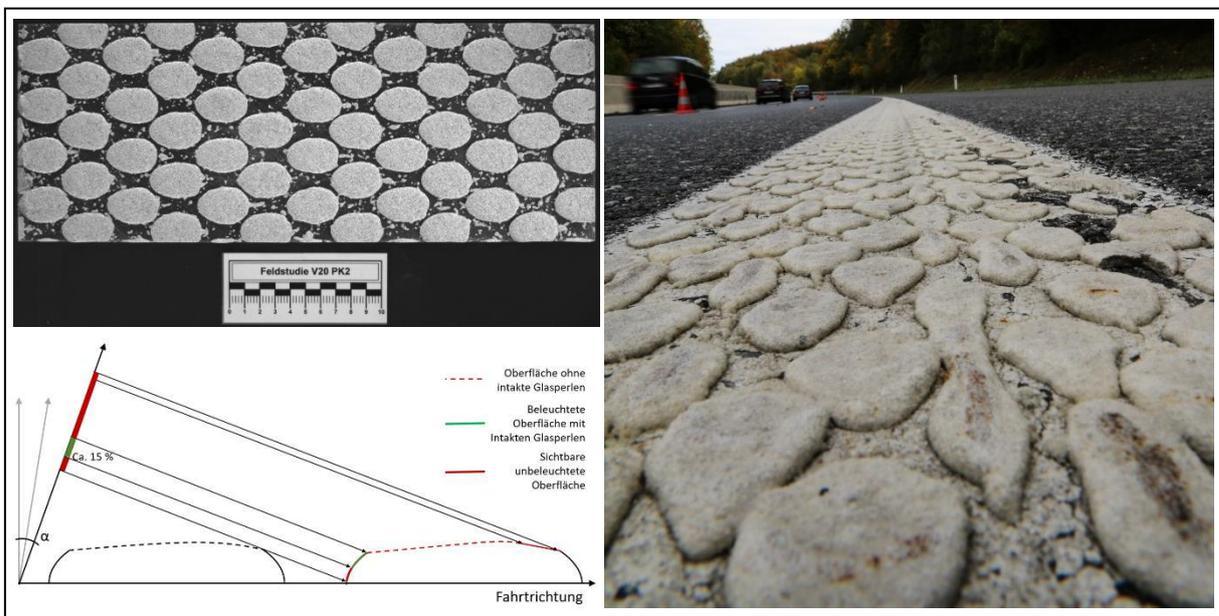


Durable Road Markings for Infrastructure DRM-Infra

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2014
(VIF2014)

Juli 2018



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien

 **Bundesministerium**
Verkehr, Innovation
und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

ISAC GmbH
Pascalstraße 6
52076 Aachen
Deutschland

 **ISAC**
G M B H

Programmmanagement:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Durable Road Markings for Infrastruktur DRM-Infra

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2014)

Autoren:

Dr.-Ing Dirk Kemper
Stefan Biermeier, B.Sc.

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

ISAC GmbH

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Zielsetzung und Methodik des Vorgehens.....	2
1.3 Weitere Forschungsziele dieses Projekts.....	4
1.4 Aufbau des Abschlussberichts	4
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Bodenmarkierungssysteme.....	6
2.1.1 Europäisches Normung EN	8
2.1.2 Österreichische Normung und Regelwerke.....	11
2.1.3 Deutsches Regelwerk.....	16
2.2 Winterdienstsysteme.....	18
2.2.1 Schneepflüge.....	19
2.2.2 Anforderungen an einseitige Schneepflüge.....	20
2.2.3 Zweiseitige Schneepflüge	20
2.2.4 Einseitige Schneepflüge	20
2.2.5 Schürfleisten.....	21
2.2.6 Räumgeschwindigkeit und Überlastsicherung.....	22
2.3 Raytracing für numerische Simulationen	23
2.3.1 Raycasting.....	23
2.3.2 Shading	23
2.3.3 Struktur von Geländedaten	24
2.3.4 Raycasting in einem Höhenfeld	24
2.3.5 Shading in einem Höhenfeld.....	25
2.4 Computerbasierte Umsetzungen.....	25
2.4.1 Physical Model	25
2.4.2 Calibration Model.....	26
2.4.3 Human Performance Model	26
2.5 Bisherige Forschungsprojekte zur Verbesserung der Beständigkeit der Fahrbahnmarkierung gegen die Belastung durch den Winterdienst.....	27

3	Vorstudie	29
3.1	Maschinentechnische Machbarkeit.....	29
3.2	Laborversuchsprogramm	31
3.2.1	Versuchsstand zur Simulation der Schneepflugbelastung.....	31
3.2.2	Belastung Straßenverkehr	35
3.3	Statistische Verfahren zur Auswertung der Versuchsergebnisse.....	36
4	Laborstudie	37
4.1	Ablauf/ Verfahren	37
4.1.1	Ausgangszustand	38
4.1.2	Belastungszustand	41
4.2	Variantenmatrix.....	41
4.3	Ergebnisse der Laborstudie	42
4.3.1	Entwicklung der Tagsichtbarkeit im Labor.....	43
4.3.2	Entwicklung der Nachtsichtbarkeit im Labor.....	43
4.3.3	Auswirkungen der Perlengröße.....	50
5	Feldstudie	53
5.1	Teststrecke und Variantenmatrix.....	53
5.1.1	Teststrecke.....	54
5.1.2	Variantenmatrix	54
5.2	Prüfplan zur Überwachung der Leuchtdichten.....	55
5.3	Ergebnisse der Feldstudie.....	56
5.3.1	Ergebnisse der Leuchtdichtemessung im Feld.....	56
5.3.2	Beobachtungen	62
6	Computergestützte numerische Methode	64
6.1	Aufbau und Entwicklung der Methode	65
6.1.1	Applikationsmodell.....	66
6.1.2	Schneepflugbelastungsmodell	66
6.1.3	Beleuchtungsmodell	68
6.1.4	Fazit aus der numerischen Methode.....	69

7 Bewertung und Empfehlung	71
7.1 Korrelation Feldstudie und Laborstudie	71
7.2 Bewertung.....	76
7.3 Optimierung	78
7.3.1 Symmetrisches Muster	78
7.3.2 Asymmetrisches Muster.....	81
7.4 Fazit und Empfehlung	83
7.4.1 Geometrievariante	83
7.4.2 Applikationsuntergrund	84
7.4.3 Perlenwahl.....	84
7.4.4 Applikationsmuster	85
7.4.5 Fazit.....	86
Literaturverzeichnis.....	87
Anhang	90

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 1

Abbildung 1-1: Flanken- und Kuppenanteil an der Retroreflexion	2
Abbildung 1-2 Konzept zur Untersuchung	3

Kapitel 2

Abbildung 2-1: Q _d -Klassen für Straßenmarkierungen bei Trockenheit (EN 1436, 2007)	9
Abbildung 2-2: R _L -Klassen für Straßenmarkierungen bei Trockenheit (EN 1436, 2007).....	9
Abbildung 2-3: Werte der R _L -Klassen für Straßenmarkierungen bei Feuchtigkeit und Regen (EN 1436, 2007).....	9
Abbildung 2-4: Gewährleistung und Funktionsdauer von Bodenmarkierungen (ONR 22440-1).....	12
Abbildung 2-5: Anforderungen an die Nachtsichtbarkeit nach Art und Farbe der Markierung (ONR 22441).....	13
Abbildung 2-6: Anforderungen an die Nachtsichtbarkeit bei Feuchtigkeit (ONR 22441).....	14
Abbildung 2-7: Anforderungen an die Tagessichtbarkeit nach Farbe und Deckenart (ONR 22441).....	14
Abbildung 2-8: Anforderungen an den Markierungsstoff: Kaltplastikmassen (ONR 22441).....	15
Abbildung 2-9 Mindestwerte des Leuchtdichtkoeffizienten bei diffuser Beleuchtung Q _d (ZTV M 2013).....	16
Abbildung 2-10 Mindestwert der Nachtsichtbarkeit R _L für endgültige Markierungssysteme (ZTV M 2013).....	16
Abbildung 2-11 Mindestwert der Nachtsichtbarkeit R _L für vorübergehende Markierungssysteme (ZTV M 2013).....	17
Abbildung 2-12 Definition des Schürfleistanstellwinkels (links) und des Raumwinkels α (rechts) (Schmidt, 2016)	22
Abbildung 2-13 binäre Suche in einem Höhenfeld (Heightfield) (Dübel 2010)	24
Abbildung 2-14 Geometrien des Physical Modell (CARVE) (Schnell,Zwahlen 2000)	26

Kapitel 3

Abbildung 3-1 Konzept Vorstudie.....	29
Abbildung 3-2 Markierungsmaschine (rechts) und markierte Prüfplatte (links)	30
Abbildung 3-3 Skizze der Versuchsplatte mit Runddots	30
Abbildung 3-4: Variantenmatrix Vorversuchsreihe.....	30
Abbildung 3-5 Ansichten der Maschine von links (links oben), rechts (links unten) und vorne (rechts).....	32
Abbildung 3-6: Schürfleiste Küper Kombi S 50 Wave (Kueper 2016).....	33
Abbildung 3-7: KÜPER Wave S 50 Schürfleiste im Labormaßstab	33
Abbildung 3-8 Seitenansicht der Schürfleiste (Vorversuchsreihe).....	34
Abbildung 3-9 Schürfleiste im System (li) und Nahaufnahme der eingespannten Schürfleiste (re)	35
Abbildung 3-10 Seitenansicht der Schürfleiste (Hauptversuchsreihe).....	35
Abbildung 3-11 Rundlaufprüfanlage der Swarco Limburger Lackfabrik, Diez	36

Kapitel 4

Abbildung 4-1 Konzept Laborstudie	37
Abbildung 4-2 Ablauf Laborstudie	37
Abbildung 4-3: Systematik zur Auswertung der Flächenbedeckung.....	38

Abbildung 4-4: Höhenmessplan mit Messpunkten im Sichtbarkeitsmessbereich (rot) und außerhalb (blau).....	38
Abbildung 4-5 Versuchsbrett zur Trocken- und Nassmessung.....	39
Abbildung 4-6 geschwärtzter Probekörper mit stochastischer Agglomeratmarkierung	40
Abbildung 4-7 Flächenbedeckung, Schichtdicke und Materialverbrauch	42
Abbildung 4-8 Laborergebnisse Tagsichtbarkeit über Gewichtsverlust.....	43
Abbildung 4-9 Geometrievariante Kombination 2 (F20K)	45
Abbildung 4-10 Laborergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Trockenmessung) über Gewichtsverlust	46
Abbildung 4-11 Laborergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Trockenmessung) über Schichtdickenverlust.....	47
Abbildung 4-12 Laborergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Nassmessung) über Gewichtsverlust	48
Abbildung 4-13 Laborergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Nassmessung) über Schichtdickenverlust.....	49
Abbildung 4-14 Vergleich Tagssichtbarkeitswerte Q_D der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung	50
Abbildung 4-15 Vergleich Tagssichtbarkeitswerte Q_D der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung	50
Abbildung 4-16 Vergleich Nachtsichtbarkeitswerte R_L trocken der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung.....	51
Abbildung 4-17 Vergleich der Nachtsichtbarkeitswerte R_L trocken der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung.....	51
Abbildung 4-18 Vergleich der Nachtsichtbarkeitswerte R_L nass der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung.....	52
Abbildung 4-19 Vergleich der Nachtsichtbarkeitswerte R_L nass der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung.....	52

Kapitel 5

Abbildung 5-1 Konzept Feldstudie	53
Abbildung 5-2 Fahrbahnrandmarkierung auf der Teststrecke an Stationierungskilometer 25+750 der A1 in Fahrtrichtung Wien 12.10.2017.....	54
Abbildung 5-3 Variantenmatrix Feldstudie A1	55
Abbildung 5-4: Prüfplan zur Überwachung des Leuchtdichteverlaufs	55
Abbildung 5-5 Durchführung einer Nassmessung auf trockener Fahrbahn.....	56
Abbildung 5-6 Feldmessungsergebnisse Entwicklung der Tagsichtbarkeit.....	59
Abbildung 5-7 Feldmessungsergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Trockenmessung) ..	60
Abbildung 5-8 Feldmessungsergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Nassmessung)	61
Abbildung 5-9 stochastische Feldprobe nach einem Winter Belastung.....	62
Abbildung 5-10 regelmäßige Feldprobe (Pflaumen F20) nach einem Winter einseitiger Belastung	62
Abbildung 5-11 Feldprobe (Kombination 2) nach zwei Winter Belastung.....	62
Abbildung 5-12 komplettes Herausbrechen nach 2 Wintern.....	62
Abbildung 5-13 Probenentnahme.....	63

Kapitel 6

Abbildung 6-1 Beispiel einer numerisch belasteten Probe aus dem Labor	64
Abbildung 6-2 Aufbau der numerischen Methode.....	65

Abbildung 6-3 symmetrisches Applikationsmuster..... 66
Abbildung 6-4 Höhenverlauf der Schneepflugkante..... 66
Abbildung 6-5 Schema Belastung 67
Abbildung 6-6 Korrelation Gewichtsverlust Modell über Labor 67
Abbildung 6-7 Schema Beleuchtung 68
Abbildung 6-8 Schema Sichtbarkeitsanalyse 68
Abbildung 6-9 Korrelation Sichtbarkeitswert Modell über Labor 69
Abbildung 6-10 unsymmetrisches Applikationsmuster..... 70

Kapitel 7

Abbildung 7-1 Konzept Bewertung 71
Abbildung 7-2 Korrelation RL,trocken Labor und Feld unbelastet (li) belastet (re) 72
Abbildung 7-3 Tabellen und Diagramm zur Bestimmung der relevanten Belastungsgröße anhand
der Trockenmessung 73
Abbildung 7-4 Korrelation Trockenmessung Feld- über Labormessergebnisse nach Abtragsgewicht
..... 74
Abbildung 7-5 Korrelation Nassmessung Feld- über Laborergebnisse nach Abtragsgewicht..... 75
Abbildung 7-6 Rangfolge der Geometrievarianten der Feldstudie nach Nachtsichtbarkeit bei Nässe
und Trockenheit 77
Abbildung 7-7 Rangfolge der durch die Nassmessung gewählten Geometrievarianten der Feld- und
Laborstudie nach Nachtsichtbarkeit bei Trockenheit 77
Abbildung 7-8 Ausprägung der Geometrievariation V20 bzw. V10 Pflaumen mit niedriger
Nachtsichtbarkeitswerten 78
Abbildung 7-9 Ausprägung der Geometrievariationen Kombination 2 (Pflaumen + (Erdnüsse)) mit
hoher Nachtsichtbarkeit 78
Abbildung 7-10 Nachtsichtbarkeitswerte des symmetrischem Musters nach zwei Wintern Belastung
..... 79
Abbildung 7-11 symmetrisch applizierte Agglomerate mit kleinem Abstand in Fahrtrichtung (21mm)
..... 80
Abbildung 7-12 symmetrisch applizierte Agglomerate mit mittlerem Abstand (31mm) 80
Abbildung 7-13 symmetrisch applizierte Agglomerate mit großem Abstand (42mm) 81
Abbildung 7-14 Nachtsichtbarkeitswerte des asymmetrischem Musters nach zwei Wintern
Belastung 81
Abbildung 7-15 asymmetrisch applizierte Agglomerate mit kleinem Abstand (77mm) 82
Abbildung 7-16 asymmetrisch applizierte Agglomerate mit großem Abstand (102mm) 82
Abbildung 7-17 asymmetrisch applizierte Agglomerate mit mittlerem Abstand (91mm) 83
Abbildung 7-18 empfohlenes asymmetrisches Applikationsmuster mit der Pflaumenagglomeratform
..... 85
Abbildung 7-19 empfohlenes symmetrisches Applikationsmuster mit Pflaumenagglomeratform ... 85

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Gemäß der Straßenverkehrsordnung (StVO, 1960) können Bodenmarkierungen auf der Straße zur Sicherung, Leitung und Ordnung des fließenden und des ruhenden Verkehrs als Längs- und Quermarkierungen als Richtungspfeile, Schraffen, Schriftzeichen oder Symbole angebracht werden. Fahrbahnmarkierungen sind dabei die hinsichtlich der Sicherung und Ordnung des Verkehrs effektivste Komponente der Straßenausstattung (Reinsberg 2001; Rohrlack 2006).

Insbesondere in Hinblick auf die Sicherung des fließenden Verkehrs sowohl auf der freien Strecke als auch in Baustellen und/oder Gefahrenbereichen sind funktionsfähige, griffige und gut sichtbare Fahrbahnmarkierungen von überaus großer Bedeutung und müssen zu jeder Zeit eine fortlaufende optische Führung des Verkehrsteilnehmers gewährleisten um zu einem leistungsfähigen Verkehrsablauf und einer erhöhten Verkehrssicherheit beizutragen (John 1999; Schönborn 1992; Meseberg 1993; Meseberg 1993; Bruehning 1998, 1998). Des Weiteren übernehmen Fahrbahnmarkierungen eine Warnfunktion und erhöhen die Orientierungsmöglichkeiten im Straßenraum, besonders bei eingeschränkter Sicht durch Dunkelheit oder Nässe (Meseberg 2006).

Die Fahrbahnmarkierung darf in keinem Fall eine Sicherheitsgefahr darstellen. Daher müssen Fahrbahnmarkierungen jederzeit ein Mindestmaß an Griffigkeit und Sichtbarkeit (sowohl Tages- als auch Nachtsichtbarkeit) aufweisen. Bei Tag wird die Sichtbarkeit durch einen starken positiven Kontrast zur Fahrbahnoberfläche, bei Nacht überwiegend durch in die Oberfläche eingearbeitete Reflexkörper hervorgerufen (Rohrlack 2006). Nachtsichtbarkeit und Sichtbarkeit bei Nässe sind dabei die wichtigsten verkehrstechnischen Eigenschaften von Fahrbahnmarkierungen.

Entgegen stehen kontinuierliche Beanspruchungen der Fahrbahnmarkierungen durch die Radüberrollung (Pkw-Überfahrungen) sowie darüberhinausgehende Beanspruchungen beispielsweise durch den Winterdienst. Der Winterdienst, dabei insbesondere das Überfahren der Markierungen mit Schneepflügen, beeinflusst diese Reflexionseigenschaften negativ. Insbesondere die Markierungsglasperlen sind dabei Belastungen ausgesetzt, die ihre Reflexionseigenschaften im Laufe der Zeit verschlechtern und es dem Fahrzeugführer erschweren, die Fahrbahnbegrenzung ausreichend wahrzunehmen. Mit jedem Überfahren der Schürfleiste des Schneepfluges brechen einige der Markierungsglasperlen, sodass das vom Fahrzeug einfallende Scheinwerferlicht nicht mehr in dem vorgesehenen Maße zurückgeworfen wird.

Häufige Markierungsarbeiten zur Sicherstellung der o.g. Anforderungen sind die Folge. Allerdings beeinflusst dies die Verfügbarkeit der Infrastruktur. Staus sowie Reisezeitverluste sind die Folge. In Österreich entstehen alleine durch „Verkehrsstaus“ pro Jahr 6 bis 7 Mrd. Euro volkswirtschaftlicher Schaden. Rechnet man noch die Folgen von vermeidbaren Unfallfällen infolge der Stauerscheinungen dazu, so erreicht man Größenordnungen von 10 Mrd. Euro. Darüber hinaus verursachen Verkehrsstaus infolge Arbeitsstellen kürzerer Dauer, bspw. zur Markierungsapplikation, eine erhebliche Zusatzbelastung der Umwelt durch Schadstoffausstoß stehender Fahrzeuge bzw. durch zusätzliche Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver im Stop&Go Verkehr.

1.2 Zielsetzung und Methodik des Vorgehens

Ziel des Forschungsprojekts „DRM-Infra: Durable Road Markings for Infrastructure“ ist daher die Entwicklung eines Fahrbahnmarkierungssystems mit erhöhter Beständigkeit gegen die mechanische Belastung durch den Winterdienst. Die angestrebte Erhöhung/Verlängerung der Beständigkeit der Fahrbahnmarkierung beziehungsweise der Tages- und Nachtsichtbarkeit und die damit verbundene deutliche Verlängerung der Einsatzzeit stellt dabei neben der Erhöhung der Verkehrssicherheit auch einen wichtigen volkswirtschaftlichen Beitrag dar. Stauerscheinungen infolge Arbeitsstellen kürzerer Dauer zur Markierungsapplikation werden vermieden. Die Sichtbarkeit und Griffigkeit der Fahrbahnmarkierung kann länger aufrechterhalten werden. Die Verkehrssicherheit steigt.

Die Beständigkeit der Tages- und Nachtsichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen ist in diesem Kontext von der Art und Ausführung der Reflexionskörper bzw. -perlen, der Einbettung der Reflexionskörper in das Markierungsmaterial und von der Form beziehungsweise Strukturierung der Markierung abhängig. Insbesondere in Hinblick auf die Beständigkeit der Tages- und Nachtsichtbarkeit gegen Schneeräumung ist die Form/Struktur und Anordnung der Markierungen von erheblichem Interesse.

Diesbezüglich haben sich insbesondere strukturierte Fahrbahnmarkierungen, sogenannte Agglomerate als vorteilhaft erwiesen. Diese Markierungen ermöglichen durch ihre regelmäßige bzw. stochastische Anordnung eine verbesserte Tages- und Nachtsichtbarkeit auch bei nasser Fahrbahnoberfläche. Dies wird durch die Strukturierung der Fahrbahnmarkierung, die eine Einbettung der Reflexionskörper (das heißt der Nachstreumittel, beispielsweise Glas) nicht nur an der Markierungsoberfläche sondern vielmehr auch an der Markierungsflanke in das Markierungsmaterial ermöglicht, realisiert (siehe Abbildung 1-1).

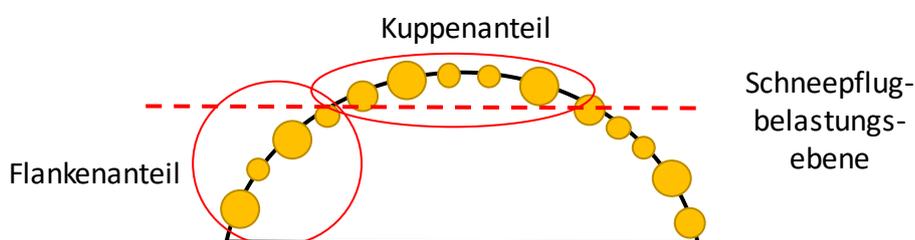


Abbildung 1-1: Flanken- und Kuppenanteil an der Retroreflexion

Darüber hinaus ist durch die spezielle Applikationsform der Agglomerat-Markierung nicht die gesamte Markierungsoberfläche den mechanischen Beanspruchungen infolge Schneeräumung ausgesetzt, sondern vielmehr ist nur eine Teilfläche belastet. Die Vorgehensweise war die gezielte Optimierung der Ausprägung eben dieser nicht durch die mechanische Beanspruchung des Schneepflugs belasteten Fläche. Die Strukturierung, Form und Ausprägung kann durch die gewählte Maschinenteknik gezielt beeinflusst und variiert werden. Die Tages- und Nachtsichtbarkeit und die Dauerhaftigkeit/Beständigkeit der Gebrauchseigenschaften lassen sich so beeinflussen. Berücksichtigt werden soll dabei stets die maschinentechnische Machbarkeit der geometrischen Ausprägung der Agglomeratfahrbahnmarkierungen.

Die Methodik des Vorgehens innerhalb dieses Forschungsprojekts beinhaltet die kombinierte Durchführung einer Labor- und Feldstudie. Das Gesamtkonzept ist in Abbildung 1-2 dargestellt.

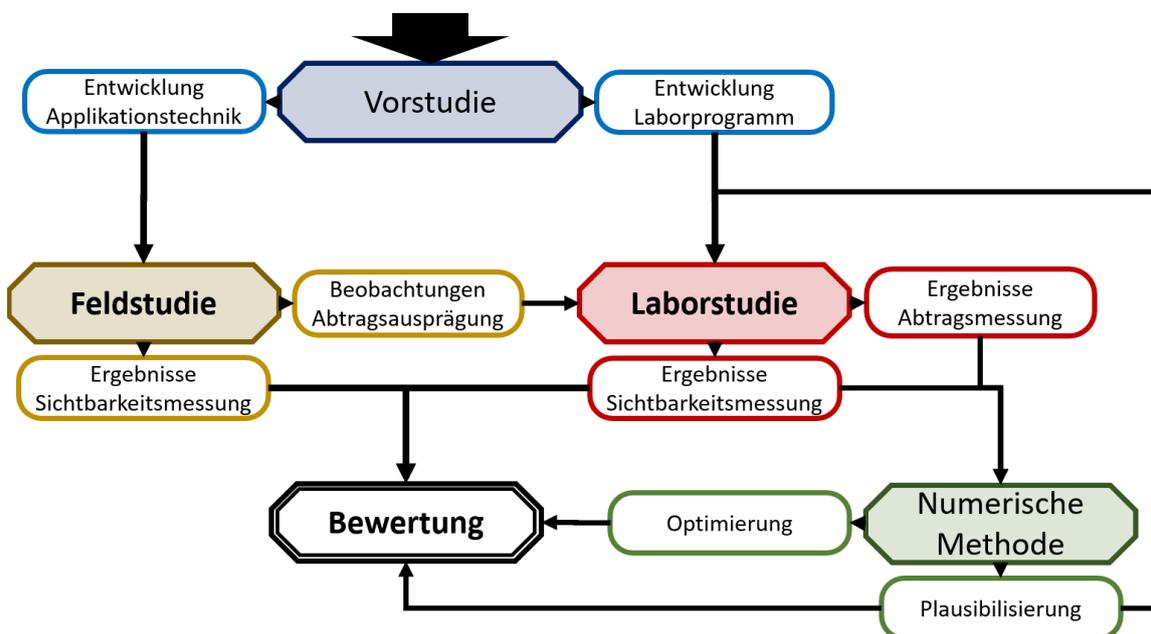


Abbildung 1-2 Konzept zur Untersuchung

Dabei wurde die maschinentechnische Machbarkeit und Möglichkeit der Reproduzierbarkeit diverser Agglomeratstrukturen zunächst in einer Vorstudie beurteilt. Die Vorstudie stellte somit die Grundlage für die Labor- und Feldstudie dar. Die Untersuchung der ersten Probekörper diente sowohl zur Entwicklung des verwendeten Laborverfahrens, als auch zum Erstellen einer Variantenmatrix für die Feldstudie. Hierzu wurden ausgewählte Markierungsvarianten hinsichtlich der Entwicklung ihrer Tag- und Nachtsichtbarkeit auf die Belastung durch Schneepflugüberfahrten getestet.

In der durchgeführten Laborstudie wurde der Versuchsablauf den Erfahrungen und Beobachtungen aus der Vorstudie angepasst. Die entwickelte Methode sieht die Simulation der Belastung und die Messung der Sichtbarkeit vor. Hierbei können sowohl die Ergebnisse der Sichtbarkeitsmessung, als auch die der Abtragsmessungen analysiert werden.

Durch Beobachtungen der parallel durchgeführten Feldstudie auf der Autobahn A1 bei Wien konnte die Simulation des Abtrags in der Laborstudie verbessert werden. Außerdem liefert die Feldmessung Ergebnisse der begleitenden Sichtbarkeitsmessungen. Diese wurden zur Validierung der Sichtbarkeitsergebnisse im Labor genutzt.

Zusätzlich zu den genannten Aspekten wurde ein numerisches Rechenverfahren entwickelt. Dieses erlaubt es auf Basis eines 3-D-Profiles der Fahrbahnmarkierung die Entwicklung der Nachtsichtbarkeit unter der Belastung des Winterdienstes nachvollziehen zu können. Durch eine Simulation von Schneepflugbelastung und Beleuchtung können die komplexen Sichtbarkeitsbeziehungen und Schattenwürfe aufgeschlüsselt werden. Auf Basis dessen soll dann ebenfalls die theoretisch und maschinentechnisch mögliche optimale Markierungsform prognostiziert werden.

1.3 Weitere Forschungsziele dieses Projekts

Mit Hilfe der aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse soll es in Zukunft möglich sein, häufige Reparaturen und Nachbesserungen an Fahrbahnmarkierungen bereits bei der Planung und Sanierung von Straßen durch die Auswahl geeigneter Markierungssysteme zu vermeiden. Dies bringt einerseits für den Betreiber der Straße, der durch die Ausdehnung der Reparaturintervalle finanzielle Ressourcen einspart, als auch für die Verkehrsteilnehmer bedeutende Vorteile mit sich. Diese profitieren davon, dass auch bei schlechten Witterungsbedingungen sowie bei Dunkelheit die Fahrbahnbegrenzung ausreichend erkennbar bleibt.

Eine Übertragbarkeit der Prüfkonstruktion auf weitere Markierungsmaterialien und -varianten ist denkbar. Durch eine Standardisierung der Untersuchung von Fahrbahnmarkierungen hinsichtlich der Winterdienstbeanspruchung ist bei der Planung und dem Betrieb von Straßen in höhergelegenen Regionen sowohl eine Steigerung der Verkehrssicherheit als auch der Kosteneffizienz möglich.

1.4 Aufbau des Abschlussberichts

Der vorliegende Abschlussbericht gliedert sich zunächst in sieben Abschnitte. Nach der bereits in diesem Kapitel begonnenen Einführung in die Thematik folgt im zweiten Kapitel eine ausführliche Literaturrecherche zunächst bezüglich der gültigen Normung und Regelwerke sowohl auf europäischer als auch auf österreichischer und deutscher Ebene sowie bezüglich bisheriger Erkenntnisse im Hinblick auf die Beständigkeit von Fahrbahnmarkierungen gegenüber der mechanischen Belastung insbesondere natürlich durch den Winterdienst. Zusätzlich werden verschiedene Winterdienstverfahren und -geräte vorgestellt, die für die Beanspruchung von Markierungssystemen innerhalb dieser Versuchsreihe relevant sind. An dieser Stelle wird auf Schneepflugvarianten und ihre Eigenschaften eingegangen.

Es erfolgt die Erstellung und Beschreibung einer geeigneten Prüfsystematik zur Untersuchung der Auswirkung von Schneepflugüberfahrten auf ausgewählte Fahrbahnmarkierungen. Die durchgeführten Änderungen an der Prüfsystematik aus der Vorstudie werden durch erlangte Erkenntnisse aus Vor- und Feldstudie begründet. Dieses Kapitel befasst sich auch mit den angewandten Auswertemethoden auch hinsichtlich der statistischen Bewertung der Untersuchungsergebnisse.

Im vierten Kapitel über die Laborstudie werden der Versuchsablauf und die Messmethoden dargestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildungen und Tabellen zusammengefasst. Wichtige Erkenntnisse und herausstechende Messergebnisse werden genannt und analysiert.

Anknüpfend werden die Teststrecke und der Prüfplan der Feldstudie auf der A1 vorgestellt, die mit der Messung im Ende Juni 2018 vervollständigt wurde. Die Ergebnisse der regelmäßig durchgeführten Leuchtdichtemessungen sind dargestellt und werden im Hinblick auf ihre Verwertbarkeit analysiert.

Kapitel 6 gibt Eindrücke in die Entwicklung einer computergestützten numerischen Methode, in der Schneepflugbelastung und Beleuchtung in getrennten Modellen simuliert werden können. Nach einer Korrelation mit den Ergebnissen der Laborstudie wird der Nutzen und der Anwendungsrahmen erläutert.

Die Ergebnisse der Laborstudie, Feldstudie und der numerischen Methode werden am Schluss gemeinsam bewertet. Hierbei wird sowohl eine begründete Rangliste der verschiedenen Agglomeratgeometrien im Hinblick auf ihre Widerstandsfähigkeit gegen die Belastung durch den Winterdienst erstellt, als auch die Aussagekraft der Laborstudie ermittelt. Anhand von Abbildungen von computergenerierten Modellen wird auf die relevanten Phänomene hingewiesen, aus denen sich eine Reihe an Empfehlungen ableiten. Diese richten sich sowohl an zukünftige Forschungsvorhaben als auch an die direkte Anwendung in der Praxis.

2 Stand der Technik

Die Entwicklung einer gegenüber der mechanischen Belastung durch den Winterdienst besonders widerstandsfähigen Fahrbahnmarkierung erfordert zunächst eine Skizzierung der aktuell in der Praxis verwendeten **Bodenmarkierungssysteme**. Markierungssysteme müssen grundsätzlich gewissen Anforderungen entsprechen, damit die verkehrstechnischen Eigenschaften von Fahrbahnmarkierungen gewährleistet werden. Die Auswahl des passenden Markierungssystems ist eine Voraussetzung für eine langanhaltende Funktionstüchtigkeit. Da die Optimierung der Widerstandsfähigkeit wie bereits in Kapitel 1 beschrieben auf Basis des bekannten Wissens im Einsatz mit dem System der Agglomeratfahrbahnmarkierungen, welches in der Schweiz und in Deutschland bereits seit mehreren Jahren erfolgreich eingesetzt wird, stattfinden soll, wird im Rahmen dieses Kapitels neben der Darlegung der europäischen Regelwerke sowie österreichischer Ergänzungen auch insbesondere auf den in Deutschland bereits erworbenen Wissensstand eingegangen. Die dort gültigen Normen und Vorschriften sowie Ausführungshinweise sollen im Anschluss noch einmal in die für Österreich geltenden Vorschriften eingeordnet werden.

Zusätzlich soll alsdann auch der Stand der Technik bezüglich eingesetzter **Winterdienstsysteme** vorgestellt werden, der zum einen zur Abschätzung der eingetragenen Belastung und zum anderen für die Entwicklung des Laborprüfverfahrens zur Schneepflugbelastung dienen soll.

2.1 Bodenmarkierungssysteme

Bodenmarkierungen, auch Fahrbahnmarkierungen oder Straßenmarkierungen genannt, sind gemäß Abschnitt IV der StVO §55 Einrichtungen zur Sicherung, Leitung und Ordnung des fließenden und des ruhenden Verkehrs.

Bodenmarkierungen sind daher ein wichtiger Bestandteil der modernen Straßenausstattung. Sie sind ein wesentliches Element der Verkehrsregelung und der Verkehrsführung und dienen der Sicherheit im Straßenverkehr (Reinsberg 2001). Sie begrenzen die Fahrbahn nach außen, trennen einzelne Fahrstreifen voneinander und geben zudem Informationen wie den weiteren Straßenverlauf oder die zulässige Höchstgeschwindigkeit an den Fahrzeugführer weiter.

Dabei können Sie ihre Aufgabe in vollem Umfang nur gerecht werden, wenn die für den Anwendungsfall und die bevorstehende Belastung korrekt ausgewählten Materialien verwendet werden, diese richtig appliziert wurden und ihre Funktionstüchtigkeit über die gesamte Lebensdauer mit Hilfe eines geeigneten Systems der Überprüfung sichergestellt wird (Reinsberg 2001).

Wie bereits zuvor erwähnt soll im Rahmen dieses Kapitels zunächst der Stand der Technik bezüglich der europäischen Normung unter Einbezug der in Österreich und Deutschland geltenden ergänzenden Regelungen dargestellt werden. Eine Übersicht dessen gibt die Aufzählung auf der nächsten Seite:

- EN 1436: Straßenmarkierungsmaterialien - Anforderungen an Markierungen auf Straßen
- EN 1790: Straßenmarkierungsmaterialien – Vorgefertigte Markierungen
- EN 1423: Straßenmarkierungsmaterialien – Nachstreumittel – Markierungs-Glasperlen, Griffigkeitsmittel und Nachstreugemische
- EN 1424: Straßenmarkierungsmaterialien – Premixglasperlen
- EN 13197: Straßenmarkierungsmaterialien – Verschleißsimulator
- EN 1824: Straßenmarkierungsmaterialien – Feldprüfungen
- EN 1871: Straßenmarkierungsmaterialien – Markierungsfarben, Kaltplastikmassen und Heißplastikmassen - Physikalische Eigenschaften
- EN 12802: Straßenmarkierungsmaterialien – Laborverfahren für die Identifikation
- ONR 22440-1: Bodenmarkierungen Funktionsdauer – Teil 1: Allgemeines
- ONR 22440-2: Bodenmarkierungen Funktionsdauer – Teil 2: Ortsgebiet
- ONR 22441: Richtlinien zur Spezifikation von Bodenmarkierungen und Bodenmarkierungsmaterial
- ÖNORM B 2440: Bodenmarkierungen – Anforderungen an das Material und dessen Aufbringung
- BGBl. Nr. 848/1995: Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über Bodenmarkierungen (Bodenmarkierungsverordnung)
- RVS 05.03.11: Ausbildung und Anwendung von Bodenmarkierungen. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr
- RVS 05.03.12: Auswahl von Bodenmarkierungen. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr
- RVS 08.23.11: Bodenmarkierungsarbeiten und zugehöriges Arbeitspapier Nr. 23 Checkliste für die Ausführung von Bodenmarkierungsarbeiten. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr
- TL M 2006: Technische Lieferbedingungen für Straßenmarkierungsmaterialien. Herausgegeben durch den Arbeitsausschuss Fahrbahnmarkierungen der Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV)
- ZTV M 2013: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen. Herausgegeben durch den Arbeitsausschuss Straßenmarkierungen der Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV)
- Merkblatt für Agglomeratfahrbahnmarkierungen: Herausgegeben von der Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)

Aus der Vielzahl an Regelwerken kann dabei der im Folgenden dargelegte Stand der Technik abgeleitet werden.

2.1.1 Europäisches Normung EN

Einen ersten Überblick über die Eigenschaften sowie zu erfüllenden Anforderungen der Straßenmarkierung gibt die EN 1436. Darin werden Straßenmarkierungen wie folgt beschrieben: „Straßenmarkierungen bilden gemeinsam mit Straßenmarkierungsknöpfen die horizontalen Signaleinrichtungen auf Straßen. Straßenmarkierungen umfassen dabei Längsmarkierungen, Pfeile, Quermarkierungen, Texte und Symbole auf der Straßendecke. Straßenmarkierungen können durch das Aufbringen von Farbe, Heiß- und Kaltplastikmassen sowie durch vorgefertigte Linien und Symbole oder weitere Mittel hergestellt werden. Die meisten Straßenmarkierungen sind weiß oder gelb; in bestimmten Fällen werden jedoch auch andere Farben verwendet. Straßenmarkierungen sind entweder dauerhaft oder vorübergehend. Straßenmarkierungen können mit oder ohne Zusatz von Markierungs-Glasperlen ausgeführt werden. Bei Verwendung von Glasperlen kommt es zur Retroreflexion der Markierung, wenn diese durch Fahrzeugscheinwerfer angeleuchtet wird. Durch besondere Eigenschaften der Markierung lässt sich deren Retroreflexion bei Nässe oder Regen verbessern. Solche Eigenschaften lassen sich durch eine spezielle Oberflächenstruktur (z. B. profilierte Markierungen), große Markierungs-Glasperlen oder weitere Hilfsmittel erreichen.“ (EN 1436, 2007)

Somit kann eine erste Einteilung der Straßenmarkierungsmaterialien wie folgt geschehen:

- Materialien
 - Farbe
 - Heißplastiken
 - Kaltplastiken
 - Vorgefertigte Systeme
- Farben
 - Weiß
 - Gelb
- Haltbarkeit
 - Dauerhaft
 - Vorübergehend
- Ausführung mit/ohne Verwendung von Glasperlen

Über die Einteilung und Definition der Fahrbahnmarkierung hinaus beinhaltet die EN 1436 auch die einzuhaltenden Anforderungen an

- Sichtbarkeit bei Tageslicht oder Beleuchtung
- die notwendigen Retroreflexionseigenschaften bei trockenen wie auch bei nassen Fahrbahnbedingungen sowie
- die erforderliche Griffigkeit und
- die Farbe.

Die Anforderungen an diese Kennwerte werden durch die Einteilung in Klassen realisiert, sodass den verschiedenen Kennwerten in Abhängigkeit der Umstände eine unterschiedliche Gewichtung zukommen gelassen werden kann. Dabei werden an die Sichtbarkeit bei Tageslicht nur Anforderungen im trockenen Fahrbahnzustand gestellt während für die Nachtsichtbarkeit (Retroreflexion) sowohl Werte im trockenen wie auch im feuchten Zustand einzuhalten sind.

Der Sichtbarkeit bei Tageslicht sowie die Retroreflexionseigenschaften werden dabei über den Leuchtdichtkoeffizienten Q_d bzw. R_L mit der Einheit [$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$] Anforderungen zugeordnet, die über das in EN 1436, Anhang A beschriebene Verfahren ermittelt werden müssen. Die Griffigkeit wird anhand von SRT-Werten spezifiziert, die Farbe anhand von Normfarbewertanteilen.

Die einzuhaltenden Grenzwerte die auch für dieses Forschungsprojekt Zwangspunkte darstellen finden sich in untenstehenden Abbildungen Abbildung 2-1 bis Abbildung 2-3.

Farbe der Straßenmarkierung	Art der Straßendecke	Klasse	Mindestwert für den Leuchtdichtkoeffizienten bei diffuser Beleuchtung Q_d in $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$
Weiß	Asphalt	Q0	keine Anforderung
		Q2	$Q_d \geq 100$
		Q3	$Q_d \geq 130$
		Q4	$Q_d \geq 160$
	Zementbeton	Q0	keine Anforderung
		Q3	$Q_d \geq 130$
Gelb		Q0	keine Anforderung
		Q1	$Q_d \geq 80$
		Q2	$Q_d \geq 100$
		Q3	$Q_d \geq 130$

ANMERKUNG Die Klasse Q0 ist für den Fall vorgesehen, dass die Tagessichtbarkeit durch den Leuchtdichtfaktor β bestimmt wird, siehe 4.2.3.

Abbildung 2-1: Q_d -Klassen für Straßenmarkierungen bei Trockenheit (EN 1436, 2007)

Art und Farbe der Straßenmarkierung		Klasse	Mindestwert für den Leuchtdichtkoeffizienten bei Retroreflexion R_L in $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$
Dauerhaft	Weiß	R0	keine Anforderung
		R2	$R_L \geq 100$
		R3	$R_L \geq 150$
		R4	$R_L \geq 200$
		R5	$R_L \geq 300$
	Gelb	R0	keine Anforderung
		R1	$R_L \geq 80$
		R3	$R_L \geq 150$
		R4	$R_L \geq 200$
Vorübergehend		R0	keine Anforderung
		R3	$R_L \geq 150$
		R5	$R_L \geq 300$

Die Klasse R0 ist für den Fall vorgesehen, dass die Sichtbarkeit der Straßenmarkierung auch ohne Retroreflexion durch Anleuchtung mit Fahrzeugscheinwerfern erreicht wird.

