



Beurteilung des LTL-M

Mobile Messung von Straßenmarkierungen

Sven-Olof Lundkvist

Herausgeber:  SE-581 95 Linköping Schweden	Veröffentlichungen: VTI rapport 675B				
Autor: Sven-Olof Lundkvist	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="904 197 1023 293"> Freigabe: 2010 </td> <td data-bbox="1023 197 1233 293"> Projekt Nummer: 40793 </td> <td data-bbox="1233 197 1516 293"> Registrierungsnummer: 2007/0553-28 </td> </tr> </table>		Freigabe: 2010	Projekt Nummer: 40793	Registrierungsnummer: 2007/0553-28
Freigabe: 2010	Projekt Nummer: 40793	Registrierungsnummer: 2007/0553-28			
Titel: Bewertung des LTL-M – Mobile Messung von Straßenmarkierungen	Projekt Titel: Bewertung der mobilen Reflektometer des Typs MR				
Im Auftrag: Vejdirektoratet Vegdirektoratet Vägverket					
Abstract (Hintergrund, Ziel, Verfahren, Ergebnis) max. 200 Wörter: Das LTL-M, eine Ausrüstung für die mobile Messung der Rückstrahlung von Straßenmarkierungen, wurde von DELTA Light & Optics in Dänemark entwickelt. Dieses Gerät setzt ein anderes optisches Prinzip als das bisher übliche mobile Gerät ein, das Ecodyn 30. Das optische System des LTL-M könnte zu höherer Genauigkeit und besserer Wiederholbarkeit führen. Durch simultane Messungen mit den beiden mobilen Geräten und als Referenz mit dem Handmessgerät LTL-2000 wurden die Genauigkeit und Wiederholbarkeit des LTL-M und des Ecodyn 30 eingeschätzt. Die Messungen erfolgten im Labor an Proben von Straßenmarkierungen und in einer Feldstudie an durchgehenden und unterbrochenen Seitenlinien. Die Schlussfolgerung dieser Studie ist, dass das LTL-M mit weniger systematischen und Zufallsfehlern als das Ecodyn 30 misst. Außerdem ist die Wiederholbarkeit des LTL-M besser als die Wiederholbarkeit des Ecodyn 30.					
Stichwort: Mobile Mess-, Reflektometer, Retro-Reflektion, Fahrbahnmarkierung					
ISSN: 0347-6030	Sprache: Deutsch	Seitenzahl: 24 + 2 Anhänge			

Utgivare:  581 95 Linköping	Publikation: VTI rapport 675B		
Författare: Sven-Olof Lundkvist	Utgivningsår: 2010	Projektnummer: 40793	Dnr: 2007/0553-28
Titel: Utvärdering av LTL-M – mobil mätning av vägmarkeringar			
Referat (bakgrund, syfte, metod, resultat) max 200 ord: DELTA Lys & Optik i Danmark har utvecklat ett instrument för mobil mätning av vägmarkeringars retroreflexion, LTL-M. Detta instrument använder en annan optisk princip än det instrument som vanligen har använts hittills, Ecodyn 30. LTL-M:s optiska system skulle kunna innebära att mätfelen reduceras. Genom samtidig mätning med LTL-M, Ecodyn 30 och, som referens det handhållna instrumentet LTL-2000, har de mobila instrumentens validitet och repeterbarhet skattats. Mätningar gjordes i laboratoriet på vägmarkeringssampel och i fält på heldragna och intermittenta kantlinjer. Slutsatsen från studien är att LTL-M mäter med mindre systematiska och slumpmässiga fel än Ecodyn 30. LTL-M har även bättre repeterbarhet än Ecodyn 30.			
Nyckelord: mobil mätning, reflektometer, retroreflexion, vägmarkering			
ISSN: 0347-6030	Språk: Tyska	Antal sidor: 24 + 2 bilagor	

Vorwort

Dieses Projekt wurde im Rahmen der NMF (Skandinavische Konferenz für verbesserte Straßenausrüstungen) durchgeführt. Die Studie wurde von den Straßenbehörden in Dänemark, Norwegen und Schweden finanziert, in denen die folgenden Personen zuständig waren:

Dänemark, Dänische Straßenverwaltung	Peter J Andersen
Norwegen, Norwegische öffentliche Straßenbauverwaltung	Bjørn Skaar
Schweden, Schwedische Straßenbauverwaltung	Hans G Holmén

Die Messungen mit Handmessgeräten wurden von Lars Eriksson, VTI, und dem Autor, die LTL-M-Messungen von Kai Sørensen und Asbjørn Mejnertsen, DELTA Light & Optics, und die Messungen mit dem Ecodyn 30 von Peter Lövmö, Ramböll RST, durchgeführt.

Die Analyse und Dokumentation wurden vom Autor erstellt.

Linköping, August 2010

Sven-Olof Lundkvist

Qualitätskontrolle

Die interne Prüfung durch Kollegen erfolgte am 18. Januar 2010 durch Sara Nygårdhs, VTI. Sven-Olof Lundkvist nahm Änderungen am abgeschlossenen Manuskript des Berichts vor. Der Forschungsleiter des Projektmanagers, Jan Andersson, prüfte und genehmigte den Bericht am 28. Januar 2010 zur Veröffentlichung.

Kvalitetsgranskning

Intern peer review har genomförts 2010-01-18 av Sara Nygårdhs, VTI. Sven-Olof Lundkvist har genomfört justeringar av slutligt rapportmanus. Projektledarens närmaste chef, Jan Andersson, VTI, har därefter granskat och godkänt publikationen för publicering 2010-01-28.

Inhalt

Zusammenfassung	5
Sammanfattning	7
1 Hintergrund und Ziel der Studie	9
2 Informationen zum Gerät	10
2.1 Das Handmessgerät	12
3 Verfahren	13
3.1 Labormessungen	13
3.2 Feldmessungen	13
4 Ergebnisse	16
4.1 Definitionen	16
4.2 Laborstudie	16
4.3 Feldstudie	17
5 Diskussion	22
6 Schlussfolgerung	23
Literatur	24

Anhang A

Anhang B

Beurteilung des LTL-M – Mobile Messung von Straßenmarkierungen

von Sven-Olof Lundkvist

VTI (Staatliches Schwedisches Straßen- und Verkehrsforschungsinstitut

SE-581 95 Linköping Schweden

Zusammenfassung

Mit steigendem Verkehrsaufkommen nimmt auch die Nachfrage nach mobilen Messverfahren zu. Auf stark befahrenen Straßen sind Handmessgeräte nicht sicher, weil das Messpersonal auf der Straße arbeiten muss. Stattdessen werden zur Sicherheit des Personals und der Verkehrsteilnehmer mobile Messungen mit normaler Fahrgeschwindigkeit vorgezogen. Diese Studie enthält eine Beurteilung des mobilen Reflektometers LTL-M, das von DELTA Light & Optics in Dänemark entwickelt wurde.

