naturkonstante). Andererseits bestimmen die unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen von zwei Materialien die Reflexionsstärke gemäss

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

Mit dem Reflexionskoeffizienten r und den Dielektrizitätszahlen ϵ_{r1} und ϵ_{r2} der Materialien 1 und 2. Besteht Material 1 aus Luft, so kann deren Dielektrizitätszahl als konstant angenommen werden und die Gleichung erlaubt eine einfache Bestimmung der Dielektrizitätszahl des Materials 2 über

die Reflexionsstärke an der Materialoberfläche. Einen Überblick über die Dielektrizitätszahlen verschiedener Materialien gibt die Tabelle Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: relative Dielektrizitätszahlen verschiedener Materialien

Material	Rel. Dielektrizitätszahl bei 500MHz bis 1 GHz
Luft	1
Süsswasser	81
Asphalt	5-9
Beton (trocken)	4-7
Beton (feucht)	8-14

Ein Zusammenhang zwischen dem Alter bzw. Zustand eines Strassenbelages und der Dielektrizitätszahl ist aufgrund der verschiedenen ablaufenden Prozesse wie Nachverdichtung, Rissbildung oder dem Eindringen von Wasser nicht nur möglich sondern wahrscheinlich. Saarenketo (2004) schlägt den in Abbildung 5-11 vorgestellten Zusammenhang im Sinne einer noch näher abzuklärenden Hypothese vor. Demnach steigt die Dielektrizitätszahl unmittelbar nach dem Einbau zunächst sprunghaft und anschliessend gleichmässig an. Rissbildung führt schliesslich zu einem raschen Abfall.

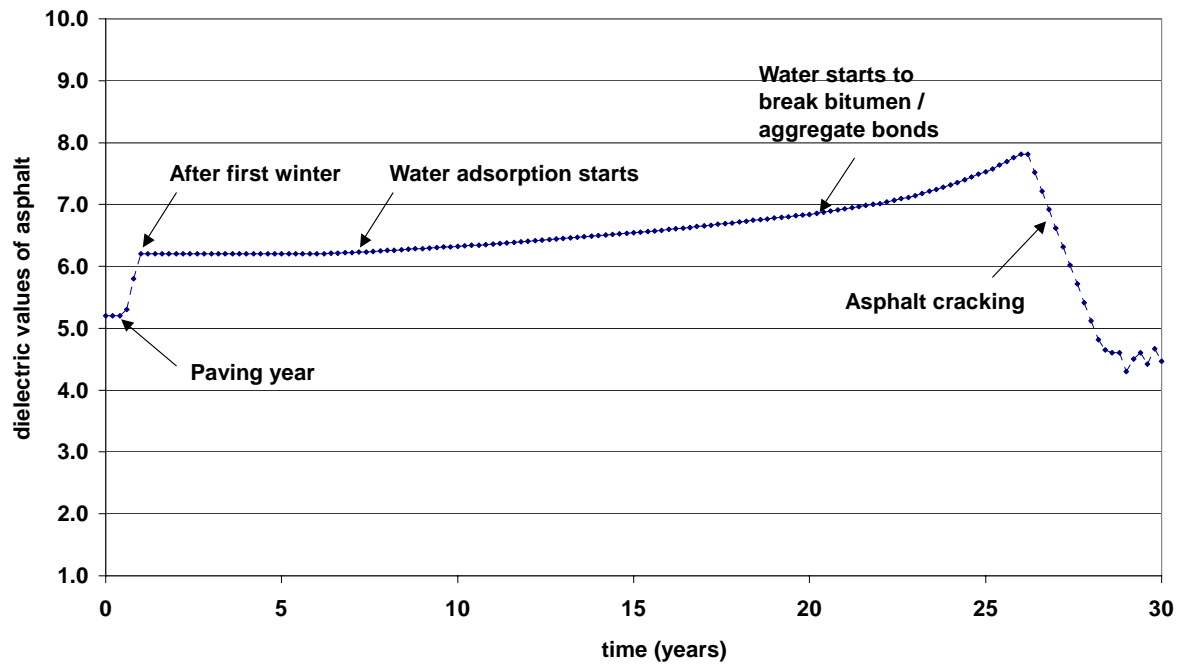


Abbildung 5-11: rel. Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von der Zeit

6 Projekt und Methodik

Um die in Abbildung 5-11 dargestellte Hypothese zu prüfen, wurden Radar- und IRI-Messungen in Finnland, Griechenland und der Schweiz durchgeführt. Durch die Messungen in den drei Ländern konnte der Aufwand für die einzelnen Teilnehmer in einem vertretbaren Rahmen gehalten werden. Die Messungen wurden auf Strassen verschiedenen Alters durchgeführt. In den einzelnen Ländern wurden Strassen ausgewählt, deren Deckschicht gleich bzw. möglichst ähnlich war. Um den Zustand der Strassen zu erfassen wurden IRI-Messungen durchgeführt. Gemäss Sayers (1986) besteht ein Zusammenhang zwischen dem IRI-Wert und dem Zustand einer Strasse. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 6-1 vereinfacht dargestellt. Die Radar- und IRI-Messungen auf Strassen verschiedenen Alters ermöglichten es, die aus den Radardaten ermittelte relative Dielektrizitätszahl in Bezug zum Alter der Strasse und zum IRI-Wert zu setzen.

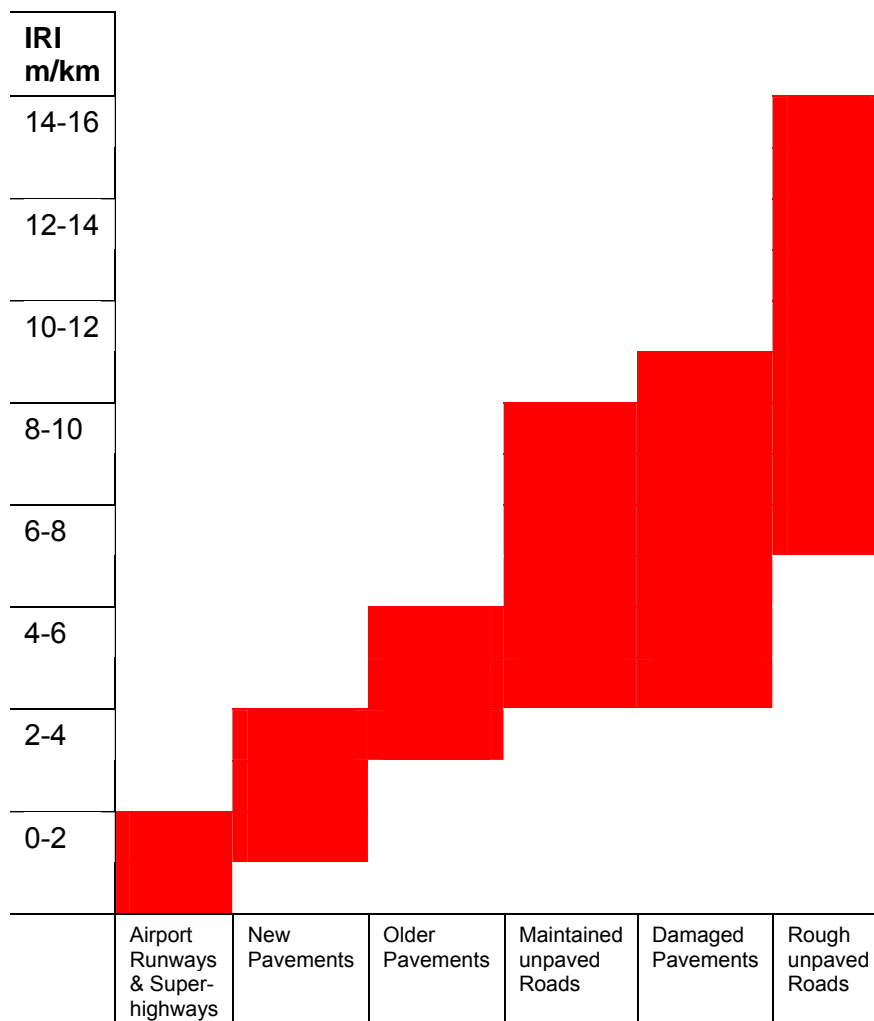


Abbildung 6-1: IRI Skala (vereinfacht nach Sayers et al., 1986)

7 Durchführung der Radarmessungen

Die Radarmessungen wurden während drei Nächten im Frühling/Sommer 2005 bei trockener Witterung durchgeführt, die Fahrbahn war bei allen Messungen trocken. Um die Vergleichbarkeit mit den in Finnland und Griechenland durchgeführten Messungen zu gewährleisten wurde mit den gleichen Messparametern und der gleichen Antenne gemessen. Zwischen den Messungen auf den Strassen wurde jeweils zu Kalibrationszwecken über einer Metallplatte gemessen.

Die Abbildung 7-1 zeigt das Messfahrzeug mit den montierten Antennen. Die Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-4 listen die Aufzeichnungsparameter, die eingesetzten Geräte, die beteiligten Personen und die gemessenen Strassen auf.



Abbildung 7-1: Messfahrzeug mit GSSI Modell 4105 Antenne

Tabelle 7-1: Aufzeichnungsparameter

Spuren pro Meter:	10
Spurlänge	20 ns
Filter:	500MHz-5000MHz FIR Boxcar
Antennenhöhe:	0.45m

Tabelle 7-2: eingesetzte Geräte

Radargerät:	GSSI SIR-20
Antenne:	GSSI Modell 4105 Horn
Mobiler Aufbau:	Empa-Eigenbau
GPS:	Trimble Modell 5700 RTK

Tabelle 7-3: beteiligte Personen

Verantwortlicher Radarmessung:	Johannes Hugenschmidt, EMPA
Verantwortlicher Positionskontrolle	Roman Mastrangelo, EMPA

Tabelle 7-4: Strassenverzeichnis

Baujahr	Ort	Bezeichnung	km	Deckschicht	Tragschicht	Position
Tag-1	12.-13. may 2005					
2000	Fällanden	Maurstr. S-1	0.800 - 2.080	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 32 mm	best. Strasse	Fällanden-Maur, Mitte Fahrspur
2000	Fällanden	Maurstr. S-1	0.800 - 2.080	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 32 mm	best. Strasse	Maur-Fällanden, Mitte Fahrspur
2000	Fällanden	Maurstr. S-1	0.800 - 2.080	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 32 mm	best. Strasse	Fällanden-Maur, Rechte Radspur
2000	Fällanden	Maurstr. S-1	0.800 - 2.080	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 32 mm	best. Strasse	Maur-Fällanden, Rechte Radspur
2000	Fällanden	Schwerzenbachstr. S-2	0.200 - 1.100	SMA 11, Olexobit SMA, Schichtdicke 46 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 89 mm	Fällanden-Schwerzenbach, Mitte Fahrspur
2000	Fällanden	Schwerzenbachstr. S-2	0.200 - 1.100	SMA 11, Olexobit SMA, Schichtdicke 46 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 89 mm	Schwerzenbach-Fällanden, Mitte Fahrspur
2000	Fällanden	Schwerzenbachstr. S-2	0.200 - 1.100	SMA 11, Olexobit SMA, Schichtdicke 46 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 89 mm	Fällanden-Schwerzenbach, Rechte Radspur

				mm	mm	
2000	Fällanden	Schwerzenbachstr. S-2	0.200 - 1.100	SMA 11, Olexobit SMA, Schichtdicke 46 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 89 mm	Schwerzenbach-Fällanden, Rechte Radspur
2002	Pfäffikon Fehraltorf	Kempttalstr. S-1 Kempttalstr. S-1	0.000 - 0.750 2.700 - 3.950	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 33 mm	HMT 32 H, Olexobit HP Schichtdicke 108 mm	Fehraltorf – Pfäffikon, Rechte Radspur
2001	Pfäffikon	Hochstr. S-1	3.100 - 4.700	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 45 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 108 mm	Kempton, Rechte Radspur
2002	Pfäffikon Wetzikon	Pfäffikerstr. S-1 Pfäffikerstr. S-2	4.700 - 5.450 0.000 - 0.300	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 34 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 117 mm	Kempton, Rechte Radspur
2002	Pfäffikon Wetzikon	Pfäffikerstr. S-1 Pfäffikerstr. S-2	4.700 - 5.450 0.000 - 0.300	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 34 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 117 mm	Pfäffikon, Rechte Radspur
2001	Pfäffikon	Hochstr. S-1	3.100 - 4.700	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 45 mm	HMT 32 H, BP Structur, Schichtdicke 108 mm	Pfäffikon, Rechte Radspur
2002	Pfäffikon Fehraltorf	Kempttalstr. S-1 Kempttalstr. S-1	0.000 - 0.750 2.700 - 3.950	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 33 mm	HMT 32 H, Olexobit HP Schichtdicke 108 mm	Pfäffikon-Fehraltorf, Rechte Radspur

Baujahr	Ort	Bezeichnung	km	Deckschicht	Tragschicht	Position
Tag-2	12.-13. july 2005					
ca. 97	Henggart	Ortsumfahrung	Ca. 2 km	AB	Nicht bekannt	Henggart-Aesch, Rechte Radspur
ca. 97	Henggart	Ortsumfahrung	Ca. 2 km	AB	Nicht bekannt	Aesch-Henggart, Rechte Radspur
ca. 97	Henggart	Ortsumfahrung	Ca. 2 km	AB	Nicht bekannt	Henggart-Aesch, Mitte Fahrspur
ca. 97	Henggart	Ortsumfahrung	Ca. 2 km	AB	Nicht bekannt	Aesch-Henggart, Mitte Fahrspur
2004	Zollikon	Bergstr. S-4	0.800 - 1.800	AB 11 S, Styrelf E 40, Schichtdicke 38 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 103 mm	Downhill, Rechte Radspur
2004	Zollikon	Bergstr. S-4	0.800 - 1.800	AB 11 S, Styrelf E 40, Schichtdicke 38 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 103 mm	Uphill, Rechte Radspur
2004	Zollikon	Bergstr. S-4	0.800 - 1.800	AB 11 S, Styrelf E 40, Schichtdicke 38 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 103 mm	Downhill, Mitte Fahrspur

2004	Zollikon	Bergstr. S-4	0.800 - 1.800	AB 11 S, Styrelf E 40, Schichtdicke 38 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 103 mm	Uphill, Mitte Fahrspur
------	----------	--------------	---------------	---	--	------------------------

Baujahr	Ort	Bezeichnung	km	Deckschicht	Tragschicht	Position
Tag-3	14.-15. July 2005					
2004	Illnau-Effretikon	Kempptalstr. S-2	1.470 - 2.460	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 40 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 70 mm	Illnau-Effretikon, Rechte Radspur
2004	Illnau-Effretikon	Kempptalstr. S-2	1.470 - 2.460	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 40 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 70 mm	Effretikon- Illnau, Rechte Radspur
2004	Illnau-Effretikon	Kempptalstr. S-2	1.470 - 2.460	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 40 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 70 mm	Illnau-Effretikon, Mitte Fahrspur
2004	Illnau-Effretikon	Kempptalstr. S-2	1.470 - 2.460	AB 11 S B 50/70, Schichtdicke 40 mm	HMT 22 S, B 50/70, Schichtdicke 70 mm	Effretikon- Illnau, Mitte Fahrspur

Eine Übersicht über die geographische Lage der einzelnen Messlinien gibt die Abbildung 7-2. Hierbei handelt es sich um die Darstellung der kontinuierlichen GPS-Messung während der Radarmessung. Teilweise sind Strassenstücke in Abbildung 7-2 länger als die in der Tabelle 7-4 angegebenen Strassenkilometer, weil die Messung an möglichst günstigen Positionen, wie zum Beispiel an einer Bushaltestelle gestartet und gestoppt wurde, um Halts mitten auf der Strasse zu vermeiden. Bei der Auswertung wurden dann lediglich die Abschnitte gemäss den Strassenkilometern in der Tabelle berücksichtigt. Weiterhin zeigen sich in der Abbildung 7-2 diverse Lücken auf den einzelnen Messlinien. Dies ist auf eine mangelnde Anzahl Satelliten auf einzelnen Abschnitten, z.B. wegen der Abdeckung durch Häuser oder Bäume, zurückzuführen.