Abbildung 2-2: R_L -Klassen für Straßenmarkierungen bei Trockenheit (EN 1436, 2007)

Bedingungen bei Feuchtigkeit	Klasse	Mindestwert für den Leuchtdichtkoeffizienten bei Retroreflexion R_L in $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$
Messung 1 min nach Befeuchtung der Oberfläche nach B.6	RW0	keine Anforderung
	RW1	$R_L \geq 25$
	RW2	$R_L \geq 35$
	RW3	$R_L \geq 50$
	RW4	$R_L \geq 75$

Die Klasse RW0 ist für die Fälle gedacht, bei denen dieser Retroreflexionstyp nicht aus ökonomischen oder technischen Gründen gefordert ist.

Abbildung 2-3: Werte der R_L -Klassen für Straßenmarkierungen bei Feuchtigkeit und Regen (EN 1436, 2007)

Eine weitere Spezifizierung hinsichtlich der notwendigen und einzuhaltenden Eigenschaften differenziert nach gelben, weißen, vorübergehenden oder dauerhaften Markierungen enthält die EN 1436 nicht.

Weitere Anforderungen hinsichtlich physikalischer Eigenschaften hingegen definieren EN 1871 sowie prEN 1871, EN 1790 und EN 12802. Darin werden diverse Anforderungen an das zu verwendende Material aus Markierungsfarbe, Heiß- und Kaltplastikmassen gestellt, welche sich insbesondere auf deren physikalische Anforderungen hinsichtlich Deckvermögen, Lagerbeständigkeit, Alterung durch UV-Bestrahlung, Alkali- und Wärmebeständigkeit sowie Abriebfestigkeit beziehen. Diese Kennwerte sind selbstverständlich für das im Rahmen dieses Projekts eingesetzte Markierungssystem einzuhalten, spielen jedoch für die inhaltliche Fragestellung der geometrischen Optimierung nur eine untergeordnete Rolle.

Hinsichtlich des Einsatzes von Nachstreumitteln und Glasperlen reglementieren die EN 1423 sowie die EN 1424 weiterhin. Dabei beinhaltet die EN 1423 Hinweise zu Nachstreumitteln im Grundsätzlichen. Diese können weiterhin differenziert werden in:

- Glasperlen und
- Griffigkeitsmittel

Glasperlen sind nach Definition der EN 1423 „transparente, kugelige Glaskörper, die zur Gewährleistung der Nachtsichtbarkeit der Straßenmarkierungen durch Retroreflexion des einfallenden Scheinwerferstrahles eines Fahrzeugs zum Fahrer angewendet werden“. Griffigkeitsmittel sind entsprechend „harte Körner, natürlichen oder künstlichen Ursprungs, um die Griffigkeitseigenschaften der Straßenmarkierungen sicherzustellen“.

Anforderungen an Glasperlen werden hinsichtlich der folgenden Kenngrößen gestellt:

- Korngrößenverteilung
- Brechungsindex
- Widerstandsfähigkeit gegen Wasser und Chemikalien
- Mögliche Oberflächenbeschichtungen

Insbesondere die Zulässigkeit verschiedener Oberflächenbeschichtungen sowie ein hoher Brechungsindex scheint für das vorliegende Forschungsprojekt von Relevanz. So dürfen feuchtigkeitsabweisende-, Flotations- sowie Adhäsionsbeschichtungen zum Einsatz kommen.

An verwendete Griffigkeitsmittel werden Anforderungen hinsichtlich chemischer Merkmale, Farbe und Leuchtdichtefaktor und Korngrößenverteilung gestellt.

Gemische aus Griffigkeitsmitteln und Glasperlen sind ebenfalls zulässig.

EN 1424 reglementiert hingegen sogenannte Premixglasperlen. Per Definition der Norm sind Premixglasperlen „transparente, kugelige Glaskörper, die zur Gewährleistung der Nachtsichtbarkeit der Straßenmarkierungen durch Retroreflexion des einfallenden Scheinwerferstrahles eines Fahrzeuges zum Fahrer angewendet werden. Diese Materialien werden während der Herstellung in Anstrichstoffe, Thermoplastikmassen, Kaltplastikmassen und andere Markierungsprodukte eingemischt, die im flüssigen Zustand auf die Straßenoberfläche aufgetragen werden“. Hinsichtlich der Qualitätsanforderungen gelten dieselben Anforderungskategorien wie für nachgestreute Glasperlen.

Während die Prüfung der Leuchtdichteigenschaften wie bereits zuvor erwähnt in EN 1436 beschrieben wird, beinhaltet EN 10297 die Prüfung der Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung mit dem sogenannten Verschleißsimulator. Die sogenannte Rundlaufprüfanlage ist letztendlich eine sich drehende Scheibe welche unter einem in Bezug auf den Ort festen Reifen bewegt wird darstellt.

Die bisher beschriebenen europäischen Normen werden letztlich ergänzt, durch die EN 1824 in denen das vorgeschriebene Verfahren für die Feldprüfung von Straßenmarkierungsmaterialien dargelegt wird. Auch auf diese Norm soll später im Rahmen der Überlegungen für die Feldstudie und –prüfungen erneut eingegangen werden.

Wie sich aus den bisherigen Erkenntnissen schließen lässt und bereits durch die Übersicht der Normen und Regelwerke zu Beginn dieses Kapitels angedeutet wurde, lässt die europäische Normung den Spielraum für Ergänzungen. Dieser wird sowohl durch die österreichische Normung und das österreichische Regelwerk aber auch durch deutsche Regelwerke ausgenutzt. Ihre Inhalte sollen in den folgenden beiden Abschnitten 2.1.2 und 2.1.3 wiedergegeben werden.

2.1.2 Österreichische Normung und Regelwerke

Ähnlich den EN 1436 gibt die Bodenmarkierungsverordnung (ONR 22441) grundsätzliche Definitionen und Beschreibungen zu Bodenmarkierungen. So heißt es in §2 der Verordnung:

- (1) Bodenmarkierungen sind in weißer, blauer oder gelber Farbe durch Beschichten, durch Aufbringen von vorgefertigten Materialien, durch den Einbau von Kunst- oder Natursteinen oder von Formstücken, durch Aufbringen oder Einsetzen von Straßenknöpfen u. dgl. darzustellen.
- (2) Bodenmarkierungen sind, wenn es die Verkehrssicherheit erfordert, rückstrahlend auszuführen. Das ist insbesondere bei Straßen der Fall, die mit einer Geschwindigkeit von mehr als 50 km/h befahren werden dürfen oder keine während der Dunkelheit dauernd in Betrieb stehende Straßenbeleuchtung aufweisen.
- (3) Bodenmarkierungen müssen einen Reibungsbeiwert haben, der annähernd dem der betreffenden Fahrbahn entspricht.

Weitere in Bezug auf das Projekt relevante Informationen ergeben aus der Definition von Leitlinien, Sperrlinien, Rand- und Begrenzungslinien sowie deren erforderlicher Breite, welche für hochbelastete Autobahnen mit mindestens 15 cm angegeben sind.

Bezüglich der Anforderungen an das aufgebrachte Material von Fahrbahnmarkierungen gibt zunächst die ÖNORM B 2440 Hinweise. Diese Norm ergänzt insbesondere die Regelwerke EN 1871, prEN 1871, EN 1790 und EN 12802 und verweist ebenfalls auf die bereits durch EN 1436 gestellten Anforderungen.

Angaben zur Festlegung der Funktionsdauer entsprechend dem angestrebten Verwendungszweck, welche für die Zuordnung der Grenzwerte aus EN 1436 notwendig ist geben ONR 22440-1 und ONR 22440-2. Zur Festlegung der Funktionsdauer fließen unter anderem folgende Faktoren ein:

- Verkehrsdichte
- Fahrstreifenbreiten
- Art der Markierung in Bezug auf ihre Funktion
- Lage der Markierung
- Umwelteinflüsse

Durch ein Punktsystem werden die einzelnen Faktoren in ihren Ausprägungen gewichtet, sodass sich letztlich durch die Addition der Einzelpunkte eine Gesamtpunktzahl, die alsdann einer Verwendungsgruppe gemäß ONR 22440-1 entspricht.

Unmittelbar aus der Einordnung des Straßenabschnitts in eine Verwendungsgruppe ergibt sich dann in Abstimmung mit der Markierungsstoffklasse sowie weiteren Einflüssen aus Belagsart, Umwelteinflüssen und dem vorhandenen Untergrund die vorzugebende Funktionsdauer, welche unmittelbar einhergeht mit dem Ende der Gewährleistungsfrist (siehe Abbildung 2-4).

Markierungsstoffklasse	Verwendungsgruppe	Funktionsdauer	Ende der Gewährleistungsfrist
A	1	12	31.3. des Folgejahres
B	1	24	31.3. des zweiten Jahres
	2	12	31.3. des Folgejahres
C	2	24	31.3. des zweiten Jahres
	3	12	31.3. des Folgejahres
D	2	48 ^a	31.3. des vierten Jahres
	3	36 ^a	31.3. des dritten Jahres
	4	24	31.3. des zweiten Jahres

^a Ausgenommen Nachsichtbarkeit ab dem 24. Monat

Abbildung 2-4: Gewährleistung und Funktionsdauer von Bodenmarkierungen (ONR 22440-1)

Zusätzlich wird der Hinweis gegeben, dass mit dem Ende der Gewährleistungsfrist mindestens 85 % der insgesamt aufgetragenen und mindestens 70 % jeder Einzelfläche der Markierung vorhanden sein müssen.

Aus Teil 2 der ONR 22440 lassen sich in Ergänzung zu den Ausführungen der EN 1436 ebenfalls weitere Markierungsarten ableiten. Es wird unterschieden zwischen:

- Provisorischen Markierungen: Markierungen in Baustellen, auf neuen Belägen oder kurzfristige Auffrischungen
- Regenerierungsmarkierungen: Markierungen zur Erneuerung der Tages- und Nachsichtbarkeit sowie der Griffbarkeit, wenn die vorhandene Markierung noch zu 80 % vorhanden ist
- Erneuerungsmarkierungen: Markierungen gleich den Regenerierungsmarkierungen wobei die alte Markierung zu weniger als 80 % vorhanden ist
- Neumarkierungen: Markierungen die erstmalig auf die Straßenoberfläche aufgebracht werden

Im Falle des vorliegenden Forschungsprojekts sind dabei insbesondere Regenerierungs- und Erneuerungsmarkierungen sowie Neumarkierungen relevant, da es sich bei den im Projekt behandelten Agglomeratfahrbahnmarkierungen um endgültige Markierungen handelt.

Gegenüber der EN 1436 wird innerhalb dieses Regelwerks auch erstmals auf notwendige und zugelassene Schichtdicken eingegangen. So sind für Regenerierungsmarkierungen Trockenschichtdicken von 0,4 bis 0,9 mm aufzutragen während für Erneuerungsmarkierungen Schichtdicken im Trockenzustand zwischen 0,6 und 2,0 mm zulässig sind. Gleiches gilt für Neumarkierungen.

Vergleicht man diese Schichtdicken mit typischen Schichtdicken von Agglomeratfahrbahnmarkierungen in der Schweiz oder in Deutschland so ist bereits hier ein möglicher Konflikt

erkennbar. Sofern für die im Rahmen dieses Projekts entwickelte geometrisch optimale Lösung eine Schichtdicke > 2,0 mm erfordert, so ist bereits an dieser Stelle über eine Ergänzung im entsprechenden Regelwerk nachzudenken.

Neben der erstmaligen Einführung der Anforderung an die Schichtdicken finden sich in ONR 22440-2 auch ergänzende und erweiternde Anforderungen an die Tages- und Nachsichtbarkeit von Bodenmarkierungen sowohl im Neuzustand als auch bis zum Ende der Funktionsdauer. Der Neuzustand beschreibt dabei denjenigen Zeitabschnitt von Aufbringung der Markierung bis hin zu zwei Monaten Liegedauer.

Im Einzelnen werden von **ONR 22440-2** an dauerhafte Markierung folgende Anforderungen gestellt:

- **Nachtsichtbarkeit bei Trockenheit**
 - Anfangswert:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 200 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (R 4)
 - bis zum Ende der Funktionsdauer:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 100 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (R 2)
- **Nachtsichtbarkeit bei Feuchtigkeit**
 - Anfangswert:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 35 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (RW 2)
 - bis zum Ende der Funktionsdauer:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 25 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (RW 1)
- **Tagsichtbarkeit**
 - $Q_d \geq 100 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (Q 2)
bis zum Ende der Funktionsdauer

Gegenüber den Anforderungen an Tages- und Nachsichtbarkeit aus EN 1436 sowie ONR 22440 ergeben sich aus ONR 22441 noch einmal weitere Spezifikationen, welche eine weitere Einteilung in Klassen vornehmen.

Hinsichtlich der Nachsichtbarkeit ergeben sich somit die in den Abbildungen Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 stehenden Klassen und Anforderungen.

Art und Farbe der Markierung		Klasse	Rückstrahlwert R_L in $\text{mcd} \times \text{m}^{-2} \times \text{lx}^{-1}$	Prüfverfahren gemäß
dauerhaft	Weiß	R 2 ^a R 4 ^b	$R_L \geq 100$ $R_L \geq 200$	ÖNORM EN 1436
	Gelb	R 1	$R_L \geq 80$	ÖNORM EN 1436
temporär	Orange	R 3	$R_L \geq 150$	ÖNORM EN 1436
	Weiß und gelb			ÖNORM EN 1436
^a Für Markierungen der Markierstoffklasse D darf auch die in Anhang A beschriebene Prüfmethode verwendet werden. ^b Klasse R 4 gilt für Markierungen der Markierstoffklassen A, B und C im Neuzustand innerhalb des 7. und 28. Tages nach Aufbringung.				

Abbildung 2-5: Anforderungen an die Nachsichtbarkeit nach Art und Farbe der Markierung (ONR 22441)

Bedingung bei Feuchtigkeit	Klasse	Rückstrahlwert R_L in $\text{mcd} \times \text{m}^{-2} \times \text{lx}^{-1}$	Prüfverfahren ^a gemäß
Messung 1 Minute nach Benässung der Oberfläche mit Wasser	RW 2 ^{b, c}	$R_L \geq 35$	ÖNORM EN 1436
	RW 1 ^b	$R_L \geq 25$	
^a Klasse RW 2 gilt nur für Bodenmarkierungen, die speziell für die Nachtsichtbarkeit bei Feuchtigkeit ausgelegt sind. ^b Die Messstelle sollte so gewählt werden, dass kein stehender Wasserfilm (Pfütze) die Beurteilung verfälscht. ^c im Neuzustand innerhalb des 7. und des 28. Tages nach Aufbringung			

Abbildung 2-6: Anforderungen an die Nachtsichtbarkeit bei Feuchtigkeit (ONR 22441)

Farbe der Markierung	Deckenart	Klasse für Leuchtdichtekoeffizient Q_d^a	Rückstrahlwert R_L in $\text{mcd} \times \text{m}^{-2} \times \text{lx}^{-1}$	Klasse für Leuchtdichtefaktor β	Leuchtdichtefaktor	Prüfverfahren gemäß
Dauerhaft						
Weiß	Asphalt	Q 2	$Q_d \geq 100$	B 2	$\beta \geq 0,30$	ÖNORM EN 1436
	Beton	Q 3	$Q_d \geq 130$	B 3	$\beta \geq 0,40$	ÖNORM EN 1436
Gelb	Asphalt/Beton	Q 2	$Q_d \geq 100$	B 1	$\beta \geq 0,20$	ÖNORM EN 1436
Blau	Asphalt/Beton	–	–	B 1	$\beta \geq 0,20$	ÖNORM EN 1436
Grün	Asphalt/Beton	–	–	–	$\beta \geq 0,15$	ÖNORM EN 1436
Rot	Asphalt/Beton	–	–	–	$\beta \geq 0,12$	ÖNORM EN 1436
temporär						
Orange	Asphalt/Beton	Q 2	$Q_d \geq 100$	–	$\beta \geq 0,10$	ÖNORM EN 1436
Weiß	Asphalt/Beton	Q 2	$Q_d \geq 100$	B 6	$\beta \geq 0,70$	ÖNORM EN 1436
Gelb	Asphalt/Beton	Q 2	$Q_d \geq 100$	B 3	$\beta \geq 0,40$	ÖNORM EN 1436
^a Für die Beurteilung von strukturierten Bodenmarkierungen mit erhöhter Nachtsichtbarkeit bei Nässe darf nur der Leuchtdichtekoeffizient Q_d angewandt werden.						

Abbildung 2-7: Anforderungen an die Tagessichtbarkeit nach Farbe und Deckenart (ONR 22441)

Hinsichtlich der Griffigkeit wird gegenüber EN 1436 nur der SRT-Wert ≥ 45 , der die Klasse S1 repräsentiert, vorgeschlagen. Die Beurteilung des Farbtons erfolgt auch hier mit Hilfe einer Normfarbtafel und zugehörigen x- und y-Farbanteilen.

Weiterhin projektrelevant sind die sich in diesem Regelwerk zu findenden wesentlichen Anforderungen an Kaltplastikmassen, aus denen die hier verwendete Agglomeratfahrbahnmarkierung bestehen wird (siehe Abbildung 2-8).

Eigenschaft	Anforderungsklasse und Einheit	Prüfverfahren gemäß	Eigenüberwachung	Fremdüberwachung, Freigabeproofung
Tagessichtbarkeit	– weiß, LF 6, $\beta \geq 0,80$ – gelb, LF 2, $\beta \geq 0,50$ – blau, $\beta \geq 0,20$ – orange, $\beta \geq 0,10$	ÖNORM EN 1871	+	+
Farbe	Normfarbwert-Anteile x und y gemäß Tabelle 5	ÖNORM EN 1438 ÖNORM EN 1871	–	+
Deckvermögen	weiß $\geq 95\%$ gelb $\geq 90\%$	ÖNORM EN 1871 oder ÖNORM EN ISO 2814	–	+
Lagerbeständigkeit	\geq Note 4	ÖNORM EN 1871	–	+
Beständigkeit gegen Durchschlagen	weiß und gelb BR 2, $\Delta \beta \leq 0,05$	ÖNORM EN 1871	–	+
Alkalibeständigkeit	nach ÖNORM EN 1871	ÖNORM EN 1871	–	+
Zeitdauer bis zur Befahrbarkeit	≤ 30 min	ASTM D 711	+	+
Viskosität	Sollwert $\pm 20\%$	nach Angabe des Herstellers	+	+
Dichte	Sollwert $\pm 0,1$ g/ml	ÖNORM EN ISO 2811 (alle Teile)	+	+
Festkörperanteil	$\geq 75\%$ der Masse	ÖNORM EN 12802	+	+
Bindemittelanteil	$\pm 3\%$ der Masse nach Herstellerangabe	ÖNORM EN 12802	+	+
Pigment- und Füllstoffanteil	$\pm 3\%$ der Masse nach Herstellerangabe	Anhang B	+	+
Bindemitteltyp	Vergleichsspektrum	ÖNORM EN 12802	–	+
Titandioxidanteil	$\pm 1\%$ der Masse nach Herstellerangabe	Anhang C	–	+
Bleigehalt	$\leq 0,25\%$ der Masse	ISO 6503	–	+
chemische Analyse der Lösemittel	aromatische Kohlenwasserstoffe $\leq 1\%$ der Masse halogenierte Kohlenwasserstoffe $\leq 0,05\%$ der Masse Benzol $\leq 0,1\%$ der Masse organische Lösemittel in wasserverdünnbaren Bodenmarkierungen $\leq 5\%$ der Masse	Anhang D	alle 100 t, jedoch mindestens 1 x jährlich	+

Abbildung 2-8: Anforderungen an den Markierungsstoff: Kaltplastikmassen (ONR 22441)

Letztlich wird in diesem Regelwerk dann auch in Ergänzung zu EN 1824 die Feldprüfung von Bodenmarkierungen spezifiziert sowie der Ablauf der Einsatzfreigabe festgelegt. Auch darauf soll später im Rahmen der Beschreibung der Vorbereitung der Feldstudie (Kapitel 5) erneut eingegangen werden.

Letztlich können dann weitere Hinweise zu Bodenmarkierungen aus den drei oben genannten RVS abgeleitet werden. Diese dienen in Ihrem Zweck als Grundlage für die Ausschreibung und stellen in diesem Sinne einen technischen Mindeststandard dar.

Die RVS 08.23.11 hingegen regeln die Ausführung von Bodenmarkierungsarbeiten. Unter anderem wird beschrieben, wie die Oberfläche auszusehen hat, welche Anforderungen an die Verwendung von Markierungsmaterialien gestellt werden dürfen, welche Eignungsnachweise anzufordern sind und welche Anforderungen an das Markierungsbild gestellt werden dürfen. Außerdem werden Hinweise zur Überprüfung von Bodenmarkierung und zum Arbeitsablauf gegeben.

Überschaut man resümierend noch einmal die geltenden europäischen und österreichischen Regelwerke in Bezug auf den im Rahmen dieses Projekts verfolgten Ansatz der geometrischen Optimierung von Agglomeratfahrbahnmarkierungen, so wird schnell deutlich, dass für die Anwendung dieser Markierungsart bisher keine Regelungen getroffen wurden. Daher soll dieser Teil des Stands der Technik und die im Rahmen diverser Versuche bisher erlangten und dokumentierten Erkenntnisse aus dem deutschen Regelwerk bezogen werden.

2.1.3 Deutsches Regelwerk

Ähnlich wie die ONR in Österreich regeln in Deutschland die „Technischen Lieferbedingungen für Straßenmarkierungsmaterialien“ [TL M] sowie die „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen“ [ZTV M] die zu stellenden Anforderungen an Straßenmarkierungen. Während sich die TL M insbesondere mit der Vorgabe der Materialien und Definitionen befassen geben die ZTV M ähnlich der oben erläuterten europäischen Normen wie auch die ONR 22441 Begriffsbestimmungen hinsichtlich verschiedener Markierungssysteme, Anforderungen an die Sichtbarkeit, Hinweise zur Auswahl von Markierungssystemen, Ausführungsdetails, Prüfungen sowie Mängelansprüche, Abrechnung und Abzüge an.

Insbesondere wird in der ZTV M zwischen Neu- und Gebrauchszustand unterschieden. In den Abbildungen 2-9 bis 2-11 werden diese abhängig von Zustand (neu, gebraucht) dargestellt. Vorübergehende Markierungen haben eigene Grenzwerte (ZTV M, 2013).

endgültige Markierungen	Neuzustand		Gebrauchszustand	
	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$	Klasse	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$	Klasse
	160	Q 4	130	Q 3
vorübergehende Markierungen	Neu- und Gebrauchszustand			
	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$		Klasse	
	100		Q 2	

Abbildung 2-9 Mindestwerte des Leuchtdichtekoeffizienten bei diffuser Beleuchtung Q_d (ZTV M 2013)

Markierungsart	Markierungssysteme des Typs I und II, trocken			
	Neuzustand		Gebrauchszustand	
	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$	Klasse	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$	Klasse
Folien	300	R 5	150	R 3
übrige	200	R 4	100	R 2
Markierungssysteme des Typs II, feucht				
Folien	75	RW 4	35	RW 2
übrige	50	RW 3	25	RW 1

Abbildung 2-10 Mindestwert der Nachsichtbarkeit R_L für endgültige Markierungssysteme (ZTV M 2013)

Zeitpunkt der Messung nach der Applikation	Markierungssysteme des Typs I und II, trocken		Markierungssysteme des Typs II, feucht	
	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$	Klasse	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$	Klasse
bis 90 Tage	200	R 4	50	RW 3
von 91 Tagen bis 120 Tage	150	R 3	35	RW 2
ab 121 Tage	100	R 2	25	RW 1

Abbildung 2-11 Mindestwert der Nachtsichtbarkeit R_L für vorübergehende Markierungssysteme (ZTV M 2013)

Im Einzelnen werden von der **ZTV M** an dauerhafte Markierung folgende Anforderungen gestellt:

- **Nachtsichtbarkeit bei Trockenheit**
 - Anfangswert:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 200 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (R 4)
 - bis zum Ende der Funktionsdauer:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 100 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (R 2)
- **Nachtsichtbarkeit bei Feuchtigkeit**
 - Anfangswert:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 50 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (RW 3)
 - bis zum Ende der Funktionsdauer:
Nachtsichtbarkeit $R_L \geq 25 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (RW 1)
- **Tagsichtbarkeit**
 - Anfangswert:
Tagsichtbarkeit $Q_d \geq 160 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (Q 4)
 - bis zum Ende der Funktionsdauer:
Tagsichtbarkeit $Q_d \geq 130 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (Q 3)

Ergänzend zu den bisher aufgeführten Erkenntnissen sei an dieser Stelle insbesondere der Stand der Technik in Bezug auf Agglomeratfahrbahnmarkierungen dargestellt. Diese sind gemäß ZTV M Markierungssysteme des Typs II mit besonders hoher Retroreflexion. Agglomerate sind demnach „grobstrukturierte, aus Einzelteilen bestehende Fahrbahnmarkierungen. Sie werden aus regelmäßig oder unregelmäßig angeordneten unterschiedlichen Markierungsstoffen und den zugehörigen Beistoffen hergestellt. Sie können mit oder ohne vollflächige Unterlegung (Grundstrich) appliziert werden. Die Flächenbedeckung soll bei senkrechter Betrachtung im Neuzustand mindestens 60 % betragen. Agglomeratmarkierungen müssen aus der Perspektive eines Lkw-Fahrers (ca. 2,20 m Augenhöhe) bei 30 m Beobachtungsentfernung vollflächig gesehen werden“. Hinsichtlich der Griffbarkeit, welche in der Regel auf unregelmäßigen Flächen wie diese von Agglomeratmarkierungen dargestellt werden, nicht mit dem SRT-Pendel erfasst werden kann, lässt die ZTV M die Klasse S0 aus EN 1436 zu.

Hinsichtlich der Schichtdicken wird in Bezug auf Agglomeratmarkierungen durch die ZTV M gänzlich auf deren Angabe verzichtet. Stattdessen heißt es: „Bei Agglomeratmarkierungen ist anstelle der Mindestschichtdicke die Mindestmaterialmenge, gemessen ohne Nachstreumittel, maßgeblich. Eine Materialmenge von 2,2 kg/m² darf nicht unterschritten werden“. Als maximale Schichtdicke werden 7 mm angegeben.

In Bezug auf den Widerstand gegen mechanische Beanspruchung verweist die ZTV M ebenfalls auf den möglicherweise erhöhten Widerstand gerade in Bezug auf den Winterdiensteseinsatz mit Schneepflügen.

Weiteres Verständnis gibt das „Merkblatt für Agglomeratmarkierungen“ [M Agglo]. Betont werden insbesondere die hohe Drainagefähigkeit sowie die erhöhte Nachtsichtbarkeit. Als nachteilig werden unter anderem die möglicherweise erhöhte Geräusentwicklung und die Verschmutzung innerhalb selten befahrener Bereiche ausgewiesen. Hinsichtlich der Anforderungen an den Untergrund weist das M Agglo den Einsatz auf allen auch für gewöhnliche Fahrbahnmarkierungen geeigneten Untergründen als geeignet aus. Dennoch sind Untergründe gegebenenfalls vorzubehandeln.

Hinsichtlich der Applikationsverfahren empfiehlt das Merkblatt folgende vier Verfahren:

- Druckluftgesteuerte Verfahren
- Lochblech/Lochwalzenverfahren
- Schleuderspachteltechnik mit/ohne Vorspanntechnik
- Stachelwalzenverfahren

Als notwendige Prüfungen gibt das Merkblatt die Materialmenge, die Strichbreite sowie die Flächenbedeckung insbesondere aus.

Bezüglich der Haltbarkeit dickschichtiger Markierungssysteme weist der „Leitfaden Fahrbahnmarkierung“ (Leitfaden Markierung) eine Dauer von 4 bis 6 Jahren aus.

2.2 Winterdienstsysteme

Als Winterdienst wird die Gesamtheit aller Maßnahmen zum Sicherstellen von Verkehrssicherheit, Mobilität und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes im Winter bezeichnet (EN 15144, 2007). Aus diesem Grund ist der Winterdienst grundlegend notwendig für die Sicherstellung der Befahrbarkeit von Straßen. Er ist notwendig um im Winter einen möglichst reibungslosen Verkehrsablauf gewährleisten zu können. Übernommen wird der Winterdienst auf österreichischen Autobahnen im Normalfall von der ASFINAG Service GmbH, die ihn von ihren Bau- und Betriebshöfen an den Autobahnen aus tätigt.

Dabei gelten in Bezug auf den Winterdienst insbesondere folgende Regelwerke:

- RVS 12.04.11 Winterdienst Allgemeines
- RVS 12.04.12 Schneeräumung und Streuung
- RVS 12.04.16 Streumittel

Die Bestandteile des Winterdienstes lassen sich in die **Schneeräumung** und die **Streuung** einteilen. Unterschieden wird weiterhin zwischen einer Schneeräumung mit Hilfe von Schneepflügen und Schneefräsen oder anderen Geräten, sowie einer Bekämpfung von Glätte durch den Einsatz von Streumitteln wie Salze (RVS 12.04.12). Da das Augenmerk dieses Projekts auf der Untersuchung und Abschätzung der Auswirkungen des Winterdienstes auf Fahrbahnmarkierungssysteme liegt, deren Widerstandsfähigkeit gegen Salze, Wasser und Laugen bereits untersucht und nachgewiesen wurde, befasst sich der folgende Abschnitt mit der Darstellung von Schneepflügen und deren Charakteristika.

Zunächst sollen allerdings die Anforderungen an die Schneeräumung gemäß RVS 12.04.12 vorgestellt werden.

Die RVS 12.04.12 ist für die Schneeräumung und Streuung auf Bundes-, Landes- und Gemeindestraßen mit öffentlichem Verkehr das verbindliche Regelwerk. Die Anforderungen an die Schneeräumung entsprechen dabei allen notwendigen Erfordernissen zur Ermöglichung der Befahrbarkeit des Straßennetzes. Um die Ausprägung des Winterdiensteinsatzes zu bestimmen werden Straßen in Winterdienstkategorien eingeordnet, mit denen Bedienungsanforderungen einhergehen.

Hinsichtlich der Schneeräummaßnahmen ist insbesondere der Punkt „Räumgeräte“ für das vorliegende Forschungsprojekt relevant und soll daher im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.2.1 Schneepflüge

Schneepflüge sind „Maschinen mit denen Schnee mit Hilfe einer Pflugschar von Verkehrsflächen geschoben werden kann“ (EN 13021, 2009). Sie sind im Winterdienst nach Streumaschinen die am häufigsten eingesetzten Maschinen um die Funktionsfähigkeit von Straßen aufrechtzuerhalten.

Die RVS 12.04.12 beschreibt Schneepflüge wie folgt: „Durch Schneepflüge wird der Schnee von der zu räumenden Verkehrsfläche angehoben und zur Seite geschoben bzw. geworfen. Das Abheben erfolgt mechanisch mit einer Schürfleiste, Pflugmessern und dergleichen. Der seitliche Auswurf hängt von der Pflugform, dem Schwenkwinkel, der Räumgeschwindigkeit und der Schneebeschaffenheit ab“.

Im Straßenwinterdienst kommen überwiegend folgende Schneepflüge zum Einsatz:

- Seitenschneepflüge
- Seitenflügel-Schneepflüge
- Keilschneepflüge
- Variopflüge (RVS 12.04.12)

Angebracht werden können sie sowohl an der Vorderseite des Fahrzeugs **als Frontschneepflug** als auch seitlich als sogenannter **Seitenschneepflug**. Zur Vergrößerung der Räumbreite ist eine Schneepflugverbreiterung möglich (EN 15144, 2007). Geometrisch wird zwischen ein- und zweiseitigen Schneepflügen unterschieden. Während bei zweiseitigen Schneepflügen der Schnee während der Fahrt zu beiden Seiten der Fahrbahn geräumt wird, werfen einseitige Pflüge den Schnee nur in eine Richtung, die vorher durch die Ausrichtung des Schneepfluges bestimmt wird.

Aufgebaut sind Schneepflüge meist nach demselben Schema, allerdings weichen die genauen Dimensionen zwischen den einzelnen Herstellern voneinander ab. Mit Hilfe einer meist hydraulisch gesteuerten Hub- und Senkvorrichtung werden die Schneepflüge am Fahrzeug befestigt. An ihr befindet sich die Pflugschar, die den Schnee von der Fahrbahn räumt. Sie lässt sich hydraulisch nach links und rechts ausrichten, um damit die Wurfrichtung des Schnees festzulegen. An der Unterseite der Pflugschar ist die Schürfleiste montiert. Sie ist der einzige Teil des Schneepfluges, der direkten Kontakt mit der Fahrbahn hat und dadurch ein wichtiger Faktor sowohl für die Räumqualität als auch für eine möglichst geringe Belastung der Fahrbahn und der Fahrbahnmarkierung während des Räumvorgangs. Betrieben werden Schneepflüge meist in zwei Stellungen. In der **Schwimmstellung** liegt der Schneepflug mit seinem gesamten Gewicht auf der Verkehrsfläche auf und folgt

ihren Konturen. In der **entlasteten Schwimmstellung** liegt der Pflug nur mit einem definierten Teil des Gesamtgewichts auf der Verkehrsfläche auf. Das schont die Fahrbahn, die Markierung und die Schürfleisten des Pfluges (EN 15144, 2007).

2.2.2 Anforderungen an einseitige Schneepflüge

Beim Betrieb von einseitigen Schneepflügen werden an diese zahlreiche Anforderungen gestellt. So müssen Schneepflüge über eine Ausrüstung zur Minderung des Stoßes verfügen, der beim Anfahren an aus der Verkehrsfläche herausragende Hindernisse entsteht. Um dies zu gewährleisten gibt es verschiedene Möglichkeiten.

- Sollbruchstellen
- Ausklinkeinrichtungen für die Pflugscharsegmente
- Federbelastete Klappen an der Pflugschar
- Aufhängung der Pflugschar an elastischen Lenkern
- Hydraulische Systeme

Maßgebend für die Funktionsfähigkeit jeder dieser Einrichtungen ist das sichere Auslösen beim Anfahren an ein 50 mm hohes Hindernis bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 40 km/h. Räumt ein Schneepflug mit mehr als 40 km/h muss er entweder bauartbedingt oder durch Anbringung einer zusätzlichen Einrichtung über einen Schneestaubschutz verfügen (EN 13021, 2009).

2.2.3 Zweiseitige Schneepflüge

Zweiseitige Schneepflüge werden keilförmig gebaut und räumen den Schnee zu beiden Seiten der Fahrbahn. Angewendet werden sie zur Räumung von Fahrbahnen bei relativ großen Schneehöhen und großen Wurfweiten. Jedoch besteht bei ihrem Einsatz ein großes Risiko der Beschädigung von Pflug, Fahrzeug und Fahrbahn insbesondere beim Anfahren an Bodenunebenheiten (FGSV 390/11a).

2.2.4 Einseitige Schneepflüge

Bei einseitigen Schneepflügen unterscheidet man zwischen Einschar- und Mehrscharpflügen. Der Einscharpflug eignet sich zur Räumung von ebenen Verkehrsflächen ohne vorstehende Hindernisse wie zum Beispiel Kanaldeckel. Er zeichnet sich vor allem durch seine einfache und unkomplizierte Wartung, sein geringes Gewicht und seine günstige Anschaffung aus. Jedoch sind bei Hindernissen größere Beschädigungen an Pflug, Fahrzeug und Verkehrsfläche möglich.

Der Einscharpflug kann in drei Varianten eingesetzt werden. Zur Räumung von Geh- und Radwegen eignet sich der Einscharpflug ohne Scherbolzen. Er wird meist an kleinere Fahrzeuge wie Kommunaltraktoren oder handgeführte Motorpflüge montiert. Einscharpflüge mit Scherbolzen können zur Räumung ebener Verkehrsflächen eingesetzt werden. Hierbei funktioniert der Scherbolzen als Sollbruchstelle, die beim Anfahren an ein Hindernis den Pflug nach vorne kippen lässt. Anschließend muss der Scherbolzen jedoch erneuert werden. Bei der Räumung von Neuschnee kann außerdem der Federklappenpflug eingesetzt werden. Bei gering hervorstehenden Hindernissen federt der Pflug zurück, was eine Beschädigung vermeidet. Allerdings ist er deswegen ungeeignet zur Beseitigung von festgefahretem Schnee, da er nicht auf die Fahrbahn gepresst werden darf (FGSV 390/11a).

Den Mehrscharpflug gibt es in vier verschiedenen Bauformen. Als Scherbolzenpflug ist er vor allem zur Räumung von ebenen Verkehrsflächen geeignet. Das Prinzip ist identisch

zum Scherbolzenpflug als Einschar, jedoch löst beim Mehrscharpflug nur das betroffene Segment aus und muss anschließend erneuert werden. Zur Räumung von Verkehrsflächen mit vorstehenden Hindernissen kommen sowohl der Stahlfederpflug als auch der Elastikpflug in Betracht. Beim Stahlfederpflug weicht beim Anfahren an ein Hindernis nur das betroffene Segment nach hinten aus und kehrt anschließend wieder in die Ausgangsstellung zurück. Seine Konstruktion enthält bauartbedingt viele bewegliche Teile, was eine Wartung des Pfluges sehr aufwendig gestaltet. Auch beim Elastikpflug weicht nur das betroffene Segment dem Hindernis aus, jedoch handelt es sich hierbei um eine wesentlich einfachere Konstruktion. Dies hat zur Folge, dass der Elastikpflug ungeeignet für Einsätze bei hartem Schnee ist. Ist die Fahrbahn von weichem Schnee bzw. Schneematsch bedeckt kann außerdem der Einsatz eines Matschpfluges in Betracht gezogen werden. Er verursacht weniger Lärmemissionen als die vorherigen Varianten und beansprucht die Fahrbahndecke wesentlich weniger. Allerdings ist auch er für den Einsatz bei hartem Schnee und Eis ungeeignet (FGSV 390/11a).

2.2.5 Schürfleisten

Die Schürfleisten bilden denjenigen Teil eines Schneepfluges, der direkten Kontakt zur Fahrbahn hat. In der RVS 12.04.12 heißt es: „Die Schürfleisten müssen aus einem entsprechend verschleißfesten Material (Stahl, Hartmetall, Kunststoff, Gummi oder Kombinationen aus den genannten Materialien) bestehen. Schürfleisten sind Verschleißteile und müssen leicht wechselbar sein“. Daher gelten an sie besondere Anforderungen, um eine Beschädigung der Fahrbahndecke zu vermeiden und um einem übermäßigen Verschleiß der Schürfleiste vorzubeugen. Neben einem geringen Schubwiderstand ist vor allem eine hohe Standzeit der Leisten von großer Bedeutung. Außerdem ist bei der Auswahl der Materialien darauf zu achten, dass an der Schürfleiste keine scharfen Späne entstehen (FGSV 337/5, 1997). Gängige Materialien für Schürfleisten sind unter anderem:

- Stahl
 - Hohe Standzeit
 - Aggressive Räumung
- Gummi
 - Geräuscharme und schonende Räumung
 - Geeignet für empfindliche Beläge und Kopfsteinpflaster
- Gummi-Korund
 - Gummi mit eingebettetem Korund und eingelassenem Stahleinsatz
 - Verbesserte Gleiteigenschaften und höhere Laufruhe
 - Höhere Standzeiten als Vollgummi und PU-Schürfleisten
- Gummi-Gewebe
 - Zäh, reißfest und widerstandsfähig
 - Sehr elastisch
 - Schonende und dennoch standfeste Alternative
 - Geeignet für unebenen Untergrund und Kopfsteinpflaster
- Elastomer
 - Speziell für Kleingeräte entwickelt
- PU
 - High-Tech-Kunststoff

- Äußerst flexibel und stoßabsorbierend
- Sehr schonend und geräuscharm
- Gut geeignet für Kopfsteinpflaster
- Ursprünglich aus der Flugfeldräumung
- Kombination
 - Verbundmaterial aus Stahl, Gummi und Korund
 - Aggressive Räumung
 - Hohe Standzeit und geringer Kraftstoffverbrauch
 - Gute Gleiteigenschaften (Mutter-Solutions)

Um einen reibungslosen Einsatz der Schneepflüge zu gewährleisten, muss ein einfaches und leichtes Wechseln der Schürfleisten bei gleichzeitig zuverlässiger Befestigung am Pflug möglich sein (RVS 12.04.12). Zwischen den einzelnen Modellen und Herstellern bestehen unterschiedliche Räumwinkel des gesamten Pfluges sowie Schürfleistenanstellwinkel. Gängige Schürfleistenanstellwinkel sind etwa 21° oder 25° , bei manchen Modellen jedoch auch Varianten mit nur 9° oder bis zu 30° . Der Bereich des Räumwinkels reicht bei einigen Modellen von 30° bis hin zu 40° (Schmidt, 2016)

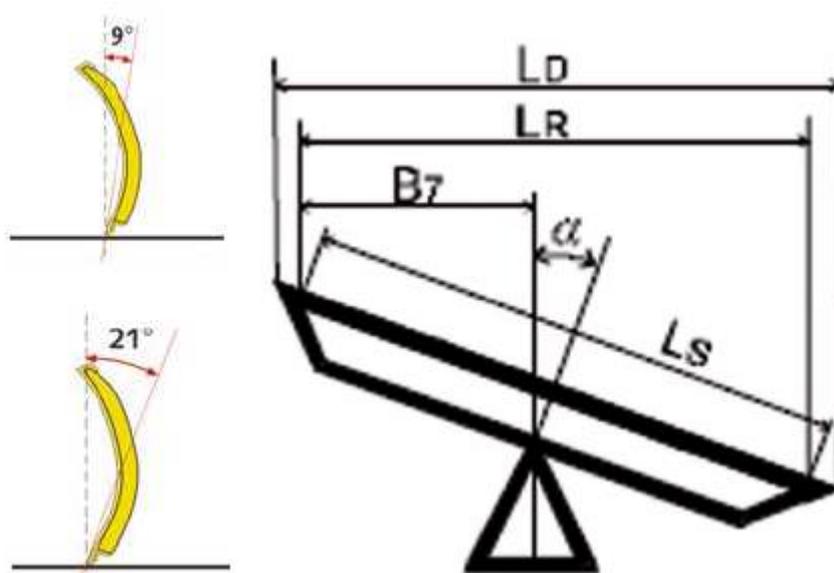


Abbildung 2-12 Definition des Schürfleistenanstellwinkels (links) und des Raumwinkels α (rechts) (Schmidt, 2016)

2.2.6 Räumgeschwindigkeit und Überlastsicherung

„Um den Auflagedruck des Schneepfluges auf die Verkehrsfläche variabel einstellen zu können, kann eine Pflugentlastung vorgesehen werden. Der Auflagedruck soll damit gegenüber dem Eigengewicht definiert verringert werden“ (FGSV 337/5, 1997). Dadurch wird sichergestellt, dass eine Anpassung des Pfluges an die Querneigung und das Querprofil der Verkehrsfläche möglich ist. Des Weiteren kann so ein Räumen bis auf die Fahrbahndecke, das sogenannte Schwarz-räumen, ermöglicht werden.