In der Praxis weist ein fahrzeugbasiertes Retroreflektometer durch die Fahrzeugbewegungen und die Straßenwölbung eine gewisse Neigung bzw. Anhebung gegenüber der Straßenmarkierungsoberfläche auf. Dies führt zu zufälligen oder systematischen Änderungen der tatsächlichen Distanz und damit auch zu Änderungen des gemessenen R_L -Werts aufgrund des Lichtabstandsgesetzes. Das LTL-M hat ein optisches System, das als Simulation eines defokussierten Systems beschrieben werden kann, siehe Abschnitt 2. Dieses optische System soll die Messungen zuverlässig machen und nur zu geringen zufälligen und systematischen Fehlern führen. In der ersten Phase dieser Studie wurden zwei optische Prinzipien (fokussiert und defokussiert) im Labor getestet und mit verschiedenen Längen, Höhen und Messwinkeln verglichen.

Anschließend wurde eine Feldstudie mit Messungen verschiedener Typen von Straßenmarkierungen in Dänemark und Schweden durchgeführt. In dieser zweiten Phase wurden zwei mobile Messgeräte, das LTL-M und das Ecodyn 30, benutzt. Das Referenzinstrument war das Handmessgerät LTL-2000. Außerdem wurde die Wiederholbarkeit durch doppelte Messung jedes Messabschnitts untersucht.

Das Ergebnis der Laborstudie zeigte, dass Messungen mit dem fokussierten optischen System (Ecodyn 30) erhebliche Messfehler aufgrund von Änderungen der Messgeometrie aufweisen können. Dagegen waren die Messungen des LTL-M mit dem defokussierten System fast unabhängig von der Messgeometrie. Die Labormessungen zeigten somit klar, dass das defokussierte optische System bei einem mobilen Reflektometer vorzuziehen ist.

In der Feldstudie wurden die Messungen des LTL-2000 als Referenz angesehen, obwohl auch dessen Messungen Fehler aufweisen. Außerdem sind die Messungen nicht vollständig vergleichbar, weil das LTL-2000 nur zur Messung eines kleinen prozentualen Teils der Straßenmarkierung benutzt wurde, während das LTL-M praktisch die gesamte Fläche maß. Der Vergleich der Messungen mit dem LTL-M und dem Ecodyn 30 zeigte allerdings:

	LTL-M	Ecodyn 30
Systematischer Fehler	3,6%	10,6%
Zufallsfehler	5,3%	12,5%
Wiederholbarkeit	3,3%	7,0%

Die Schlussfolgerung aus den Labor- und Feldmessungen ist, dass das LTL-M verglichen mit dem Ecodyn 30 mit weniger systematischen und Zufallsfehlern misst. Außerdem ist die Wiederholbarkeit des LTL-M besser.

Abschließend wurde vorgeschlagen, eine umfangreichere Feldstudie durchzuführen. Diese Studie sollte nicht nur das LTL-M und Ecodyn 30, sondern auch andere auf dem Markt verfügbare mobile Messgeräte einschließen.

Utvärdering av LTL-M – mobil mätning av vägmarkeringar

av Sven-Olof Lundkvist
VTI
581 95 Linköping

Sammanfattning

På högtrafikerade vägar är det inte lämpligt att göra mätningar med handhållna instrument eftersom detta innebär risker både för mätpersonal, som måste befinna sig på vägen, och för trafikanter. Istället är det önskvärt att i största möjliga utsträckning utföra funktionsmätningar med mobila mätmetoder i en hastighet som inte avviker mycket från övrig trafik. Föreliggande rapport dokumenterar en utvärdering av ett nyligen utvecklat mobilt instrument för mätning av vägmarkeringars retroreflexion. Instrumentet, som benämns LTL-M, är utvecklat av DELTA Lys & Optik i Danmark.

Att en reflektometer är monterad på ett fordon innebär att mätvinklar och mätthöjd (över vägmarkeringsytan) kommer att variera under mätningens gång, vilket i sin tur leder till en förändring av det faktiska mätavståndet. Belysningsstyrkan vid instrumentet följer den kvadratiske belysningslagen, vilket innebär att det registrerade retroreflexionsvärdet kommer att bli felaktigt. Emellertid använder LTL-M en optik som simulerar ett defokuserat optiskt system, vilket är mindre känsligt för felaktig mätgeometri. Detta borde innebära att LTL-M mäter med mindre systematiska och slumpmässiga fel än instrument som använder fokuserat mätsystem. I den första fasen av projektet jämfördes de två optiska systemen – det defokuserade och det fokuserade – med avseende på mätningarnas noggrannhet och precision genom att mätvinklar och mätthöjd i statistiska laboriemätningar varierades systematiskt.

I studiens andra fas gjordes mobila fältmätningar på kantlinjer i Danmark och Sverige med LTL-M och Ecodyn 30, varav den sistnämnda använder ett fokuserat optiskt system. För att studera repeterbarheten gjordes två mätningar på varje mätsträcka. Som referens gjordes handhållna mätningar med LTL-2000, varvid resultat från mobila och handhållna mätningar jämfördes.

Laboriestudien visade att mätningar med ett fokuserat system (Ecodyn 30) kunde vara behäftade med stora fel. Däremot var LTL-M:s mätvärden så gott som oberoende av mätgeometrin. Således kunde laboriemätningarna bekräfta att ett defokuserat mätsystem är att föredra vid mobil mätning av retroreflexionen.

I fältstudien ansågs de handhållna mätningarna vara facit, även om också dessa är behäftade med små systematiska och slumpmässiga mätfel. Vidare ska det påpekas att handhållna och mobila mätningar egentligen inte är helt jämförbara eftersom det handhållna instrumentet mäter på endast en liten del av den totala vägmarkeringsarean, medan de mobila mätningarna registrerar nästan hela arean. Ändå visade de jämförande mätningarna följande:

	LTL-M	Ecodyn 30
Systematiskt mätfel	3,6 %	10,6 %
Slumpmässigt mätfel	5,3 %	12,5 %
Repeterbarhet	3,3 %	7,0 %

Slutsatsen av studien är att LTL-M mäter med både mindre systematiska och slumpmässiga fel än Ecodyn 30. Jämfört med Ecodyn 30 har även LTL-M bättre repeterbarhet.

Slutligen föreslås en ytterligare fältstudie, i vilken även andra på marknaden förekommande instrument undersöks.

1 Hintergrund und Ziel der Studie

Mit steigendem Verkehrsaufkommen nimmt auch die Nachfrage nach mobilen Messverfahren zu. Auf stark befahrenen Straßen sind Handmessgeräte nicht sicher, weil das Messpersonal auf der Straße arbeiten muss. Zur Sicherheit des Personals und der Verkehrsteilnehmer werden mobile Messungen mit normaler Fahrgeschwindigkeit vorgezogen.

Seit fast 20 Jahren werden mobile Retroreflektivitäts-Messgeräte für Straßenmarkierungen benutzt. In Europa wird das französische Ecodyn seit den späten 1980ern produziert und seit mehr als zehn Jahren in den skandinavischen Ländern eingesetzt. Die 30-Meter-Version dieses Geräts, das Ecodyn 30, wurde 1999 in Schweden getestet – dokumentiert im VTI-Bericht 444A (Lundkvist, 1999). Das Gerät wurde seither weiterentwickelt und die Messfehler wurden verringert, wie es z. B. von Lundkvist (2009) dokumentiert wurde. Die Messfehler sind jedoch weiterhin zu groß für bestimmte Anwendungen, so z. B. bei Verwendung von Messergebnissen für die Entscheidung von Streitfällen. Es gibt somit Bedarf an einem Gerät, das die Eigenschaften von Straßenmarkierungen noch genauer als das aktuelle Ecodyn 30 misst.