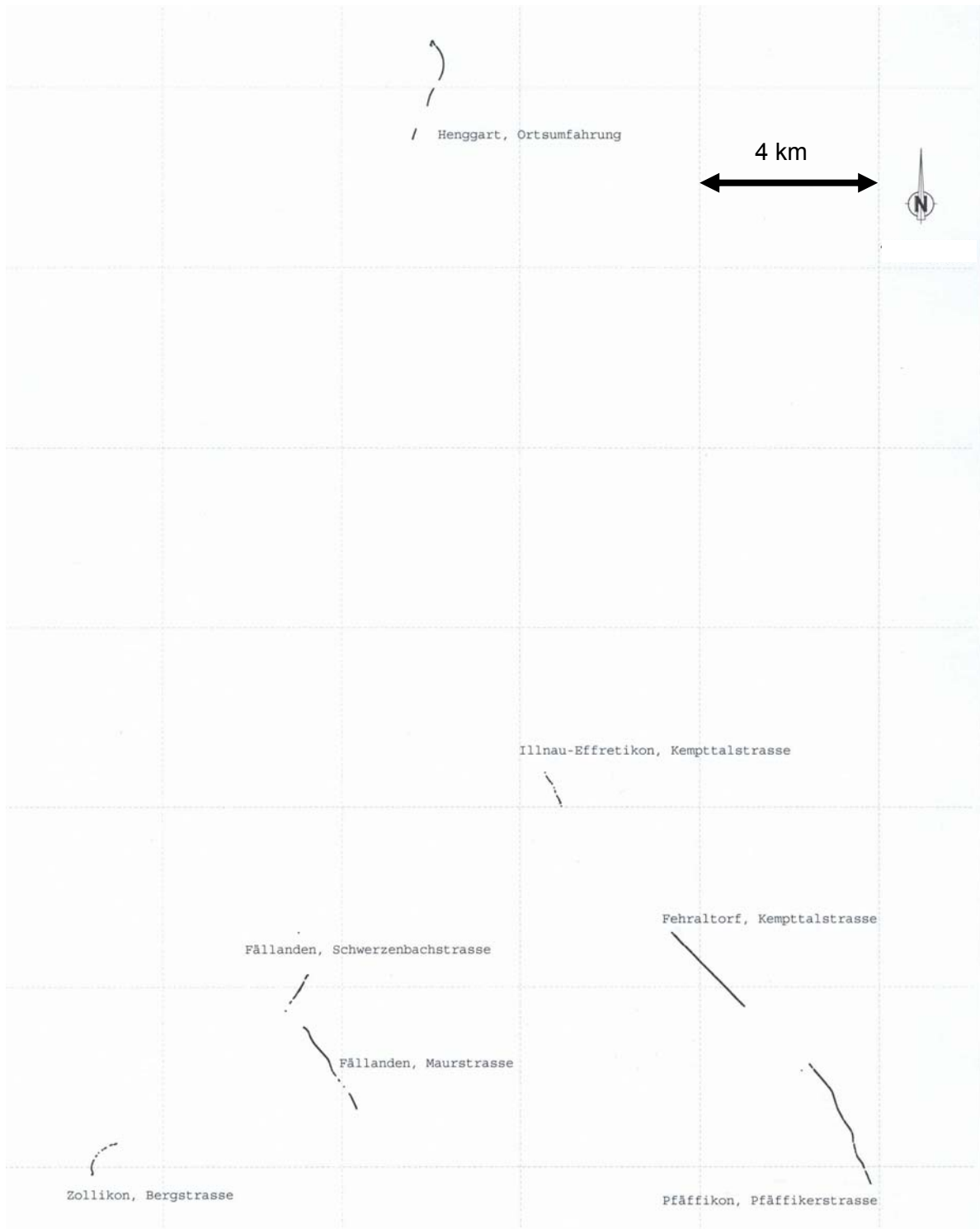


Abbildung 7-2: Übersicht über die gemessenen Strassen

8 Durchführung der IRI-Messungen

Die IRI-Messungen wurden im Frühjahr 2006 durch die Firma SACR AG in Zürich durchgeführt. Die Ergebnisse und eine Beschreibung der Messapparatur befinden sich in den Beilagen.

9 Ergebnisse international

Gemäss der in diesem Forschungsprojekt überprüften Hypothese, wird die relative Dielektrizitätszahl mit zunehmendem Alter des Asphaltbelages langsam grösser, bis sie schliesslich, bei einsetzender Rissbildung, rasch abnimmt (Abbildung 5-11). Die Auswertung der in den drei Ländern aufgezeichneten Radardaten wurde von der NTUA durchgeführt. Dabei wurden die relativen Dielektrizitätszahlen auf den einzelnen Strecken bestimmt und fünf Altersgruppen (0-1 Jahr, 1-5 Jahre, 5-10 Jahre, älter als 10 Jahre) zugeteilt. Dies wurde jeweils separat für die Spurmitte und die rechte Radspur sowie für die 1 GHz und 2 GHz Antenne und jedes Land durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle Altersklassen und alle Antennen in allen Ländern gemessen wurden. Die ebenfalls gemessenen IRI Daten wurden, entgegen den ursprünglichen Plänen nicht international ausgewertet.

Die Abbildung 9-1 zeigt die Ergebnisse für die 1 GHz Antenne in der rechten Radspur. Dargestellt sind jeweils die gemittelten Werte für jedes Land. Die minimale ermittelte rel. Dielektrizitätszahl (ϵ_r) beträgt 4.9 (Finnland, 0-1 Jahr), die maximale 7.7 (Griechenland, älter als 10 Jahre). Die über die Länder gemittelten Werte zeigt die Abbildung 9-2. Der minimale Wert von 5.3 ergibt sich für Strassen mit einem Alter unter einem Jahr, der grösste Wert von 6.9 für über 10 Jahre alte Strassen. Somit scheint es mit zunehmendem Alter auch eine Zunahme der relativen Dielektrizitätszahl zu geben, allerdings sind die Schwankungen zwischen den einzelnen Ländern erheblich und der internationale Mittelwert für 5-10 Jahre alte Strassen ist kleiner als der für 1-5 Jahre alte.

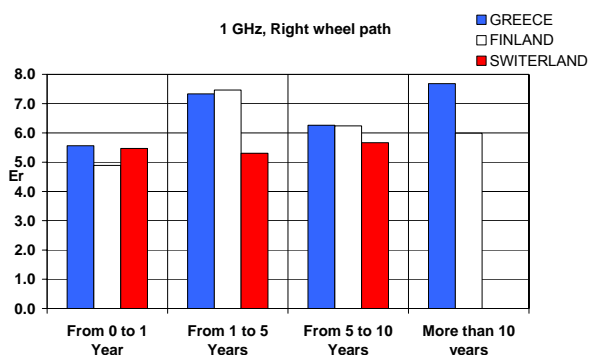


Abbildung 9-1: rechte Radspur, 1GHz

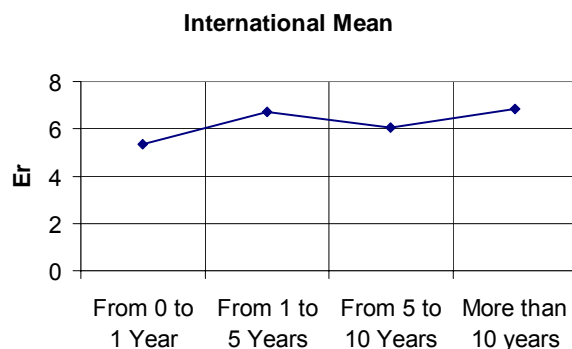


Abbildung 9-2: rechte Radspur, 1 GHz, gemittelt über Länder

Die Tabelle 9-1 zeigt die Minimal- und Maximalwerte für die einzelnen Länder. Die Bandbreite beträgt maximal 1.6 (Finnland, 0-1 Jahre) und ist damit genau so gross wie die Differenz zwischen dem grössten und kleinsten internationalen Mittelwert.

Tabelle 9-1: rechte Radspur, 1 GHz, Minimal- und Maximalwerte

	From 0 to 1 year	From 1 to 5 years	From 5 to 10 years	Over 10 years
Greece	5.3 - 5.9	7.1 - 7.6	6.1 - 6.4	7.4 - 8.4
Finland	4.1 - 5.7	7.3 - 7.6	6.0 - 6.5	5.7 - 6.3
Switzerland	5.2 - 5.8	5.0 - 5.6	5.3 - 6.0	-

Die mit der 1 GHz Antenne in der Mitte der Fahrbahn erhaltenen Ergebnisse für die einzelnen Länder zeigt die Abbildung 9-3, die über die Länder gemittelten Ergebnisse sind in Abbildung 9-4 dargestellt. Die Ergebnisse weisen eine grosse Ähnlichkeit mit denen der rechten Radspur auf, allerdings ergibt sich der grösste internationale Mittelwert von 7.4 für die 1-5 Jahre alten Strassen. Den kleinsten Mittelwert von 5.1 weisen wiederum die 0-1 Jahre alten Strassen auf.

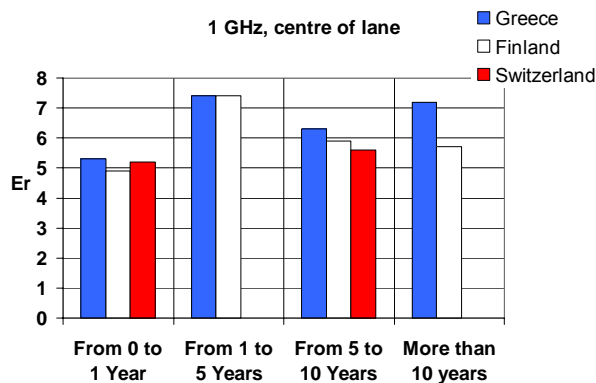


Abbildung 9-3: Mitte Fahrbahn, 1GHz

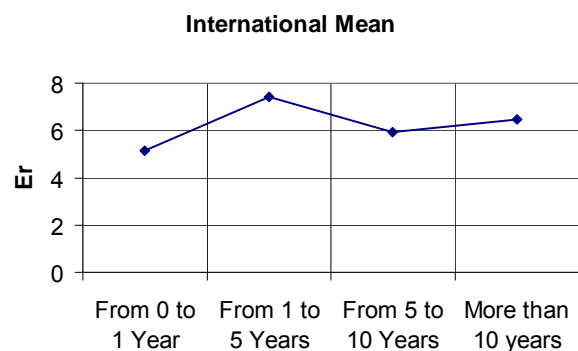


Abbildung 9-4: Mitte Fahrbahn, 1 GHz, gemittelt über Länder

Die mit der 2 GHz Antenne in der rechten Radspur erhaltenen Ergebnisse für die einzelnen Länder zeigt die Abbildung 9-5, die über die Länder gemittelten Ergebnisse sind in Abbildung 9-6 dargestellt. Messungen mit der 2 GHz Antenne wurden lediglich in Finnland und Griechenland

durchgeführt. Der grösste internationale Mittelwert von 6.7 ergibt sich für die über 10 Jahre alten Strassen. Den kleinsten Mittelwert von 5.2 weisen wiederum die 0-1 Jahre alten Strassen auf.

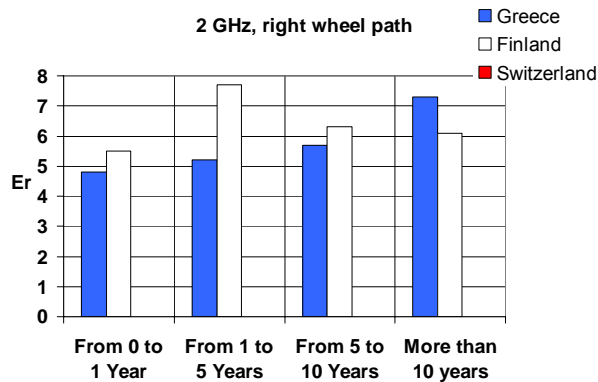


Abbildung 9-5: rechte Radspur, 2GHz

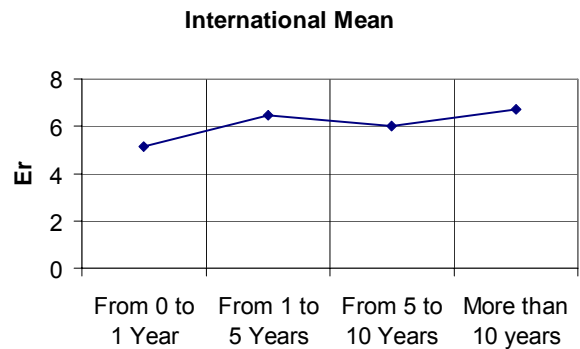


Abbildung 9-6: rechte Radspur, 2 GHz, gemittelt über Länder

Die mit der 2 GHz Antenne für die Mitte der Fahrbahn erhaltenen Ergebnisse für die einzelnen Länder zeigt die Abbildung 9-7, die über die Länder gemittelten Ergebnisse sind in Abbildung 9-8 dargestellt. Der grösste internationale Mittelwert von 7.5 ergibt sich für die über 10 Jahre alten Strassen. Den kleinsten Mittelwert von 5.0 weisen wiederum die 0-1 Jahre alten Strassen auf.

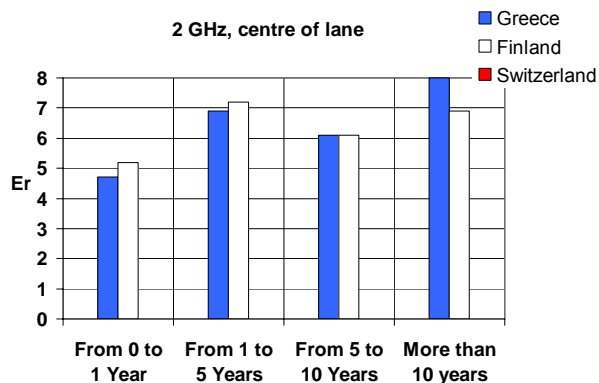


Abbildung 9-7: Mitte Fahrbahn, 2GHz

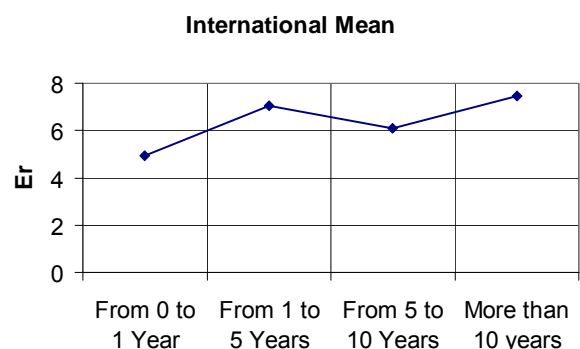


Abbildung 9-8: Mitte Fahrbahn, 2 GHz, gemittelt über Länder

Die Ergebnisse aus den drei Ländern scheinen die Hypothese einer mit dem Alter zunehmenden relativen Dielektrizitätszahl zu bestätigen. Allerdings sind die Schwankungen sowohl zwischen den einzelnen Ländern als auch innerhalb erheblich. Die internationalen Mittelwerte der 1-5 Jahre alten Strassen sind in allen Fällen grösser als die der 5-10 Jahre alten.

