

**Technische, ökologische und ökonomische Kriterien
für die Wahl von Gesteinskörnungen zum Bau und zur Erhaltung
von ungebundenen Deckschichten im Waldwegebau**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Uwe Barge

geboren in Oberhausen

Göttingen, den 4. Juli 2000

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. E. Roffael
2. Berichterstatter: Prof. em. Dr. W. Knigge
3. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Leutner (TU Braunschweig)

Tag der mündlichen Prüfung: 06.09.2000

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Holzbiologie und Holztechnologie (ehemals: Institut für Forstbenutzung) der Georg-August-Universität Göttingen in der Zeit von 1996 bis Juni 2000 unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. E. ROFFAEL.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. ROFFAEL für seine wissenschaftliche Betreuung, die zahlreichen Anregungen sowie seine stete Diskussions- und Hilfsbereitschaft.

Großer Dank gebührt den Herren Dipl.-Ing. Chr. DRÖGE und Prof. Dr.-Ing. R. LEUTNER vom Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig für die Unterstützung bei der Erstellung des „Technischen Teils“ durch wichtige Hinweise, Diskussionen und die Bereitstellung der labortechnischen Ausrüstung. Herrn Dipl.-Ing. S. WULFF danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Laborarbeiten.

Rat und fachliche Hinweise zum Waldwegebau gab Prof. Dr. Dr. h.c. G. BECKER vom Freiburger Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, der maßgeblich an der Konzeption der Arbeit (s. Einleitung) beteiligt war.

Die bodenkundlich, ökochemischen Ergebnisse wären ohne die Unterstützung von Herrn Prof. Dr. F. BEESE und seine Mitarbeiter vom Institut für Bodenkunde und Waldernährung durch die Durchführung der chemischen Analysen und wichtige Diskussionen nicht entstanden. Dafür möchte ich mich ebenfalls besonders bedanken.

Wichtige pflanzensoziologisch und waldökologisch bedeutsame Unterstützung erhielt ich von Prof. Dr. W. SCHMIDT und Dr. R. MROTZEK vom Institut für Waldbau.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. B. MÖHRING, Institut für Forstökonomie, für die Unterstützung in Fragen der betriebswirtschaftlichen Bedeutung der Wegeerhaltung.

Für die sehr wertvolle Unterstützung bei der Probenahme und für die zahlreichen, wertvollen Diskussionen zu Sachfragen des praktischen Waldwegebbaus sei den Herren A. HERWIG, H.-J. KREUZKAM und Dr. K.-H. PIEST nochmals gedankt.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Holzbiologie und Holztechnologie möchte ich für die gute Zusammenarbeit sowie für mannigfache Hilfeleistungen danken.

Den genannten Steinbruchbetreibern sei an dieser Stelle nochmals für die Überlassung des Probematerials gedankt.

Teile der vorliegenden Untersuchung wurden mit Mitteln des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Landesforstverwaltung) des Landes Niedersachsen gefördert. Hierfür möchte ich meinen Dank aussprechen.

0. EINLEITUNG	1
0.1. ZUR ENTSTEHUNG DER UNTERSUCHUNG	1
0.2. ZUR GLIEDERUNG.....	3
1. TECHNISCHER TEIL	4
1.1. PROBLEMSTELLUNG.....	4
1.2. ZIELSETZUNG	9
1.3. STAND DER KENNTNISSE.....	10
1.3.1. Anforderungen an Gesteinskörnungen im Straßen- und Wegebau.....	10
1.3.2. Anforderungen an Gesteinskörnungen im Waldwegebau.....	13
1.3.3. Beanspruchungen der ungebundenen Waldwegedecken	15
1.3.4. Die Bedeutung des Feinmaterials für ungebundene Wege	19
1.4. PRÜFVERFAHREN ZUR SCHLAG- UND SCHLAGABRIEBRESISTENZ	21
1.4.1. Schotter- und Splittschlagprüfung	22
1.4.2. Micro-Deval-Test.....	24
1.4.3. Los Angeles-Versuch	25
1.4.4. Vergleich und Korrelationen zwischen den Verfahren	27
1.5. LOS ANGELES-VERSUCHE AN WALDWEGEMATERIALIEN.....	29
1.5.1. Materialherkunft und Probenahme	30
1.5.2. Siebanalysen der Baustoffe.....	34
1.5.3. Durchführung der LA-Versuche.....	35
1.5.4. Ergebnisse der LA-Versuche.....	37
1.5.5. Kornzertrümmerung und Materialverfeinerung.....	38
1.5.6. Vergleich der Ergebnisse	40
1.6. VERSUCHE ZUR WIDERSTANDSFÄHIGKEIT GEGEN FROST	43
1.6.1. Beschreibung des FTW-Versuches.....	45
1.6.2. FTW – Versuche an Waldwegebaumaterial.....	47
1.7. DISKUSSION DER ERGEBNISSE DES „TECHNISCHEN TEILS“.....	51
2. ÖKOLOGISCHER TEIL	55
2.1. STAND DES WISSENS.....	55
2.1.1. Wege- und Straßenbegleitflächen in der Literatur	55
2.1.2. Ökologische Bedeutung der Waldwege	57
2.1.3. Der Begriff „Bodenveränderung“	60
2.1.4. Die quantitative Bedeutung des Materialverschleißes	61
2.1.5. Untersuchungen zur Staubausbreitung im Umfeld von Straßen und Wegen	62
2.2. VEGETATIONSKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN DER BODENVERÄNDERUNG.....	64
2.3. VEGETATIONSUNTERSUCHUNG AN WALDWEGEN IM HARZ	65
2.4. VEGETATIONSUNTERSUCHUNG AN WALDWEGEN IM SOLLING	68
2.5. VEGETATIONSUNTERSUCHUNG AN WALDWEGEN IM BRAMWALD	72
2.5.1. Einleitung und Zielsetzung	72
2.5.2. Material und Methoden.....	74

2.5.3. Ergebnisse	76
2.5.4. Diskussion.....	89
2.6. CHEMISCH, BODENKUNDLICHE UNTERSUCHUNG DER WEGEBAU-DECKSCHICHTMATERIALIEN	93
2.6.1. Zielsetzung.....	93
2.6.2. Material und Methoden	93
2.6.3. Ergebnisse	97
2.6.4. Diskussion.....	104
2.7. BEWERTUNG DER ERGEBNISSE UND FOLGERUNGEN FÜR DEN WALDWEGBAU.....	108
3. BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE DER WEGEERHALTUNG	109
3.1. STAND DER KENNTNISSE	109
3.1.1. Methodik: Die Investitionsrechnung im Waldwegebau.....	111
3.2. VERGLEICH DER GEBUNDENER UND UNGEBUNDENER BAUVARIANTEN	112
3.2.1. Kosten des Wegeausbaus.....	112
3.2.2. Kosten der Wegeerhaltung.....	113
3.2.3. Vergleich anhand der Kapitalwerte.....	114
3.3. INSTANDSETZUNGSKOSTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER NUTZUNGSDAUER	116
3.3.1. Ankauf von Gesteinskörnungen - Mengen und Ausgaben.....	116
3.3.2. Instandsetzungskosten für ungebundene Wegedecken.....	117
3.3.3. Kapitalwerte für Grundinstandsetzungen	118
4. EXKURS: RECYCLINGBAUSTOFFE UND INDUSTRIELLE NEBENPRODUKTE	121
4.1. EINLEITUNG UND BEGRIFFSBESTIMMUNGEN.....	121
4.2. RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DIE VERWENDUNG VON RC-BAUSTOFFEN	123
4.2.1. Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz	123
4.2.2. Bauschutt, RC-Baustoffe und künstliche Gesteine im Abfallrecht.....	124
4.2.3. Bodenschutz	126
4.2.4. Wasserschutz	127
4.3. UMWELTGERECHTE VERWENDUNG KÜNSTLICHER GESTEINE UND RC-BAUSTOFFE	128
4.4. TECHNISCHE EIGNUNG VON RECYCLINGBAUSTOFFEN ALS DECKSCHICHTMATERIAL	134
4.4.1. Verwitterungsbeständigkeit von RC-Material	135
4.4.2. RC-Baustoffe in der Schlagbeanspruchung	137
4.4.3. Industrielle Nebenprodukte als Deckschichtmaterial.....	138
4.5. DISKUSSION.....	139
5. SYNOPTISCHE DISKUSSION.....	142
6. ZUSAMMENFASSUNG	148
7. LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS / VORSCHRIFTEN UND RICHTLINIEN	151
8. ANHÄNGE 1 – 9.....	165

Aküve

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AFNOR	<u>A</u> ssociation <u>F</u> rançaise de <u>N</u> ormalisation
AFZ	<u>A</u> llgemeine <u>F</u> orst <u>Z</u> eitschrift
ASTM	<u>A</u> merican <u>S</u> ociety for <u>T</u> esting and <u>M</u> aterials
ATV	<u>A</u> llgemeine <u>T</u> echnische <u>V</u> ertragsbedingungen
B2	Qualitätsklasse der EBA-NS 86
BAST	<u>B</u> undes <u>a</u> nstalt für <u>S</u> traßenwesen (Bergisch Gladbach)
BMVBW	<u>B</u> undes <u>m</u> inisterium für <u>V</u> erkehr, <u>B</u> au- und <u>W</u> ohnungswesen
bspw.	beispielsweise
BZE	<u>B</u> oden <u>z</u> ustand <u>e</u> rhebung / Deutscher Waldbodenbericht, 1996
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CBR	<u>C</u> alifornia <u>B</u> eating <u>R</u> atio (Koeffizient eines Festigkeitsversuchs)
°C	Grad Celsius
CEN	<u>C</u> ommission <u>E</u> uropéenne de <u>N</u> ormalisation
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
DIN	<u>D</u> eutsche <u>I</u> ndustrie- <u>N</u> orm(en)
EBA-NS 86	<u>E</u> rgänzende <u>B</u> estimmungen der <u>N</u> iedersächsischen Straßenbauverwaltung zu den technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bemessung und den Bau von <u>A</u> sphaltstraßen, Ausgabe <u>86</u>
EN	<u>E</u> uropäische <u>N</u> orm(en)
EOX	Extraktion organisch gebundener Halogene
etc.	et cetera
F&H	<u>F</u> orst und <u>H</u> olz, Verlag M.& H. Schaper, Alfeld
Fa.	Firma
FGSV	<u>F</u> orschungsgesellschaft für <u>S</u> traßen- und <u>V</u> erkehrswesen
FoA	<u>F</u> orst <u>a</u> mt
FTW	<u>F</u> rost- <u>T</u> au- <u>W</u> echsel
g	Gramm
Gew.-%	Gewichtsprozent (siehe auch M.-%)
ggf.	Gegebenenfalls

ha	Hektar
HSG	<u>H</u> eilquellens <u>sch</u> utzgebiet
i.d.R.	in der Regel
incl.	inklusive
Kap.	Kapitel
KGV	<u>K</u> orngrößen <u>v</u> erteilung
KrW-/AbfG	<u>K</u> reislauf <u>w</u> irtschafts- und <u>A</u> bfallgesetz
l	Liter
LA	<u>L</u> os <u>A</u> ngeles (-Versuch, -Wert, -Koeffizient)
LAGA	<u>L</u> änder <u>a</u> rbeits <u>g</u> emeinschaft <u>A</u> bfall
Lkw	Lastkraftwagen
M	Mol (mol/l)
m	Meter
M.-%	Massenprozent. Der Begriff M.-% löst in den neuen Regelwerken des Straßenbaues (TL Min-StB 2000) den Begriff Gew.-% ab. In der vorliegenden Arbeit gelten beide Begriffe synonym.
m ³	Kubikmeter
mg/kg	Milligramm/Kilogramm
min	Minuten
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
mmol	Millimol
N/mm ²	Newton/Quadratmillimeter
ÖNORM	<u>Ö</u> sterreichische <u>N</u> orm
PAK (EPA)	<u>P</u> olyzyklische, <u>a</u> romatische <u>K</u> ohlenwasserstoffe (nach dem Analyseverfahren der „ <u>E</u> nvironmental <u>P</u> rotection <u>A</u> gency“)
Pkw	Personenkraftwagen
prEN	Europäische Vornormen
PSV	<u>P</u> olished <u>S</u> tone <u>V</u> alue (Maßeinheit für Polierresistenz)
RAP Stra 98	<u>R</u> ichtlinien für die <u>A</u> nerkennung von <u>P</u> rüfstellen für Baustoffe und Baustoffgemische im <u>S</u> traßenbau, Ausgabe 1998
RAwas-StB	<u>R</u> ichtlinien für die <u>A</u> nwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im <u>S</u> traßenbau aus <u>w</u> asserwirtschaftlicher Sicht (liegt im Entwurf vor)
RC-	<u>R</u> ecycling-
RG Min-StB 93	<u>R</u> ichtlinien für die <u>G</u> üteüberwachung von <u>M</u> ineralstoffen im <u>S</u> traßenbau, Ausgabe 1993
RLW 99	<u>R</u> ichtlinien für den <u>l</u> ändlichen <u>W</u> egebau, Ausgabe 1999

s	Sekunden
S&A	<u>S</u> traße und <u>A</u> utobahn, Kirschbaumverlag, Bonn
StVO	<u>S</u> traßen <u>v</u> erkehr <u>s</u> o <u>r</u> d <u>n</u> ung
StVZO	<u>S</u> traßen <u>v</u> erkehr <u>s</u> z <u>u</u> l <u>a</u> s <u>s</u> u <u>n</u> g <u>s</u> o <u>r</u> d <u>n</u> ung
SZ	<u>S</u> chlag <u>z</u> er <u>r</u> ü <u>m</u> me <u>r</u> ung (-Versuch, -Wert)
t	Tonne
Tab.	Tabelle
TL	<u>T</u> echnischen <u>L</u> ieferbedingungen
TL Min-StB 2000	<u>T</u> echnischen <u>L</u> ieferbedingungen für <u>M</u> ineralstoffe im <u>S</u> traßen <u>b</u> au, Ausgabe <u>2000</u>
TP Min-StB 94	<u>T</u> echnische <u>P</u> rüf <u>v</u> orschriften für <u>M</u> ineralstoffe im <u>S</u> traßen <u>b</u> au, Ausgabe <u>1994</u>
Tsd.	Tausend
U/min	Umdrehungen/Minute
vgl.	vergleiche
VOB	<u>V</u> erdingungs <u>o</u> rdnung für <u>B</u> auleistungen
WHG	<u>W</u> asser <u>h</u> aus <u>h</u> alt <u>s</u> g <u>e</u> set <u>z</u>
WSG	<u>W</u> ass <u>e</u> r <u>s</u> ch <u>u</u> t <u>z</u> g <u>e</u> bi <u>e</u> t
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
ZTV	<u>Z</u> usätzlichen <u>T</u> echnischen <u>V</u> ertragsbedingungen
ZTV LW 99	<u>Z</u> usätzliche <u>t</u> echnische <u>V</u> ertragsbedingungen und Richtlinien für die Befestigung ländlicher <u>W</u> ege, Ausgabe 1999
ZTVT-StB 95	<u>Z</u> usätzliche <u>t</u> echnische <u>V</u> ertragsbedingungen für den Bau von <u>T</u> ragschichten im <u>S</u> traßen <u>b</u> au, Ausgabe <u>1995</u>
µg	Mikrogramm = 10 ⁻⁶ g
µm	Mikrometer = 10 ⁻⁶ m

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNGEN IM TECHNISCHEN TEIL:

Abbildung 1-1: Arbeiten am Hang mit „getiltetem“ Planierschild (Quelle: Ausbildungsanweisung der Bundeswehr, VS)	4
Abbildung 1-2: Modernes Uhrglas- oder Graderprofil (schematisch)	5
Abbildung 1-3: Nutzungsdauer bindemittelfreier ländlicher Wege (nach Ergebnissen von Schmuck & Krause, 1994)	8
Abbildung 1-4: Beanspruchung von Gesteinskörnungen in einer Wegebefestigung (aus Quervain, 1957)	18
Abbildung 1-5: Schlagprüfgerät aus TP Min-StB 94 Teil 5.1 (links) und Krzemien (1975)	23
Abbildung 1-6: Mikro –Deval Prüffrommeln im Institut für Straßenwesen Braunschweig	24
Abbildung 1-7 : Los Angeles Trommel (Institut für Straßenwesen, BS und TP Min-StB 94 Teil 5.4.1)	26
Abbildung 1-8: Sieblinien des untersuchten Diabas	35
Abbildung 1-9: LA-Werte der Wegebaumaterialien graphisch	38
Abbildung 1-10: Kornverfeinerung und -zertrümmerung nach Dienemann und Dao	39
Abbildung 1-11: Kornverteilungslinien nach dem LA-Versuch	40
Abbildung 1-12: Korrelation zwischen LA- und SZ-Wert (nach Ballmann, 1996)	41
Abbildung 1-13: Schematische Darstellung der Frostwirkung (nach Quervain)	44
Abbildung 1-14: Temperaturverlauf beim Dosenfrostversuch nach TP Min StB 94	46
Abbildung 1-15: LA- und FTW- Werte der Wegematerialien	49
Abbildung 1-16: Absplitterung nach FTW-Versuch (prozentual)	50

ABBILDUNGEN IM ÖKOLOGISCHEN TEIL:

Abbildung 2-1: Prozentuale Verteilung der von Tamm (1955) erfaßten Immissionsmengen zur Entfernung von der Straße	63
Abbildung 2-2: pH-Werte an einem Weg mit Diabas-Deckschicht und an einem naturfesten Weg nach Glowienka (1994)	66
Abbildung 2-3: Einteilung des Wegerandbereiches in Bankette (Ba), Seitenstreifen (Sei), Graben (Gra) Böschung (Bö) und Waldrand (WR) (Wagner 1997)	68
Abbildung 2-4: pH-Werte der Wege: A (Devonkalk-Deckschicht), B (Dolomit-DS), C (Asphaltfahrbahn), D (Diabas-DS) und E (naturfeste DS) W5 und W5 sind 5 bzw. 15 m vom Weg entfernte Transekte (Wagner 1997)	69
Abbildung 2-5: pH-Werte an einem Weg mit Devonkalk Deckschicht im Solling (Wagner, Barge, 1998)	70
Abbildung 2-6: Mittlere Reaktionszahlen der Wege A (Devonkalk-Deckschicht), B (Dolomit-DS), C (Asphalt), D (Diabas-DS) und E (naturfeste DS) (Wagner 1997)	70
Abbildung 2-7: Mittlere Zahl an Pflanzenarten (Wagner, Barge 1998)	71
Abbildung 2-8: Mediane sowie Minimum und Maximum der Artenzahlen in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten. (n = 3)	79
Abbildung 2-9: Mediane sowie Minimum und Maximum der Reaktions-Zeigerwerte in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten (n = 3).	81

Abbildung 2-10: Mediane sowie Minimum und Maximum der Stickstoff-Zeigerwerte in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten. (n = 3).....	83
Abbildung 2-11: Relative Anteile der soziologischen Artengruppen in den verschiedenen Varianten nach Ellenberg et al. (1992) getrennt in Unter- und Oberhang. (N = Buntsandsteinmaterial; K = Muschelkalk; h = „hell“; d = „dunkel“).....	85
Abbildung 2-12: Mediane sowie Minimum und Maximum des mittleren relativen Lichtgenusses in den einzelnen Transekten der vier Varianten. (n = 3).....	87
Abbildung 2-13: Mediane sowie Minimum und Maximum der mittleren pH _(H2O) -Werte im oberen Mineralboden (0-3 cm) in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten (n = 3 bzw. 2)......	88
Abbildung 2-14: Fraktionierung des Feinmaterials aus dem LA-Versuch.....	95
Abbildung 2-15: Ca und Mg Gehalte (mg/kg) im Wegebaumaterial im Vergleich zu den Waldbodentypen (sortiert nach Ca Gehalt).....	98
Abbildung 2-16: K und P Gehalte (mg/kg) im Wegebaumaterial im Vergleich zu den Waldbodentypen (sortiert nach P Gehalt).....	98
Abbildung 2-17: Austauschbare Elementvorräte in Waldböden nach Ergebnissen der BZE.....	99
Abbildung 2-18: Vergleich der wässrigen Eluate von Ca und Mg mit dem HNO ₃ -Druckaufschluß .	103
Abbildung 2-19: Vergleich der wässrigen Eluate von K und P mit dem HNO ₃ -Druckaufschluß	103
 ABBILDUNGEN IM ÖKONOMISCHEN TEIL:	
Abbildung 3-1: Ausbaustandard und Kosten aus Hirt (1977).....	109
Abbildung 3-2: Erhaltungskosten im Wegenetz des südniedersächsischen Berglandes (aus Schützendorff 1985).....	110
Abbildung 3-3: Jährliche Gesamtkosten der Wegeerhaltung in zwei Inspektionen des südniedersächsischen Berglandes. Aus Bertram, 1997.....	113
Abbildung 3-4: Modellbetrachtung zur Instandsetzung bei unterschiedlicher Nutzungsdauer.....	118
Abbildung 3-5: Kapitalwerte für die Instandsetzung (unterschiedliche Nutzungsdauer).....	119
 ABBILDUNGEN IM EXKURS RC-BAUSTOFFE UND INDUSTRIELLE NEBENPRODUKTE:	
Abbildung 4-1: Stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen (aus Guth, 1993).....	136
Abbildung 4-2: FTW-Ergebnisse an natürlichen Gesteinskörnungen und RC-Baustoffen nach Ergebnissen von Tabbert (1996).....	137
Abbildung 4-3: Schlagzertrümmerungswerte SZ _{8/12} an Basalten und RC-Baustoffen nach Ergebnissen von Tabbert (1996).....	138

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLEN IM TECHNISCHEN TEIL:

Tabelle 1-1: Herkunft und Bezeichnung der untersuchten Gesteinsarten	31
Tabelle 1-2: Geologisch, petrographische Kurzbeschreibung der Gesteine.....	32
Tabelle 1-3: Zusammensetzung der Korngemische und Reibmittelladung.....	36
Tabelle 1-4: Ergebnisse der Los Angeles-Prüfung.....	37
Tabelle 1-5: Vergleich der ermittelten LA-Werte mit Angaben aus der Literatur.....	42
Tabelle 1-6: Ergebnisse der FTW- Versuche am Waldwegematerial	47
Tabelle 1-7: LA- und SZ- Kategorien der prEN 13242 mit Einschätzung der Eignung für ungebundene Wegedeckschichten	53

TABELLEN IM ÖKOLOGISCHEN TEIL:

Tabelle 2-1: Transportentfernung des Materials (nach Werten von Tamm, 1995)	63
Tabelle 2-2: Die Auswirkungen der Deckmaterialien auf den pH-Wert der Umgebung (aus Glowienka 1994)	65
Tabelle 2-3: Aufteilung der 11 Untersuchungsflächen auf die vier Varianten	74
Tabelle 2-4: Grundsätzliche Anforderungen an die Probeflächen.....	74
Tabelle 2-5: Stetigkeitstabelle. Arten, die einen deutlichen Schwerpunkt innerhalb einer der vier untersuchten Varianten haben (Trennarten).....	77
Tabelle 2-6: Herkunft und Probenbezeichnung der im IBW untersuchten Materialien	94
Tabelle 2-7: Bewertung der Ca, Mg und K Vorräte in Waldböden durch den Arbeitskreis Standortskartierung	99
Tabelle 2-8: Jährliche Elementaufnahme typischer Waldgesellschaften (Beese, 2000)	107

TABELLEN IM ÖKONOMISCHEN TEIL:

Tabelle 3-1: Kosten verschiedener Bauweisen nach Mischkalkulationen (Bielka, 1998)	112
Tabelle 3-2: Kapitalwerte der Ausbauvarianten bei variablen Erhaltungskosten.....	114
Tabelle 3-3: Jährlich höhere Belastung der Asphaltdecke (Kapitaldienst).....	115
Tabelle 3-4: Ankauf (t) und Kosten der Wegebaustoffe	116
Tabelle 3-5: Kosten und Nutzungsdauer verschiedener Gesteinskörnungen.....	117
Tabelle 3-6: Instandsetzungskosten und Kostenzuschlag (bei einem Bemessungszeitraum von 25 Jahren)	120

TABELLEN IM EXKURS RC-BAUSTOFFE UND INDUSTRIELLE NEBENPRODUKTE:

Tabelle 4-1: Wasserwirtschaftliche Anforderungen an Recycling-Baustoffe nach TL Min-StB 2000..	130
Tabelle 4-2: Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung gemäß RAwas-StB.....	132
Tabelle 4-3: Einsatzmöglichkeiten für Hochofenschlacke-1 (HOS-1)aus RAwas-St	133
Tabelle 4-4: Einsatzmöglichkeiten für Recycling-Baustoff-1 (RC-1)aus RAwas-StB	134

0. Einleitung

Der Wald ist flächenbedeutsamer Bestandteil der mitteleuropäischen Kulturlandschaft. Obwohl - oder gerade weil - seit Jahrhunderten intensiv bewirtschaftet und genutzt, erfüllt er bis heute in weitaus größerem Maße als andere Landnutzungsformen zugleich Funktionen als ökologischer Ausgleichsraum. Zur Gewährleistung eines wirksamen Wasser-, Boden-, Klima- und Artenschutzes gewinnt der Wald in dem Maße an Bedeutung, in dem Zivilisationseinflüsse auf die Landschaft insgesamt wachsende Wirkung entfalten. Walderhaltung und Waldnutzung im Rahmen ordnungsgemäßer forstlicher Bewirtschaftung ist an das Vorhandensein eines ausreichenden Wegenetzes geknüpft. Die wachsende Inanspruchnahme des Waldes bei Freizeitgestaltung und Erholung der Bevölkerung führt auch zu einem wachsenden Interesse und Bedarf der Öffentlichkeit an einem diesen vielfältigen Belangen entsprechenden forstbetrieblichen Wegenetz.

Zugleich sind der Bau und die Erhaltung sowie die betriebliche wie auch die öffentliche Nutzung von Waldwegen zwangsläufig mit Einwirkungen auf den Naturhaushalt und das Ökosystem Wald verbunden. Die mit der wachsenden Bedeutung des Waldes als ökologischer Ausgleichsraum einhergehende Sensibilität der Öffentlichkeit gegenüber derartigen Beeinträchtigungen und zunehmende Kenntnisse sowie Erfahrungen über ihre qualitativen und quantitativen Auswirkungen führen zu einem wachsenden umweltpolitischen und damit öffentlichen Interesse an dem Fragenkomplex der ökologischen Bewertung von Waldwegen. Zugleich steigt das Konfliktpotential beim Ausgleich von öffentlichen und betrieblichen Nutzungsansprüchen (BECKER, BARGE, RESSMANN, 1995).

0.1. Zur Entstehung der Untersuchung

Die vorliegende Untersuchung der ökologischen, technischen und ökonomischen Kriterien der Materialwahl im Waldwegebau wurde angeregt durch das Gutachten des Instituts für Forstbenutzung „Umweltverträglicher Waldwegebau in Nordrhein-Westfalen“, das im Auftrag des MURL, NRW erstellt wurde (BECKER, BARGE, RESSMANN, 1995). Große Teile des Gutachtens sind in das Merkblatt „Leitbild für den nachhaltigen forstlichen Wegebau in Nordrhein-Westfalen“ (1999) eingeflossen. Neben Aspekten der umweltverträglichen Konzeption, Trassenführung und

Bauausführung von Waldwegen hat die Verwendung geeigneter Wegebaumaterialien im Land NRW eine gesteigerte Bedeutung.

In NRW als dichtbesiedeltem Bundesland ist einerseits das Aufkommen großer Mengen an Bauschutt zu verzeichnen (KRASS et al., 1999). Andererseits herrscht an vielen Orten im Bereich der Ballungsgebiete eine gewisse Knappheit an Abbau- und Lieferbetrieben für mineralisches Wegebaumaterial, bzw. der Ankauf mineralischen Materials ist durch weite Transportentfernungen mit hohen Kosten belastet. Vor diesem Hintergrund ist es insbesondere im Privatwald in NRW in der Vergangenheit immer wieder zu Konflikten durch die Verwendung ungeeigneter Wegematerialien, insbesondere unsortiertem Bauschutt gekommen. Bauschutt ist nicht nur wegen seiner oft geringen Resistenz gegen mechanische Beanspruchungen in technischer Hinsicht kritisch zu bewerten. Vielmehr kann die Auswaschung und Verlagerung seiner chemischen Bestandteile für den Boden und das Grund- und Abflußwasser zu einer erheblichen Belastung werden (DOHMANN, TRÄNKLER, 1986; GEISELER, BIALUCHA, 1994). Seine unkontrollierte Verwendung ist somit vor allem in ökologischer Hinsicht und unter Aspekten des Naturschutzes in Frage zu stellen. Das Problemfeld der Verwendung von Bauschutt, Recyclingmaterial und den sog. industriellen Nebenprodukten (Hochofenschlacken, Aschen, etc.) wird in Kap. 4 behandelt.

Die Erstellung des o.g. Gutachtens wurde von einer beratend tätigen Arbeitsgruppe begleitet, die unter anderen mit Experten der Wasser- und Umweltverwaltung sowie der Forstverwaltung des Landes NRW und erfahrenen Wegebaupraktikern besetzt war. In verschiedenen Diskussionen innerhalb dieser Arbeitsgruppe wurde deutlich, daß die ökologischen Aspekte um das beim Waldwegebau zu verwendende Material und insbesondere um die Materialien der ungebundenen Deckschichten (Verschleißschichten) noch nicht ausreichend untersucht sind, um in der öffentlichen Diskussion über die ökologische Beurteilung verschiedener Materialien fundierte Aussagen treffen zu können (WOIKE, 1995).

Weiterhin wurde ebenso deutlich, daß eine isolierte ökologische Betrachtung den vielfältigen Ansprüchen an ein forstliches Erschließungssystem in Gestalt ungebundener Waldwege nicht gerecht wird. Somit ist eine parallele und gleichwertige technische Untersuchung erforderlich, um sicher zu stellen, daß ökologisch günstige Lösungen auch mit einer angemessenen technischen Eignung einher gehen.

Ökologische und technische Aspekte bestimmen letztlich auch die Wirtschaftlichkeit bestimmter Bauweisen und Erhaltungsstrategien. Die Resistenz von Wegebaumaterialien gegen mechanische Belastungen, wie auch gegen Frosteinwirkungen

ist ein entscheidendes Kriterium für die geforderte Langlebigkeit der Wegkonstruktion und somit bestimmend für die Erneuerungsintervalle, bzw. die hiermit verbundenen Erhaltungskosten.

0.2. Zur Gliederung

Die vorliegende Untersuchung hat das Ziel, die wichtigsten, „kardinalen“ Aspekte, nämlich Technik, Ökologie und Ökonomie im Hinblick auf die Auswahl der für ungebundene Deckschichten zu verwendenden Gesteinskörnungen zu untersuchen und in einer synoptischen Betrachtung zusammenfließen zu lassen. Daher baut sich die Gliederung wie folgt auf:

1. **Technischer Teil.** Im technischen Teil wird die Resistenz verschiedener Deckschichtmaterialien im Hinblick auf Schlagabriebbelastungen und Frosteinwirkungen untersucht. Hierzu werden Prüfverfahren des klassifizierten Straßenbaues an Deckschichtmaterialien für Waldwege angewendet und die Bedeutung der Regelwerke des klassifizierten Straßenbaues für die Materialwahl im Waldwegebau untersucht und erläutert.
2. **Ökologischer Teil.** Stoffe aus dem Wegekörper, insbesondere Feinmaterial aus ungebundenen Deckschichtmaterialien, können das Umfeld des Weges beeinflussen. Die mögliche Veränderung des an die Waldwege angrenzenden Standorts wird mit Hilfe von pflanzensoziologischen Untersuchungen und ökochemischen Analysen des Wegematerials untersucht.
3. **Ökonomischer Teil.** Die Wirtschaftlichkeit der Materialwahl unter der Annahme differierender Instandsetzungszeiträume wird mit Hilfe der dynamischen Investitionsrechnung untersucht.
4. **Exkurs zum Thema „Recyclingbaustoffe“.** Die Frage, inwieweit güteüberwachte Recyclingbaustoffe und industrielle Nebenprodukte eine technische Alternative zur Wahl natürlicher Gesteine für ungebundene Wegedecken im Wald darstellen, soll vor dem Hintergrund der rechtlichen und wasserwirtschaftlichen Regelungen untersucht werden.
5. **Synoptische Diskussion.** In einer Zusammenschau der vorgenannten Aspekte werden, in Abhängigkeit von der Vielfalt der Waldstandorte, der forstlichen wie auch der naturschützerischen Belange, Empfehlungen zur Materialwahl formuliert.