Die DELTA Light & Optics hat ein neues mobiles Retroreflektometer, das LTL-M, entwickelt. Dieses Gerät soll mit einem etwas anderen Messverfahren als das Ecodyn 30 die Genauigkeit mobiler Messungen verbessern. Das Ziel dieser Studie sind Untersuchung und Vergleich der Messfehler des LTL-M und des Ecodyn 30.

Der Bericht konzentriert sich auf In-situ-Messungen, die zur Untersuchung der Verlässlichkeit und Gültigkeit des LTL-M vorgenommen wurden, und auf den Vergleich dieses neuen Geräts mit dem Ecodyn 30. Außerdem werden einige Ergebnisse der Labormessungen gezeigt, die zum Test des Messprinzips erfolgten.

2 Informationen zum Gerät

Das LTL-M benutzt die 30-m-Standardmessgeometrie gemäß EN-1436 (CEN, 2007) in einem verringerten Maßstab aller Maße, so dass der tatsächliche Messabstand 6 m beträgt. Das Ecodyn 30 basiert auf derselben Maßstabverringerung der 30-m-Geometrie wie auch einige andere auf dem Markt erhältliche mobile Geräte, bei denen der Maßstab jedoch abweichen kann.

In der Praxis weist ein fahrzeuggestütztes Retroreflektometer durch die Fahrzeugbewegungen und die Straßenwölbung eine gewisse Neigung bzw. Anhebung gegenüber der Straßenmarkierungsoberfläche auf. Dies führt zu zufälligen oder systematischen Änderungen der tatsächlichen Distanz und damit auch Änderungen des gemessenen R_L -Werts aufgrund des Lichtabstandsgesetzes. Eine Anhebung führt zu einer Änderung des Winkelverhältnisses von Beleuchtung und Messung und damit Änderungen des gemessenen R_L -Werts, weil dieses Verhältnis ein inhärenter Faktor des R_L -Werts ist.

Ähnliche Abweichungen könnten von einem tragbaren Retroreflektometer erwartet werden, weil es eine gewisse Neigung und Anhebung gibt, wenn es auf die Straßenoberfläche gesetzt wird. Die Hand-Retroreflektometer LTL-X und LTL-2000 bieten jedoch durch optische Verfahren einen praktisch unbegrenzten Messabstand. Dies eliminiert den Einfluss kleiner Verschiebungen des beleuchteten Felds. Außerdem sind die Felder gemäß dem in EN 1426 beschriebenen Verfahren B angeordnet (das gemessene Feld schließt das beleuchtete Feld ein), was den Einfluss des Verhältnisses zwischen den Winkeln ausschaltet. Zusammenfassend kann dies als defokussiertes System oder auch Kollimationsoptik bezeichnet werden.

Das defokussierte System kann nicht direkt für fahrzeuggestützte Retroreflektometer benutzt werden, weil diese große Breiten des Messfelds erfordern, um das Lenken zu ermöglichen. Die Prinzipien des LTL-M schließen jedoch die Effekte des defokussierten Verfahrens ein, und im Folgenden wird das LTL-M als das Gerät bezeichnet, das das defokussierte System benutzt.

Die Messfehler bei Benutzung des defokussierten Systems wurden im Labor getestet, siehe Kapitel 3.

Die Lichtquelle ist eine Blitzentladungslampe, die nicht Typ A gemäß der Definition in ISO/CIE 10526 (ISO/CIE, 1999) entspricht. Der Spektralbereich des Photometers ist jedoch so modifiziert, dass es einen korrekten Spektralbereich der Beleuchtung und Messung bietet (dies ist nach DIN EN 1326 zulässig).

Das beleuchtete Feld auf der Straßenoberfläche ist ca. 1 m breit und 1 m lang. Das gemessene Feld befindet sich im beleuchteten Feld und wird durch Lücken in unterbrochenen Straßenmarkierungen sowie die Breiten der Markierungen begrenzt. Dies ermöglicht eine ziemlich große Fehlerspanne beim Lenken. Doppellinien werden simultan gemessen. Die Ergebnisse schließen nicht nur R_L -Werte, sondern auch die Straßenmarkierungsgeometrie (Breiten und Unterbrechungen von Linien) und sogar die relative Geometrie der Messung zwischen dem Retroreflektometer und der Straßenmarkierungsoberfläche ein.

Ein tragbares Retroreflektometer hat normalerweise eine Abdeckung, um das Signal des Umgebungslichts, besonders direktes Sonnenlicht, abzuschirmen. Ein fahrzeuggestütztes Retroreflektometer kann keine Abdeckung des Messfelds vor dem Fahrzeug haben und benötigt deshalb ein anderes Abschirmungsverfahren.

Das Ecodyn 30 benutzt modulierte Beleuchtung in Verbindung mit selektiver Verstärkung der Modulationsfrequenz. Das Laserlux benutzt selektiven Empfang eines schmalen Wellenlängenbands, das die Wellenlänge des Lasers einschließt. Das LTL-M benutzt mit der Belichtung während eines sehr kurzen Blitzintervalls, während dessen der Blitz stärker als das übrige Licht ist, wiederum ein anderes Verfahren. Keines dieser Verfahren reicht bei direktem Sonnenlicht völlig aus, weshalb das Signal des Umgebungslichts gemessen und subtrahiert werden muss. Das LTL-M setzt hierfür bei jeder Messung ein effizientes Verfahren ein.

Das LTL-M wird mit einem Kalibrierblock mit geneigter weißer Oberfläche kalibriert. Es können beide für das LTL-X bzw. das LTL-2000 benutzte Typen verwendet werden.

Abb. 1 zeigt das LTL-M an einem Peugeot Van.



Abb. 1 Das LTL-M an einem Peugeot Van.

Nach den Labormessungen 2008 wurde das LTL-M modifiziert, um die Wiederholbarkeit zu verbessern. Das Gerät war deshalb bei den Labor- und den Feldmessungen nicht identisch.

Das in der Feldstudie 2009 getestete Gerät ist das bisher einzig hergestellte und muss deshalb als Prototyp angesehen werden. Der Entwicklungsaufwand war erheblich, und es ist unwahrscheinlich, dass die derzeitigen Funktionsprinzipien geändert werden. Die praktische Anwendung und die Software werden jedoch noch weiterentwickelt.

Wie oben erwähnt, benutzt das Ecodyn 30 dieselbe Messgeometrie wie das LTL-M. Das System ist jedoch fokussiert, was die Messungen anfällig für Änderungen der Systemgeometrie machen kann. Das Ecodyn 30 hat 14 Fotozellen mit je einer Messbreite von 40 mm. Die Messung entspricht vorzugsweise dem Durchschnittswert der einen oder der zwei Zelle(n) mit dem höchsten Wert. Die Messung ist somit ein Durchschnitt von 40 bzw. 80 mm Straßenmarkierungsbreite. In dieser Studie wurde die 80-mm-Messbreite für die Feldmessungen benutzt. Die Lichtquelle ist eine Halogenlampe mit Dauerlicht. Um den Einfluss des Umgebungslichts auszuschalten, wird jedoch ein Zerhackerverfahren benutzt. Die Software wurde für Messungen der unterbrochenen Straßenmarkierung mit 1 m Länge eingestellt. Abb. 2 zeigt das Ecodyn 30.