10 Ergebnisse Schweiz

Die Abbildung 10-1 zeigt die relativen Dielektrizitätswerte aller Schweizer Daten in Abhängigkeit vom Baujahr bzw. Alter der Strassen gemittelt über Abschnitte von jeweils 50 Metern. Die über die einzelnen Baujahre gemittelten Werte zeigt Abbildung 10-2. Eine Aufspaltung in rechte Radspur und Fahrbahnmitte zeigen Abbildung 10-3 und Abbildung 10-4. Auf den Schweizer Strassen kann die Hypothese einer mit dem Alter zunehmenden rel. Dielektrizitätszahl nicht nachgewiesen werden. Auch die leicht höheren Werte für die rechte Radspur im Vergleich zur Mitte der Fahrbahn (Abbildung 10-3, Abbildung 10-4) sind nicht signifikant.

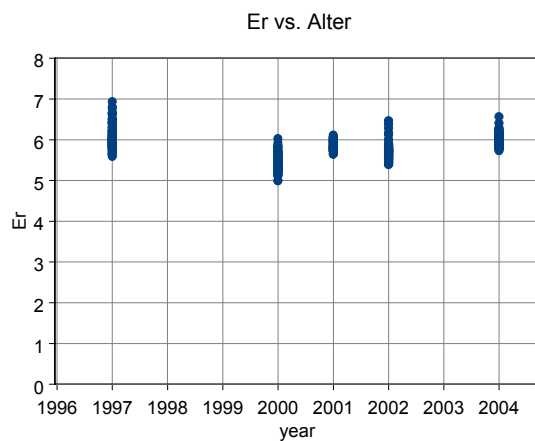


Abbildung 10-1: rel. Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom Baujahr

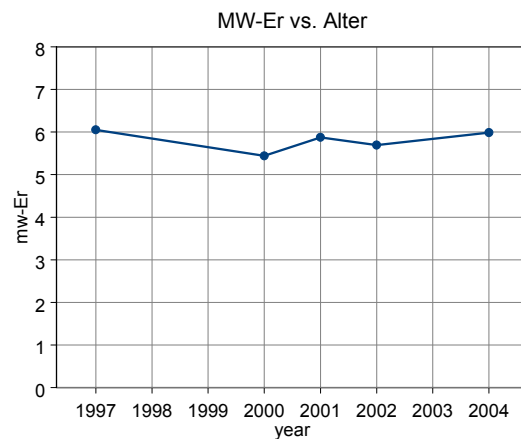


Abbildung 10-2: Mittelwert rel. Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom Baujahr

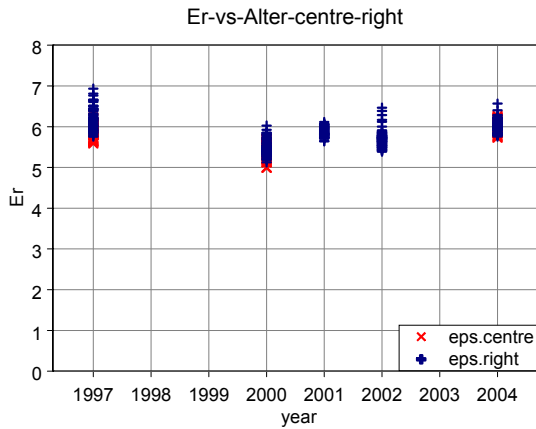


Abbildung 10-3: rel. Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von Baujahr und Position

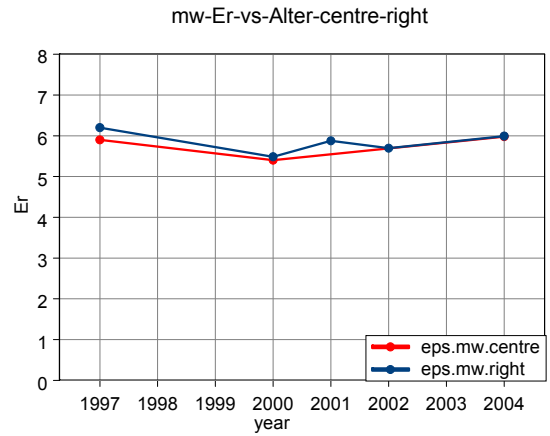


Abbildung 10-4: Mittelwert rel. Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von Baujahr und Position

Ein Vergleich der IRI-Werte (Werte für Abschnitte von je 50 Metern Länge) mit dem Baujahr der Strassen (Abbildung 10-5, Abbildung 10-6) ergibt für Strassen der Baujahre 2000 und 1997 leicht höhere Werte als für die jüngeren Strassen. Die Mittelwerte für die rechte Radspur sind höher als für die Mitte der Fahrbahn (Abbildung 10-8).

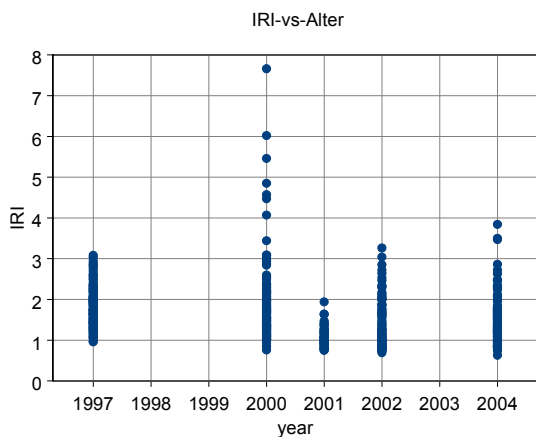


Abbildung 10-5: IRI in Abhängigkeit vom Baujahr

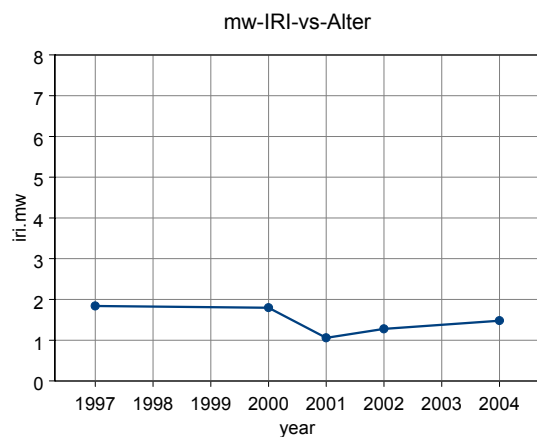


Abbildung 10-6: Mittelwert IRI in Abhängigkeit vom Baujahr

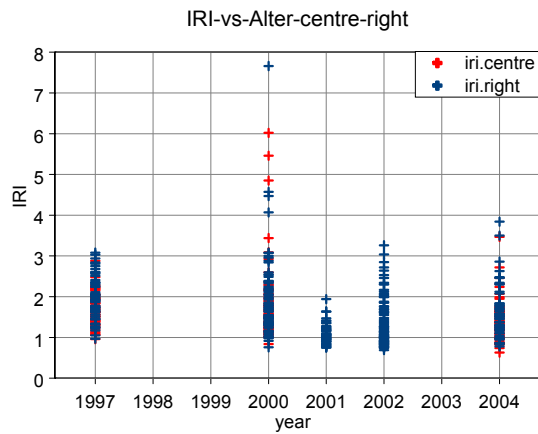


Abbildung 10-7: IRI in Abhängigkeit von Baujahr und Position

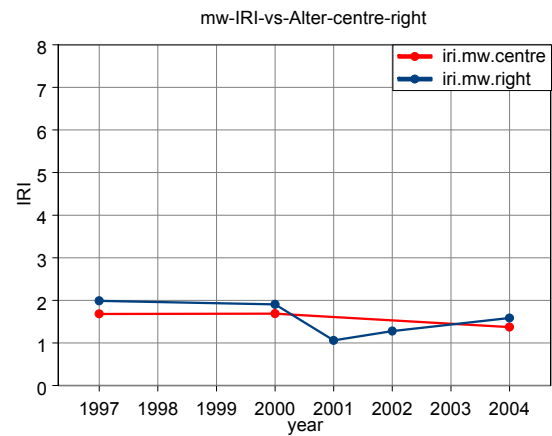


Abbildung 10-8: Mittelwert IRI in Abhängigkeit von Baujahr und Position

Die Abbildung 10-9 zeigt die relativen Dielektrizitätszahlen aufgetragen über die zugehörigen IRI-Werte für Strassenabschnitte von je 50 Metern Länge. Da die meisten Dielektrizitätswerte zwischen 5 und 7 und die meisten IRI-Werte zwischen 0 und 3 liegen, ist dieser Ausschnitt in Abbildung 10-10 vergrößert dargestellt. In der vergrößerten Punktwolke ist kein Trend auszumachen.

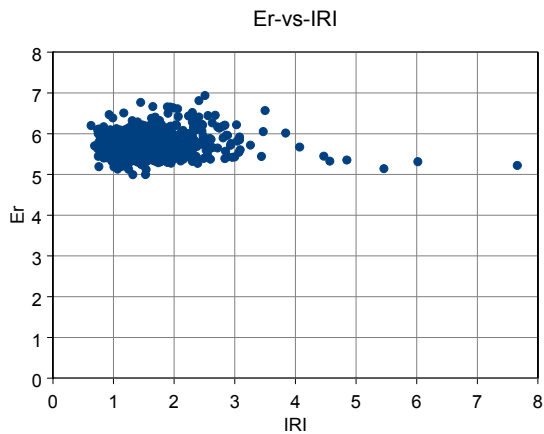


Abbildung 10-9: relative Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom IRI

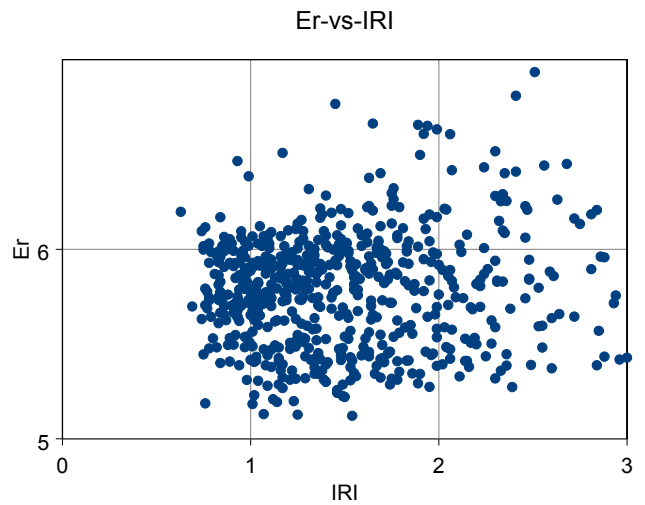


Abbildung 10-10: relative Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom IRI, vergrößerter Ausschnitt

Die Abbildung 10-11 zeigt den Bereich der relativen Dielektrizitätszahlen zwischen 5 und 7 aufgetragen über alle IRI-Werte. Hieraus lässt sich ablesen, dass sich Abbildung 5-1 Abbildung 5-1 höheren IRI-Werte die Dielektrizitätszahlen im unteren Bereich liegen. Eine Aufspaltung in rechte Radspur und Fahrbahnmitte (Abbildung 10-12) liefert keine zusätzlichen Erkenntnisse.

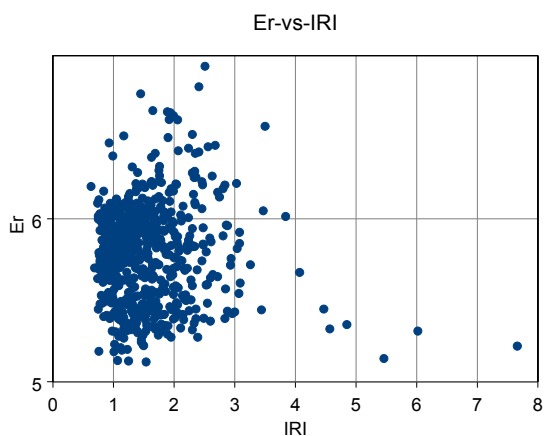


Abbildung 10-11: relative Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom IRI, vergrößerter Ausschnitt

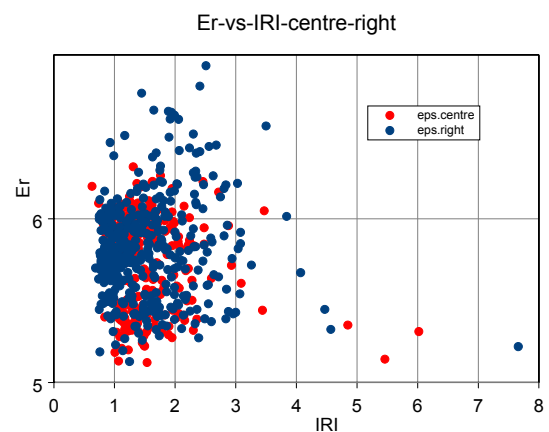


Abbildung 10-12: relative Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom IRI, vergrößerter Ausschnitt für rechte Fahrs pur und Mitte Fahrbahn

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich auf den Schweizer Strassen keine klaren Zusammenhänge zwischen den relativen Dielektrizitätszahlen und dem Alter der Strasse bzw. den

IRI-Werten ermitteln lässt. Evtl. sind die untersuchten Strassen in einem für die hier bearbeitete Fragestellung in einem zu guten Zustand.

11 Durchführung der MLS Messungen

11.1 Beschreibung MLS 10

Der Mobile Load Simulator (MLS) ist ein mobiles Gerät zur beschleunigten Simulation von Verkehrslasten auf Strassenbelägen. Als besondere Vorzüge weist die MLS 10 eine hohe Leistungsfähigkeit von bis zu 6000 Überrollungen pro Stunde, realistische Achslasten von bis zu 65 kN sowie eine weitgehende Autarkie auf. Die Abbildung 11-1 zeigt eine Gesamtansicht der Maschine und in Abbildung 11-2 ist das Prinzip dargestellt. Vier Räder laufen in einer ovalen Bahn und überfahren dabei auf einer Länge von 4.2m den Strassenbelag. Die Tabelle 11-1 gibt einen Überblick über die technischen Daten der Maschine.