1. Technischer Teil

1.1. Problemstellung

Für die Walderschließung mit Lkw-fähigen Fahrwegen haben sich aus verschiedenen technischen, ökologischen und ökonomischen Gründen Bauweisen ohne Bindemittel durchgesetzt (DIETZ et al., 1984). Die Erhaltung von ungebundenen Deckschichten ist nur dann kostengünstig, wenn sie weitestgehend maschinell ausgeführt werden kann (PIEST, 1990). Aus der unbedingten Forderung nach einer Maschinenpflegbarkeit, verbunden mit der Grundphilosophie des Wegebaues, nämlich das Niederschlagswasser auf kurzem Weg vom Wegekörper zu führen (MEIßNER, 1999), hat sich im Waldwegebau bei mittlerer bis hoher Beanspruchung die Standardbauweise des sog. Uhrglas- oder Kreisbogenprofils, mit variierender, im Randbereich progressiv auf etwa 8 - 12% zunehmender Querneigung durchgesetzt (BECKER et al., 1995, PIEST, 1997). Für die Anlage des Profilaufbaues ist es vor allem für die seitliche Abführung des Wassers wichtig, daß bereits das Planum und die Tragschicht durch einen Bagger oder aber eine Raupe (Kettendozer) mit „Tilteinrichtung“ (s. Abb. 1-1) mit einer konvexen Wölbung angelegt und nicht als ebene Fläche ausgeformt werden (EYMER, 1995).

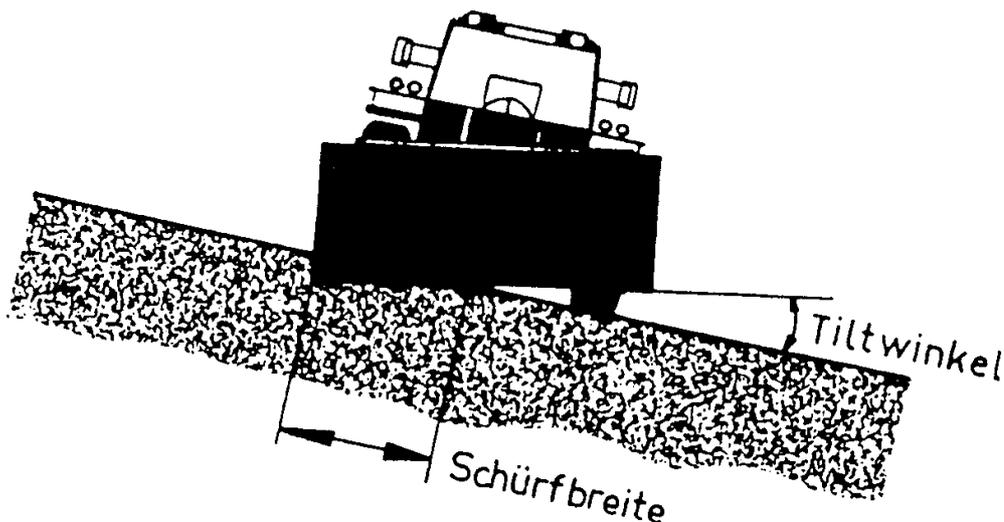


Abbildung 1-1: Arbeiten am Hang mit „getiltetem“ Planierschild (Quelle: Ausbildungsanweisung der Bundeswehr, VS)

Die Gesteinskörnungen¹ sind in einer Lage maschinell gleichmäßig bei günstigem Wassergehalt einzubauen und zu verdichten. Die Verdichtung hat so zu erfolgen, daß ein einwandfreier Oberflächenschluß und in Verbindung mit der Profilgestaltung ein rascher, schadensfreier Abfluß des Oberflächenwassers gewährleistet ist. Entmischtes Material darf nicht eingebaut werden.

Ein skizzierter Aufriß eines Querprofils ist in der folgenden Abbildung 1-2 schematisch dargestellt:

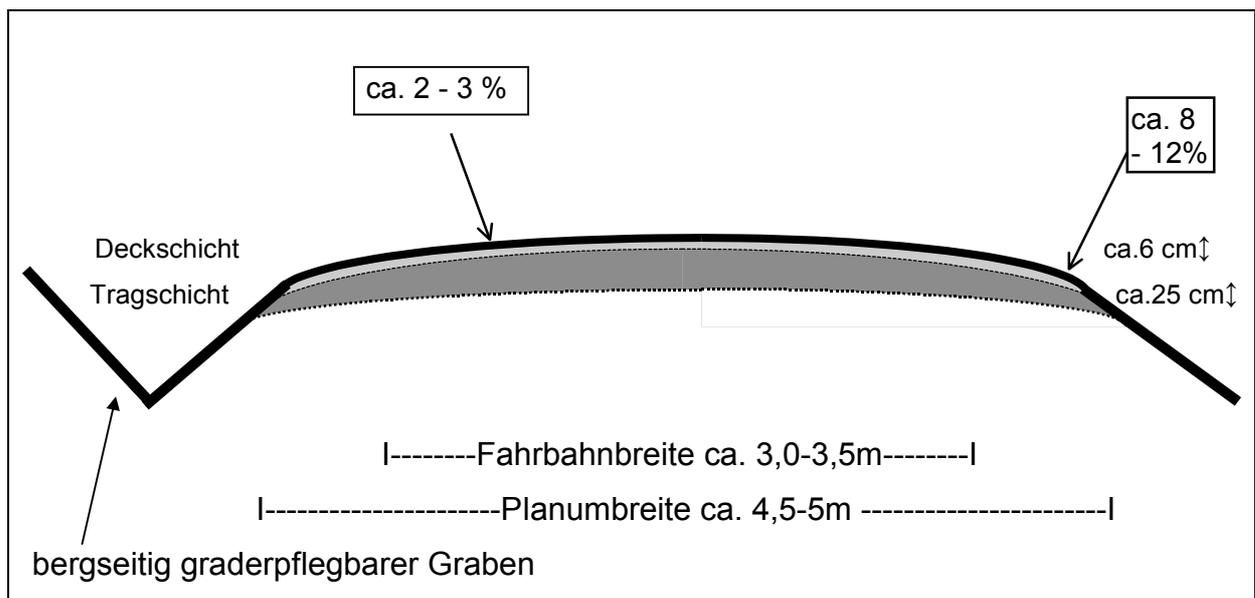


Abbildung 1-2: Modernes Uhrglas- oder Graderprofil (schematisch)

Ein solches Profil besteht durch die folgenden Merkmale:

- Es läßt sich durch Motorgrader besonders gut herstellen und durch Anbau-Wegehobel oder Kleingrader kostengünstig unterhalten. Die Technik ist in beiden Fällen gleich: Die Gesteinskörnung wird mit schräggestelltem „getiltetem“ Planierschild von beiden Seiten zum „Satteldach“ geschoben und der „First“ danach mit quergestelltem Schild bis zu den Fahrspuraußenrändern wieder abgestoßen (PIEST, 1997). Daher wird dieses Profil bezeichnenderweise mancherorts auch Graderprofil genannt. Mit der Vibrationswalze wird die Deckschicht bei der Herstellung und nach Instandsetzung mit Materialeinbau verdichtet. Dies ist bei den Unterhaltungsarbeiten nicht nötig.

¹ Die Begriffe Gesteinskörnung, bzw. Gestein lösen in den neuesten Regelwerken den Begriff Mineralstoff ab, der nur noch im Titel der neuen Regelwerke erscheint (Bsp.: TL Min-StB, 2000).

- Bei nahezu waagerechter Fahrbahn im Lkw-Fahrspurbereich ist der von den Rädern ausgeübte Druck über die gesamte einfache oder Zwillingstreifenbreite in hohem Maße ausgeglichen. Das starke Quergefälle außerhalb der Fahrspuren gewährleistet auch bei Absenkung der Fahrspuren etwa durch Nachverdichtung und Materialaustrag weiterhin einen seitlichen Abfluß des Niederschlagswassers.
- Durch eine waagerechte Stellung der Fahrzeugachse auf der Fahrbahn wird die Masse der Fahrzeuge gleichmäßig auf beide Fahrzeugseiten verteilt, Schrägneigung vermieden und die Fahrsicherheit günstig beeinflusst.
- Im Vergleich zu Wegprofilen mit einseitiger Querneigung ist es grundsätzlich vorteilhafter, das Wasser nur über maximal die halbe Breite des Wegekörpers, der Gefällsresultierenden folgend, seitlich abzuführen.

Die ständige maschinelle Unterhaltung ist ein wesentlicher Bestandteil der Profilerhaltung sowie wichtig zum Erhalt des Materials für die Deckschicht, da Gesteinspartikel, die durch den Verkehr aus dem Verband gerissen werden, bzw. aus der Fahrspur getragen werden, profilgerecht wieder über die ganze Wegbreite verteilt werden.

Die notwendige Intensität der Wegeerhaltung wird in der Literatur unterschiedlich bewertet. Es können die Strategien „Intensiverhaltung“ und „bedarfsorientierte Erhaltung“ im Sinne von BRANZ (1994) und BECKER (1995) unterschieden werden. BERTRAM (1997) konnte zeigen, daß im Solling bei sehr intensiver Erhaltung rechnerisch jährlich etwa 75 % der Wegstrecke im Wald mit Profiliergeräten unterhalten sowie noch einmal rund 15% der Wegstrecke mit Gradern nachprofiliert und instandgesetzt wurden. Es muß allerdings davon ausgegangen werden, daß die Wegeunterhaltung nicht 75% des Wegebestandes ausmacht; sondern daß stark beanspruchte Hauptwege 2 mal pro Jahr auf diese Weise bearbeitet wurden. Obwohl BRANZ und BERTRAM im Einzelfall eine Überlegenheit der „Intensiverhaltung“ belegen, sieht ein weiterführender ökonomischer Vergleich dieser Strategien (oder „Erhaltungsphilosophien“) bislang aus. Oft lassen sich diese Strategien auch nicht scharf abgrenzen, da die „Intensiverhaltung“ auch immer das verbreitete Vorhandensein pflegbarer Deckschichten voraussetzt (PIEST, 1996) und ihren Schwerpunkt auf den belasteten Hauptwegen hat.

Auch bei intensiver Erhaltung unterliegen die Deckschichten einem bemerkenswerten Verschleiß. Die Angaben zum Erneuerungsintervall sind in der Literatur des Waldwegebaues sehr unterschiedlich. So beziffern FABER und DOLDT (1932),

ENGLERT (1952) und KIESEKAMP (1958) die Lebensdauer von Schotterdecken mit maximal 15 Jahren und dies auch nur bei regelmäßiger Überschotterung bzw. Übergru- sung. Die Aussagen dieser Autoren entstanden in einer Zeit der Hinwendung zu hyd- raulischen und bitumengebundenen Deckbauweisen im Waldwegebau. Sie müssen entsprechend kritisch interpretiert werden. Erst in den 80er Jahren dieses Jahrhun- derts wurde diese Entwicklung zu Gunsten der ungebundenen Ausführungen umge- kehrt (DIETZ, 1984). So konnte v. SCHULTZENDORFF (1985) zeigen, daß 1980 im Sol- ling und Harz das Erneuerungsintervall für ungebundene Deckschichten durch- schnittlich 26 bzw. 28 Jahre betragen hat.

Die Bestimmung des Instandsetzungsbedarfs wird von dem Problem der Scha- densdefinition² begleitet. Es gibt diverse juristische Definitionen des Schadensbeg- riffes (GANTEN, 1974). Demgegenüber zeichnen sich technische Schadensdefinitio- nen immer dadurch aus, daß sie Einbußen oder den Verlust der Nutzbarkeit bzw. des Nutzungskomforts eines Gegenstandes, einer Anlage oder eines Wirtschaftsgu- tes bzw. den „Verbrauch an konstruktiver Substanz“ (SCHMUCK, 1989) beschreiben.

Sehr umfassende Untersuchungen zur Nutzungsdauer bindemittelfreier ländli- cher Wege stammen von SCHMUCK und KRAUSE (1994) aus Bayern. Anhand eines sehr großen Datenmaterials auf Versuchstrecken von rd. 660 km Länge, definieren die Autoren „Gebrauchszustände“ über die Einschränkungen der Befahrbarkeit, bzw. Begehbarkeit der Wege. Sie legen anhand einer Vielzahl von Bewertungsfaktoren einen „Schwellenwert“ fest, bei dessen Erreichen spätestens eine Instandsetzungs- maßnahme erfolgen sollte. Es wird allerdings empfohlen, Erhaltungsmaßnahmen schon zu einem früheren Zeitpunkt, bei Erreichen eines ebenso definierten „Warn- wertes“ durchzuführen, damit die Wege in einem gut bis mittel brauchbaren Zustand gehalten werden. Der Bereich zwischen dem Warnwert und dem Schwellenwert kann demgemäß als „Eingreifbereich“ bezeichnet werden. Der Zeitraum zwischen der Ersterstellung der Befestigung und dem „Eingreifzeitpunkt“, bzw. dem „Eingreifbe- reich“ wird als „Nutzungsdauer“ der Befestigung definiert. Je nach zugrunde gelegter Nutzergruppe ergeben sich unterschiedliche Nutzungsdauern. Die folgende, auf der Basis der Hauptergebnisse von SCHMUCK und KRAUSE (1994) erstellte Abb. 1-3 zeigt

² TUCHOLSKY hat es schon unnachahmlich gesagt: "Ein Loch ist da, wo nichts ist. Ein Loch definiert sich sozusagen durch den Rand". Mit dem Schaden ist es auch so: Ein Schaden ist da, wo nichts ist. Was freilich die Theorie des Schadens von der des Loches unterscheidet, ist daß ein Schaden immer nur dann gegeben ist, wenn anstelle des Nichts vorher ein Etwas gegeben war. Das Nichts sozusagen an die Stelle des Etwas tritt oder anders formuliert, daß das Etwas eben einfach weg ist (SCHRÖDER, BÄR, 1997).

den dominanten Einfluß der Längsneigung der bindemittelfreien Wege auf die Nutzungsdauer.

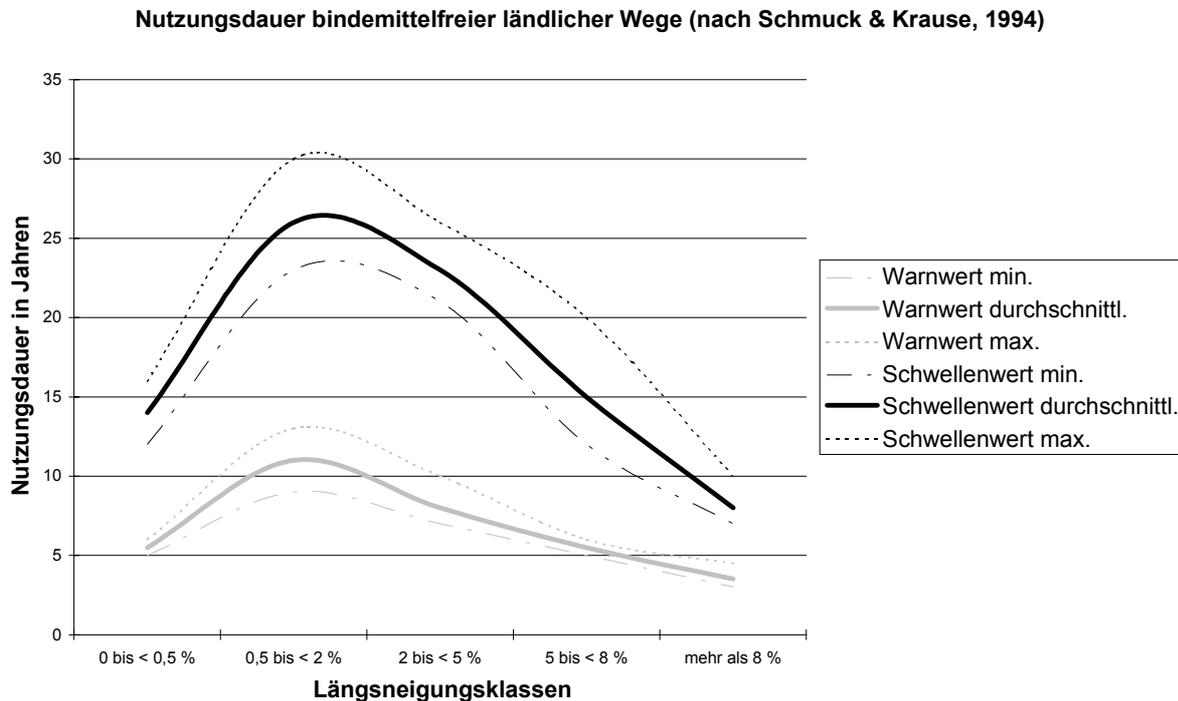


Abbildung 1-3: Nutzungsdauer bindemittelfreier ländlicher Wege (nach Ergebnissen von Schmuck & Krause, 1994)

Deutlich ist die Wirkung des Wassers, durch Aufweichen des Wegekörpers bei fehlender Längsneigung und somit mangelhafter Wasserabführung, bzw. durch Erosion bei starker Längsneigung > 8 % zu erkennen.

Bei der Beurteilung der Nutzbarkeit ist es ein offensichtliches Phänomen, daß bindemittelfreie Wegedecken im Vergleich zu gebundenen Ausführungen wesentlich später, d.h. bei einer sehr viel höheren Einbuße am Nutzungskomfort als „schadhaft“ bezeichnet werden (LEUTNER, 2000).

Die unterschiedlichen Bauweisen haben charakteristische Schadensformen. Bei den hydraulisch- oder bitumengebundenen treten schwere Schäden vor allem auf durch Rißbildungen mit anschließender Schlaglochbildung oder Niveauverschiebung von Bruchstücken oder ganzen Platten. Der überwiegende Teil der schweren Schäden an diesen Bauweisen an Waldwegen ist auf eine unzureichende Tragfähigkeit des Unterbaues und letztlich auf den fehlenden frostsicheren Ausbau der Waldwege zurückzuführen. Die nur von spezialisierten Straßenbauunternehmen mit hohem Kostenaufwand zu reparierenden Schäden sind eine der wesentlichen Ursachen für

den, seit den 70er Jahren zunehmenden Bedeutungsverlust dieser Bauweisen im praktischen Waldwegebau (PIEST, 1990, 1997).

Die Schadensformen an ungebundenen Bauweisen, deren Ursache fast immer Verdrückungen von aufgeweichtem Material oder Materialverlust infolge Erosion, Verstaubung und Freilegung des Stützgefüges ist (FGSV, 1993), werden in Verbindung mit den Beanspruchungen im folgenden Kap. 1.3.3 beschrieben. Die besondere ökonomische Bedeutung der Lebensdauer ungebundener Deckschichten bedingt durch die Materialeigenschaften des verwendeten mineralischen Baumaterials ist im Kap. 3 (Ökonomischer Teil) dargestellt.

1.2. Zielsetzung

Vor dem soeben skizzierten Hintergrund ist es das Ziel der technischen Betrachtungen und Untersuchungen der vorliegenden Arbeit, die folgenden Fragen zu klären, oder zumindest einer Klärung näher zu bringen:

- Welchen Belastungen sind ungebundene Waldwegedecken durch den Verkehr und durch Witterungseinflüsse ausgesetzt?
- Welche besondere Belastungen treten direkt an den Gesteinskörnungen auf?
- Welche wichtigen Aussagen in den Technischen Regelwerken für den ländlichen Wegebau sind bedeutsam für die Gesteine in Waldwege-Deckschichten?
- Was ist darüber hinaus aus den Technischen Regelwerken und Normen des klassifizierten Straßenbaues und Tiefbaues für die Deckschicht-Gesteine bedeutsam?
- Welche Prüfverfahren des klassifizierten Straßenbaues sind für die Ermittlung der Resistenz gegen Schlagabrieb und für die Dauerhaftigkeit von Deckschicht-Gesteinen bedeutsam?
- Lassen sich durch die Ergebnisse von Pilotversuchen und analoge Folgerungen aus Untersuchungen an Straßenbaugesteinen qualifizierte Aussagen zur technischen Eignung von Gesteinskörnungen für Deckschichten auf Waldwegen formulieren?
- Können auf der Grundlage der Kategorien, die für diverse Materialeigenschaften in den neuen Europäischen Normen gebildet werden, Empfehlungen für die Eignung als Waldwege-Deckschichtmaterial ausgesprochen werden?

Neben den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Faktoren gibt es weitere Auswirkungen auf die Festigkeit von Wegedecken. So kann durch Vermörtelungseffekte, wie sie bei Feinstmaterial durch chemische Brückenbildung (Bsp.: Ca-Si-Brücken) beschrieben sind (HUHEEY et al, 1995) eine höhere Festigkeit der Wegedecke erreicht werden. Daneben sind verschiedene Verfahren zur petrochemischen und organo-chemischen Stabilisierung (HÖFLE, 1997; ELLIOT et al, 1999) der Wegedecken bekannt. Vergleichsweise jung sind biologische Verfahren zur Staubbinding und Gefügestabilisierung auf der Basis abbaubarer Bioölprodukte. Derart stabilisierte Wegedecken gehören definitionsgemäß nicht mehr zu den ungebundenen (binde-mittelfreien) d.h. teilweise wasserdurchlässigen Bauweisen. Dies gilt im strengen Sinn auch für Baustoffe mit „latent hydraulischen“ Eigenschaften (vgl. Kap. 4.5). Diese Aspekte sind nicht Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit.

Aus didaktischen Gründen wird mit einer aktuellen Darstellung der wichtigsten Regelwerke begonnen:

1.3. Stand der Kenntnisse

1.3.1. Anforderungen an Gesteinskörnungen im Straßen- und Wegebau

In seiner Straßenbauanweisung aus dem Jahre 1807 bemerkt SCHEMERL, daß nur die „vorzüglichsten Gattungen der Materialien“ zur Herstellung von Verkehrswegen herangezogen werden sollten, „die festesten und besten Materialien verwendet, die man nur aufzubringen im Stande ist“. Die Auswahl erfolgte dabei allein nach visuellen, empirischen Grundsätzen: „Jene [Materialien], welche ihre Haltbarkeit durch lange Dauer in der Luft und Kälte, in Feuer und Wasser erprobt haben, können jederzeit zu den wichtigsten Bauwerken verwendet werden“.

Heute, etwa 200 Jahre später, werden die Anforderungen an natürliche und künstliche Gesteinskörnungen, die bei der Herstellung und Instandsetzung von Oberbauschichten im Straßen- und Wegebau verwendet werden, in den Regelwerken des Straßenbaues formuliert. Öffentliche Auftraggeber haben bei Ausschreibungen die Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB) zu beachten. In Teil C der VOB sind Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) formuliert. Nachgeordnete Regelwerke zu der VOB sind die „Technischen Lieferbedingungen“ (TL) und die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen“ (ZTV).

Die von der Commission Européenne de Normalisation (CEN) erarbeiteten Europäischen Normen (EN) für Straßenbaustoffe, bzw. Vornormen, mit vorläufigem Charakter (prEN), sind als Anhang in den VOB Teil C enthalten. Sofern die EN Spielraum für nationale Ausgestaltung lassen, werden bei Bedarf für Straßenbaustoffe in Deutschland Regelungen in dem der VOB nachgeordneten Regelwerk (TL, ZTV) festgelegt (KRASS, 2000).

Zur wichtigsten, die Gesteinskörnungen betreffenden Europäische Norm wird die prEN 13242 „Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau“. Die prEN 13242 ist eine Anforderungsnorm, die neben den Prüfnorm-Referenzen und Merkmalsdefinitionen geometrische und chemische Anforderungen an Gesteinskörnungen beschreibt. Für den Wegebau und die vorliegende Untersuchung gewinnt diese prEN vor allem durch die Beschreibung von physikalischen Anforderungen sowie von Anforderungen an die Dauerhaftigkeit (durability) an Bedeutung. Die physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen werden durch den Widerstand gegen Schlagabrieb (resistance to fragmentation) über den Los Angeles-Versuch (LA-Versuch, vgl. Kap. 1.4.3 ff) und den Widerstand gegen Schlagzertrümmerung (resistance to impact) beschrieben. Die Dauerhaftigkeit wird über die Wasseraufnahme (vgl. Kap. 1.6) und die Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel (FTW) beschrieben. Daneben enthält die prEN 13242 Vorgaben zur Güteüberwachung und zur Bezeichnung und Kennzeichnung von Gesteinskörnungen. Zur Zeit befaßt sich eine ad-hoc-Gruppe in der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen mit der Umsetzung der EN in das bautechnische Regelwerk des Straßen- und Wegebau (KRASS, 2000).

In Deutschland sind die wichtigsten Regeln für Gesteine und Gesteinskörnungen als Straßen- und Wegebaustoffe seit den 30er Jahren dieses Jahrhunderts in den sog. „Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau“ (TL Min-StB) formuliert und werden den stetig steigenden technischen Anforderungen entsprechend periodisch aktualisiert. Die Ausgabe 2000 (TL Min-StB 2000) löst die TL Min-StB 94 ab. Sie beinhaltet zusätzlich die in den letzten Jahren erschienenen Lieferbedingungen für die verschiedenen industriellen Nebenprodukte (Schlacken, Aschen, etc.) und für die Recyclingbaustoffe. Erstmals sind somit alle bautechnischen Anforderungen an natürliche und künstliche Gesteinskörnungen für die Herstellung und Erhaltung von Oberbauschichten im Straßen- und Wegebau in einer Technischen Lieferbedingung zusammengefaßt. Außerdem sind für die künstlichen Ge-

steinskörnungen noch Angaben zu den wasserwirtschaftlichen Merkmalen enthalten (LENKER, 2000).

Wenn für Gesteinskörnungen eine Güteüberwachung zur Einhaltung der Güteanforderungen vereinbart wird, so ist nach den Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau (RG Min-StB 93) zu verfahren. Die Güteanforderungen ergeben sich aus den bereits erwähnten DIN-Normen, Technischen Liefer- und Prüfbedingungen sowie weiteren für einzelne Materialien erstellte Regelwerken (THURM, 1994). Das System der Güteüberwachung ist im wesentlichen in die drei Bereiche

1. Eignungsnachweis
2. Eigenüberwachung
3. Fremdüberwachung

gegliedert, wobei die eigentliche Güteüberwachung die Eigen- und Fremdüberwachung umfaßt.

Der Eignungsnachweis besteht aus einer Erstprüfung des Materials und einer Beurteilung des Herstellerbetriebes (Erstinspektion). Sie wird vor Aufnahme der Güteüberwachung durch Vorlage eines Prüfungszeugnisses erbracht.

Die Eigenüberwachung besteht darin, daß die Prüfungen periodisch an Proben aus der laufenden Produktion, bzw. aus dem Eingangs- oder Ausgangslager des Lieferbetriebes durchgeführt werden. Sie werden i.d.R. im Betriebslaboratorium von geeignetem Fachpersonal vorgenommen. Die Ergebnisse sind gesammelt in Form eines Labortagebuches mit dreijähriger Frist aufzubewahren.

Für die Fremdüberwachung entnimmt eine anerkannte Prüfstelle (s.u.) Proben im Werk. Die Prüfungen werden in festgelegten Zeitintervallen entweder zweimal im Jahr (RC-Baustoffe vierteljährlich) oder alle zwei Jahre oder unverzüglich bei wesentlichen Änderungen in der Materialbeschaffenheit durchgeführt. Über die Ergebnisse aller durchgeführten Prüfungen wird ein Fremdüberwachungszeugnis ausgestellt, das zusammen mit dem Eignungsnachweis dem Unternehmer und/oder dem Auftraggeber (z.B. Straßenbaubehörde) zugeht.

Der Eignungsnachweis und die Prüfungen im Rahmen der Fremdüberwachung werden von Prüfstellen durchgeführt, die nach den „Richtlinien für die Anerkennung von Prüfstellen für Baustoffe und Baustoffgemische im Straßenbau, Ausgabe 1998“ (RAP Stra 98) von der obersten Straßenbaubehörde anerkannt sind. Lediglich für den Eignungsnachweis können auch Prüfstellen der Hersteller und Aufbereiter anerkannt werden.

1.3.2. Anforderungen an Gesteinskörnungen im Waldwegebau

Waldwege werden im Hinblick auf ihre Funktion und technischen Ausbauzustand in

1. Fahrwege und
2. Rückewege

differenziert. Letztere sind schmale, das Gelände erschließende Maschinenwege. Sie sind mit (überwiegend allradgetriebenen) Schleppern bzw. forstwirtschaftlichen Spezialmaschinen befahrbar und erhalten, mit Ausnahme stärker befahrener Einmündungen in das Fahrwegenetz, keine Befestigung durch Gesteinskörnungen.

Mit regionalen Schwankungen sind in Deutschland etwa 90 bis 95 % der Fahrwege im Wald in ungebundener Bauweise konstruiert (BECKER et al., 1995). Diese ungebundenen Fahrwege haben in der Regel einen zweischichtigen Aufbau aus einer auf dem Planum liegenden Tragschicht und einer abschließenden Deckschicht. Beide sind aus korngestuftem, in Anlehnung an die „Fuller-Parabel“ strukturierten, Gesteinskörnungen aufgebaut. Eine typische Lieferkörnung für Tragschichten ist 0/56 (d.h. korngestuft vom Feinstkorn bis zum Größtkorn von 56 mm), für Deckschichten 0/22 (Dietz, 1984). Ausnahmen bestehen bei den sog. naturfesten Wegen, die bei besonders günstigen petrographischen Eigenschaften des örtlich anstehenden Gesteins, bzw. des Verwitterungshorizonts (C_v) dieses Gesteins, mit einer Tragdeckschicht aus diesem örtlichen Material versehen sind. Bei Waldwegen mit geringer Verkehrsbelastung wird zugunsten einer Tragdeckschicht aus korngestuftem Gesteinskörnung häufig auf einen zweischichtigen Aufbau verzichtet.

Waldwege werden hinsichtlich der bautechnischen Kriterien den ländlichen Wegen zugeordnet. Die Bemessung und der Bau ländlicher Wege erfolgt nach den Vorgaben der „Richtlinien für den ländlichen Wegebau“ (RLW 99), herausgegeben vom Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Die RLW 99 löst die RLW 75 ab. Ökologische Belange haben bei der Gestaltung der RLW 99 erheblich an Gewicht gewonnen. Bei der Erstellung des neuen Regelwerkes war es unbestritten, daß ländliche Wege, trotz der immer größeren und schwereren in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzten Maschinen und Transportfahrzeuge, nach wie vor nicht wie klassifizierte Straßen entworfen und gebaut werden können, sondern aus vielerlei Gründen eigene Technische Regelwerke angewandt werden müssen. Neben den grundsätzlich dünneren Schichten besteht der wesentliche Unterschied darin, daß ländliche Wege in aller Regel nicht frostsicher ausgebaut werden,

weil ein solcher Ausbau weder erforderlich noch wirtschaftlich vertretbar ist (MEIßNER, 1999).

Angaben zu den zu verwendenden Gesteinskörnungen finden sich im bautechnischen Teil. Dieser wird als „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Befestigung ländlicher Wege“ (ZTV LW 99), von der FGSV herausgegeben. Die ZTV LW 99 beinhalten Vorschriften für Wegebefestigungen ohne Bindemittel -, mit hydraulischen Bindemitteln -, mit Asphalt -, sowie mit Pflasterdecken. Sie sind darauf ausgerichtet, daß die Verdingungsordnung für Bauleistungen Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen (ATV) Bestandteil des Vertrages sind. Sofern auch die ZTV LW Bestandteil des Bauvertrages ist, wird Sie zu „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen“ im Sinne des § 1 Nr. 2d VOB Teil B – DIN1961. Daneben sind in den ZTV LW „Richtlinien“ enthalten, die vom Auftraggeber bei der Aufstellung der Leistungsbeschreibung sowie bei der Überwachung und Abnahme der Bauleistung zu beachten sind.

Für den Bau und die Erhaltung von Deckschichten, Gegenstand der vorliegenden Untersuchung, treffen die ZTV LW 99 zu den natürlichen Gesteinen die folgenden wichtigen Aussagen. Diese gelten für den Fall, daß ATV und ZTV Bestandteil eines Bauvertrages wird:

- *Die Baustoffe und Baustoffgemische müssen für den jeweiligen Verwendungszweck geeignet sein und (speziellen, bei den einzelnen Bauweisen definierten) Anforderungen genügen.*
- *Natürliche Mineralstoffe können in gebrochener und ungebrochener Form vorliegen. Ungebrochene Mineralstoffe (Rundkorn) sind Kies und Natursand. Gebrochene Mineralstoffe (Breckkorn) sind Schotter, Splitt, Brechsand, Edelsplitt, etc.*
- *Mineralstoffe müssen entsprechend den Technischen Regelwerken güteüberwacht sein.*
- *Natürliche Mineralstoffe müssen den Anforderungen der TL Min-StB entsprechen, soweit in (speziellen, bei den einzelnen Bauweisen definierten Bauweisen) keine abweichenden Anforderungen gelten.*

Insbesondere diese deutliche Verpflichtung zur Güteüberwachung und zur Anwendung der Technischen Lieferbedingungen sind, im Vergleich zu älteren Versionen, neuartig in der ZTV LW 99!