Abb. 2 Das Ecodyn 30.

Es muss erwähnt werden, dass das in dieser Studie benutzte Ecodyn 30 für die Messung schwedischer Straßenmarkierungen modifiziert wurde. Die Ergebnisse sind deshalb evtl. nicht mit älteren schwedischen oder anderen in Europa oder den USA durchgeführten Studien vergleichbar.

2.1 Das Handmessgerät

Die Handmessgeräte LTL-X und LTL-2000 wurden bei den Labor- bzw. Feldmessungen als Referenzgeräte benutzt. Die beiden Geräte sind hinsichtlich der Messgeometrie identisch, beide verwenden ein defokussiertes optisches System und sind in fast jeder anderen Hinsicht gleichwertig. Beide Geräte sind wohlbekannt und weisen kleine Messfehler auf, wie u. a. Bernstein (2000) berichtet.

Das in dieser Studie benutzte Gerät wurde kurz vorher im Labor kalibriert.

3 Verfahren

3.1 Labormessungen

Mit den mobilen Messgeräten wurden im Labor statische Messungen an 12 Proben neuer, auf Metalltafeln aufgetragener Straßenmarkierungen durchgeführt. Diese Messungen sollten die beiden Messprinzipien, das defokussierte (LTL-M) und das fokussierte (Ecodyn 30), vergleichen. Es wurde das folgende Verfahren benutzt:

In der ersten Messserie wurde das Gerät für Messungen der Proben im Abstand von 6 m montiert, kalibriert und justiert, und es wurden zwei Messungen aufgezeichnet. Anschließend wurde das Gerät demontiert, abgeschaltet und dann das Verfahren - Montage, Kalibrierung und Justierung - wiederholt. Ausgehend von diesen Messergebnissen wurden die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit geschätzt.

Das Messergebnis des LTL-M repräsentierte die durchschnittliche Rückstrahlung der gesamten Probenfläche, während das Ergebnis des Ecodyn 30 einer ovalen Fläche mit einer größten Breite von 40 mm in der Mitte der Straßenmarkierung entsprach. Weil die beiden mobilen Geräte also nicht dieselbe Fläche maßen und die Probenoberflächen nicht homogen waren, waren nicht genau dieselben Werte zu erwarten.

Im zweiten Schritt variierte an einigen der 12 Proben die Messgeometrie systematisch, um den Einfluss der Messhöhe und -winkel bei beiden Messprinzipien herauszufinden.

Die Messungen mit dem LTL-X wurden für alle Proben aufgezeichnet. Bei jeder Probe wurde fast die gesamte Straßenmarkierungsfläche gemessen.

3.2 Feldmessungen

Die Feldmessungen wurden in zwei Kategorien aufgeteilt:

- Validierungsmessungen an Abschnitten von ca. 200 m Länge
- Produktionsmessungen an Abschnitten von ca. 12 km Länge.

3.2.1 Validierungsmessungen

Um die Gültigkeit und Wiederholbarkeit an zwei mobilen Geräten zu prüfen, wurden Messungen an 28 Abschnitten trockener Seitenlinien von jeweils ca. 200 m Länge vorgenommen. In Dänemark wurden 22 Abschnitte mit durchgehenden Seitenlinien und in Schweden sechs Abschnitte mit unterbrochenen Seitenlinien ausgewählt. Die Straßenmarkierungen in Dänemark waren Testmarkierungen und in den meisten Fällen profiliert. Sie hatten jedoch das Aussehen regulärer Markierungen, nur das Rezept der Mischung oder der Typ der Glasperlen wichen ab. Alle Straßenmarkierungen waren 100 mm breit. Abb. 3 zeigt je einen typischen dänischen und schwedischen Testabschnitt.

Die Messungen mit den beiden mobilen Geräten erfolgten fast simultan (innerhalb von 30 Minuten). Außerdem wurde jeder Testabschnitt zweimal gemessen, um die Wiederholbarkeit der Geräte zu schätzen.

In Dänemark wurden die Handmessungen innerhalb von 30 Minuten nach den mobilen Messungen durchgeführt. Aufgrund des Dämmerungseinbruchs wurden jedoch zwei Abschnitte am Folgetag gemessen. Es wird angenommen, dass dies keinen Einfluss auf die Messergebnisse hatte, weil es in der Nacht keinen Niederschlag gab und die Straßenmarkierungen in beiden Fällen trocken waren.

Über den gesamten ca. 200 m langen Abschnitt wurden mit dem LTL-2000 in Dänemark alle 5 m und in Schweden alle 6 m Handmessungen aufgezeichnet. Dies ergab auf jedem Testabschnitt 30 bis 40 Messungen.



Abb. 3 Typische Testabschnitte in Dänemark und Schweden mit durchgehenden (links) und unterbrochenen (rechts) Seitenlinien.

3.2.2 Produktionsmessungen

Um das Verhalten der Geräte unter realen Bedingungen zu prüfen, bei denen die Länge eines Objekts bis zu 10 km lang sein kann, wurden 32 Abschnitte mit mobilen Einheiten gemessen. Das Hauptziel dieser Messungen war nicht der Vergleich der Messergebnisse, sondern ein Zuverlässigkeitstest der Geräte. Traten spezifische Probleme auf? Es ist eine Sache, eine einzige Messung auf einem kurzen Straßenabschnitt durchzuführen. Wie aber verhält sich das Gerät im Dauerbetrieb 10 Stunden pro Tag und über mehrere Tage hinweg?

3.2.3 Testabschnitte

Die in Dänemark und Schweden gewählten Testabschnitte sind in Tabelle 1 gezeigt. Drei der Testabschnitte in Schweden befanden sich auf Straßen mit hoher Verkehrsdichte. Aufgrund der schwedischen Vorschriften für Straßenarbeiten erfolgten auf diesen Abschnitten keine Handmessungen.

Tabelle 1 Teststraßen in Dänemark und Schweden. Jede Teststraße war in x Abschnitte mit jeweils unterschiedlichen Typen von Straßenmarkierungen aufgeteilt. Validierungsmessungen erfolgten an zehn der Straßen mit 28 Testabschnitten.

Land	Straße Nr.	Testabschnitt Nr.	Abschnittlänge (km)	Messungslänge (km)	Aufteilung in x Testabschnitte
Dänemark	213	dk1 – dk4	1,4	5,6	4
	E47*	dk5	11,7	23,4	1
	469	dk7	2,0	8,0	1
	469	dk8-dk15	5,0	20,0	8
	475	dk17-dk19	1,5	6,0	3
	24	dk20-25	4,2	16,8	6
Schweden	E6*	s4	6,0	24,0	1
	21	s10	4,5	18,0	1
	24*	s13	2,8	11,2	1
	101	s18	0,2	0,8	1
	104	s19	2,7	10,8	1
	108	s20	3,1	12,4	1
	108**	s21	4,2	16,8	1
	110	s22	4,3	17,2	1
	115	s23	3,8	15,2	1

* Auf dieser Teststraße erfolgten nur Produktionsmessungen.