Zudem müssen Schneepflüge mit einer Überlastsicherung ausgerüstet sein. Diese muss so wirken, „dass bei Räumgeschwindigkeiten bis 40 km/h beim Anfahren an Hindernisse, die bis 100 mm Höhe aus der Fahrbahn herausragen, am Pflug weder Deformationen noch

Funktionsstörungen auftreten“. Darüber hinaus muss eine Räumgeschwindigkeit bis 60 km/h möglich sein (FGSV 337/5, 1997).

2.3 Raytracing für numerische Simulationen

„Für die optische Wahrnehmung muss Licht auf das Auge treffen. Dieses wird dabei auf dem Weg von der Lichtquelle in den Raum von Objekten gebrochen, diffus reflektiert und gespiegelt. So kann das Gehirn ein Bild aus dem Licht, welches auf die Netzhaut trifft, generieren. Beim Raytracing wird der umgekehrte Weg gegangen.“ (Dübel 2010) Raytracing oder auch Strahlenverfolgung findet häufig in der Computergrafik Anwendung. Mit zwei Methoden werden Sichtbarkeits- und Beleuchtungsbeziehungen ermittelt.

2.3.1 Raycasting

Das heißt die Lichtstrahlen werden nicht von der Lichtquelle, sondern von der Bildebene aus verfolgt. Die sichtbaren Punkte im Raum werden als Schnittpunkte der Normalen der Bildebene und der Oberflächen der Objekte im Raum ermittelt. Die Normalen werden als Primärstrahlen bezeichnet. Dabei entspricht die Anzahl an berechneten Primärstrahlen der Anzahl der Pixel und wird auch als Auflösung bezeichnet. Wird ein Strahl gebrochen, wird er in der neuen Richtung weiterverfolgt bis er auf das nächste Objekt trifft. Diese Sichtbarkeitsberechnung wird auch als Raycasting bezeichnet. (Appel 1968; Dübel 2010)

2.3.2 Shading

Die Farbe und die Helligkeit des Pixels wird dann über die sogenannte Beleuchtungsbeziehung oder auch Shading bzw. Schattierung ermittelt werden. Hierfür werden die Strahlen aus dem Raycasting vom Schnitt mit der Objektoberfläche zu allen Lichtquellen weiterverfolgt. Diese Strahlen werden als Schattenstrahl bezeichnet. Wird hierbei ein weiteres Objekt geschnitten, liegt der Punkt im Schatten der Lichtquelle. Mit den Informationen über die Oberflächenart, die Einfall- und Ausfallwinkel und die Lichtstärken der Lichtquellen kann eine Aussage über die Farbe und Helligkeit des Pixels gemacht werden. In einem Beleuchtungsmodell werden diese Informationen verarbeitet. Ein in der Computergraphik häufig zu Grunde gelegtes Modell ist das Beleuchtungsmodell von Phong. Die Lichtstärke L_{phong} setzt sich aus einer Mindestlichtstärke (ambiente Anteil L_{amb}) und Anteilen aus diffuser und spiegelnder Reflexion zusammen.

$$I_{\text{phong}} = I_{\text{amb}} + k_{\text{dif}} \sum_{i=1}^c (\cos \varphi_i) + k_{\text{spec}} \sum_{i=1}^c (\cos \Phi_i)$$

Mit:

- $I_{\text{phong}} / I_{\text{amb}}$: Gesamte Lichtstärke und ambierter Anteil
- $k_{\text{dif}} / k_{\text{spec}}$: materialabhängige Konstanten für diffuse und spiegelnde Reflexion
- φ_i : Winkel zwischen Beleuchtungsvektor und Oberflächennormale
- Φ_i : Winkel zwischen dem Vektor der Gegenrichtung des geschnittenen Strahles und dem Vektor des gespiegelten Lichtstrahles
- c : Anzahl Lichtquellen

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass auch eine angestrahlte Oberfläche wiederum als Lichtquelle wirken kann. Dies nennt man Interreflexion. (Dübel 2010)

2.3.3 Struktur von Geländedaten

Dübel setzt sich in seinem Werk mit Arten der Geländesimulation auseinander. In vielen Fällen liegen Geländedaten in zweieinhalb-dimensionalen Datensätzen vor, einem sogenannten Höhenfeld. Das heißt, dass einer x-Koordinate und einer y-Koordinate in einer Ebene jeweils nur ein Hochwert (z-Koordinate) zugeordnet ist. Die Fläche, die sich durch diese Punktwolke ergibt ist stetig über x und y. Gegenüber einem Dreiecksnetz hat dieses Format einen kleineren Speicherbedarf und muss aus häufig nicht zusätzlich generiert werden, da gescannte Gelände oder Oberflächen häufig in dieser Form vorliegen. (Dübel 2010)

2.3.4 Raycasting in einem Höhenfeld

Dübel vergleicht mehrere Raycasting Methoden, die das Ziel haben Schnittpunkte von Lichtstrahlen mit einer Höhenfeld-Oberfläche zu ermitteln. Er beurteilt die Methoden nach Vorberechnungsaufwand, zusätzlichen Speicherbedarf und Echtzeitfähigkeit. Das Relief Mapping ist zwar am eingeschränktesten echtzeitfähig, hat aber keinen zusätzlichen Vorberechnungsaufwand und zusätzlichen Speicherbedarf. Policarp, Oliveira und Comba beschreiben die Variationen der Methode in einer Veröffentlichung.

- Relief Mapping mit binärer Suche
- Relief Mapping mit lineare Suche
- Relief Mapping mit kombinierter binärer und linearer Suche

Das Grundprinzip ist das Prüfen von Punkten entlang eines Primärstrahls. Liegt der Punkt unterhalb der Polygonlinie ändert sich die Methode um den Schnittpunkt möglichst gut anzunähern. Dies wird als binäre Suche bezeichnet.

Bei der binären Methode wird der erste Punkt in die Mitte zwischen Anfang (A) und Ende (E) des Untersuchungsbereichs gesetzt. Der nächste Punkt wird abhängig von der Lage des Punktes in die Mitte zwischen 1 und A oder zwischen 1 und E definiert. Umso häufiger dieser Schritt wiederholt wird umso näher liegt das Ergebnis am tatsächlichen Schnittpunkt.

Bei der linearen Suche werden die Punkte in Schritten mit einer definierten Schrittweite δ ausgehend von Punkt A gesetzt. Liegt ein Punkt unterhalb der Polygonlinie ist die lineare Suche beendet.

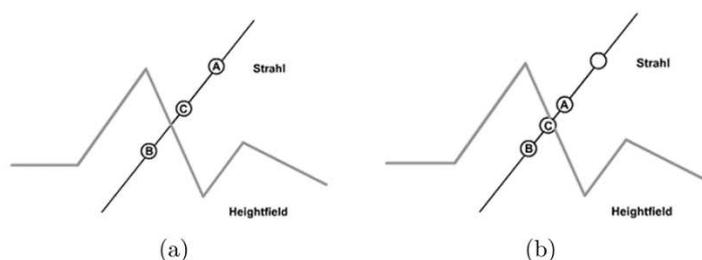


Abbildung 2-13 binäre Suche in einem Höhenfeld (Heightfield) (Dübel 2010)

An dieser Stelle kann zwischen dem ersten Punkt unterhalb der Polygonlinie und dem letzten Punkt oberhalb der Polygonlinie eine binäre Suche angeschlossen werden. Durch die Kombination verringert sich auch die Wahrscheinlichkeit, dass eine Höhe im Höhenfeld ausgelassen wird wie in Abbildung 2-13 dargestellt. Außerdem kann δ kleiner gewählt werden, da die Genauigkeit nur bedingt von der linearen Suche abhängt. (Policarpo 2005, 2005; Dübel 2010)

2.3.5 Shading in einem Höhenfeld

Auch beim Shading stellt Dübel eine Übersicht an möglichen Ansätzen für sein Problem einer Echtzeitsimulation von einer Geländeoberfläche auf. Hier kommen mehrere Algorithmen in Frage.

- Light Map
- Photon Map
- Spherical Harmonics

Die Beleuchtungssituation bei Photon Map und Spherical Harmonics ist physikalisch korrekt da sie von realistischen Oberflächen ausgeht. Allerdings haben sie einen höheren Rendering Aufwand und einen höheren Vorberechnungsaufwand.

Beim **Light Map** Algorithmus nutzt eine klassische Raytracing Methodik. In einer Vorberechnung wird die Helligkeit und Farbe jedes sichtbaren Punktes in der Bildebene wie unter Shading ermittelt. Der Nachteil dieses Algorithmus ist das Entstehen von harten Schatten.

Das Prinzip beim **Photonmapping** ist dasselbe wie beim Lightmapping. Hier geht die Beleuchtungsberechnung allerdings von den Lichtquellen aus und es werden Interreflexionen berücksichtigt. Der Rechenaufwand ist um vieles höher, da auch die Beleuchtung der Oberflächen berechnet werden muss, die nicht von Primärstrahlen getroffen werden.

Um weite Geländeflächen realistisch virtuell zu beleuchten können Kugelfunktionen angewandt werden, die ebenfalls Interreflexionen berücksichtigen. Die Vorberechnung bei den **Spherical Harmonics** ist im Vergleich zum Photonmapping kleiner, da mehrere Strahlen in Kugelfunktionen zusammengefasst werden und kumuliert simuliert werden.

(Dübel 2010)

2.4 Computerbasierte Umsetzungen

Zur Untersuchung des Helligkeitseindrucks von Fahrbahnen mit Markierung wurde von Thomas Schnell und Helmut T. Zwahlen eine computerbasierte Methode entwickelt. Das Ziel war die Ermittlung der Mindestqualitätsstufe von Fahrbahnmarkierung. In dem entwickelten Computer Aided Road Marking Visibility Evaluator (CARVE) sind drei Methoden integriert.

- Physical Model
- Calibration Model
- Human Performance Model

(Schnell,Zwahlen 2000)

2.4.1 Physical Model

Die physikalische Methode greift auf Datenbanken der Reflexionseigenschaften von verschiedenen Oberflächen zurück. Abhängig von unterschiedlichen Messgeometrien aus Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel ergeben sich oberflächenspezifische Leuchtdichtekoeffizienten R_L .

Außerdem wird in dem physikalischen Model die Messgeometrie definiert. Der Beleuchtungswinkel und Beobachtungswinkel können prinzipiell in alle Winkel die zur Beurteilung des kompletten Sichtfelds des Fahrers nötig sind definiert werden. Abbildung 2-14 zeigt ein repräsentatives Beispiel für eine Messgeometrie.

In diesem Model wird die Markierungsfläche immer als homogene Fläche gesehen, auf der der Leuchtdichtekoeffizient nicht variiert. Das Ziel ist es, einen Mindestleuchtdichte-koeffizienten oder eine optimale Geometrie von Markierungsflächen zu ermitteln und nicht den Leuchtdichtekoeffizienten eines Markierungssystems zu untersuchen. An dieser Stelle existiert also noch Untersuchungsbedarf. Die Methodiken können sich teilweise aber entsprechen.

(Schnell,Zwahlen 2000)

2.5 Bisherige Forschungsprojekte zur Verbesserung der Beständigkeit der Fahrbahnmarkierung gegen die Belastung durch den Winterdienst

In der Vergangenheit wurden die Auswirkungen der Belastungen durch den Winterdienst meist in der Praxis untersucht. Dies geschieht in der Regel auf Testfeldern, auf denen verschiedene Markierungssysteme und -materialien appliziert werden und in vorher bestimmten zeitlichen Intervallen auf ihre Funktionseigenschaften hin überprüft werden.

In seiner 2005 erschienenen Abhandlung „Einfluss der Schneeräumung auf Straßenmarkierungen Produktseitig“ beschreibt Förster die Auswirkungen des Winterdienstes in Form von Schneeräumung und Streumiteleinsetz über einen Zeitraum von zwei Jahren. Er kommt in seiner Arbeit zu dem Schluss, dass der Winterdienst erhebliche Schäden an den getesteten Fahrbahnmarkierungen verursacht, wodurch bereits nach zwei Jahren die lichttechnischen Eigenschaften stark in Mitleidenschaft gezogen und somit gegebenenfalls Mindestanforderungen der Norm nicht weiter erreicht werden. Er stellt eine Abhängigkeit der Anfälligkeit von Fahrbahnmarkierungen gegenüber Schneepflugbelastungen von mehreren Faktoren fest. Unter anderem von:

- Häufigkeit der wintersaisonalen Schneepflugeinsätze
- Schichtdicke der Markierungen
- Schürfleisten und Anpressdruck der Schneepflüge
- Typ-I oder Typ-II Markierungen
- Einbettung und Haftung der Reflexperlen und Griffigkeitsmittel

In seinem Fazit spricht er allerdings davon, dass für klar erwiesene Folgeschäden durch Schneepflugeinsätze weder der Hersteller bzw. der Lieferant der Markierungsmaterialien, noch der Markierungsunternehmer verantwortlich oder haftbar gemacht werden können (Foerster 2005).

In einem gemeinsamen Testfeld der BAST und der Deutschen Studiengesellschaft für Straßenmarkierungen e.V., DSGS, auf der Bundesstraße 4 bei Torfhaus im Harz wurden ab September 2006 ebenfalls verschiedene Markierungssysteme mit dem Ziel eines Erkenntnisgewinns, welche Markierungssysteme in Regionen mit überdurchschnittlichem Winterdienst gut geeignet und welche weniger geeignet sind, untersucht. Der Untersuchungszeitraum betrug hierbei vier Winterperioden. Appliziert wurden auf diesem Testfeld sowohl Typ-I als auch Typ-II Markierungen, davon 36 Varianten bestehend aus einer Zwei-Komponenten-Kaltplastik und 29 Agglomeratmarkierungen, welche von Markierstoffherstellern verschiedener europäischer Länder stammten. Das Prüffeld war dabei stets der EN 1824 konform, hatte keine nennenswerten Kurven und ein insgesamt annähernd konstantes Höheniveau. Die aufgenommenen Messwerte setzten sich aus je 3 Messpunkten je Messstreifen

zusammen, sodass insgesamt pro Muster 24 Werte erfasst wurden. Während des Untersuchungszeitraumes wurden insgesamt 794 Schneepflugeinsätze erfasst.

Die abschließenden Untersuchungen des Projektes lassen den Schluss zu, dass Typ-II Markierungen aus Kaltspritzplastiken nur bedingt für den Einsatz auf Streckenabschnitten mit häufigem Winterdiensteinsatz geeignet sind, Agglomeratmarkierungen dagegen eine deutlich längere Haltbarkeit aufweisen. Der Verfasser weist darauf hin, dass allein die Betrachtung nur einer verkehrstechnischen Eigenschaft, wie etwa die Messung der Tag- oder Nachtsichtbarkeit, keine oder nur eine bedingte Beurteilung der Markierung als Ganzes zulassen.

In Folge der Ergebnisse des Testfeldes wurden im Rahmen der Überarbeitung der zur Zeit der Untersuchungen gültigen Norm ZTV M 02, Streckenabschnitte mit hohem Winterdiensteinsatz, zum Beispiel Passstraßen, von den lichttechnischen Anforderungen im Gebrauchszustand ausgenommen (John 2009).

3 Vorstudie

Wie bereits einleitend beschrieben, wurde die Optimierung der Agglomeratfahrbahnmarkierung hinsichtlich der Beständigkeit gegen die mechanische Beanspruchung aus dem Winterdienst durch eine kombinierte Labor- und Feldstudie angestrebt.

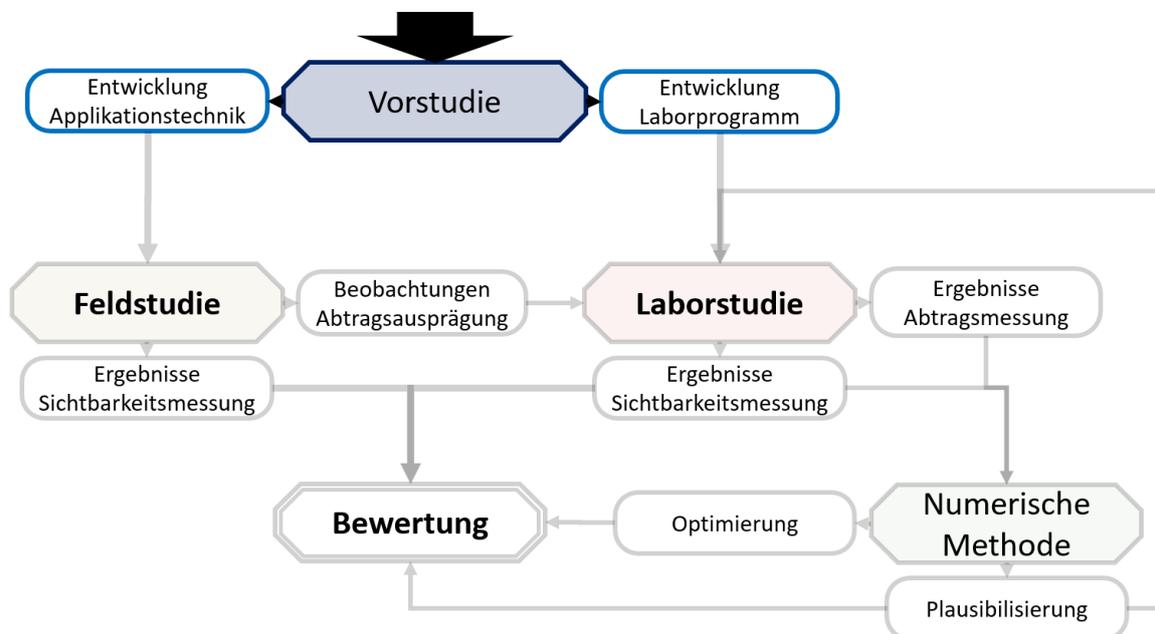


Abbildung 3-1 Konzept Vorstudie

Die Vorstudie sollte somit grundlegende Informationen für die Labor- und Feldstudie geben. Entscheidend für die Feldvorstudie war die Bestätigung der maschinentechnischen Machbarkeit. Der erste Teil der Vorstudie stellte also das Applizieren verschiedener Geometrievarianten dar. Durch das Probeapplizieren konnten Geometrievarianten als realisierbar und unbrauchbar identifiziert werden.

Für die Laborstudie war es entscheidend das entworfene Prüfprogramm zu testen und daraufhin weiterzuentwickeln. Die im ersten Teil der Vorstudie hergestellten Probekörper waren gleichzeitig für die Untersuchung im Labor geeignet. Der zweite Teil sah also eine Untersuchung der Probekörper im Prüfprogramm vor.

3.1 Maschinentechnische Machbarkeit

Im Rahmen des ersten Teils der Vorstudie stellten sich zehn verschiedene geometrische Varianten der Agglomeratmarkierung als maschinentechnisch machbar heraus. Jede dieser Markierungen setzte sich aus einer 2-Komponenten-Kaltplastik vom Typ **Stollreflex D1249** und Glasperlen des Typs **SOLIDPLUS 30 212-425 T18** oder **SOLIDPLUS 30 212-850 T18**, hergestellt von der Firma Swarco zusammen. Kaltplastiken werden als zähflüssige Masse auf die Fahrbahn gespritzt und härten ohne weitere thermische Behandlung bei Umgebungsbedingungen aus. Die Markierungspersperlen sind bei den zu prüfenden Probekörpern als Nachstreumittel und Premixglasperlen eingesetzt.

Um für alle Varianten vergleichbare Bedingungen zu garantieren wurden diese auf identischen, vorher angefertigten, Metallplatten appliziert. Auf diesen wurde zuvor ein Primer zur

Verbesserung der Haftung aufgebracht. Die eigentlichen Markierungsarbeiten fanden anschließend am 16. Dezember 2015 im niedersächsischen Wardenburg bei der Firma **Straat1** mit einem automatisierten Spritzmarkierungsfahrzeug statt.



Abbildung 3-2 Markierungsmaschine (rechts) und markierte Prüfplatte (links)

Alle hergestellten Markierungsvarianten sind in ihrer Zusammensetzung bezüglich der verwendeten Materialien identisch, unterscheiden sich jedoch in ihrer Geometrie.

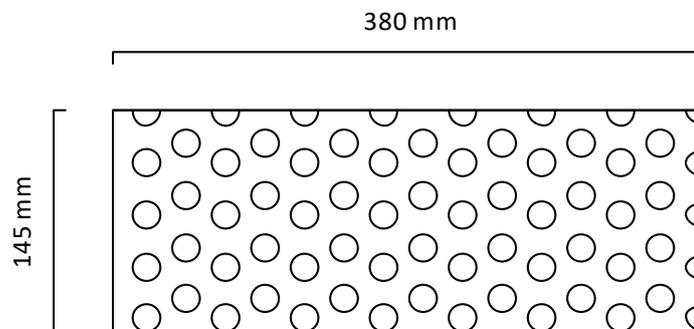


Abbildung 3-3 Skizze der Versuchsplatte mit Runddots

Daraus ergibt sich schließlich die gegenüber der am 9. September 2015 auf der Kick-Off-Sitzung vorgeschlagenen Variantenmatrix im Folgenden dargestellte verkleinerte Matrix. Dies ist insbesondere durch den maschinentechnisch zu begründenden fehlenden Unterschied zwischen den Varianten mit unterschiedlicher Viskosität zu begründen.

		Viskosität 1		Viskosität 2		
		Glasperle 1	Glasperle 2	Glasperle 1	Glasperle 2	
Referenz		Ofein	Ogroß	21	31	
Rund-Dots	klein	1	11	21	31	
	groß	2	12	22	32	
Kreuz-Dots		3	13	23	33	
Dreieck	klein	Richtung 1	4	14	24	34
		Richtung 2	5	15	25	35
	groß	Richtung 1	6	16	26	36
		Richtung 2	7	17	27	37
Stochastische Anordnung		grob	8	18	28	38
		fein	8F	18F	28	38
Tropfen		9	19	29	39	
Pflaumen		10	20	30	40	

Glasperle 1 SOLIDPLUS 30 212-425T18 klein
 Glasperle 2 SOLIDPLUS 30 212-850T18 groß

Abbildung 3-4: Variantenmatrix Vorversuchsreihe

3.2 Laborversuchsprogramm

Das im Rahmen der Laborvorstudie angewandte Untersuchungsprogramm sah mehrere Schritte vor. Da der Ablauf sich nicht maßgeblich geändert hat soll in Kapitel 4.1 der finale Prüfablauf näher erläutert werden. Hier sollen nur die für die Vorversuchsreihe charakteristischen Entwicklungen und Beobachtungen dargestellt werden. Es handelt es sich um die Entwicklung des Versuchsstandes zur Simulation der Schneepflugbelastung und um die Untersuchung und Beurteilung des Verhaltens der unterschiedlichen Varianten unter der mechanischen Belastung durch den Straßenverkehr.

3.2.1 Versuchsstand zur Simulation der Schneepflugbelastung

Derzeit gibt es noch kein standardisiertes Prüfverfahren, um die Auswirkungen des Winterdienstes, insbesondere von Schneepflügen, auf die Funktionsfähigkeit von Fahrbahnmarkierungen zu untersuchen. Durch ihr hohes Gewicht in Verbindung mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von bis zu 60 km/h und dem zum Räumen der Fahrbahn notwendigen Bodenkontakt entstehen für die Markierungen erhebliche mechanische Beanspruchungen. In welchem Umfang diese zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit führen, wurde bisher lediglich in der Praxis auf Testfeldern untersucht. Hierzu sei an dieser Stelle auf Kapitel 2.5 verwiesen.

Aufgabe dieses Projekts war es daher einen geeigneten Laborversuch zu entwickeln, mit dessen Hilfe eine qualitative Aussage über die Auswirkungen von Winterdienstbeanspruchung durch das Überfahren mit Schneepflügen auf Fahrbahnmarkierungssysteme getroffen werden kann. Des Weiteren war die Zielsetzung dieses Projekts eine Prognose über die voraussichtliche Lebensdauer verschiedener Markierungssysteme in Abhängigkeit der Schneepflugüberfahrten und des daraus resultierenden Abtrags des Materials der Markierung treffen zu können.

Es galt also eine Maschine zu entwickeln, welche den Abtrag durch einen Schneepflug möglichst realistisch in Belastungsstufen simulieren kann. Es ergebenen sich einige Anforderungen an diese Schneepflugsimulationsmaschine.

Anforderungen an die Abtragsimulation

Grundvoraussetzung ist das Aufbringen einer wiederkehrenden **schabenden Belastung**.

Außerdem muss es die Möglichkeit geben, die für die Anwendung spezifischen Probekörper nacheinander **einzuspannen**, zum Analysieren **auszuspannen** und erneut einzuspannen.

Nachfolgend muss nach dem Durchführen des Belastungsprogramms ein Ergebnis erzielt werden, welches der **Ausprägung der Beschädigung auf der Straße** möglichst nahekommt.

Schließlich muss das Belastungsergebnis reproduzierbar sein und bei jedem Probekörper erreicht werden um eine **Vergleichbarkeit** zu ermöglichen.

Maschine zur Abtragsimulation

Die zu Grunde gelegte Hobelmaschine mit beweglichem Ausleger erfüllt die Anforderung an eine wiederholbare **schabende Belastung**. Außerdem ermöglicht die Maschine das Anbringen und Einstellen verschiedener Module um den andere Anforderungen gerecht zu werden.

Die vorhandene Einspannvorrichtung (zwei grobe Klemmbacken) eignet sich nicht direkt zum Einspannen der Prüfbleche. Dies machte die Herstellung eines Adapters nötig. Zum einen musste es möglich sein, diesen Adapter dauerhaft und unbeweglich in einer festen und definierten Position einzuspannen. Zum anderen musste der Adapter die Anforderungen an **Einspannen/ Ausspannen** erfüllen. Hierbei muss jedes Prüfblech an der gleichbleibenden Position und im gleichbleibenden Winkel zur gesamten Maschine ausgerichtet sein. Der in Abbildung 3-5 dargestellte weiße Silikonblock garantiert eine dauerhaft waagerechte Auflagefläche. Die zusätzlichen montierten Klemmleisten halten die Probekörper in der geforderten Position und ermöglichen ein schnelles Ein- und Ausspannen.

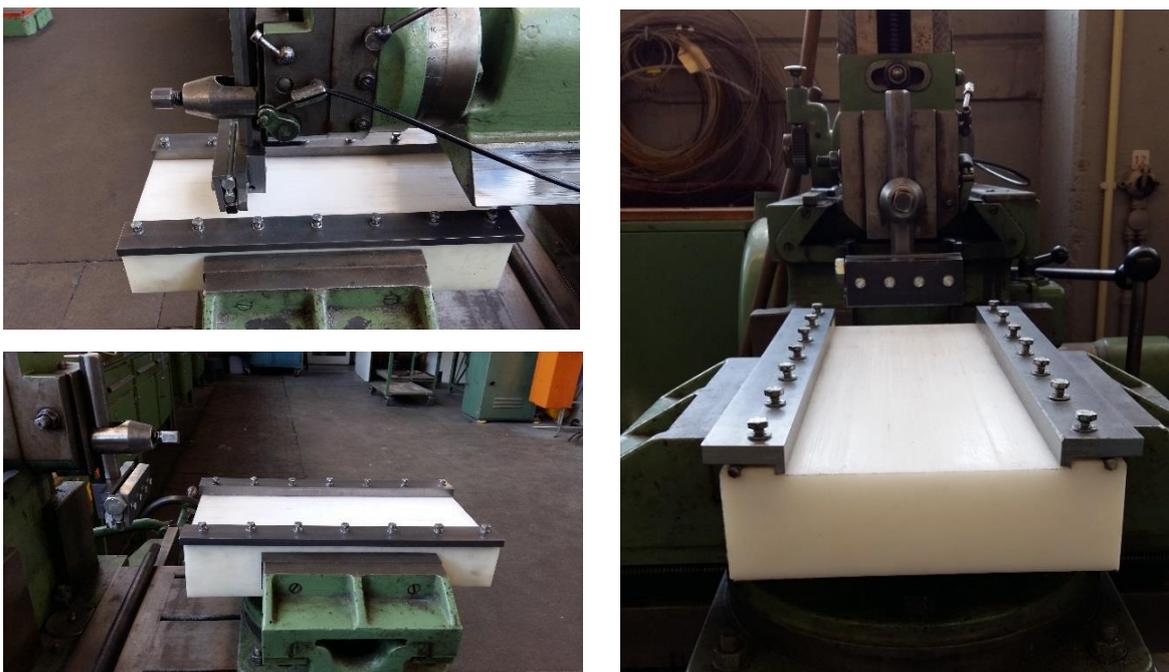


Abbildung 3-5 Ansichten der Maschine
von links (links oben), rechts (links unten) und vorne (rechts)

Für eine **realistische Belastungssimulation und Vergleichbarkeit** ist sowohl eine Schürfkante, als auch ein passendes Belastungsprogramm zu wählen. Verwendete Schürfleisten in der Vorstudie gingen von einer Schürfleiste „Kombi S50 Wave“ von der Firma Kuepper, über ein Vierkantmetall, bis schließlich zu einem neu entwickelten kombinierten Stahl-Korund-Modell. Beim Belastungsprogramm wurden schließlich einzelne Übergänge anstelle von mehreren Übergängen pro Belastungsstufe gewählt. Außerdem wurde dazu übergegangen die Höhe nicht mehr zu definieren, sondern im Nachhinein zu messen. Hierbei ist zu sagen, dass während der Entwicklung ein Paradigmenwechsel stattgefunden hat. Die Prämisse hierbei war nicht mehr den Abtragvorgang an sich, sondern die Beschädigung zu simulieren. Der **Entwicklungsprozess der Schürfkante und des Schürfprozesses** soll ausführlich vorgestellt werden:

a) „Kombi S50 Wave“

Um die Belastung durch den Winterdienst möglichst realistisch abzubilden, wurde zunächst eine Recherche bezüglich der in Österreich, genauer auf dem später für die Feldstudie einbezogenen Abschnitt, verwendeten Schürfleisten durchgeführt. Nach Auskunft der Autobahnmeisterei Pressbaum werden in diesem Abschnitt ausschließlich Schürfleisten der

Firma Küper verwendet. Das an den Pflügen montierte Modell ist dabei die Schürfleiste „Kombi S50 Wave“ (siehe Abbildung 3-6).

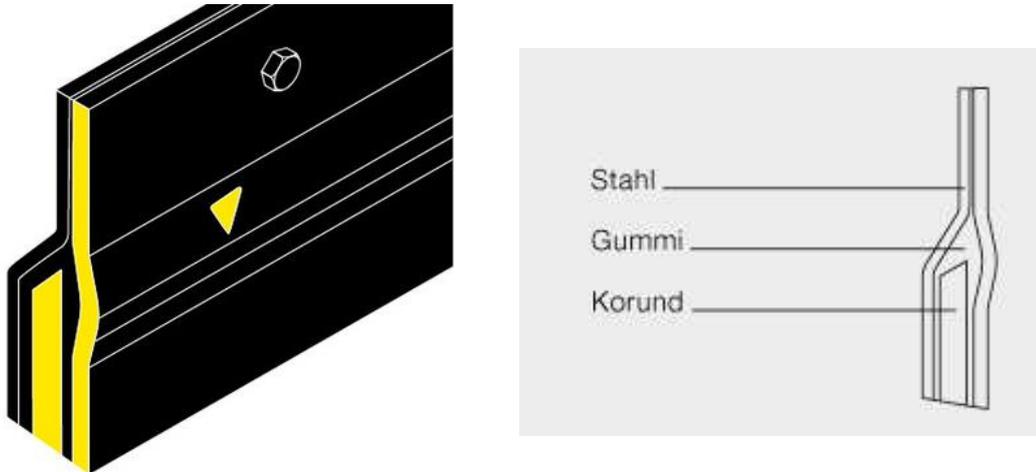


Abbildung 3-6: Schürfleiste Küper Kombi S 50 Wave (Kueper 2016)



Abbildung 3-7: KÜPER Wave S 50 Schürfleiste im Labormaßstab

Nach ersten Testläufen mit der eingespannten originalgetreuen KÜPER-Schürfleiste wurde allerdings festgestellt, dass der gleichmäßige Abtrag durch die gebaute Vorrichtung nicht möglich ist. Trotz des Hochleistungswasserschnittverfahrens ist die Oberflächenebenheit der offengelegten Korundkante zu gering um einen gleichmäßigen Abtrag zu gewährleisten. Hinzu kommt, dass bei den im Rahmen des Laborverfahrens eingesetzten Maschinengeschwindigkeiten kein signifikanter Abtrag sowohl als Verschleiß an der Schürfleiste aber auch als Beanspruchung der Markierung selbst auftrat. Vielmehr kam es zu einem Polierprozess von Markierung und Schürfleiste. Eine derartige originalgetreue Schürfleiste scheint mit dem vorgeschlagenen Versuchskonzept für den Materialabtrag nicht praktikabel.

b) Vierkantmetall

Für die Labormessungen der Vorversuchsreihe wurde ein eingespanntes Vierkantmetall aus gehärtetem Werkzeugstahl mit den Maßen 12x12x125 (H*B*L) [mm] montiert. Dieses ist leicht gekippt, um eine deutliche Kante zu erhalten und somit die Spitze der Schürfleiste eines Schneepfluges zu simulieren (siehe Abbildung 3-8). Durch eine sich ständig wiederholende Überfahung der Markierung mit der Stahlkante war trotz deren extremen Härte ein

Abtrag des Stahls in Form einer Verunreinigung der Markierung zu verzeichnen war. Zusätzlich wird die Kante des Vierkantmetalls nach dem Bearbeiten von wenigen Probekörpern schnell stumpf, sodass vergleichbare Abtragsbedingungen nicht gegeben sind.



Abbildung 3-8 Seitenansicht der Schürfleiste (Vorversuchsreihe)

Eine Belastungsstufe wurde zuerst durch eine definierte Anzahl Übergänge realisiert. Es stellte sich allerdings heraus, dass so keine vergleichbare Abtragsbedingungen zwischen den Probekörpern ermöglicht werden konnten. Ein weiterer Ansatz war der Abtrag auf definierte Höhenstufen in 0,2 mm Schritten. Diese Stufen konnten nicht mit ausreichender Genauigkeit erreicht werden.

c) finaler Schürfleistenaufbau

Auf Grundlage der Literaturrecherche sowie der gewonnenen Erfahrungen aus Laborstudie sowie der Feldstudie wurde die **Versuchsapparatur abschließend angepasst**:

Jeder Probekörper wird in insgesamt fünf etwa gleichgroßen Belastungsstufen um insgesamt ca. 1mm abgetragen. Hierfür wird jede Platte pro Belastungsstufe nur einmal langsam mit der Versuchsmaschine überfahren. Es wird keine konstante Abtragshöhe erreicht. Die Abweichung von der eingestellten Höhe wird ein wenig größer, wenn mehr Material auf einmal abgeschürft wird. Dies stellt allerdings kein Problem dar, sondern entspricht den Beobachtungen im Feld. Hierfür wurden auf der A1 Agglomeratproben entnommen und direkt mit den Laborproben verglichen (s. Kapitel 5.3). Um die nötige Vergleichbarkeit herzustellen wurden sowohl die Höhenverluste als auch die Gewichtsverluste nach jeder Belastungsstufe gemessen. Verglichen werden anschließend nicht die diskreten Werte der Belastungsstufe, sondern interpolierte Werte. In Kapitel 7 wird abschließend analysiert ob die Abtragshöhe oder das Abtragsgewicht den Vergleichswert darstellt.

Neben dem oben beschriebenen Abtragsprofil ist die abgenutzte Oberfläche entscheidend. Wie im Original aus dem Feld ist die Oberfläche frei von intakten Glasperlen.

Auf Grundlage der Literaturrecherche sowie der gewonnenen Erfahrungen aus der Laborstudie wurde ein finaler Schürfleistenaufbau gewählt, der eine realistischen Abtrag garantiert ohne dabei verschleißanfällig zu sein. Zwei Stahlbleche werden gemäß der Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10 durch einen Korundkern unterstützt.



Abbildung 3-9 Schürfleiste im System (li) und Nahaufnahme der eingespannten Schürfleiste (re)

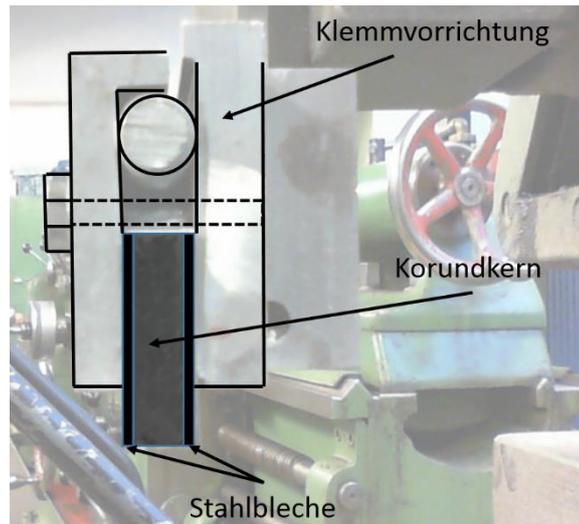


Abbildung 3-10 Seitenansicht der Schürfleiste (Hauptversuchsreihe)

Durch die verwendete Schürfleiste und das gewählte Verfahren werden abschließend die Kriterien an die Ähnlichkeit zur tatsächlichen Schneepflugbelastung und Vergleichbarkeit zwischen den Probekörper erfüllt. Die Entwicklung des Prüfstands gilt als abgeschlossen. Das gesamte Verfahren sowie die Ergebnisse der Laborstudie wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

3.2.2 Belastung Straßenverkehr

Als drittes Element der Vorversuchsreihe wurde die Beurteilung des Verhaltens der unterschiedlichen Varianten unter der mechanischen Belastung durch den Straßenverkehr untersucht. Dieser Test wurde bei der finalen Laborstudie nicht wiederholt, da übermäßige negative Effekte ausgeschlossen werden konnten.

Verfahren

Das Verfahren wurde mit Hilfe der Reifenrundlaufprüfanlage der Swarco Limburger Lackfabrik, Diez realisiert. Ähnlich dem Konzept welches auch in EN 13197 beschrieben ist, werden hier auf Platten applizierte Fahrbahnmarkierungen durch Rotation der Einspannvorrichtung mechanisch durch einen örtlich feststehenden aber rotierenden Reifen belastet (siehe Abbildung 3-11). Die parallele Durchführung dieser Versuche diente dabei insbesondere dem Ausschluss negativer Effekte durch die geometrisch verschiedenen Agglomeratformen.



Abbildung 3-11 Rundlaufprüfanlage der Swarco Limburger Lackfabrik, Diez

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind im Anhang in tabellarischer Form sowie als Diagramm zu finden. Das prognostizierte Verhalten entspricht dabei einer sukzessiven Abnahme der Leuchtdichten mit zunehmender Überrollungszahl durch die Reifen.

Aus den graphisch dargestellten Ergebnissen in Gegenüberstellung zu den ebenfalls verzeichneten Grenzwerten wird deutlich, dass auch bei einer Überrollungszahl von 4,0 Mio., abgesehen von den Varianten V04 und V05 (Dreiecke in und entgegen der Fahrtrichtung, feine Perle) sowie der Variante V15 (Dreiecke entgegen der Fahrtrichtung, grobe Perle), die Grenzwerte der Tages- und Nachtsichtbarkeit von allen Varianten eingehalten werden.

3.3 Statistische Verfahren zur Auswertung der Versuchsergebnisse

Um die Belastbarkeit der gewonnenen Prüfergebnisse hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Unabhängigkeit voneinander sicherzustellen, wurde neben der arithmetischen Mittelwertbildung stets auch die Standardabweichung, die Varianz sowie der Varianzkoeffizient als prozentuales Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert berechnet.

Zusätzlich wurde für alle Messreihen eine Prüfung auf Ausreißer in Anlehnung an das Verfahren von (Davies, Gather 1993) gemäß dem „Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2“ der FGSV durchgeführt.