Weiterhin heißt es zur Korngrößenverteilung:

- *Für Deckschichten auf Kies- und Schottertragschichten sind hohlraumarme Mineralstoffgemische (Gesteinskörnungen) aus verwitterungsbeständigen und festen*

Mineralstoffen zu verwenden. Das Größtkorn darf nicht größer als zwei Drittel der vorgesehenen Dicke für die eingebaute Schicht sein.

- *Die Mineralstoffgemische müssen eine möglichst gleichmäßige Korngrößenverteilung haben und dürfen im eingebauten Zustand nicht mehr als 7 Gew.-% Kornanteil unter 0,063 mm enthalten.*

Daneben formuliert die ZTV LW 99 für die Deckschichten noch folgende „Richtlinien“ für die Auftraggeber:

- *Die Dicke der Deckschichten ist abhängig von der Art und Oberflächenstruktur der Unterlage. Sie soll im eingebauten Zustand mindestens 6 cm bei grobkörniger Unterlage und Unterhaltung mit schweren Geräten (Motorgrader) betragen.*
- *Es können Kies-Sand- bzw. Splitt-Sand-Gemische der Lieferkörnung 0/11, 0/16, 0/22 oder 0/32 sowie Gemische aus unsortiertem Gestein mit einem angemessenen Anteil an bindigen Bestandteilen verwendet werden.*
- *Auf Tragschichten aus unsortiertem Gestein bzw. auf naturfesten Wegen sind auch Deckschichten aus unsortierten Baustoffen zulässig. Für Wege, die auch als Radwege vorgesehen sind, soll das Größtkorn 16 mm nicht überschreiten.*

Diese für den ländlichen Wegebau bestimmten Anweisungen haben für den Waldwegebau dann eine untergeordnete Bedeutung wenn aus Gründen der Wirtschaftlichkeit die Verwendung von Gesteinskörnungen, die nicht zu den „vorzüglichsten“ im Sinne SCHEMERLS (1807) gehören, jedoch den Erfordernissen unter bestimmten Voraussetzungen voll genügen, bevorzugt wird. Dies geschieht häufig bei der Wegeerhaltung in Eigenregie oder in anderen Fällen, bei denen keine Ausschreibung der Maßnahme unter den Bedingungen der VOB, Teil C und der nachgeordneten technischen Regelwerke erfolgt.

1.3.3. Beanspruchungen der ungebundenen Waldwegedecken

Die bedeutsamste Wegebelastung durch die Forstwirtschaft resultiert in der Regel aus der Abfuhr von Langholz über das Erschließungssystem.

Seit dem 1.1.1993 gelten im wesentlichen unverändert die harmonisierten, in der „Richtlinie 85/3/EWG des Rates vom 18. Dezember 1984 über die Gewichte und Abmessungen und bestimmte andere technische Merkmale bestimmter Straßenfahrzeuge“ (zuletzt geändert durch die Richtlinie 92/7/EWG) festgelegten und in die

Straßenverkehrszulassungsordnung (§34 StVZO) übernommenen höchstzulässigen Grenzwerte für:

1. Einzelachslast	11,5 t
2. Doppelachslast	19,0 t
3. zulässiges Gesamtgewicht	
3a. Einzelfahrzeuge - ausgenommen Sattelanhänger	
3a1. Fahrzeug 2-achsig	18,0 t
3a2. Fahrzeug 3-achsig	26,0 t
3a3. Fahrzeug 4-achsig	32,0 t
3b. Lastzug oder Sattelkraftfahrzeug 5-achsig	40,0 t

Beim Langholztransport mit Sattelschleppern, der für die Holzabfuhr den Regelfall darstellt, werden die zulässigen Höchstgewichte von 40,0 t je Lkw-Zug i.d.R. ausgenutzt. Ausnahme- Erlaubnisse zur Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes können von den Ländern nach § 70 StVZO (Ausnahmegenehmigung aufgrund technischer Eignung des Kfz) in Verbindung mit § 29 STVO (Straßenverkehrsordnung), worin die übermäßige Straßenbenutzung geregelt wird und einer zusätzlichen Verwaltungsvorschrift, die die Voraussetzungen und zeitlichen Befristungen bestimmt, erteilt werden. Zur Beseitigung von Sturmschäden im Wald können solche Ausnahmegenehmigungen und Erlaubnisse für befristete Zeiträume und Transportentfernungen erteilt werden. Das zulässige Höchstgewicht wird in diesem Fall i.d.R. auf 44 t oder 46 t begrenzt. Genehmigende Behörde ist meistens der Regierungspräsident.

Mit den handelsüblichen, in Deutschland zur Holzabfuhr verwendeten Fahrzeugen können im Falle einer gesetzwidrigen Überladung mit vollholzigen, bzw. feuchtem Langholz Überschreitungen des zulässigen Gesamtgewichtes um bis zu ca. 60% vorkommen (HERWIG, KREUZKAM, PIEST 1999). D.h. in der Praxis treten gelegentlich Gesamtgewichte überladender Holzzüge von 60 t, tlw. bis zu 70 t und Doppelachslasten von deutlich über 25 t als wegebelastende Kräfte auf.

Häufige Beschädigungen ungebundener Wegdecken in Folge statischer Belastungen entstehen durch das Schleifen von Stammholz zum Holzlagerstreifen oder einem zentralen Holzlagerplatz. Das Verladen des Stammholzes zur Holzabfuhr erfolgt heute üblicherweise mittels eines Ladekranes mit Greifzange, der auf dem Holzabfuhr-Lkw / Sattelzug montiert ist. Beim Verladen wird das Fahrzeug auf Laststützen stabilisiert. Sobald sich ein schwerer Stamm an dem ausgelegten Arm des Ladekranes befindet, kommt es zu einem extremen Druck auf die Laststützen. Bei bindemittelfreien Decken sowie bei Asphaltdecken, die durch die Sonnenwärme erweicht sind, kann es in der Folge zu erheblichen Verdrückungen kommen. Binde-

mittelfreie Wege sollten zur Erhaltung in der Regel nach jeder größeren Holzernte-
maßnahme mit dem Grader oder einem Planiergerät nachprofiliert- und ggf. an-
schließend mit einer Walze verdichtet werden

Neben dieser statischen Belastung ist die dynamische Belastung ungebundener
Wege durch relativ schnell fahrende Pkw, insbesondere bei Trockenheit von großer
Bedeutung. Durch die „knetende“ Wirkung beim Fahren, Anfahren und Bremsen in
Verbindung mit den von den Gummireifen erzeugten Saugspannungen, unterstützt
durch Zentrifugalkräfte im Kurvenbereich, kommt es zu einer starken Ausstaubung
der Fein- und Feinstbestandteile ($< 63\mu\text{m}$), wobei zugleich das Stützkorn freigelegt,
ggf. verschoben und herausgeschleudert wird (DIETZ et al., 1984). Diese Belastung
kann am wirkungsvollsten durch eine Beschränkung der Fahrgeschwindigkeit auf 30
km/h gemildert werden, die vor allem bei Trockenheit eingehalten werden sollte.

Gesteinskörnungen in ungebundenen Deck- und Tragdeckschichten werden auf
verschiedenartige Weise beansprucht. An der Oberfläche einer Straßenbefestigung
wirkt primär eine reibende Beanspruchung (Gleitreibung), die von einer schlagenden
Komponente, wie sie beim Überfahren durch ein Fahrzeugrad entsteht, ergänzt wird.
In der Deckschicht ist die Belastung des Einzelkornes, das sich auf benachbarten
Körnern abstützt, sehr groß, da hier die Lasten der Fahrzeuge punktförmig wirken.
Bei mangelnder Festigkeit des Einzelkornes führt dies zu Absplitterungen oder Korn-
zertrümmerung. Vor allem während der Herstellung der Deckschicht werden Einzel-
körner in nicht unerheblichem Maß von den Glattmantelwalzen, die die Gesteinskör-
nung sehr hoch belasten, zerdrückt. Die Festigkeit des Einzelkornes muß daher so
groß sein, daß dieser Effekt weitestgehend vermieden wird.

Daneben treten, begründet durch hohe Fahrgeschwindigkeiten, Zugkräfte auf,
die allerdings weniger dem Gesteinskorn, als vielmehr dem geschlossenen Gefüge
der Fahrbahn schaden.

In den unterhalb der Deckschicht liegenden Schichten (Trag- und Frostschutz-
schicht) wirken ähnliche Kräfte, vor allem Druckkräfte, wenn auch in verringerter
Größenordnung. Die reibende Beanspruchung ergibt sich hier durch die Relativbe-
wegung der einzelnen Gesteinskörner zueinander.

Die Korngrößenverteilung (KGV) beeinflusst in hohem Maße die Belastung des
Einzelkornes. Bei gut abgestuften Gesteinskörnungen wird der Druck über eine sehr
große Anzahl von Berührungspunkten auf die Körner übertragen und damit auf viele
Körner verteilt. In schlecht abgestuften Gemischen ist die Zahl der Berührungspunkte
geringer, der Druck an diesen Stellen wird größer und die Kornzertrümmerung wird

gefördert. Dies gilt besonders bei den ungebundenen Schichten (LEERS, 1975). QUERVAIN (1957) beschreibt die Beanspruchung des gesamten Kornverbandes in Wegebefestigungen durch horizontale und vertikale Kräfte auf Druck, Zug, Biegung und Scherung wie in der folgenden Abbildung (a bis d) im Prinzip dargestellt ist:

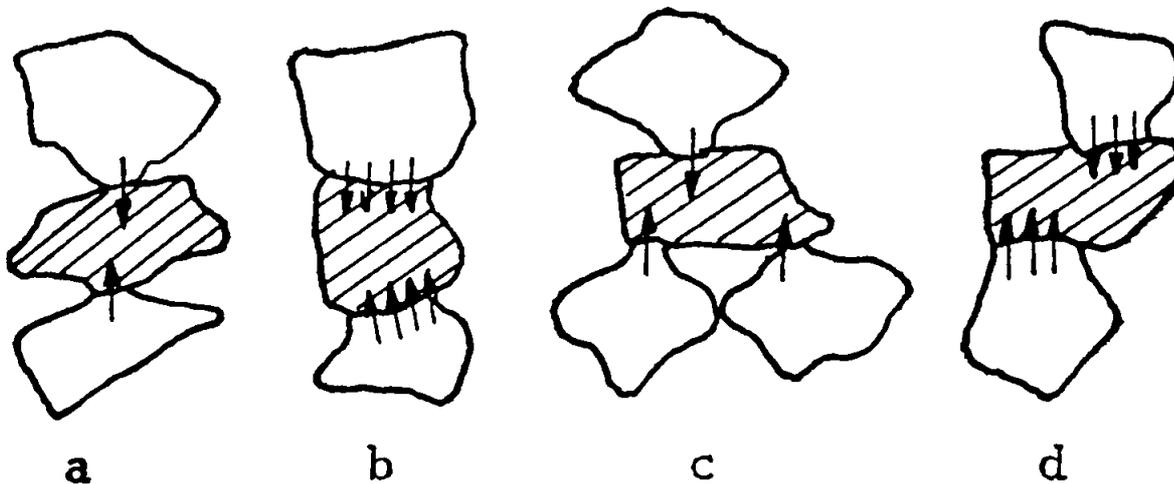


Abbildung 1-4: Beanspruchung von Gesteinskörnungen in einer Wegebefestigung (aus Quervain, 1957)

Die Größen der Beanspruchungen, die auf das einzelne Gesteinskorn wirken, sind noch weitgehend unerforscht. Es ist jedoch nachvollziehbar, daß infolge der dynamisch wirkenden Kräfte zumindest in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche kurzzeitig höhere Beanspruchungen eingeleitet werden, als dies aus der Rad- und Achslast statisch zu berechnen ist. Die in den bekannten Prüfverfahren erzeugten Flächenpressungen liegen jedoch um ein Vielfaches über den tatsächlichen (BRAND, 1977).

In Idaho (USA) verglichen FOLTZ & TRUEBE (1995 u. '96) in der Deckschicht eines Forstweges unter ansonsten gleichen Bedingungen eine Gesteinskörnung von etwas überdurchschnittlicher Qualität mit einem geringwertigen Material. Letzteres zeichnete sich durch einen überdurchschnittlichen Gehalt an Feinmaterial und geringerer Dauerhaftigkeit aus. Es wird aus Kostengründen allerdings in großem Umfang im dortigen Wegebau verwendet. Die beiden Materialien wurden ein Jahr ohne und drei Jahre lang unter Verkehrsbelastung untersucht. Das schlechtere erbrachte unter Verkehrsbelastung eine erodierbare Sedimentmenge, die 3,7 bis 17,3 mal höher ist als beim guten Material. Wobei das Material durch den Verkehr zerstört wird, so daß sich Spurrinnen im Weg bildeten. Beim schlechten Material muß der Weg zwei bis

vier mal im Jahr unterhalten werden, während beim guten Material in Einzelfällen auf eine Unterhaltung verzichtet werden konnte.

Bei einer jährlichen Transportmenge von etwa 20.000 m³ Holzabfuhr stieg auf der Versuchsstrecke in Idaho die Sedimentmenge gegenüber einer Situation ohne Verkehr um den Faktor 18, beim schlechteren Material um den Faktor 25. Betrug die Transportmenge nur 4.500 m³ im Jahr, so verdoppelte sich zwar die Sedimentmenge; ein Materialeinfluß war aber nicht mehr signifikant feststellbar. Durch Modifizierung des Reifendrucks an den Holzabfuhr-Lkw gelang es den amerikanischen Forschern (FOLTZ & ELLIOT, 1996) die Sedimentfrachten um bis zu 80 % zu verringern. HÖFLE (1997) kommentiert die amerikanischen Untersuchungen *„Daraus wird deutlich, daß die Qualität des Wegebaumaterials sorgfältig beachtet werden muß, weil sie die Sedimentmenge und den Unterhaltungsaufwand entscheidend beeinflusst, so daß das billigste Material nicht unbedingt das wirtschaftlichste ist“*.

1.3.4. Die Bedeutung des Feinmaterials für ungebundene Wege

Durch seine relativ große spezifische Oberfläche bindet Feinmaterial [Ton (Feinstes)- und Schluffraktion < 63µm] laminar anhaftendes Wasser in der Gesteinskörnung, das seinerseits über kapillare Saugspannung und die Bildung von Wasserstoffbrücken (HUHEEY et al, 1995) den Zusammenhalt des Korngefüges unterstützt. Im Wald bewirkt der Verdunstungsschutz aus Beschattung und verminderten Windgeschwindigkeiten, daß die „bindenden Kräfte des Wassers länger wirksam bleiben“ (PIEST, 1997). Dieses besondere Waldinnenklima ist letztlich ausschlaggebend für die Verbreitung der bindemittelfreien Bauweise im Waldwegebau. In der freien Landschaft kommt es vor allem durch Ausstaubung des Feinmaterials viel häufiger zu einer sehr schnellen Freilegung der Einzelkörner und zur Auflösung des Stützgefüges. Dies gilt insbesondere für Wege mit nennenswertem öffentlichem und schnellem Verkehr.

Der Verlust an Feinmaterial wird durch eine permanente Neubildung feiner und feinsten Partikel, eine sog. aktive „Eigenverstaubung“ der Deckschicht (LEUTNER, 2000) ausgeglichen, die durch die mechanische Belastung und die Frost-Verwitterung bewirkt wird. Ein, nur in der Theorie existierendes Gestein, das so fest und abriebresistent ist, daß keine Feinteilneubildung erfolgt, wäre als Deckschichtmaterial für ungebundenen Wege somit ungeeignet. Daneben existiert auch eine passi-

ve Verstaubung bzw. Feinmaterialanreicherung von außen. Dies kann bei Waldwegen durch die Eintrag von Waldboden über die grobstolligen Reifen der Forstmaschinen lokal eine, allerdings meist geringe Bedeutung haben.

Im praktischen Waldwegebau werden in großem Umfang Gesteinskörnungen aus Vorabsiebungen oder andere, nicht güteüberwachte Materialien verwendet, von denen vermutet wird, bzw. bekannt ist, daß der Anteil an Feinmaterial über der Vorgabe der ZTV LW 99 (max. 7 % im eingebauten Zustand) liegt (HERWIG, KREUZKAM, PIEST, 1999). Die Fähigkeit dieser Materialien, etwas mehr Wasser zu binden, wird in der Praxis überwiegend positiv beurteilt.

Erreicht der Anteil an Feinmaterial einen bestimmten, bislang für den Waldwegebau noch nicht wissenschaftlich ermittelten Schwellenwert, so treten schnell die negativen Eigenschaften eines zu hohen Feinteilanteiles in den Vordergrund. Dies sind vor allem ein Aufweichen der Wegedecke durch zu hohen Anteil an Kapillarwasser, nachfolgende Labilisierung des Stützgefüges und anschließende Verdrückung beim Lastübergang. Die Schäden durch Verdrückung und Spurrinnenbildung stehen im einem engen Zusammenhang mit den nachfolgenden Erosionsschäden, insbesondere bei fehlender oder zu starker Längsneigung der Wege und somit mangelhafter seitlicher Abführung des Niederschlagswassers. Die erodierende Wirkung des in den Rinnen fließenden Wassers wirkt abschließend deutlich auf die dargestellte Abhängigkeit der Nutzungsdauer von der Längsneigung (SCHMUCK & KRAUSE, 1994, s. Kap. 1.3). Der richtige bemessene Anteil an Feinmaterial in der Gesteinskörnung ist somit von großer Bedeutung, da sowohl ein Mangel wie auch ein Übermaß nachteilige Wirkungen hervorrufen. Bei güteüberwachten Materialien wird dies durch die Mengenbegrenzung des Feinteilanteiles bei max. 7 M.-% im eingebauten Zustand sinnvoll durch die ZTV geregelt.

Für den Waldwegebau scheint die Rolle der Feinteilnachbildung in Abhängigkeit von der Härte und der Abriebresistenz der Gesteinskörnungen geklärt zu sein. Eine zu geringe Feinteilnachbildung aufgrund zu großer Abrieb- und Verwitterungsresistenz der Gesteine wird im Waldwegebau nur vergleichsweise selten, auf besonnten, stark befahrenen Teilstücken zum Problem (HERWIG, KREUZKAM, PIEST, 1999). Wesentlich bedeutsamer ist das Gegenteil, eine zu starke Feinteilbildung aufgrund zu geringer Abrieb- und Verwitterungsresistenz, wie auch die amerikanischen Untersuchungen von FOLTZ & TRUEBE (1995, s.o.) bestätigen. Im Bereich der landwirtschaftlichen Wege sind Verhagerungserscheinungen der Deckschicht und zu geringe Feinteilbildung eine wesentlich häufigere Schadensursache (FGSV, 1993).

1.4. Prüfverfahren zur Schlag- und Schlagabriebresistenz

Im Waldwegebau wie auch im modernen Straßenbau werden Gesteine fast ausschließlich als gebrochenes Material verwendet, was eine Feststellung der Gesteinseigenschaften direkt an der Körnung notwendig macht. Im Hinblick auf die Verwendung im Waldwegebau sind folgende stoffliche Eigenschaften der Gesteinskörnungen unter Berücksichtigung des Verwendungszweckes von Bedeutung:

- Schlagfestigkeit, Druckfestigkeit und Kantenfestigkeit
- Verwitterungsbeständigkeit (Frost- und Raumbeständigkeit)
- Kornform

Eine sehr spezielle Form der Ermittlung des Abriebwiderstandes ist die Ermittlung der Polierresistenz. An der Oberfläche von Straßendecken in gebundener Bauausführungen, wo scharfkantige Splitte hydraulisch- oder bitumengebunden eingebettet sind, ist sie von großer Bedeutung für den Erhalt der Griffigkeit der Fahrbahndecke. In Deutschland erfolgt die Prüfung zur Beurteilung des Polierwiderstandes von Mineralstoffen gemäß TP Min-StB 94 Teil 5.5.1 an der Splittkörnung 8/10 mm durch Ermittlung des Polished Stone Value (PSV). Bemerkenswert ist, daß besonders harte, petrographisch feinstrukturierte Gesteine (Bsp.: Basalt) häufig weniger harten, etwa den zu den Psammiten zählenden Sedimentgesteinen, hinsichtlich der Polierresistenz unterlegen sind. Letztere behalten durch das Herausbrechen einzelner Partikel in der Sandfraktion immer eine raue Oberfläche, während die Kanten der feinstrukturierten Gesteinsarten „wie bei einem alten Pflasterstein“ gerundet, bzw. poliert werden (LEUTNER, 2000). Die Bedeutung der Polierresistenz für Deckschichtmaterial bei ungebundenen Bauweisen ist bislang noch nicht untersucht worden. Sie scheint von untergeordneter Bedeutung zu sein und ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die Kornform ist ein wichtiges Kriterium für die Stabilität des Einzelkornes. Grundsätzlich sind kubische Körner stabiler als plattige oder spießige Formen. Nach der TL Min-StB 2000 darf *der Anteil der Körner, bei denen das Verhältnis von Länge zu Dicke größer als 3:1 ist, bei Lieferkörnungen 0/8 bis 0/63 höchstens 50 Gew.-% des Anteils über 4 bzw. 5 mm betragen*. Die Kornform kann nach Augenschein beurteilt werden. In Zweifelsfällen ist nach DIN 52 114 zu prüfen. Beim Material der vor-

liegenden Untersuchung waren augenscheinlich ganz überwiegend kubische Kornformen vorhanden.

Für die Untersuchung der wichtigen dynamischen Schlag- und Schlagabriebbeständigkeit existieren international verschiedene Testverfahren: Die drei bedeutendsten Verfahren sind:

- Schotter- und Splittschlagprüfung nach DIN 52 109
- Micro-Deval-Test nach AFNOR NFP-18-572
- Los Angeles- Versuch nach EN 1097 - 2

Das Versuchsprinzip dieser Versuche ist ähnlich. Eine ausgewählte Kornklasse wird eine Schlag- und Abriebbelastung unterworfen. Der Grad der Zertrümmerung wird anschließend durch Prüfsiebung mit definierten Analysensieben festgestellt. Der Siebdurchgang als prozentualen Anteil der in den Versuch eingehenden Materialmenge entspricht dem Ergebniswert. Dieser Wert sinkt mit zunehmender Widerstandsfähigkeit gegen den Schlag und Abrieb („je kleiner das Ergebnis, desto besser das Material“).

1.4.1. Schotter- und Splittschlagprüfung

Mit dem Schlagversuch wird die Widerstandsfähigkeit von Gesteinen gegen Zertrümmerung an einer ausgewählten Kornklasse geprüft. Die Zertrümmerung erfolgt durch 10 Schläge aus 500 mm Höhe im Schlaggerät nach DIN 52 109 (Abb. 1-5). Der Grad der Zertrümmerung wird durch Prüfsiebung mit festgelegten Analysensieben festgestellt. Der Schlagzertrümmerungswert „SZ“ ist, abhängig von der Bauklasse und Konstruktionsschicht des Straßenoberbaues, als oberer Grenzwert in % in den Regelwerken für den Straßenbau festgelegt. Solche Grenzwerte sind auch in den TL Min-StB 2000 zu finden.

Die Beanspruchung des Materials liegt bei diesem Verfahren als Beanspruchung des Kornverbandes vor. Die durch das Prüfgerät eingetragenen Kräfte werden von Korn zu Korn übertragen. Während der Beanspruchung tritt mit zunehmender Zertrümmerung eine Verdichtung des Prüfgutes ein. Somit wird die relative Beanspruchung des Einzelkornes verringert. Es tritt ein Zerschlagen, Absplittern und Zerquetschen der Einzelkörner ein.

Dieser Versuch ist in Deutschland genormt und weit verbreitet. Um auf die jahrelangen Erfahrungen mit den bekannten Prüfvorschriften nicht verzichten zu müssen, wurde eine Aufnahme des Versuches als alternative Prüfmethode in die europäische Normenvorschrift angestrebt. Aufgrund dieser Bestrebungen wurde bereits im September 1996 ein „Anhang A“ zur EN 1097, Teil 2 formuliert.

Die Schlagfestigkeitsprüfung hat mehrere Nachteile (BRAND, 1977, WULFF 1998):

- Die Eichung der Geräte bedarf eines großen Aufwandes, denn geringe Abweichungen wirken sich auf das Prüfergebnis aus.
- Brauchbare Versuchsergebnisse lassen sich nur bei relativ einkörniger Zusammensetzung des Prüfgutes erzielen.
- Unterschiedlich feste Gesteine werden unterschiedlich stark beansprucht: Weniger festes Material nähert sich bereits nach wenigen Schlägen der Fullerkurve an und die weiteren Schläge beanspruchen dieses Prüfgut weniger als ein Prüfgut aus festem Gestein.

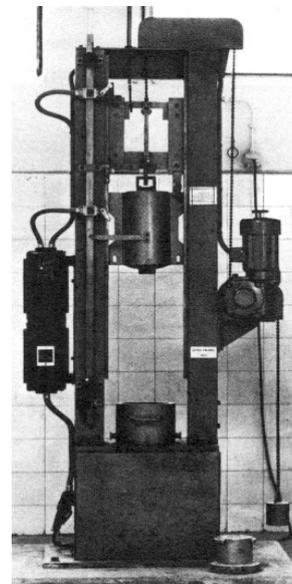
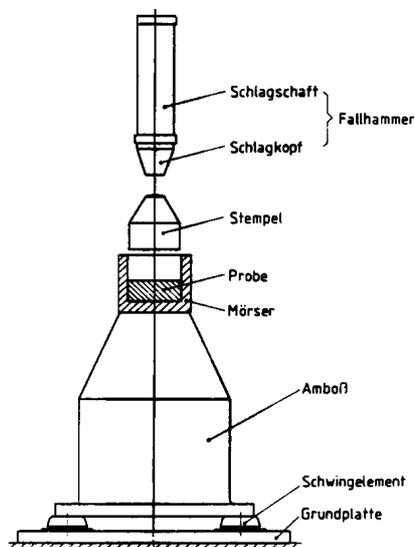


Abbildung 1-5: Schlagprüfgerät aus TP Min-StB 94 Teil 5.1 (links) und KRZEMIEN (1975)

1.4.2. *Micro-Deval-Test*

Die aus Frankreich stammende Micro-Deval Verschleißprüfung erlaubt die Bestimmung des Abriebwiderstandes von Gesteinen in einem rotierenden Zylinder unter definierten Bedingungen (s. Abb. 1-6). Bei der Beanspruchung in der Micro-Deval-Prüfmaschine steht die zerreibende (sekundär die zerschlagende) Bearbeitung der Einzelkörner unter Beigabe von Stahlkugeln im Vordergrund. Die Zylinder werden mit einer Geschwindigkeit von $100 \text{ U/min} \pm 5 \text{ U/min}$ für eine Zeitdauer von 2 Stunden oder 12.000 U zum Rotieren gebracht. Diese Beanspruchung ist mit der Wirkung einer Kugelmühle vergleichbar. Die Relation von Korndurchmesser und Kugeldurchmesser ist zu beachten: Bei steigendem Verhältnis Korndurchmesser / Kugeldurchmesser erhöht sich der Einfluß der Abriebbeanspruchung, bei vermindertem Verhältnis der Einfluß der „Schlagbeanspruchung“. Letztere ist in ihrer Qualität allerdings nicht mit den anderen vorgestellten Verfahren vergleichbar. Mit diesem Test ist sowohl eine „trockene“ als auch eine „nasse“ Prüfung von Mineralstoffen durchführbar. Der Abrieb unterscheidet sich bei bestimmten Gesteinen im nassen Zustand von dem im trockenen Zustand (Vogler, 1988).

Diese Prüfmethode, bislang in der französischen „AFNOR NFP-18-572“ geregelt, wurde in die EN 1097, Teil 1 aufgenommen.



Abbildung 1-6: Mikro –Deval Prüftrommeln im Institut für Straßenwesen Braunschweig

1.4.3. Los Angeles-Versuch

Die Los Angeles-Prüfung liefert ein Maß für die Kornzerkleinerung von Gesteinskörnungen genormter Korngrößenverteilung in einer rotierenden Stahltrommel (500 Umdrehungen mit 30 – 33 U/min) mit einer festgelegten Anzahl von Stahlkugeln. Die Los Angeles-Trommel funktioniert nach dem Prinzip einer Kugelmühle. Die Zerkleinerungseffekte, die in einer solchen Apparatur verwirklicht werden können, beruhen auf dem Zusammenwirken von Schlag- und Reibwirkung der Mahlkörper (Stahlkugeln). Es tritt stets die Kombination beider Beanspruchungsarten auf.

Das Überwiegen des einen oder anderen Effektes ist durch Veränderung des Füllungsgrades, der Drehzahl und der Zusammensetzung des Mahlkörpers (durch Veränderung des Verhältnisses von Korndurchmesser zu Kugeldurchmesser) zu erzielen.

Die Untersuchungen von LEHMANN (1964) zeigen, daß in Mühlen mit glatter Wandung stets Reibwirkung vorherrscht, die sich aus Roll- und Gleitreibung zusammensetzt. Die Schlagwirkung tritt nicht erst beim Abwerfen, sondern bereits beim Herabstürzen der Mahlkörper an der Böschung der Mühlenfüllung ein. Zur Verbesserung der Wirkungsweise einfacher Kugelmühlen wurde bei der Entwicklung des Los Angeles-Versuches die Mitnehmerleiste vorgesehen, die das Gleiten und Pendeln der Mühlenfüllung unterbindet. Diese Effekte würden bewirken, daß ein Teil des Prüfgutes aufgrund der unterkritischen Umdrehungsgeschwindigkeit nicht geworfen wird, sondern von herabfallenden Teilen beansprucht wird.

Die folgende Abbildung 1-7 verdeutlicht den Aufbau der Los Angeles-Trommel. Links ist die geöffnete Trommel der Firma STRASSENTTEST und rechts oben die Füllung mit Reibmittelladung im Institut für Straßenwesen und Erdbau der TU Braunschweig zu sehen. Angaben in der Zeichnung unten rechts in inch:

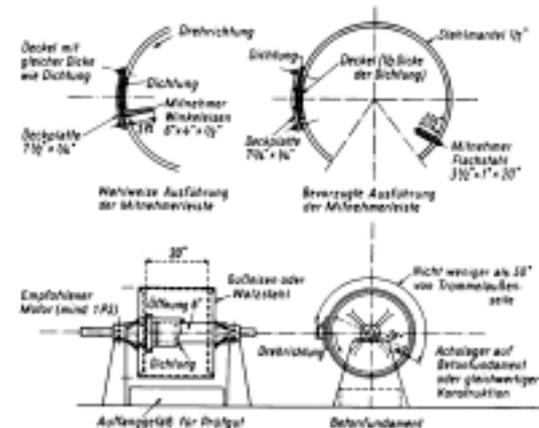
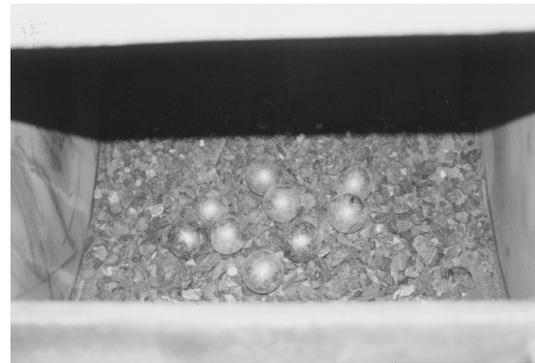


Abbildung 1-7 : Los Angeles Trommel (Institut für Straßenwesen, BS und TP Min-StB 94 Teil 5.4.1)

Den Bewegungsablauf des Prüfgutes in der Los Angeles-Trommel hat WULFF (1998) unter Beachtung der Ergebnisse von LEHMANN (1964) in folgende Phasen eingeteilt:

- Phase 1: Das Prüfgut wird vom Trommelmantel mitgenommen und angehoben; gleichzeitig rollen (mahlen) die Stahlkugeln aufgrund ihres hohen Gewichtes über das Prüfgut.
- Phase 2: Das Prüfgut und die Stahlkugeln werden von der Mitnehmerleiste erfaßt und weiter angehoben, ohne daß ein Zurückgleiten (Pendeln) auftritt.
- Phase 3: Bei Erreichen einer bestimmten Höhe (Erreichen des günstigsten Ablöswinkels) erfolgt das Abfallen des Prüfgutes. Dabei fallen größere Körner schneller als kleine. Teile der großen Körner können deshalb aber trotzdem, z.B. aufgrund eines längeren Fallweges, gleichzeitig mit kleineren Körnern auftreffen. Die schlagende Wirkung entsteht durch den Aufprall des Prüfgutes auf den Trommelmantel verbunden mit einem Zerschlagen durch die Stahlkugeln.
- Phase 4: Das Prüfgut auf dem Trommelmantel bildet aufgrund der sich fortbewegenden Trommel eine Fläche, über die wiederum die Stahlkugeln mahlen.