** Aus der Analyse ausgeschlossen.

Auf den meisten der Testabschnitte in Tabelle 2 erfolgten die Messungen zweimal auf beiden Straßenseiten. Allgemein bedeutet dies, dass die Messungslänge das Vierfache der Abschnittlänge beträgt.

Die Teststraße S21 wurde aufgrund eines menschlichen Fehlers von der Analyse ausgeschlossen. Aus Versehen wurden die Ergebnisse des LTL-2000 vorgestellt, bevor DELTA die Analyse durchführte. Es war somit möglich (jedoch nicht wahrscheinlich), dass DELTA das LTL-M-Ergebnis an die Ergebnisse der Handgeräte anpassen konnte. Um ein absolut faires Ergebnis zu erzielen, wurde dieser Testabschnitt nicht berücksichtigt.

Alle Messungen erfolgten an trockenen Straßenmarkierungen zuerst in Dänemark auf den Straßen 213 und E47 in Seeland, dann auf allen schwedischen Teststraßen in Schonen und schließlich auf den dänischen Straßen in Jütland. Auf diese Weise wurden alle Messungen innerhalb von drei Tagen abgeschlossen.

4 Ergebnisse

4.1 Definitionen

In den Abschnitten 4.2, 4.3 und 4.4 sind die in Tabellen und Abbildungen gezeigten Parameter folgendermaßen definiert.

Der systematische Messfehler ε ist definiert als:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{Li}(mobile) - R_{Li}(LTLX)) / R_{Li}(LTLX)}{n} \quad [1]$$

wobei $R_{Li}(mobile)$ und $R_{Li}(LTLX)$ die Rückstrahlung der Probe i bei Messung mit einem mobilen Gerät bzw. dem Handgerät LTL-X ist. n ist die Anzahl von Proben bzw. Testabschnitten.

Der Zufallsfehler ist mit denselben Bezeichnungen wie oben definiert als:

$$|\varepsilon| = \frac{\sum_{i=1}^n |R_{Li}(mobile) - R_{Li}(LTLX)| / R_{Li}(LTLX)}{n} \quad [2]$$

Außerdem ist die Wiederholbarkeit als Differenz zwischen zwei Messrunden definiert und wird folgendermaßen berechnet:

$$\varepsilon_{rep} = \frac{\sum_{i=1}^n |R_{Li1}(mobile) - R_{Li2}(mobile)| / R_{Li2}(mobile)}{n} \quad [3]$$

Die Reproduzierbarkeit wird ebenfalls mit Gleichung [3] berechnet, aber in diesem Fall wurde das Gerät zwischen zwei Messrunden neu kalibriert (nur Labormessungen).

4.2 Laborstudie

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse des Laborversuchs aus einem früher veröffentlichten Bericht von Ramböll RST (Lundkvist, 2009) zusammengefasst.

Tabelle 2 Messfehler und Einfluss von RL aufgrund von Abweichungen von der korrekten Messgeometrie. Die Zahlen basieren auf der Messung von 12 Proben.

Parameter	Defokussiert (LTL-M) %	Fokussiert (Ecodyn 30) %
Systematischer Fehler	+0,6	-3,0
Zufallsfehler	±7,7	±7,5
Wiederholbarkeit	±1,8	±0,3
Reproduzierbarkeit	±5,3	±13,3
Einfluss von Messabstand 1), Abweichung 20%	1–11	23–47
Einfluss von Messhöhe 2), Abweichung 20%	2–14	9–67
Einfluss der Geräteneigung 3), Neigung 2–5 Grad	1–7	4–11
Einfluss des seitlichen Messwinkels 4), Abweichung 2,5 Grad	1–5	1–17
Einfluss der seitlichen Position 5), Abweichung 0,1–0,2 m	1–4	0–16
1) Durch Vorwärts-/Rückwärtsneigung des Geräts 2) Durch Anheben/Absenken des Geräts und gleichzeitiges Vorwärts-/Rückwärtsneigen, um den Abstand konstant zu halten 3) Durch Seitwärtsneigung 4) Durch seitliches Ausrichten des Geräts und gleichzeitiges Seitwärtsbewegen, um die Probe in der Mittellinie zu halten 5) Durch Seitwärtsbewegen des Geräts ohne Ausrichtung, um die Probe aus der Mittellinie zu bringen		

Die Ergebnisse des Laborversuchs zeigen klar, dass alle Messfehler mit Ausnahme von Zufallsfehler und Wiederholbarkeit mit dem defokussierten Messprinzip signifikant geringer sind - besonders Fehler im Zusammenhang mit Änderungen der Messgeometrie. Dies ist ein starker Hinweis darauf, dass ein mobiles Gerät dieses optische Prinzip benutzen sollte, weil sich die Messgeometrie aufgrund von Fahrzeugbewegungen bzw. der Straßenwölbung ändern kann.

Es muss betont werden, dass zwei Messprinzipien und nicht zwei Geräte verglichen wurden. Das LTL-M zeigte jedoch einen unerwünschten Zufallsfehler, der wahrscheinlich die Wiederholbarkeit beeinflusst. Als Fehlerquelle wurde eine schlechte Einstellung des Nullsignals ausgemacht, die in zwei Stufen verbessert wurde, wobei im letzten Schritt die Nullsignal-Direktmessung und Kompensation bei jeder Messung eingeführt wurden.

4.3 Feldstudie

4.3.1 Gültigkeit und Wiederholbarkeit der mobilen Geräte

In Abschnitt 4.1 wurden die Gleichungen [1], [2] und [3] zur Schätzung von Messfehlern und der Wiederholbarkeit der beiden mobilen Geräte benutzt. Im Feldtest wurden die Messungen der beiden Handgeräte (LTL-2000) als „echte RL-Werte“

angesehen. Dies bedeutet, dass die Abweichungen von den Messungen des LTL-2000 als „Messfehler“ gelten.

Die Gültigkeit des mobilen Geräts lässt sich durch die Beziehung zwischen mobilen und Handmessungen ausdrücken. Dies ist in den Abb. 4 und 5 für das LTL-M bzw. das Ecodyn 30 gezeigt.

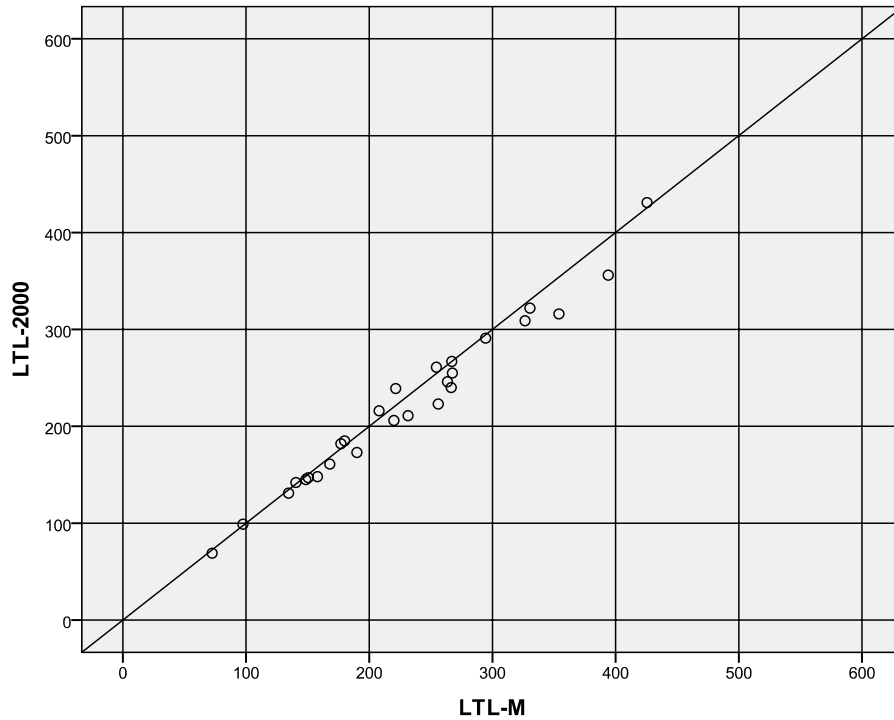


Abb. 4 Beziehung zwischen den LTL-M- und Handmessungen bei 28 Typen von Straßenmarkierungen. Durchschnitt der beiden Messrunden.