Tabelle 11-1: Technische Daten MLS 10

Bezeichnung	MLS 10
Hersteller	MLS Test Systems Pty Ltd, Stellenbosch, Südafrika
Gesamtgewicht	32t
Gesamtlänge	10.7m
Belastungsstrecke	4.2m
Belastungsgeschwindigkeit	22 km/h
Max. Belastung	65 kN
Max. Belastungen pro Stunde	6000



Abbildung 11-1: MLS 10

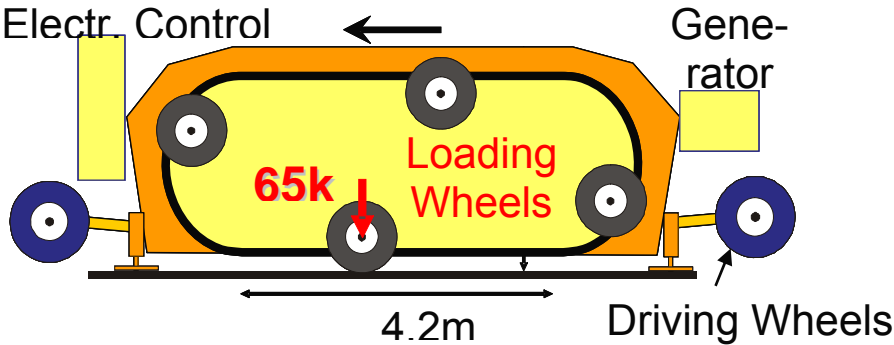


Abbildung 11-2: Funktionsprinzip MLS 10

11.2 Vorbereitung und Durchführung der Messungen

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Maschine wurden auf einem Autobahnstummel bei Hinwil/ZH im Herbst 2007 eine Million Überrollungen durchgeführt. Vor und nach diesen Überrollungen wurden Radarmessungen vorgenommen um einerseits den idealen Standort der Maschine abzuklären und andererseits den Einfluss der Überrollungen auf das Radarergebnis zu untersuchen.

Vor der Radarmessung wurden 7 Messlinien definiert und auf dem GPS-Controller abgelegt, um während der Messung für die Navigation zur Verfügung zu stehen. Die Abbildung 11-3 zeigt schematisch die Position der Messlinien, welche zusätzlich in Tabelle 11-2 aufgelistet sind.

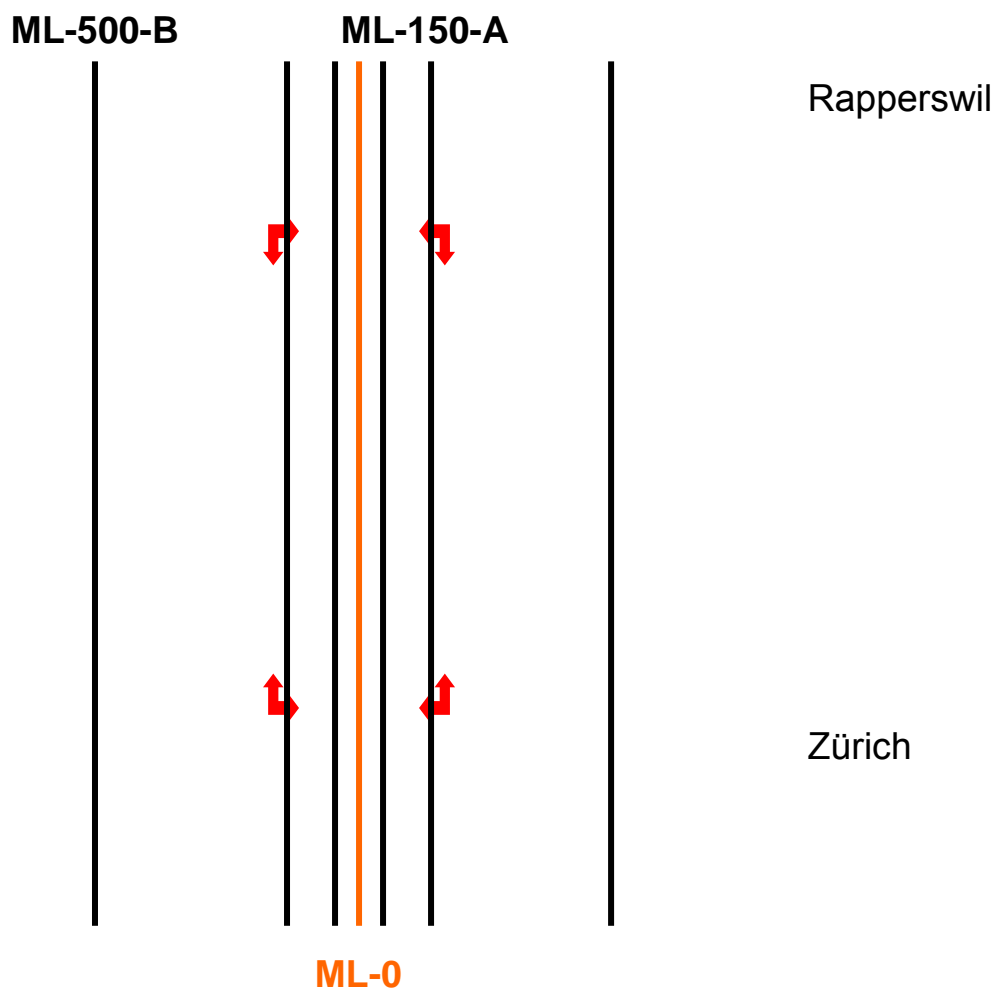


Abbildung 11-3: Position der Messlinien

Tabelle 11-2: Bezeichnung der Messlinien

Bezeichnung	Position
MLS-0	Mitte längs, Standort X (1,2)
MLS-50-A	50cm nach rechts
MLS-150-A	150cm nach rechts
MLS-500-A	500cm nach rechts
MLS-50-B	50 cm nach links
MLS-150-B	150 cm nach links
MLS-500-B	500 cm nach links

Die Radarmessungen wurden am 3. September 2007 und am 5. November 2007 jeweils bei trockener Witterung mit der mobilen Georadar-Anlage der Empa (Abbildung 11-4) durchgeführt. Zwischen diesen beiden Daten wurde die Strasse mit dem Verkehrslastsimulator mit einer Million Zyklen belastet. Die eingesetzten Geräte und die Messparameter sind in Tabelle 11-3 und Tabelle 11-4 beschrieben.



Abbildung 11-4: mobile Georadar-Anlage

Tabelle 11-3: eingesetzte Geräte

	Modell	Hersteller
Hornantennen	4205	GSSI
Radargerät	SIR 20	GSSI
Mobiler Aufbau		EMPA
GPS-System		Trimble 5700 RTK

Tabelle 11-4: Messparameter

Fahrgeschwindigkeit :	10 km/h
Spurlänge:	20 ns
Spuren pro Meter:	40
Datenverarbeitung während der Messung:	keine

Die im Anschluss an die Messung durchgeführte Datenbearbeitung beschränkte sich auf die folgenden Schritte:

- Bandpassfilter
- Korrektur der Oberflächenreflexion auf die Zeit 0.00ns
- Positionskorrektur

Die Datenbearbeitung wurde bewusst einfach gehalten, um Vergleiche zwischen den Reflexionsamplituden vor und nach der Schwerlastsimulation zu ermöglichen. Die Abbildungen Abbildung 11-5 und Abbildung 11-6 zeigen den Datensatz der Linie MLS-150-A vor and nach der Datenbearbeitung.

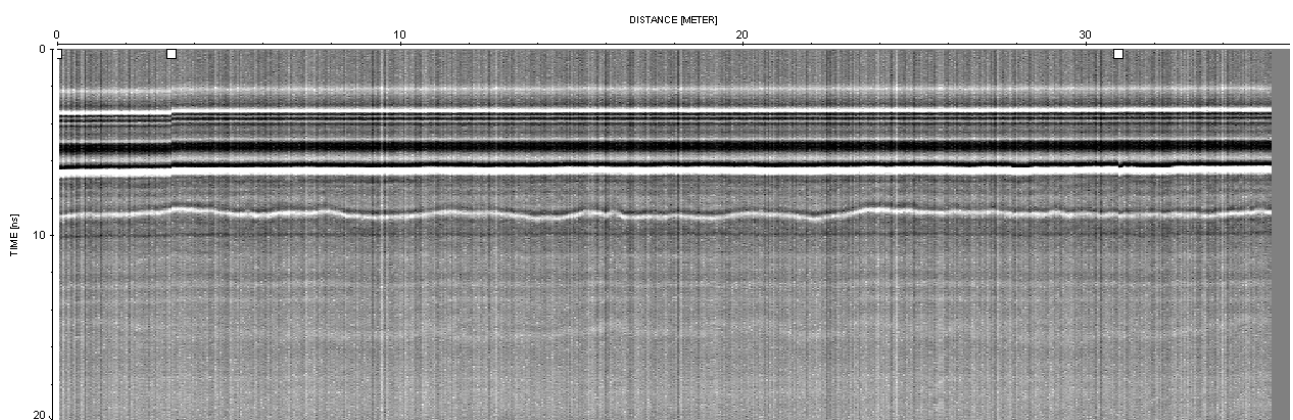


Abbildung 11-5: Radardaten der Linie MLS-150-A vor der Datenbearbeitung (vor Schwerlastsimulation)

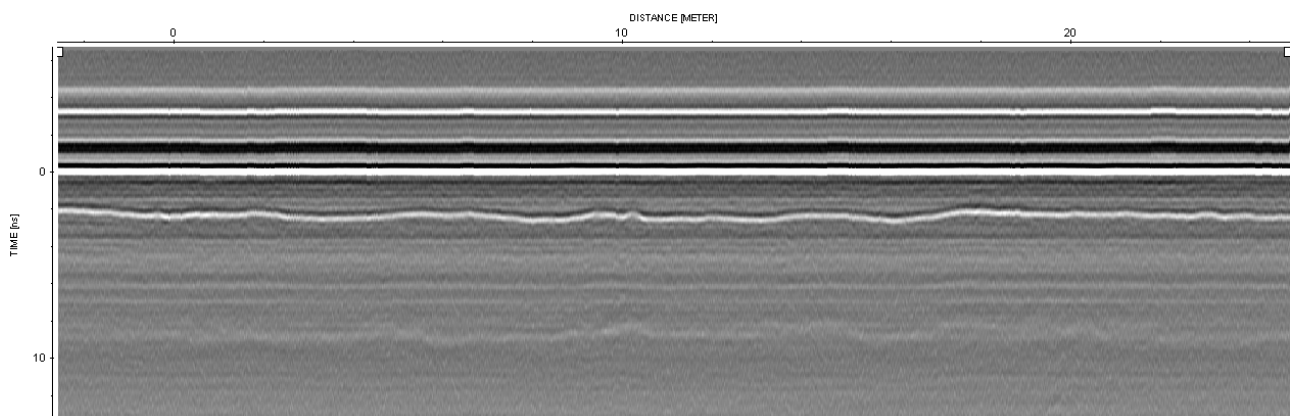


Abbildung 11-6: Radardaten der Linie MLS-150-A nach der Datenbearbeitung (vor Schwerlastsimulation)

11.3 Belagsaufbau im Messfeld

Die Abbildung 11-7 zeigt den auf der Linie MLS-0 vor der Schwerlastsimulation aufgezeichneten Datensatz (oben) zusammen mit der Auswertung der Schichtdicken (unten). Im Bereich des Messfeldes (weisser Pfeil) ergeben sich Belagsdicken zwischen 14 cm und 16 cm. Grössere Abweichungen ergeben sich ausserhalb des Messfeldes, wo die Belagsdicke lokal weniger als 10 cm beträgt. Die Untergrenze der Zementstabilisation liegt in einer Tiefe von 32 cm bis 36 cm. Die zur Umrechnung der Laufzeiten in Dicken/Tiefen erforderliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von 0.115m/ns für den Asphalt und 0.07667 m/ns für die Zementstabilisation wurde anhand der Bohrungen (rote Markierung in Abbildung 11-7) ermittelt.

Die Abbildung 11-8 zeigt den Datensatz und die Schichtdicken für die Linie MLS-150-A. Im Bereich des Messfeldes ergibt sich eine ähnliche Situation wie auf der Linie MLS-0. Ausserhalb des Messfeldes betragen die Asphaltthicken, anders als auf der Linie MLS-0, ebenfalls überall über 12 cm.

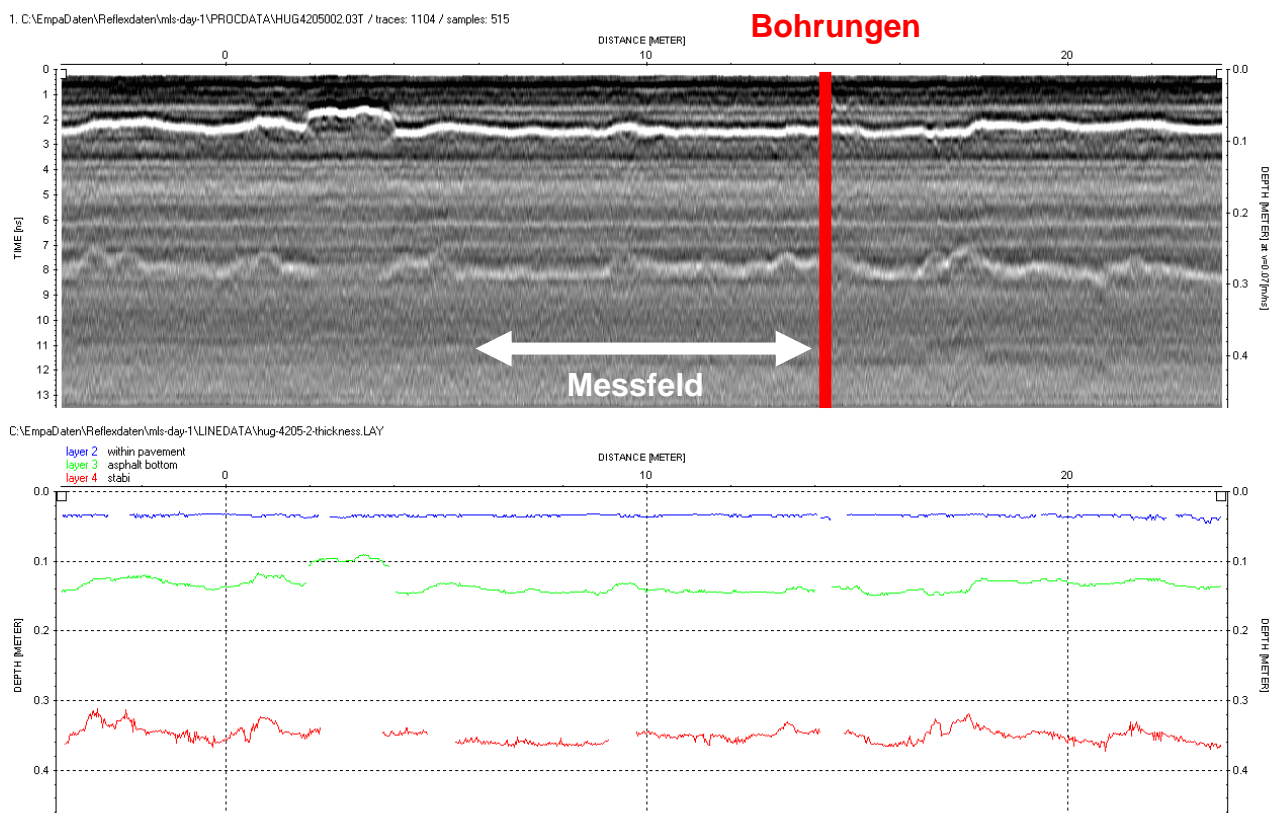
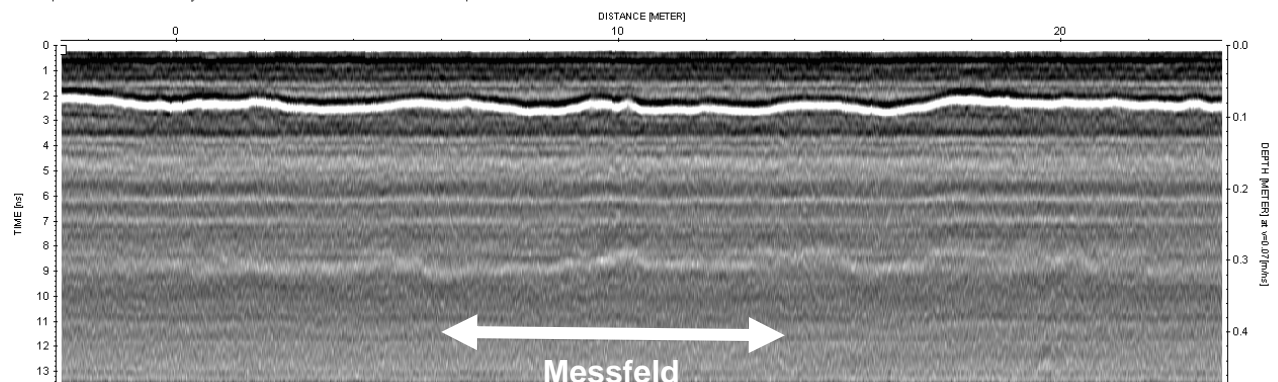