Konkrete Aussagen über die Größe der Beanspruchung auf ein einzelnes Korn können nicht getroffen werden. Da die Bewegungen innerhalb des Prüfgutes während der Trommeldrehung als „chaotisch“ bezeichnet werden müssen, ist eine Messung oder Berechnung der Belastungen wohl unmöglich.

Für die Durchführung des Los Angeles-Versuches bestanden bislang in der Bundesrepublik Deutschland keine Prüfvorschriften. In der TP Min-StB 94 Teil 5.4.1 ist der Versuch unter Hinweis auf die internationale Bedeutung beschrieben. Darin wird die US-amerikanische Vorschrift (ASTM) wiedergegeben. Durch die Aufnahme in den Katalog der Europäischen Normung ist eine weiterhin steigende Bedeutung des Verfahrens zu erwarten.

Die Normen für die Durchführung des Los Angeles-Versuches sehen die Prüfung sowohl einzelner Kornklassen, als auch von Korngemischen vor. Die Korngrößen liegen für Kornklassen zwischen 2 und 32 mm und für Korngemische von 5 bis 35 mm. Die bekanntesten nationalen Normen zur Durchführung des Versuches sind:

- USA: ASTM C 131 - 81 und ASTM C 535 - 81
- Österreich: ÖNORM B 3128
- Europa: EN 1097 – 2

Das Versuchsergebnis, der sogenannte Los Angeles-Wert (LA-Wert) errechnet sich nach Absieben des Rückstandes auf einem 1,6 mm-Sieb und dessen Gewichtsermittlung. Durch die Subtraktion des Gewichtes des Rückstandes R vom Gewicht des Prüfgutes vor dem Versuch, der Einwaage E, ergibt sich das Gewicht des Verlustes. Gibt man diesen Verlust als prozentualen Wert von E an, so erhält man den gesuchten LA-Wert für die jeweilige geprüfte Kornzusammensetzung. Dieser wird i.d.R. in ganzen Prozentzahlen (ohne Kommastellen) angegeben. Für genauere Betrachtungen ist die Angabe höchstens einer Dezimale sinnvoll:

$$LA [\%] = \frac{E - R}{E} \cdot 100$$

1.4.4. Vergleich und Korrelationen zwischen den Verfahren

Während mit dem Micro-Deval-Test überwiegend die Abriebresistenz des Materials erprobt wird, erkundet der Schlagversuch nach DIN 52 109 die Widerstandsfähigkeit

gegen schlagende Kräfte. Beim Los Angeles-Test wird das in der Prüftrommel frei bewegliche Material durch die eigene Bewegung und zusätzlich durch die Stahlkugeln gleichzeitig auf Abrieb und auf Schlag beansprucht.

Die Beanspruchung des Materials in der ungebundenen Bauweise der Waldwege ist bei dem Los Angeles-Versuch der Realität besser angenähert als bei den anderen vorgestellten Versuchen. Der Verkehr belastet die Mineralstoffe vor allem in der Deckschicht im wesentlichen durch mahlende, reibende und (bedingt durch schnelle Fahrzeuge und hohe Lastübergänge) auch schlagende Kräfte. Ausschließlich schlagende Kräfte, die nur für den Bruchteil einer Sekunde auftreten und sofort wieder abklingen (wie dies im Schlagversuch simuliert wird), existieren in der Realität nicht, sondern gehen immer mit einer konstant ansteigenden Druckbelastung einher (WULFF, 1998 unter Bezug auf LEERS, et al. 1975).

Die in Kap. 1.4.1 genannten Nachteile der Schlagfestigkeitsprüfung treten beim Los Angeles-Versuch ebenfalls nicht auf. Ob ein Mineralstoff sich schon zu Versuchsbeginn relativ stark zerkleinert oder nicht, hat im Gegensatz zum Schlaggerät keinen großen Einfluß auf die weitere Prüfgutbeanspruchung. Mit der Los Angeles-Trommel können darüber hinaus nicht nur einzelne Kornklassen, sondern auch kornabgestufte Gemische geprüft werden. (BRAND, 1977)

Uneinheitlich sind die Aussagen zu Korrelationen zwischen dem Schlagversuch und dem LA-Test. Während BRAND und NIES bereits 1969 von einer „klaren und eindeutigen“ Korrelation zwischen den Verfahren berichten, wird in einem Aufsatz von LEERS et al. aus 1975 eine ausreichende Übereinstimmung bezweifelt. Dieses steht allerdings im Zusammenhang mit dem von den Autoren geforderten Ansatz eines sehr hohen Bestimmtheitsmaßes von $\geq 99\%$.

Nach neueren Untersuchungen von BALLMANN (1996), die nach Angabe von RITTER (2000) maßgeblich für die Aufnahme des LA-Versuches als Referenzprüfmethode in die europäische Norm prEN 13242 verantwortlich sind, wird eine gute Korrelation zwischen den beiden Verfahren beschrieben mit:

$$SZ = 3,62 \cdot LA^{0,5569}$$

Trotz des augenscheinlich ähnlichen Versuchsablaufes konnte dagegen zwischen Los Angeles- und Micro-Deval-Verfahren keine hinreichende Übereinstimmung festgestellt werden. Hierzu berichtete bereits im Jahr 1975 KRZEMIEN: „Die Korrelation ... ist unzureichend. Zusammenhänge bestehen sicherlich hinsichtlich des

Abriebverhaltens. Da jedoch beim Los Angeles-Test je nach Korngröße die Schlagkomponente verschieden stark überwiegt, während der Deval-Test eine reine Abriebprüfung ist, ist gar keine bessere Übereinstimmung zu erwarten.“

1.5. Los Angeles-Versuche an Waldwegematerialien

Wie im vorherigen Kap. 1.4.3 dargestellt, ist der Los Angeles-Versuch von den gebräuchlichen Verfahren zur Erprobung der Widerstandsfähigkeit gegen Abrieb- und Schlagbeanspruchung am besten geeignet, Material zu beproben, das als ungebundene Deckschicht, bzw. Tragdeckschicht in einem Waldweg verbaut ist. Der Materialverschleiß aus Reibung, Mahlen und Schlagen durch den Verkehr auf Waldwegen, wechselwirkend durch die Befahrung mit langsamen, schweren Transportfahrzeugen und schnellen, leichten Pkw aufgebracht, kann gut mit diesem Versuch simuliert und zeitgerafft dargestellt werden.

Durch einen Pilotversuch mit den üblichen, für den Bau von Deckschichten, bzw. Tragdeckschichten im südniedersächsischen Bergland verwendeten mineralischen Materialien in der LA-Trommel sollten die folgenden Fragen beantwortet, oder aber einer Beantwortung nahe gebracht werden:

1. Ist das für den „klassifizierten“ Straßenbau bewährte Verfahren für den Waldwegebau anwendbar und bedeutsam?
2. Welche Versuchsergebnisse (LA-Werte) liefert das Waldwegebaumaterial? Lassen sich aus der Straßenbauliteratur anhand dieser eigenen Werte Kennwerte und Hinweise zur Verwendbarkeit, insbesondere zu Verwendungseinschränkungen bei geringwertigem Material ableiten?
3. Gibt die Abfolge der Versuchsergebnisse Hinweise zur Verwendbarkeit? Inwieweit decken sich die Ergebnisse mit den empirischen Erfahrungen von Wegebau-Praktikern?
4. Welche Unterschiede zwischen teurem, güteüberwachtem Material und den kostengünstigeren Vorabsiebungen, die verstärkt im Waldwegebau verwendet werden, zeigt der LA-Versuch?

1.5.1. *Materialherkunft und Probenahme*

Die natürlichen Gesteine (Mineralstoffe) werden nach geologisch, petrographischen Kriterien wie folgt gegliedert:

1. **Magmatische Gesteine**, die primär aus einer Schmelze kristallisiert sind.

1a. Tiefengesteine: Bei Bildung in größerer Tiefe werden sie als plutonisch bezeichnet. Die Plutonite zeichnen sich meistens durch eine Kristallisation in einem mittel- bis grobkörnigen Gefüge (Bsp.: Granit) aus.

1b. Ergußgesteine: Entstehen sie oberflächennah, so handelt es sich um vulkanische Gesteine. Die Vulkanite sind i.d.R. durch eine schnellere Abkühlung mit einer feinkörnigen und dichten Struktur (Bsp.: Basalt) gekennzeichnet.

1c. Ganggesteine: Eine mengenmäßig untergeordnete Sonderform der magmatischen Gesteine stellen die sog. Ganggesteine dar, die in Spalten der Erdkruste auskristallisiert sind.

Die wichtigsten Minerale scheiden sich bei der Abkühlung mit fallenden Temperaturen etwa in folgender Reihenfolge aus: Olivin => Augite => Hornblenden => Biotit => Kalifeldspat => Muskovit => Quarz. Dabei nimmt der Siliziumdioxid-Gehalt zu (KIRSCH, 1965). Gesteine mit mehr als 65 % SiO_2 werden als saure, solche mit 52 – 65 % als intermediäre und die mit weniger als 52 % als basische Gesteine bezeichnet (TP Min-StB 94, Teil 1.2). Neben der Kieselsäure enthalten die sauren Magmatite vorwiegend die Elemente Aluminium und Kalium, die basischen hingegen vorwiegend die Elemente Eisen, Calcium und Magnesium (WAGENBRETH, 1977). Die kiesel-säurereichen Gesteine (z.B. Quazit) erscheinen in der Regel hell (sialisch). Die kiesel-säurearmen, mit tlw. hohen Gehalten an Hornblende, Augit und Olivin erscheinen überwiegend dunkel (femisch). Die sauren Gesteine tendieren in ihrer Rohdichte gegen $2,6 \text{ g/cm}^3$, die basischen gegen $3,1 \text{ g/cm}^3$ (KIRSCH, 1965).

2. **Sedimentgesteine**, die aus Verwitterungsprodukten anderer Gesteine sekundär zum Absatz (Sedimentation) gekommen sind. Sobald die Sedimente abgelagert sind, beginnt die Verfestigung durch Kompaktion. Dieser Prozeß wird Diagenese genannt. Die Sedimentgesteine werden weiter untergliedert (MATTHES, 1993) in:

2a. Klastische Sedimente (Trümmergesteine): Bestehend aus diskreten mechanischen Partikeln, d.h. es sind Neubildungen aus Verwitterungsrückständen. Sie werden nach Korngröße der Komponenten eingeteilt in Pelite (Ton einschließlich Mittelschluff $< 0,02 \text{ mm}$), Psammite (Sand einschließlich Grobschluff $0,02 - 2,0 \text{ mm}$) und Psephite (Kies $> 2,0 \text{ mm}$).

2b. Chemische Sedimente (Prezipitate): Das sind die ehemals in Wasser gelösten Ionen (u.a. Ca^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , H^+ , OH^-), die durch rein chemische Vorgänge in Form einfacher Verbindungen ausgeschieden und hauptsächlich in Form verschiedener Kalkschlämmen im Meer abgelagert wurden.

2c. Biogene Sedimente: Das sind die ebenfalls ehemals in Wasser gelösten Ionen, die mit Hilfe von oder direkt durch Organismen gebunden und dann mit den abgestorbenen Organismen abgelagert werden. Zahlreiche Organismen bauen ihre Schalen, Gerüste und Skelette entweder aus im Meer gelösten CaCO_3 oder (seltener) aus Kieselsäure auf. Daher handelt es sich bei dem Großteil der biogenen Sedimente um Kalke oder Kalksteine bzw. um Kieselgur.

3. **Metamorphe Gesteine**, die durch Veränderung von Druck und Temperatur im Bereich der festen Erdkruste umkristallisiert sind.

Die Probenahme von Gesteinskörnungen für die Erhaltung von Deckschichten und Tragdeckschichten erfolgte im Sommer des Jahres 1997 in verschiedenen süd-niedersächsischen und einem thüringischen Steinbruchbetrieb (Tab. 1-1). Eine Kartendarstellung in Anhang 1 gibt einen Überblick über die Lage der Gewinnungsstätten.

Tabelle 1-1: Herkunft und Bezeichnung der untersuchten Gesteinsarten

Gestein	Steinbruchbetreiber Standort des Werkes	Kornklasse	Bemerkung
Basalt	Basalt-Vertrieb GmbH & Co. KG Hermann Wegener Werk 37139 Adelebsen	0/22 0/32 B2 ³	0/22 mit interner Handelsbezeichnung „Forstwegematerial“
Buntsandstein (Helmershau- sen- Solling- Folge)	Bunk GmbH & Co. KG Werk 34385 Bad Karlshafen	0/100	nach Absiebung der Fraktion > 32,0 mm geeignet als Material für Tragdeckschichten. Keine güteüberwachten Baustoffe
Diabas	Telge & Eppers GmbH & Co. KG Werk Huneberg , 38640 Goslar	0/22 0/32 B2	0/22 Vorabsiebungen aus sog. „grauen“ und „braunen“ Gesteinsfascies
Devonkalk	Felswerke GmbH Werk Münchehof , 38604 Goslar	0/30 0/32 B2	0/30 ist Vorabsiebung
Grauwacke	Hartsteinwerk Ilfeld Werk Unterberg , 99768 Ilfeld	0/22	1. Wahl und 2. Wahl 'Forst'. Keine Güteüberwachung
Muschelkalk	Oppermann Kiesgewinnungs- und Vertriebs-GmbH Werk Emmenhausen , 34346 Hann. Münden	0/32 0/40 0/45 B2	0/40 ist Vorabsiebung

Die, in der vorliegenden Untersuchung betrachteten Gesteine lassen sich wie folgt geographisch bzw. petrographisch zuordnen.

³ Klassifizierung der EBA-NS 86 in der Fassung von 1997 (Ergänzende Bestimmungen der Niedersächsischen Straßenbauverwaltung zu den technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bemessung und den Bau von Asphaltstraßen. Hrsg. Nds. Landesamt f. Straßenbau, Hannover)

Tabelle 1-2: Geologisch, petrographische Kurzbeschreibung der Gesteine

Basalt	Beim Bramburger Basalt aus Adelebsen handelt es sich um einen Feldspatbasalt, der als glutflüssige Schmelze während des Tertiär (vor rd. 13 Mio. Jahren) aus großen Tiefen vulkanisch aufgestiegen ist. Durch rasche Abkühlung kristallisierte das basaltische Magma relativ feinkörnig und vollkristallin aus. Infolge Schrumpfrissen entstehen im Idealfall, orientiert senkrecht zu den Abkühlungsflächen, sechseckige Säulen.
Bunt-sandstein	Im Trias, vor rd. 220 Mio. Jahren gebildetes, zum mittleren Buntsandstein (sm ₂) gehörendes, klastisches Sediment mit psammitischem Aufbau. Die Helmershausen-Solling-Folge bildet mit dem „Bausandstein“ den relativ härtesten triasischen Buntsandstein.
Devonkalk	Im Oberdevon, vor rd. 360 Mio. Jahren als biogenes Sediment gebildeter Riffkalk aus dem Iberg-Winterberg-Gebiet. Der von MÜLLER (1980) beschriebene sehr hohe Calcit-Gehalt von 96–98 % wird durch die chemische Analyse ⁴ (vgl. Kap. 2.6.3) bestätigt.
Diabas	Untermeerischer Vulkanismus im Unterkarbon (Kulm, vor rd. 350 Mio. Jahren) förderte Diabaslaven im Oberharzer Diabaszug. Der Kulmdiabas am Huneberg ist zum Teil metamorph umgewandelt. Die Grünfärbung beruht auf Mineralumwandlung (MOHR, 1964).
Grauwacke	Nach neueren Untersuchungen wurde die Grauwacke im Oberdevon (und nicht in Unterdevon) vor rd. 360 Mio. Jahren als Verwitterungsschutt mit überwiegend psammitischen Anteilen im Meer östlich der „Mitteldeutschen Schwelle“ sedimentiert, diagenetisch verfestigt und im Zuge der herzynischen Faltung verlagert (MÜLLER & Strauß, 1987).
Muschelkalk	Biogenes Sediment vor rd. 220 Mio. Jahren im mittleren Trias in der Sedimentationsfolge des Unteren Muschelkalkes entstanden.

Es wurden jeweils die sog. „Vorabsiebungen“ oder spezielle Materialien ohne Güteüberwachung, die üblicherweise aufgrund ihres deutlich geringeren Preises als Waldwegematerial Verwendung finden, beprobt. Als Vorabsiebung werden jene Körnungen aus unsortiertem Gestein bezeichnet, die hinter dem Vorbrecher eines Steinbruchs anfallen, oder aber bei dem Anstich einer neuen geologischen Formati-

⁴ weitere Aussagen zur chemisch-mineralogischen Zusammensetzung finden sich im „Ökologischen Teil“ (Kap. 2.6.3).

on in den Randbereichen gewonnen wird. In diesen Bereichen treten vermehrt Störschichten (z.B. Toneinschlüsse) auf. Dieses Material wird gebrochen und ohne Erfüllung von Güteansprüchen zur Verwendung für untergeordnete Zwecke verkauft. Vor allem ein weitaus höherer Anteil an schlecht geformten Körnern und organische Anhaftungen zeichnen die Vorabsiebung aus.

Als Referenzmaterial wurde in jedem Steinbruch, sofern vorhanden, ein güteüberwachter Baustoff, der in seiner Kornzusammensetzung dem erstgenannten Material möglichst ähnelt, gewählt. Dieses Material ist unter Beachtung der EBA-NS 86, als 'B2' gekennzeichnet.

Die Probenahme erfolgte nach den Vorgaben der TP Min-StB 94; DIN 52 101, Teil 2.2.1.

Die Proben wurden, mit Ausnahme des Devonkalkes 0/32 B2, der direkt von einem Förderband beprobt wurde, von Schütthalden genommen. Eine gute Durchmischung des Materials an der zu beprobenden Stelle der Halde konnte in allen Fällen mit Hilfe eines Radladers erreicht werden, der durch ein „Aufschütteln“ der Gesteinskörnungen die haldentypische Fraktionierung, die durch Abrollen der gröberen Bestandteile nach Unten und Außen entsteht, weitestgehend beseitigte. Anschließend wurden die Teilproben von mindestens drei verschiedenen Stellen und Höhen des Haldenanschnittes in den Laboratorien der Steinbrüche mit einem Probenteiler homogenisiert.

Die nicht der Güteüberwachung unterliegenden Baustoffe wurden an der Halde von erfahrenen Wegebaupraktikern in Augenschein genommen. So wurde die Probenahme möglichst weitgehend an der Materialbeschaffung der forstlichen Praxis orientiert. Die Praktiker bestätigten, daß das Material in der vorliegenden Zusammensetzung für die Verwendung als Deckschicht-, bzw. Tragdeckschichtmaterial akzeptiert und bei Bedarf angekauft wird.

Die Gesteinsproben wurden in sauberen 10-Liter-Plastikeimern im Labor des Institutes für Straßenwesen in Braunschweig angeliefert. Eine Liste der 24 angelieferten Gesteinsproben befindet sich in Anhang 2.

1.5.2. Siebanalysen der Baustoffe

Die angelieferten Proben lagen in Korngemischen von 0 bis 100 mm vor⁵. Sie wurden anschließend einer Naßsiegung unterzogen. Durch eine Naßsiegung sollte folgende Ziele erreicht werden:

1. Darstellung einer Sieblinie für jedes untersuchte Material.
2. Bestimmung des Anteiles der Schluff- und Feinstfraktion bei Anlieferung.
3. Zerlegung in die für den LA-Versuch erforderlichen Kornklassen.
4. Schaffung von definierten Ausgangsbedingungen vor dem Versuch.

Die Ergebnisse der Siebanalyse sind bei WULFF (1998) als tabellarische sowie als graphische Darstellung wiederzufinden. Sie zeigen, daß sämtliches beprobtes Material, welches nicht der Güteüberwachung unterliegt, deutlich erhöhte Anteile an Bestandteilen der Schluff- und Feinstfraktion (Ton) $< 0,063$ mm aufweist. Der Massenanteil dieser Fraktion lag (ohne pos./neg. Ausreißer) zwischen 9,8 % und 16,7 % im Mittel bei 13 %. Bei den güteüberwachten Baustoffen lag er demgegenüber bei durchschnittlich 6,5 %. Regelwerke zur Materialverwendung im Straßenbau (ZTVT-StB 95) und im ländlichen Wegebau (ZTV LW 99) begrenzen den zulässigen Anteil an Bestandteilen $< 0,063$ mm für viele Verwendungen bei einem Massenanteil von 7% im eingebauten Zustand.

Besonders deutlich wird diese Besonderheit am Beispiel des untersuchten Diabas, dessen Sieblinien in der folgenden Abb. 1-8 dargestellt sind:

⁵ Buntsandstein 0/100 gilt nach Absieben der Kornfraktion 32/100 als geeignetes Material für Tragdeckschichten auf Waldwegen mit geringer Verkehrsbelastung.

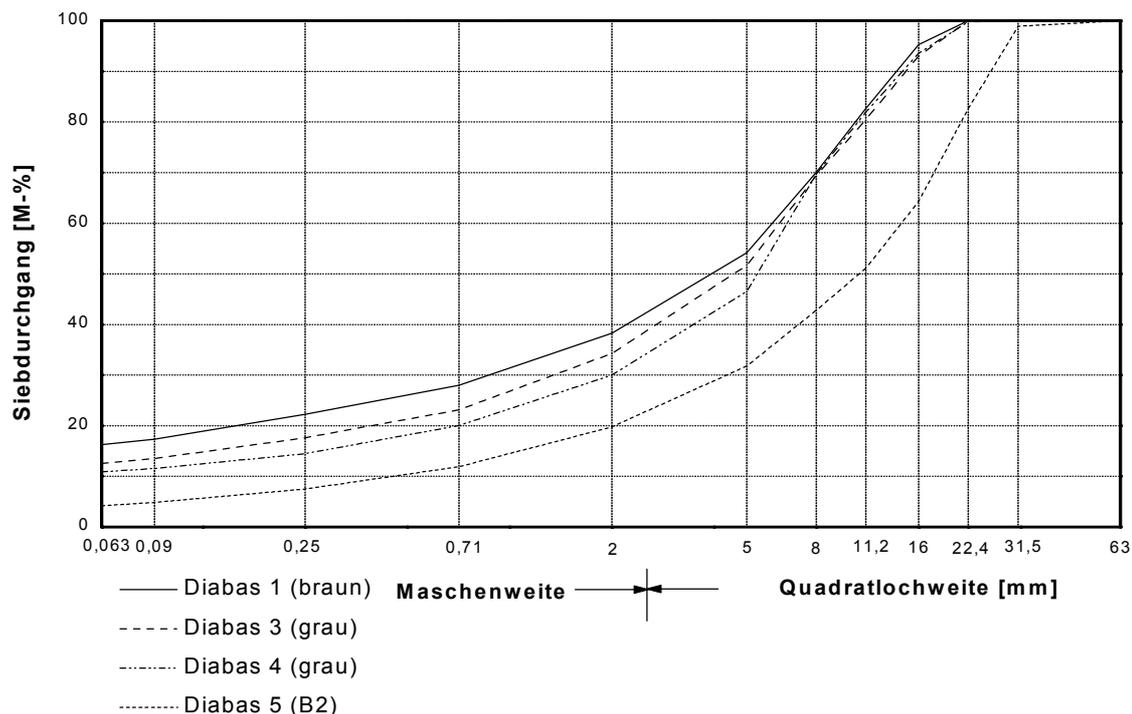


Abbildung 1-8: Sieblinien des untersuchten Diabas

Der Massenanteil $< 0,063$ mm wurde über den Massenverlust ermittelt. Der Anteil beträgt bei der Probe Diabas 1 („brauner Diabas“, i.d.R. für geringwertigere Verwendungen) 16,2 %. Bei der güteüberwachten Probe Diabas 5 beträgt dieser Anteil 4,6 %. Damit würde diese Gesteinskörnung auch im eingebauten Zustand, somit auch nach einer weiteren Zerkleinerung beim Einbau, die überwiegend beim Walzen erfolgt, der o.g. Forderung der ZTV LW 99 (und anderer ZTV) genügen.

1.5.3. Durchführung der LA-Versuche

Für die Durchführung der Los Angeles-Versuche im Labor des Institutes für Straßenwesen wurde eine den Vorgaben der ÖNORM B 3128 angenäherte Zusammensetzung des Gemisches gewählt.

Nach Begutachtung der zur Verfügung stehenden Materialmengen wurden zwei verschiedene Zusammensetzungen für das Korngemisch ausgewählt. Das erste Gemisch (5/16) setzt sich aus den Kornklassen 5-8 mm, 8-11,2 mm und 11,2-16 mm

zusammen, das zweite (5/22) wird um die Kornklasse 16-22,4 mm erweitert. Die Mengenteile der jeweiligen Fraktionen sind in Tabelle 1-3 aufgeführt.

Tabelle 1-3: Zusammensetzung der Korngemische und Reibmittelladung

Kornklasse [mm]	Prüfgutbezeichnung und Mengenteile	
	5/16	5/22
5,0 - 8,0	1.666,0 g	1.050,0 g
8,0 - 11,2	1.667,0 g	1.300,0 g
11,2 - 16,0	1.667,0 g	1.300,0 g
16,0 - 22,4	-	1.350,0 g
Summe	5.000,0 g	5.000,0 g
Reibmittelladung		
Anzahl der Kugeln	9	12
Gewicht der Kugeln	3.750 ± 20 g	5.000 ± 25 g

Nach dem Trocknen der einzelnen Fraktionen wurde das Prüfgemisch nach Tab. 1-3 zusammengesetzt und der Los Angeles-Prüfung unterzogen. Nach 500 Umdrehungen in der Trommel wurde das Prüfgut auf dem 1,6 mm Sieb gewaschen, um anhaftendes Feinmaterial zu lösen. Der Rückstand wurde bei 110°C 24 Stunden lang getrocknet und gewogen. Abschließend wurde der LA-Wert errechnet. Eine detaillierte Darstellung von Gerät und Versuchsablauf sowie eine Diskussion zu Korrekturformeln bei Abweichungen der geräte- und versuchsspezifischen Parameter von den Normvorgaben findet sich bei WULFF (1998). Der zeitliche Aufwand für den einzelnen LA-Versuch beträgt rd. 4 h 15 min.

1.5.4. Ergebnisse der LA-Versuche

In der folgenden Tabelle 1-4 sind die Ergebnisse des LA-Versuches dargestellt. Hierbei fällt eine Bildung von zwei Klassen auf. Als „harte“ Gesteinen haben Diabas, Basalt und Grauwacke den Versuch mit LA-Werten zwischen 13 und 17 durchlaufen. Demgegenüber verließen die „weichen“ Devon- und Muschelkalk wie auch der Buntsandstein mit deutlich höheren Schlagabriebverlusten von 26% bis 36% die LA-Trommel.

Tabelle 1-4: Ergebnisse der Los Angeles-Prüfung

Material für Waldwege-Deckschichten				
Nr.	Gestein	LA-Wert	Prüfkörnung	Bemerkungen
1	Diabas	13,6	5/16	braun ⁶
2	Diabas	13,0	5/16	grau ⁷
3	Diabas	13,4	5/16	B 2
4	Basalt	14,6	5/16	-
5	Basalt	14,8	5/16	-
6	Basalt	14,3	5/22	B 2
7	Devonkalk	29,3	5/16	Vorabsiebung
8	Devonkalk	28,1	5/16	Vorabsiebung
9	Devonkalk	32,1	5/22	B 2
10	Grauwacke	17,4	5/22	1. Wahl
11	Grauwacke	16,7	5/16	2. Wahl
12	Buntsandstein	30,1	5/16	-
13	Buntsandstein	35,8	5/22	-
14	Muschelkalk	30,7	5/22	-
15	Muschelkalk	25,8	5/16	B 2

⁶ Werkinterne Fachbezeichnung: Material mit hohem Feinkornanteil

⁷ Werkinterne Fachbezeichnung: Material mit geringerem Feinkornanteil

Nachfolgend sind die Versuchsergebnisse graphisch dargestellt (bei der Farbgebung der Säulen wurde, soweit dies technisch möglich ist, eine mit dem geprüften Material verbundene Farbassoziation verwendet).

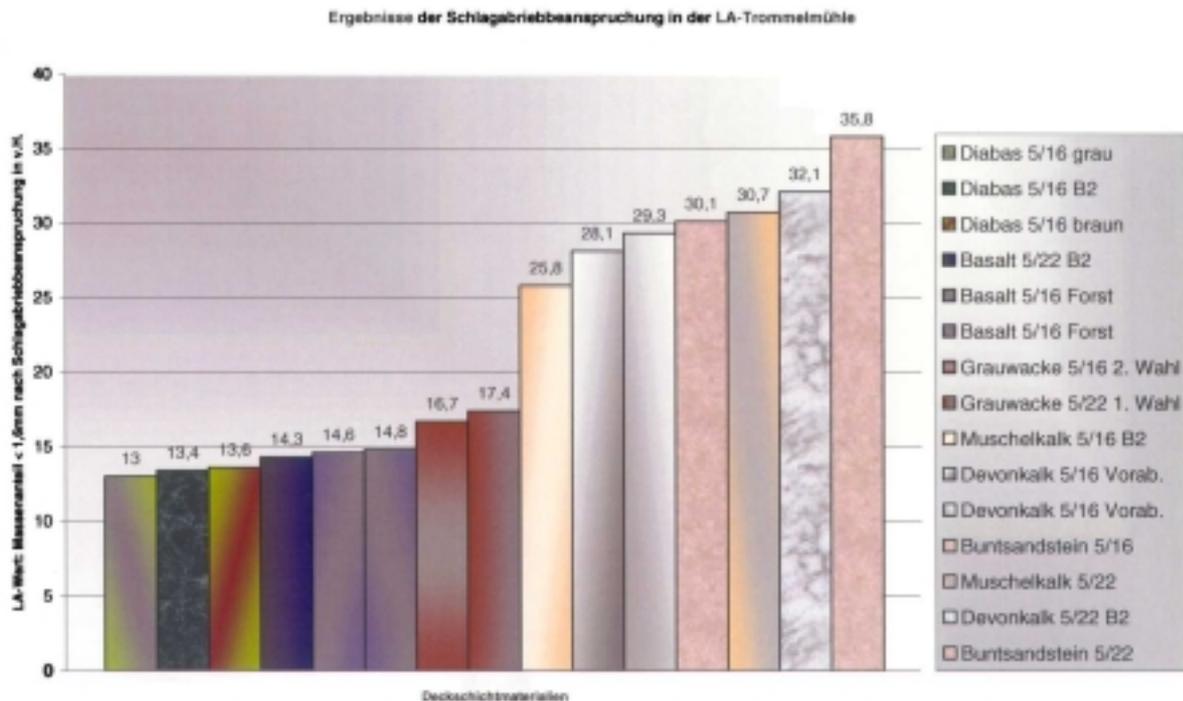


Abbildung 1-9: LA-Werte der Wegebaumaterialien graphisch

Die Ergebnisse des LA- Versuches an dem Forstwegematerial zeigen eine deutliche Klassenbildung. Die „harten“ Gesteine mit LA- Werten von 13 bis 17,4 sind deutlich von den „weichen“ Kalken und dem Buntsandstein abzugrenzen.

1.5.5. Kornzertrümmerung und Materialverfeinerung

Durch die Beanspruchung in der Los Angeles-Trommel kann nicht nur der entstehende Materialanteil $< 1,6$ mm als LA-Wert ermittelt werden. Das Prüfmaterial unterliegt insgesamt einer Kornzertrümmerung und Verfeinerung, die nach Mineralstoffart unterschiedlich ist.

Theoretische Grundlagen zur Quantifizierung dieser Vorgänge stammen von DAO (1971) und DIENEMANN (1980). DAO beurteilt die Verfeinerung eines Mehrkorngemischs über den Kornzertrümmerungsgrad Z :

$$Z = \frac{R_v - R_n}{R_v} \cdot 100 [\%]$$

R_v = Summe der Rückstände auf den einzelnen Prüfsieben vor der Beanspruchung.

R_n = Summe der Rückstände nach der Beanspruchung.