Messfehler, Wiederholbarkeit und Korrelation zwischen den LTL-M- und Handmessungen waren:

Systematische Abweichung zwischen den LTL-M- und Handmessungen	3,6%
Zufallsabweichung zwischen den LTL-M- und Handmessungen	5,3%
Wiederholbarkeit – Abweichung zwischen beiden Messrunden bei Verwendung des LTL-M	3,3%
Korrelation zwischen den LTL-M- und Handmessungen	0,988

Die entsprechenden Ergebnisse für das Ecodyn 30 sind:

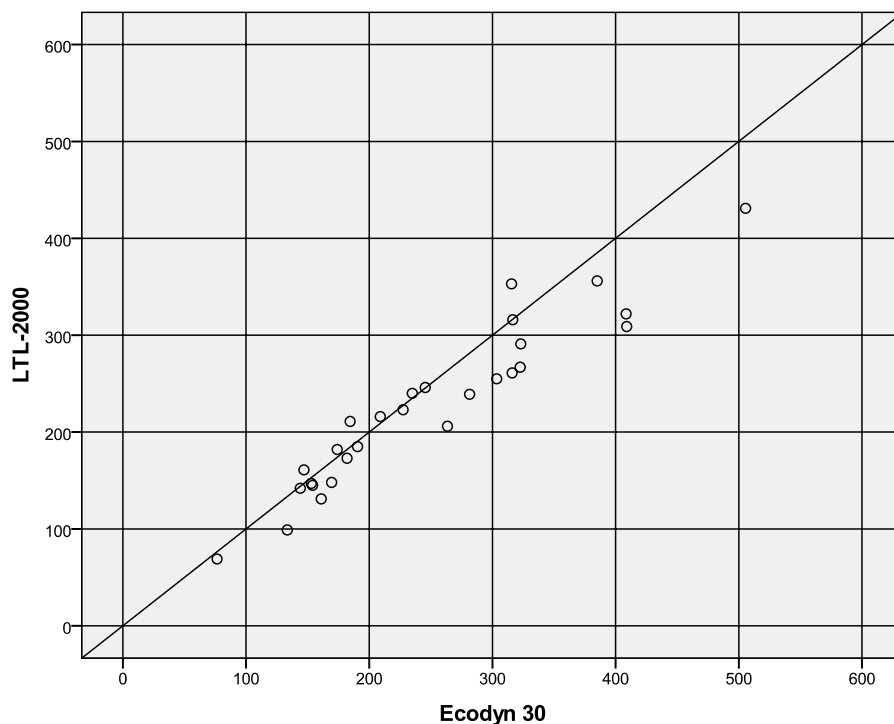


Abb. 5 Beziehung zwischen den Ecodyn 30- und Handmessungen bei 28 Typen von Straßenmarkierungen. Durchschnitt der beiden Messrunden.

Messfehler, Wiederholbarkeit und Korrelation zwischen den Ecodyn 30- und Handmessungen waren:

Systematische Abweichung zwischen den Ecodyn 30- und Handmessungen	10,6%
Zufallsabweichung zwischen den Ecodyn 30- und Handmessungen	12,5%
Wiederholbarkeit – Abweichung zwischen beiden Messrunden bei Verwendung des Ecodyn 30	7,0%
Korrelation zwischen den Ecodyn 30- und Handmessungen	0,964

Die Abweichungen zwischen den mobilen Geräten und dem LTL-2000 sind in Abb. 6 zusammengefasst.

Wie bereits erwähnt, sind die Seitenlinien in Dänemark durchgehend und in Schweden unterbrochen. Deshalb können die o. a. Messabweichungen in diese beiden Typen von Straßenmarkierungen aufgeteilt werden. Dies ist in Abb. 7 für die beiden mobilen Geräte gezeigt.

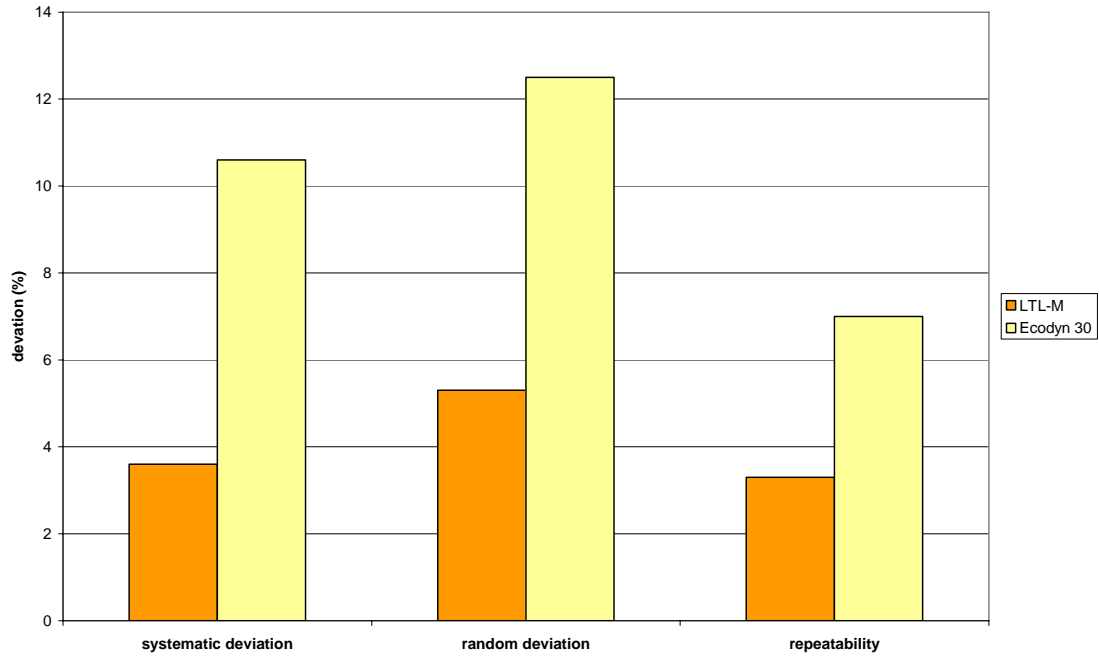


Abb.6 Abweichungen zwischen mobilen und Handgeräten.