4 Laborstudie

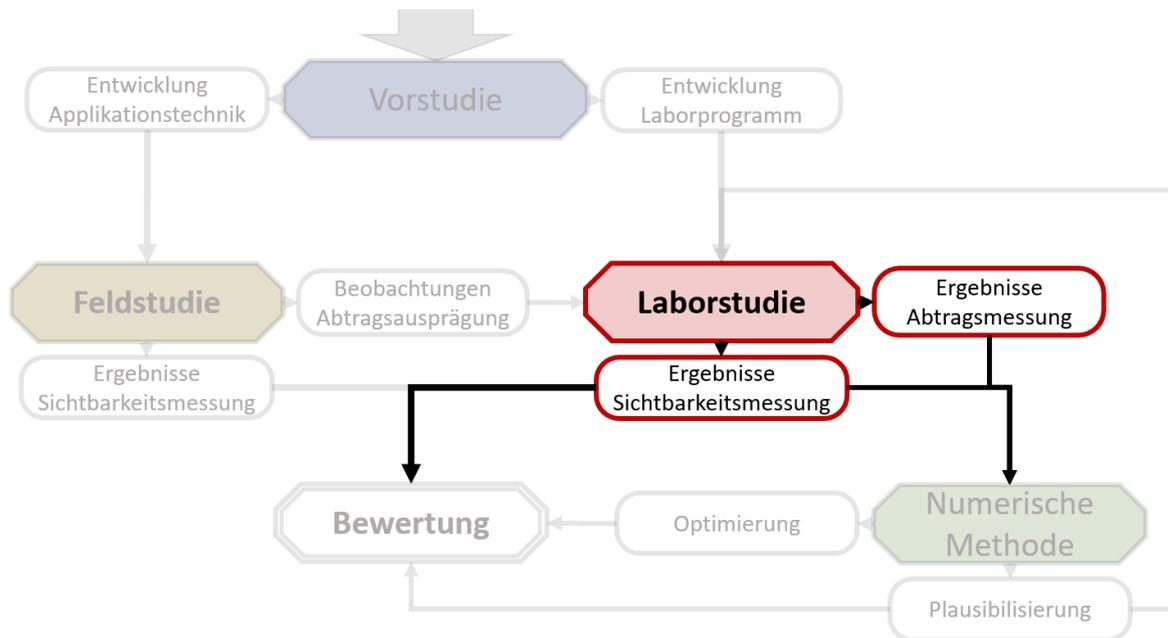


Abbildung 4-1 Konzept Laborstudie

Wie Abbildung 4-1 zu entnehmen ist, wurde das Laborprogramm während der Vorstudie entwickelt. In Kapitel 3.2.1 ist ebenfalls der Einfluss aus Beobachtungen in der Feldstudie beschrieben. Allerdings wurde hier nur auf Entwicklungen der Laborstudie eingegangen. Deshalb soll vorerst ein Überblick über den Ablauf der Laborstudie gegeben werden. Des Weiteren wird auf die Variantenmatrix der insgesamt drei Messreihen eingegangen. Abschließend werden sowohl die Ergebnisse der begleitenden Sichtbarkeitsmessung und der begleitenden Abtragsmessungen dargestellt. Das Schaubild zeigt welche Ergebnisse für die abschließende Bewertung und welche für die Validierung der numerischen Methode benötigt wurden.

4.1 Ablauf/ Verfahren

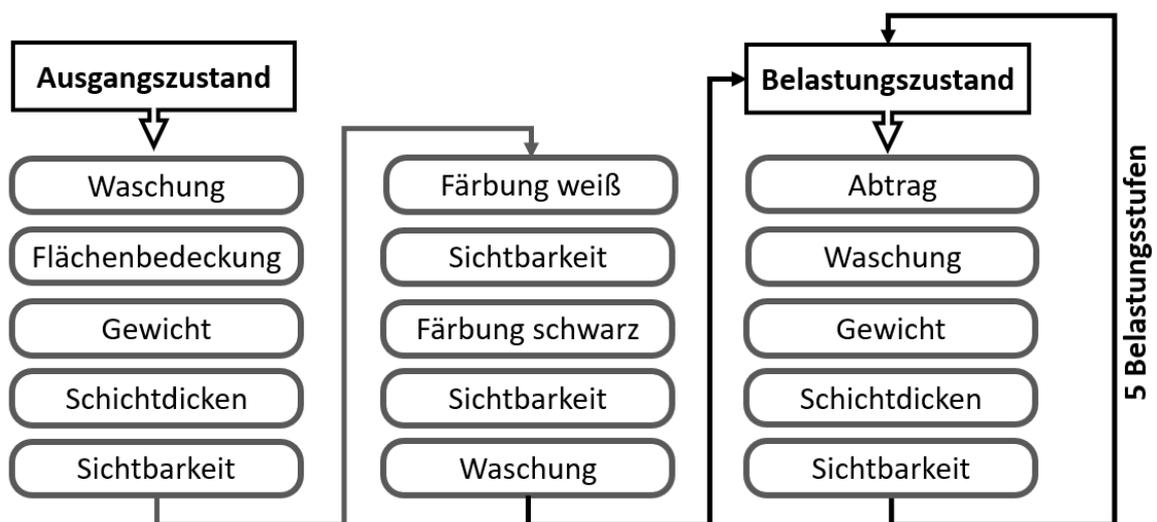


Abbildung 4-2 Ablauf Laborstudie

Jeder Probekörper ist nach demselben Ablauf zu untersuchen. In Abbildung 4-2 sind die einzelnen Tätigkeiten in der anzuwendenden Reihenfolge dargestellt. Alle Probekörper durchlaufen zuerst einmalig die Beurteilung im Ausgangszustand und anschließend fünfmal die Beurteilung im Belastungszustand.

4.1.1 Ausgangszustand

Im Rahmen der Beurteilung des Ausgangszustandes wurden die auf die Prüfbleche applizierten Probekörper zunächst im Rahmen einer Waschung bei laufendem Wasser abgefegt um lose Glasperlen zu entfernen.

Anschließend wurde bei jedem Probekörper der Flächenbedeckungsgrad mit Hilfe der Auswertung von Fotoaufnahmen bestimmt. Mit Hilfe einer Grenzwertsetzung wurde das ursprünglich aufgenommene Bild in ein schwarz/weiß-Bild umgewandelt. Dabei wurde außerdem berücksichtigt, dass schwarze Pixel, welche ausschließlich von weißen umgeben sind, ebenfalls zur Markierungsfläche gehören müssen. Anschließend wurden diejenigen Pixel gezählt, welche weiß eingefärbt wurden und ihr Verhältnis zur Gesamtpixelanzahl bestimmt (siehe Abbildung 4-3).

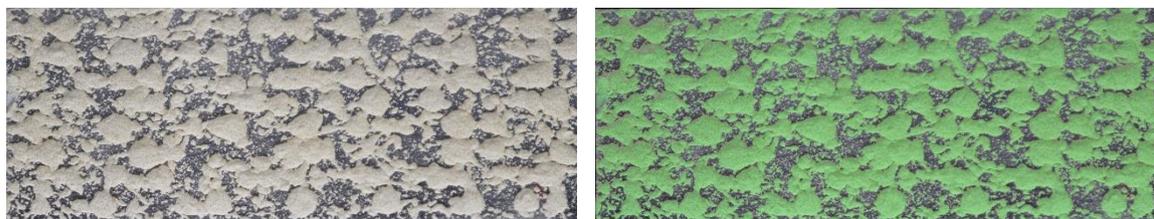


Abbildung 4-3: Systematik zur Auswertung der Flächenbedeckung

Zusätzlich wurde die Schichtdicke gemessen. Da nach jeder Belastungsstufe eine weitere Schichtdickenmessung durchgeführt wurde, erfolgte diese nach Höhenmessplänen (siehe Abbildung 4-4), die die zu messenden Agglomerate angeben. Durch eine genaue Dokumentation und Zuordnung der einzelnen Höhenmessungen zu definierten Messpunkten, konnten nachher Mittelwerte in verschiedenen Bereichen (wie dem Sichtbarkeitsmessbereich) gebildet werden.

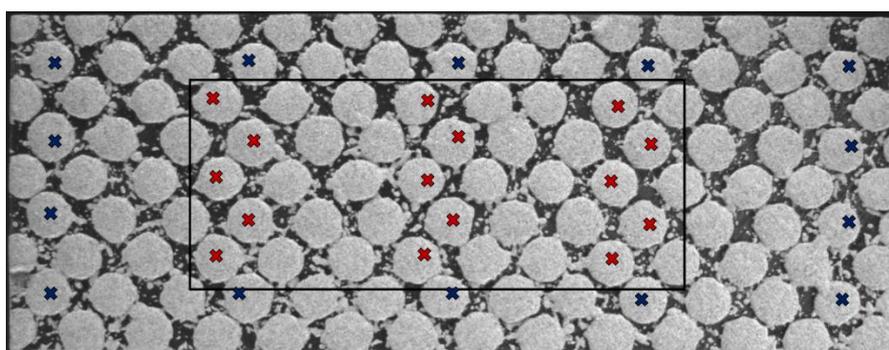


Abbildung 4-4: Höhenmessplan mit Messpunkten im Sichtbarkeitsmessbereich (rot) und außerhalb (blau)

Durch eine Wiegung und dem bei der Applikation gemessenen Anteil nachgestreuter Glasperlen lässt sich alsdann auch der Materialverbrauch je Platte und je m² bestimmen.

Im Anschluss wurden die Probekörper sowohl einer Trocken- als auch einer Nassmessung zur Aufnahme der Tages- und Nachtsichtbarkeit gemäß Anhang A der EN 1436 unterzogen. Als Messgerät für die Leuchtdichten wurde im Rahmen dieser Versuchsreihen ein LTL 2000S Retrometer der Firma Delta eingesetzt.

Um für die zu prüfenden Probekörper gleichbleibende Messbedingungen während der Messungen gewährleisten zu können, werden diese bei jeder Messung auf einem hierfür konzipierten Versuchsbrett fixiert. An der Vorderseite sowie an beiden Seiten liegen die Probekörper an Metallkanten an, was eine gleichbleibende Lage bei jeder Messung garantiert. Zwei äußere Fixierungsschienen sorgen dafür, dass das Messgerät zentriert über den Probekörpern gehalten wird. Für die Messungen des Retroreflexionswertes bei Nässe muss zusätzlich eine Querneigung des Bretts von 2% eingestellt werden, was durch zwei Stellschrauben an einer der Längsseiten möglich ist. Schlitzte in der unteren Fixierungsschiene ermöglichen zudem ein Abfließen des Wassers bei Nassmessungen.

Im Besonderen zur Evaluierung der numerischen Methode wurde ein möglichst breiter Messbereich benötigt. Das Versuchsbrett wurde entsprechend angepasst, sodass jeweils bis zu 5 Messungen in zwei nebeneinanderliegenden Messbereichen durchgeführt werden konnten. An beiden Fixierungsschienen befinden sich fünf Markierungen im Abstand von je 1 cm um das Messgerät exakt positionieren zu können. Sowohl die linke als auch die rechte Schiene garantieren zwei nebeneinanderliegende Messbereiche. Eine Skizze des Versuchsbretts veranschaulicht dies in Abbildung 4-5.

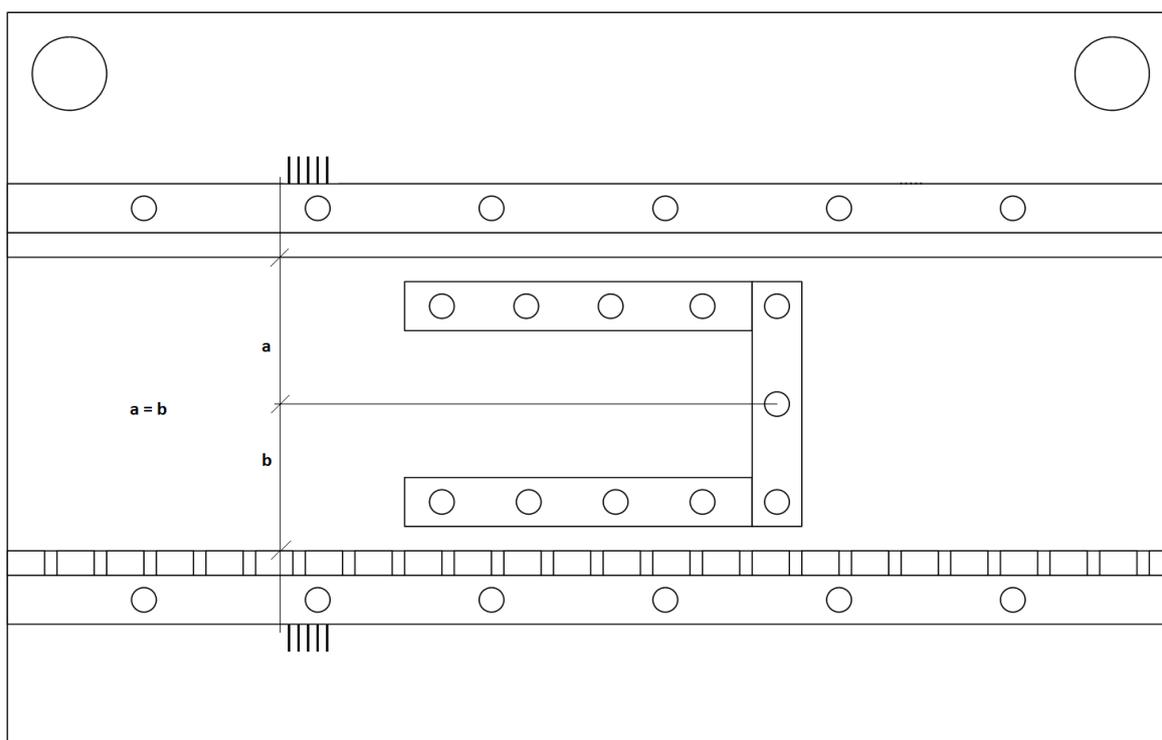


Abbildung 4-5 Versuchsbrett zur Trocken- und Nassmessung

Während der Trockenmessungen werden die Probekörper unter Umgebungsbedingungen im Labor untersucht. Hierzu werden pro Untersuchung bis zu zehn Einzelmessungen je Probekörper durchgeführt, beginnend an der ersten Markierung und fortlaufend im Abstand von 1 cm. Anschließend wird aus den Ergebnissen ein Mittelwert gebildet.

Die Nassmessungen finden unter folgenden genormten Versuchsbedingungen statt. Die Probekörper befinden sich auf dem Versuchsbrett mit einer eingestellten Querneigung von 2%. Aus einer Höhe von 30 cm werden pro Probekörper mindestens 3 L/m² Wasser gleichmäßig ausgegossen, sodass die gesamte Metallplatte und deren nähere Umgebung kurzzeitig überflutet sind. Anschließend wird eine Trocknungszeit von 60 ± 5 Sekunden abgewartet, während der das Wasser durch die Schlitze in der unteren Fixierungsschiene ablaufen kann. Nach Ablauf dieser Zeit wird die Messung analog zur Trockenmessung an den feuchten Probekörpern durchgeführt (EN 1436, 2007). Um den Messzeitraum einhalten zu können, wurden nur sechs Einzelnassmessungen durchgeführt.

Im Anschluss wurde ein neu entwickeltes **beschädigungsfreies Prognoseverfahren** zur Abschätzung der verbleibenden Leuchtdichten am Ende der Funktionsdauer bzw. nach Belastung durch den Winterdienst angewendet. Dabei wurden die Kuppen der einzelnen Elemente der Agglomeratfahrbahnmarkierungen zuerst mit Hilfe einer Malerrolle mit weißer Farbe bestrichen und die Trockenleuchtdichten gemessen und anschließend gleiches Prozedere mit schwarzer Farbe erneut durchgeführt. Bei der Messung mit weißer Farbe wird dabei davon ausgegangen, dass keine Glasperlen mehr auf der Kuppe einen Beitrag zur Leuchtdichte liefern, was dem Zustand einer vollständigen Zerstörung durch den Schneepflug entspricht. Die Schwarzmessung dient lediglich der numerischen Auswertung des Anteils von Kuppe und Flanke. Im Anschluss wird die zu 100% wasserlösliche Farbe entfernt und die Prüfkörper stehen für weitere Messungen zur Verfügung.



Abbildung 4-6 geschwärtzter Probekörper mit stochastischer Agglomeratmarkierung

Ziel dieses Verfahrens ist es, abzuschätzen, welcher Anteil der Gesamtleuchtdichte auf die Kuppe der Markierung und welcher Anteil auf die Flanke der Markierung zurückzuführen ist. Dies geschieht insbesondere vor dem Hintergrund der grundlegenden Annahme dieses Projekts, dass durch die Belastung durch den Winterdienst insbesondere die Kuppen der Agglomeratmarkierungen geschädigt werden, der Flankenanteil jedoch weiterhin für die Rückstrahlung des Lichts zur Verfügung steht.

Warum dieses Verfahren allerdings nicht weiter analysiert wurde ist in Abbildung 6-7 klar im Kapitel 6 um die numerische Methode klar. Die komplexen mit der Belastung sich ändernden Sichtbeziehungen können durch ein bloßes Färben der Kuppen nicht simuliert nachgestellt werden.

4.1.2 Belastungszustand

Am Anfang der Untersuchung eines Belastungszustands steht der Abtrag der jeweiligen Stufe. Bei jeder Abtragstufe werden, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, mit Hilfe des entwickelten Versuchsstands ca. 0,2 mm abgetragen. Es wird versucht nach fünf möglichst gleichmäßigen Stufen ca. 1 mm Abtrag zu erzeugen. Nach dem Ausspannen aus der Versuchsvorrichtung wird der abgetragene Staub aus Glasperlen und Trägermaterial unter fließendem Wasser von den Probekörpern gewaschen.

Nach der Trocknung werden die Höhen der auf den Höhenplänen markierten Agglomerate gemessen. Zusätzlich wird durch eine Wiegung die Menge des abgetragenen Materials ermittelt.

Abschließend wird wie im Ausgangszustand die Sichtbarkeit gemäß Anhang A der EN 1436 gemessen. Eine Trockenmessung wird nach jeder Abtragstufe durchgeführt, während eine Nassmessung aus Gründen des Aufwands nur bei jeder zweiten Belastungsstufe durchgeführt wurde.

4.2 Variantenmatrix

Um für die Laborstudie geeignete und zugleich realitätsnahe Probekörper verwenden zu können wurden diese vorab im Rahmen der Erprobung der maschinentechnischen Machbarkeit verschiedener Agglomeratgeometrien mit dem auch später im Rahmen der durchgeführten Feldstudie verwendeten Applikationsgerät hergestellt.

Nach der Vorversuchsreihe und der Feldstudie wurde die Variantenmatrix entsprechend den Beobachtungen wie unten dargestellt erweitert. Die Auswahl wird im Folgenden erläutert.

Die dargestellte Tabelle zeigt die in den drei Hauptversuchsreihe getesteten **Geometrievarianten**. Kreisdots, Dreiecke, Stochastisch, Tropfen und Pflaumen bilden die phänotypischen Überkategorien. Die Kategorie „Kombi“ beschreibt die Kombination aus dünnen und dicken Tropfen (F19K), sowie aus dünnen Tropfen und Pflaumen (F20K). Diese Kategorie entspricht den fehlerhaften Applikationen der Feldstudie. Aufgrund der überdurchschnittlichen Ergebnisse sind diese in die Laborstudie mit aufgenommen worden.

Der Buchstabe (**F** oder **L**) steht für die Hauptversuchsreihe bzw. die Unterkategorie. Wie die Tabelle zeigt unterscheiden sich die Unterkategorien maßgeblich in Flächenbedeckung, Materialmenge und Schichtdicke. Die Probebezeichnung F steht für die erste Hauptversuchsreihe, die sich stark an den Geometrien im **Feld** orientiert. Für eine zweite und dritte Versuchsreihe wurden andere nur im **Labor** untersuchte Geometrievarianten gewählt. Bei der ersten und zweiten wurden ausschließlich Varianten mit großen Perlen (SOLIDPLUS 30 212-850 T18) untersucht, während für die dritte Versuchsreihe Varianten mit kleinen Perlen (SOLIDPLUS 30 212-450 T18) gewählt wurden. Die dritte Versuchsreihe (**LO**) soll zusätzlich zu den Ergebnissen im Feld zeigen, dass die Perlengröße keine nennenswerte Auswirkung auf den Vergleich des Sichtbarkeitsverlaufs einer Geometrie unter Schneepflugbelastung hat. Zu jeder Unterkategorie wurden jeweils drei Probekörper getestet. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte dieser Probekörperschar.

Da im österreichischen Regelwerk bisher Agglomeratmarkierungen nicht weiter spezifiziert wurden, wurden an dieser Stelle zunächst die Grenzwerte der in Deutschland geltenden ZTV M bezüglich Flächenbedeckung und Materialverbrauch angesetzt. Diese sind zum Teil unterschritten.

Geometrie		Flächenbedeckung		Materialmenge		Schichtdicke		
		[%]	min	[kg/m ²]	min	[mm]	max	
Kreisdots	(klein)	L11	77,6	60,0	3,1	2,2	4,7	7,0
		<u>L01</u>	70,9	60,0	2,8	2,2	4,7	7,0
		F11	77,9	60,0	2,7	2,2	3,9	7,0
	(groß)	F12	79,9	60,0	3,0	2,2	3,8	7,0
	(kreuz)	F13	74,1	60,0	2,1	2,2	3,5	7,0
Dreiecke	(in FR.)	L14	68,7	60,0	2,9	2,2	5,1	7,0
		<u>L04</u>	65,2	60,0	2,1	2,2	4,6	7,0
		F14	73,4	60,0	1,6	2,2	3,2	7,0
	(eg. FR.)	L15	67,8	60,0	2,8	2,2	5,1	7,0
		F15	75,1	60,0	1,8	2,2	3,3	7,0
Stochastisch	(grob)	L18	69,6	60,0	2,7	2,2	5,1	7,0
		<u>L08</u>	66,8	60,0	2,0	2,2	4,3	7,0
		F18	77,8	60,0	2,0	2,2	3,6	7,0
	(fein)	L18f	61,8	60,0	1,6	2,2	4,1	7,0
		F18f	70,8	60,0	1,7	2,2	3,3	7,0
Tropfen	(dick)	L19	66,4	60,0	3,0	2,2	4,7	7,0
		<u>L09</u>	70,9	60,0	2,9	2,2	4,8	7,0
		F19	64,4	60,0	2,4	2,2	3,8	7,0
	(dünn)	L19A	66,8	60,0	3,1	2,2	4,7	7,0
		F19A	60,5	60,0	2,6	2,2	4,6	7,0
Pflaumen		L20	60,2	60,0	2,6	2,2	4,6	7,0
		F20	73,2	60,0	3,0	2,2	3,9	7,0
Kombi		F19K	59,4	60,0	2,1	2,2	3,6	7,0
		F20K	73,0	60,0	3,2	2,2	4,8	7,0

Abbildung 4-7 Flächenbedeckung, Schichtdicke und Materialverbrauch

4.3 Ergebnisse der Laborstudie

In den folgenden Abschnitten sollen die Ergebnisse der Versuche auf Laborebene vorgestellt, analysiert und beurteilt werden.

Des Weiteren wurden drei Hauptversuchsreihen durchgeführt, analysiert und beurteilt. Die Ergebnisse der Vorversuchsreihen sind auf Grund der geänderten Untersuchungsmethodik und mangelnder Vergleichbarkeit nicht zur Analyse und Beurteilung herangezogen worden.

Dargestellt sind nun die Ergebnisse der Hauptversuchsreihe aus denen Schlüsse zu einer Abhängigkeit der Geometrie zur Schneepflugbeständigkeit von Agglomeratfahrbahnmarkierung geschlossen werden können.

Des Weiteren werden die Geometrievarianten nach ihrer Schneepflugbeständigkeit bei Tag, Nacht und Nässe beurteilt.

Eine ausführliche tabellarische Darstellung aller Messwerte, sowie weitere Diagramme finden sich im Anhang.

4.3.1 Entwicklung der Tagsichtbarkeit im Labor

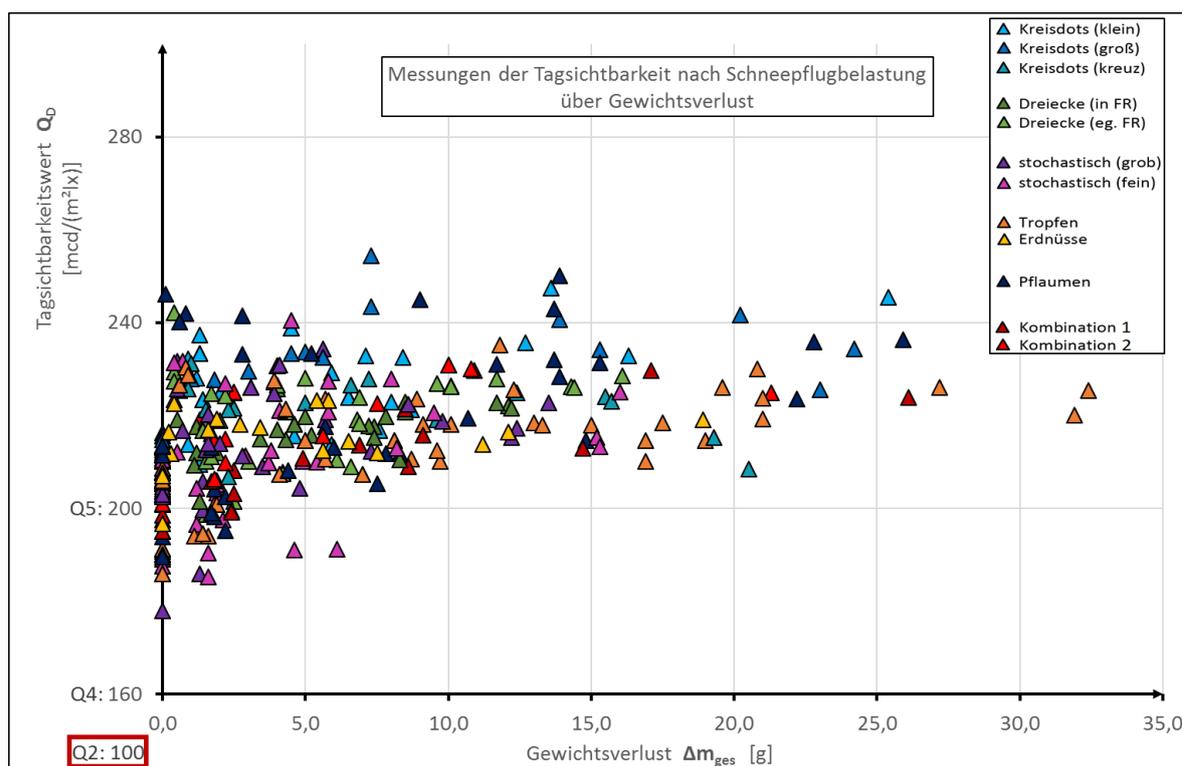


Abbildung 4-8 Laborergebnisse Tagsichtbarkeit über Gewichtsverlust

Die Ergebnisse der Tagsichtbarkeitsmessungen Proben mit großer Perle (SOLIDPLUS 30 212-850 T18) sind in Abbildung 4-8 dargestellt. Die Sichtbarkeitsklassen nach EN 1436 sind auf der Sichtbarkeitsachse markiert. Hervorgehoben ist die Sichtbarkeitsklasse, die nach ONR 22441 einzuhalten ist. Im Anhang sind die Einzelmessungen in Tabellenform aufgeführt. An dieser Stelle ist darauf zu verweisen, dass die Probekörper vor jeder Messung gewaschen und getrocknet wurden um eine Ungleichheit durch Verschmutzung in der Untersuchung zu vermeiden. Dies führt dazu dass sich der **Tagsichtbarkeitswert über die Belastungsstufen nicht verändert** und demnach auch die Geometrie keine Rolle spielt. Hierbei ist es unerheblich, ob der Gewichtsverlust oder der Schichtdickenverlust als vergleichbare Belastung angenommen werden. Die Sichtbarkeitsklasse Q4 wird nach kurzer Belastung von allen Geometrien über alle Belastungsstufen eingehalten. Somit sind sowohl die Anforderungen nach ONR 22441 als auch nach der deutschen ZTV M im Neuzustand und Gebrauchszustand eingehalten. Unterschiedliche Geometrien haben bei reiner Schneepflugbelastung keine Auswirkung auf die Tagsichtbarkeit.

4.3.2 Entwicklung der Nachtsichtbarkeit im Labor

In Folgenden sind die interpolierten Sichtbarkeitsverläufe aller untersuchten Geometrievarianten aufgetragen. In Abbildung 4-10 ist der Gewichtsverlust als Vergleichsgröße gewählt, während in Abbildung 4-11 der Nachtsichtbarkeitswert über den Schichtdickenverlust aufgetragen ist. Die Korrelation in 7.1 zeigt, dass der Gewichtsverlust die vergleichende Belastungsgröße darstellt, die sich in Schneepflugübergänge umrechnen lässt. Die Sichtbarkeitsklassen nach EN 1436 sind auf der Sichtbarkeitsachse markiert. Hervorgehoben ist hierbei zum einen die einzuhaltende Klasse im Gebrauchszustand nach ONR 22441 und ZTV M ($R_2 = RW_1$). Zum anderen ist die Klasse markiert, die im Neuzustand einzuhalten ist. Nach ONR sind dies die Klassen R4 und RW2. Nach ZTV M hingegen

sind R4 und RW3 zu erfüllen. Da der deutsche Grenzwert (RW3) bei der Nassmessung höher liegt wurde dieser hervorgehoben. Eine Tabelle der Ergebnisse jeder Geometrie ist im Anhang aufgeführt. Im speziellen sind hier aber auch die Kurven einzeln in jeweils einem Diagramm hervorgehoben. Um die Abweichung der Mittelwerte einer jeden Messung von der interpolierten Kurve einschätzen zu können sind diese ebenfalls in den angehängten Diagrammen aufgetragen.

Zuerst ist festzustellen, dass alle Geometrievarianten insgesamt bei zunehmender Belastungsgröße kontinuierlich an Sichtbarkeit verlieren. Weiterhin zeigt sich, dass die verschiedenen Geometrien schon bei unterschiedlichen Sichtbarkeitswerten starten. Die Anforderungen nach den Regelwerken sind im Neuzustand allerdings stets eingehalten. Die Entwicklung der Sichtbarkeit unter Belastung führt aber dazu, dass Geometrien bei einer bestimmten Belastungsstufe im Vergleich schlechter sichtbar sein können als Geometrien, die im Neuzustand noch sichtbarer waren. Es lässt sich also weder im trockenen, noch im nassen Zustand von der Sichtbarkeit im Neuzustand auf eine Vergleichsposition in einem vergleichbaren Belastungszustand schließen.

Alle Probekörper halten die Grenzsichtbarkeiten aus der Norm im Untersuchungsrahmen stets ein. Allerdings ist hier erneut zu erwähnen, dass die Probekörper keiner Verschmutzung und keinen weiteren Einflüssen zwischen den Messungen außer der Schürfleistenbelastung und einer Waschung ausgesetzt waren. Deshalb ist ein höherer Messwert aus der Labormessung stets als Reserve zu sehen, die unter Feldbedingungen genutzt werden kann um andere Faktoren wie Verschmutzung aufzufangen. Die Messwerte unterscheiden sich bei vergleichbarer Belastungsstufe zum Teil um das Doppelte.

Eine weitere allgemeine Beobachtung, die an dieser Stelle gemacht werden kann, ist die zum Teil **unterschiedliche Entwicklung der Sichtbarkeiten von gleichen Geometrievarianten**. Hier ist auf die unterschiedliche Ausprägung der Unterkategorien in Abbildung 4-7 zu verweisen. So haben zum Beispiel die Dreiecksvarianten L14 und L15 wesentlich größere Schichtdicken als die Varianten F14 und F15. Dies führt dazu, dass diese bei allen Nachtmessungen höhere Sichtbarkeiten erzielen. Gleiches fällt bei den Tropfenvarianten L19, L19A und F19 auf. Während die Varianten L19 und L19A sehr gute Verläufe zeigen, ist die vermeintlich gleiche Geometrievariante F19 besonders bei der Nassmessung deutlich weniger sichtbar. Festzuhalten ist die Erkenntnis, dass die Ausführungsart der Geometrie sehr großen Einfluss auf ihre Schneepflugbeständigkeit haben kann.

Zusätzlich fällt auf, dass von Sichtbarkeitsverläufen im **Trockenzustand nicht auf** die Verläufe im **Nasszustand** geschlossen werden kann. In Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 fallen allgemein die Nachtsichtbarkeitswerte von trockenen **Kreisdots** früh unter die Werte der anderen Geometrievarianten. Bei der Sichtbarkeit im Nasszustand (Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13) sind ihre Verläufe weniger stark abfallend als die der übrigen Geometrievarianten.

Deutlich hervorzuheben ist schließlich noch die auf den ersten Blick **beste Geometrievariante** der Laborstudie. Der Nachtsichtbarkeitsverlauf der **Kombination 2 (F20K)**, welche ursprünglich als fehlerhafte Geometrievariante beschrieben wurde ist sowohl im trockenen, als auch im nassen Zustand stets als sehr sichtbar einzustufen. Ebenfalls gilt dies

für beide Belastungsgrößen. **Kombination 2** sollte ursprünglich als **Pflaumengeometrie** appliziert werden. Allerdings sind einige Reihen schmaler und verfügen über eine höhere Schichtdicke, sodass diese Ähnlichkeit zur **Erdnussgeometrie** haben.

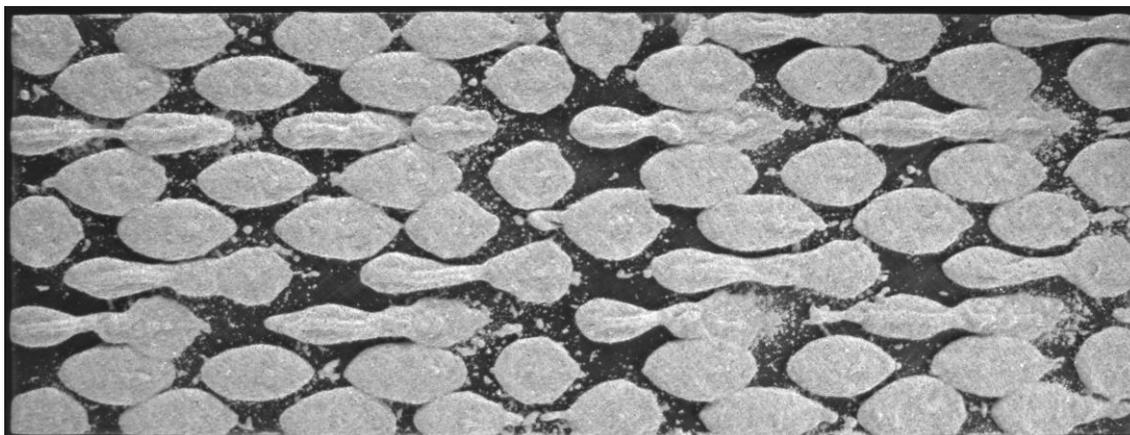


Abbildung 4-9 Geometrievariante Kombination 2 (F20K)

Die Beurteilung wird im Kapitel 7 unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Feldstudie weitergeführt.

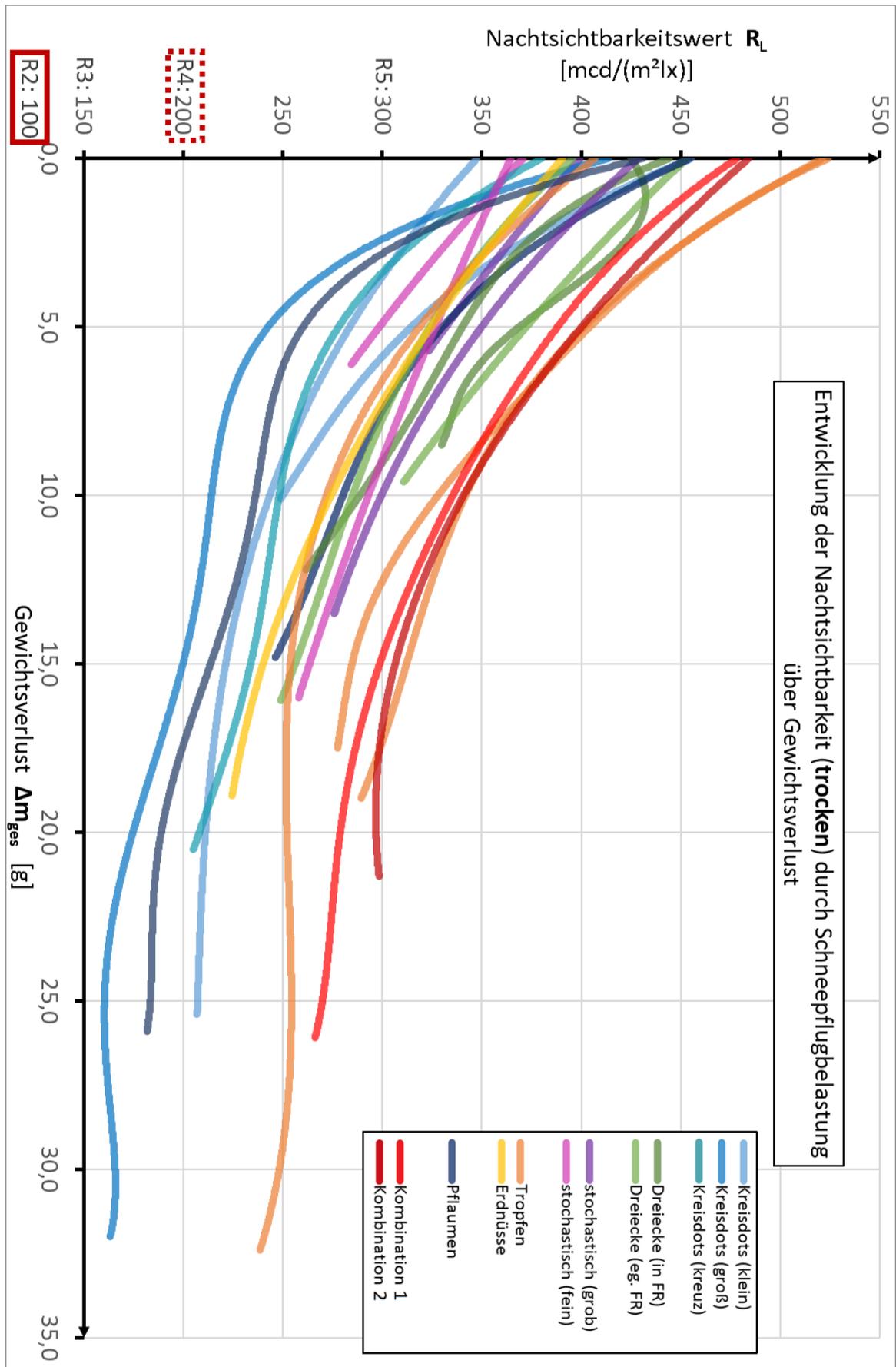


Abbildung 4-10 Laborergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Trockenmessung) über Gewichtsverlust

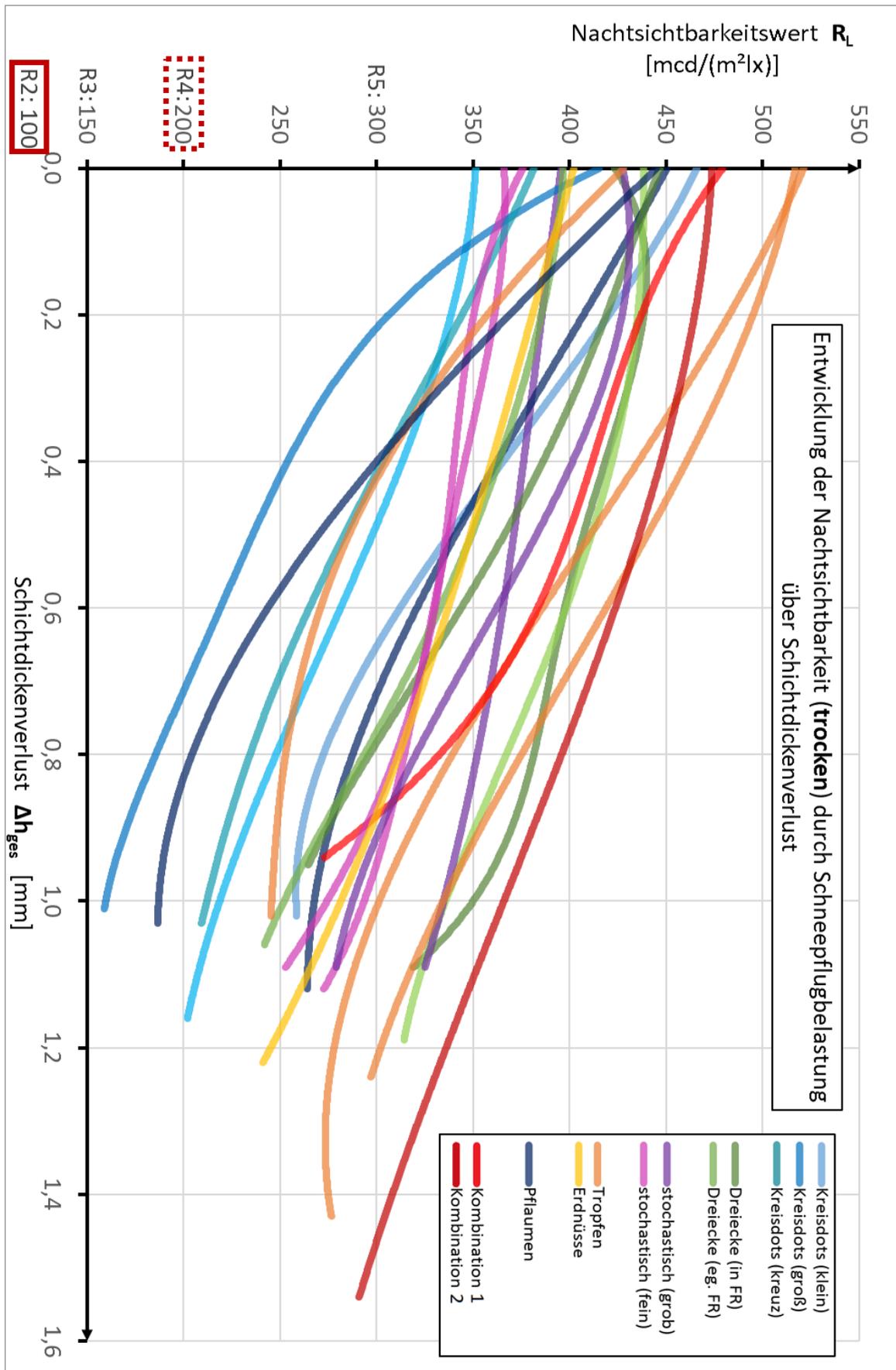


Abbildung 4-11 Laborergebnisse Entwicklung der Nachsichtbarkeit (Trockenmessung) über Schichtdickenverlust