DIENEMANN betont, daß bei der Zerkleinerung eines Korngemisches (Haufwerkes) die Durchgangssummenlinie des zerkleinerten Gemisches stets über der ursprünglichen Durchgangssummenlinie liegt. Die Fläche unterhalb einer Durchgangssummenlinie kann somit als „Maß für die Feinheit eines Haufwerkes (Korngemisches)“ bezeichnet werden. Die vorhandene Verfeinerung DF eines zerkleinerten Korngemisches ist die Differenz der Fläche nach und vor Zerkleinerung: $DF = F_{nach} - F_{vor}$ [Gew.-%]. Der Autor trifft weitere Aussagen, die den Anteil der Kornverfeinerung einzelner Kornklassen beschreiben („bezogener Verfeinerungsgrad“).

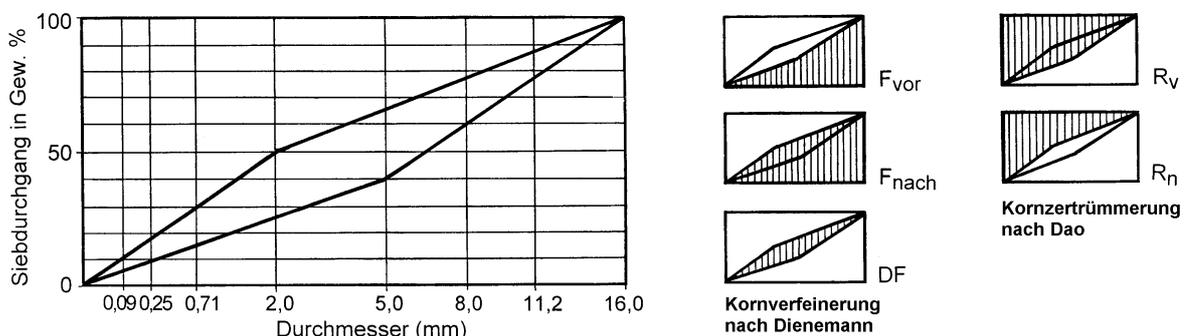


Abbildung 1-10: Kornverfeinerung und -zertrümmerung nach DIENEMANN und DAO

Die folgende Abbildung (1-11) zeigt die Korngrößenverteilungslinien des Buntsandsteines, welcher sich im Versuch mit der Korngrößenverteilung 5/16 als das am wenigsten widerstandsfähige Material erwies und die des Basaltes, mit einem günstigen Los Angeles-Wert nach dem Versuch. Die Korngrößenverteilungslinien wurden von WULFF (1998) durch Siebung des Materials nach der Auswertung bestimmt. Da der Kornanteil unterhalb von 1,6 mm abgespült wurde, kann dieser Anteil in seiner Verteilung nur aufgrund der Ergebnisse von EPPENSTEINER et al. (1975) als nahezu parabolischer Verlauf angenommen werden:

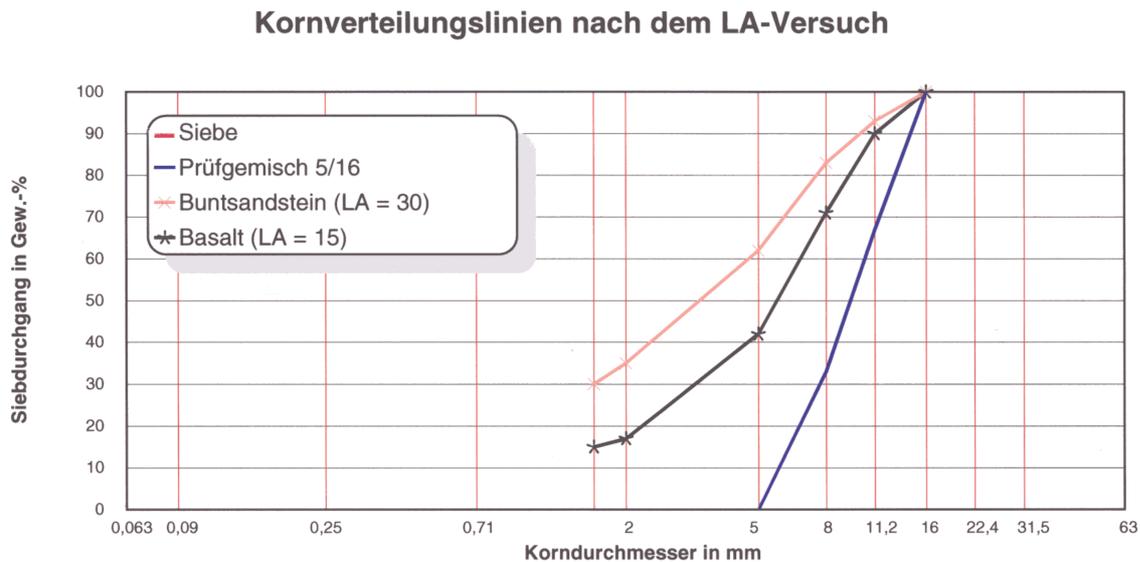


Abbildung 1-11: Kornverteilungslinien nach dem LA-Versuch

Aus der Abbildung wird ersichtlich, daß der Mengenanteil des Materials sich sehr deutlich in den feineren Bereich verschoben hat. Die durch die Schlagabriebbelastung entstandenen Fraktionen von 2,0 bis 5,0 mm unterscheidet sich bei beiden Materialien bereits deutlich. Der unterhalb des 1,6 mm Prüfsiebes liegende Anteil an Sand und Feinmaterial ist beim Buntsandstein mit 30 % etwa doppelt so hoch wie beim Basalt mit 14,8 %. Der Zertrümmerungs- bzw. Verfeinerungsgrad des Buntsandsteines ist somit relativ „hoch“, der des Basaltes „gering“. Zwei weitere Darstellungen der Korngrößenverteilung von Diabas und Devonkalk nach dem LA-Versuch finden sich in Anhang 1 unten.

1.5.6. Vergleich der Ergebnisse

In einer Projektarbeit aus dem Jahr 1996 hat TABBERT die Qualität mineralischer Straßenbaustoffe aus den alten und neuen Bundesländern sowie Importe untersucht. Anhand der Angaben aus der Fremdüberwachung gemäß den Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau – RG Min-StB - wurden Daten aus über 1.500 Natursteinbetrieben erfaßt. Die Untersuchungen wurden den Mineralstoffgruppen (Gesteinsgruppen), wie sie in den Regelwerken dargelegt sind, zugeordnet. Für die vorliegende Untersuchung können aus dieser Projektarbeit Vergleiche auf der Basis eines sehr großen Stichprobenumfangs gezogen werden.

Mit Hilfe der in Kap. 1.4.4 vorgestellten Korrelation zwischen dem LA-Wert und dem SZ-Wert nach einer Untersuchung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) in Bergisch Gladbach (BALLMANN, 1996), lässt sich aus den bekannten SZ-Werten wie folgt auf den LA-Wert schließen:

$$SZ = 3,62 \cdot LA^{0,5569} \Rightarrow LA = 0,5569 \sqrt{\frac{SZ}{3,62}} \Rightarrow LA = \left(\frac{SZ}{3,62}\right)^{\frac{1}{0,5569}} \Rightarrow LA = \left(\frac{SZ}{3,62}\right)^{1,796}$$

Diese Korrelation stellt sich graphisch wie folgt dar:

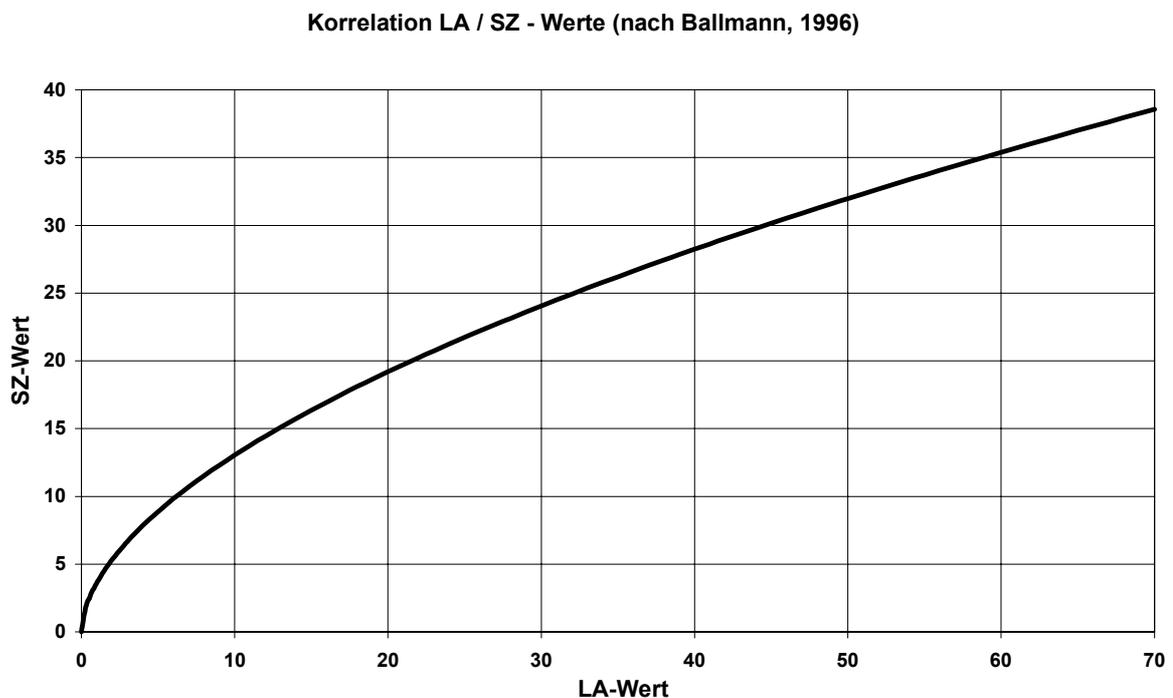


Abbildung 1-12: Korrelation zwischen LA- und SZ-Wert (nach BALLMANN, 1996)

In der folgenden Tabelle werden die im Versuch ermittelten LA-Werte der Waldwegebauaterialien mit den Angaben aus der Untersuchung der BAST (BALLMANN, 1996, gelb unterlegte Zeilen) sowie den $SZ_{8/12}$ -Werte von TABBERT (1996), umgerechnet nach der o.g. Korrelation (grau unterlegte Zeilen), verglichen:

Tabelle 1-5: Vergleich der ermittelten LA-Werte mit Angaben aus der Literatur

Gestein bzw. Gesteinsgruppe	An- zahl	LA- min.	LA- mittel	LA- max.	s*
Diabas LA_{5/16}	3	13,0	--	13,6	--
Diabas LA _{10/14} (Ballmann, BAST)	2	8	--	11	--
Diabas LA (aus SZ _{8/12} korreliert)	89	5,4	11,1	28,6	3,91
Basalt LA_{5/16}, bzw. 5/22	3	14,3	--	14,8	--
Basalt LA _{10/14} (BALLMANN, BAST)	9	8,3	14,5	21	--
Basalt LA (aus SZ _{8/12} korreliert)	107	5,7	11,9	36,4	5,06
Grauwacke LA_{5/16}, bzw. 5/22	2	16,7	--	17,4	--
Grauwacke LA _{10/14} (BALLMANN, BAST)	3	11,1	--	15,4	--
Grauwacke LA (aus SZ _{8/12} korreliert)	40	7,2	12,6	29,7	5,19
Kalksteine LA_{5/16}, bzw. 5/22	5	25,8	--	32,1	--
Kalksteine LA _{10/14} (BALLMANN, BAST)	10	15	24,4	37,5	--
Kalksteine LA (aus SZ _{8/12} korreliert)	350	13,2	26,2	42,0	4,49
Buntsandstein LA_{5/16}, bzw. 5/22	2	30,1	--	35,8	--
RCL-Baustoffe LA (aus SZ _{8/12} korreliert)	75	18,0	38,1	49,5	8,38

* = Standardabweichung der LA-Werte (aus SZ-Angaben von TABBERT korreliert)

Die Ermittlung der Los Angeles-Werte erfolgte unter leicht unterschiedlichen Versuchsbedingungen. WULFF hat sich beim Los Angeles-Versuch an den Wegebbaumaterialien mit den Prüfkörnungen 5/16 und 5/22 an den Vorgaben der ÖNORM B 3128 orientiert. Demgegenüber hat die BAST entsprechend der vorgesehenen EN 1097, Teil 2, die Prüfkörnung 10/14 gewählt. Die Umrechnung der Schlagzertrümmungswerte nach der oben beschriebenen Korrelation ist bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,939 (BALLMANN, 1996) zwar straff, es ergeben sich jedoch geringe, für die Praxis tolerierbare rechnerische Abweichungen.

Wie zu erkennen, liegen die am Waldwegebbaumaterial ermittelten LA-Werte in Größenordnungen, die sich gut mit den Untersuchungen der BAST vergleichen lassen. Ebenso gut passen die Werte zu dem großen, von TABBERT (1996) ermittelten Zahlenkollektiv, bei dem die SZ-Werten über die o.g. Korrelation auf LA-Werte umgerechnet wurden. Mit Ausnahme des oberen Grenzwertes bei den untersuchten Kalken liegen diese Werte innerhalb des, durch die oben angegebene einfache Standardabweichung definierten Vertrauensbereichs. Man beachte in diesem Zusammenhang aber die min/max. Grenzwerte für Kalksteine bei Tabbert!

1.6. Versuche zur Widerstandsfähigkeit gegen Frost

Neben der mechanischen Beanspruchung durch schlagende und reibende Kräfte unterliegen Gesteinskörnungen in ungebundenen Wegen in besonderes hohem Maß der Frostbeanspruchung. Die Regelwerke für den Straßenbau⁸ sehen zwei Verfahren zur Prüfung der Widerstandsfähigkeit von Gesteinen bzw. Gesteinskörnungen gegen Frosteinwirkung vor:

1. Bestimmung der Wasseraufnahme und des Sättigungswertes
2. Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (FTW)

Die Wasseraufnahme W_a von Naturstein und Gesteinskörnungen unter Atmosphärendruck ist die Differenz zwischen der Masse der unter Atmosphärendruck wassergelagerten Probe m_w und der getrockneten Probe m_{tr} ($W_a = m_{w,a} - m_{tr}$). Der massebezogene Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck $W_{m,a}$ wird wie folgt

berechnet:

$$W_{m,a} = \frac{W_a}{m_{tr}} \cdot 100\%$$

Nach den technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000) ist eine ausreichende Widerstandsfestigkeit gegen Frosteinwirkung gegeben, sofern der massebezogene Wasseraufnahmegrad $W_{m,a} < 0,5 \%$ ist. Bei einer Überschreitung dieses Grenzwertes sieht das Regelwerk die Durchführung des FTW-Versuches vor.

Bereits im Jahr 1975 hat EHLERS in seiner Dissertation darauf hingewiesen, daß dieser Grenzwert von 0,5 Gew. % festgelegt wurde, weil diese Wassermenge bei den Versuchsdurchführungen als sogenanntes Haftwasser auf der Gesteinsoberfläche haften und in von außen zugängliche Hohlräume eingedrungen sein kann. Bei einer Eisbildung wird der Sprengdruck des Eises so groß, daß das Gestein zerspringt. Hierbei ist aber festzustellen, daß diese Grenze unabhängig von der Korngröße des Prüfgutes festgelegt wurde, obgleich feststeht, daß die Menge des Haftwassers entscheidend von der Summe der Kornoberflächen abhängt. Die Gesamtoberfläche von Korngruppen mit einem kleineren Durchmesser ist um ein Vielfaches größer als die von Korngruppen mit einem größeren Durchmesser.

⁸ TP Min-StB 94 in Verbindung mit TL Min-StB 2000

Auch die Menge des in von außen zugänglichen Hohlräumen eingedrungenen Wassers ist kein Maß für die Frostbeständigkeit eines Gesteines oder Korngemisches.

Die Mengenangabe allein läßt weder eine Aussage über den Füllungsgrad der Poren mit Wasser noch über die Größe der Kapillaren zu, die von außen zu den inneren Hohlräumen führen. Für die Frostbeständigkeit eines Gesteins sind aber eben der Füllungsgrad der Poren mit Wasser und die Größe der Zugangsöffnung von entscheidender Bedeutung. Dies wurde bereits von QUERVAIN (1948) sehr deutlich dargestellt:

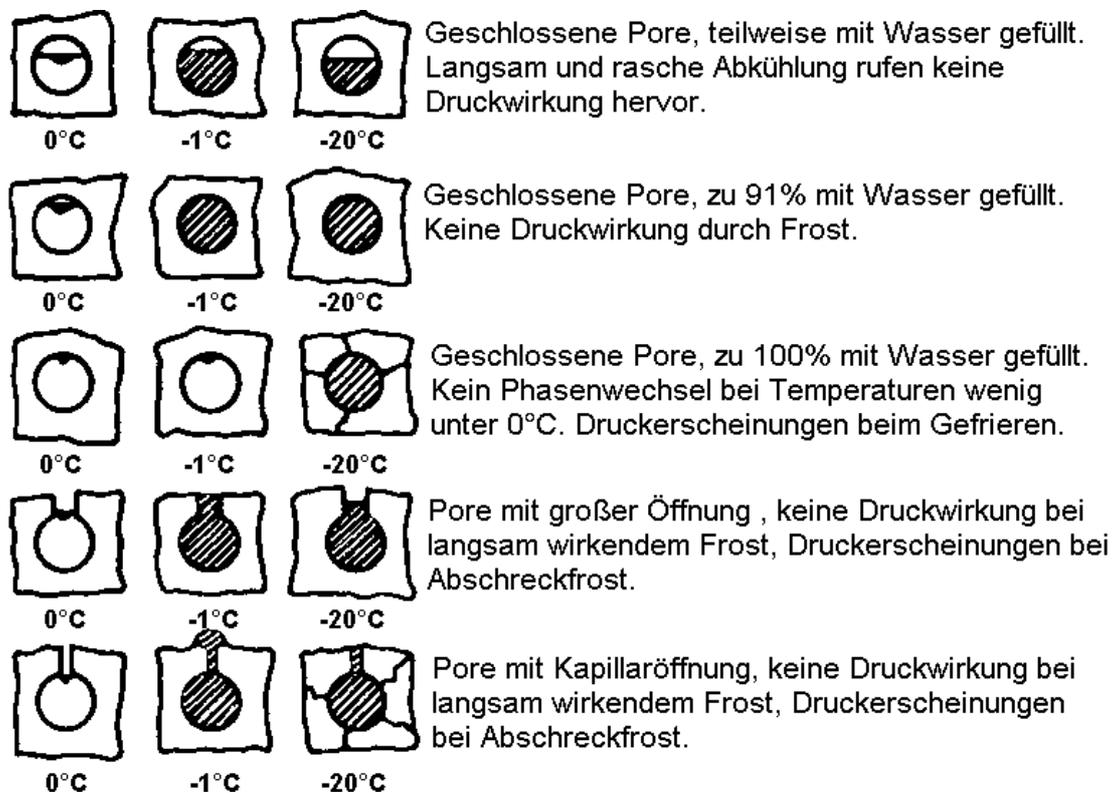


Abbildung 1-13: Schematische Darstellung der Frostwirkung (nach QUERVAIN)

Eine weiteres nur bedingt taugliches Verfahren, das hier der Vollständigkeit halber erwähnt sei, ist die Bestimmung des Sättigungswertes S (auch S -Wert) von Naturstein, der das Verhältnis der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck W_a zur

Wasseraufnahme unter Druck (150 bar) W_d beschreibt:
$$S = \frac{W_a}{W_d}.$$

Der Sättigungswert soll somit Aufschluß über den Füllungsgrad der Gesteinsporen mit Wasser geben und zeigen, welcher Resthohlraum für die Volumenzunahme im gefrorenen Zustand zur Verfügung steht. SCHULZE (1969) und LÖFFLER (1971) bezeichnen den Sättigungswert als ungeeignetes Kriterium für die Beurteilung der Frostbeständigkeit von Mineralstoffen, insbesondere bei kleineren Korngruppen, da die Größe eines unter Druck zugänglichen „Reserveporenraumes“ sinkt, je kleiner die Korngröße ist. Damit würde der Sättigungswert S gegen 1 gehen und ein Material aus frostsicherem Gestein müßte als „frostgefährdet“ bezeichnet werden.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, daß für die Beurteilung der Frostbeständigkeit die FTW- Versuche, insbesondere bei korngestuftem Materialien für den Waldwegebau, bessere Ergebnisse erbringen als die Bestimmung der Wasseraufnahme und des Sättigungswertes.

1.6.1. Beschreibung des FTW-Versuches

Zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit von Mineralstoffen gegen Frost-Tau-Wechsel stehen zwei verbreitete Verfahren zur Verfügung, die in der TP Min-StB 94 beschrieben sind:

Beutelfrostversuch (nach LÖFFLER)

Dosenfrostversuch in Anlehnung an DIN 4226 und DIN 52104

Der Beutelfrostversuch, bei dem die Mineralstoffproben mit Wasser in PVC-Beuteln durchgefrostet werden, ist nach Untersuchungen von STRITTMATTER (1979) mit thermischen Problemen und Unzulänglichkeiten behaftet. Daher wurde in der vorliegenden Untersuchung im Institut für Straßenwesen in Braunschweig der Dosenfrostversuch angewendet, der diese Unzulänglichkeiten nicht besitzt.

Beim Dosenfrostversuch werden etwa 2000 bis 3500 g eines Mineralstoffes einer definierten Körnung (hier 1,6/16, 1,6/22 und 2/11,2) bedeckt mit Wasser in einer verschlossenen Metalldose nach 24stündiger Wasserlagerung zur Durchfrostung in eine Frostkammer (Gefriertruhe) verbracht. Die Temperatur im Kühlraum wird kontrolliert so abgesenkt und die Dosen anschließend aufgetaut, daß die Temperatur in der Mitte der Füllung einer Blechdose, die mittig steht, etwa so, wie in der folgenden Abbildung dargestellt ist, verläuft:

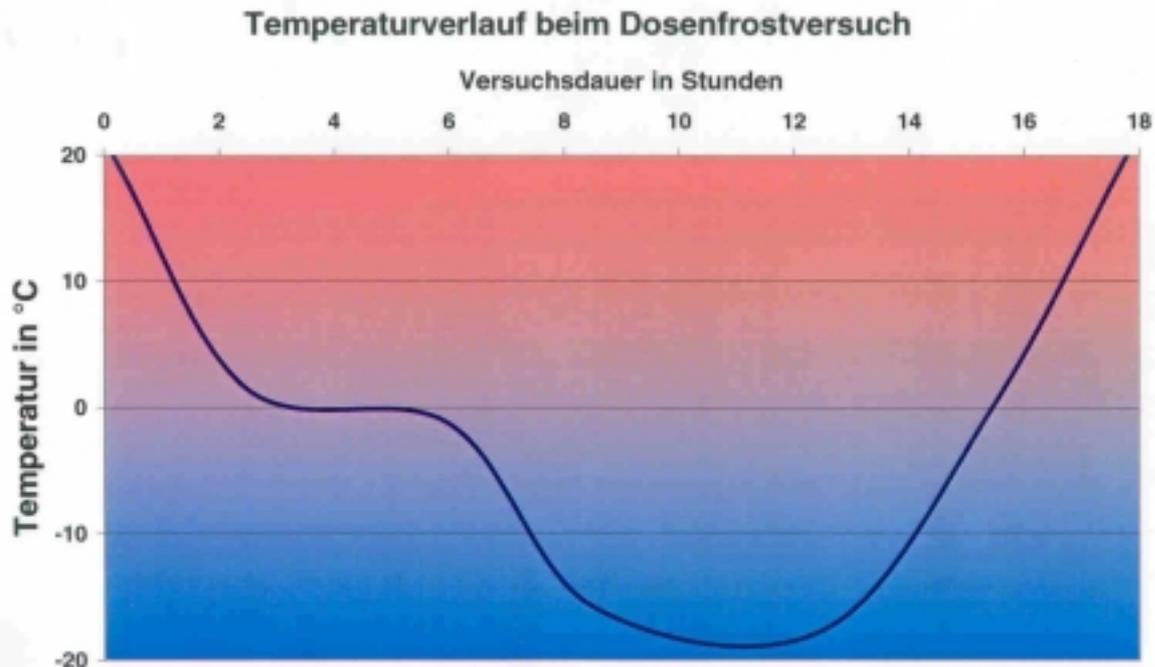


Abbildung 1-14: Temperaturverlauf beim Dosenfrostversuch nach TP Min StB 94

Dieser Frost-Tau-Wechsel wird insgesamt 10mal ausgeführt. Wenn kein Wechsel zwischen Gefrieren und Auftauen stattfinden kann, z. B. an Sonn- und Feiertagen, verbleiben die Behälter bei -15 bis -20°C in der Frostkammer.

Nach der Frost-Tau-Wechselbeanspruchung wird das Prüfgut auf dem nächst kleineren Prüfsieb nach der Siebfolge der TP Min StB 94, das auf die untere Prüfkorngröße folgt (hier 1mm), naß gesiebt. Der Rückstand wird 24 Stunden lang bei 110°C getrocknet und gewogen. Der Durchgang des Prüfgutes nach dem Frost-Tau-Wechsel durch das nächst kleinere Prüfsieb wird als Absplitterung bezeichnet und in Gew.-% bezogen auf die Einwaage angegeben.

Die Anzahl der in die Frostkammer einsetzbaren Dosen hängt von der Kühlleistung und der Kammergröße ab. In der Kammer sind die Dosen in solchen Abständen voneinander und von den Kammerwänden aufzustellen, daß die Wärme allen Dosen möglichst gleichmäßig entzogen wird. Außerdem sind die Stellplätze der einzelnen Dosen in der Frostkammer bei jedem Einsetzen zu tauschen um den Einfluß unterschiedlicher Abstrahlung und Konvektion möglichst auszugleichen.

1.6.2. FTW – Versuche an Waldwegebaumaterial

An einzelnen Proben des Wegebaumaterials, deren Herkunft bereits in Kapitel 1.5 beschrieben ist, wurden FTW- Versuche nach dem Dosenfrostverfahren im Institut für Straßenwesen (Braunschweig) im Januar 1999 durchgeführt.

Mit dem FTW-Versuch beprobt wurden insgesamt 9 Gesteinskörnungen, nachdem das Material zuvor den Los Angeles-Versuch durchlaufen hat. Eine bis dahin unbeanspruchte Probe (Nr. 10) wurde in den Versuch einbezogen. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der 10 FTW-Versuche zusammengefaßt. Für die Basaltprobe (Nr. 3) ist durch einen Meßfehler keine Auswertung möglich:

Tabelle 1-6: Ergebnisse der FTW- Versuche am Waldwegematerial

Gestein	Bezeichnung alt (LA-Versuch)	Korngrößenverteilung vor dem Versuch [mm]	Masse trocken [g]	Masse Rückstand [g]	Masse Durchgang [g]	Absplitterung [%]
Probe 1 Diabas	1	1,6 - 16	2273,5	2266,9	6,6	0,3*
Probe 2 Diabas	2	1,6 - 16	2027,0	2024,7	2,3	0,1*
Probe 3 Basalt	4	1,6 - 16	2161,6	--	--	--
Probe 4 Devonkalk	7	1,6 - 16	2605,2	2596,7	8,5	0,3*
Probe 5 Devonkalk	8	1,6 - 16	2907,4	2897,1	10,3	0,4*
Probe 6 Grauwacke	11	1,6 - 16	2132,7	2128,9	3,8	0,2*
Probe 7 Buntsandstein	12	1,6 - 16	2680,1	2660,8	19,3	0,7*
Probe 8 Buntsandstein	13	1,6 - 22	2411,6	2375,3	36,3	1,5*
Probe 9 Muschelkalk	14	1,6 - 22	2951,2	2882,2	69,0	2,3*
Probe 10 Muschelkalk	unbeansprucht	2 - 11,2	2118,8	2018,8	100,0	4,7

*= Im LA-Versuch zuvor beanspruchte Gesteinskörnungen

Die Beprobung von bereits beanspruchten Gesteinskörnungen entspricht den realen praxisnahen Bedingungen für mineralisches Wegematerial. Ein solcher Wechsel von mechanischer Belastung und Frosteinwirkung wird in den Technischen Prüfbedingungen (TP Min–StB 94) zur individuellen Materialbeurteilung erwähnt. In den technischen Lieferbedingungen (TL Min–StB 2000) sind Grenzwerte für die Frostabsplitterung genannt, die sich allerdings auf zuvor nicht mechanisch beanspruchtes Material beziehen.

Die Absplitterung nach der FTW- Belastung liegt bei den meisten hier untersuchten Gesteinsproben auf einem sehr niedrigen Niveau. Insbesondere die Proben 1 bis 7 zeigen nur sehr geringe Absplitterungen zwischen 0,1 und 0,7 Gew.-% der in den Versuch eingegangenen Masse. Nach den Vorschriften der Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe (TL Min–StB 2000) werden somit die an Edelsplitle gestellten Anforderungen zur Frostbeständigkeit (max. 1 Gew.-% Absplitterung) erfüllt. Diese besondere Frostbeständigkeit ist wohl zu einem großen Teil dadurch zu erklären, daß durch die vorangegangene Schlagabriebbelastung instabile und poröse Bereiche der Mineralien, die üblicherweise einem Frostangriff ausgesetzt sind, bereits abgeschlagen, bzw. zermahlen waren. Die zuvor unbeanspruchte Muschelkalkprobe erfüllt mit 4,7 Gew.-% Absplitterung allerdings nicht die an korngestuftem Schotter gestellten Anforderungen der TL Min–StB 2000 (max. 3 Gew.-% Absplitterung) und muß demnach als nicht frostbeständiges Material eingestuft werden.

Trotz des insgesamt niedrigen Niveaus der Absplitterung nach FTW- Belastung zeigt der Versuch einen Zusammenhang zwischen den zuvor ermittelten LA-Werten und der Frostbeständigkeit der Wegebaustoffe. Die folgende, nach der Abfolge der LA-Werte sortierte Grafik zeigt, daß die, als „harte“ Gesteine aus dem Schlagabriebversuch hervorgegangenen Proben, auch sehr niedrige FTW-Absplitterungen aufweisen. Der untersuchte Devonkalk, im LA-Test bei den „weicheren“ Gesteinen eingestuft, zeigt allerdings nur geringe Absplitterungen um 0,4 Gew.-%.