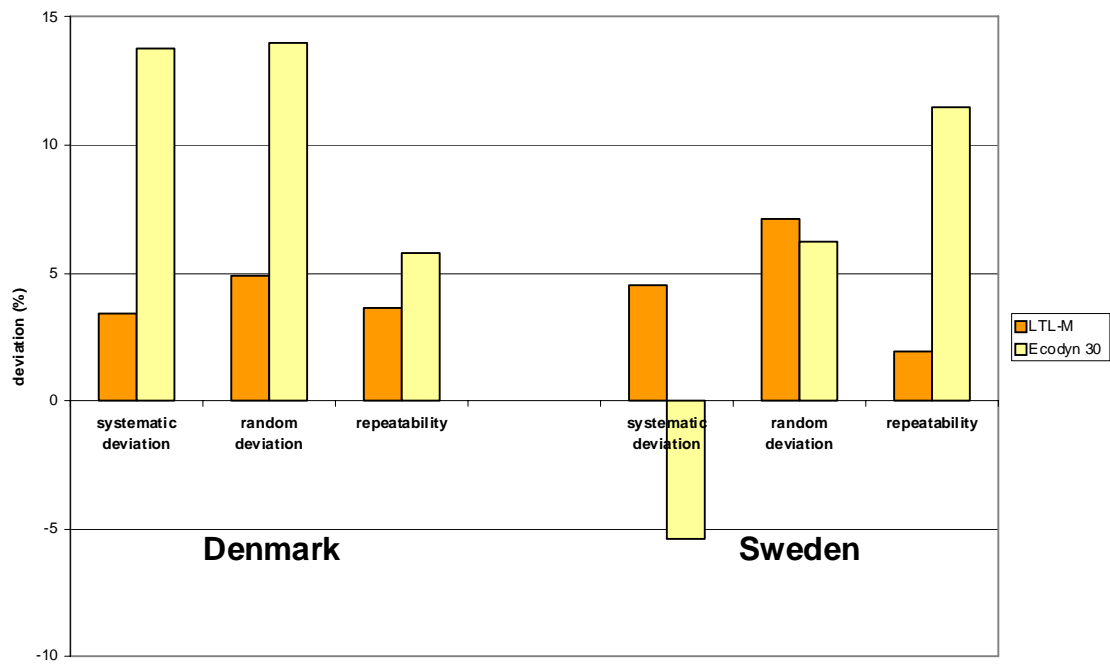


Abb. 7 Abweichung zwischen Messungen der beiden mobilen Geräte und dem Handgerät LTL-2000, aufgeteilt in Ergebnisse für durchgehende Markierungen in Dänemark und unterbrochene in Schweden.

4.3.2 Produktionsmessungen

Wie zuvor erwähnt, hatten die Produktionsmessungen den Hauptzweck, die Eigenschaften der Geräte bei „realen“ Messungen an Straßenabschnitten mit bis zu 10 km Länge zu untersuchen und zu vergleichen. Dieser Teil der Studie zeigte, dass beide Geräte zuverlässig waren. Bei Messungen über eine Straßenlänge von 206 km trat nur ein Fehler auf, eine Fehlfunktion der LTL-M-Software. Diese wurde jedoch schnell erkannt und beseitigt, was bedeuten sollte, dass dieser Fehler nicht wieder auftreten wird. Das Ecodyn 30 funktionierte während der dreitägigen Messungen ohne jeden Fehler.

Es muss angemerkt werden, dass sich das LTL-M noch in der Schlussphase der Entwicklung befindet, während das Ecodyn 30 nach mehreren Jahren auf dem Markt ausgereift ist.

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse der Produktionsmessungen

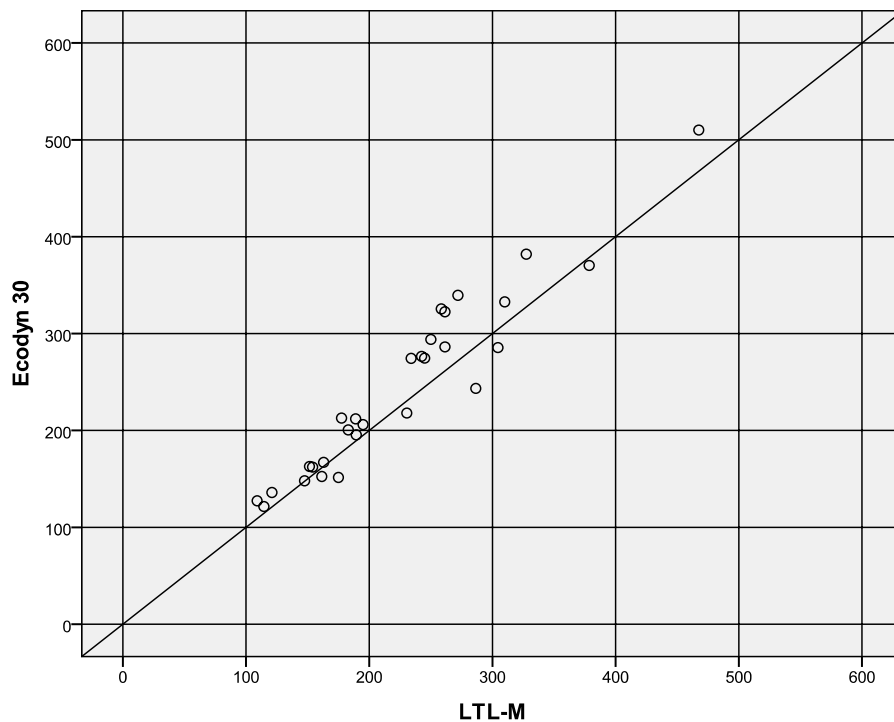


Abb. 8 Beziehung zwischen den Messungen der beiden mobilen Geräte LTL-M und Ecodyn 30. Messungen von 32 Abschnitten mit bis zu 12 km Länge. Durchschnitt der beiden Messrunden.

Es zeigt sich eine Abweichung zwischen den Messungen der beiden Geräte, was nach der Auswertung der Ergebnisse in 4.3.1 zu erwarten war.

5 Diskussion

Die Laborstudie zeigte klar, dass das Messprinzip des LTL-M zuverlässiger als das des Ecodyn 30 ist, weil das LTL-M weniger empfindlich auf Änderungen der Messgeometrie reagiert.

Natürlich waren alle Messungen im Labor statisch und die Änderungen der Geometrie kontrolliert. Bei der Montage an einem fahrenden Fahrzeug ändern sich dagegen viele Parameter auf recht unkontrollierte Weise. Unter Berücksichtigung der Laborergebnisse war die Erkenntnis deshalb nicht erstaunlich, dass die LTL-M-Messungen zuverlässiger als die Ecodyn 30-Messungen waren.

In der zuvor erwähnten Ecodyn 30-Studie aus dem Jahr 2000 wurden auch die Wiederholbarkeit und die Reproduzierbarkeit des LTL-2000 getestet. Die Wiederholbarkeit des LTL-2000 wurde mit 2,4% bewertet, was nur leicht besser als der Wert für das LTL-M von 3,3% ist.