Abbildung 11-7: Schichtdicken der Linie MLS-0 (vor Schwerlastsimulation)

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\mils-day-1\PROCADATA\HUG4205004.03T / traces: 1100 / samples: 517



C:\EmpaDaten\Reflexdaten\mils-day-1\LINEDATA\hug-4205-4-thickness.LAY

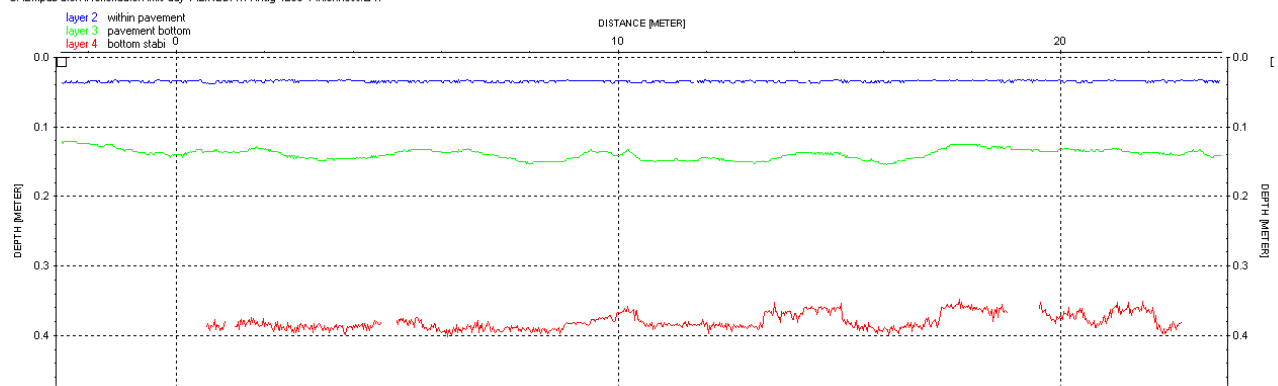
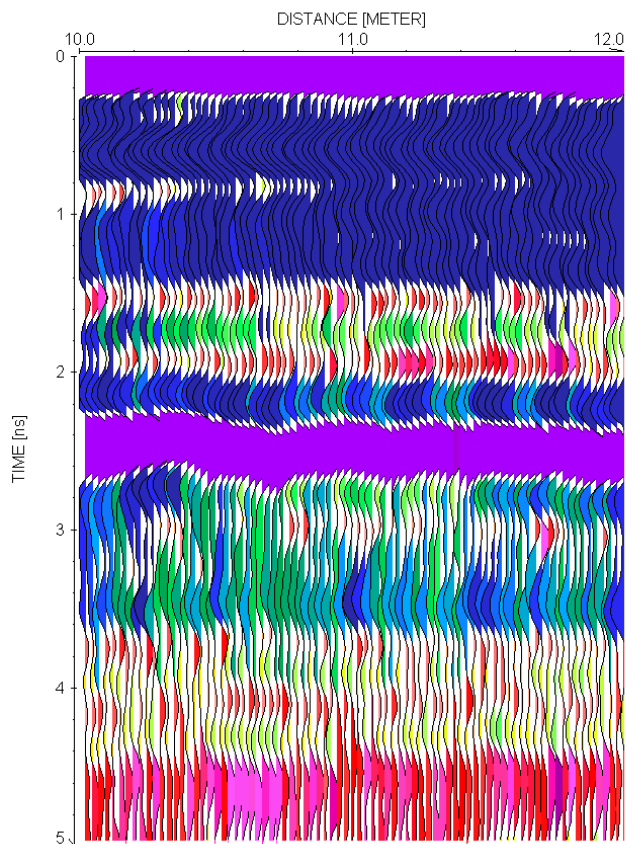


Abbildung 11-8: Schichtdicken der Linie MLS-150-A (vor Schwerlastsimulation)

11.4 Vergleich vor, während und nach einer Million Zyklen

Die Abbildung 11-9 zeigt einen Ausschnitt von 2.0m Länge aufgezeichnet vor (links) und nach (rechts) der Schwerlastsimulation. Dieser Ausschnitt stellt die Hälfte des überrollten Bereichs dar. Die andere Hälfte wurde ausgeklammert, da sich dort bei der Messung nach der Schwerlastsimulation ein Kabel auf der Belagsoberfläche befand. Die Reflexion an der Unterseite des Asphaltbelages befindet sich um 2.5ns. Abgesehen von einem deutlichen Unterschied zwischen 10.0m und 10.2 m, vermutlich verursacht durch das in der Nähe befindliche Kabel, sind die beiden Datensätze sehr ähnlich.

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\mls-day-1\PROCDATA\HUG4205002.03T / traces: 1104 / samples: 515



2. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\mls-day-2\PROCDATA\HUG4205004.03T / traces: 1165 / samples: 524

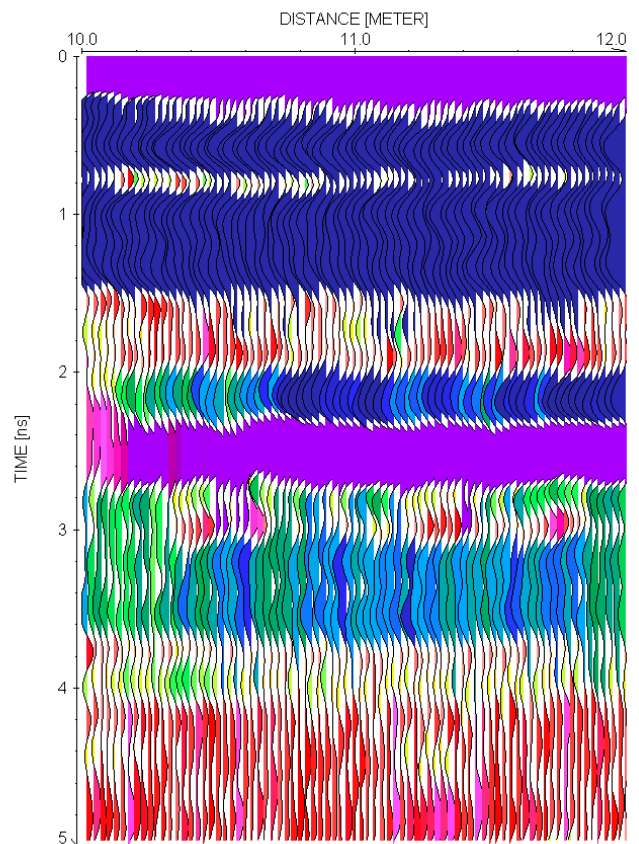


Abbildung 11-9: Ausschnitt aus der Linie MLS-0 vor (links) und nach (rechts) Schwerlastsimulation

Die Reflexionsstärken an der Belagsoberfläche auf den Linien MLS-00 und MLS-50B zeigen die Abbildung 11-10 und die Abbildung 11-11. Auf der Linie MLS-00 zeigt sich der Einfluss des Kabels zwischen 0m und 10m. Zusätzlich ist eine deutliche Abschwächung auf der belasteten Strecke zwischen 10m und 12m erkennbar. Auf der Linie MLS-50B ist keinerlei Änderung sichtbar, obwohl diese Linie unmittelbar neben dem belasteten Bereich liegt. Der Mittelwert des Absolutwertes der Reflexionsstärke an der Belagsoberfläche im Abschnitt 10.00-12.00m nimmt auf der Linie MLS-0 von 14449 auf 13374 ab. Gemäss der Gleichung (2) bedeutet dies eine Abnahme der relativen Dielektrizitätszahl im Asphalt. Gemäss Gleichung (1) sollte somit die Ausbreitungsgeschwindigkeit v im Asphalt ansteigen und damit die Laufzeit des Signals im Asphalt zurückgehen. Diese Überlegung beinhaltet die Annahme, dass die Änderung der relativen Dielektrizitätszahl sich nicht alleine auf die Oberfläche beschränkt, sondern einen wesentlichen Teil des Belags betrifft. Die Abbildung 11-12 zeigt die Laufzeiten für die Belagsuntergrenze, die Abbildung 11-13 den entsprechenden Ausschnitt für 10m bis 12m. Die Laufzeiten nach der Schwerlastsimulation sind

geringfügig grösser als vorher. Dies steht im Widerspruch zur Abnahme der relativen Dielektrizitätszahl.

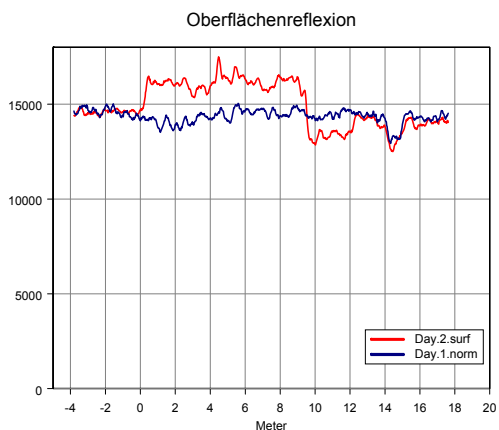


Abbildung 11-10: Reflexionsstärke Oberfläche, Linie MLS-00

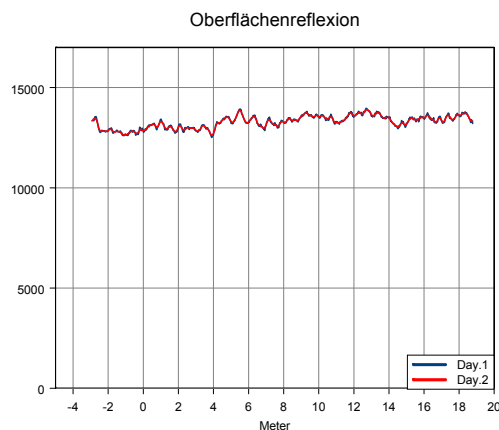


Abbildung 11-11: Reflexionsstärke Oberfläche, Linie MLS-50-B

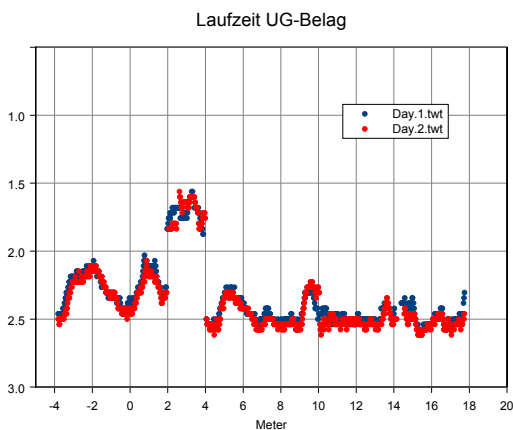


Abbildung 11-12: Laufzeiten, UG-Belag, Linie MLS-00

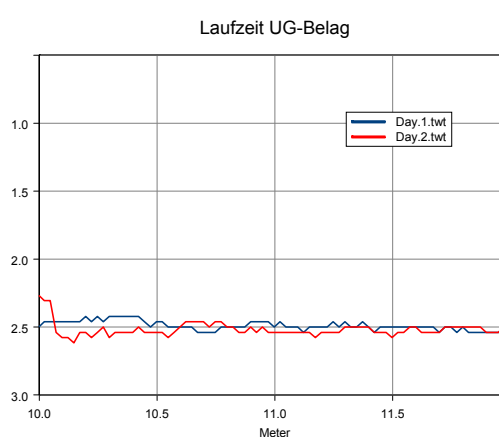


Abbildung 11-13: Laufzeiten, UG-Belag, Linie MLS-00, Ausschnitt

Eine offensichtliche Veränderung der Reflexionsstärke im überrollten Bereich steht somit im

Widerspruch zu den grösseren Laufzeiten des Radarsignals. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Reflexionsstärke lediglich durch oberflächliche Veränderungen hervorgerufen wird.

Unmittelbar neben dem belasteten Bereich ist keinerlei Veränderung festzustellen. Es erscheint auf Grund dieser Ergebnisse sinnvoll, das Experiment im Rahmen zukünftiger Einsätze der MLS zu wiederholen.

12 Schlussfolgerungen

Die in der Hypothese formulierte Abhängigkeit der relativen Dielektrizitätszahl vom Zustand des Belages konnte durch die internationalen Daten nicht belegt werden. Zwar ergeben sich gewisse Trends, diese sind jedoch teilweise widersprüchlich und die Einzelwerte weisen erhebliche Streuungen auf.

Mit den Schweizer Daten und den Vergleich mit den IRI-Werten lassen sich ebenfalls keine klaren Zusammenhänge nachweisen.

Die Messungen im Zusammenhang mit dem Schwerlastsimulator MLS sollten in Zukunft wiederholt werden, insbesondere da Georadar sowieso zur Untersuchung des Experimentierfeldes vor der Simulation eingesetzt wird.

Eine Fortführung der Forschungsarbeiten über den Zusammenhang zwischen der relativen Dielektrizitätszahl und dem Zustand des Belages erscheint momentan nicht als sinnvoll.

13 Dank

Urs Schellenberg vom Tiefbauamt des Kantons Zürich hat die Informationen über die untersuchten Strassen zur Verfügung gestellt und damit die hier dokumentierten Untersuchungen erst ermöglicht.

Der Kommission EK 7.11 unter Leitung von Luzia Seiler sei an dieser Stelle für die Begleitung dieses Forschungsprojektes gedankt.