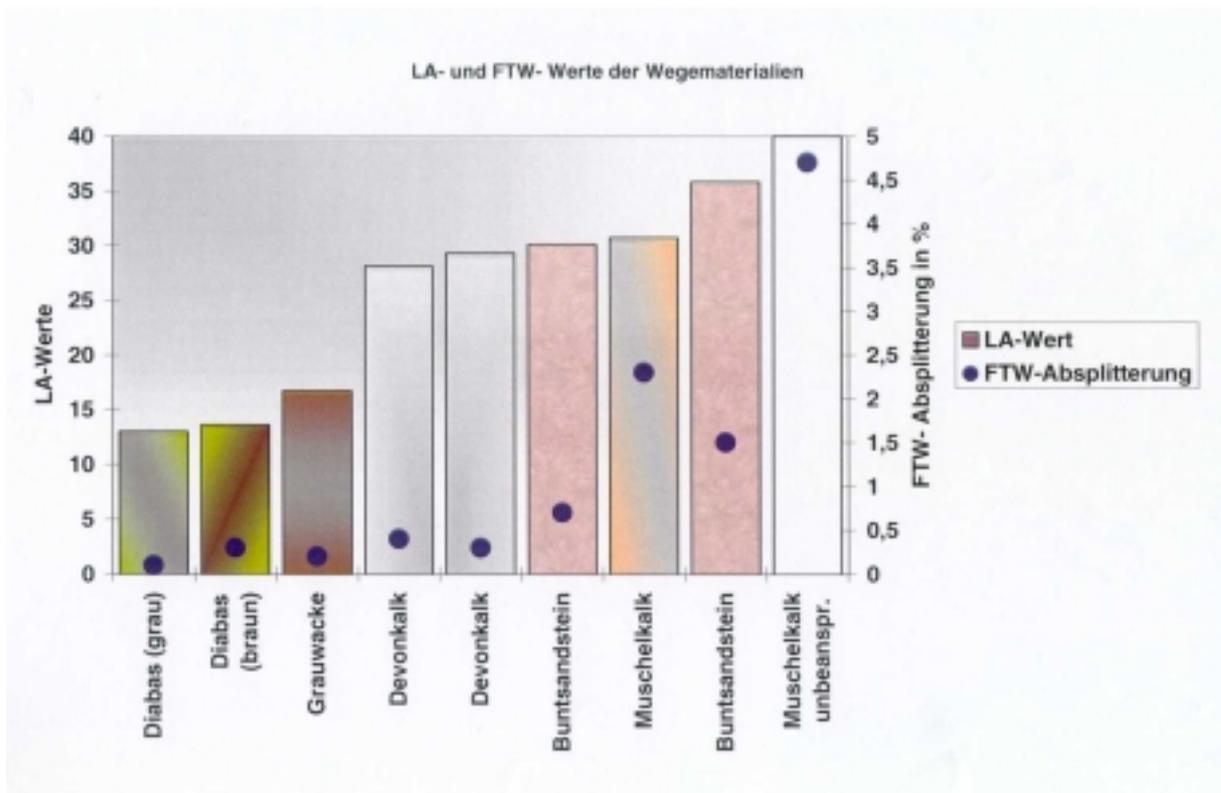


Abbildung 1-15: LA- und FTW- Werte der Wegematerialien

Neben der Absplitterung nach FTW auf dem nächst unteren Prüfsieb (hier 1mm, siehe Anhang 3) wurde durch Siebung an einigen Proben die Kornverfeinerung bestimmt. Die Ergebnisse sind tabellarisch in Anhang 4 dargestellt. Die folgende Abbildung zeigt die prozentuale Aufgliederung der Absplitterung in die Fraktionen < 1 bis $0,063$ mm und $< 0,063$ mm (Schluffkorn und feiner) fallend sortiert nach dem Anteil der gröberen Fraktion:

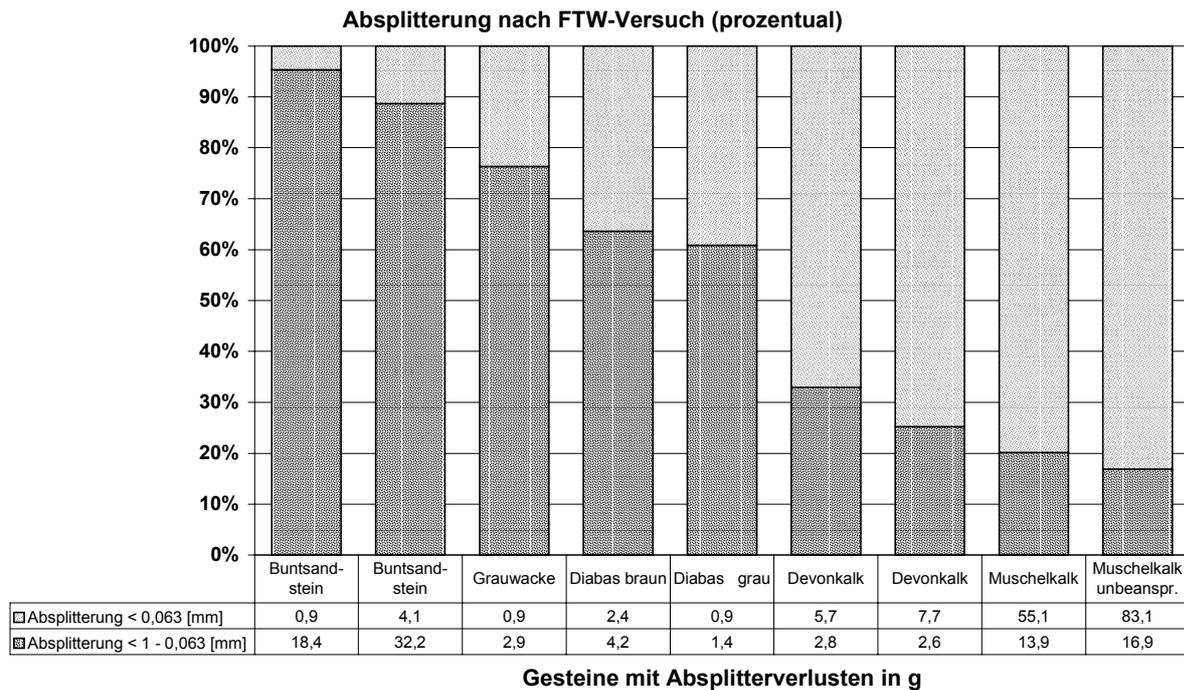


Abbildung 1-16: Absplitterung nach FTW-Versuch (prozentual)

Die Fraktion des abgesplitterten Materials steht offensichtlich nicht im Zusammenhang mit der Frost- Tau- Resistenz der Gesteinsart. Vielmehr erklärt die Struktur und die absolute Korngröße der im Gestein enthaltenen Aggregate die Verteilung des abgesplitterten Materials. Der triasische Buntsandstein hat, wie sein Name sagt, eine sandige, vergleichsweise grobe Struktur. Wie auch die chemische Analyse zeigt (vgl. Kap. 2.6.3), besteht er zu mehr als 75% seiner Masse aus Silikaten.

Die oberdevonische Grauwacke wird zwar zu den Psammiten gezählt, aber das zu beobachtende Spektrum reicht von pelitischen bis zu grobklastischen Anteilen. Sie kann als sehr unreiner Sandstein bezeichnet werden (MARESCH/MEDENBACH, 1996). Demgegenüber zeigt der Muschelkalk als eindeutig den Peliten zuzuordnendes Sedimentgestein eine Absplitterung, die zu mehr als 80% aus Feinmaterial der Fraktion < 0,063 mm besteht.

1.7. Diskussion der Ergebnisse des „Technischen Teils“

Der vorliegenden technischen Untersuchung geht eine Darstellung des heute üblichen Bauverfahrens und der wesentlichen technischen Anforderungen an das Baumaterial für Waldwege-Deckschichten, wie in den Regelwerken des klassifizierten Straßen- und Wegebaues dargelegt, voraus. Anschließend werden Aspekte, die für eine möglichst lange Nutzungsdauer der Deckschichten bedeutsam sind, im Wege von Pilotversuchen an 15 Gesteinsproben näher untersucht.

Ein zunächst bedeutsames Ergebnis der Untersuchung ist die besondere Korngrößenverteilung (KGV) der nicht klassifizierten Wegebaugesteine mit einem auffallend hohen, durchschnittlich 13%igen Massenanteil in der Schluff- und Feinstfraktion (Ton) $< 0,063$ mm. (s. Kap. 1.5.2). Die Regelwerke im Straßenbau und im ländlichen Wegebau (ZTV LW 99) begrenzen den zulässigen Anteil dieses Feinmaterials bei 7 % im eingebauten Zustand.. Die Frage, ob diese deutliche Abweichung der Kornstufung von der angestrebten „Fuller-Parabel“ bereits eine negative Auswirkung auf die Festigkeit von Wegedecken hat, konnte durch die vorliegende Untersuchung nicht geklärt werden. Die besondere Bedeutung eines Mangels bzw. eines überhöhten Anteiles an Feinmaterial wird in Kap. 1.3.4 dargestellt. Es kann gezeigt werden, daß eine zu große Feinteilbildung in der Gesteinskörnung bei wenig abrieb- und verwitterungsresistenten Gesteinen im Waldwegebau wesentlich bedeutsamer ist und weit mehr Schäden an Wegedecken verursacht, als der umgekehrte Fall.

Anhand der vergleichenden Darstellung der Prüfmethode zur Bestimmung der Schlagabriebfestigkeit kann gezeigt werden, daß der im klassifizierten Straßenbau bewährte Los Angeles-Versuch besonders geeignet ist, die Verschleißbedingungen, denen Gesteinskörnungen in ungebundenen Deckschichten unterworfen sind, zeitgerafft zu simulieren.

Es war nicht das Ziel der vorliegenden technischen Untersuchungen abschließende Ergebnisse für die Verwendbarkeit bestimmter Gesteine für Bau und zur Erhaltung von ungebundenen Deckschichten im Waldwegebau zu liefern. Dies liegt vor allem an der sehr großen Variabilität der Gesteinseigenschaften in Abhängigkeit vom Vorkommen einzelner Gesteinsfacies. Um einzelne Gesteinseigenschaften statistisch gesichert zu beschreiben, sind breit angelegte Ringuntersuchungen notwendig (LEERS, JOHANNKNECHT, 1975). Die vorliegende Untersuchung verläßt somit nicht den Rahmen einer Pilotstudie. Erst die Zuordnung der eigenen Ergebnisse zu größeren,

im klassifizierten Straßenbau durchgeführten Versuchsreihen an Gesteinskörnungen, in Verbindung mit empirischen Beobachtungen aus der Praxis des Waldwegebaues ermöglicht weiterführende Aussagen.

Die Versuchsergebnisse des LA-Pilotversuches, nämlich eine Abgrenzung der „harten“ Gesteinskörnungen mit LA- Werten von 13 bis 17,4 von der Gruppe der „weichen“ Gesteine mit Werten von 25,8 bis 35,8 decken sich weitgehend mit empirischen Beobachtungen von Wegebaupraktikern (HERWIG, KREUZKAM, PIEST, 1999). Diese beschreiben besonders hohen Verschleiß auf Wegdecken aus Kalken, Schiefern und Sandsteinen und beurteilen solche Materialien aus bautechnischer Sicht sehr kritisch. Auch in dem von PIEST entwickelten und in die RLW 1999 eingebrachten Verfahren des Wegeneubaus im Zuge von Bodenumlagerung (MEIßNER, 1999) wird daher das *„besonders zügige Versehen von schneller verwitterndem Gestein (z.B. Buntsandstein) mit einer Deckschicht“* vorgesehen.

Als wichtiges Teilergebnis ist die Tatsache, daß im LA-Versuch kein Unterschied zwischen klassifiziertem, güteüberwachtem Material und preiswerteren, nicht klassifizierten Gesteinskörnungen, bzw. Vorabsiebungen gefunden wurde. Dies bestätigt das Verhalten einiger großer Forstverwaltungen, die den Wegebau und die Erhaltung funktionalisiert haben und den Ankauf der Gesteinskörnungen von sachkundigen Praktikern durchführen lassen. Dennoch sollte in Zweifelsfällen eine Überprüfung der Schlagabriebbeständigkeit erfolgen, wie im Folgenden dargelegt wird.

Der Vergleich der am Waldwegematerial ermittelten LA-Werte mit den Untersuchungen der BAST (BALLMANN, 1996) und mit den vielen, von TABBERT (1996) zusammengestellten Schlagzertrümmerungswerten, umgerechnet nach der von BALLMANN gefundenen Korrelation, zeigt, daß trotz leicht unterschiedlichem LA-Versuchsverlauf, die gefundenen Ergebnisse sehr gut zu den Ergebnissen dieser Autoren passen (s. Kap. 1.5.6). Diese Ergebnisse stammen allerdings aus einem großen, statistisch gesicherten Versuchskollektiv.

In diesem Zusammenhang ist es bedeutsam, daß der Los Angeles-Versuch (nach EN 1097-2:1988, Abs. 5), als Referenztest zur Ermittlung des Widerstandes gegen Zertrümmerung, Aufnahme in den Katalog der europäischen Normen für Gesteine und Gesteinskörnungen und insbesondere in die wichtige prEN 13242 gefunden hat. Der ältere, in Deutschland verbreitete Schlagzertrümmerungsversuch (nach EN 1097-2:1988, Abs. 6) wird zukünftig („nur“) die Rolle einer alternativen Testmethode übernehmen. Im Hinblick auf den endgültigen Normstatus sind, nach Aussa-

gen von RITTER (2000), keine gravierenden Änderungen, die diese Test-Methoden betreffen könnten, zu erwarten.

Die in der Zielsetzung gestellte Frage, ob auf der Grundlage der Kategorien, die für diverse Materialeigenschaften in den neuen Europäischen Normen gebildet wurden, Empfehlungen für die Eignung bei Waldwege-Deckschichtmaterial ausgesprochen werden können, läßt sich für die Schlag- und Schlagabriebresistenz somit beantworten. In der prEN 13242 werden für Grenzwerte aus beiden Versuchen die in Tabelle 1-7 dargestellten Kategorien gebildet. Aus der Betrachtung der eigenen Ergebnisse und der oben aufgeführten Ergebnisse der Straßenbauforschung läßt sich für Deckschichtmaterial auf ungebundenen Wegen die folgende, in der Tabelle farblich (Ampelfarben) dargestellte Empfehlung geben:

Tabelle 1-7: LA- und SZ- Kategorien der prEN 13242 mit Einschätzung der Eignung für ungebundene Wegedeckschichten

Los Angeles-Test		Schlagzertrümmerungstest	
Los Angeles Ko- effizient	Kategorie LA	Schlagzertrümmer- ungswert	Kategorie SZ
≤ 20	LA ₂₀	≤ 18	SZ ₁₈
≤ 25	LA ₂₅	≤ 22	SZ ₂₂
≤ 30	LA ₃₀	≤ 26	SZ ₂₆
≤ 40	LA ₄₀	≤ 32	SZ ₃₂
≤ 50	LA ₅₀	≤ 35	SZ ₃₅
≤ 60	LA ₆₀	keine Anforderung	SZ _{NR}
keine Anforderung	LA _{NR}		

- Den besonderen Anforderungen an die Verschleißresistenz auf der Wegedecke werden Gesteinskörnungen der Kategorie LA₂₀ (entsprechend SZ₁₈) gerecht. Sie können als „vorzüglich“ im Sinne SCHEMERLS (1807) „jederzeit“ für den untersuchten Zweck verwendet werden. Diese Einschätzung deckt sich mit den empirischen Beobachtungen aus der Praxis der Waldwegeerhaltung. Die bewährten „härteren“ Gesteine des eigenen LA-Versuches liegen in dieser Kategorie.
- Die Verwendung von Gesteinskörnungen der Kategorie LA₂₅ und LA₃₀ (entsprechend SZ₂₂ und SZ₂₆) als Deckschichtmaterial sollte einer Einzelfallentscheidung vorbehalten sein. Das wesentliche technische Kriterium ist hier die zu erwartende Verkehrsbelastung des Weges (PIEST, 1996).

- Gesteinskörnungen der Kategorie LA₄₀ und hoher (entsprechend SZ₃₂ und höher) sind nicht für die untersuchte Verwendung geeignet. An güteüberwachten, harten Gesteinen wurden auch von BALLMANN (1996) und TABBERT (1996) keine derart hohen Schlag- bzw. Schlagabriebkoeffizienten gefunden.

Sofern keine Auskünfte aus den Fremd- und Eigenüberwachungszeugnissen der Steinbruchbetriebe zur Verschleißresistenz vorliegen, scheint im Einzelfall eine Prüfung des Materials über den Los-Angeles Versuch oder die ersatzweise Ermittlung des Schlagzertrümmerungswertes sinnvoll zu sein. Dies gilt insbesondere für Materialien mit einer erwarteten Kategorie LA₃₀ bzw. entsprechend SZ₂₆ und darüber. Solche Test sollten auch routinemäßig vor der Abnahme großer Chargen an Gesteinskörnungen ohne Güteüberwachung oder Vorabsiebungen erfolgen.

Mit der Aufnahme des LA-Versuchs als europäisches Referenzverfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegen Zertrümmerung ist in naher Zukunft mit einer weiteren Verbreitung von LA-Prüftrommeln in den Prüflaboratorien des klassifizierten Straßenbaues und somit auch mit einer besseren Verfügbarkeit dieser Versuchsaparatur innerhalb Deutschlands zu rechnen.

Neben dem mechanischen Verschleiß ist auch die Belastung der Gesteine durch Frost-Tau-Wechsel auf der Oberfläche von Waldwegen bedeutsam. Die Reihung der Ergebnisse entspricht in der Tendenz der Reihe der zuvor ermittelten LA-Werten. Es waren allerdings nur sehr geringe FTW-Absplitterungen (zwischen 0,1 und 0,7 Gew.-% der Masse) bei dem im LA-Versuch vorbelasteten Material zu verzeichnen. Instabile und poröse Bereiche der Mineralien, die einem Frostangriff unterliegen, waren offensichtlich durch die vorangegangene Schlagabriebbelastung bereits abgeschlagen, bzw. abgerieben. Dies deutet darauf hin, daß der extrem materialbelastende LA-Versuch für den hier untersuchten Verwendungszweck sehr umfassende Aussagen liefert. Daher scheint die Anwendung des FTW-Versuches, zusätzlich zum LA-Versuch, nicht in allen Fällen an Gesteinen für ungebundenen Deckschichten erforderlich zu sein. Der FTW-Versuch sollte vorrangig an Gesteinen mit kapillaren Hohlräumen (Tuffe, einige Laven, Sedimentgesteine und auch RC-Baustoffe), bei denen gefrierendes Wasser im besonderen Maß zur Zerstörung der Kornstruktur führen kann, durchgeführt werden, sofern sie in ungebundene Deckschichten starker Verwitterung ausgesetzt werden sollen.

2. Ökologischer Teil

2.1. *Stand des Wissens*

In den letzten Jahren ist das ökologische Umfeld von Waldwegen stärker in das Interesse von Wege- und Straßenbauern, Vegetationskundlern und Naturschützern getreten. Hatte man sich seit den siebziger Jahren hauptsächlich um das Naturschutzpotential der Begleitflächen von öffentlichen Straßen gekümmert, so sind es heute auch oft Wald- und Feldwege, die mit in das Naturschutzdenken einbezogen werden.

Grünflächen an Straßen sind keine für die Natur wertvollen Gebiete und können zerstörte Biotop nicht ersetzen. Sie besitzen aber einen hohen Vernetzungseffekt und zeichnen sich durch eine große Standort- und Strukturvielfalt aus (STOTTELE, 1995). Außerdem nehmen Straßenbegleitflächen an öffentlichen und nichtöffentlichen Straßen 3,2 % der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland ein, das ist ca. das dreifache der ausgewiesenen Naturschutzgebiete (SCHMIDT, 1991).

Bei einer Wegedichte von rd. 40 m/ha⁹ und einer Wegebreite von 3m bestehen etwa 1,2% der Waldfläche aus Wegen. Wird eine auf jeder Seite 5 m breite Beeinflussung des Waldes durch veränderte autökologische Bedingungen unterstellt, so beträgt das von Wegen beeinflusste Gebiet 5,2% der Waldfläche. Das sind bundesweit über 500.000 ha Waldfläche.

2.1.1. *Wege- und Straßenbegleitflächen in der Literatur*

Die Zahl vegetationskundlicher Arbeiten über Straßenbegleitflächen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Früher wurde die Straßenrandvegetation eher zufällig aufgenommen. Heute werden dagegen gezielt bestimmte Streckennetze und Landschaftsräume bearbeitet. In den meisten Fällen erfolgten die Untersuchungen in enger Zusammenarbeit mit den zuständigen Verkehrsministerien und Straßenbauverwaltungen. Ziel war daher nicht nur, Flora und Vegetation zu bestimmen, sondern auch deren aktuellen Wert für Naturschutz und Landschaftspflege, sowie Vorschläge

⁹ Die Bundeswaldinventur im Jahr 1990 beziffert die durchschnittliche Wegedichte des deutschen Waldes mit rd. 54 m/ha. Hinsichtlich der Erfassung von Wegen wird das Inventurverfahren allerdings kritisch beurteilt (BECKER et al. 1996).

für Anlage und Unterhaltung zu machen. Dieses Ziel verfolgten die Arbeiten von NAGLER et al. (1989), MEDERAKE (1991) und STOTTELE (1995).

NAGLER et al. (1989) weisen darauf hin, daß die Straßenrandvegetation stark anthropogen geprägt ist und sich z.T. noch in einer sehr dynamischen Entwicklung befindet. Dabei stellen Bankette den extremsten und naturfernsten Standort dar, vor allem durch den starken Wechsel in der Wasserversorgung, sowie den erhöhten Schadstoff- und Nährstoffeintrag und die mechanische Belastung durch den Fahrzeugverkehr. Trotzdem, oder gerade deswegen ist die Straßenrandvegetation sehr artenreich. Eine unmittelbare Beeinflussung der angrenzenden Nutzung ist dabei nur bei zweispurigen Straßen deutlich nachweisbar, deren Randflächen artenreicher sind als die zwar weitläufigeren, aber einheitlicher gestalteten Autobahnränder.

Straßen und Wege folgen damit einer allgemeinen Gesetzmäßigkeit, nach der Störungen eines Systems die Biodiversität zunächst deutlich erhöhen. Nach Überschreitung eines Schwellenwertes sinkt die Biodiversität wieder ab (BEESE, 2000).

Zu ähnlichen Erkenntnissen kommt auch STOTTELE (1995). Er führte umfangreiche vegetationskundliche Untersuchungen in 14 Gebieten in ganz Westdeutschland durch. Im Vergleich mit Feldwegen, Ackerrainen, Uferstaudenfluren und Waldsäumen zählen für ihn Straßenränder zu den artenreichsten linearen Landschaftselementen. Ursachen dafür sind neben den starken Randeffekten vor allem die Inhomogenität der Standorte und das hohe Maß an Störungen, die zu einer anhaltenden Entwicklungsdynamik in den Lebensgemeinschaften führen.

BERG U. MAHN (1990) wiederholten nach 30 Jahren Vegetationsaufnahmen an Straßenrändern im Raum Halle/Saale und belegten die in der Zwischenzeit stattgefundenen anthropogenen Veränderungen mit konkreten Beispielen. Sie stellten eine Abnahme der Diversität durch Zunahme euryöker Ubiquisten (Pflanzen ohne besondere Standortansprüche) und eine Erhöhung des Hemerobiegrades (Grad der menschlichen Beeinflussung von Lebensgemeinschaften) fest. Als Ursachen dafür erklärten sie hauptsächlich die intensivere Nutzung der angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen.

Über nichtöffentliche Straßen (Feld- und Waldwege) ist die Anzahl vegetationskundlicher Arbeiten viel geringer. Die Arbeiten von RUTHSATZ U. OTTE (1987) und LANGE U. SCHMIDT (1989) über Feldwege und von SCHALL (1987) und GLOWIENKA (1994) über Waldwege sind hierbei zu nennen.

RUTHSATZ U. OTTE (1987) machten pflanzensoziologische Inventuren an Feldwegränder und Ackerrainen bei Ingolstadt. Sie ermittelten einen Artenrückgang seit

den letzten 140 Jahren und bestimmten die Vegetation als ruderalen Wiesen. Je magerer und trockener diese ruderalen Wiesen, Halbtrocken- und Magerrasen, und je geringer der Nährstoff- und Schadstoffeintrag, desto eher dienen diese Kleinstandorte als Refugien für selten gewordene Pflanzen. LANGE U. SCHMIDT (1989) untersuchten die Vegetation und Phänologie von Feldwegen bei Göttingen.

Waldwege und ihre Begleitflächen wurden erstmalig vordergründig behandelt von SCHALL (1987). Er erarbeitet die Korrelation der Vegetation der Waldwege zu den Waldgesellschaften im Schwarzwald und macht Vorschläge zur Anlage und Pflege von Waldwegen. Zusammenfassend stellt er fest, daß bei großräumiger Betrachtung eine enge Korrelation zwischen den Binnensaumgesellschaften der Waldwege und den angrenzenden Waldgesellschaften besteht. Bei kleinräumiger Betrachtungsweise nimmt die Korrelation jedoch stark ab. Nach seinen Vorschlägen zur Anlage und Pflege sollte das Wegenetz nur im unbedingt notwendigen Maße ausgebaut oder sogar reduziert werden. An den Wegrändern sollte der natürlichen Entwicklung von vielfältigen Vegetationsstrukturen viel Raum belassen werden. Pflegemaßnahmen sollten sich im Wesentlichen auf den eigentlichen, regelmäßig befahrenen Wegbereich beschränken.

Auch GLOWIENKA (1994) setzt sich mit diesem Thema im Harz auseinander. Neben der Zuordnung der vorgefundenen Vegetation in Pflanzengesellschaften stellt er eine enge Bindung synanthroper Arten (Pflanzen, die durch den Menschen in ein Gebiet gelangt sind) an Bankett und Seitenstreifen fest. Er beschreibt die deutliche Abhängigkeit bestimmter Arten von der Höhenlage und der Lichteinwirkung. Eine Bindung an bestimmte Wegedeckschichtmaterialien kann er nicht feststellen, da die verschiedenen Materialien nicht gleichmäßig im Untersuchungsgebiet verteilt sind. Zu den wenigen positiven Eigenschaften eines Waldweges aus Naturschutzsicht zählt für ihn die Biotopvernetzung. Um diese Eigenschaften zu stärken, die Diversität zu erhöhen und den Barriere- und Zerschneidungseffekt zu begrenzen, macht GLOWIENKA abschließend Vorschläge zur Anlage und Pflege von Waldwegen im Harz.

2.1.2. Ökologische Bedeutung der Waldwege

Der Arbeitskreis „Waldbau und Naturschutz“ der Höheren Forstbehörde Westfalen-Lippe und die Landesgemeinschaft Naturschutz und Umwelt NRW (LNU) haben im Jahre 1988 zu wichtigen Fragen des Komplexes Ökologie/Walderschließung Stellung

genommen. Nachfolgend sind die wichtigsten Aspekte zur Auswirkung der Waldwege auf das Ökosystem Wald aufgeführt. Waldwege beeinflussen und belasten das Ökosystem Wald besonders im Hinblick auf folgende Faktoren:

- Gefährdung schutzwürdiger Biotop: Standorte seltener und gefährdeter Pflanzen und andere kleinflächige Biotop (z.B. Quellbereiche) können durch Anschnitt, Zerschneidung, Überbauung ihre Lebensraumfunktion zum Teil oder auch vollständig verlieren.
- Entwässerung von Feucht- und Naßbiotop: Wegebau, der Feucht- und Naßbiotop berührt, verändert den Wasserhaushalt, indem durch wegparallele seitliche Entwässerungsgräben und quer angeschlossene Zusatzgräben randliche, je nach Ausbau und Lage auch weitergehende Entwässerungen verursacht werden können.
- Zerschneidung von Populationen: Etliche bodengebundene Tierarten meiden die Überquerung von breiten, befestigten Fahrwegen. Je breiter und intensiver befestigt die Trassen sind, um so seltener werden sie von Arten überquert, die in ihren bodenklimatischen (KREBS, BÖLLINGER, 1981) und strukturökologischen Ansprüchen ausgesprochen stenök reagieren. Dadurch kann es zur Isolation von Teilpopulationen und zur Unterschreitung überlebensnotwendiger Minimalareale kommen. Weiterhin beeinflussen zeitliches Muster und Frequenz der Verkehrsbeanspruchung den trennenden Effekt des Weges für Tierpopulationen (MADER, 1990).
- Schneiseneffekt: Im Wald baut sich ein bestandestypisches Innenklima auf; es ist charakteristischer Bestandteil des Waldökosystems. Zumindest breite Wegetrassen reißen geschlossene Bestände auf und verändern das Bestandesinnenklima (Wind, Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit). Auf Veränderungen des Kleinklimas reagiert neben der Bodenvegetation vor allem ein großer Teil der wirbellosen Fauna sehr empfindlich.
- Störungseffekt: Manche Wege leiten Waldbesucher und die von ihnen ausgehenden Störungen in Bereiche, in denen zur Erhaltung störungsempfindlicher Waldtierarten Ruhe herrschen sollte (z.B.: Greifvögel, Raufußhühner, Schwarzstorch, Rotwild).
- Bodenverdichtung: Durch Wegebau kommt es zu Bodenverdichtungen. Für Pflanzenwurzeln, die im Boden lebenden Tierarten und den Bodenwasserfluß entstehen dadurch Barrieren.

- Bodenveränderung: Wegebaumaterialien aus Bauschutt, Recyclingmaterial aus dem Straßenbau oder Sekundärrohstoffe und ortsfremde Gesteine verändern die standortstypischen Bodeneigenschaften in Wegnähe und damit auch Vegetation und Tierwelt.

Viele der hier genannten Aspekte sind Gegenstand von Untersuchungen und Aufsätzen zum Thema Waldwegbau und Naturschutz. Sie werden auch von BEHRNDT betont, der im Bezug auf die Materialverwendung bereits im Jahr 1990 den „Einsatz nicht zwingend erforderlicher Fremdmaterialien“ als „konfliktträchtig“ beschreibt.

Wegebau und die damit verbundene Öffnung der Bestände können auch positive Auswirkungen haben:

- Erhöhung der Vielfalt: Bei breiteren Trassen, die hin und wieder im hängigen Gelände vorkommen, können sich Waldinnenränder bilden. Durch die höhere Lichtzufuhr entwickeln sich vor allem in jüngeren Beständen an den Wegerändern häufig artenreiche Randstreifen (Saumbiotop). Manchen lichtliebenden Tier- und Pflanzenarten des Waldes dienen sie als Rückzugsgebiete und als Leitlinien für eine Wiederausbreitung. Eine üppigere wegbegleitende Flora bietet zusätzliche Äsungsmöglichkeiten für das Wild.
- Schaffung von Sonderbiotopen: Fahrspuren führen bei bestimmten Bodenarten dazu, daß in ihnen Wasser steht. Dadurch ergeben sich Laichmöglichkeiten für Amphibien. Trockene vegetationsarme Sandwege sind Lebensstätten mancher wärme- und trockenheitsliebender Tier- und Pflanzenarten, deren ehemalige Lebensräume kaum noch vorhanden sind (z.B. Binnendünen). Böschungen und Materialentnahmestellen können bei einem Verzicht auf Rekultivierungsmaßnahmen als Pionierstandorte mit Sonderbiotopcharakter zur Artenvielfalt deutlich beitragen und liefern als Bodendenkmale geologisch-bodenkundliche Informationen.
- Bodenschonung: Eine unzureichende Erschließung wird insbesondere im kleineren Privatwald dazu führen, daß die Waldbewirtschaftung dennoch durchgeführt wird und zwar mit unregelmäßigem, flächigen Befahren der Waldböden und allen verbundenen, z.T. irreversiblen Schäden wie Verdichtung, Verlust der Porenkontinuität, Kontaminierung, usw. (BECKER, et al., 1989 und 1995).
- Lenkung von Waldbesuchern: Waldwege können Besucherströme lenken bzw. kanalisieren und damit Ruhezeiten in wegfernen Bereichen sichern helfen
- Erhöhung des Erholungswertes: Wegbegleitende Baum- und Straucharten erhöhen in gleichförmigen Wäldern in ihren unterschiedlichen Blüh-, Frucht- und Verfärbungsphasen den Erlebniswert für Waldbesucher. Die im Bereich der Bö-

schungen freigelegten Bodenanschnitte und das Grundgestein sind nicht nur geologisch interessant sondern bereichern ebenfalls den Erlebniswert.

2.1.3. Der Begriff „Bodenveränderung“

Die vom verwendeten Material ausgehenden Einflüsse auf den angrenzenden Waldstandort sind ein besonderer Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Diese Beeinflussung wird von einigen Autoren mit dem sprachlich überwiegend negativ belegten Begriff „Bodenveränderung“ bezeichnet (ARBEITSKREIS „WALDBAU UND NATURSCHUTZ“, 1988). Die Bodenverdichtung (BECKER, 1989) und seine Folgen, sowie Schadstoffeinträge in den Boden (SEELING, 1990) werden nicht betrachtet.

Als „Bodenveränderung“ soll hier im Folgenden der Einfluß von Wegebaumaterialien aus ortsfremden Gesteinen auf die standorttypischen Bodeneigenschaften und somit auf die Tier- und Pflanzenwelt in Wegnähe bezeichnet werden. Bodenverändernde Stoffe aus dem Wegekörper können einerseits durch die Luft, durch Verstaubung der Wegematerialien (=äolische Immission) - und andererseits durch Wasser, durch Auswaschung der Wegematerialien bei Niederschlag (=aquatische oder limnische Immission) - das Umfeld des Weges beeinflussen. Der Begriff „Bodenveränderung“ sollte zunächst weitgehend wertneutral verwendet werden, da unterschiedliche Standpunkte für eine Bewertung bekannt sind. So werden häufig positive Aspekte, nämlich die „düngende Wirkung“ auf die Vegetation in der Umgebung der Wege in den Vordergrund gestellt. Negativ wird häufig die, mit der Bodenveränderung einhergehende Veränderung der Flora bewertet, sofern das Leitbild dieser Bewertung die möglichst unbeeinflusste Entwicklung des natürlichen Artenspektrums des Waldstandortes ist (BECKER et al., 1995).

Auch in Waldgebieten mit vollständig vorhandenem Wegesystem ist im Zuge der Wegeerhaltung, insbesondere der periodisch notwendigen und anfallenden Instandsetzung, bzw. Erneuerung der Wegedeckschichten unter Einbringung von feinkörnigen Gesteinskörnungen unverzichtbar *„wenngleich als Folge der meist kalkhaltigen Gesteine eine gewisse pH-Wertveränderung im unmittelbaren Einflußbereich des Wegekörpers nicht immer auszuschließen ist“* (BEHRNDT, 1990). Daher wird die mit der Materialwahl verbundene Problematik auch zukünftig von besonderer Bedeutung sein, obwohl der Neubau, anders als die Erhaltung von Wegen, in der überwiegenden Zahl der bundesdeutschen Waldgebiete keine große Rolle mehr spielt.