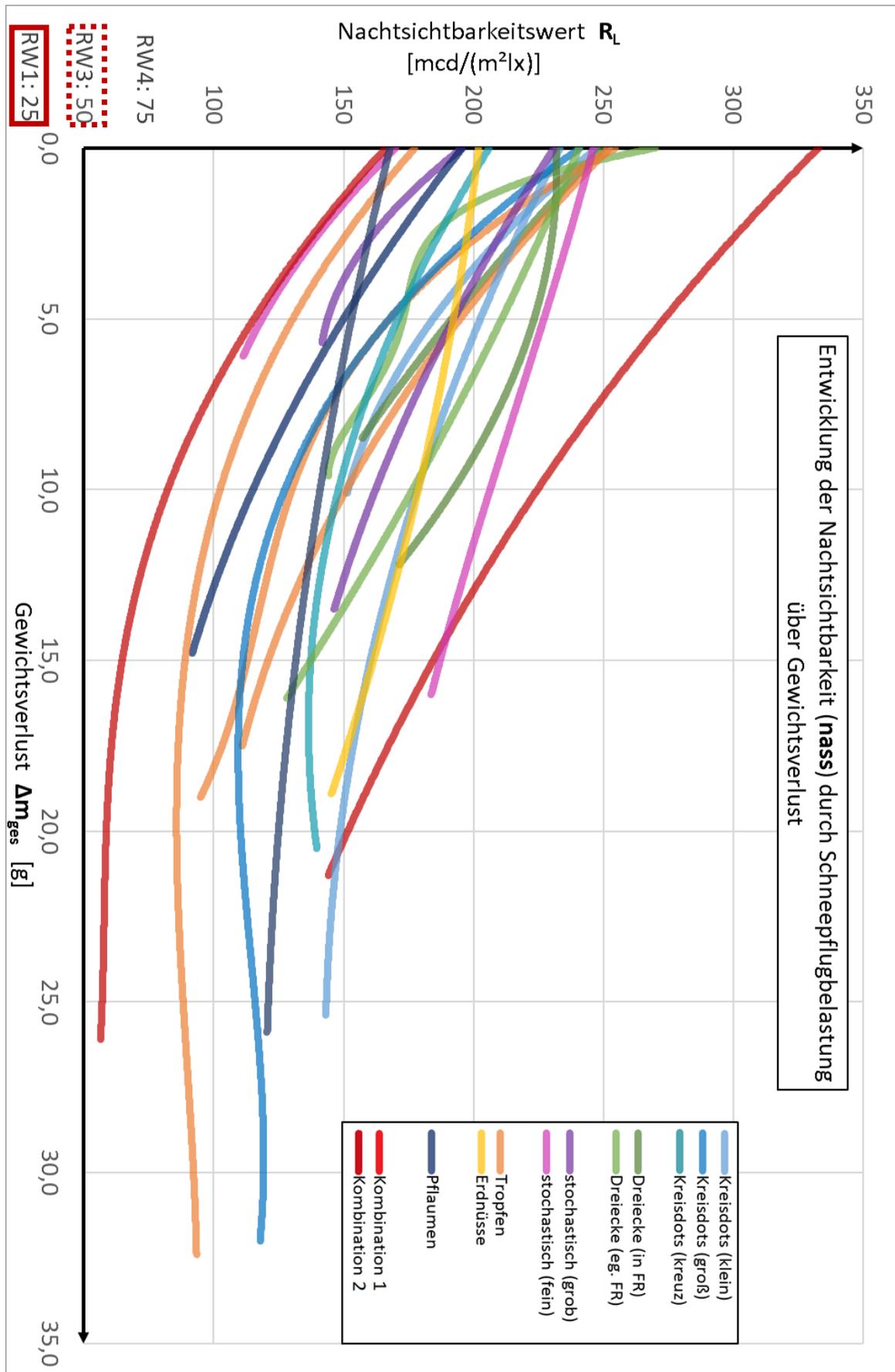


Abbildung 4-12 Laborergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Nassmessung) über Gewichtsverlust

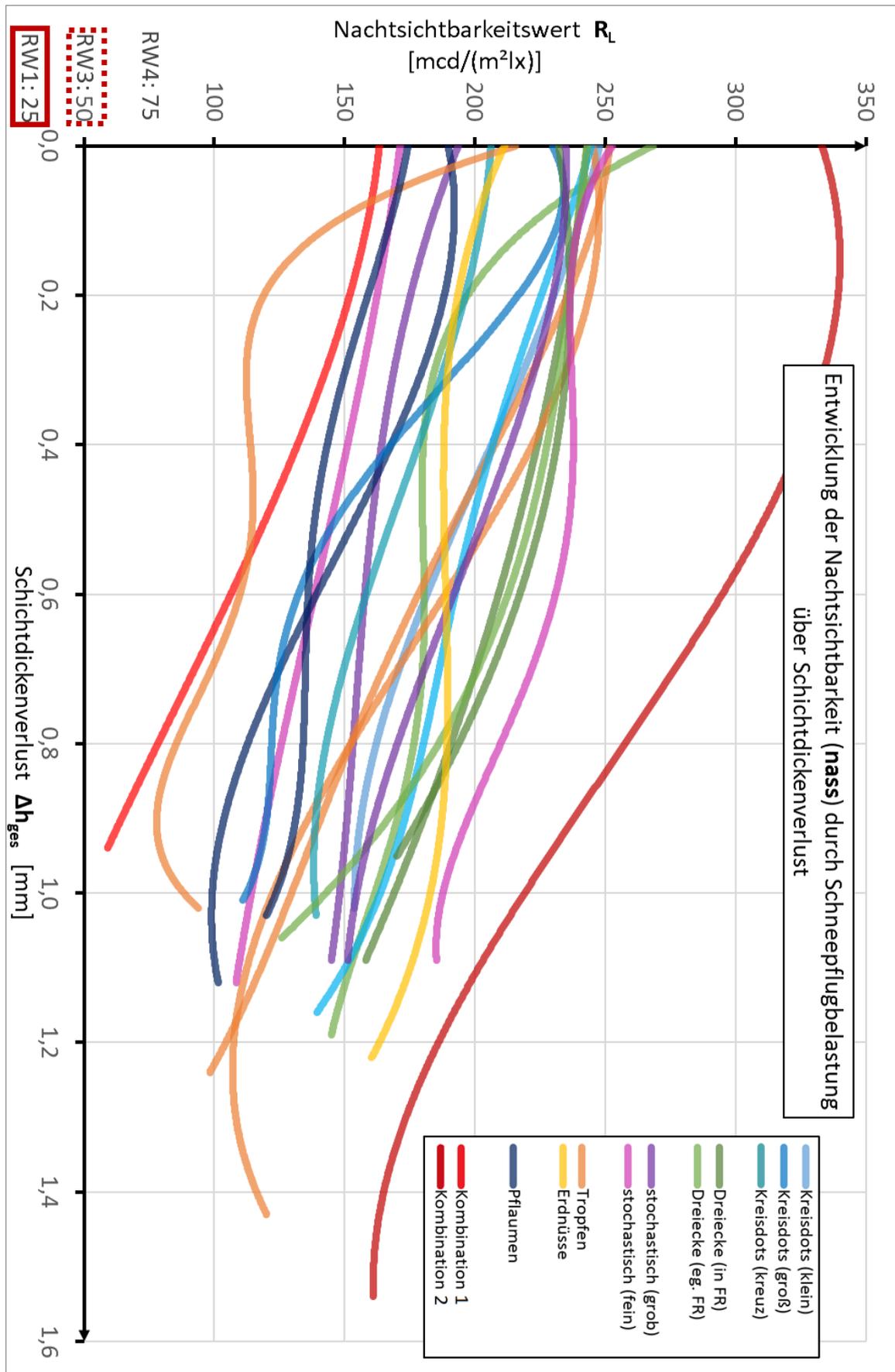


Abbildung 4-13 Laborergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Nassmessung) über Schichtdickenverlust

4.3.3 Auswirkungen der Perlengröße

Der Einfluss der Perlengröße wurde gesondert betrachtet. In den folgenden Tabellen wird die Nachsichtbarkeit, Tagsichtbarkeit und Nachsichtbarkeit bei Nässe vergleichend aufgeführt.

Geometrie		Q _D trocken [mcd/(m ² lx)]							
		unbearbeitet				abgenutzt			
		"große" Perle SOLIDPLUS 30 212-850 T18		"kleine" Perle SOLIDPLUS 30 212-425 T18		"große" Perle SOLIDPLUS 30 212-850 T18		"kleine" Perle SOLIDPLUS 30 212-425 T18	
		MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
L11 / L01	PK 1	206	210	206	208	223	223	237	229
	PK 2	216		208		226		225	
	PK 3	208		211		221		226	
L14 / L04	PK 1	213	209	202	208	223	220	222	221
	PK 2	206		209		216		219	
	PK 3	208		214		221		222	
L18f / L08	PK 1	188	191	219	215	191	197	236	225
	PK 2	195		207		191		223	
	PK 3	191		220		210		216	
L19 / L09	PK 1	196	200	210	208	223	215	221	218
	PK 2	207		212		196		220	
	PK 3	196		203		226		213	

Abbildung 4-14 Vergleich Tagssichtbarkeitswerte Q_D der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung

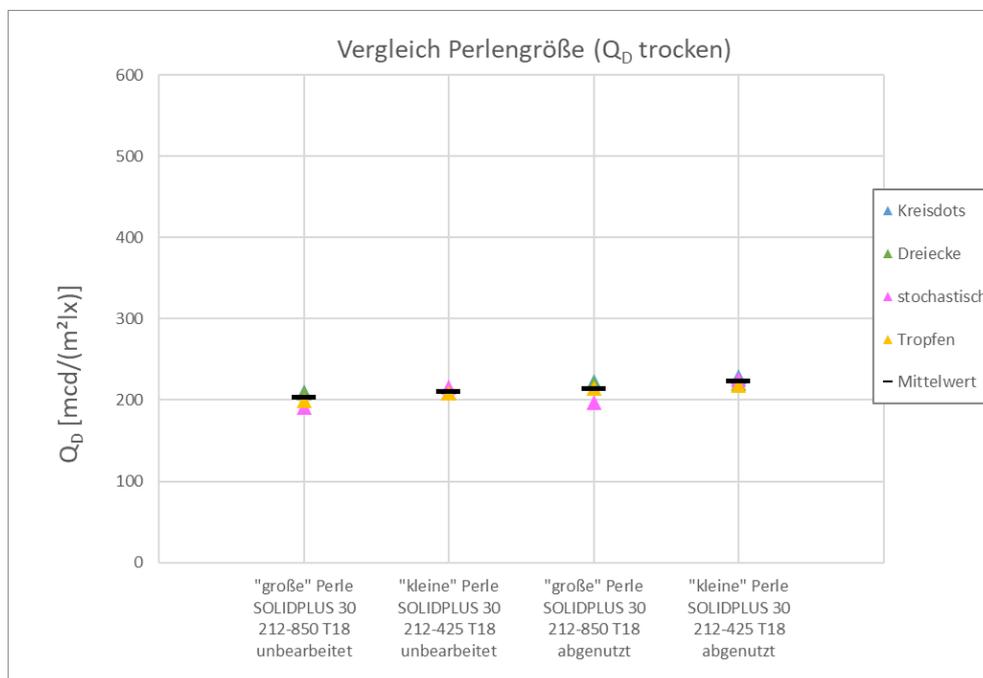


Abbildung 4-15 Vergleich Tagssichtbarkeitswerte Q_D der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung

Beim Tagssichtbarkeitswert (Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15) ist kein Einfluss der Perlengröße zu erkennen. Im unbearbeiteten und abgenutzten Zustand sind keine unterschiedlichen Entwicklungen des Leuchtdichtekoeffizienten zu erkennen.

Geometrie		R _L trocken [mcd/(m ² lx)]							
		unbearbeitet				abgenutzt			
		"große" Perle SOLIDPLUS 30 212-850 T18		"kleine" Perle SOLIDPLUS 30 212-425 T18		"große" Perle SOLIDPLUS 30 212-850 T18		"kleine" Perle SOLIDPLUS 30 212-425 T18	
			MW		MW		MW		MW
L11 / L01	PK 1	452	460	374	386	240	283	227	255
	PK 2	468		384		348		300	
	PK 3	461		399		261		238	
L14 / L04	PK 1	423	425	420	430	376	411	369	387
	PK 2	415		417		427		394	
	PK 3	435		454		429		399	
L18f / L08	PK 1	406	394	372	358	306	312	301	295
	PK 2	375		343		331		301	
	PK 3	403		359		299		283	
L19 / L09	PK 1	502	523	442	448	360	382	335	342
	PK 2	544		468		383		350	
	PK 3	523		435		404		343	

Abbildung 4-16 Vergleich Nachtsichtbarkeitswerte R_L trocken der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung

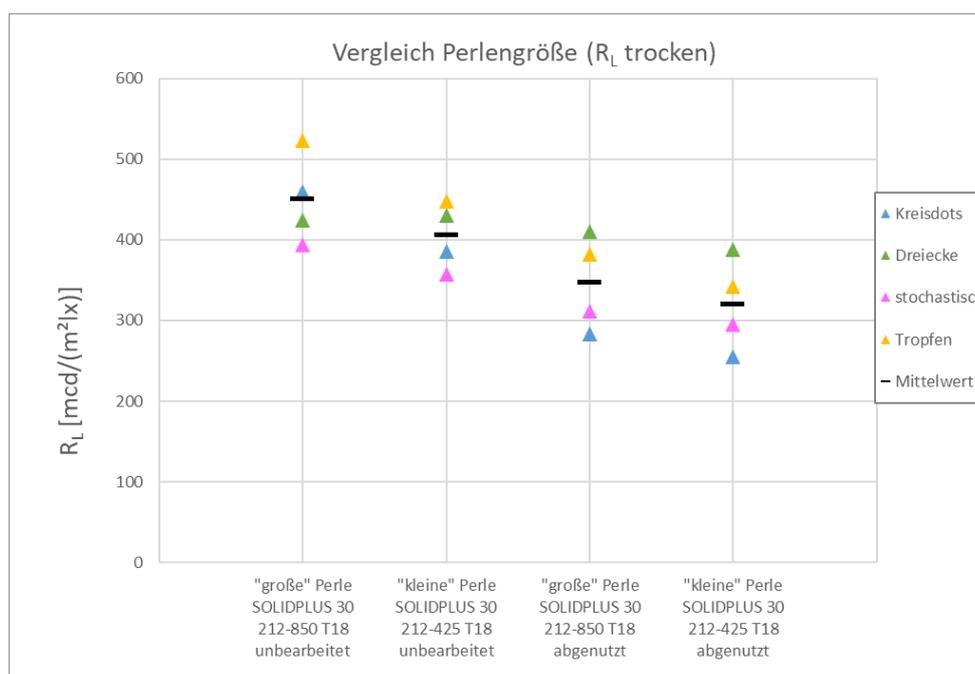


Abbildung 4-17 Vergleich der Nachtsichtbarkeitswerte R_L trocken der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung

Bei den Nachtsichtbarkeitsmessungen Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-19 sind hingegen Unterschiede zu erkennen. Sowohl bei der Nassmessung als auch bei der Trockenmessung schneiden Proben mit „kleiner“ Perle schlechter ab. Allerdings soll nicht die Güte der Perlen verglichen, sondern der Einfluss auf ein Geometrieranking analysiert werden. Zwar liegt der gemittelte Messwert der Kreisdots, bei der unbearbeiteten Probe im trockenen Zustand, einmal oberhalb und einmal unterhalb dem der Dreiecke. Dennoch kann aus den Messungen im abgenutzten Zustand sowie im allgemeinen nassen Zustand kein Einfluss der Perlengröße auf ein Geometrieranking abgelesen werden.

Geometrie		R _L nass [mcd/(m ² lx)]							
		unbearbeitet				abgenutzt			
		"große" Perle SOLIDPLUS 30 212-850 T18		"kleine" Perle SOLIDPLUS 30 212-425 T18		"große" Perle SOLIDPLUS 30 212-850 T18		"kleine" Perle SOLIDPLUS 30 212-425 T18	
			MW		MW		MW		MW
L11 / L01	PK 1	261		212		176		138	
	PK 2	229	250	195	180	218	196	150	125
	PK 3	259		132		194		88	
L14 / L04	PK 1	255				126			
L14 / L04	PK 2	248	256	133	135	234	215	113	112
	PK 3	265		147		219		125	
	L18 / L08	PK 1		179				135	
L18 / L08	PK 2	189	198	116	139	159	149	134	127
	PK 3	226		167		142		129	
	L19 / L09	PK 1		229				168	
L19 / L09	PK 2	250	245	194	190	187	184	149	137
	PK 3	256		209		193		144	

Abbildung 4-18 Vergleich der Nachtsichbarkeitswerte R_L nass der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung

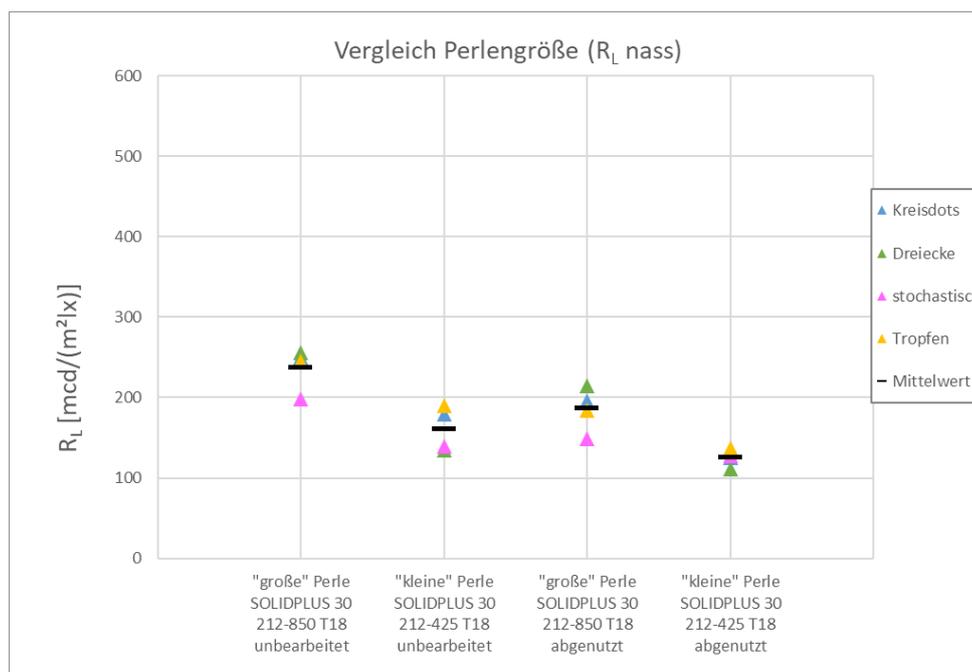


Abbildung 4-19 Vergleich der Nachtsichbarkeitswerte R_L nass der Probekörper mit SOLIDPLUS 30 212-425 und SOLIDPLUS 30 212-850 vor und nach Belastung

Aussagen die über die Widerstandsfähigkeit von Agglomeratgeometrien gemacht werden, gelten sowohl für „kleine“ als auch für „große“ Perlen. Eine alleinige Betrachtung der großen Perlen zur Ermittlung der optimalen Geometrie ist somit ausreichend. Dies ist eventuell darauf zurückzuführen, dass nach wiederholten Schneepflugbelastungen lediglich Oberflächen mit völlig zerstörten oder mit völlig intakte Glasperlen entstehen. Effekte wie ein einzeltes Herausbrechen der Glasperlen sind sowohl im Labor als auch im Feld nicht zu beobachten.

5 Feldstudie

Wie bereits zu Beginn erläutert, sollen mit Hilfe der Feldstudie verschiedene Ziele realisiert werden. Auf der einen Seite dient die Feldstudie, in der die Fahrbahnmarkierung unmittelbar dem tatsächlichen Lastkollektiv aus (Schwerlast)Verkehr und Winterdienstesatz ausgesetzt ist, der Validierung und Optimierung des entwickelten Labortests zur Schneepflugbelastung und Prognose sowie Optimierung der verbleibenden Leuchtdichten nach mechanischer Belastung. Auf der anderen Seite soll die Feldstudie aber auch dazu dienen, bereits im Vorgriff auf eine Prüfung zur Einsatzfreigabe abzuschätzen, wie sich die geometrisch verschiedenen Markierungssysteme verhalten.

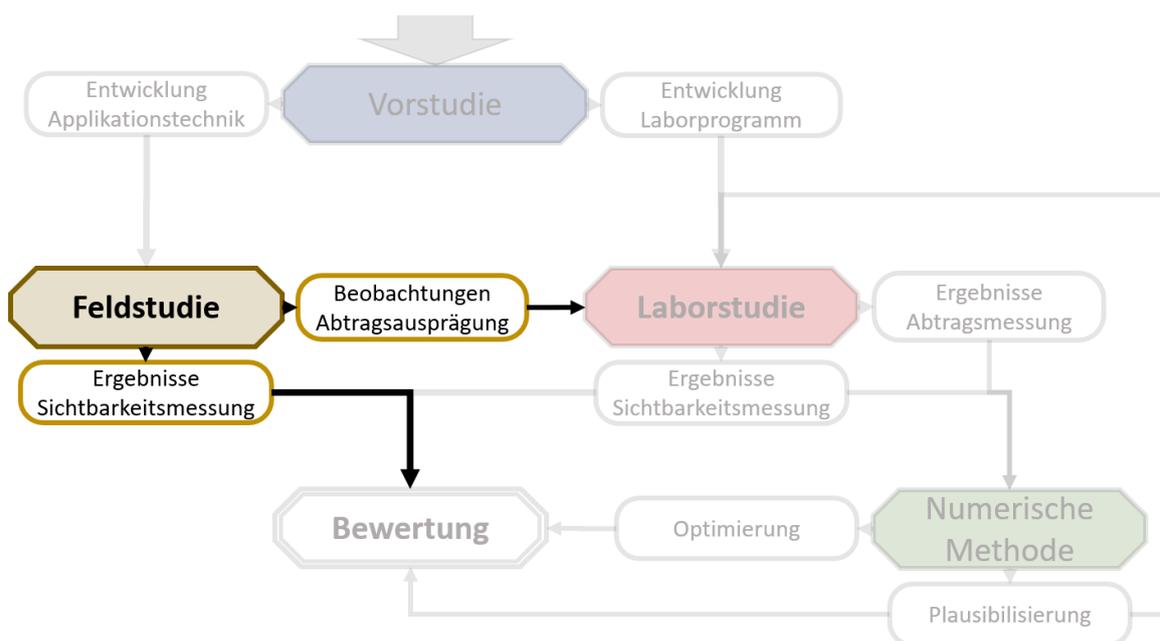


Abbildung 5-1 Konzept Feldstudie

In dieser Hinsicht wurden zunächst einige Vorüberlegungen für die Durchführung der Feldstudie getätigt. Diese sollen im Rahmen des folgenden Abschnitts erläutert werden, bevor im Anschluss die applizierte Variantenmatrix sowie die Ergebnisse der bisher durchgeführten Leuchtdichtemessung auf der A1 vorgestellt werden sollen.

5.1 Teststrecke und Variantenmatrix

Im Rahmen der folgenden drei Abschnitte sollen zunächst die Gegebenheiten vor Ort, die Applikationstechnik und die Variantenmatrix vorgestellt werden bevor im Anschluss die Ergebnisse der bisherigen Messungen der Leuchtdichten, sowie sonstige Beobachtungen dargestellt und interpretiert werden.

5.1.1 Teststrecke

Die für die im Rahmen dieses Projekts zu realisierende Feldstudie vorgesehene Teststrecke befindet sich auf der A1 in Fahrtrichtung Wien. Genauer handelt es sich um den zur Autobahnmeisterei Pressbaum gehörigen Abschnitt zwischen Kilometer 29+500 bis 23+500.



Abbildung 5-2 Fahrbahnrandmarkierung auf der Teststrecke an Stationierungskilometer 25+750 der A1 in Fahrtrichtung Wien 12.10.2017

Der vorliegende Asphaltbelag ist bereits mehrfach mit einfacher Markierungsfarbe markiert worden, sodass die neue Agglomeratmarkierung sachgemäß auf einem durchgehenden Unterstrich appliziert ist. Die stichprobenartig aufgenommenen Leuchtdichten der Altmarkierung erreichten dabei die nach ONR und EN 1436 geforderten Grenzwerte.

Die gesamte Teststrecke ist in Segmente mit einer Länge von 250 m eingeteilt in denen jeweils gleichartige Markierungen appliziert ist. Eine Segmentlänge von 250 ist dabei mindestens notwendig, um Einflüsse aus Steigung und Kurven auszuschließen beziehungsweise über die Mittelwertbildung vieler Messwerte in Ihrer Auswirkung einzuschränken.

5.1.2 Variantenmatrix

Die bereits im Rahmen der Vorversuchsreihen applizierten Varianten sollten alsdann auch im Rahmen der Feldstudie appliziert werden. Die Applikation der Agglomeratfahrbahnmarkierungen auf der A1 musste aus maschinentechnischen Gründen auf 3 Tage aufgeteilt werden (31.05. und 01.06.2016 sowie 04.07.2016).

Wie auch bei den Vorversuchsreihen wurden eine 2-Komponenten-Kaltplastik vom Typ **Stollreflex D1249** und zwei verschiedene Glasperlen (fein und grob) des Typs **SOLIDPLUS 30 212-425 T18** oder **SOLIDPLUS 30 212-850 T18** für alle Muster gleichermaßen verwendet.

In untenstehender Abbildung 5-3 findet sich daher eine vollständige Aufzeichnung der örtlichen Lage aller Varianten.

V01 fehler	29+500 - 29+450	V18	28+000 - 27+950	V10 fehler	26+500 - 26+450	V09	25+000 - 24+950
V01	29+450 - 29+400	stochastisch	27+950 - 27+900	Kombination	26+450 - 26+400	Tropfen	24+950 - 24+900
Kreisdots	29+400 - 29+350	(grob)	27+900 - 27+850	2	26+400 - 26+350		24+900 - 24+850
(klein)	29+350 - 29+300		27+850 - 27+800		26+350 - 26+300		24+850 - 24+800
	29+300 - 29+250		27+800 - 27+750		26+300 - 26+250		24+800 - 24+750
V11	29+250 - 29+200	V08	27+750 - 27+700	V09 fehler	26+250 - 26+200	V04	24+750 - 24+700
Kreisdots	29+200 - 29+150	stochastisch	27+700 - 27+650	Kombination	26+200 - 26+150	Dreiecke	24+700 - 24+650
(klein)	29+150 - 29+100	(grob)	27+650 - 27+600	1	26+150 - 26+100	(in FR)	24+650 - 24+600
	29+100 - 29+050		27+600 - 27+550		26+100 - 26+050		24+600 - 24+550
	29+050 - 29+000		27+550 - 27+500		26+050 - 26+000		24+550 - 24+500
V12 fehler	29+000 - 28+950	V08F	27+500 - 27+450	V19 fehler	26+000 - 25+950	V05	24+500 - 24+450
V12	28+950 - 28+900	stochastisch	27+450 - 27+400	Kombination	25+950 - 25+900	Dreiecke	24+450 - 24+400
Kreisdots	28+900 - 28+850	(fein)	27+400 - 27+350	1	25+900 - 25+850	(entg FR)	24+400 - 24+350
(groß)	28+850 - 28+800		27+350 - 27+300		25+850 - 25+800		24+350 - 24+300
	28+800 - 28+750	Ausfahrt	27+300 - 27+250		25+800 - 25+750		24+300 - 24+250
V02	28+750 - 28+700	Ausfahrt	27+250 - 27+200	V10	25+750 - 25+700	V14	24+250 - 24+200
Kreisdots	28+700 - 28+650	V18F	27+200 - 27+150	Pflaumen	25+700 - 25+650	Dreiecke	24+200 - 24+150
(groß)	28+650 - 28+600	stochastisch	27+150 - 27+100		25+650 - 25+600	(in FR)	24+150 - 24+100
	28+600 - 28+550	(fein)	27+100 - 27+050		25+600 - 25+550		24+100 - 24+050
	28+550 - 28+500		27+050 - 27+000		25+550 - 25+500		24+050 - 24+000
V03	28+500 - 28+450	zu verwerfen	27+000 - 26+950	V20	25+500 - 25+450	V15	24+000 - 23+950
Kreisdots	28+450 - 28+400		26+950 - 26+900	Pflaumen	25+450 - 25+400	Dreiecke	23+950 - 23+900
(kreuz)	28+400 - 28+350		26+900 - 26+850		25+400 - 25+350	(entg FR)	23+900 - 23+850
	28+350 - 28+300		26+850 - 26+800		25+350 - 25+300		23+850 - 23+800
	28+300 - 28+250		26+800 - 26+750		25+300 - 25+250		23+800 - 23+750
V13	28+250 - 28+200	V20 fehler	26+750 - 26+700	V19 fehler	25+250 - 25+200	19A	23+750 - 23+700
Kreisdots	28+200 - 28+150	Kombination	26+700 - 26+650	Kombination	25+200 - 25+150	Erdnüsse	23+700 - 23+650
(kreuz)	28+150 - 28+100	2	26+650 - 26+600	V19	25+150 - 25+100	09A	23+650 - 23+600
	28+100 - 28+050		26+600 - 26+550	Tropfen	25+100 - 25+050	Erdnüsse	23+600 - 23+550
	28+050 - 28+000		26+550 - 26+500		25+050 - 25+000		23+550 - 23+500

Abbildung 5-3 Variantenmatrix Feldstudie A1

5.2 Prüfplan zur Überwachung der Leuchtdichten

Um die durch Verkehrsbelastung und Winterdienst abnehmenden Werte der Tages- und Nachtsichtbarkeit systematisch zu erfassen und im Anschluss eine tatsächliche Rangfolge der Leuchtdichten der Varianten zu erhalten. Diese wird zum Abgleich mit dem Labortest zur Verkehrs- und Schneepflugbelastung genutzt. Mit Hilfe des folgenden Schemas wurde die Entwicklung systematisch hinsichtlich lichttechnischer Eigenschaften überwacht:



Abbildung 5-4: Prüfplan zur Überwachung des Leuchtdichteverlaufs

5.3 Ergebnisse der Feldstudie

Die am 31. Mai und 1. Juni 2016 applizierten Varianten wurden durch Herrn Prof. Dr. Fred Scheuer am 21. und 22. Juni 2016 vermessen. Während die Leuchtdichtewerte am 4. Juli 2016 applizierten Varianten von Herrn Prof. Dr. Fred Scheuer am 22. Juli 2016 erfasst wurden

Die Messung vor dem ersten Winter konnte aufgrund des Wetters nicht durchgeführt werden.

Der entsprechende Autobahnabschnitt wurde im Winter 16/17 **27-mal von einem Schneepflug überfahren**. Die darauffolgende wurden am 18. Mai 2017 durchgeführt.

Am 12. Oktober 2017 wurde die Messung vor dem Winter durchgeführt. Die Autobahnmeisterei übermittelte nach dem Winter 17/18 **37 Schneepflugüberfahrungen**.

Die Abschlussmessung konnte aufgrund des Wetters erst am 26. Juni 2018 durchgeführt werden.

Der **DTV** wurde für den gesamten Zeitraum der Feldstudie durch die Straßenmeisterei Pressbaum auf **27.000 Kfz/d** geschätzt.



Abbildung 5-5 Durchführung einer Nassmessung auf trockener Fahrbahn

5.3.1 Ergebnisse der Leuchtdichtemessung im Feld

Jeder einer Variante zugehörige 250 m Abschnitt wurde dabei zusätzlich in fünf kleinere Abschnitte geteilt in denen jeweils eine definierte Anzahl von Messwerten erfasst wurde. Insgesamt wurden pro geometrischer Ausprägung bei jedem Messtermin 100 Trockenmessungen und 36 Nassmessungen durchgeführt. Einige Felder fallen kleiner aus Abbildung 5-4. Alle Messungen wurden nach DIN EN 1436 mit einem ZRM 6014 Gerät der Firma Delta durchgeführt.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind die gebildeten Mittelwerte der in Abbildung 5-4 dargestellten Abschnitte. Dabei handelt es sich um eben diejenigen Abschnitte in denen auch die Prüfbleche für die Laborversuche entnommen wurden. Eine tabellarische Darstellung der Ergebnisse findet sich im Anhang.

Dem Prüfplan ist zu entnehmen, dass einige Felder als fehlerhaft interpretiert wurden. Erst nach den überraschend positiven Laborergebnissen dieser Fehlergeometrien wurden diese Felder in der Feldstudie auf ihre Leuchtdichte mit einer Nassmessung untersucht. Bei ausreichender Korrelation der Feld- und Laborstudie kann allerdings auf fehlende Messungen geschlossen werden. Die Güte der Korrelation wird durch das Fehlen einzelner Messwerte nicht bedroht. Des Weiteren ist die letzte Messung für eine Bewertung im Rahmen der Feldstudie aufgrund der stetigen Abnahme der Leuchtdichte als die relevante anzunehmen. Beim letzten Feldmessungstermin wurden alle Felder im vollem Umfang geprüft.

Tagsichtbarkeit

Wie in Abbildung 5-6 dargestellt erreichen alle Geometrievarianten nach zwei Jahren Belastung durch Verkehr und Winterdienst den Grenzwert. Allerdings ist aufgrund der Laborergebnisse zu sagen, dass der maßgebliche Bereich, der für einen hohen Tagsichtbarkeitswert sorgt die abgenutzte Kuppe ist. Während in der Laborstudie deshalb die Tagsichtbarkeitswerte durch Belastung eher anstiegen, kann dies über die Sichtbarkeit im Feld nicht gesagt werden. Vielmehr stellt sich nach 2 Jahren Belastung eine Stagnation ein. Der durchschnittliche **Leuchtdichteverlust** bezogen auf die jeweilige vorherige Messung ist im **ersten Winter 20%, im Sommer 9 % und im letzten Winter -1 %**. Es ist anzunehmen, dass die Tagsichtbarkeit sich nicht maßgeblich weiter verschlechtert. Die Tagsichtbarkeit im Feld ist maßgeblich von der Verschmutzung der Kuppen abhängig. Da dies aber keinen direkten Schluss auf die Verschmutzung der Flanken zulässt, sollen die Werte nicht weiter interpretiert werden. Eine abschließende Bewertung findet in Kapitel 7 statt.

Nachtsichtbarkeit trocken

Auch die Grenz-Nachtsichtbarkeit wird von allen Geometrievarianten eingehalten. Insgesamt ist kein Unterschied bei verschiedenen Perlengrößen zu erkennen. Zwar gibt es teilweise deutliche Abweichungen bei der Betrachtung einzelner Geometrievarianten. Diese fallen aber bei allen Belastungsstufen sowohl zu Gunsten der kleineren also auch der größeren Perlen aus. Dies gilt als Bestätigung dafür, dass es große Unterschiede in der tatsächlich ausgeführten Geometrie geben kann, auch wenn die selbe Geometrie angestrebt wurde.

Im Feld ist ebenfalls eine stetige Abnahme in allen Messfeldern zu beobachten. Hierbei ist es sehr wichtig festzustellen, dass die Abnahme sehr viel größer ausfällt, wenn zwischen den Messterminen ein Winter lag. Der durchschnittliche **Leuchtdichteverlust** bezogen auf die jeweilige vorherige Messung ist im **ersten Winter 40%, im Sommer 6 % und im letzten Winter 29 %**. Die Standartabweichung dieser Mittelwerte ist allerdings bedeutend höher als die der Tagsichtbarkeitsmessung, sodass einige Geometrien bei Nacht deutlich weniger Leuchtdichte verlieren.

Besonders hervorzuheben sind die **Kombinationen 1 und 2** (fehlerhafte Tropfen und Pflaumen) und alle **Kreisdots**. Während die gemessenen Nachtsichtbarkeitswerte der **Kombinationen** bei der letzten Messung teilweise den Grenzwert noch um das 3-fache überschreiten, sind viele Felder der **Kreisdots** deutlich näher am Grenzwert. Eine abschließende Bewertung findet in Kapitel 7 statt.

Nachtsichtbarkeit nass

Der bei Nässe gemessene Nachtsichtbarkeitswert unterschreitet häufiger den Grenzwert. Die Felder mit der groben Perle waren bei der letzten Messung immer mindestens gleich sichtbar, wie die Felder mit kleiner Perle. In einigen Fällen sind auch deutliche Unterschiede zu Gunsten der groben Perlen zu erkennen. Bei der ersten Messung im Sommer 2016

liegen die Nassmesswerte der Felder mit groben Perlen bei durchschnittlich 157% der Felder mit kleinen Perlen. Im Sommer 2018 sind es noch 117%.

Der Leuchtdichtkoeffizient der Nassmessung nimmt stetig ab. Der durchschnittliche **Leuchtdichteverlust** bezogen auf die jeweilige vorherige Messung ist im **ersten Winter 39%, im Sommer 14 % und im letzten Winter 34 %**. Auch hier sind allerdings deutliche Unterschiede zwischen den Geometrievarianten zu erkennen.

Mit niedrigen gemessenen Sichtbarkeiten bei Nässe im Sommer 2018 fallen besonders alle Dreiecke, **Erdnüsse**, die **Kombination 1** und **stochastisch** verteilte Agglomerate auf. Höhere Sichtbarkeiten erzielen **Kreisdots**, **Pflaumen** und die **Kombination 2** (fehlerhafte Pflaumen). Eine abschließende Bewertung findet in Kapitel 7 statt.