14 Literatur

- [1] Daniels D.: Ground Penetrating Radar, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2004
- [2] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Merkblatt B10m Februar 2008
- [3] Hugenschmidt J., Kalogeropoulos A.: Georadar-Untersuchungen vor, während und nach einer Million Schwerlastüberrollungen auf einer Autobahn, Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 3.-6. März 2008, Freiberg
- [4] Saarenketo T.: MEASURING ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF ASPHALT FOR PAVEMENT QUALITY CONTROL AND DEFECT MAPPING, Timo Saarenketo, Nordic Road Association Conference, 28 June- 2 July 2004, Reykjavik, Iceland
- [5] Sayers M. W., Gillespie T. D. and Paterson W. D. O., Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, World Bank Technical Paper Number 46, 1986

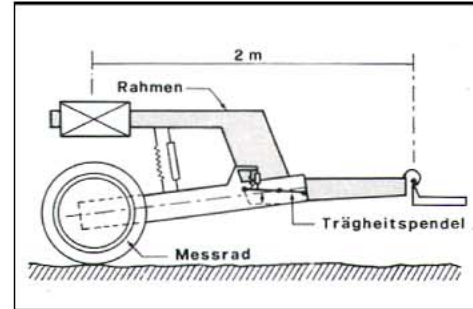
15 Beilagen

15.1 Beschreibung des APL Gerätes

APL - LÄNGSEBENHEITSMESSGERÄT



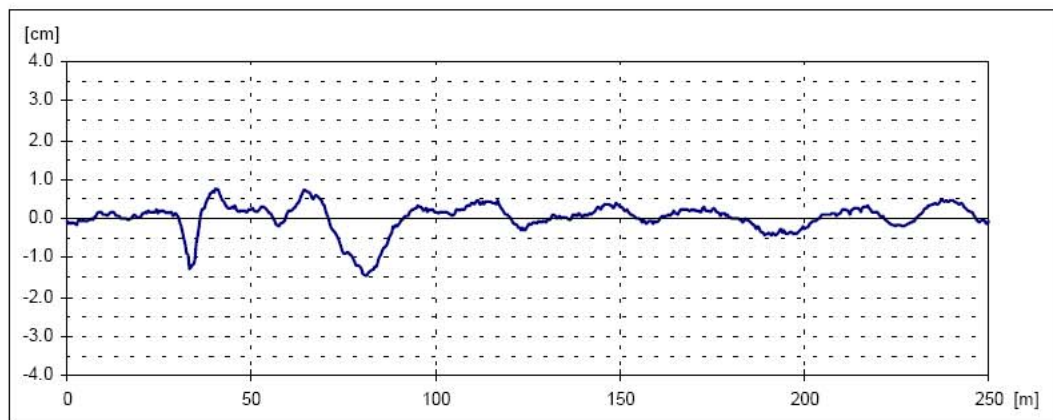
Fahrzeug mit Messanhänger



Messprinzip

ZUSAMMENFASSUNG DER TECHNISCHEN DATEN

- Anwendungsbereich : Zustandserfassung der Längsebenheit auf Strassen und Flugpisten, Vorbereitung und Abnahme von Belagseinbauten
- Prinzip der Aufnahme : Aufzeichnung des variablen Winkels zwischen dem Messarm und dem **Trägheitspendel** (dient als Referenzebene)
- Art der Aufnahme : Aufzeichnung des **wahren Unebenheitsprofils** alle 5 cm
- Messgeschwindigkeit : Konstante Geschwindigkeit frei wählbar in Funktion der Zielgrösse.
Messbereich : 40 km/h ⇒ Wellenlängen von 0.5 bis 25 m
80 km/h ⇒ Wellenlängen von 1 bis 50 m
- Grundauswertung : W- und Sw-Werte gemäss SN-Norm 640'520a (Winkelmethode)
- Weitere Auswertungen : Darstellung des Unebenheitsprofils und der Winkelwerte
Berechnung der IRI-Werte oder der spektralen Dichte
Berechnung der französischen oder belgischen Ebenheitsnoten
Bestimmung des **Zustandsindex**es I_2 gemäss SN 640'925a



Beispiel eines Unebenheitsprofils

SACR Zürich AG, Berninastrasse 9, CH - 8057 Zürich Tel. + 41 1 312 46 72 Fax. + 41 1 312 44 32

APL - Längsebenheitsmessgerät

1. Systembeschreibung

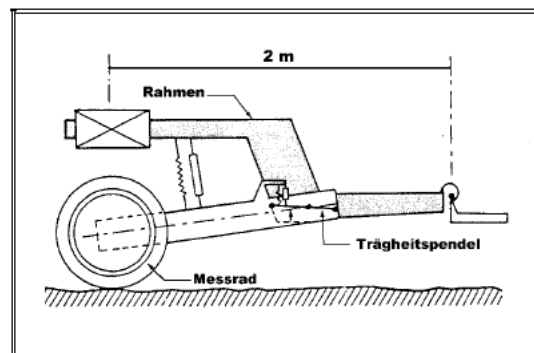
Das APL-Messsystem („Analyseur de Profil en Long“) dient der schnellen Erfassung der Längsebenheit von Fahrbahnen und Flugpisten. Es ist vom französischen "Laboratoire des Ponts et Chaussées" entwickelt worden und besteht aus einem Einradanhänger sowie einer elektronischen Steuer- und Erfassungseinheit. Seit der ersten Inbetriebnahme des Systems im Jahre 1974 ist die Elektronik mehrmals dem Stand der Technik angepasst worden. Die letzte Version von 1988, von der die SACR ein Exemplar angeschafft hat, heisst "APL UNIQUE" (Universalgerät). Sie besteht aus einer EDV-gesteuerten Erfassungs- und Auswerteeinheit, die eine Vielzahl von Auswertemethoden zulässt (siehe Kapitel 4).

Das APL-System kann in mehreren Bereichen eingesetzt werden :

- Erhaltungsmanagement einer Strasse oder eines Strassennetzes
- Vorbereitung und Abnahme von Belagseinbauten (Auswertung nach VSS-Norm, graphische Darstellung des Unebenheitsprofils im Höhenmassstab 1:1, weitere Auswertemethoden)
- Messung der Fugenaufhebung auf Betonstrassen (Stufenbildung)
- Vorsortierung der Strassenabschnitte mit potentiellen strukturellen Problemen (Vergleich der Ebenheit im Randbereich und in der Strassenmitte)
- Messungen auf Flugpisten und Rollwegen (Erfassung von Wellenlängen bis 80 Meter bei einer Messgeschwindigkeit von 140 km/h).

2. Messprinzip

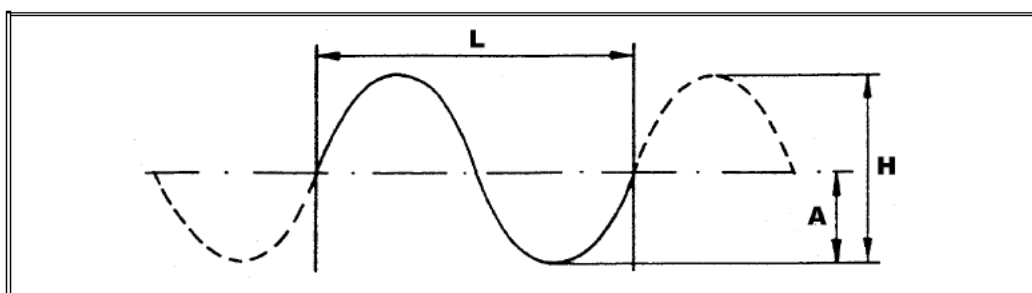
Der Kern des Messsystem besteht aus einem Trägheit-Tieffrequenzpendel, das als pseudowaagrechte Referenzebene dient. Bei der Messung werden die Unebenheiten des Längsprofils durch das Abstrad registriert. Die Unebenheiten werden durch die kontinuierliche Erfassung des Winkels α zwischen dem Messarm und dem Referenzpendel in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das zum wahren Unebenheitsprofil direkt proportionale Messsignal wird fortlaufend digitalisiert und gespeichert.



3. Messbereich

Das Längsprofil einer Strasse kann durch eine Funktion ausgedrückt werden, die von der Unebenheit (Differenz zwischen gemessenem und idealem Profil) und der Distanz abhängt. Diese Funktion hat eine unbegrenzte Spektralhäufigkeit (Wellenlängen von Null bis Unendlich). Sie kann aber in eine Summe von elementaren sinusoidalen Signalen zerlegt werden (Fourier-Analyse), die durch ihre Wellenlänge L und ihre Amplitude A definiert sind (vgl. Darstellung auf Seite 2).

Das Schwingensystem des APL ist so konzipiert und geeicht, dass es im Frequenzbereich von 0.5 bis 20 Hz, unabhängig von der Messgeschwindigkeit, eine Übertragungsfunktion von 1 aufweist, das heisst : das gemessene und das wahre Unebenheitsprofil stimmen genau überein. Diese Übertragungsfunktion fällt an beiden Enden dieses Frequenzbereiches langsam ab. Bei den angrenzenden Frequenzen von 0.3 und 26 Hz stellt man zum Beispiel eine Verminderung des Messsignals von 3 dB (ca. 30 %) fest.



Das APL-System verhält sich gegenüber dem registrierten Messsignal wie ein mechanisches Frequenzband-Filter. Deswegen wird das Längsprofil in einem von der Messgeschwindigkeit abhängigen Wellenlängenbereich registriert. Die Messgeschwindigkeit muss deswegen relativ konstant gehalten werden, kann aber beliebig gewählt werden. Die Grundgleichung zwischen der Frequenz f , der Geschwindigkeit V und der Wellenlänge L ist : $f \text{ [Hz]} = V \text{ [m/s]} / L \text{ [m]}$. Zum Beispiel für eine Messgeschwindigkeit von 72 km/h (= 20 m/s), registriert man das **tatsächliche Unebenheitsprofil** in einem **Wellenlängenbereich zwischen 1.0 m (20 Hz) und 40.0 m (0.5 Hz)**. Die Wellenlängen 0.77 m (26 Hz) und 66.7 m (0.3 Hz) werden mit einer Amplitudenverminderung von ca. 30 % aufgezeichnet (kann bei gewissen Auswertungen kompensiert werden).

Die nachstehende Tabelle gibt Auskunft über diese zwei Wellenlängenbereiche für verschiedene Messgeschwindigkeiten.

Messgeschwindigkeiten		Wellenlängenbereich	Wellenlängenbereich
[km/h]	[m/s]	für 20 - 0.5 Hz ⁽²⁾	für 26 - 0.3 Hz ⁽³⁾
9	2.5	L = 0.12 - 5.0 m	L = 0.10 - 8.3 m
18	5.0	L = 0.25 - 10.0 m	L = 0.19 - 16.7 m
36 ⁽¹⁾	10.0	L = 0.50 - 20.0 m	L = 0.40 - 33.3 m
60	16.7	L = 0.85 - 33.3 m	L = 0.64 - 55.5 m
72 ⁽¹⁾	20.0	L = 1.00 - 40.0 m	L = 0.77 - 66.7 m
100	27.8	L = 1.40 - 55.5 m	L = 1.05 - 92.2 m
120	33.3	L = 1.65 - 66.6 m	L = 1.28 - 111 m
140	38.9	L = 2.00 - 80.0 m	L = 1.54 - 133 m

(1) übliche Messgeschwindigkeiten der alten Version (APL 72)

(2) Wellenlängenbereich, in dem das aufgenommene Signal mit dem wahren Profil exakt übereinstimmt.

(3) maximaler Wellenlängenbereich für eine Auswertung in Klassen von Wellenlängen.

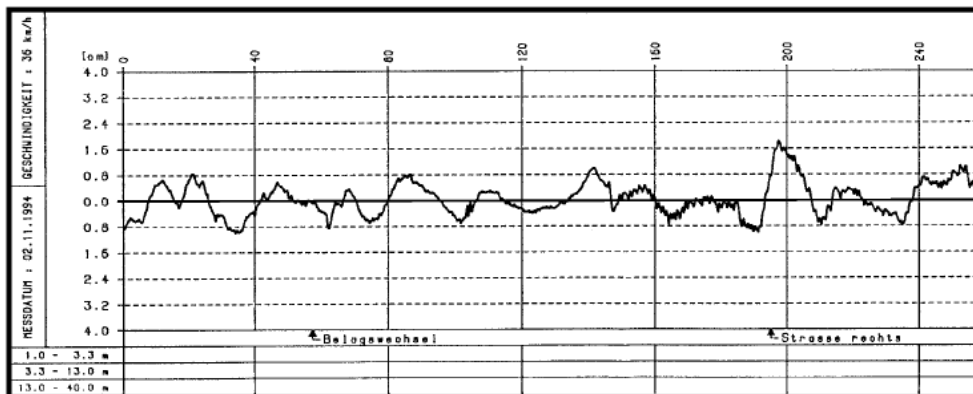
4. Auswertung der Messungen

Der gewählte Konzept für das neue "APL UNIQUE" (EDV gesteuerte Erfassungseinheit, Digitalisierung des gemessenen Unebenheitsprofils) hat für die Auswertung fast unbegrenzte Möglichkeiten eröffnet. Da das **wahre Profil** in einem Wellenlängenbereich aufgezeichnet wird, der deutlich über denjenigen der anderen Ebenheitsmessgeräte reicht (Viagraph, Goniograph, Winkelmesser), ist es mit einer passenden Software möglich, die Mess- und Auswertungsarten der anderen Messgeräte mathematisch zu simulieren. Mögliche Auswertungen sind zum Beispiel :

- Bestimmung der W- und Sw-Werte gemäss der SN-Norm 640'520a. Die Beurteilung der Ebenheit kann für Abschnitte von 250, 200, 100 oder 50 m gemäss den Sollwerten der Norm 640'521b erfolgen (mit dem APL sind schon nach 50 m die für die sW nötigen 1000 Einzelwerte aufgezeichnet).
- Bestimmung der "Ebenheitsnoten" (für 2 bis 3 Wellenlängenbereiche je nach Messgeschwindigkeit) gemäss der vom französischen "Laboratoires des Ponts et Chaussées" entwickelten Methode. Sie basiert auf einer Beurteilung der Energie des Messsignals. Die Ebenheitsnoten werden je nach Messgeschwindigkeit alle 50, 100, 200, 250 oder 400 m berechnet.
- Bestimmung der CP Werte (Coefficient de Planéité) gemäss der belgischen Methode.
- Berechnung und Darstellung der spektralen Dichte der Unebenheitsamplituden.
- Bestimmung des IRI Wertes (International Roughness Index).
- Bestimmung des QI Wertes (Quality Index).

5. Graphische Darstellung des Unebenheitsprofils

Die Aufzeichnung des tatsächlichen Profils ermöglicht viele interessante Anwendungen im Rahmen von Belagseinbauten. Die Aufzeichnung des Unebenheitsprofils kann vor dem Einbau (Bestimmung der Zonen, bei denen eine Profilkorrektur oder eine Aufsichtung nötig ist), sowie nach dem Einbau (Qualitätskontrolle) wertvolle Informationen liefern. Die vielseitigen Darstellungsmöglichkeiten (beliebige Höhen- und Längsskalen) sowie die genaue Distanzaufzeichnung ermöglichen eine exakte Bemessung und Lokalisierung von möglichen Unebenheiten (siehe untenstehendes Beispiel). Die Beurteilung und Darstellung des aufgenommenen Profils kann auf Anfrage direkt auf der Baustelle ausgearbeitet werden.