2.1.4. Die quantitative Bedeutung des Materialverschleißes

Mit dem Verschleiß von Deckschicht- und Tragdeckschichtmaterial entsteht erodierbares mineralisches Feinmaterial. Für den Wegebauer geht damit die Notwendigkeit einher, durch eine Instandsetzungsmaßnahme, d.h. Aufbringung einer neuen Deckschicht, diesen Material- und Substanzverlust am Wegekörper auszugleichen. Die quantitative Bedeutung dieses Materialverschleißes kann man vereinfacht mit der folgenden Kalkulation abschätzen:

Es wird unterstellt, daß auf rd. 50% der Wegstrecke (3m breite Wege mit höherer Bedeutung für die Erschließung, die mit Deckschichten ausgestattet sind) im Wald des Berglandes pfleg- und erneuerbare Deckschichten vorhanden sind (HERWIG, 1999, mdl. Mttlg.). Der Wald im Bergland ist seinerseits mit rd. 40 m Waldwegen pro ha erschlossen. In einem 20 bis 30 im Mittel 25jährigen Erneuerungsturnus wird eine 5 bis 6 cm starke Deckschicht aus korngestuftem, verdichtetem mineralischen Baustoff mit einer Dichte von $2,1 \text{ t/m}^3$ (DIETZ, 1984) aufgebracht. Hieraus errechnet sich ein Materialverschleiß von rd. 340 kg/m in einem Instandsetzungsintervall (25 Jahre). Bezogen auf die Waldfläche entspricht dies einem **Materialeintrag von rd. $270 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$** . Das Material verbleibt in überwiegend feinkörniger, somit chemisch reaktiver Form im Umfeld der Wege. Ein Teil wird mit dem Wasserabfluß ausgetragen.

Diese theoretische Kalkulation wird gestützt durch Angaben aus der forstlichen Praxis. Die Niedersächsische Landesforstverwaltung hat in den Jahren 1987 bis 1996 über die beiden Stützpunktförstämter Riefensbeek und Seelzerthurm rd. 650.000 t an mineralischen Baustoffen, davon $2/3$ Kalke, angekauft (Auszüge aus der Kostenträgerrechnung der Nds. Landesforstverwaltung, vgl. Kap. 3.3.1). Unterstellt man, daß rd. 50.000 t für den in seinem Umfang unbedeutenden Neubau von Waldwegen verwendet wurden, so verbleibt eine jährlich verbaute Materialmenge von 600.000 t für die Erhaltung von Deckschichten und Tragdeckschichten. Südlich der Linie Elm – Mittellandkanal – Palsterkamp findet sich im Bergland eine Holzbohlenfläche von rd. 170.000 ha Staatswald des Landes Niedersachsen in dem diese Materialmenge, das sind rd. $350 \text{ kg ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ verbaut wurde. Unterstellt man weiterhin, daß die Wegeerhaltung eine Daueraufgabe ist, und diese Materialmenge dem Verschleiß entspricht, so stützt dies die oben gemachte Kalkulation.

In amerikanischen Untersuchungen (FOLTZ & TRUEBE, 1995) wurde eine Materialerosion, bezogen auf die Fläche der Wege, von ca. $30 \text{ t} \times \text{a}^{-1} \times \text{ha}^{-1}$ (Wegefläche!) beobachtet (vgl. Kap. 1.3.3). Bei einer dort vorhandenen durchschnittlichen Wegebreite von 4,3 m sind das etwa $13 \text{ kg} \times \text{a}^{-1} \times \text{m}^{-1}$ (Wegelänge). Unterstellt man ebenfalls ein 25-jähriges Erneuerungsintervall, so sind dies rd. 325 kg/m.

Dieser Material-Input-Strom ist neben der kompensatorischen Waldkalkung¹⁰ sicher einer der bedeutsamsten Materialströme in das Waldökosystem.

2.1.5. Untersuchungen zur Staubausbreitung im Umfeld von Straßen und Wegen

Studien zum Transport von Bodenpartikeln durch den Wind wurden bereits im vorherigen Jahrhundert von UDDEN (1894), später von SAMUELSSON (1926) durchgeführt. Den Zusammenhang von Staubemissionen und der Anreicherung von pflanzenverfügbaren Nährionen im Umfeld von Straßen und Wegen wurde in einer originellen Arbeit von den Schweden TAMM und TROEDSSON im Jahr 1952 bei Stockholm untersucht: Entlang einer Straße mit ungebundenem Schotter als Deckschicht untersuchten die Wissenschaftler die von der Straße erodierten und auf und in der umgebenden Schneedecke abgelagerten mineralischen Immissionen. Die Materialmengen wurden erfaßt, indem der Schnee mit großen, definierten Zylindern ausgestochen wurde. Nach Abschmelzen des Schnees wurde anschließend im Labor das Wasser-Mineralgemisch analysiert. Die Straße ist im Bereich der Meßstellen von Ackerflächen umgeben, die ihrerseits von Wald umgrenzt werden. Anhand der sorgfältig protokollierten meteorologischen Bedingungen (4 Meßstationen in der Umgebung) kann als gesichert angenommen werden, daß die Immissionen innerhalb von zwei Monaten, vor allem aber in der Periode vom 1. bis zum 21. März 1955 abgelagert wurden. Der Eintrag von mineralischem Material erfolgte ganz überwiegend in einem Umfeld von bis zu 60 m beidseitig der Straße. Ein Lufttransport von feinstem Material konnte allerdings bis zu 150 m nachgewiesen werden.

Die folgende Abbildung zeigt die prozentual aufgegliederte Verteilung der Materialeinträge beiderseits der Straße. Die relativ gute Übereinstimmung der in überwiegend westliche und östliche Richtung verlaufenden Emissionen ist zufällig und mit den vorherrschenden Witterungsbedingungen zu erklären.

¹⁰ Kompensationskalkungen werden vor allem zum Puffern anthropogener Säureeinträge in einem etwa zehnjährigen Turnus üblicherweise mit 3 t/ha kohlensaurem Kalk durchgeführt.

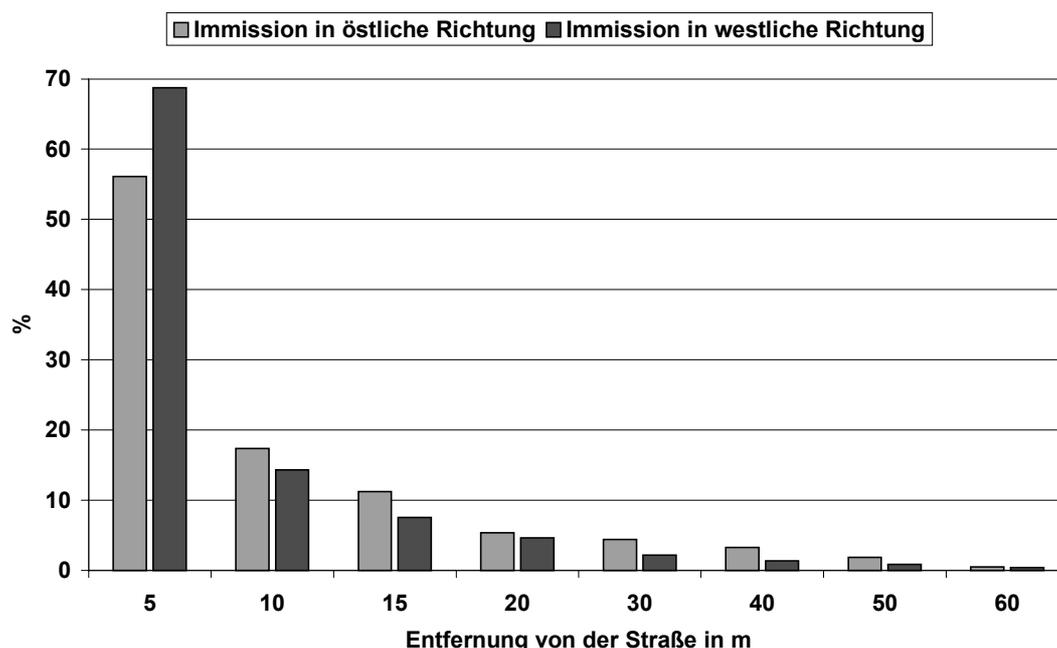


Abbildung 2-1: Prozentuale Verteilung der von Tamm (1955) erfaßten Immissionsmengen zur Entfernung von der Straße

Eine Fraktionierung der in und auf der Schneedecke gefundenen Materialien zeigte die in der folgenden Tabelle dargestellten Transportentfernungen. Die Windgeschwindigkeiten betragen im Untersuchungszeitraum an wenigen Tagen 7 bis 8 Beaufort, das sind ca. 14 – 20 m/s (steifer bis stürmischer Wind):

Tabelle 2-1: Transportentfernung des Materials (nach Werten von Tamm, 1995)

Fraktion	Größe (mm)	Transportentfernung (m)	
		> 90 % abgelagert bis	max.
Feinkies	2 – 6	5	10
Grobsand	0,6 – 2	10	10
Mittelsand	0,2 – 0,6	10	20
Feinsand	0,06 – 0,2	20	50
Sehr feiner Sand	0,02 – 0,06	40	150
Grobschluff	0,006 – 0,02	---	> 150
Feinschluff	0,002 – 0,006		
Ton (Feinstes)	< 0,002		

Der auffällig weite Transport, auch der größeren Partikel, wird nach Ansicht der Verfasser durch die initiale Beschleunigung erklärt, die das Material beim Aufwirbeln durch Motorfahrzeuge erfährt.

Die von TAMM und TROEDSSON analytisch bestimmten Elementgehalte der mineralischen Materialimmission lassen für die vorliegende Arbeit nur begrenzt analoge Schlüsse zu. Zum einen ist das Material der Straßendeckschicht nicht bekannt, wohl aber wird erwähnt, daß zur Verminderung von Staubbildung auf ungebundenen

Straßen und Wegen damals in Schweden Calciumchlorid und –sulfid verwendet wurde. Weiterhin läßt die Analyse des verunreinigten Schnees, die methodisch sehr originell ist aber nur einen kurzen Zeitraum repräsentiert, keine Schlüsse auf die Jahresrate der Gesamtmission zu. Die Autoren folgern, daß für das Pflanzenwachstum bedeutsame Mengen an Calcium (mehrere $\text{kg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{a}^{-1}$) und Phosphor von ungebundenen Wegen vom Wind bis zu 20m verlagert wird. Die „Düngung“ wird in Zusammenhang gebracht mit beobachteten Vegetationsveränderungen, vor allem in Sümpfen entlang von Wegen. Von den Autoren wurde dieser Düngungseffekt (im Jahr 1955!) allerdings überwiegend positiv interpretiert.

2.2. Vegetationskundliche Untersuchungen der Bodenveränderung

Aus der Tschechoslowakei, von böhmischen Botanikern, stammen weitere Hinweise und Untersuchungen zum Wegematerial als Auslöser von Boden- und Standortveränderungen entlang von Waldwegen. Diese führen zum Einwandern (sog. viatische Migration) bestimmter Pflanzenarten und leisten letztlich einen bedeutsamen Beitrag zur „Synanthropisierung“ der Flora und Vegetation. [VANĚČEK (1972) zitiert bei KOPECKÝ (1988) und KOPECKÝ (1978)]. Die Autoren beschreiben die sekundäre Ausbreitung relativ kalkliebender Krautarten entlang von Waldstraßen im Böhmerwald die mit kristallinem Kalkstein befestigt wurden. Arten relativ eutropher Standorte wanderten in ein Gebiet mit armen Böden über Granitverwitterung, während Migrationen in umgekehrter Richtung nur ausnahmsweise beobachtet wurden. Beide Autoren beschreiben überraschend hohe Nährstoffgehalte entlang der Wege, besonders was den CaO -, P_2O_5 - und K_2O - Gehalt anbelangt.

Obwohl die Bodenveränderungen entlang von Waldwegen, manifestiert durch geänderte Artenzusammensetzung in der Flora, allen interessierten Forstpraktikern und Botanikern bekannt sind, wurden sie von den Vegetationskundlern nur nachgeordnet behandelt. So vermuten ELLENBERG et al. 1991, daß das Vorkommen insbesondere von "Kalkzeigern" an Wegrändern (Arten wie z.B. *Mercurialis perennis* [Wald-Bingelkraut] und *Lamiastrum galeobdolon* [Goldnessel]) dem aufgebrachten Schotter zu verdanken ist. „Auf den armen Substraten der Umgebung sind diese Arten im weiteren Umkreis in den Wäldern nicht zu finden, obwohl es sich um Waldarten handelt, die nicht etwa nur aufgrund des höheren Lichtangebotes am Wege wachsen“.

2.3. Vegetationsuntersuchung an Waldwegen im Harz

Die Vegetation an Waldwegen im Harz im Hinblick auf Bodenveränderungen durch Wegebaumaterial wurde von GLOWIENKA (1994) beschrieben. Der Autor untersucht den Zusammenhang zwischen der veränderten Flora und dem Anstieg der verfügbaren basischen Nährionen die über den gestiegenen pH-Wert im Oberboden nachgewiesen werden kann.

An Waldwegen, die mit Kalk oder Diabas geschottert sind, fand GLOWIENKA eine dreistufige "pH-Schneise". Im direkten Schotterbereich liegen die pH-Werte etwa bei pH 8 (in Wasser). An den, im sehr hohen pH-Werten (> 7) versehenen Seitenstreifen schließt ein 2 m breiter Streifen, in dem der pH-Wert um 3-4 pH-Einheiten sinkt und der sehr inhomogen ist. Kleine Steine, die von Fahrzeugen weggeschleudert werden, und die Böschung hinabgerolltes Schottermaterial erzeugen starke Schwankungen auf kleinstem Raum.

GLOWIENKA kann anhand der pH-Wert-Erhöhung in der bergseitigen Abtragsböschung zeigen, daß carbonathaltiger Staub als dem Verursacher der pH-Wert Erhöhung eine bedeutsame Rolle zukommt. An einem Wegabschnitt bei einer Hangneigung von 46% (21°) ist der Staubeinfluß hangaufwärts noch 5 m und hangab noch 9 bis 10 m nachweisbar. Somit scheidet eine Auswaschung aus dem Schottermaterial als ausschließliche Begründung aus. Der von Glowienka als Vergleichsobjekt untersuchte naturfeste Weg (ohne Deckschicht) zeigt ebenfalls erhöhte pH-Werte zum umgebenden Oberboden des Waldbestandes. Diese Erscheinung wurde auch von WAGNER (1997) im Solling (vgl. folgendes Kap. 2.4) beobachtet. Als plausible Erklärung kann die Entfernung des versauerten Oberbodens und die Freilegung des weniger sauren Gesteinshorizonts durch den Wegebau dienen.

Tabelle 2-2: Die Auswirkungen der Deckmaterialien auf den pH-Wert der Umgebung (aus GLOWIENKA 1994)

Deckmaterial des Weges	pH-Wert im direkten Wegebereich	Reichweite von Schottermaterial hangauf/hangab	Reichweite des Staubeinflusses hangaufwärts ¹¹	Reichweite des Staubeinflusses hangabwärts ¹¹	pH-Wert des unbeeinflussten Waldbodens
Kalkschotter	7,8	2 m / 2 m	4 m	9 m	4,0
Diabasschotter	7,9	0 m / 5 m	4 m	9 m	3,7
Naturweg	5,7	-/-	1 m	5 m	4,1

¹¹ bezogen auf den jeweils entferntesten, noch signifikant von der Umgebung verschiedenen pH-Wert

Die folgende Abbildung zeigt im direkten Vergleich Grafiken von GLOWIENKA¹², die die vorgefundenen pH-Werte über dem Wegeprofil an einem mit Diabas bedeckten Weg und an einem naturfesten Weg beschreiben. Neben den Graphen auf dem Median der Einzelwerte ist auch die Streuung der pH-Werte dargestellt.

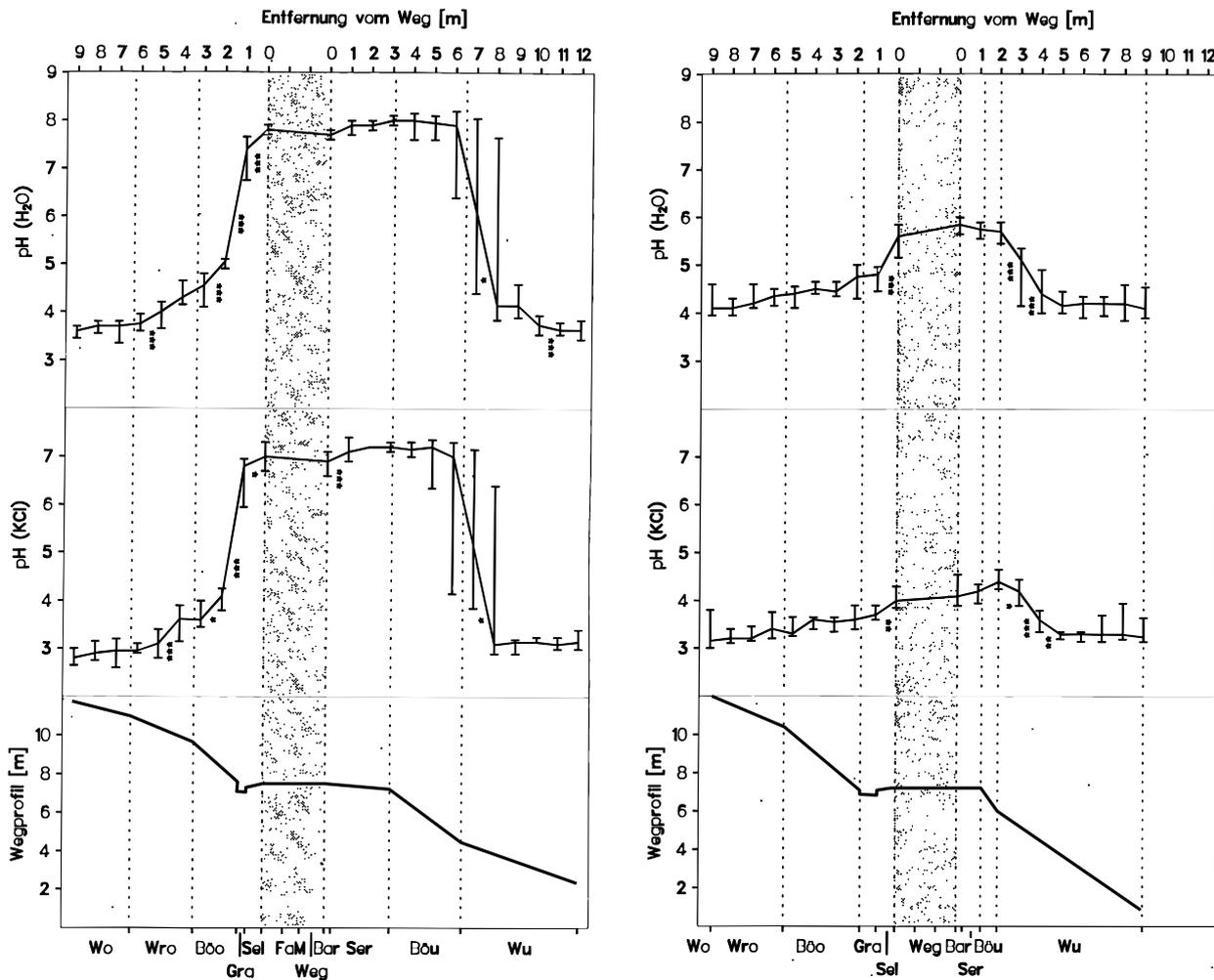


Abbildung 2-2: pH-Werte an einem Weg mit Diabas-Deckschicht und an einem naturfesten Weg nach GLOWIENKA (1994)

Als Ursache für den sichtbaren, aber nicht signifikanten Anstieg der pH-Werte im Seitenstreifen, der auch auf dem naturfesten Weg zu messen ist, vermutet GLOWIENKA die unterschiedliche Perkolation des oberflächlichen Wassers. Im bewachsenen, feinerdereicheren Seitenstreifen versickert ein wesentlich höherer Anteil des Niederschlagswassers als auf dem Weg selbst. Dies kann dazu führen, daß der

¹² mit freundlicher Genehmigung des Verfassers

karbonathaltige Staub, anders als im befahrenen Schotter, nicht abgespült wird, sondern sich anreichert.

Auf der Talseite des mit Diabas gedeckten Weges ist der „große pH-Sprung“ nach 2 Metern beendet. Die hohen Streuungen der Werte um bis zu 2,7 pH-Einheiten deuten auf eine höhere Heterogenität der Ablagerung basischen Materials im Oberboden hin, für die das Mikrorelief verantwortlich zu sein scheint.

Nach weiteren 3 bis 4 m, in denen der gemessene pH-Wert mehr oder minder konstant um ca. 0,5 pH-Einheiten über dem Durchschnitt der Umgebung liegt, erfolgt innerhalb eines Meters nochmals ein letzter pH-Abfall. Die statistische Analyse bestätigt diese Beobachtung. Während die ersten 3 m im Wald unterhalb des Weges keine signifikanten Unterschiede aufweisen, ist die Differenz der Ergebnisse von 9 m auf 10 m Entfernung vom Weg höchstsignifikant ($p \leq 0,01$).

Die Effekte dieser pH-Wert-Erhöhung werden von GLOWIENKA unter verschiedenen Gesichtspunkten bewertet: Zum einen stellen die erhöhten pH-Werte im Seitenstreifen die Grundlage zur Florenveränderung eines Gebietes dar (z.B. *Urtica dioica*, *Galium album*, div. *Arctium*-Arten). Auf der anderen Seite bieten sie solchen Pflanzen einen Rückzugsraum, die auf den stark versauerten Böden nur noch selten zu finden sind, aber natürlicher Weise vorkämen (z.B. *Dentaria bulbifera*, *Polygonatum verticillatum*, *Galium sylvaticum*, *Scrophularia nodosa*).

2.4. Vegetationsuntersuchung an Waldwegen im Solling

Mit der „Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Wegebaudeckschichtmaterialien auf die Vegetation im Umfeld der Wege im Solling“ befaßt sich 1997 WAGNER. Die für die Wegeerhaltung praxisrelevanten Ergebnisse dieser Untersuchung wurden von WAGNER und BARGE (1998) zusammengestellt.

In der Arbeit wurden verschiedenartige Waldwege in einer einheitlichen Landschaft, dem Solling untersucht. Der Einfluß der ortsfremden Deckschichtmaterialien Devonkalk, Dolomit, Asphalt und Diabas wurden mit dem ortsansässigen Buntsandstein als Wegebaumaterial in Form einer Pilotstudie verglichen. Der Solling wurde ausgewählt, da er eines der bodenkundlich einheitlichsten Gebiete Niedersachsens ist. Als angrenzende Waldbestände wurden Buchenbestände ausgewählt. Die fünf untersuchten Wege liegen in den Forstämtern Neuhaus, Winnefeld und Dassel in ebener bis schwach geneigter Lage. Die Decken der Wege bestehen seit mindestens 10 Jahren in der vorliegenden Ausbauweise. Die Asphaltstraße erwies sich als ungeeignetes Vergleichsobjekt, da der für die Konstruktion der Tragschicht verwendete Kalkschotter, der an der Bankette hervortritt, einen deutlichen Einfluß auf das Wegeumfeld hat.

An jeden Weg wurden vier bis fünf Transekte gelegt und diese in die Wegbereiche Bankett, Seitenstreifen, Graben, Böschung und Waldrand unterteilt:

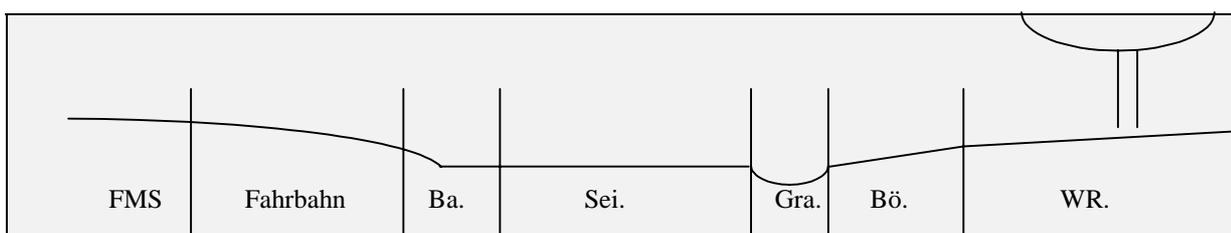


Abbildung 2-3: Einteilung des Wegerandbereiches in Bankette (Ba), Seitenstreifen (Sei), Graben (Gra) Böschung (Bö) und Waldrand (WR) (WAGNER 1997)

In den Waldbeständen wurden Referenzflächen in 5 und 15 Metern Entfernung vom Wegerand (W5, W15) untersucht. Die Transekte wurden parallel zum Weg gewählt, da sich dies für Vegetationsaufnahmen an Straßen bewährt hat und die Straßenrandvegetation eine typische Abfolge parallel zur Trasse darstellt (SCHMIDT, 1987). Die Vegetation an jedem Wegbereich wurde durch eine Vollaufnahme fest-

gehalten. Auch die Standortparameter pH-Wert und relativer Lichtgenuß wurden gemessen. Anhand der Vegetationsaufnahme wurden die mittleren Zeigerwerte für Licht, Feuchte, Reaktion¹³ und Stickstoffversorgung (ELLENBERG, 1992) errechnet.

Alle fünf Wege zeigen bezüglich der pH-Werte im Oberboden und Reaktionszahlen im Wegeumfeld deutliche Ergebnisse:

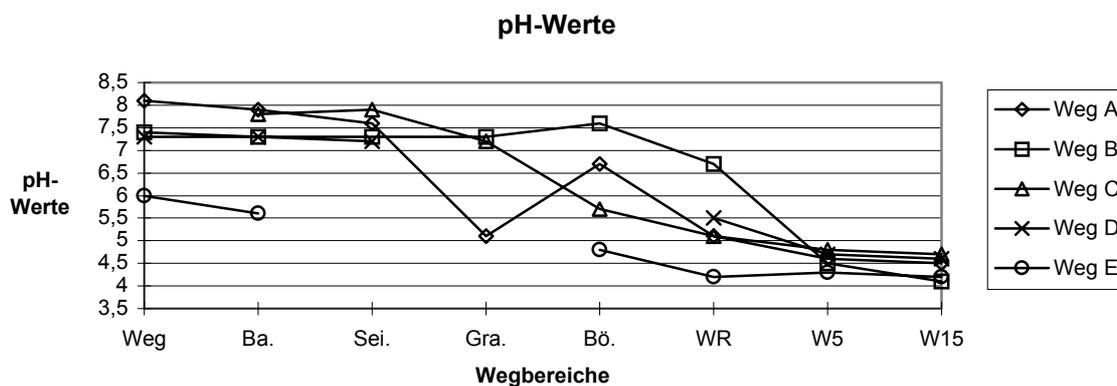


Abbildung 2-4: pH-Werte der Wege: A (Devonkalk-Deckschicht), B (Dolomit-DS), C (Asphaltfahrbahn), D (Diabas-DS) und E (naturfeste DS) W5 und W15 sind 5 bzw. 15 m vom Weg entfernte Transekte (WAGNER 1997)

In der konkreten Abgrenzung der Wegbereiche zeigen sich deutlich erhöhte pH-Werte bis zum umgebenden Waldrand. In der 15 Meter vom Weg entfernt liegenden Referenzflächen W15 sind nur noch geringfügig höhere pH-Werte festzustellen, als sie von der Bodenzustandserfassung (BZE, WOLFF) von 1997 im Solling in gekalkten Laubbaumbeständen mit einem durchschnittlichen pH-Wert von 4,23 ausgewiesen wurden. Alle an die untersuchten Wege angrenzenden Waldbestände wurden in der jüngeren Vergangenheit mit einer Kompensationskalkung behandelt. Somit kann man den Referenzwert der BZE für gekalkte Bestände zum Vergleich heranziehen.

Der pH-Wert des naturfesten Weges liegt mit einem Wert von 6 ca. 2 pH-Einheiten über dem Wert des Waldbodens, da am Weg der saure Oberboden nicht mehr vorhanden ist.

Eine Differenz um 2 pH-Einheiten bedeutet, daß die H^+ -Ionenkonzentration 100mal so hoch ist. Daher kann man von großen Unterschieden zwischen dem Weg-pH des naturfesten Weges und denen der anderen Wege sprechen. Diesbezüglich decken sich die Ergebnisse mit den Untersuchungen von GLOWIENKA aus dem Harz.

¹³ Die Begriffe: „Zeigerwert“, „Reaktion“ und „Reaktionszahl“ werden in Kap. 2.5.2. erklärt.

Der Bereich, der offensichtlich vom Wegematerial deutlich beeinflusst wird, erstreckt sich auf eine Breite von 4 bis 6 Metern beidseitig der Wege. Als typisches Beispiel kann hier die Abfolge der pH- Messungen an dem Weg mit einer Devonkalk-Deckschicht gelten:

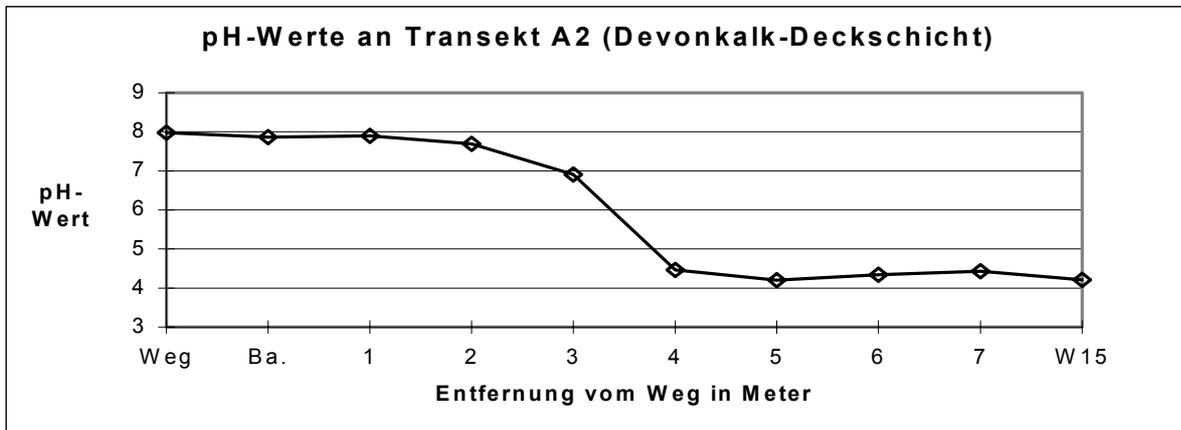


Abbildung 2-5: pH-Werte an einem Weg mit Devonkalk Deckschicht im Solling (WAGNER, BARGE, 1998)

Die pflanzensoziologische Inventur und Interpretation der Flora, die den Schwerpunkt der Arbeit bildet, belegt, daß Basenzeiger vermehrt bei allen Wegen im Bankettbereich vorkommen und die **mittleren Reaktionszahlen**⁵ vom Bankett zum Waldbestand abnehmen. Die, über die mittlere Reaktionszahl dokumentierte Anreicherung von basischen (Nähr-) Ionen durch die Verstaubung des Wegematerials, entspricht in der Tendenz deutlich der oben dargestellten Abfolge der pH-Werte:

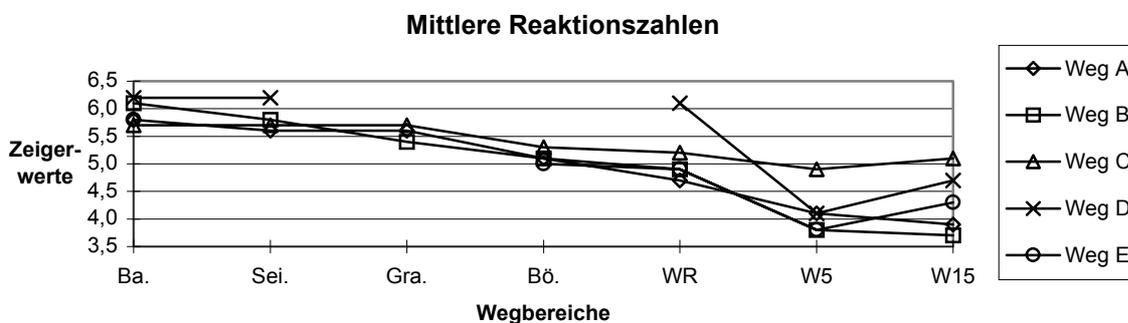


Abbildung 2-6: Mittlere Reaktionszahlen der Wege A (Devonkalk-Deckschicht), B (Dolomit-DS), C (Asphalt), D (Diabas-DS) und E (naturfeste DS) (WAGNER 1997).