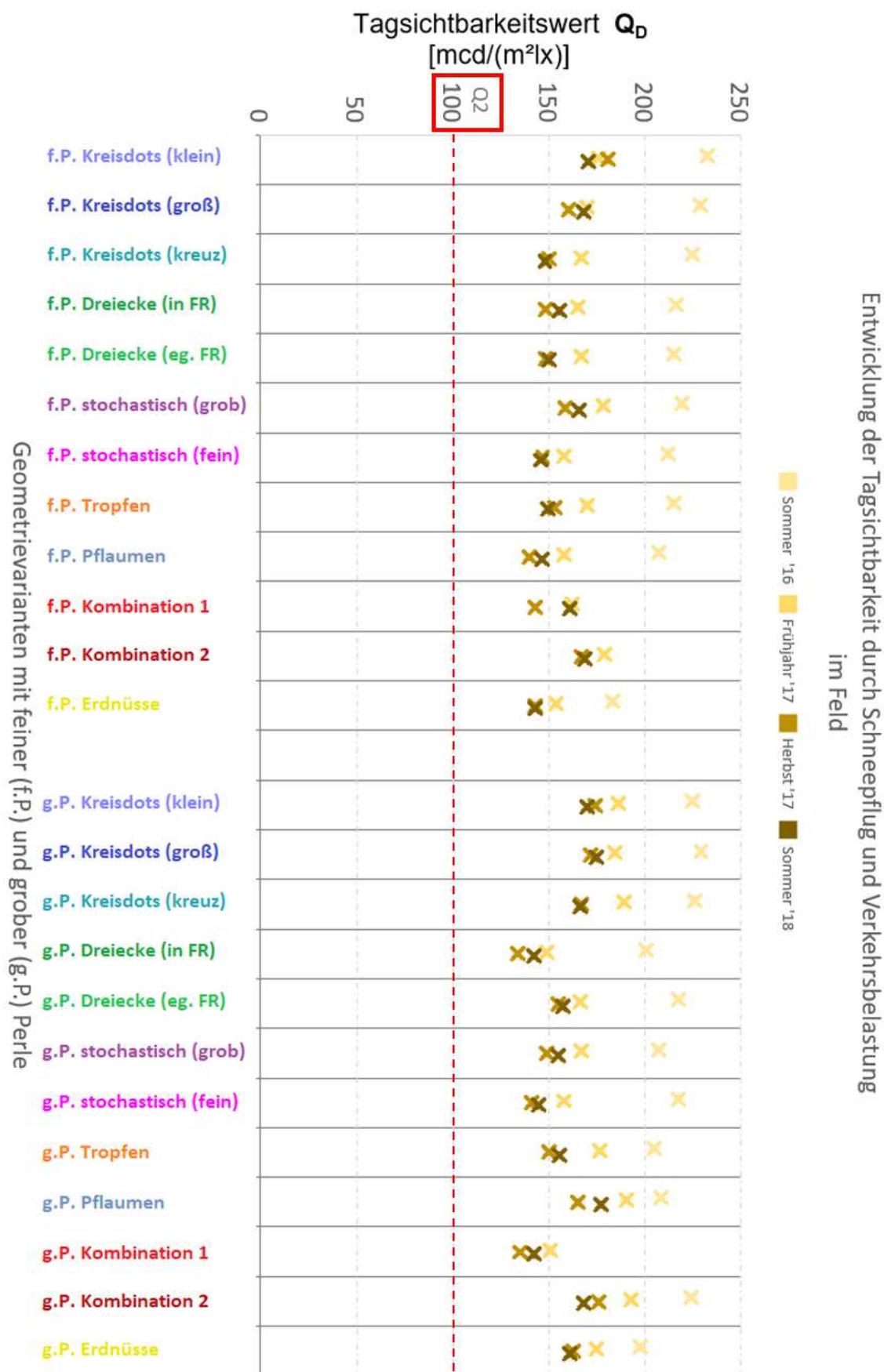


Abbildung 5-6 Feldmessungsergebnisse Entwicklung der Tagsichtbarkeit

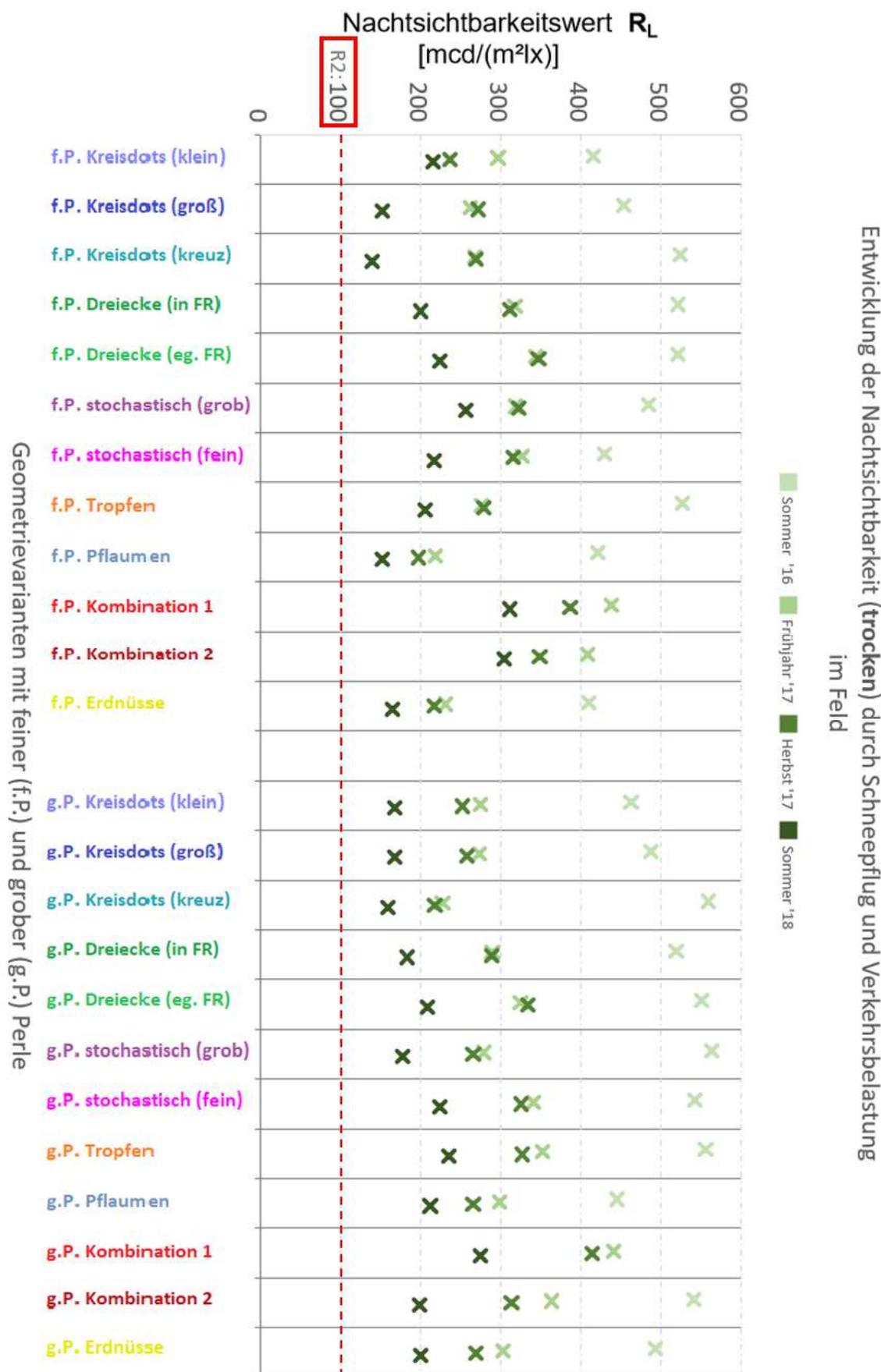


Abbildung 5-7 Feldmessungsergebnisse Entwicklung der Nachsichtbarkeit (Trockenmessung)

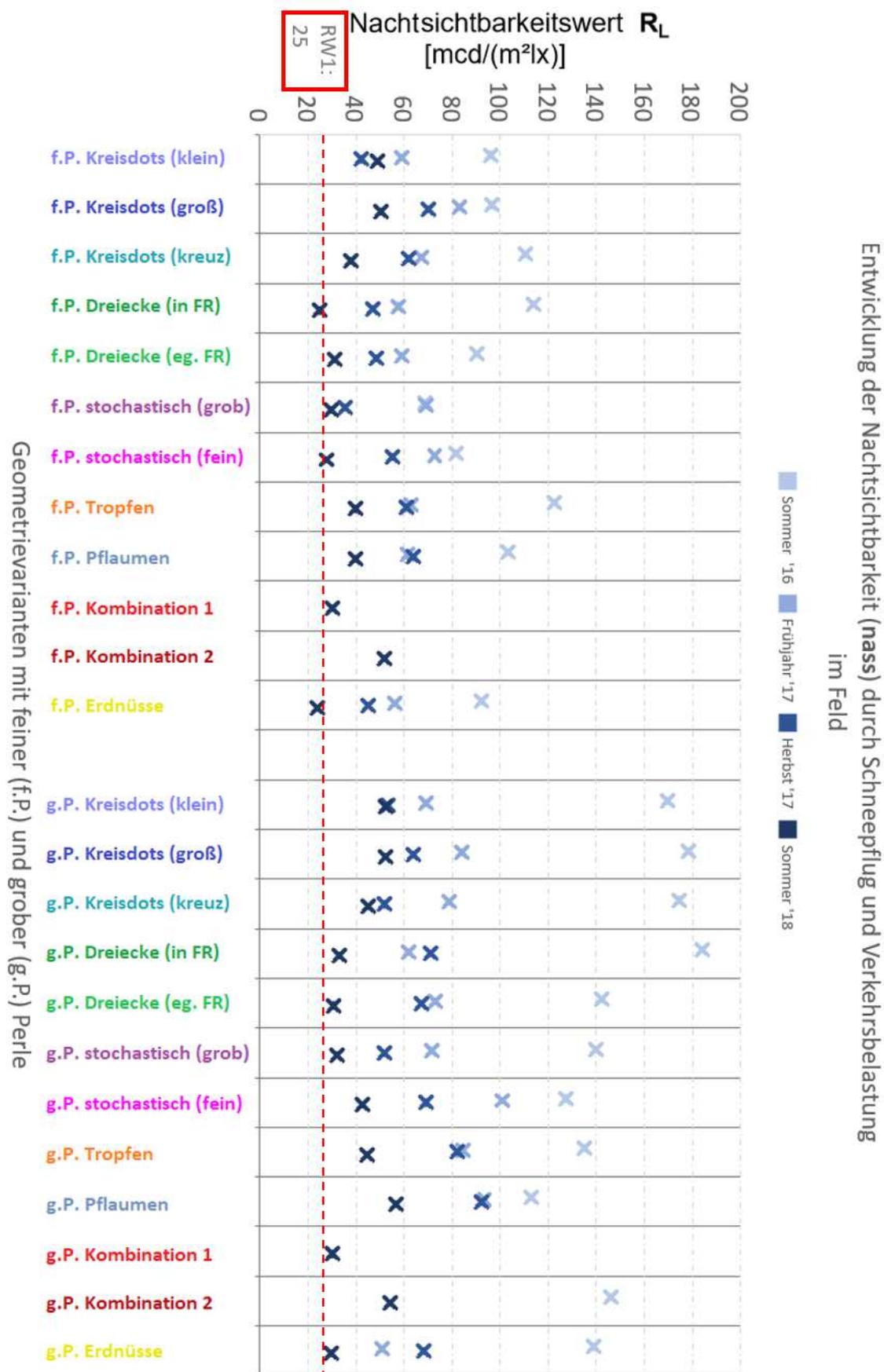


Abbildung 5-8 Feldmessungsergebnisse Entwicklung der Nachtsichtbarkeit (Nassmessung)

5.3.2 Beobachtungen

Bei den Messterminen konnten neben den Messwerten noch weitere Beobachtungen gemacht werden, die maßgeblich zur Bewertung der Messwerte als auch zur Entwicklung des Laborverfahrens beigetragen haben.

Die Agglomeratmarkierung verschmutzt an unterschiedlichen Stellen in unterschiedlicher Ausprägung. Auf den abgenutzten Kuppen stellt sich eine rostbraune Verfärbung ein. Es scheint, dass die Verfärbung zunimmt, wenn größere Höhen abgetragen wurden, wie beispielhaft an dem Detail in Abbildung 5-9 zu sehen ist. Die **Verschmutzung** wird zum Teil wohl direkt über die Schürfkante aufgetragen. Ein anderer Teil könnte sich durch die leicht poröse Oberfläche an den Kuppen angelagert haben.

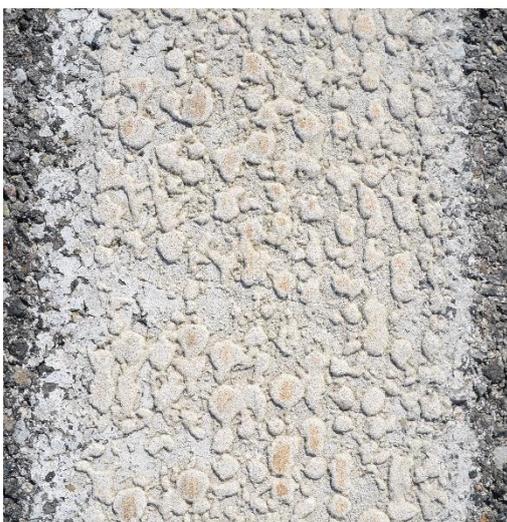


Abbildung 5-9 stochastische Feldprobe nach einem Winter Belastung

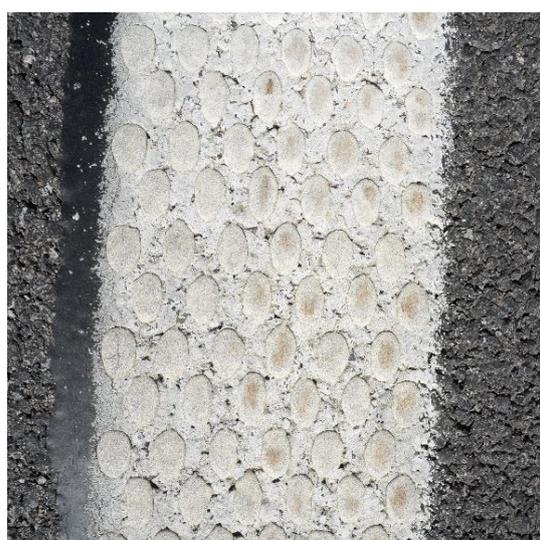


Abbildung 5-10 regelmäßige Feldprobe (Pflaumen F20) nach einem Winter einseitiger Belastung

Des Weiteren sind die Retroreflexionswerte (R_L -Werte) stark erhöht, wenn wird mit dem Retrometer **gegen die Fahrtrichtung** gemessen. Dieses Phänomen tritt bei allen Proben auf, auch bei stochastischen (V18, V18F) oder quer zur Fahrtrichtung symmetrischen regelmäßigen Geometrien wie Kreisdots (V11, V12). Die Ursache hierfür scheint zum Teil



Abbildung 5-12 komplettes Herausbrechen nach 2 Wintern

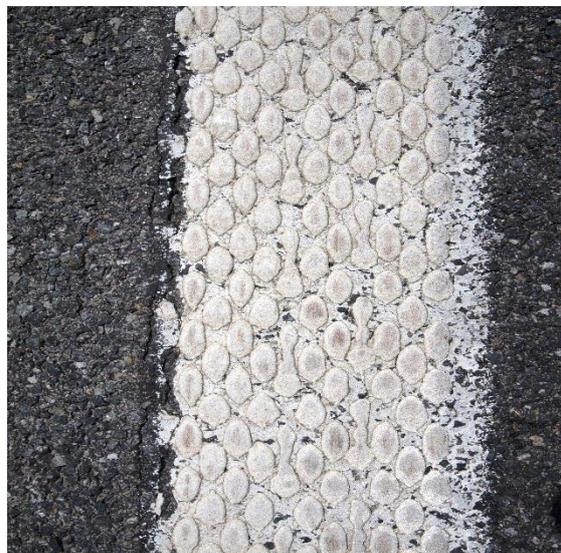


Abbildung 5-11 Feldprobe (Kombination 2) nach zwei Winter Belastung

auch an der Verschmutzung zu liegen. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass auf der Vorderseite der Agglomerate mehr Glasperlen erblasst oder milchig sind als auf der Rückseite. Einen anderen Faktor kann der spezielle Verlauf der Abtragshöhe darstellen.

Die Schürfkante schafft augenscheinlich die erwartete „**horizontale Abnutzung**“ der Kuppen. Höhere Kuppen einer Probe wurden offensichtlich tiefer abgetragen als niedrigere. Bei näherer Betrachtung fällt allerdings auf, dass die Abtragshöhe sich maßgeblich nach der abgetragenen Masse richtet. Liegen Agglomerate zu weit auseinander, so fällt die Schürfkante zwischendurch ab. Diese Erkenntnisse werden in Kapitel 7 weiter erläutert.

Das Untersuchen von entnommenen Proben ergab, dass der **Schichtdickenverlust** bei den Geometrien mit **kleinerer Flächenbedeckung stärker** ausfiel. Deshalb wurde, wie in Kapitel 4 erläutert, der Gewichtsverlust als wichtige Vergleichsbelastungsgröße eingeführt. Die Annahme ist, dass ein Schneepflugübergang bei allen Geometrien eine ähnliche Materialmenge abträgt. Die Abtragshöhe allerdings kann stark variieren und stellt somit eine schwächere Vergleichsgröße dar.



Abbildung 5-13 Probenentnahme

Zu beachten ist, dass einige Gegebenheiten die Messung zusätzlich beeinträchtigt haben. So wurde die Markierung teilweise auf den entstandenen Riss zwischen Hauptfahrbahn und unbefestigten Seitenstreifen appliziert. Die Messung an diesen Stellen wurde unterlassen und ging nicht in die Bewertung mit ein, wenn die Werte links und rechts vom Riss sich zu stark unterschieden. Im Zweifel wurde der beanspruchte Teil der Markierung gemessen. Ebenfalls nicht gewertet wurden die Ergebnisse aus Messungen in Kuhlen oder bei kompletten Herausbrechen der Agglomerate. Dieser komplett rückstandsfreie Abtrag trat sowohl bei den großen Agglomeraten mit hoher Schichtdicke, als auch bei kleinen Agglomeraten mit kleinen Schichtdicken auf. Da sich der Grundstrich ebenfalls mit gelöst hat wird davon ausgegangen, dass der Verbund zwischen Grundstrich und Straße versagt hat. Deshalb geht der rückstandsfreie Abtrag nicht in Bewertung der Agglomeratgeometrien mit ein. In Abbildung 5-12 ist das komplette Herausbrechen ganzer Agglomerate dargestellt.

6 Computergestützte numerische Methode

Die Ergebnisse der Laborstudie zeigen zum Teil starke Diskrepanzen der Schneepflugbeständigkeit zwischen gleichen Geometrietypen. Die tatsächliche Ausprägung hängt von Umgebungsfaktoren wie Temperatur, Materialfaktoren wie Viskosität bis hin zu menschlichen Faktoren wie der Geschwindigkeit des Applikationsfahrzeuges ab. Es ist weder sinnvoll Probekörper in allen Ausprägungen herzustellen noch ist es zielführend nur wenige Ausprägungen zu untersuchen.

Ein weiteres Problem stellt die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse dar. Eine sinnvolle Ergänzung um die Hintergründe besser zu verstehen sind Darstellungen, die aufzeigen welche Bereiche zur Sichtbarkeit beitragen und welche die Sichtbarkeit senken.

Ein Hilfsmittel stellt dabei ein computergestütztes numerisches Modell dar, bei dem die Modelle von definierten Agglomeratgeometrien in einer großen Menge verschiedener Ausprägungen untersucht werden. Die komplette Methode und damit auch die Sichtbarkeitsmessung werden numerisch durchgeführt werden.

Ziel war es eine solche computergestützte numerische Methode zu entwickeln. Folglich soll die Methode die Belastung simulieren und verschiedene Agglomeratgeometrien vor und nach der Belastung auf ihre Sichtbarkeit hin bewerten. Hierbei ist eine Anpassung der Messgeometrie möglich, sodass Unterschiede zwischen der Sichtbarkeit für verschiedene Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden können.

Die Methode wird über Messergebnisse der Laborstudie sowie der Feldstudie verifiziert und soll erkannte relevante Phänomene zuverlässig berücksichtigen. Hierfür werden vorerst eingescannte Laborproben als programminterne Modelle verwendet.

Mit einem optischen Oberflächenanalysegerät wird eine dreidimensionale Punktwolke erstellt, die nach Konvertierung mit einem Programm für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen analysiert werden kann.

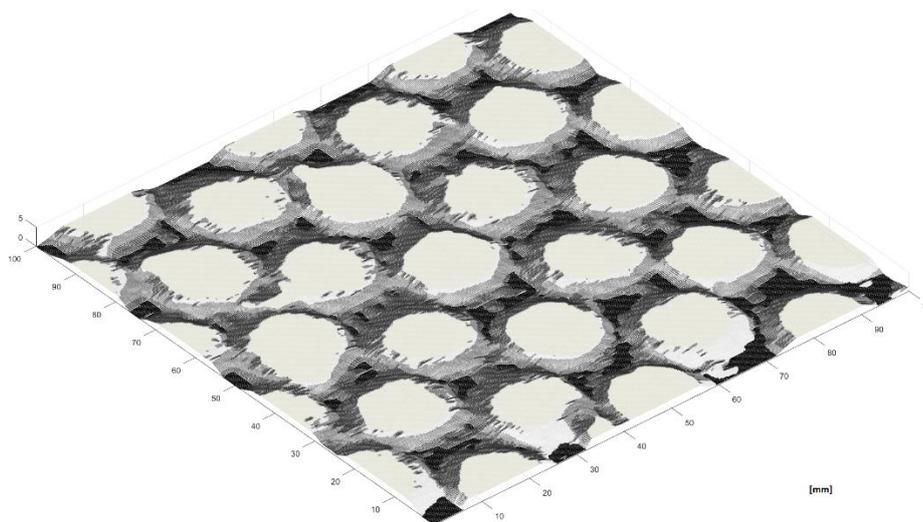


Abbildung 6-1 Beispiel einer numerisch belasteten Probe aus dem Labor

Mittels Strahlenverfolgung werden die Reflexionen simuliert. Dem zu Grunde liegt eine Analyse der beiden relevanten Oberflächenarten. Die ursprüngliche Oberfläche mit intakten Glasperlen sowie die durch den Schneepflug zerstörte Kaltplastikoberfläche.

6.1 Aufbau und Entwicklung der Methode

Die Methode zur Beurteilung der Schneepflugbeständigkeit lässt sich in drei Modelle unterteilen.

- Applikations-Modell
- Schneepflugbelastungs-Modell
- Beleuchtungs-Modell

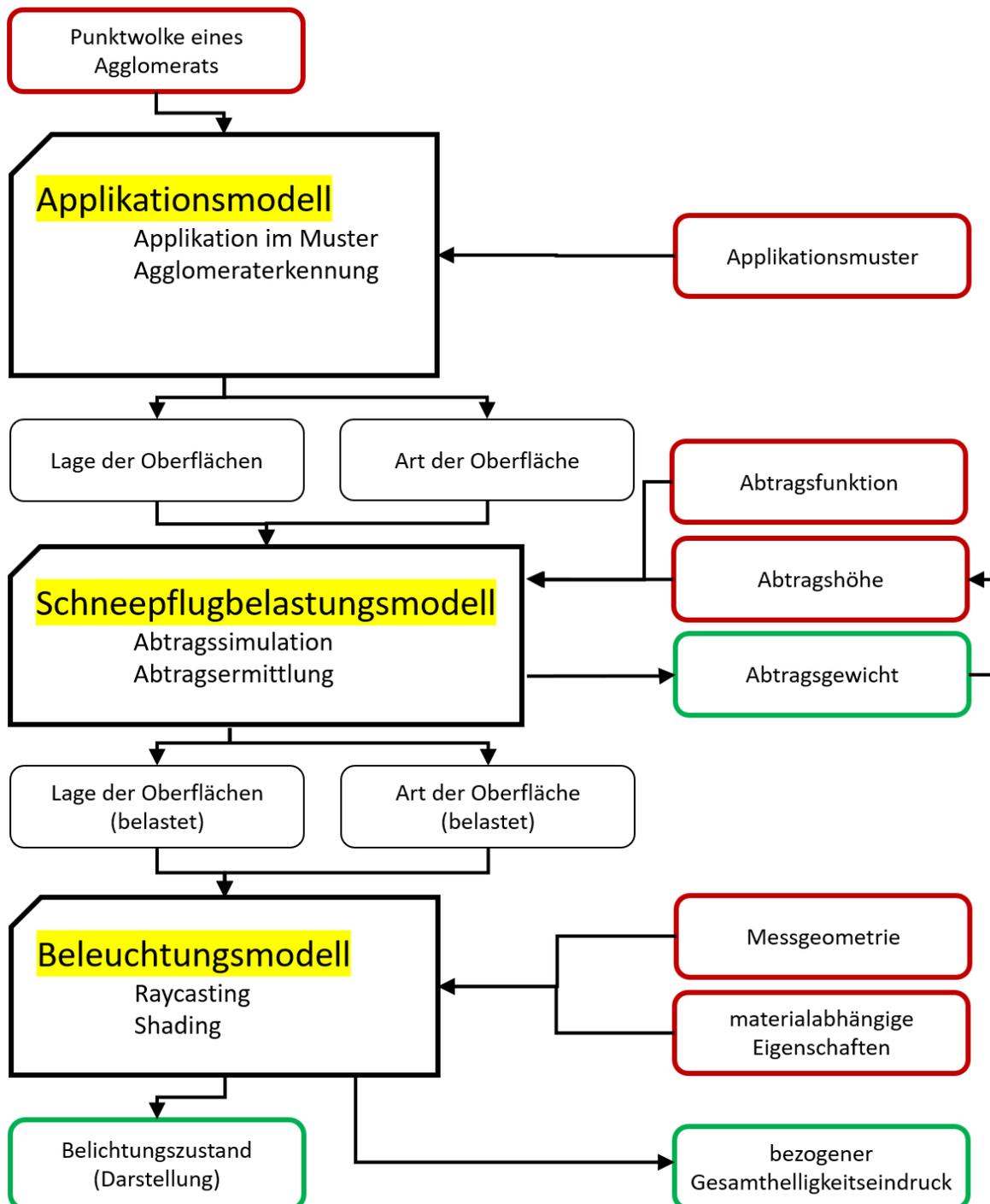


Abbildung 6-2 Aufbau der numerischen Methode

Jedes dieser drei Modelle ist in sich abgeschlossen und hat einen definierten Eingang sowie einen definierten Ausgang. Die Zusammenhänge der Modelle (gelb) und ihrer Ein- und Ausgänge (rot und grün) sind in Abbildung 6-2 dargestellt.

6.1.1 Applikationsmodell

Die Methode erfordert eine Punktwolke eines Agglomerats in Form eines zweieinhalb-dimensionalen Höhenfelds. Die Punktwolke wird über einen 3D-Scan eines Laborprobekörpers generiert, es ist aber auch möglich CAD-Oberflächen zu integrieren.

Die Einzelagglomerate werden nach Mustern angeordnet. Die Parameter, die variiert werden können sind in Abbildung 6-3 dargestellt.

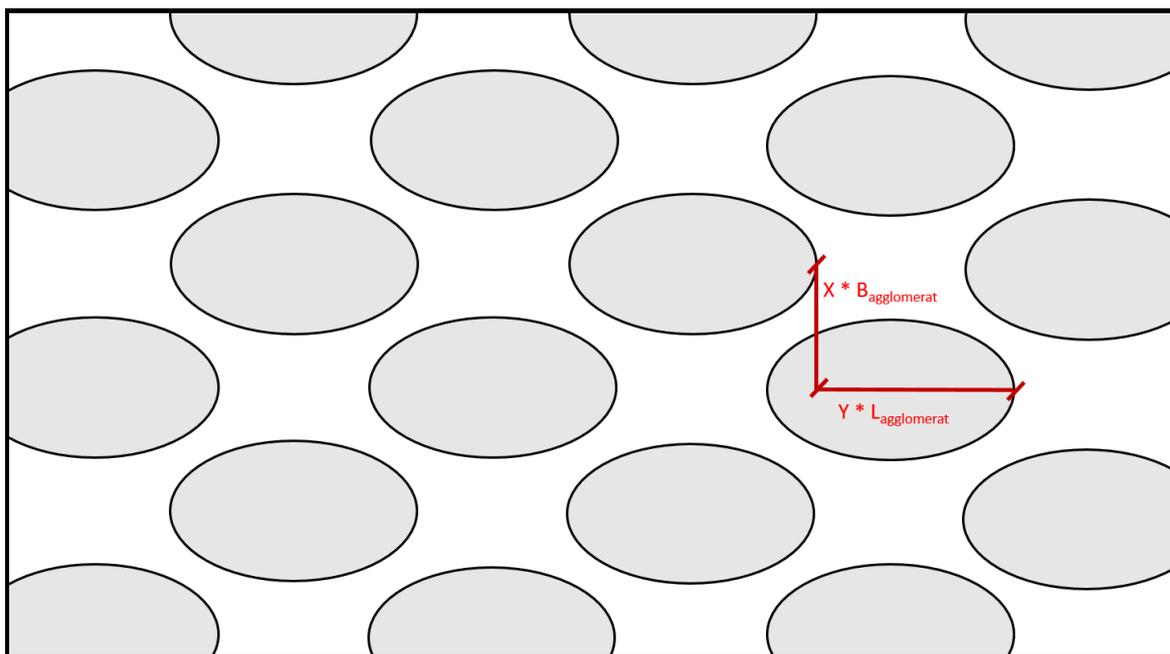


Abbildung 6-3 symmetrisches Applikationsmuster

6.1.2 Schneepflugbelastungsmodell

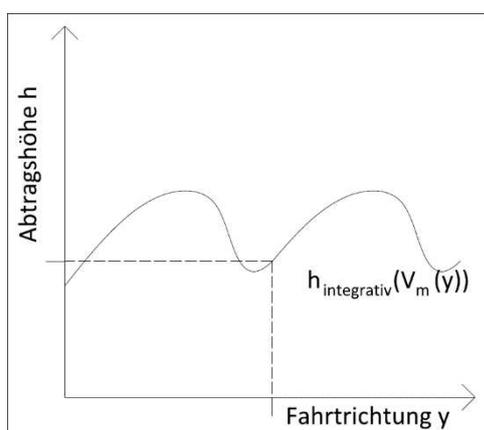


Abbildung 6-4 Höhenverlauf der Schneepflugkante

Um einen Abtrag zu simulieren, muss eine Abtragshöhe festgelegt werden. Diese beschreibt die Ausgangshöhe der Schneepflugkante über der Fahrbahnoberfläche bzw. der Prüfblechkante. Umso tiefer der Wert, desto größer der Abtrag. Die Abtragshöhe wird dann im Verlauf durch eine Abtragungsfunktion definiert, die integrativ von Auflagefläche und der bisherigen Abtragsmenge abhängig ist. Die Funktion wurde über Beobachtungen (kein konstanter Abtrag) aus Feld und Labor entwickelt. Im Beleuchtungsmodell wird klar wieso dieses scheinbare Detail massive Auswirkungen auf die Sichtbarkeit hat.

In Abbildung 6-5 ist das Schema vereinfacht dargestellt. Für die spätere Sichtbarkeitssimulation ist es wichtig, dass neben der Lage der Oberfläche auch die Art der Oberfläche (belastet) geändert wird.

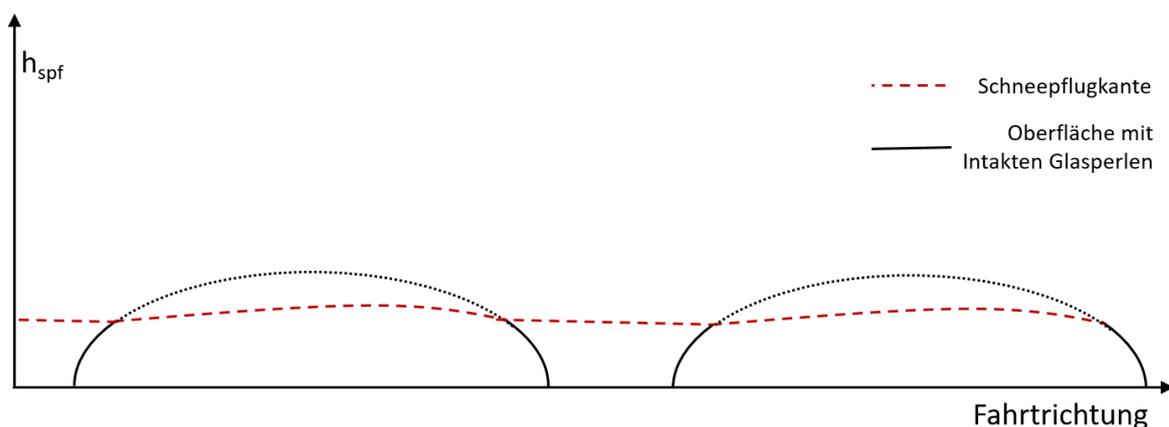


Abbildung 6-5 Schema Belastung

Des Weiteren wird ein Abtraggewicht ermittelt. Auch dieses kann mit dem tatsächlichen Abtrag verglichen werden. Die Parameter wurden nachfolgend über die Laborstudie kalibriert. Die sich hierbei ergebende Korrelation ist in der untenstehenden Abbildung 6-6 dargestellt.

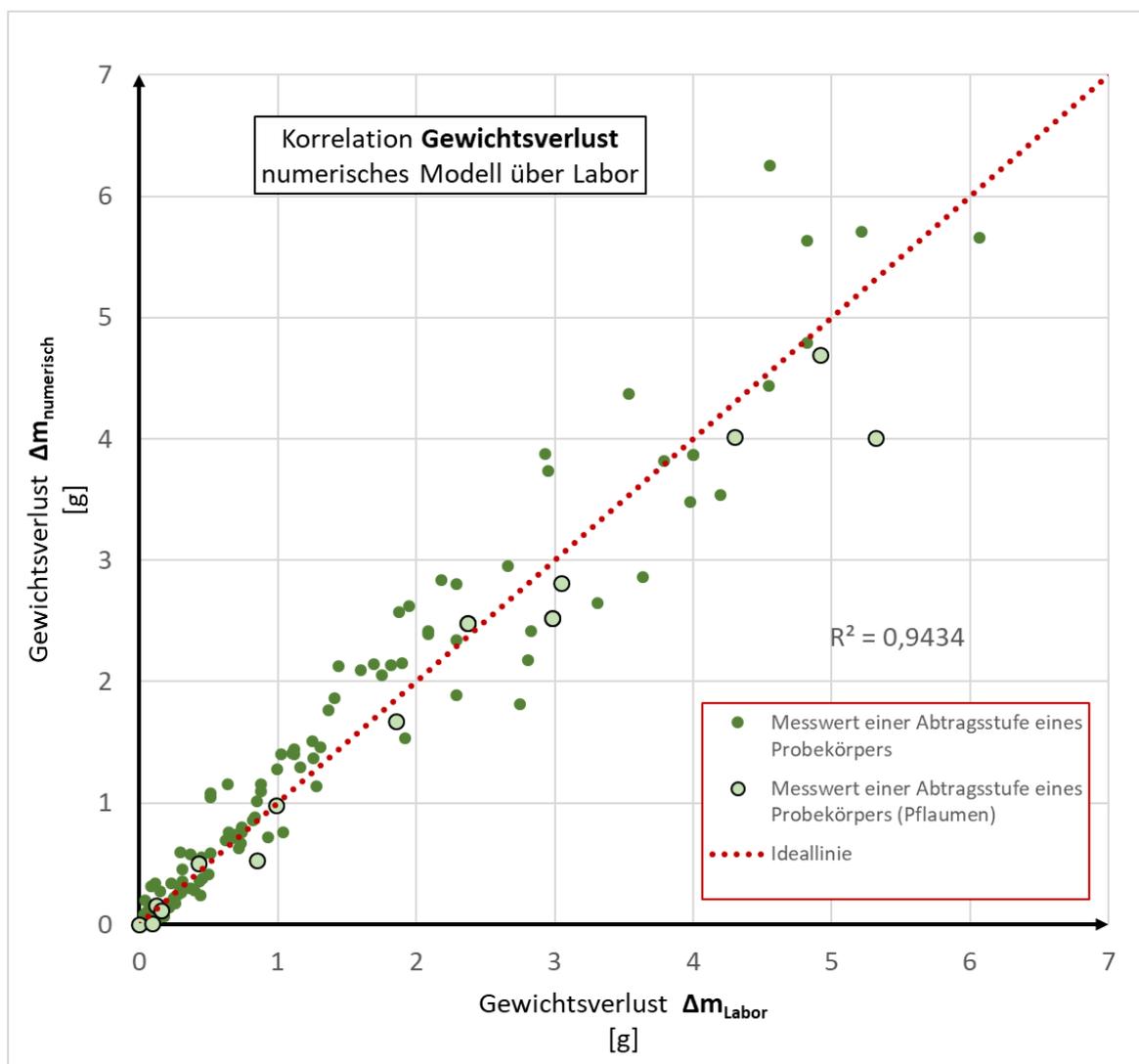


Abbildung 6-6 Korrelation Gewichtsverlust Modell über Labor

6.1.3 Beleuchtungsmodell

Die Definition der Messgeometrie erfolgt über das Angeben eines Beobachtungswinkels α und eines Beleuchtungswinkels ε . Über die Winkel werden die Lage der Bildebene, sowie die Lage der Lichtquelle festgelegt. Um die Messgeometrie der Nachtsichtbarkeitsmessung eines Retrometers zu simulieren muss die 1,24°/2,29°- Normgeometrie verwendet werden. Über Raytracing können Bereiche, die im Schatten liegen ermittelt werden.

Dies geschieht über die dargestellten zwei Stufen.

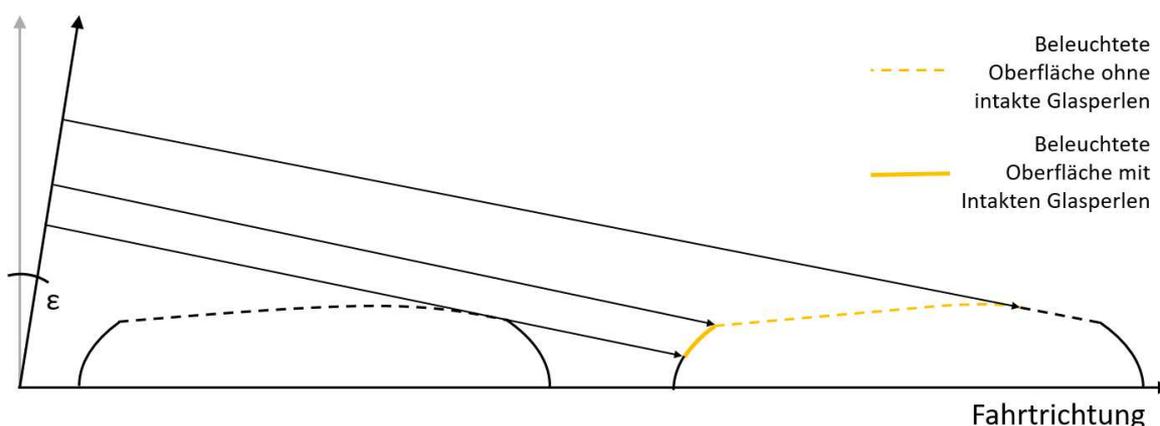


Abbildung 6-7 Schema Beleuchtung

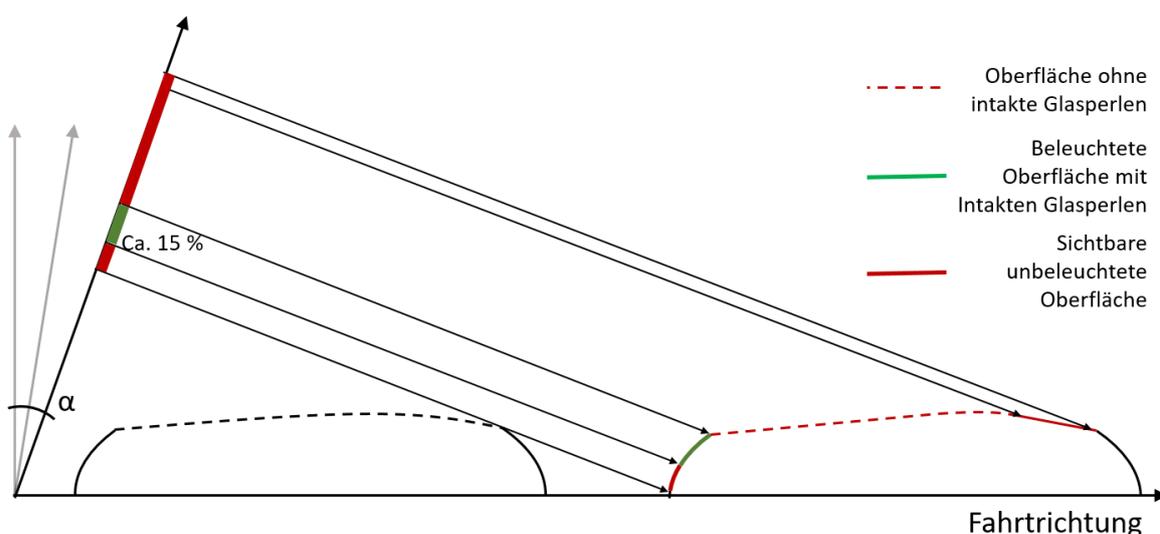


Abbildung 6-8 Schema Sichtbarkeitsanalyse

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Glasperlen (wenig Retroreflexion in einem Anstrahlwinkel von $< 60^\circ$) muss das dargestellt Flächenverhältnis weiter bewertet werden.

Die materialabhängigen Eigenschaften wurden ebenfalls über die Laborergebnisse kalibriert. Aufgrund der Güte der Korrelation konnten die abgenutzten Modelle der Laborprobekörper weiter für die Kalibrierung des Beleuchtungsmodells verwendet werden. Die materialabhängigen Eigenschaften beschreiben die Retroreflexionseigenschaften der relevanten Oberflächen in Abhängigkeit des Beleuchtungswinkels. Die relevanten Oberflächen sind das Prüfblech, die unbeschädigte Agglomeratoberfläche sowie die beschädigte Agglomer-

ratoberfläche. Die Retroreflexionseigenschaften des Prüfblechs und der beschädigte Agglomeratoberfläche sind konstant, während die der unbeschädigten Agglomeratoberfläche durch eine vom Beleuchtungswinkel abhängige Funktion beschrieben wird.

Ergebnis der Methode ist ein bezogener Gesamtheitseindruck, der mit den tatsächlichen Retroreflexionswerten (Leuchtdichtewerten bei Trockenheit und Nacht) korreliert werden kann (Abbildung 6-9).

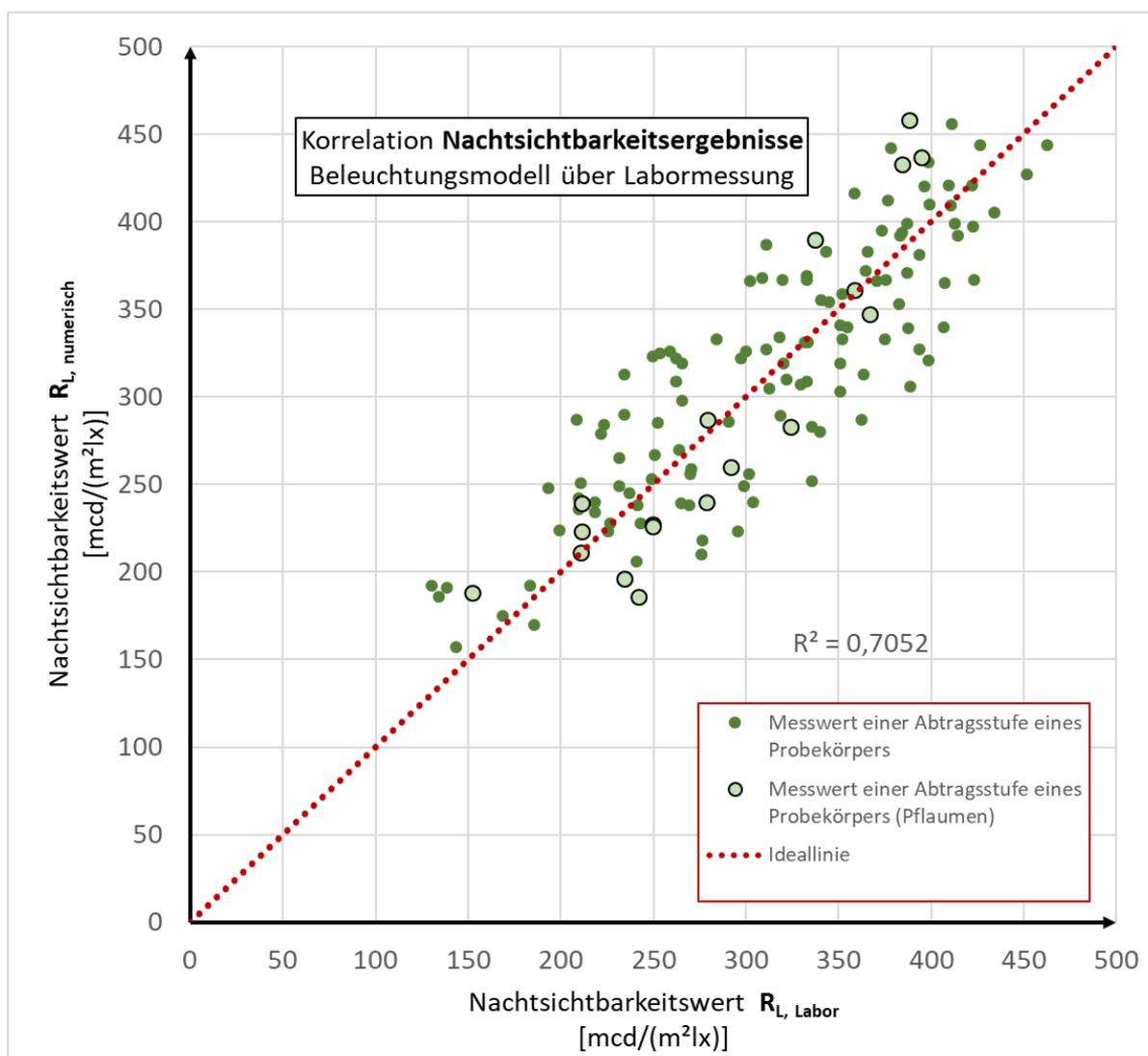


Abbildung 6-9 Korrelation Sichtbarkeitswert Modell über Labor

Die Abweichungen, die durch optimieren der numerischen Methode in der Korrelation entstehen sind auch aufgrund der Ungenauigkeiten der Labormessung nur zu minimieren, nie ganz zu entfernen.