Außerdem wurde festgestellt, dass die Abweichung zwischen den Messungen des LTL-2000 und des LTL-M nur leicht größer als die zwischen zwei Exemplaren des LTL-2000 ist. Dies zeigt, dass das LTL-M fast ebenso genau wie das Handgerät misst. Andererseits sind die Messfehler des Ecodyn 30 klar größer als die des LTL-2000, was auch Bernstein (2000) festgestellt hat.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse allgemein muss berücksichtigt werden, dass wir nicht die absolut richtigen Werte für die Rückstrahlung erhalten haben, weil auch die Handgeräte Messfehler aufweisen. Außerdem ist die gemessene Fläche nicht identisch: Handmessungen erfolgen mit Sampling, wobei etwa alle 5 m eine Messung in der Mitte der Straßenmarkierung erfolgt. Das LTL-M misst dagegen einen R_L -Wert pro Meter, und dieser Wert entspricht einem Durchschnitt der gesamten Markierungsbreite. Dies bedeutet, dass das LTL-M auf einem 200 m langen Abschnitt einer durchgehenden Seitenlinie von 0,10 m Breite fast die gesamte Straßenmarkierungsfläche von 20 m^2 erfasst, während das LTL-2000 einen Durchschnitt von ca. $0,34 \text{ m}^2$ misst, was 1,7% der Gesamtfläche entspricht. Dies kann Einfluss auf den Vergleich der LTL-M- und LTL-2000-Messungen haben. Es soll darauf hingewiesen werden, dass die bei Labormessungen, bei denen die gemessenen Flächen identisch waren, festgestellte systematische Abweichung nur 0,6% betrug.

Der Zuverlässigkeitstest mit einer Messung von über 200 km Länge ergab, dass beide Geräte gut funktionierten. Es trat ein Fehler auf, als die Software des LTL-M abstürzte. Dies war jedoch ein einfacher Fehler, der sofort beseitigt wurde. Darüber hinaus gab es keine Probleme mit den beiden mobilen Geräten.

6 Schlussfolgerung

Das mobile Gerät LTL-M erwies sich als fast ebenso genau wie ein Handgerät, und es misst genauer als eines seiner Mitbewerber, das Ecodyn 30. Der durchgeführte Test war jedoch nur eingeschränkt, und es wäre sehr interessant, mehr als ein Exemplar der fertigen Version des LTL-M zu testen. Schließlich sollte auch ein Vergleich nicht nur mit dem Ecodyn 30, sondern auch mit anderen mobilen Geräten erfolgen. Eine Möglichkeit wäre, dies im Rahmen von CEN TC226/WG2 durchzuführen.

Literatur

Bernstein, H., Evaluation findings of the LTL 2000 Pavement Marking Retro-reflectometer, Highway Innovative Technology Evaluation Center (HITEC), Collage Station, TX, USA, 2000.

European Committee for Standardization, *Road marking Materials – Road marking performance for road users, European Standard EN 1436:2007*, Brüssel, Belgien, 2007.

International Organization for Standardization, *CIE standard illuminants for colorimetry, ISO/CIE 10526:1999*, Genf, Schweiz, 1999.

Lundkvist, S-O., *Evaluation of Ecodyn 30: validation of a mobile instrument for measuring the retroreflection of road markings*, VTI rapport 444A, Linköping, Schweden, 1999.

Lundkvist, S-O., *RMT State of the art measurements. Measurement of road marking performance 2008, App. C* (Schwedisch). Ramböll Report 2009-02-09, Linköping, Schweden, 2009.

Anhang A

Seite 1 (1)

Tabelle A1 Die Rückstrahlung (mcd/m²/lx) eines 200 m langen Testabschnitts. Durchschnitt der beiden Messrunden mit den beiden mobilen Geräten und von 35–40 Messungen mit dem Handgerät LTL-2000.

Testabschnitt	LTL-2000	Ecodyn 30	LTL-M
dk1	239	281,5	221,5
dk2	267	322,5	267,0
dk3	255	303,5	267,5
dk4	291	323,0	294,5
dk7	69	76,5	72,5
dk8	131	161,0	134,5
dk9	173	182,0	190,0
dk10	147	153,0	150,5
dk11	145	154,0	148,5
dk12	142	144,0	140,5
dk13	148	169,5	158,0
dk14	356	385,0	394,0
dk15	99	133,5	97,5
dk17	240	235,0	266,5
dk18	316	316,5	354,0
dk19	246	245,5	263,5
dk20	185	190,5	180,0
dk21	206	263,5	220,0
dk22	261	316,0	254,5
dk23	309	409,0	326,5
dk24	322	408,5	330,5
dk25	431	505,5	425,5
s18	161	147,0	168,0
s19	182	174,0	177,0
s20	216	209,0	208,0
s21	353	315,5	*
s22	211	184,5	231,5
s23	223	227,5	256,0

*nicht gemessen

Anhang B

Seite 1 (1)

Tabelle B1 Die Rückstrahlung (mcd/m²/lx) von Testabschnitten mit 0,1 - 11,7 m Länge. Durchschnitt der beiden Messrunden mit den beiden mobilen Geräten

Testabschnitt	Ecodyn 30	LTL-M
dk1	322,5	261,5
dk2	325,5	258,5
dk3	294,0	250,0
dk4	276,5	242,5
dk5	339,5	272,0
dk7	121,5	114,5
dk8	213,0	177,5
dk9	148,0	147,5
dk10	206,0	195,0
dk11	167,0	163,0
dk12	162,0	154,0
dk13	163,0	151,5
dk14	370,5	378,5
dk15	127,5	109,0
dk17	243,5	286,5
dk18	285,5	304,5
dk19	286,5	261,5
dk20	200,5	183,0
dk21	274,5	234,0
dk22	274,5	245,0
dk23	332,5	310,0
dk24	382,0	327,5
dk25	510,0	467,5
s4	136,0	121,0
s10	199,5	192,0
s18	152,5	161,5
s19	195,5	189,5
s20	212,0	189,0
s21	279,0	*
s22	151,5	175,0
s23	218,0	230,5

*nicht gemessen

VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut som arbetar med forskning och utveckling inom transportsektorn. Vi arbetar med samtliga trafikslag och kärnkompetensen finns inom områdena säkerhet, ekonomi, miljö, trafik- och transportanalys, beteende och samspel mellan människa-fordon-transportsystem samt inom vägkonstruktion, drift och underhåll. VTI är världsledande inom ett flertal områden, till exempel simulatorteknik. VTI har tjänster som sträcker sig från förstudier, oberoende kvalificerade utredningar och expertutlåtanden till projektledning samt forskning och utveckling. Vår tekniska utrustning består bland annat av körsimulatorer för väg- och järnvägstrafik, väglaboratorium, däckprovningsanläggning, krockbanor och mycket mer. Vi kan även erbjuda ett brett utbud av kurser och seminarier inom transportområdet.

VTI is an independent, internationally outstanding research institute which is engaged on research and development in the transport sector. Our work covers all modes, and our core competence is in the fields of safety, economy, environment, traffic and transport analysis, behaviour and the man-vehicle-transport system interaction, and in road design, operation and maintenance. VTI is a world leader in several areas, for instance in simulator technology. VTI provides services ranging from preliminary studies, highlevel independent investigations and expert statements to project management, research and development. Our technical equipment includes driving simulators for road and rail traffic, a road laboratory, a tyre testing facility, crash tracks and a lot more. We can also offer a broad selection of courses and seminars in the field of transport.