15.2 IRI-Ergebnisse

Fällanden / Maurstrasse S-1
Strecke Fällanden-Maur
Centre of lane, km 0.800 - 2.100

Fällanden / Maurstrasse S-1
Strecke Maur >> Fällanden
Centre of lane, km 2.100 - 0.800

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	0.800	0.850	2.30	38	1	2.100	2.050	1.09	44
2	0.850	0.900	1.22	39	2	2.050	2.000	1.28	41
3	0.900	0.950	1.09	40	3	2.000	1.950	1.16	41
4	0.950	1.000	1.08	39	4	1.950	1.900	1.54	40
5	1.000	1.050	1.50	37	5	1.900	1.850	1.32	40
6	1.050	1.100	1.95	37	6	1.850	1.800	1.54	39
7	1.100	1.150	1.17	39	7	1.800	1.750	1.66	39
8	1.150	1.200	1.09	40	8	1.750	1.700	1.15	39
9	1.200	1.250	0.84	39	9	1.700	1.650	1.83	39
10	1.250	1.300	1.11	40	10	1.650	1.600	1.38	38
11	1.300	1.350	1.37	38	11	1.600	1.550	1.07	39
12	1.350	1.400	1.78	36	12	1.550	1.500	1.96	40
13	1.400	1.450	1.36	35	13	1.500	1.450	1.04	42
14	1.450	1.500	1.90	36	14	1.450	1.400	1.12	44
15	1.500	1.550	1.70	37	15	1.400	1.350	1.49	45
16	1.550	1.600	1.34	38	16	1.350	1.300	1.29	42
17	1.600	1.650	1.49	38	17	1.300	1.250	1.75	41
18	1.650	1.700	1.01	37	18	1.250	1.200	1.21	41
19	1.700	1.750	1.39	35	19	1.200	1.150	1.00	40
20	1.750	1.800	1.46	36	20	1.150	1.100	1.11	40
21	1.800	1.850	1.53	36	21	1.100	1.050	1.29	41
22	1.850	1.900	1.07	36	22	1.050	1.000	1.89	41
23	1.900	1.950	1.24	36	23	1.000	0.950	1.53	41
24	1.950	2.000	1.17	36	24	0.950	0.900	1.56	38
25	2.000	2.050	1.02	37	25	0.900	0.850	1.40	38
26	2.050	2.100	0.97	37	26	0.850	0.800	1.67	38

Fällanden / Maurstrasse S-1
Strecke Fällanden >> Maur
Right wheel path, km 0.800 - 2.100

Fällanden / Maurstrasse S-1
Strecke Maur >> Fällanden
Right wheel path, km 2.100 - 0.800

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	0.800	0.850	2.94	37	1	2.100	2.050	1.50	38
2	0.850	0.900	1.34	38	2	2.050	2.000	1.67	39
3	0.900	0.950	0.76	38	3	2.000	1.950	1.30	40
4	0.950	1.000	1.02	37	4	1.950	1.900	2.14	39
5	1.000	1.050	1.14	35	5	1.900	1.850	1.55	38
6	1.050	1.100	2.39	35	6	1.850	1.800	1.99	38
7	1.100	1.150	1.69	37	7	1.800	1.750	2.14	39
8	1.150	1.200	1.69	38	8	1.750	1.700	1.31	40
9	1.200	1.250	1.41	39	9	1.700	1.650	2.53	39
10	1.250	1.300	1.15	39	10	1.650	1.600	1.82	36
11	1.300	1.350	1.47	38	11	1.600	1.550	1.44	37
12	1.350	1.400	2.22	36	12	1.550	1.500	1.69	37
13	1.400	1.450	1.48	35	13	1.500	1.450	0.98	39
14	1.450	1.500	2.36	35	14	1.450	1.400	1.25	39
15	1.500	1.550	1.79	37	15	1.400	1.350	1.53	40
16	1.550	1.600	1.64	37	16	1.350	1.300	1.35	39
17	1.600	1.650	1.99	36	17	1.300	1.250	2.17	38
18	1.650	1.700	1.06	36	18	1.250	1.200	1.34	37
19	1.700	1.750	1.71	34	19	1.200	1.150	1.00	37
20	1.750	1.800	1.74	34	20	1.150	1.100	1.13	37
21	1.800	1.850	1.86	33	21	1.100	1.050	1.25	38
22	1.850	1.900	0.92	33	22	1.050	1.000	1.40	39
23	1.900	1.950	1.37	33	23	1.000	0.950	2.11	39
24	1.950	2.000	1.33	35	24	0.950	0.900	2.33	38
25	2.000	2.050	1.13	36	25	0.900	0.850	3.00	37
26	2.050	2.100	0.98	36	26	0.850	0.800	2.49	36

Fällanden / Schwerzenbachstrasse S-2

Strecke Fällanden >> Schwerzenbach

Centre of lane, km 0.200 - 1.100

Fällanden / Schwerzenbachstrasse S-2

Strecke Schwerzenbach >> Fällanden

Centre of lane, km 1.100 - 0.200

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	0.200	0.250	2.15	34	1	1.100	1.050	2.93	39
2	0.250	0.300	2.20	36	2	1.050	1.000	1.79	39
3	0.300	0.350	2.06	24	3	1.000	0.950	1.35	39
4	0.350	0.400	1.82	29	4	0.950	0.900	1.27	38
5	0.400	0.450	1.53	36	5	0.900	0.850	1.18	39
6	0.450	0.500	1.21	38	6	0.850	0.800	1.34	36
7	0.500	0.550	1.63	39	7	0.800	0.750	2.28	24
8	0.550	0.600	1.40	39	8	0.750	0.700	6.02	25
9	0.600	0.650	1.47	38	9	0.700	0.650	2.07	33
10	0.650	0.700	2.60	33	10	0.650	0.600	1.24	35
11	0.700	0.750	5.46	24	11	0.600	0.550	1.01	36
12	0.750	0.800	4.85	33	12	0.550	0.500	1.49	35
13	0.800	0.850	2.02	36	13	0.500	0.450	1.59	35
14	0.850	0.900	1.21	38	14	0.450	0.400	1.57	35
15	0.900	0.950	1.23	39	15	0.400	0.350	3.44	36
16	0.950	1.000	2.36	39	16	0.350	0.300	1.78	35
17	1.000	1.050	1.15	39	17	0.300	0.250	2.16	35
18	1.050	1.100	3.09	39	18	0.250	0.200	1.76	35

Fällanden / Schwerzenbachstrasse S-2

Strecke Fällanden >> Schwerzenbach

Right wheel path, km 0.200 - 1.100

Fällanden / Schwerzenbachstrasse S-2

Strecke Schwerzenbach >> Fällanden

Right wheel path, km 1.100 - 0.200

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	0.200	0.250	2.60	34	1	1.100	1.050	2.55	35
2	0.250	0.300	2.38	34	2	1.050	1.000	2.19	34
3	0.300	0.350	2.04	37	3	1.000	0.950	1.55	35
4	0.350	0.400	1.29	38	4	0.950	0.900	1.32	36
5	0.400	0.450	1.52	39	5	0.900	0.850	1.78	36
6	0.450	0.500	1.24	39	6	0.850	0.800	1.53	35
7	0.500	0.550	1.93	36	7	0.800	0.750	2.84	24
8	0.550	0.600	1.49	35	8	0.750	0.700	4.57	26
9	0.600	0.650	1.50	32	9	0.700	0.650	1.74	32
10	0.650	0.700	3.08	28	10	0.650	0.600	1.63	34
11	0.700	0.750	7.66	23	11	0.600	0.550	1.46	36
12	0.750	0.800	4.47	32	12	0.550	0.500	1.84	37
13	0.800	0.850	2.06	35	13	0.500	0.450	1.97	36
14	0.850	0.900	1.17	37	14	0.450	0.400	1.73	36
15	0.900	0.950	1.36	39	15	0.400	0.350	2.88	35
16	0.950	1.000	3.07	39	16	0.350	0.300	2.25	35
17	1.000	1.050	1.03	39	17	0.300	0.250	2.96	34
18	1.050	1.100	4.07	39	18	0.250	0.200	2.55	34

Fehraltorf / Kempttalstrasse S-1
Strecke Fehraltorf >> Pfäffikon (Teil 1)
Right wheel path, km 0.000 - 0.750

Fehraltorf / Kempttalstrasse S-1
Strecke Pfäffikon - Fehraltorf (Teil 1)
Right wheel path, km 0.750 - 0.000

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	0.000	0.050	1.40	32	1	0.750	0.700	1.15	38
2	0.050	0.100	0.93	32	2	0.700	0.650	0.89	38
3	0.100	0.150	0.99	34	3	0.650	0.600	0.94	38
4	0.150	0.200	0.91	34	4	0.600	0.550	0.80	38
5	0.200	0.250	0.84	34	5	0.550	0.500	0.97	38
6	0.250	0.300	0.86	36	6	0.500	0.450	0.82	37
7	0.300	0.350	0.98	39	7	0.450	0.400	0.78	37
8	0.350	0.400	0.76	38	8	0.400	0.350	0.92	36
9	0.400	0.450	1.03	38	9	0.350	0.300	1.01	36
10	0.450	0.500	0.88	38	10	0.300	0.250	0.94	37
11	0.500	0.550	1.03	38	11	0.250	0.200	1.26	37
12	0.550	0.600	1.03	38	12	0.200	0.150	1.77	38
13	0.600	0.650	0.69	39	13	0.150	0.100	1.16	38
14	0.650	0.700	0.78	39	14	0.100	0.050	1.19	39
15	0.700	0.750	0.76	39	15	0.050	0.000	0.94	38

Fehrltorf / Kempptalstrasse S-1
Strecke Fehrltorf >> Pfäffikon (Teil 2)
Right wheel path, km 2.700 - 3.950

Fehrltorf / Kempptalstrasse S-1
Strecke Pfäffikon - Fehrltorf (Teil 2)
Right wheel path, km 3.950 - 2.700

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	2.700	2.750	0.91	38	1	3.950	3.900	2.85	37
2	2.750	2.800	0.84	37	2	3.900	3.850	2.05	36
3	2.800	2.850	0.83	36	3	3.850	3.800	1.65	36
4	2.850	2.900	0.90	36	4	3.800	3.750	1.88	37
5	2.900	2.950	1.00	36	5	3.750	3.700	2.64	38
6	2.950	3.000	0.85	36	6	3.700	3.650	1.85	38
7	3.000	3.050	1.08	36	7	3.650	3.600	0.93	38
8	3.050	3.100	2.00	37	8	3.600	3.550	0.91	38
9	3.100	3.150	1.55	38	9	3.550	3.500	0.93	38
10	3.150	3.200	0.83	39	10	3.500	3.450	0.74	38
11	3.200	3.250	0.94	39	11	3.450	3.400	0.92	38
12	3.250	3.300	0.93	39	12	3.400	3.350	0.79	38
13	3.300	3.350	1.03	38	13	3.350	3.300	0.93	37
14	3.350	3.400	1.11	38	14	3.300	3.250	0.86	37
15	3.400	3.450	0.86	38	15	3.250	3.200	1.04	36
16	3.450	3.500	0.83	38	16	3.200	3.150	0.87	36
17	3.500	3.550	0.84	38	17	3.150	3.100	2.30	37
18	3.550	3.600	1.04	38	18	3.100	3.050	2.72	38
19	3.600	3.650	1.03	38	19	3.050	3.000	1.02	38
20	3.650	3.700	2.02	38	20	3.000	2.950	0.98	38
21	3.700	3.750	2.31	37	21	2.950	2.900	0.89	38
22	3.750	3.800	3.04	36	22	2.900	2.850	0.88	38
23	3.800	3.850	2.34	36	23	2.850	2.800	0.91	39
24	3.850	3.900	3.26	35	24	2.800	2.750	1.03	39
25	3.900	3.950	2.17	35	25	2.750	2.700	0.75	38

Ortsumfahrung Henggart

Strecke Henggart - Aesch

Right wheel path, km 2.000 - 0.000

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	2.000	1.950	0.90	33
2	1.950	1.900	1.27	33
3	1.900	1.850	1.26	34
4	1.850	1.800	1.27	36
5	1.800	1.750	1.49	37
6	1.750	1.700	1.03	38
7	1.700	1.650	1.43	38
8	1.650	1.600	1.56	38
9	1.600	1.550	2.04	38
10	1.550	1.500	1.19	38
11	1.500	1.450	1.61	38
12	1.450	1.400	1.34	37
13	1.400	1.350	1.32	37
14	1.350	1.300	1.78	37
15	1.300	1.250	1.92	38
16	1.250	1.200	2.26	39
17	1.200	1.150	1.89	40
18	1.150	1.100	1.87	39
19	1.100	1.050	2.59	38
20	1.050	1.000	1.56	37
21	1.000	0.950	1.93	36
22	0.950	0.900	2.68	35
23	0.900	0.850	2.24	35
24	0.850	0.800	2.06	35
25	0.800	0.750	2.56	35
26	0.750	0.700	2.04	36
27	0.700	0.650	2.41	36
28	0.650	0.600	1.89	38
29	0.600	0.550	2.33	37
30	0.550	0.500	2.36	36
31	0.500	0.450	1.45	35
32	0.450	0.400	1.05	35
33	0.400	0.350	1.94	35
34	0.350	0.300	1.52	35
35	0.300	0.250	1.75	36
36	0.250	0.200	1.65	38
37	0.200	0.150	1.99	39
38	0.150	0.100	1.27	39
39	0.100	0.050	2.00	38
40	0.050	0.000	3.03	37

Belagswechsel

Ortsumfahrung Henggart

Strecke Aesch - Henggart

Right wheel path, km 0.000 - 2.000

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	0.000	0.050	3.08	38
2	0.050	0.100	2.61	36
3	0.100	0.150	1.72	35
4	0.150	0.200	2.11	37
5	0.200	0.250	1.67	38
6	0.250	0.300	1.47	39
7	0.300	0.350	1.22	39
8	0.350	0.400	1.25	39
9	0.400	0.450	1.17	38
10	0.450	0.500	0.97	38
11	0.500	0.550	1.90	38
12	0.550	0.600	2.84	35
13	0.600	0.650	2.75	35
14	0.650	0.700	2.03	36
15	0.700	0.750	2.81	37
16	0.750	0.800	2.30	38
17	0.800	0.850	1.76	38
18	0.850	0.900	2.30	38
19	0.900	0.950	1.63	38
20	0.950	1.000	2.07	39
21	1.000	1.050	1.99	39
22	1.050	1.100	2.51	39
23	1.100	1.150	2.41	39
24	1.150	1.200	1.92	39
25	1.200	1.250	2.35	39
26	1.250	1.300	2.35	39
27	1.300	1.350	1.34	40
28	1.350	1.400	1.68	39
29	1.400	1.450	1.92	39
30	1.450	1.500	1.44	38
31	1.500	1.550	2.94	37
32	1.550	1.600	1.73	36
33	1.600	1.650	1.45	35
34	1.650	1.700	1.19	36
35	1.700	1.750	1.38	37
36	1.750	1.800	1.05	38
37	1.800	1.850	1.09	40
38	1.850	1.900	1.21	41
39	1.900	1.950	1.62	40
40	1.950	2.000	1.05	38