6.1.4 Fazit aus der numerischen Methode

Zur graphischen Verifizierung wird außerdem für jeden Datenpunkt die Oberflächenart sowie der Belichtungszustand ausgegeben. Ergebnisse dieser Ausgabe werden in Kapitel 7 gezeigt. Aus Abbildung 6-8 können aber schon **Rückschlüsse** auf eine optimierte Anordnung der Agglomerate gezogen werden.

a) Umso konstanter die Abtragshöhe, desto weniger belastete Oberfläche wird in die Sichte ebene projiziert. Das Verhältnis zwischen Oberfläche ohne intakte Glasperlen zu beleuchteter Oberfläche mit intakten Glasperlen wird günstiger für einen hohen Retroreflexionswert. Die Auflagefläche der Schneepflugkante sollte also möglichst wenig variieren.

b) Des Weiteren spielt der Abstand der Agglomerate in Fahrtrichtung eine entscheidende Rolle. Hierdurch kann das Verhältnis zwischen beleuchteter Oberfläche mit intakten Glasperlen und Oberfläche ohne intakte Glasperlen sowie sichtbarer unbeleuchteter Oberfläche weiter erhöht werden. Wichtig ist allerdings, dass die Messgeometrie in der Realität nur begrenzt anwendbar ist. Der Beleuchtungs- und Sichtwinkel kann vom Abstand des Fahrzeugs zur wahrzunehmenden Markierungsstelle und vom betrachteten Fahrzeugtyp abhängig sein.

c) Auch, wenn das Modell keine Nassmessung simulieren kann, können trotzdem Beobachtungen aus Feld und Labor berücksichtigt werden. Das Nassmessungsergebnis ist abhängig vom Abstand zwischen den Agglomeraten, da bei zu niedrigen Abstand das Wasser nicht problemlos abfließen kann. Aus diesem Grund sind auch längere Geometrien gegen die Fließrichtung (Querrichtung) der Nachtsichtbarkeit bei Nässe nicht zuträglich. Zusätzlich benetzt das Wasser zuerst die niedrigen Bereiche der Kuppen. Es ist also wichtig die Abstände der Agglomerate nicht zu groß zu wählen, da der retroreflektierende Bereich so zu tief liegt und der Schichtdickenabtrag ansteigt.

Um diese geometrischen Anforderungen an die Markierung gleichzeitig erfüllen zu können, soll ein zweites unsymmetrisches Muster appliziert werden können. In der Optimierung in Kapitel 7 kommt, neben dem ersten symmetrischen Muster, auch dieses zum Einsatz.

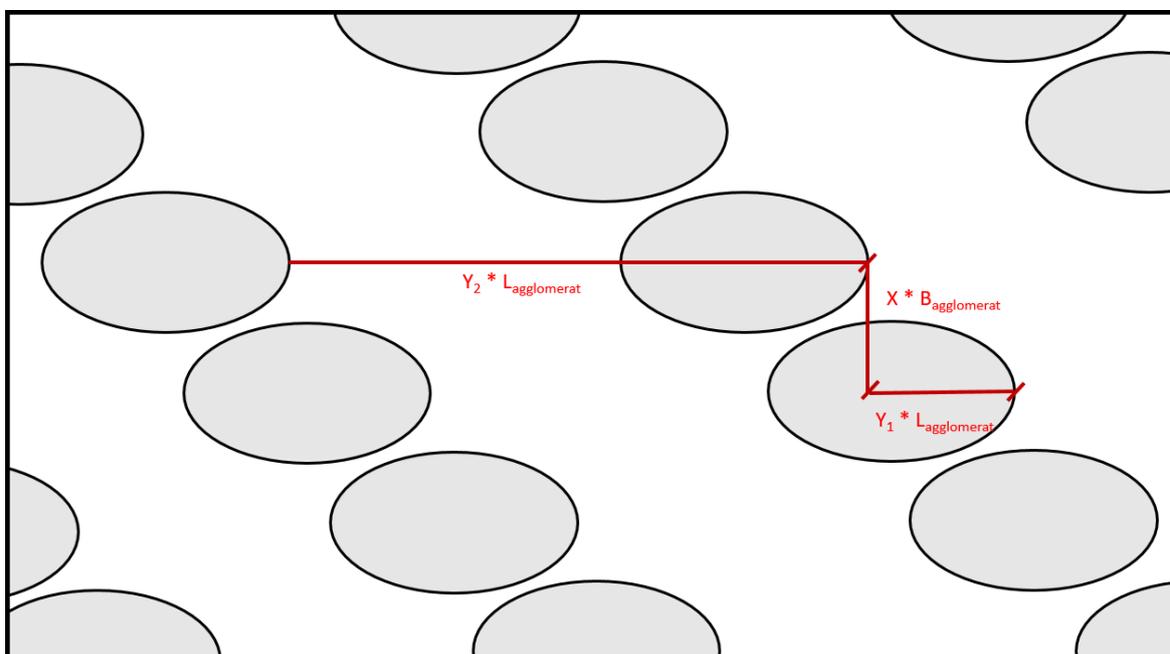


Abbildung 6-10 unsymmetrisches Applikationsmuster

7 Bewertung und Empfehlung

In der Bewertung sollen die Ergebnisse der Sichtbarkeitsmessung aus Feld und Labor zuerst kombiniert analysiert werden. Die Ergebnisse werden durch plausibilisierende Darstellungen der numerischen Methode ergänzt. Für die beste Geometrievariante soll dann eine Optimierung mit Hilfe der numerischen Methode erfolgen.

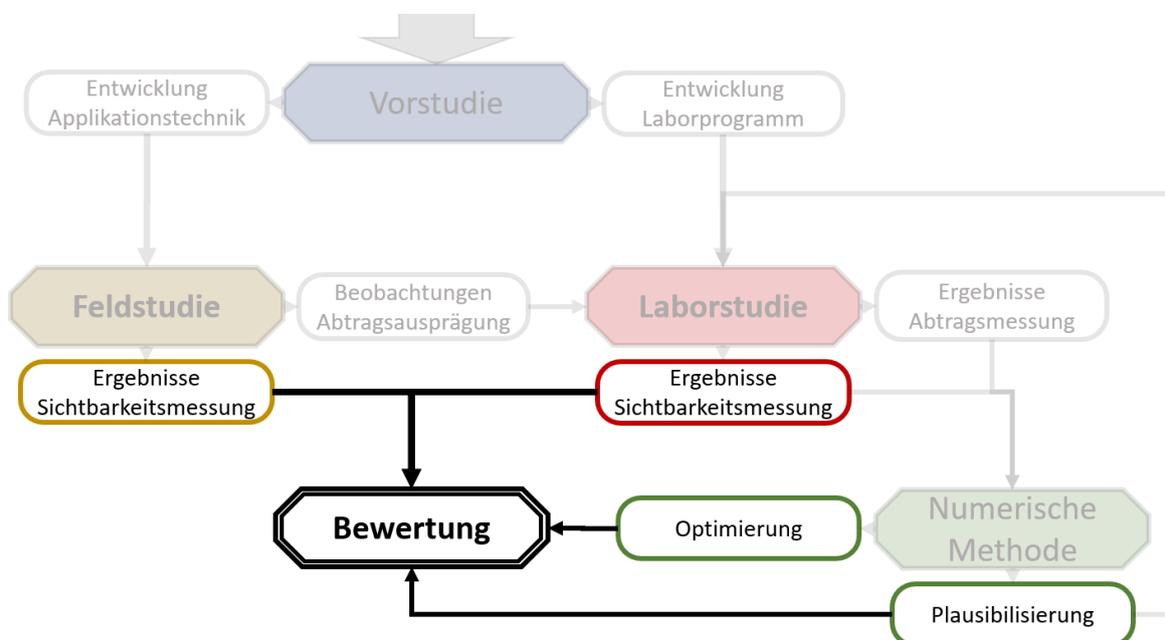


Abbildung 7-1 Konzept Bewertung

Aus Bewertung und Optimierung werden abschließende Empfehlungen im Hinblick auf eine Markierungsgeometrie gegeben, die unter Berücksichtigung aller Beobachtungen, Erfahrungen und Messungen die Schneepflugresistenz von einem Kaltplastik Agglomeratmarkierungssystem in der Praxis erhöhen soll.

7.1 Korrelation Feldstudie und Laborstudie

Es bleibt die Frage, ob von den Ergebnissen der Leuchtdichtemessung im Feld auf die im Labor geschlossen werden kann. Hierbei gilt es zu ermitteln mit welcher Belastungsstufe ein Schneepflugübergang im Labor gleichgesetzt werden kann. In der Feldstudie konnten keine Schichtdicken oder Gewichtsmessungen durchgeführt werden, während in der Laborstudie kein echter Schneepflug zum Einsatz kam. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass im Feld die beschriebenen, zusätzlichen Einflüsse wie Verschmutzung, ungleiche Abnutzung und Belastung durch den Verkehr wirken. Hinzu kommt, dass ein anderes Messgerät verwendet wurde.

Zuerst gilt es herauszufinden, ob die zur Auswertung herangezogene relevante Belastungsgröße die abgetragene Schichtdicke oder das abgetragene Gewicht ist. In einem iterativen Prozess wurden die Belastungsstufen der Trockenmessungsergebnisse der Feldstudie einzeln untersucht. In den Tabellen im Anhang A1 sind die Zwischenschritte des Prozesses dargestellt. Zwei Tabellen, der Ausgangszustand und der Endzustand, sind zum Verständnis in Abbildung 7-2 dargestellt.

Den Mittelwerten der trockenen Feld-Nachtsichtbarkeitsmessung (Feld) der einzelnen Varianten wurden die Mittelwerte der jeweiligen Pendants in der Laborstudie (1. Versuchsreihe) (Lab) gegenübergestellt. Die prozentuale Abweichung (**Abweichung Lab**) des Laborergebnisses vom gemeinsamen Mittelwert (MW) stellt die Korrelation der einzelnen Geometrievariante an einem Belastungszeitpunkt dar. Für den Ausgangszustand können hierzu noch die Mittelwerte der gemessenen Leuchtdichten bei der Messung vor dem ersten Abtrag genutzt werden. Für eine hohe Korrelation dürfen wiederum die prozentualen Abweichungen der Nachtsichtbarkeit der Geometrievarianten in Feld und Labor nicht zu stark voneinander abweichen. Falls also die Sichtbarkeiten im Feld alle um 20 % nach unten abweichen, liegt trotz der hohen Abweichungen eine hohe Korrelation vor, da es um die Rangfolge der Leuchtdichten der Varianten geht. Das ist der Grund dafür, warum keine einfache Korrelationsanalyse durchgeführt werden kann um die relevante Belastungsgröße zu ermitteln.

Juni '16 / 0,0 g	$R_{L,trocken}$			
	MW _{Labor,äqui}	MW _{Feld}	mw	Abweichung
Geometrie-variante	[mcd/(m ² lx)]			[%]
F11	348	463	405	14,2
F12	414	488	451	8,2
F13	380	559	470	19,1
F14	444	520	482	7,8
F15	396	551	473	16,4
F18	429	563	496	13,6
F18f	365	543	454	19,6
F19	407	556	482	15,5
F20	431	446	439	1,7
Kombination1	478	-	-	
Kombination2	484	541	513	5,6
F19A	391	493	442	11,6
Stabw:			5,45	

Juni '18 / 16,6 g	$R_{L,trocken}$			
	MW _{Labor,äqui}	MW _{Feld}	mw	Abweichung
Geometrie-variante	[mcd/(m ² lx)]			[%]
F11	213	169	191	-11,6
F12	195	169	182	-7,3
F13	210	160	185	-13,6
F14	198	184	191	-3,7
F15	228	209	219	-4,3
F18	250	178	214	-16,8
F18f	244	225	235	-4,1
F19	251	236	244	-3,2
F20	217	213	215	-1,0
Kombination1	278	275	277	-0,6
Kombination2	297	199	248	-19,8
F19A	225	200	213	-5,9
Stabw:			6,05	

Abbildung 7-2 Korrelation $R_{L,trocken}$ Labor und Feld unbelastet (li) belastet (re)

Die Standardabweichung der prozentualen Abweichungen vom gemeinsamen Mittelwert einer Geometrievariante aus Labor- und Feldstudie muss bei jeder Belastungsstufe möglichst gering sein. Nach diesem Kriterium wurden die optimalen Gewichtsverluste und Schichtdickenverluste iterativ ermittelt.

In den Belastungszeitpunkten nach der Anfangsmessung wurden die interpolierten Kurven aus Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 (Ergebnisse Laborstudie) verwendet. Als Randbedingungen wurde die Hypothese des konstanten Abtrags genutzt. Das heißt, dass der Abtrag der jeweiligen Belastungsgröße (Schichtdicke oder Gewichtsverlust) bei jedem Schneepflugübergang (SPÜ) gleich ist und ohne SPÜ kein Abtrag stattfindet.

Die Abbildung 7-3 stellt die Ergebnisse dar. In dem Diagramm ist zu erkennen, dass der Schichtdickenabtrag sich nicht als vergleichende Belastungsgröße eignet. Die Abweichungen zwischen Feldstudienergebnissen und Laborstudienergebnissen wachsen mit steigendem angenommenem Schichtdickenabtrag pro Schneepflugübergang (SPÜ). Der Schichtdickenabtrag mit der höchsten Korrelation ist 0 mm/SPÜ. Dies bedeutet, dass kein sinnvoller Schichtdickenabtrag gewählt werden kann, mit dem Laborstudie und Feldstudie mit ausreichender Güte verglichen werden können. In der unteren Tabelle in Abbildung 7-3 sieht man, dass bei einem gewählten Schichtdickenabtrag von 0,0148 mm/SPÜ bei dem letzten Belastungszeitpunkt nur eine schwache Ähnlichkeit (Stabw. der Abweichungen = 9,24 %) zwischen Feld- und Laborstudie existiert.

Anders verhält es sich mit dem Gewichtsabtrag als führende Belastungsgröße. Bei 0,293 g/SPÜ lässt sich die geringste mittlere Standardabweichung feststellen. In der linken Seite des Diagramms lässt sich dies ebenfalls erkennen.

Bestimmung der relevanten Belastungsgröße

Gewichtsverlust mit 0,293 g/SPÜ

Belastungszeitpunkt	Schneepflug-übergänge insgesamt	Stabw der Abweichungen	iterativ ermittelter Gewichtsverlust
	[SPÜ]	[%]	[g]
Jun 16	0	5,45	0
Mai 17	27	6,22	7,9
Okt 17	27	6,19	7,9
Jun 18	64	5,62	18,7

Schichtdickenverlust mit 0,0148 mm/SPÜ

Belastungszeitpunkt	Schneepflug-übergänge insgesamt	Stabw der Abweichungen	iterativ ermittelter Schichtdickenverlust
	[SPÜ]	[%]	[mm]
Jun 16	0	5,37	0
Mai 17	27	7,78	0,4
Okt 17	27	7,77	0,4
Jun 18	64	9,24	0,9

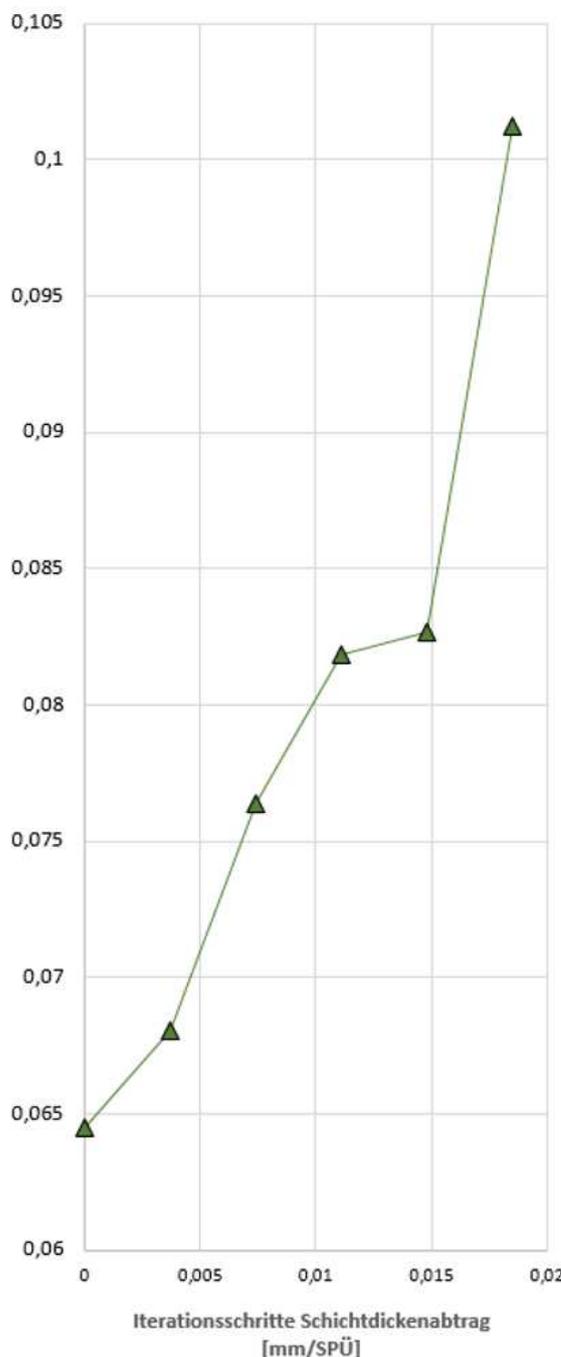
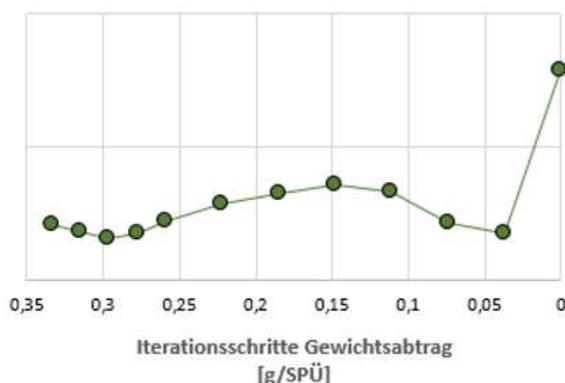


Abbildung 7-3 Tabellen und Diagramm zur Bestimmung der relevanten Belastungsgröße anhand der Trockenmessung

Zusammenfassend lässt sich folgendes sagen, die Laborergebnisse korrelieren sehr viel besser, wenn der **Gewichtsabtrag als relevante Belastungsgröße** gewählt wird. Es soll die Korrelation weiterbewertet werden, die zwischen den Trocken- und Nassmessungsergebnissen existiert. Hierbei werden die Mittelwerte der einzelnen Geometrievarianten aus der Feldstudie mit den Pendants aus der Laborstudie verglichen. In den drei Belastungszeitpunkten nach der Anfangsmessung werden die Leuchtdichten der Laborstudie mit Hilfe

der interpolierten Kurven nach Abbildung 4-10 und Abbildung 4-12 (Gewichtsverlust als relevante Belastungsgröße) ermittelt. Es wird ein Gewichtsverlust pro Schneepflugübergang von 0,293 angenommen. Dies bedeutet, dass die Leuchtdichten an den in Abbildung 7-3 (obere Tabelle) definierten Stellen auf der x-Achse bestimmt werden (0 g, 7,9g und 18,7g). Im Anhang A1 sind die Korrelationspaare dargestellt, die die Grundlage für Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 bilden. In den folgenden Graphiken sind die Korrelationen der jeweils trockenen und nassen Nachtmessung dargestellt. Aufgrund der vorher diskutierten Unabhängigkeit der Tagsichtbarkeit von der Schneepflugbelastung wird auf die Darstellung dieser verzichtet.

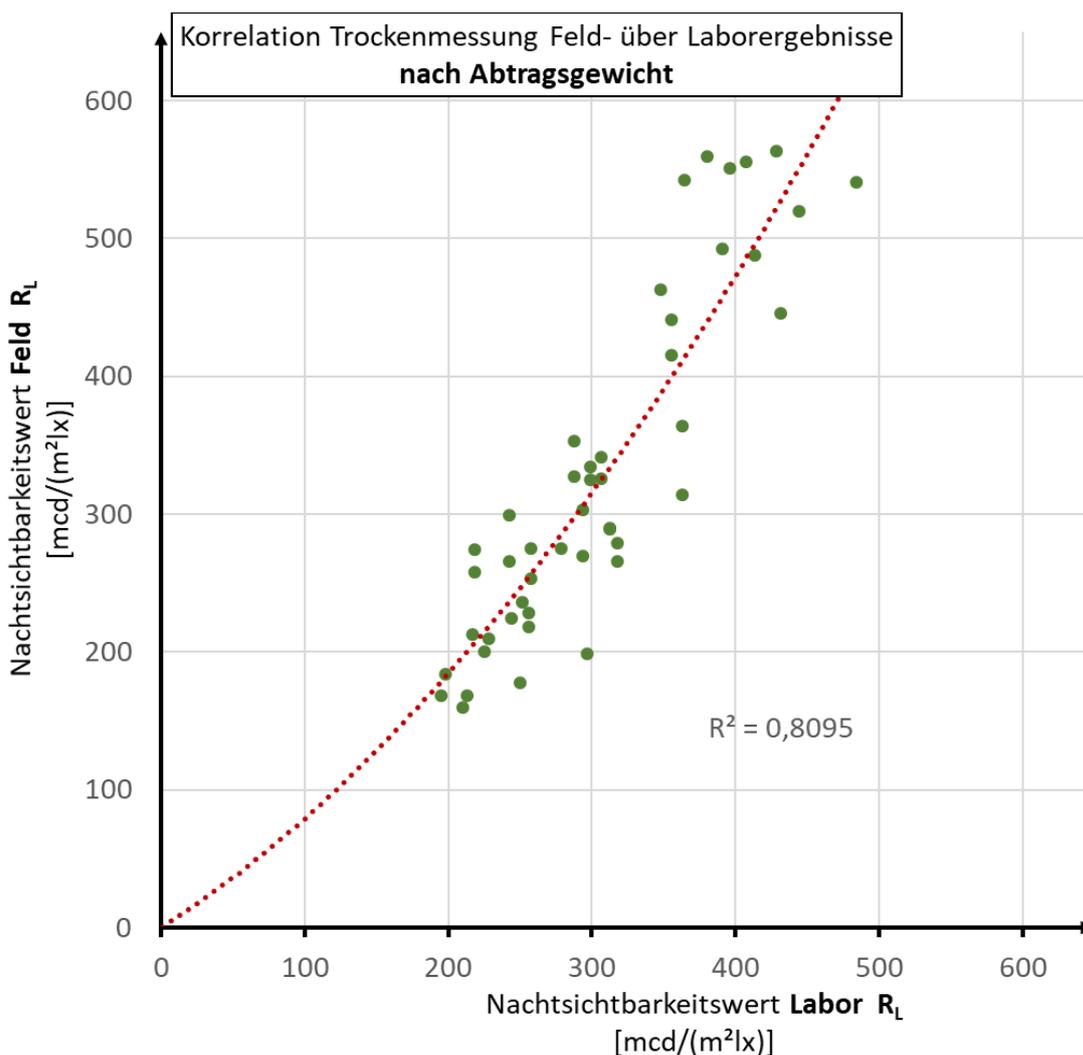


Abbildung 7-4 Korrelation Trockenmessung Feld- über Labormessergebnisse nach Abtragsgewicht

Zur Bewertung der Belastbarkeit der korrelierten Mittelwerte, ist die Anzahl der Einzelmessungen pro Geometrie genannt. Im Feld ergaben sich trocken 20 – 50 Einzelmessungen und nass 18 Einzelmessungen pro Geometrievariante und Belastungszeitpunkt. Im Labor ist anzunehmen, dass die interpolierte Kurve an der ausgewerteten Stelle von den Messwerten mindestens einer Belastungsstufe definiert ist. Dies ergibt für den korrelierten Wert ca. 30 Einzelmessungen im trockenen und 18 bei der Nassmessung. Es wurden im trockenen insgesamt ca. 2100 Einzelmessungen im Feld mit ca. 1400 Einzelmessungen im Labor korreliert. Für die Nassmessung ergeben sich jeweils 850 Einzelmessungen im Labor und im Feld.

Die Korrelationsgraden der trockenen und nassen Leuchtdichtekoeffizienten ist eine quadratische Parabel. Aufgrund der mehrfach erwähnten Zusatzbelastungen kann kein linearer Verlauf angenommen werden. Der Feldwert nimmt wie erwartet schneller ab, als der Wert aus dem Labor.

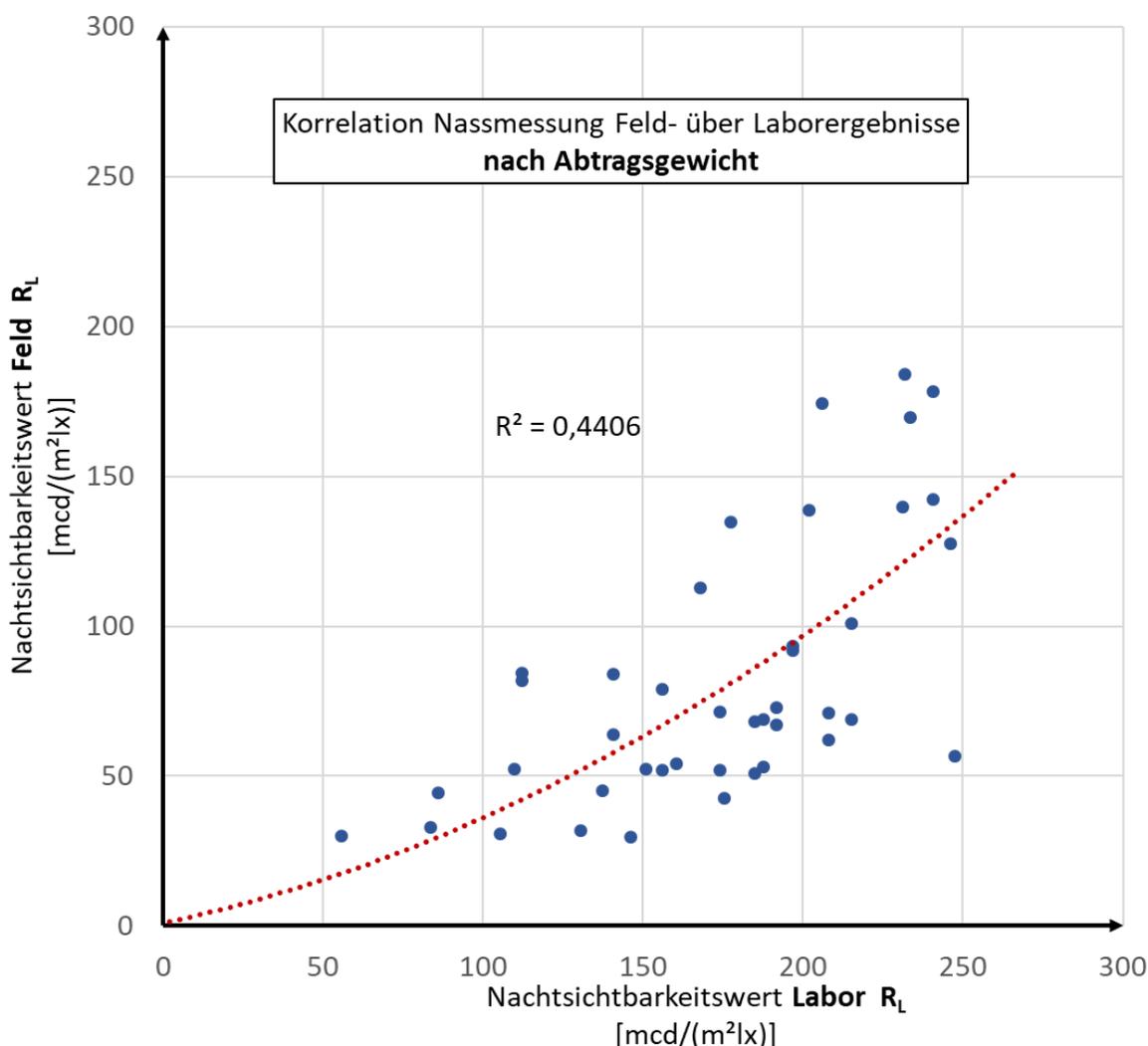


Abbildung 7-5 Korrelation Nassmessung Feld- über Laborergebnisse nach Abtragsgewicht

Im Besonderen die Korrelation des trocken gemessenen Retroreflexionswertes in Feld und Labor ist sehr stark ausgeprägt. Die nass gemessenen Werte streuen wesentlich stärker.

Hieraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

Da die Korrelation der Trockenmessung mit sinkender Leuchtdichte nicht schwächer wird, kann der Einsatz, der entwickelten Belastungsvorrichtung als sinnvoll angesehen werden. Die Belastung ist sehr realitätsnah.

Abweichungen bei der Trockenmessung, die vor der ersten Belastung zwischen Labor- und Feldmessungsergebnis auftreten, sind durch das Verwenden unterschiedlicher Messgeräte zu begründen. Bei Messwerten weit über dem Grenzwert, können solche Abweichungen eher auftreten. Dazu kann aber auch die Applikation an dieser Stelle einen Unterschied ausmachen. Besonders bei den Kombinationen (fehlerhafte Applikationen) sind im Feld durchaus deutlich unterschiedliche Ausprägungen zu erkennen. Im Labor hingegen wurde immer nur eine Ausprägung untersucht.

Die, im Verhältnis zur Trockenmessung, stärkeren Abweichungen bei der Feuchtmessung, sind wohl vor allem durch das komplexere und fehleranfälligeres Messverfahren zu begründen. Die hohe Gesamtabweichung zeigt, dass das Versuchsbrett bei der Nassmessung im Labor noch überarbeitet werden müsste. Das Wasser fließt wohl wegen dem Blechuntergrund schneller ab als im Feld. Die Asphalt- oder Markierungsoberfläche hält das Wasser wesentlich länger. Die Blechoberfläche sollte bei der erneuten Produktion von Laborprobenkörpern angeraut werden.

7.2 Bewertung

Für eine abschließende Bewertung hinsichtlich der Geometriewahl bei Agglomeratmarkierung sollen verschiedene Ansätze gewählt werden. Zum einen soll die Validität der Ergebnisse berücksichtigt werden, zum anderen sind aber auch relevante Beobachtungen und Analyseergebnisse aus Feld- und Laborstudie zu bewerten.

Die relevanten Eigenschaften, die bewertet und gewichtet werden müssen sind lediglich die Dauerhaftigkeit der trockengemessenen und nassgemessenen Nachtsichtbarkeit. Allerdings lässt sich weder in der Feldstudie noch in der Laborstudie von der Sichtbarkeit im Trockenen auf die im Nassen schließen.

Die Ergebnisse der Nachtsichtbarkeit bei Trockenheit stellen die valideren Ergebnisse dar, sind aber aufgrund des großen Abstandes zum Grenzwert nach zwei Jahren Belastung in der Feldstudie offensichtlich nicht zuerst maßgebend. Wesentlich näher am Grenzwert liegen die Feldergebnisse der Nassmessung. Aufgrund der kleineren Menge an Einzelmessungen im Feld und der schwächeren Korrelation der Laborergebnisse mit den Feldergebnissen, sind die Nassmessungsergebnisse im Verhältnis weniger verlässlich.

Da die Nachtsichtbarkeitswerte der Nassmessung der Feldstudie am dichtesten am Grenzwert von 25 mcd/m²lx liegen, sollen unterdurchschnittliche Geometrie in dieser Disziplin zuerst ausgeschlossen werden. In Abbildung 7-6 wurden die Geometrievarianten aus der Feldstudie nach ihrer Nachtsichtbarkeit bei Nässe sortiert und anschließend mit einem Farbcode versehen, der in einer weiteren Abbildung zum Einsatz kommt. Unterdurchschnittliche Geometrievarianten mit einzelnen oder mehreren Grenzwertüberschreitungen sind rot gefärbt. Geometrievarianten mit kleiner Perle sind gelb gefärbt, da für jeder dieser Varianten eine „grünmarkierte“ besser sichtbare Variante mit groben Perlen existiert. Dunkelgrün sind die Varianten deren Nachtsichtbarkeit bei Nässe nach dem letzten Winter noch flächendeckend über dem Grenzwert liegen werden. Die restlichen, mit hellgrün hinterlegte Varianten sind dieses Jahr noch knapp über dem Grenzwert. Große und kleine Kreisdots, sowie Pflaumen und die Kombination 2 aus Pflaumen und Erdnüssen haben auch nach langer Belastung die höchsten Sichtbarkeitswerte bei Nässe.

In Abbildung 7-7 werden die nach der Analyse der Nachtsichtbarkeit bei Nässe gewählten Geometrievarianten nach ihrer Nachtsichtbarkeit bei Trockenheit beurteilt. Alle Geometrien erfüllen die Grenzwerte. Dennoch lässt sich bei den Pflaumen und bei der Kombination 2 aus Pflaumen und Erdnüssen leuchtdichtetechnisch sehr großes Potential erkennen. Der Mittelwert ist allerdings nicht deutlich höher. Im Feld gibt es sowohl bei der großen und auch kleinen Perle starke Rückgänge der Sichtbarkeit.

Bei der Analyse dieser Auffälligkeit fallen passend zu den Unterschieden in der Nachtsichtbarkeit auch zum Teil sehr starke Unterschiede in der geometrischen Ausprägung auf (s. Abbildung 7-8). Entscheidend scheint der Abstand zwischen zwei Agglomeratreihen in

Längsrichtung in Kombination mit der Ausgangsschichtdicke zu sein. Dieses Phänomen lässt sich mit Ergebnissen der numerischen Methode darstellen. Da die Kreisdotgeometrien ebenfalls sehr hohe Leuchtdichten bei Nässe haben, soll deren perfekte Anordnung ebenfalls ermittelt werden.

Rang	Geometrievarianten Feldstudie	Abweichung $R_{L,nass,i}/MW$	$R_{L,nass}$
		[%]	[mcd/(m ² lx)]
1	g.P. Pflaumen	148	57
2	g.P. Kombination 2	142	54
3	g.P. Kreisdots (klein)	136	52
4	g.P. Kreisdots (groß)	136	52
5	f.P. Kombination 2	135	52
6	f.P. Kreisdots (groß)	131	50
7	f.P. Kreisdots (klein)	128	49
8	g.P. Kreisdots (kreuz)	117	45
9	g.P. Tropfen	116	45
10	g.P. stochastisch (fein)	111	43
11	f.P. Tropfen	104	40
12	f.P. Pflaumen	104	40
13	f.P. Kreisdots (kreuz)	98	38
14	g.P. Dreiecke (in FR)	86	33
15	g.P. stochastisch (grob)	83	32
16	f.P. Dreiecke (eg. FR)	81	31
17	g.P. Dreiecke (eg. FR)	80	31
18	f.P. Kombination 1	79	30
19	g.P. Kombination 1	78	30
20	g.P. Erdnüsse	78	30
21	f.P. stochastisch (grob)	77	30
22	f.P. stochastisch (fein)	72	28
23	f.P. Dreiecke (in FR)	64	25
24	f.P. Erdnüsse	62	24
		MW:	38

Abbildung 7-6 Rangfolge der Geometrievarianten der Feldstudie nach Nachsichtbarkeit bei Nässe und Trockenheit

Rang	Geometrievarianten Feldstudie	Abweichung $MW_{R_{L,trocken}}/MW_{ges}$	$MW_{R_{L,trocken}}$	grobe Perle Feld $R_{L,trocken}$	feine Perle Feld $R_{L,trocken}$	1. Versuchsreihe Labor $R_{L,trocken}$	2. Versuchsreihe Labor $R_{L,trocken}$
		[%]	[mcd/(m ² lx)]				
1	Kombination 2	124	267	199	305	297	-
2	Tropfen	113	243	236	206	251	278
3	stochastisch (fein)	106	229	225	217	244	-
4	Pflaumen	104	224	213	152	251	278
5	Kreisdots (klein)	93	200	169	216	213	203
6	Kreisdots (groß)	80	172	169	153	195	-
7	Kreisdots (kreuz)	79	170	160	140	210	-
		MW_{ges}:	215				

Abbildung 7-7 Rangfolge der durch die Nassmessung gewählten Geometrievarianten der Feld- und Laborstudie nach Nachsichtbarkeit bei Trockenheit

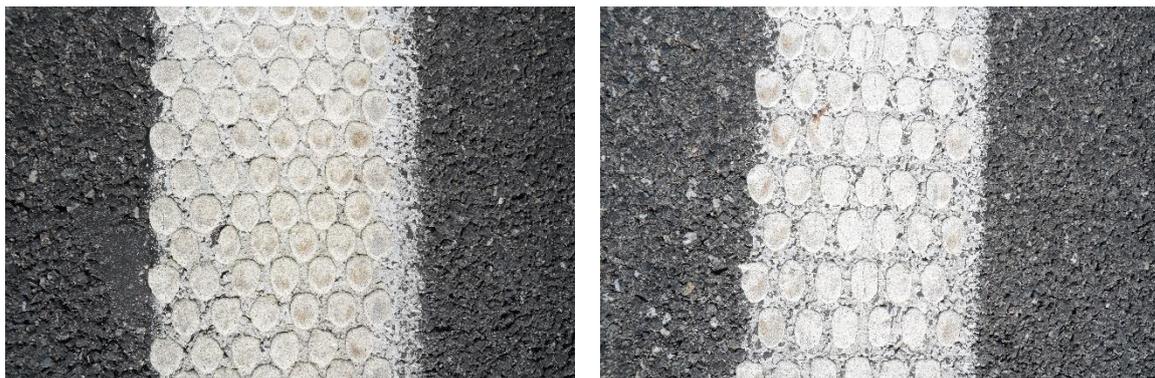


Abbildung 7-8 Ausprägung der Geometrievariation V20 bzw. V10 Pflaumen mit niedriger Nachtsichtbarkeitswerten



Abbildung 7-9 Ausprägung der Geometrievariationen Kombination 2 (Pflaumen + (Erdnüsse)) mit hoher Nachtsichtbarkeit

Als Fazit lässt sich sagen, dass mit den geometrischen Varianten Kombination 2 und Pflaumen zwei Geometrien gefunden wurden, die sowohl bei Nässe als auch im trockenen Zustand über ausreichend Sichtbarkeit verfügen um nach zwei Jahren Belastung durch den Winterdienst (insgesamt 64 Schneepflugübergänge) alle Grenzwerte einhalten. Zusätzlich besteht bei optimaler Anordnung das Potenzial weitere Schneepflugübergänge und damit nach mehr Wintern Belastung die Grenzwerte einzuhalten.

Eine ähnlich hohe Sichtbarkeit im belasteten Zustand wird sonst nur von Kreisdots erreicht. Diese liegen nach der Sichtbarkeitsbewertung bei der Trockenmessung allerdings eher unter dem Durchschnitt. Die Optimierung wird deshalb nur mit den Pflaumen durchgeführt.

7.3 Optimierung

Bei der Geometrievariante Pflaumen soll mittels der numerischen Methode, die optimale Anordnung zu in Bezug auf die Schneepflugresistenz ermittelt werden. Die Länge der Pflaumen in Fahrtrichtung beträgt 35 mm, die in Querrichtung 25 mm. Die Agglomerate sind im Neuzustand 4,3 mm hoch. Die Abstände in Querrichtung sollten immer 90% (23 mm) der Pflaumenbreite betragen, sodass eine leichte Überlappung in Längsrichtung besteht.

7.3.1 Symmetrisches Muster

Die Ergebnisse für verschiedene gewählte Abstände in Längsrichtung nach einem symmetrischen Muster Abbildung 6-3 sollen hier kurz dargestellt und analysiert werden. Als Belastungszeitraum wurden immer die zwei Winter (64 SPÜ) der Feldstudie gewählt.

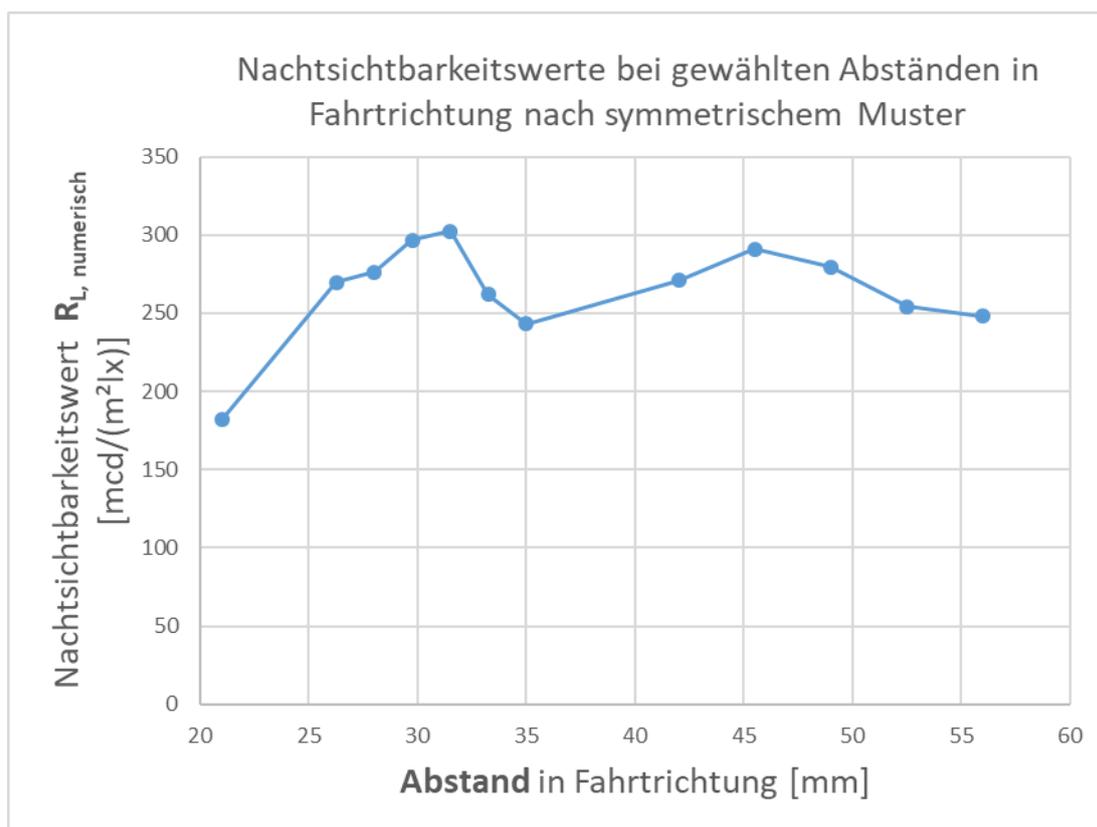


Abbildung 7-10 Nachtsichtbarkeitswerte des symmetrischen Musters nach zwei Wintern Belastung

Die zwei maßgebenden in 6.1.4 beschriebenen Faktoren führen zu zwei Peaks. Im Abstand von 30 mm überlappen die Agglomerate in Querrichtung, sodass ein konstanter Abtrag realisiert wird. Wenn der Abstand in Fahrtrichtung sich der Länge der Einzelagglomerate annähert lässt diese Wirkung ab, bis bei 35 mm der Tiefpunkt erreicht ist. Bis zu 45 mm nimmt der Sichtbarkeitswert wieder zu, da zunehmend die komplette Flanke zur Retroflexion genutzt wird. Ab 45 mm liegt die beleuchtete und sichtbare Fläche schließlich auch auf dem nicht retroreflektierenden Untergrund. Anhand der folgenden Abbildungen der abgetragenen und beleuchteten Modelle kann dies nachvollzogen werden. Die sichtbare und damit relevante Oberfläche ist rot bzw. grün dargestellt. Rot ist die belastete Fläche und die verschattete aber sichtbare Fläche eines Agglomerats. Nur die grünen Flächen tragen zur Sichtbarkeit bei. Weiße und graue sind irrelevante nicht sichtbare Oberflächen auf den Agglomeraten bzw. auf dem Untergrund.

Die Laborprobekörper als auch die Felder auf der A1 wurden mit einem Abstand von ca. 38 mm appliziert. Allein durch eine andere Anordnung der Agglomerate kann somit schon eine Steigerung des trockenen Nachtsichtbarkeitswertes von 20% erreicht werden.

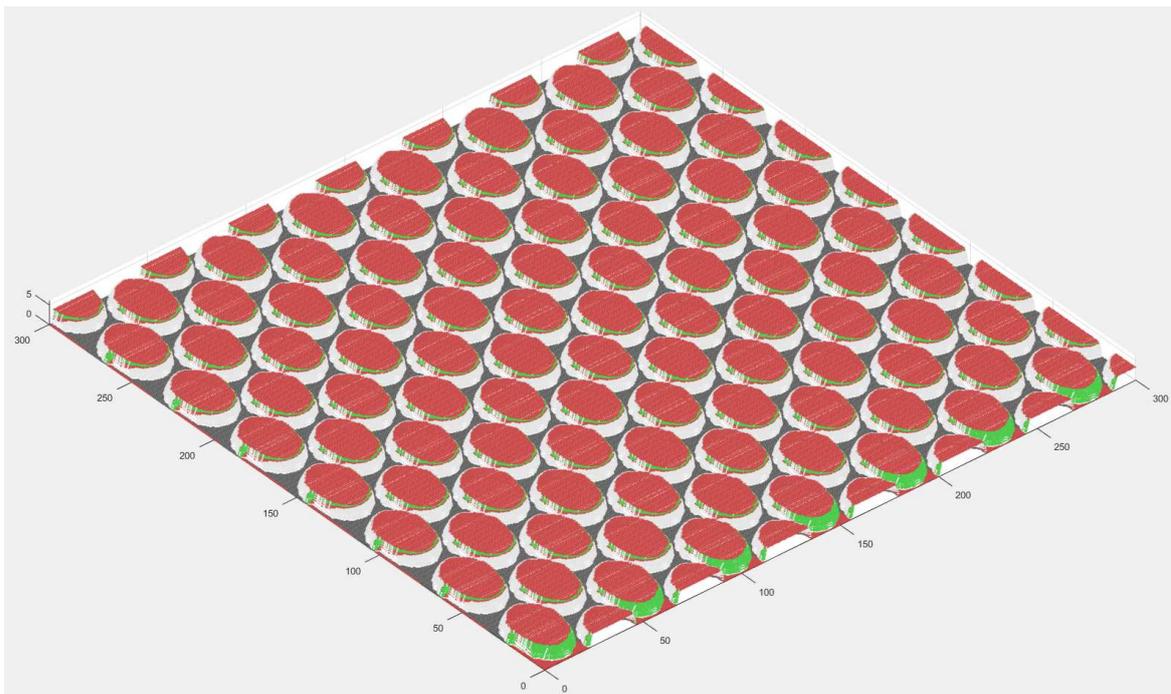


Abbildung 7-11 symmetrisch applizierte Agglomerate mit kleinem Abstand in Fahrtrichtung (21mm)

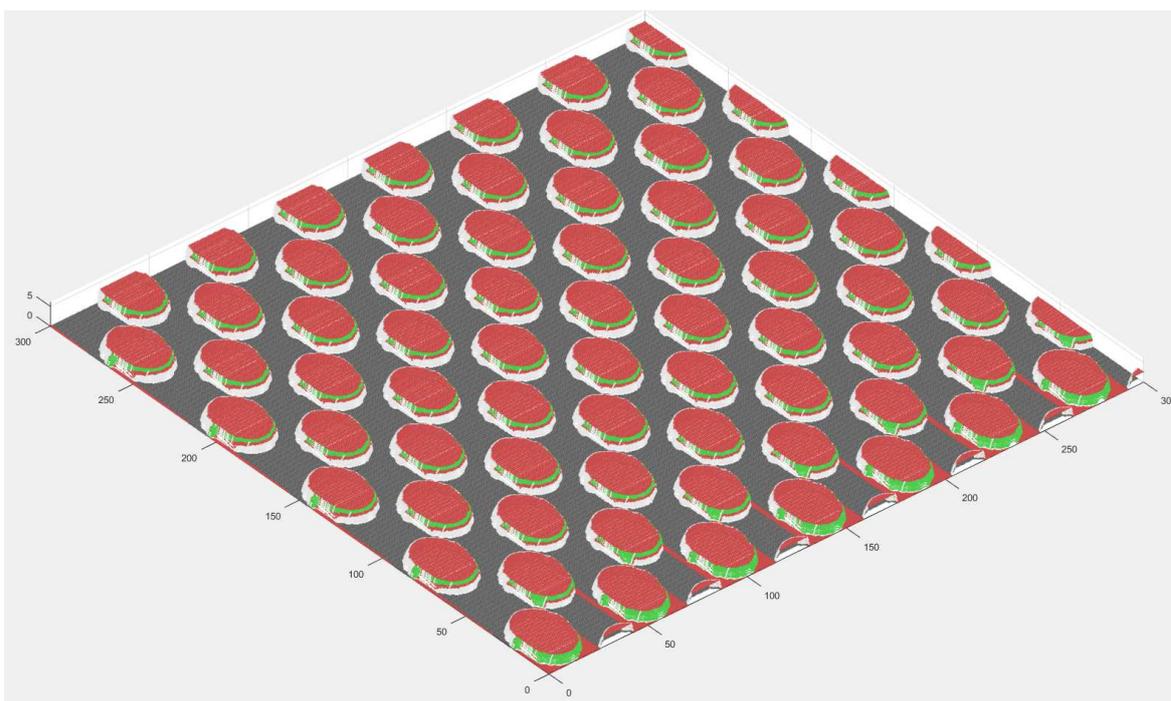


Abbildung 7-12 symmetrisch applizierte Agglomerate mit mittlerem Abstand (31mm)

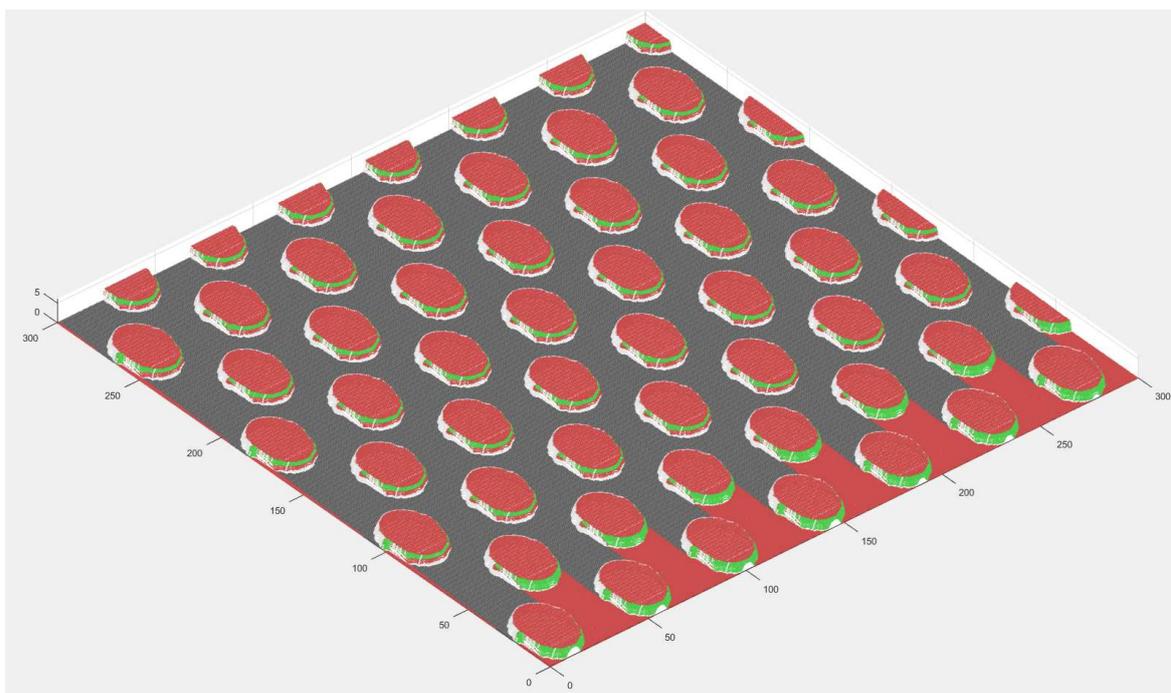


Abbildung 7-13 symmetrisch applizierte Agglomerate mit großem Abstand (42mm)

7.3.2 Asymmetrisches Muster

Wie schon in 6.1.4 angesprochen sollte erwogen werden ob es sinnvoll ist die beiden Phänomene „Sichtbarkeit durch Abstand“ und „Haltbarkeit durch Überlappen“ gleichzeitig zu nutzen.

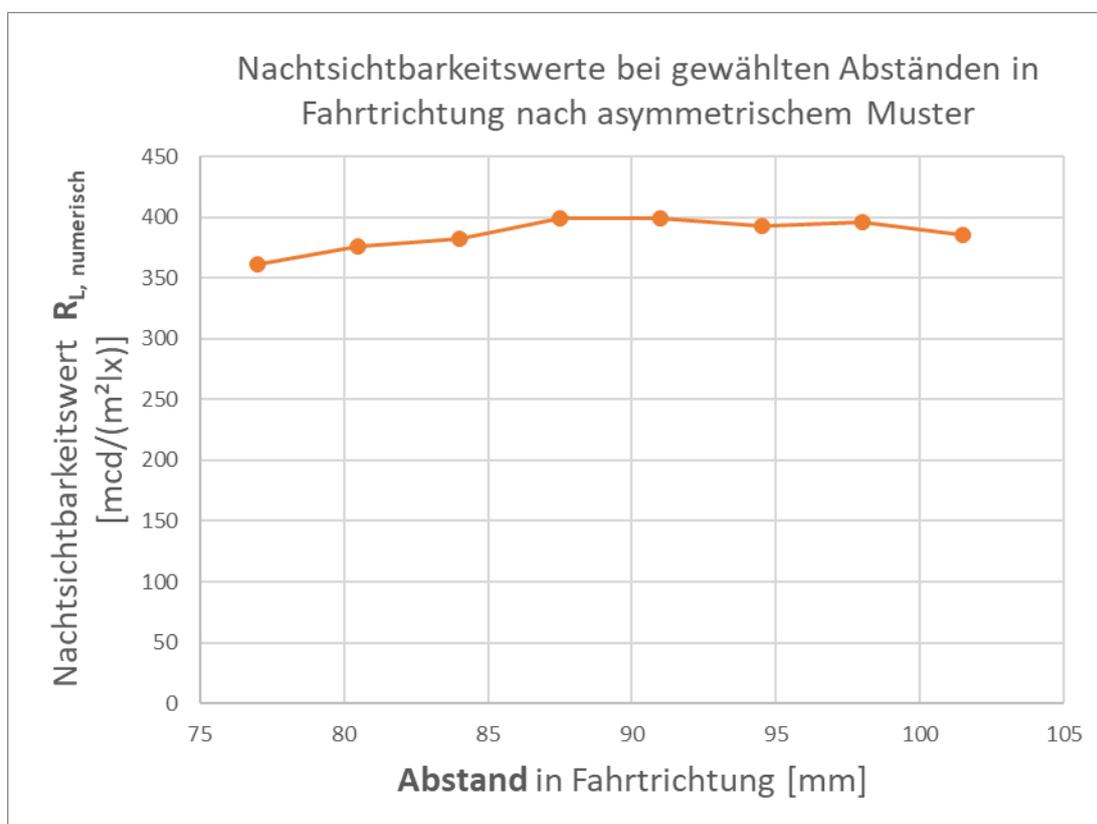


Abbildung 7-14 Nachtsichtbarkeitswerte des asymmetrischem Musters nach zwei Wintern Belastung

Der maßgebende Abstand ist auch hier in Abbildung 7-14 dargestellt. Der Abstand der im symmetrischen Fall als Parameter verwendet wurde, ist durch die Geometrie (Markierungsbreite) direkt an den zusätzlichen Abstand gekoppelt, da die Schneepflugkante immer möglichst auf der gleichen Anzahl an Agglomeraten in Querrichtung liegen sollte.

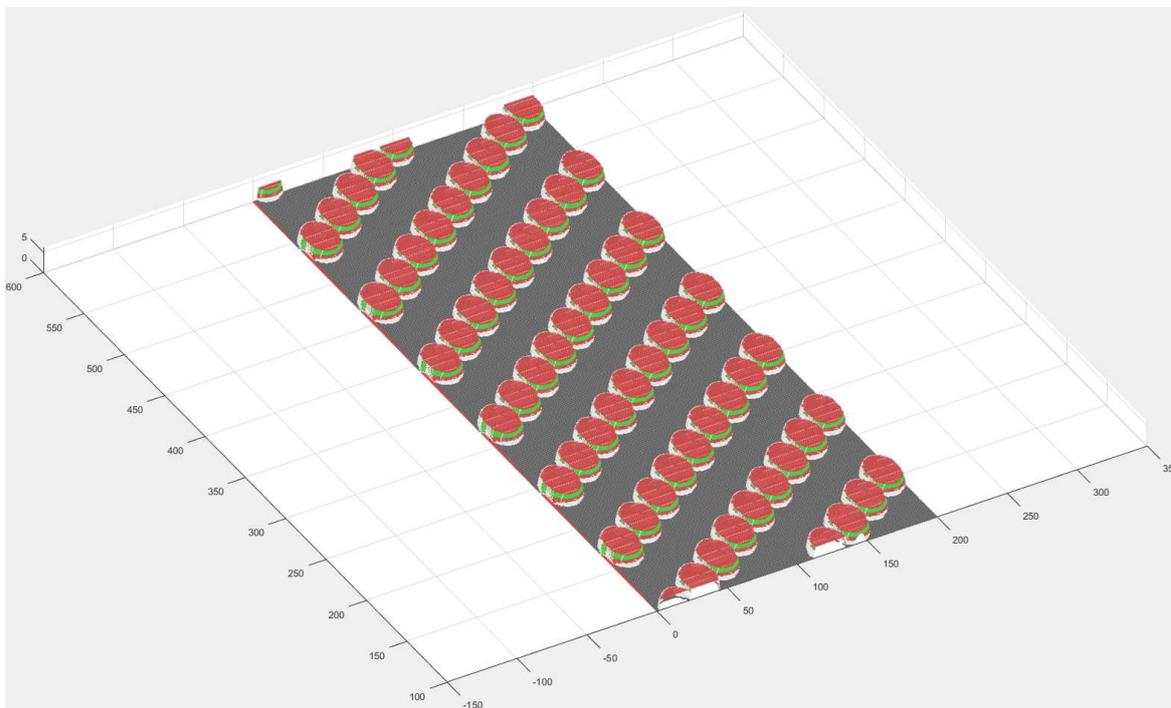


Abbildung 7-15 asymmetrisch applizierte Agglomerate mit kleinem Abstand (77mm)

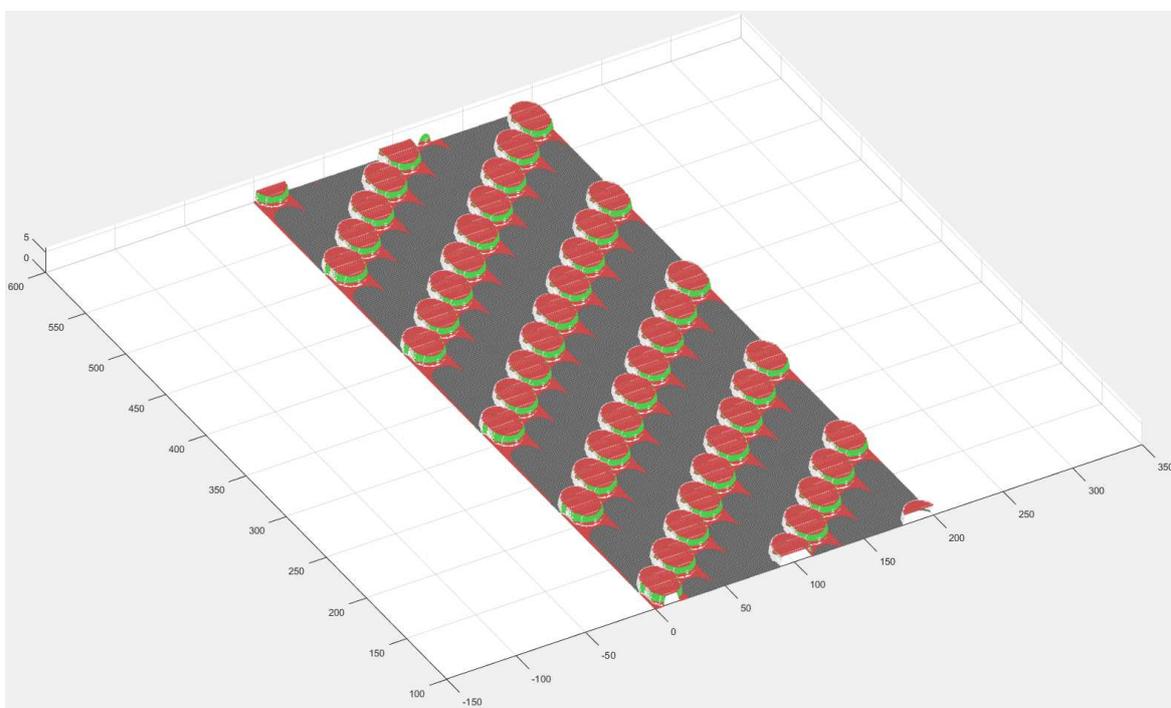


Abbildung 7-16 asymmetrisch applizierte Agglomerate mit großem Abstand (102mm)

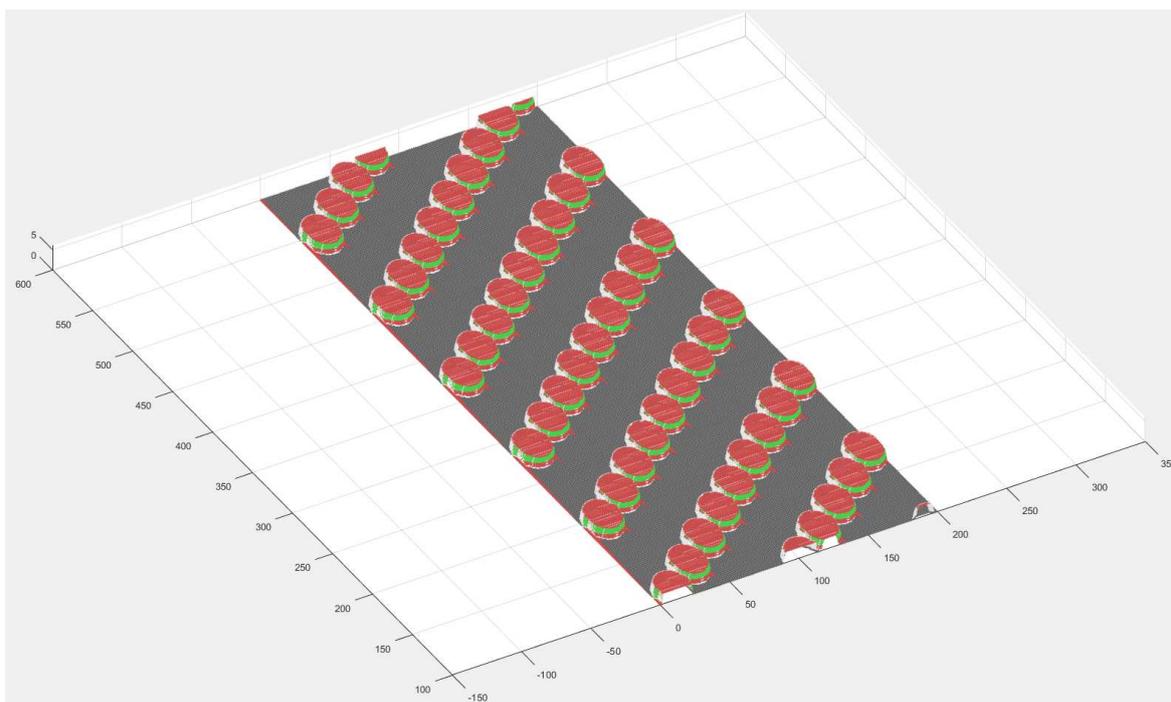


Abbildung 7-17 asymmetrisch applizierte Agglomerate mit mittlerem Abstand (91mm)

Durch eine optimierte asymmetrische Anordnung lässt sich der trockengemessene Nachsichtbarkeitswert im Belastungszustand nach 2 Jahren Belastung durch den Winterdienst um 60% gegenüber der im Feld und Labor verwendeten Anordnung erhöhen. Hierbei ist zu sagen, dass die Flächenbedeckung bei 102 mm Abstand immer noch den niedrigsten Wert von 61 % knapp über dem Grenzwert erreicht. Auch wenn der Grenzwert bei einer Bewertung der Normgeometrie vielleicht nicht sinnvoll erscheinen mag, so muss auch der LKW-Fahrer der in einer Entfernung von 10 Metern die Markierung noch als durchgängig wahrnehmen.

7.4 Fazit und Empfehlung

Im Rahmen einer Empfehlung ist auf folgende Kapitel zu verweisen:

- 4.3.1 Entwicklung der Tagsichtbarkeit im Labor
- 4.3.2 Entwicklung der Nachsichtbarkeit im Labor
- 4.3.3 Auswirkungen der Perlengröße
- 5.3.1 Ergebnisse der Leuchtdichtemessung im Feld
- 6.1.4 Fazit aus der numerischen Methode
- 7.2 Bewertung
- 7.3 Optimierung

7.4.1 Geometrievariante

Abschließend ist zu sagen, dass gerade bei Nässe größere Geometrien mit höherer Schichtdicke die bessere Wahl als feinere Geometrien sind. Zwar liegen die Nachsichtbarkeitswerte der stochastisch verteilten Markierung oder auch die regelmäßig verteilten Runddots im Feld bei Nässe über dem Durchschnitt, dies ist aber auf ihre gute Drainagefähigkeit zurückzuführen. Werden die größeren Geometrien wie Tropfen oder Pflaumen nicht zu eng angeordnet, um den Wasserabfluss nicht zu behindern, so sind sie bei Nässe wesentlich

länger sichtbar, da es mehr Schürfkantenübergänge braucht, ehe sie entscheidend an Höhe verlieren.

Ein weiterer Vorteil der gestreckten regelmäßigen Geometrievarianten liegt in der Möglichkeit sie überlappend anordnen zu können. Gerade die Sichtbarkeitsmessung bei trockener Fahrbahn zeigen, dass die Auflagefläche, über die der Schneepflug gleitet, möglichst regelmäßig und breit sein sollte, um lange Standzeiten zu garantieren.

Weiter ist zu erkennen, dass übermäßig lang gezogene Varianten, wie erdnussähnliche Formen, zwar gute Eigenschaften bezüglich des gleichmäßigen Abtrags erkennen lassen. Schließlich haben diese aber zu wenig Flanken in Fahrtrichtung, um einen hohen Anteil an beleuchteter und sichtbarer mit Glasperlen besetzter Fläche zu besitzen.

Eine bestmögliche Geometrie ist somit in Fahrtrichtung nicht zu lang, um gute Sichteigenschaften und Drainagewirkung zu haben und nicht zu kurz um überlappend angeordnet werden zu können. Außerdem ist sie nicht zu flach, um auch nach längerer Standzeit noch aus einem Wasserfilm herauszuragen und nicht zu hoch oder zu schmal, um neben steiler Kante eine möglichst flache Kuppe zu besitzen, sodass ein gleichmäßiger Abtrag möglich ist.

Die Pflaumengeometrie, als etwas in Fahrtrichtung verlängerter Runddot, erfüllt diese Eigenschaften, wenn die Agglomerate mit den charakteristischen Abmaßen hergestellt werden. Die Applikation im Feld zeigt, dass durchaus Fehlervarianten entstehen können, die eine niedrigere Resistenz gegen die Belastung durch den Winterdienst aufweisen. Die Breite der Grundfläche sollte **25 mm**, die Länge **35 mm** betragen. Entscheidend ist auch eine Höhe von mindestens **4,5 mm**. Es ist darauf zu achten, dass die Agglomerate nicht zu weit auseinanderlaufen und damit an Höhe verlieren.

7.4.2 Applikationsuntergrund

Die Frage, ob die Agglomerate auf einem Grundstrich appliziert werden sollten, ist nicht endgültig geklärt. Es hängt maßgebend davon ab, ob der Verbund zwischen neuer und alter Markierung oder zwischen neuer Markierung und Fahrbahnoberfläche höher ist. Ein zweiter Faktor ist die Fähigkeit Wasser weiterzuleiten. Gerade bei offenporigen Asphalt sollte möglichst nicht auf einen Grundstrich appliziert werden, da die Drainagewirkung vom Untergrund hier sehr gut ist. Bei Asphaltbeton oder Gussasphalt ist zu prüfen welche Oberfläche eine bessere Drainagewirkung hat.

Irrelevant bei der Entscheidung ob auf einen Grundstrich appliziert werden soll, ist die Frage der Sichtbarkeit des Grundstriches. Die Agglomerate sind aufgrund der wichtigen Gleichmäßigkeit des Abtrags ohnehin so zu applizieren, sodass der Grundstrich niemals sichtbar wird. Gerade die Nachtsichtbarkeit bei Nässe ist ein klares Argument dagegen den Grundstrich mit in die Retroreflexionswirkung einzubeziehen. Der Untergrund, Grundstrich oder Straße, darf nach den Sichtbeziehungen der Normgeometrie niemals sichtbar sein.

7.4.3 Perlenwahl

Bei der Perlenwahl sei hier nochmal kurz erwähnt, dass bei Schneepflugbelastung von Agglomeratmarkierung der Grenzwert bei Nacht und Nässe immer zuerst unterschritten wird. Für diesen Fall ist die Perle auszuwählen. Des Weiteren werden die Perlen auf den Kuppen nahezu ausnahmslos zerstört, während die Perlen in den Flanken keine Belastung erfahren. Die Perlen sind also nicht nach Widerstandsfähigkeit, sondern primär nach Nachtsichtbarkeit bei Nässe auszuwählen.

7.4.4 Applikationsmuster

Die Anordnung der Pflaumengeometrie trägt erheblich zur Sichtbarkeit bei Nacht bei. In der Feld- und Laborstudie wurden die Pflaumen in sehr ungünstigen Abständen appliziert. Es ist somit bei der Applikation entweder auf ein Überlappen in Querrichtung zu achten, oder im besten Fall für ein Überlappen viel größere Abstände zu sorgen, die der Sichtgeometrie angepasst sind. Beide dargestellten Applikationsmuster sollten mit den gleichen Applikationsverfahren produziert werden können und sind sehr robust gegen Abweichungen. Das heißt, dass bei fehlerhafter Applikation kein Zurückfallen hinter den in Feld und Labor applizierten Mustern zu erwarten ist, da diese Applikationsmuster sozusagen den schlechtesten Fall darstellen.

In den folgenden Darstellungen sind zwei Prinzipskizzen mit den empfohlenen Mustern bei einer 20 cm breiten Markierung abgebildet:

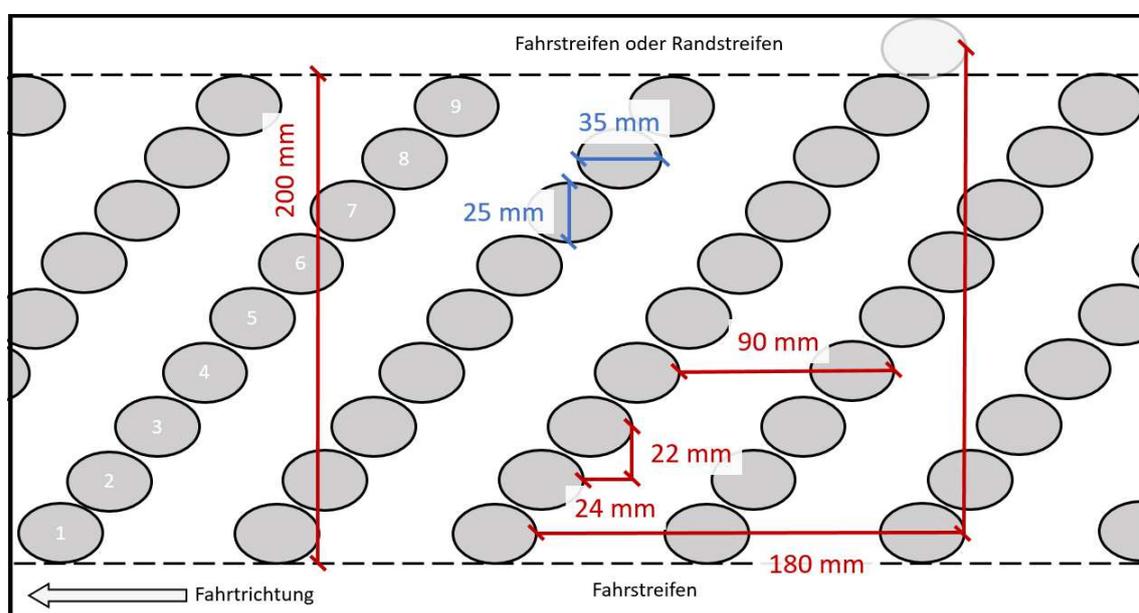


Abbildung 7-18 empfohlenes asymmetrisches Applikationsmuster mit der Pflaumenagglomeratform

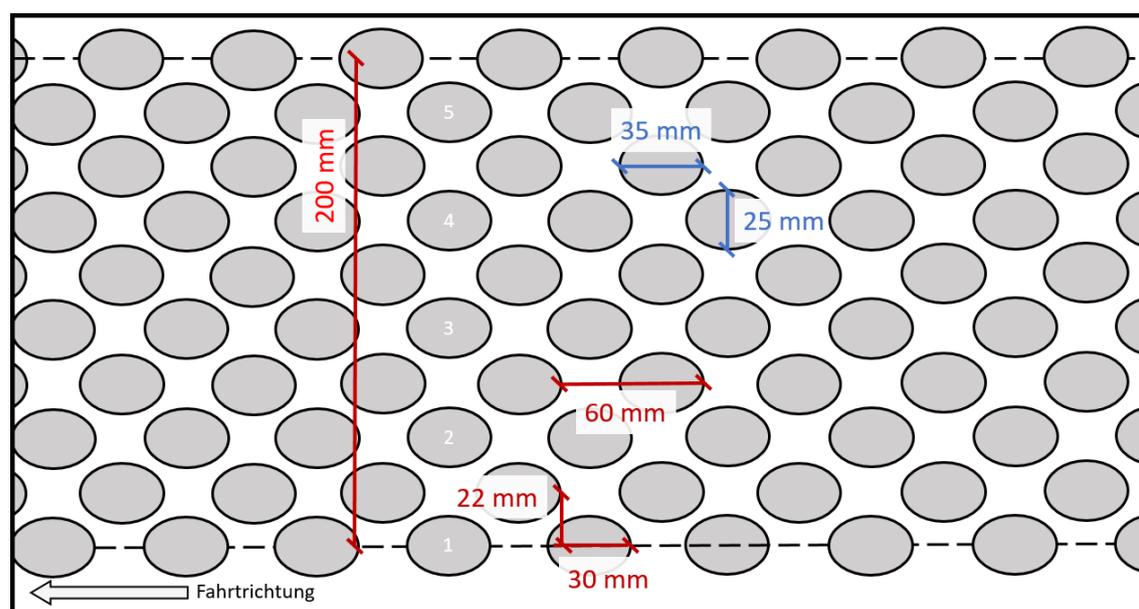


Abbildung 7-19 empfohlenes symmetrisches Applikationsmuster mit Pflaumenagglomeratform

Das asymmetrische Applikationsmuster stellt dabei nach der numerischen Simulation die wesentlich dauerhaftere Lösung dar. Die Agglomerate sind in Reihen anzuordnen, die im Abständen von 90 mm zu applizieren sind. Die Agglomerate der Reihen sind in Fahrtrichtung mit ca. 24 mm versetzt anzuordnen. Quer zur Fahrtrichtung sollten etwa 10% jedes Agglomerats mit dem direkten Nachbarn überlappen, sodass sich ein Abstand von 22 mm ergibt. Somit besteht eine Reihe bei einer 200 mm breiten Markierung aus neun Agglomeraten. Bei einer Fahrbahnbegrenzungsmarkierung sind die Reihen jeweils in Fahrtrichtung vom Randstreifen zur Fahrbahn hin auszubilden (s. Skizze), da sich somit die Sichtbarkeitswerte aus einer leicht schrägen Perspektive von der Fahrbahn aus weiter verbessern.

Beim symmetrischen Muster sind die Reihen quer zur Fahrtrichtung angeordnet. Die Reihen sind in Längsrichtung alle 30 mm zu applizieren, wobei jede zweite Reihe in Querrichtung um 22 mm versetzt wird. Hierbei sollen die Agglomerate zweier aufeinanderfolgender Reihen wie oben mit 10% ihrer Breite überlappen. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Anzahl der Agglomerate jeder Reihe gleich ist. Es ergeben sich bei einer mindestens 200 mm breiten Markierung fünf Agglomerate pro Reihe, wobei die Markierung somit tatsächlich 225 mm breit ist.

7.4.5 Fazit

Insgesamt konnte ein Fahrbahnmarkierungssystem mit erhöhter Beständigkeit gegen die mechanische Belastung durch den Winterdienst entwickelt werden. Durch einen Vergleich unterschiedlicher Agglomeratmarkierungsgeometrien in einer kombinierten Feld- und Laborstudie wurde eine Variante gefunden, welche sich bei der Tag- und Nachtsichtbarkeitsmessung sowohl bei Trockenheit, als auch bei Nässe als tauglich erwiesen hat. Durch eine optimierte Anordnung der Agglomerate kann die Sichtbarkeit nach der Belastung durch den Verkehr und den Winterdienst weiter gesteigert werden.

Außerdem konnten weitere Erkenntnisse bezüglich der Gründe für die unterschiedliche Eignung von Agglomeratgeometrien bei der Widerstandsfähigkeit gegen die Belastung durch den Winterdienst gewonnen werden. Durch Beobachtungen und Analysen konnten ermittelt werden, welche Ausprägungen einer Variante entscheidend für ein schneepflugbeständiges Markierungssystem sind.

Des Weiteren wurde ein Laborprüfverfahren entwickelt, welches ausreichend über die Ergebnisse der Feldstudie validiert wurde. Mit dem Laborprüfverfahren kann die Belastung durch den Winterdienst in definierten Schritten anhand von Probekörpern simuliert werden. Hierbei wird eine beliebige Anzahl Schneepflugübergänge als Input gewählt.

Abschließend wurde eine computergestützte Methode entwickelt und über die Ergebnisse der kombinierten Labor- Feldstudie validiert. Auch bei dieser gilt, dass eine beliebige Anzahl Schneepflugübergänge als Input gewählt werden kann, um einen realistischen Abtrag zu simulieren. Weiter kann die Leuchtdichte von den belasteten virtuellen Probekörpern ermittelt werden.

Ein Einsatz für weitere Forschungsprojekte ist bei Laborprüfverfahren und bei computergestützter Methode vorstellbar.

Literaturverzeichnis

Agglo M Merkblatt für Agglomeratfahrbahnmarkierungen: Herausgegeben von der Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2006..

Appel 1968 A.Appel. Some techniques for shading machine renderings of solids. - New York : [s.n.].

BGBI BGBI Nr. 848/1995, Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über Bodenmarkierung. - 1995.

Bruehning 1998 E.Bruehning. Mehr Sicherheit durch Fahrbahnmarkierung, Straßenverkehrstechnik 42 351-355. - 1998.

Davies,Gather 1993 Davies, L., Gather, U.: "The Identification of Multiple Outliners"; In: Journal of American Statistical Association 88, Pp. 782-792, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 1993..

Dübel 2010 Steve Dübel, Realtime CPU-based Terrain Raytracing. - Universität Rostock : [s.n.].

EN 13021 2009-04: Maschinen für den Winterdienst - Sicherheitsanforderungen. - 2009.

EN 1423 Straßenmarkierungsmaterialien - Nachstreumittel - Markierungs-Glasperlen, Griffigkeitsmittel und Nachstreugemische. - 2013.

EN 1424 Straßenmarkierungsmaterialien – Premixglasperlen. - 2003.

EN 1436 Straßenmarkierungsmaterialien – Anforderungen an Markierungen auf Straßen. - 2007.

EN 15144 2007-09: Winterdienstausrüstung - Terminologie - Begriffe zum Winterdienst. - 2007.

EN 1790 Straßenmarkierungsmaterialien – Vorgefertigte Markierungen. - 2013.

EN 1824 Straßenmarkierungsmaterialien –Feldprüfungen. - 2011.

EN12802 Straßenmarkierungsmaterialien - Laborverfahren für die Identifikation. - 2011.

EN13197 Straßenmarkierungsmaterialien – Verschleißsimulator. - 2011.

EN1871 Straßenmarkierungsmaterialien - Markierungsfarben, Kaltplastikmassen und Heißplastikmassen - Physikalische Eigenschaften [Buch]. - 2008.

Fahrbahnmarkierung Leitfaden Verm.-Ass. Dipl.-Ing. Henriette Reinsberg und Dr.-Ing. Helmut Frank: Leitfaden Fahrbahnmarkierung. Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V., Deutsche Studiengesellschaft für Straßenmarkierungen e.V., Bonn, 2014..

FGSV 337/5 Technische Lieferbedingungen und Richtlinien für Geräte des Straßenunterhaltungs- und Betriebsdienstes TLG – Teil: B4: Schneepflüge für Mehrzweckgeräteträger und Lastkraftwagen nach TLF, Teil B1 und Teil B2. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehr. - 1997.

FGSV 390/11a Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen – Teil: Kommunalen Winterdienst. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, FGSV Verlag GmbH, Köln, 1985..

Foerster 2005 Förster, R.: Einfluss der Schneeräumung auf Straßenmarkierungen Produktseitig, 2005..

John 1999 John, D.: „Staatshaftung bei unzureichender oder fehlender Fahrbahnmarkierung. Straßenverkehrstechnik“, 43 (9), 443-450, 1999..

John 2009 John, D.: „Markierungsprüffeld im Harz - Ergebnisse und daraus resultierende Anforderungen“, 2009..

Kueper 2016 <http://www.kuepergermany.com/raeumleisten/produkte/kombi-s-36-wave-kombi-s-50-wave>, 2016.

Meseberg 1993 Meseberg, H.-H.:“ Verkehrstechnische Eigenschaften von Fahrbahnmarkierungen und ihre Messung.“; In: Straßenverkehrstechnik, 37 (6), 308-313, 1993..

Meseberg 2006 Meseberg, H.-H.: „50 Jahre horizontale und vertikale Verkehrszeichen.“; In: Straßenverkehrstechnik, 50 (6), 308-320, 2006..

Mutter-Solutions www.mutter-solutions.de/Produkte/12----.html, 2016..

ÖNORM B 2440 Bodenmarkierungen – Anforderungen an das Material und dessen Aufbringung, 1998..

ONR 22440-1 Bodenmarkierungen Funktionsdauer – Teil 1: Allgemeines, 2015..

ONR 22440-2 Bodenmarkierungen Funktionsdauer – Teil 2: Ortsgebiet, 2006..

ONR 22441 Richtlinien zur Spezifikation von Bodenmarkierungen und Bodenmarkierungsmaterial, 2015..

Policarpo 2005 F. Policarpo, M.M. Oliveira, J.L.D. Comba. Real-time relief mapping on arbitrary polygonal surfaces. - Washington : ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2005.

Reinsberg 2001 Reinsberg, H.: „Straßenmarkierungen- Hohe Anforderungen mit Problemen bei der Umsetzung in der Praxis“. In: Straßenverkehrstechnik, 45 (5), 213-215, 2001..

Rohrlack 2006 Rohrlack, N.: „Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen in Deutschland“. In: Straße und Autobahn, 57 (12), 762-768, 2006..

RVS 05.03.11 Ausbildung und Anwendung von Bodenmarkierungen. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr..

RVS 05.03.12 Auswahl von Bodenmarkierungen. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr..

RVS 08.23.11 Bodenmarkierungsarbeiten und zugehöriges Arbeitspapier Nr. 23 Checkliste für die Ausführung von Bodenmarkierungsarbeiten. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr..

RVS 12.04.11 Winterdienst Allgemeines.

RVS 12.04.12 Schneeräumung und Streuung.

RVS 12.04.16 Streumittel.

Sachs 2004 Sachs, L.: „Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden“; 11., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004..

Schmidt Aebi Schmidt. www.aebi-schmidt.de/de/produkte/schneeräumung [Online]. - 2016.

Schnell,Zwahlen 2000 T.Schnell und H. T. Zwahlen. Computer-based modeling to determine the visibility and minimum retroreflectivity of pavement markings. - Bde. S. 47-60.

Schönborn 1992 Schönborn, H. D.: „Die Markierung von Straßen, unverzichtbar für die Verkehrssicherheit!“ In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 38 (1), 19-27, 1992..

Statistik Merkblatt Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen – Teil 2: Erkennen und Behandeln von Ausreißern. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2003..

StVO StVO §55. Bodenmarkierung auf der Straße [Buch]. - 1960.

TL M 2006 Technische Lieferbedingungen für Straßenmarkierungsmaterialien. Herausgegeben durch den Arbeitsausschuss Fahrbahnmarkierungen der Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV), 2006..

ZTV M 2013 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen. Herausgegeben durch den Arbeitsausschuss Straßenmarkierungen der Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV), 201.

ZTV M Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement. - 50999 Köln : FGSV Verlag, 2013.

Anhang

- A 1 Korrelation Feldstudie und Laborstudie**
- A 2 Ergebnisse der Feldstudie**
- A 3 Ergebnisse der Laborstudie auf der Rundlaufprüfanlage**
- A 4 Ergebnisse der Laborstudie zur Prüfung der Schneepflugbeständigkeit**