Belagswechsel

Ortsumfahrung Henggart

Strecke Henggart - Aesch

Centre of lane, km 2.000 - 0.000

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	2.000	1.950	0.91	34
2	1.950	1.900	1.33	34
3	1.900	1.850	1.13	34
4	1.850	1.800	1.08	35
5	1.800	1.750	1.50	36
6	1.750	1.700	0.99	37
7	1.700	1.650	1.45	37
8	1.650	1.600	1.37	36
9	1.600	1.550	2.49	36
10	1.550	1.500	1.54	36
11	1.500	1.450	1.56	36
12	1.450	1.400	1.39	36
13	1.400	1.350	1.48	35
14	1.350	1.300	1.43	35
15	1.300	1.250	1.97	37
16	1.250	1.200	2.15	38
17	1.200	1.150	1.64	39
18	1.150	1.100	1.32	39
19	1.100	1.050	1.98	38
20	1.050	1.000	1.40	38
21	1.000	0.950	1.52	37
22	0.950	0.900	2.28	37
23	0.900	0.850	1.87	36
24	0.850	0.800	1.95	36
25	0.800	0.750	1.70	36
26	0.750	0.700	1.78	36
27	0.700	0.650	1.95	38
28	0.650	0.600	1.52	39
29	0.600	0.550	1.83	38
30	0.550	0.500	1.92	36
31	0.500	0.450	1.24	35
32	0.450	0.400	0.96	35
33	0.400	0.350	1.68	35
34	0.350	0.300	1.06	36
35	0.300	0.250	1.53	37
36	0.250	0.200	1.42	38
37	0.200	0.150	1.84	38
38	0.150	0.100	1.36	38
39	0.100	0.050	1.62	38
40	0.050	0.000	2.81	37

Belagswechsel

Ortsumfahrung Henggart

Strecke Aesch - Henggart

Centre of lane, km 0.000 - 2.000

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	[V km/h]
1	0.000	0.050	2.48	36
2	0.050	0.100	1.96	34
3	0.100	0.150	1.25	35
4	0.150	0.200	1.63	36
5	0.200	0.250	1.25	37
6	0.250	0.300	1.19	37
7	0.300	0.350	1.11	38
8	0.350	0.400	1.08	39
9	0.400	0.450	1.11	39
10	0.450	0.500	1.14	39
11	0.500	0.550	1.31	37
12	0.550	0.600	2.20	34
13	0.600	0.650	2.06	33
14	0.650	0.700	1.68	35
15	0.700	0.750	2.22	36
16	0.750	0.800	2.24	37
17	0.800	0.850	1.51	37
18	0.850	0.900	1.57	36
19	0.900	0.950	1.72	36
20	0.950	1.000	2.05	36
21	1.000	1.050	1.74	36
22	1.050	1.100	2.22	36
23	1.100	1.150	2.18	36
24	1.150	1.200	1.61	35
25	1.200	1.250	2.03	35
26	1.250	1.300	2.48	36
27	1.300	1.350	1.30	37
28	1.350	1.400	1.51	38
29	1.400	1.450	1.62	38
30	1.450	1.500	1.31	37
31	1.500	1.550	2.88	36
32	1.550	1.600	1.62	35
33	1.600	1.650	1.29	35
34	1.650	1.700	1.05	35
35	1.700	1.750	1.08	36
36	1.750	1.800	0.95	37
37	1.800	1.850	1.07	38
38	1.850	1.900	0.97	38
39	1.900	1.950	1.58	38
40	1.950	2.000	1.19	37

Belagswechsel

Illnau - Effretikon

Strecke Illnau >> Effretikon, Kempptalstrasse S-2

Right wheel path, km 1.470 - 2.470

Illnau-Effretikon

Strecke Effretikon >> Illnau, Kempptalstrasse S-2

Right wheel path, km 2.470 - 1.470

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	1.470	1.520	1.62	35	1	2.470	2.420	1.73	41
2	1.520	1.570	1.46	35	2	2.420	2.370	1.53	40
3	1.570	1.620	1.57	36	3	2.370	2.320	0.83	41
4	1.620	1.670	1.58	38	4	2.320	2.270	0.78	42
5	1.670	1.720	0.87	38	5	2.270	2.220	1.20	41
6	1.720	1.770	1.46	39	6	2.220	2.170	2.30	38
7	1.770	1.820	1.70	39	7	2.170	2.120	1.37	37
8	1.820	1.870	1.19	39	8	2.120	2.070	0.97	41
9	1.870	1.920	1.25	38	9	2.070	2.020	1.10	42
10	1.920	1.970	2.08	36	10	2.020	1.970	1.59	42
11	1.970	2.020	1.71	35	11	1.970	1.920	1.10	41
12	2.020	2.070	1.55	34	12	1.920	1.870	1.10	39
13	2.070	2.120	1.84	35	13	1.870	1.820	0.86	39
14	2.120	2.170	2.48	39	14	1.820	1.770	0.99	39
15	2.170	2.220	1.04	39	15	1.770	1.720	1.81	38
16	2.220	2.270	1.16	38	16	1.720	1.670	0.97	38
17	2.270	2.320	1.11	38	17	1.670	1.620	0.83	38
18	2.320	2.370	0.98	38	18	1.620	1.570	1.25	40
19	2.370	2.420	1.04	39	19	1.570	1.520	1.24	41
20	2.420	2.470	1.89	41	20	1.520	1.470	1.34	42

Illnau-Effretikon

Strecke Illnau >> Effretikon, Kempptalstrasse S-2

Centre of lane, km 1.470 - 2.470

Illnau-Effretikon

Strecke Effretikon >> Illnau, Kempptalstrasse S-2

Centre of lane, km 2.470 - 1.470

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	1.470	1.520	1.39	34	1	2.470	2.420	1.53	39
2	1.520	1.570	1.28	34	2	2.420	2.370	1.28	40
3	1.570	1.620	1.38	36	3	2.370	2.320	0.82	42
4	1.620	1.670	1.65	38	4	2.320	2.270	0.85	42
5	1.670	1.720	0.87	39	5	2.270	2.220	1.16	41
6	1.720	1.770	1.41	39	6	2.220	2.170	1.67	35
7	1.770	1.820	1.63	39	7	2.170	2.120	1.23	36
8	1.820	1.870	1.04	38	8	2.120	2.070	0.89	40
9	1.870	1.920	1.11	36	9	2.070	2.020	1.18	42
10	1.920	1.970	1.64	35	10	2.020	1.970	1.40	43
11	1.970	2.020	1.51	33	11	1.970	1.920	1.20	43
12	2.020	2.070	1.31	33	12	1.920	1.870	1.01	41
13	2.070	2.120	1.31	36	13	1.870	1.820	0.74	40
14	2.120	2.170	2.07	39	14	1.820	1.770	1.25	38
15	2.170	2.220	1.09	39	15	1.770	1.720	1.52	39
16	2.220	2.270	1.01	38	16	1.720	1.670	0.86	38
17	2.270	2.320	1.02	37	17	1.670	1.620	1.16	38
18	2.320	2.370	0.99	36	18	1.620	1.570	1.37	39
19	2.370	2.420	0.94	38	19	1.570	1.520	1.34	41
20	2.420	2.470	1.57	39	20	1.520	1.470	1.22	41

Wetzikon : Pfäffikerstrasse S-2

Strecke Wetzikon - Pfäffikon

Right wheel path, km 0.300 - 0.000

Wetzikon : Pfäffikerstrasse S-2

Strecke Pfäffikon - Wetzikon

Right wheel path, km 0.000 - 0.300

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	0.300	0.250	1.48	39	1	0.000	0.050	1.36	38
2	0.250	0.200	1.70	38	2	0.050	0.100	1.27	38
3	0.200	0.150	1.48	37	3	0.100	0.150	1.01	38
4	0.150	0.100	1.61	37	4	0.150	0.200	1.14	38
5	0.100	0.050	1.28	36	5	0.200	0.250	1.28	38
6	0.050	0.000	1.60	36	6	0.250	0.300	1.75	38

Wetzikon : Hochstrasse S-1/Pfäffikerstrasse S-1

Strecke Wetzikon - Pfäffikon

Right wheel path, km 5.450 - 3.100

Wetzikon : Hochstrasse S-1/Pfäffikerstrasse S-1

Strecke Pfäffikon - Wetzikon

Right wheel path km 3.100 - km 5.450

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	5.450	5.400	1.99	36	1	3.100	3.150	1.08	38
2	5.400	5.350	0.97	36	2	3.150	3.200	1.00	39
3	5.350	5.300	1.05	36	3	3.200	3.250	1.63	39
4	5.300	5.250	1.00	36	4	3.250	3.300	1.40	39
5	5.250	5.200	1.11	37	5	3.300	3.350	0.89	39
6	5.200	5.150	1.28	37	6	3.350	3.400	0.81	40
7	5.150	5.100	1.07	37	7	3.400	3.450	0.78	40
8	5.100	5.050	1.22	36	8	3.450	3.500	0.79	39
9	5.050	5.000	0.99	36	9	3.500	3.550	0.92	38
10	5.000	4.950	1.33	35	10	3.550	3.600	0.95	38
11	4.950	4.900	1.86	35	11	3.600	3.650	1.09	38
12	4.900	4.850	1.63	34	12	3.650	3.700	0.89	38
13	4.850	4.800	2.53	35	13	3.700	3.750	0.83	38
14	4.800	4.750	1.61	35	14	3.750	3.800	1.07	38
15	4.750	4.700	1.58	35	15	3.800	3.850	0.90	39
16	4.700	4.650	1.94	36	16	3.850	3.900	0.75	38
17	4.650	4.600	1.06	36	17	3.900	3.950	0.89	37
18	4.600	4.550	1.18	37	18	3.950	4.000	1.28	37
19	4.550	4.500	1.36	37	19	4.000	4.050	0.83	38
20	4.500	4.450	0.84	37	20	4.050	4.100	0.98	38
21	4.450	4.400	1.25	38	21	4.100	4.150	0.86	37
22	4.400	4.350	1.15	38	22	4.150	4.200	0.75	36
23	4.350	4.300	1.42	38	23	4.200	4.250	0.95	36
24	4.300	4.250	1.10	38	24	4.250	4.300	0.76	37
25	4.250	4.200	1.04	38	25	4.300	4.350	0.91	37
26	4.200	4.150	0.97	39	26	4.350	4.400	1.22	38
27	4.150	4.100	1.08	38	27	4.400	4.450	0.84	38
28	4.100	4.050	1.01	38	28	4.450	4.500	1.05	38
29	4.050	4.000	1.03	38	29	4.500	4.550	1.64	38
30	4.000	3.950	1.04	37	30	4.550	4.600	1.19	38
31	3.950	3.900	0.96	37	31	4.600	4.650	2.28	37
32	3.900	3.850	0.92	37	32	4.650	4.700	2.35	38
33	3.850	3.800	0.83	37	33	4.700	4.750	2.46	39
34	3.800	3.750	1.35	37	34	4.750	4.800	2.09	38
35	3.750	3.700	1.35	37	35	4.800	4.850	1.69	37
36	3.700	3.650	0.99	37	36	4.850	4.900	1.99	37
37	3.650	3.600	0.97	37	37	4.900	4.950	2.13	38
38	3.600	3.550	1.05	38	38	4.950	5.000	1.24	38
39	3.550	3.500	0.95	38	39	5.000	5.050	1.43	37
40	3.500	3.450	0.84	38	40	5.050	5.100	1.28	38
41	3.450	3.400	0.94	38	41	5.100	5.150	1.13	38
42	3.400	3.350	0.98	38	42	5.150	5.200	1.11	40
43	3.350	3.300	1.04	38	43	5.200	5.250	0.77	41
44	3.300	3.250	1.26	38	44	5.250	5.300	0.78	40
45	3.250	3.200	1.21	39	45	5.300	5.350	0.77	39
46	3.200	3.150	1.17	39	46	5.350	5.400	0.99	38
47	3.150	3.100	1.47	38	47	5.400	5.450	1.43	38

Zollikon / Bergstrasse S-4

Strecke downhill

Right wheel path, km 1.750 - 0.800

Zollikon / Bergstrasse S-4

Strecke uphill

Right wheel path, km 0.800 - 1.750

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	1.750	1.700	1.66	40	1	0.800	0.850	2.12	36
2	1.700	1.650	3.5	40	2	0.850	0.900	1.16	35
3	1.650	1.600	2.34	39	3	0.900	0.950	1.52	36
4	1.600	1.550	1.75	38	4	0.950	1.000	1.21	36
5	1.550	1.500	1.79	38	5	1.000	1.050	1.78	36
6	1.500	1.450	2.63	38	6	1.050	1.100	1.69	38
7	1.450	1.400	1.65	38	7	1.100	1.150	1.81	38
8	1.400	1.350	1.38	36	8	1.150	1.200	2.32	38
9	1.350	1.300	1.48	35	9	1.200	1.250	2.47	36
10	1.300	1.250	1.69	36	10	1.250	1.300	3.84	35
11	1.250	1.200	1.37	35	11	1.300	1.350	1.45	35
12	1.200	1.150	2.46	36	12	1.350	1.400	1.83	35
13	1.150	1.100	2.34	36	13	1.400	1.450	1.71	35
14	1.100	1.050	1.31	38	14	1.450	1.500	1.84	35
15	1.050	1.000	0.95	39	15	1.500	1.550	1.29	35
16	1.000	0.950	1.75	38	16	1.550	1.600	1.51	35
17	0.950	0.900	1.48	34	17	1.600	1.650	1.30	34
18	0.900	0.850	1.46	33	18	1.650	1.700	1.57	32
19	0.850	0.800	3.47	30	19	1.700	1.750	2.14	29

Zollikon / Bergstrasse S-4

Strecke downhill

Centre of lane, km 1.750 - 0.800

Zollikon / Bergstrasse S-4

Strecke uphill

Centre of lane, km 0.800 - 1.750

Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]	Abschnitt	von km	bis km	IRI [m/km]	V [km/h]
1	1.750	1.700	1.43	37	1	0.800	0.850	2.31	36
2	1.700	1.650	3.38	39	2	0.850	0.900	0.98	36
3	1.650	1.600	0.63	40	3	0.900	0.950	1.08	37
4	1.600	1.550	2.46	38	4	0.950	1.000	1.11	37
5	1.550	1.500	1.37	37	5	1.000	1.050	1.20	37
6	1.500	1.450	2.72	37	6	1.050	1.100	1.30	40
7	1.450	1.400	1.95	36	7	1.100	1.150	1.48	41
8	1.400	1.350	1.25	36	8	1.150	1.200	1.62	38
9	1.350	1.300	1.24	36	9	1.200	1.250	1.76	37
10	1.300	1.250	1.73	36	10	1.250	1.300	2.24	36
11	1.250	1.200	1.28	35	11	1.300	1.350	1.17	36
12	1.200	1.150	1.54	35	12	1.350	1.400	1.34	36
13	1.150	1.100	1.99	35	13	1.400	1.450	1.45	36
14	1.100	1.050	1.35	36	14	1.450	1.500	1.74	36
15	1.050	1.000	0.84	37	15	1.500	1.550	1.19	35
16	1.000	0.950	1.59	37	16	1.550	1.600	1.08	34
17	0.950	0.900	1.26	37	17	1.600	1.650	1.04	34
18	0.900	0.850	1.16	37	18	1.650	1.700	1.19	32
19	0.850	0.800	2.86	37	19	1.700	1.750	1.63	30