Ebenso nimmt der relative Lichtgenuß zum Waldbestand hin ab und die Baum-schicht-Deckungsgrade zu. Lichtpflanzen dominieren im Bankettbereich, Schattenpflanzen dagegen im Waldbestand. Im Bankettbereich dominieren auch Pflanzenarten der Vegetationsgesellschaft „krautige Vegetation oft gestörter Plätze“ nach ELLENBERG (1996).

Das Zusammenspiel der untersuchten Standortfaktoren, vor allem Nährstoffe und Licht, führt insgesamt zu der häufig beobachteten gesteigerten Vegetationsvielfalt im Umfeld der Waldwege. WAGNER fand, verglichen mit den im Wald gelegenen Transekten, annähernd doppelt so viele Arten im Umfeld der Wege:

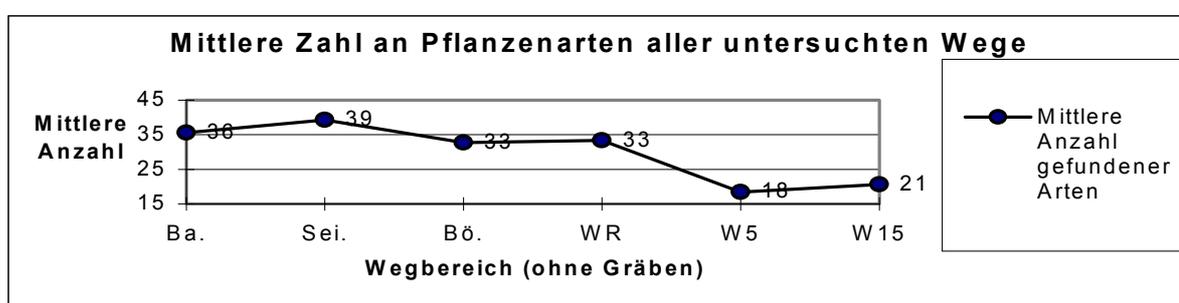


Abbildung 2-7: Mittlere Zahl an Pflanzenarten (WAGNER, BARGE 1998)

Mit der gewählten Methodik ist es leider nicht möglich, die erhöhten Artenzahlen eindeutig dem gesteigerten Standortfaktor Licht oder dem Mehrangebot an Nährstoffe im Umfeld der Wege zuzuordnen. Ebenso ist bei dem Vergleich der Ergebnisse untereinander nicht festzustellen, welches Wegebaumaterial den kleinsten oder größten Einfluß auf die Umfeldvegetation hat. Die Bindung bestimmter Pflanzenarten an bestimmte Materialien konnte mit der hier gewählten Methodik nicht festgestellt werden.

Im Hinblick auf die untersuchte Fragestellung konnte die Untersuchung im Soling folgende Ergebnisse liefern:

1. In der Umgebung der untersuchten Wege sind deutliche Einflüsse, die von der Erosion des Wegematerials stammen, anhand erhöhter pH-Werte im Oberboden und dem vermehrten Auftreten von Basenzeigern in der Vegetation offensichtlich.
2. Die Auswirkungen lassen sich mit der gewählten Methodik in einem begrenzten Bereich von 4 bis 6 Metern beidseitig des Weges, am Waldrand endend, nachweisen.

2.5. Vegetationsuntersuchung an Waldwegen im Bramwald

2.5.1. Einleitung und Zielsetzung

Um den Einfluß von Wegebaumaterial und Licht auf die Vegetation an Waldwegen und im angrenzenden Bestand vor allem im Hinblick auf eine Differenzierung dieser beiden Faktoren weiter zu erforschen, wurden in den Jahren 1998 und 1999 an Wegen im Nds. Forstamt Bramwald eine vegetationskundliche Untersuchung durchgeführt (MROTZEK, PFIRRMANN, BARGE, 2000).

Ziel der hier ausführlicher dargestellten Untersuchung ist es, den Einfluß von ungebundenem, unsortiertem Muschelkalk als Tragdeckschichtmaterial auf die Krautschicht in einem Bereich bis zu 15 m Entfernung vom Fahrbahnrand zu ermitteln. Der Muschelkalk stammt nach Auskunft der örtlichen Wegebaupraktiker mit großer Wahrscheinlichkeit aus dem Raum Witzenhausen (HERWIG, et al. 1999). Er wurde in den 70er und 80er Jahren dort in Form einer stabilisierenden ungebundenen Tragdeckschicht eingebaut. Die vergleichend untersuchten Wege aus Buntsandstein sind entweder naturfest oder wurden mit autochthonem Buntsandstein, der in Schürfungen oder Kleinststeinbrüchen im Zusammenhang mit dem Wegebau in direkter Nähe gewonnen wurde, befestigt. Die Untersuchungen beziehen sich dabei ausschließlich auf typische Zubringerwege mit niedriger Befahrungsfrequenz, so daß eine Beeinflussung durch äolischen Staubbiederschlag weitgehend ausgeschlossen ist. Um den Einfluß des Lichts als einen der wichtigsten weiteren Faktoren, die die Bodenvegetation beeinflussen, mit zu berücksichtigen, wurden zwei Lichtvarianten (geschlossener Buchenbestand „dunkel“ und aufgelichteter Buchenbestand „hell“) in die Untersuchungen einbezogen. Alle anderen Faktoren wurden möglichst konstant gehalten, was vor allem durch die Beschränkung auf ein eng umgrenztes Gebiet an der Südabdachung des Bramwaldes im Bereich des Mittleren Buntsandsteins erreicht wurde.

Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Revierförsterei Bühren im Forstamt Bramwald und wird dem Wuchsbezirk Bramwald-Brackenberg im Wuchsgebiet Südniedersächsisches Bergland zugeordnet (OTTO, 1991). Das Schedetal stellt die südliche Grenze des eigentlichen Bramwaldes (120 bis 400 m über NN) und auch der Revierförsterei

Bühren dar. Die Untersuchungsflächen befinden sich an sonnigen Süd-, Südwest- oder Südosthängen unter- und oberhalb ausgewählter Wegabschnitte am Unteren, Mittleren und Oberen Schedehangweg und am Rutzweg in einer Höhe zwischen 210 bis 330 m über NN.

Klima

Das Klima des Bramwaldes unterliegt mit einer Jahresschwankung von 16,5 °C einer atlantischen Tönung. Folgende durchschnittlichen Klimakennwerten zeichnen den Wuchsbezirk Bramwald-Brackenberg als ein für das Waldwachstum günstigen Standort aus (OTTO, 1991):

Vegetationszeit:	150-187 d
Jährlicher Niederschlag:	780 mm
Niederschlag in der Vegetationszeit:	370 mm
Mittlere Jahrestemperatur:	7,5 °C
Mittlere Temperatur in der Vegetationszeit:	14,2 °C

Da diese Mittelwerte das Klima in ca. 400 m Höhe widerspiegeln, ist aufgrund der tieferen Lage der Untersuchungsflächen von niedrigeren Niederschlagsmengen und höheren Temperaturen auszugehen.

Geologie und Boden

Im eigentlichen Bramwald, ein Buntsandstein-Hochplateau, stellt der Mittlere Buntsandstein das natürliche Ausgangsmaterial dar. Dieses basenarme Silikatgestein ist partiell mit Lößablagerungen bedeckt, so daß ca. 80 % aller Standorte im Wuchsbezirk Bramwald-Brackenberg schluffig-lehmige Böden aufweisen (OTTO, 1991). Der vorherrschende Bodentyp ist eine schwach podsolige, lockere, basenarme Braunerde mit der Humusform Moder bis mullartiger Moder. An Hanglagen ohne Lößbeeinflussung haben sich flachgründigere Böden entwickelt, die alle Übergänge von der Braunerde bis zum Ranker aufweisen können (vgl. HAPPE, 1995).

Vegetation

Die Vegetation des Untersuchungsgebietes wird durch das Luzulo-Fagetum geprägt. Je nach Standortbedingungen können dabei verschiedene Varianten ausgebildet sein, die vor allem durch Unterschiede in der Basenversorgung und der Luftfeuchte

bedingt sind. Im Untersuchungsgebiet herrscht, sofern aus waldbaulichen Gründen keine standortfremden Baumarten eingebracht bzw. gefördert wurden, weitgehend das Luzulo-Fagetum typicum vor, das sich durch das Fehlen anspruchsvollerer Arten auszeichnet. Vor allem in den geschlossenen Beständen kommt es dabei häufig zur Ausbildung des „Fagetum nudum“, in dem aufgrund des Lichtmangels praktisch keine Krautschicht ausgebildet ist.

2.5.2. *Material und Methoden*

Auswahl der Untersuchungsflächen

Die Untersuchungen wurden an insgesamt 11 Wegabschnitten in der Revierförsterei Bühren des Forstamtes Bramwald durchgeführt. Neben der grundsätzlichen Einteilung anhand des Wegematerials wurde zusätzlich der Lichtgenuß berücksichtigt, indem innerhalb einer Materialgruppe aufgelichtete (hellere) und geschlossene (dunklere) Bestände mit jeweils drei bzw. zwei Wegabschnitten untersucht wurden, so daß vier Varianten unterschieden werden können. Alle anderen Faktoren, die die Vegetation entscheidend beeinflussen können, wurden weitgehend konstant gehalten. Die Variante „Kalk / dunkel“ konnte wegen des insgesamt eng begrenzten Untersuchungsgebietes nur mit zwei Probeflächen belegt werden. Die Aufteilung der Probeflächen auf die insgesamt vier Varianten ist in Tab. 1 dargestellt. In Tab. 2 sind die grundsätzlichen Anforderungen an die Probeflächen zusammengefaßt.

Tabelle 2-3: Aufteilung der 11 Untersuchungsflächen auf die vier Varianten

Deckmaterial	Lichtgenuß	
	„dunkel“	„hell“
„natur“ (Buntsandstein)	3	3
Kalk	2	3

Tabelle 2-4: Grundsätzliche Anforderungen an die Probeflächen

Parameter	Anforderung
Baumartenzusammensetzung	> 90 % Buche
Exposition	SO – S – SW
Inklination	5° - 15°
Bestandesstruktur	Keine Dickungs- oder Stangenholzbestände ober- und unterhalb des Weges vergleichbare Bestandesstruktur
Sonstiges	Keine Holzlagerung Keine offensichtlichen Störungen (im Untersuchungs-jahr)

Einteilung und Aufnahme der Untersuchungsflächen

An jedem der elf Wegabschnitte wurden am Oberhang drei und am Unterhang vier Transektstreifen mit einer Entfernung von jeweils 0-2 m, 4-6 m, 9-11 m und 14-16 m (letztere nur am Unterhang) parallel zum Fahrbahnrand angelegt. Auf diesen je 25 m langen und 2 m breiten (= 50 m²) Untersuchungsflächen wurde die Vegetation im August 1998 aufgenommen. Die Deckungsgrade der Baum-, Strauch-, Kraut- und Moosschicht wurden direkt in Prozent, die der einzelnen Pflanzen mit Hilfe der nach SCHMIDT (1974) abgeänderten LONDO-Skala in Zehn-Prozent-Stufen geschätzt. Die Nomenklatur der Gefäßpflanzen erfolgte nach EHRENDORFER (1973), die der bodenbewohnenden Moose nach FRAHM & FREY (1987).

Lichtgenuß

Zur Bestimmung des relativen Lichtgenusses wurde am 12. 9. 1998 auf allen Transektstreifen bei diffuser Strahlung mit Silicium-Lichtsensoren (LI-COR 190 SZ in Verbindung mit LI 1000 Data-Loggern) an 16 Punkten die PAR-Strahlung gemessen (je zwei Sekunden). Die Freilandstrahlung wurde mit einem baugleichen PAR-Sensor parallel auf einer ca. 100 - 700 m von den Untersuchungsflächen entfernten Wiese ermittelt. Für die Berechnung des relativen Lichtgenusses wurden ausschließlich Werte verwendet, bei denen die Freilandstrahlung innerhalb einer Minute eine maximale Schwankung von 10 % aufwies.

pH-Wert

Um den räumlichen Einfluß des Muschelkalks auf den pH-Wert im angrenzenden Bestand zu ermitteln, wurden an je vier Punkten eines Transektstreifens je eine Mineralboden (0-3 cm)- bzw. Auflageprobe entnommen und zu Mischproben vereinigt. Die Ermittlung der pH-Werte erfolgte nach der Arbeitsanleitung zur BZE (KÖNIG & WOLFF 1993).

Zeigerwerte nach ELLENBERG et al. (1992)

Nach dem Schema von ELLENBERG et al. (1992) kann jeder Pflanzenart ein Zeigerwert für verschiedene Standortfaktoren zugeordnet werden. Der zugewiesene Zei-

gerwert beschreibt den Bereich des jeweiligen Standortfaktors, in dem die Art den Schwerpunkt ihrer Verbreitung hat. Die Skala reicht bei den hier ausgewerteten Zeigerwerten für die Bodenreaktion (Reaktionszahl oder R-Zahl), den Nährstoffhaushalt (N-Zahl) und den Lichtgenuß (L-Zahl) von 1-9. Niedrige Zeigerwerte (ca. 1-3) stehen dabei für eine saure Bodenreaktion bzw. schlechte Nährstoffversorgung oder geringen Lichtgenuß, während hohe Zeigerwerte (ca. 7-9) eine neutral-basische Bodenreaktion, bzw. sehr gute Nährstoffversorgung oder hohen Lichtbedarf bedeuten. Arten, deren Vorkommen keinen Schwerpunkt in einer der Zeigerwertklassen aufweist, sind mit X („indifferent“) gekennzeichnet.

2.5.3. Ergebnisse

Abhängigkeit einzelner Arten von den untersuchten Faktoren

Die Faktoren „Wegebaumaterial“ und „Lichtgenuß“ beeinflussen die Zusammensetzung der Vegetation in dem an den Weg angrenzenden Bestand ganz deutlich, wobei der Einfluß mit zunehmendem Abstand vom Fahrbahnrand abnimmt. In Tab. 2-5 ist die Stetigkeit einzelner Arten in den Transektstreifen 0-2 m und 4-6 m am Ober- und Unterhang in den vier Varianten dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß alle Faktoren und ihre Kombinationen durch spezifische Artengruppen charakterisiert sind.

Wegebaumaterial

Die größte Gruppe an eigenen Trennarten weisen die Aufnahmeflächen auf, die an den mit Muschelkalk befestigten Fahrbahnabschnitten liegen. Alle Arten dieser Artengruppe weisen entweder eine hohe R-Zahl (ELLENBERG et al. 1992) und/oder eine hohe N-Zahl auf, wie sie für Arten basen- und stickstoffreicher Standorte typisch ist. Ein Teil dieser Artengruppe ist mit zumeist geringerer Stetigkeit auch in den aufgelichteten Flächen der mit Buntsandsteinmaterial befestigten Fahrbahnabschnitte zu finden. Einzelne Arten wie *Impatiens parviflora* und *Lapsana communis* sind dagegen ausschließlich auf die mit Muschelkalk befestigten Fahrbahnabschnitte beschränkt.

Die Aufnahmeflächen an den mit Buntsandsteinmaterial befestigten Fahrbahnabschnitten sind demgegenüber durch Arten mit niedrigen R- und N-Zeigerwerten charakterisiert. Von zwei Ausnahmen abgesehen (vgl. Tab. 2-5) sind diese Arten an den mit Kalk befestigten Fahrbahnabschnitten vollständig verschwunden.

Lichtgenuß

Bei den Arten, die die hellen Aufnahmeflächen charakterisieren, handelt es sich durchweg um typische „Lichtzeiger“, die regelmäßig in aufgelichteten Bereichen von Buchenwäldern auf basenarmen Standorten zu finden sind. Die Licht-Zeigerwerte (nach ELLENBERG et al. 1992) liegen in allen Fällen bei 7 oder 8.

Tabelle 2-5: Stetigkeitstabelle. Arten, die einen deutlichen Schwerpunkt innerhalb einer der vier untersuchten Varianten haben (Trennarten).

Variante				N d	N h	K d	K h
Anzahl der Aufnahmen				12	12	8	12
Deckung Baumschicht 1 & 2 (%)				87	72	74	55
Deckung Krautschicht (%)				9	17	23	43
Deckung Mooschicht (%)				<1	1	2	1
Zeigerwerte	L	R	N				
Schwerpunkt: "hell"							
Calamagrostis epigejos	7	x	6	II	III	.	III
Juncus effusus	8	3	4	I	IV	.	III
Rubus idaeus	7	x	6	I	IV	II	III
Epilobium tetragonum	7	6	5	.	III	I	III
Agrostis tenuis	7	4	4	I	III	II	III
Schwerpunkt: Kalk							
Impatiens parviflora	4	x	6	.	.	IV	III
Lapsana communis	5	x	7	.	.	II	III
Mycelis muralis	4	x	6	.	.	I	I
Scutellaria galericulata	7	7	6	.	I	II	II
Galeopsis tetrahit	7	x	6	I	I	IV	II
Festuca altissima	3	8	2	.	I	II	II
Rumex sanguineus	4	7	7	I	II	III	III
Impatiens noli-tangere	4	7	6	.	III	III	V
Galium aparine	7	6	8	.	I	.	III
Geranium robertianum	5	x	7	.	II	II	III
Urtica dioica	x	7	8	.	II	II	III
Stachys sylvatica	4	7	7	.	II	II	III
Ranunculus repens	6	x	x	.	I	II	II
Schwerpunkt: Buntsandstein							
Carex pilulifera	5	3	3	III	III	II	II
Dicranella heteromalla M	5	2		II	II	I	I
Carex leporina	7	3	3	I	II	.	.
Carex pallescens	7	4	3	.	II	.	.
Larix decidua	(8)	x	3	I	III	I	.
Lonicera periclymenum	6	3	4	I	I	.	.
Deschampsia cespitosa	6	x	3	I	I	.	.
Luzula campestris	7	3	2	I	I	.	.

Stetigkeitsklassen (Häufigkeit der Art in einer Aufnahmegruppe): . = vereinzelt, I = 5-20 %; II = 21-40 %; III = 41-60%; IV = 61-80 %; V = 81-100 %

Artenzahlen

Die Artenzahlen zeigen in allen Varianten eine signifikante Abhängigkeit vom Abstand zur Fahrbahn mit den höchsten Artenzahlen am direkten Wegrand (Abb. 2-8). Die Mediane der Artenzahlen pro 50 m² reichen von 4 Arten in den Transektstreifen Natur / Dunkel / Oberhang / 9-11 m bis hin zu 32 Arten auf den Transektstreifen Kalk / Hell / Unterhang / 0-2 m (Abb. 2-8). In allen Varianten liegen die Artenzahlen in den Transektstreifen am Unterhang deutlich höher als in den vergleichbaren Transektstreifen am Oberhang, wobei die Unterschiede in den wegnahen Flächen größer sind als in den wegfernen.

Wegebaumaterial

Die mit Kalk befestigten Wege zeichnen sich insgesamt durch höhere Artenzahlen aus als die mit autochthonem Material befestigten Wege, wobei die Unterschiede zwischen den dunklen Varianten insgesamt größer sind als zwischen den hellen. Am Unterhang ist der Einfluß dabei insgesamt deutlich höher als am Oberhang und ist vor allem in der dunklen Variante noch in 14-16 m Entfernung vom Fahrbahnrand zu erkennen. Die Unterschiede zwischen dem Unter- und Oberhang sind an den mit Kalk befestigten Wegabschnitten im Mittel größer.

Lichtgenuß

Ein höherer Lichtgenuß wirkt sich durchgehend positiv auf die Artenzahlen aus. Der Effekt ist bei den mit autochthonem Material befestigten Wegabschnitten jedoch größer als bei den mit Kalk befestigten. Insgesamt gilt die Reihenfolge: Natur / Dunkel < Natur / Hell \leq Kalk / Dunkel \leq Kalk / Hell. Auffällig ist dabei vor allem der geringe Unterschied zwischen den Varianten Natur / Hell und Kalk / Dunkel, wo der Einfluß des Kalkes aus dem Wegebaumaterial in etwa den gleichen Effekt auf die Gesamtartenzahl hat wie die erhebliche Auflichtung an den mit Buntsandstein befestigten Wegen.

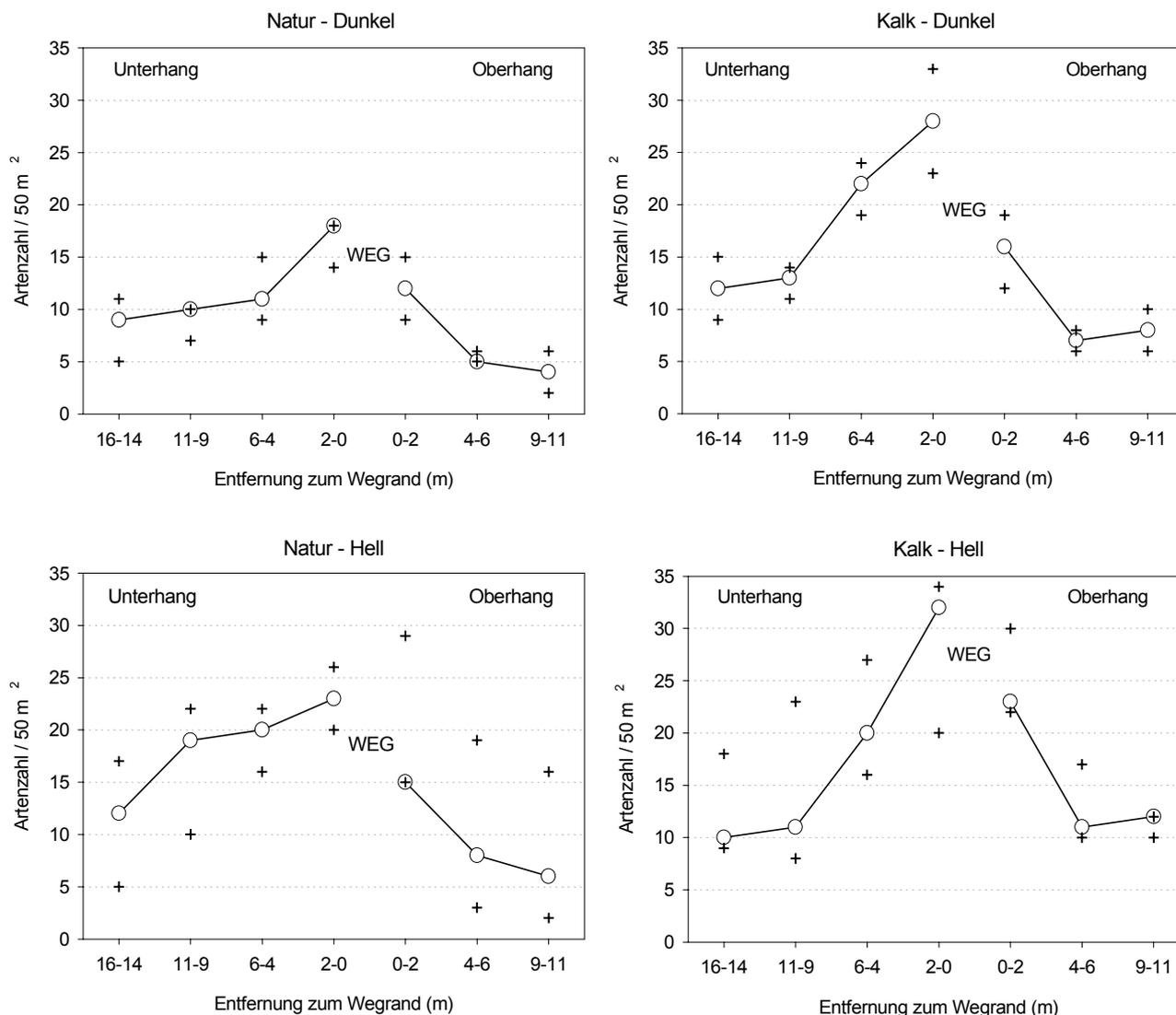


Abbildung 2-8: Mediane sowie Minimum und Maximum der Artenzahlen in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten. (n = 3)

Zeigerwerte der Kraut- und Moosschicht

Bei der Berechnung der mittleren Reaktions- und Stickstoff-Zeigerwerte nach ELLENBERG et al. (1992) wurde ausschließlich die Präsenz der Arten berücksichtigt, so daß es sich um qualitative Mittelwerte handelt.

Reaktions (R)-Zeigerwerte

In allen Varianten ist eine allgemeine Tendenz zu ansteigenden R-Werten zu erkennen, je näher die Fläche am Weg liegt (Abb. 2-9). Die mittleren R-Werte der Untersu-

chungsflächen am Unterhang sind dabei in der Regel höher als die vergleichbaren Flächen am Oberhang, wobei dieser Unterschied mit zunehmendem Abstand vom Weg geringer wird. Insgesamt reicht die Spanne der Mediane von 2,6 bis 5,7 und damit (nach der Einteilung von ELLENBERG et al. 1992) von der Indikation einer „sauen“ Bodenreaktion bis hin zur Indikation einer „mäßigsauen bis neutralen“ Bodenreaktion. Die von der allgemeinen Tendenz abweichenden Ergebnisse der Variante Kalk / Dunkel / Oberhang machen die Probleme bei der Analyse von Vegetationsaufnahmen mit sehr geringer Artenzahl und gleichzeitig geringer Stichprobenzahl deutlich (aufgrund des begrenzten Untersuchungsraumes konnten von dieser Variante nur zwei Wegabschnitte in die Untersuchungen einbezogen werden; vgl. Kap. 3.1.).

Wegebaumaterial

Die mittleren R-Werte der an die mit Kalk befestigten Wegabschnitte angrenzenden Transektstreifen sind im Durchschnitt höher als an den mit Buntsandsteinmaterial befestigten. Die Unterschiede nehmen dabei mit zunehmender Entfernung vom Weg ab, sind aber sowohl unter- als auch oberhalb des Weges deutlich zu erkennen. Die Spanne der ermittelten Mediane der R-Werte liegt bei den mit Kalk befestigten Wegen mit 3,1 – 5,7 um ca. eine Stufe höher als bei den mit autochthonem Material befestigten mit 2,6 – 4,8, was vor allem auf das Fehlen der säuretoleranten Arten zurückzuführen ist.

Lichtgenuß

Wie bei den Artenzahlen wirkt sich auch hier eine Erhöhung des Lichtangebotes bei den mit Buntsandstein befestigten Wegabschnitten stärker aus als bei den mit Kalk befestigten. Die Reihenfolge ist praktisch identisch mit der bei den mittleren Artenzahlen: Natur / Dunkel < Natur / Hell ≤ Kalk / Dunkel ≤ Kalk / Hell. Auffällig ist auch hier der geringe Unterschied zwischen den Varianten Natur / Hell und Kalk / Dunkel.

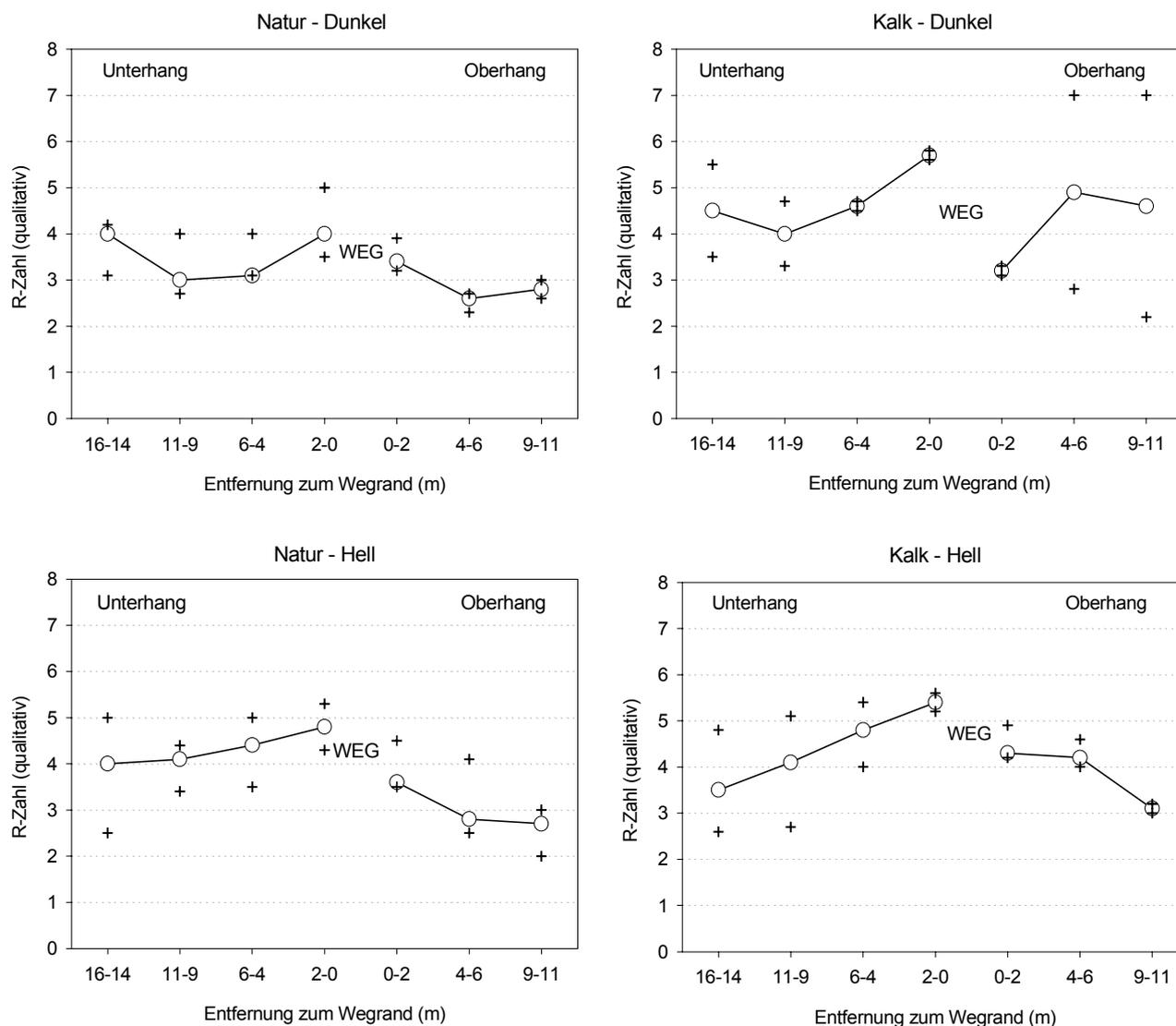


Abbildung 2-9: Mediane sowie Minimum und Maximum der Reaktions-Zeigerwerte in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten (n = 3).

Stickstoff (N)-Zeigerwerte

Insgesamt ist auch hier die gleiche allgemeine Tendenz wie bei den R-Werten zu erkennen, wobei die Gradienten vom Fahrbahnrand zu den weiter entfernten Transektstreifen innerhalb der einzelnen Varianten schwächer ausgebildet sind als bei den R-Werten (Abb. 2-10). Tendenziell sind aber auch die N-Werte der Untersuchungsflächen am Unterhang etwas höher als die vergleichbaren Flächen am Oberhang. Insgesamt reicht die Spanne der Mediane von 3,0 bis 6,1 und damit (nach der Einteilung von ELLENBERG al. 1992) von „stickstoffarmen“ bis „mäßig stickstoffreichen bis stickstoffreichen“ Standorten

Wegebaumaterial

Die mittleren N-Werte der an die mit Kalk befestigten Wegabschnitte angrenzenden Transektstreifen sind im Durchschnitt höher als an den mit Buntsandsteinmaterial befestigten. Dieser Unterschied ist vor allem bei den „dunklen“ Wegabschnitten besonders deutlich ausgeprägt, während die „hellen“ Varianten nur geringe Unterschiede aufweisen. Die Spanne der ermittelten N-Werte liegt an den mit Kalk befestigten Wegen benachbarten Aufnahmeflächen mit 4,1 – 6,1 um über eine Stufe höher als an den mit autochthonem Material befestigten mit 3,0 – 5,6, was vor allem auf das Fehlen der Arten mit niedriger N-Zahl zurückzuführen ist. Ursache hierfür ist vermutlich die erhöhte N-Mineralisation durch den Eintrag von Kalk.

Lichtgenuß

Wie bei den Artenzahlen und den R-Werten wirkt sich auch hier eine Erhöhung des Lichtangebotes bei den mit Buntsandstein befestigten Wegabschnitten stärker aus als bei den mit Kalk befestigten. Die Reihenfolge ist praktisch identisch mit der bei den anderen Parametern: Natur / Dunkel < Natur / Hell ≤ Kalk / Dunkel ≤ Kalk / Hell. Auffällig ist auch hier der geringe Unterschied zwischen den Varianten Natur / Hell und Kalk / Dunkel.

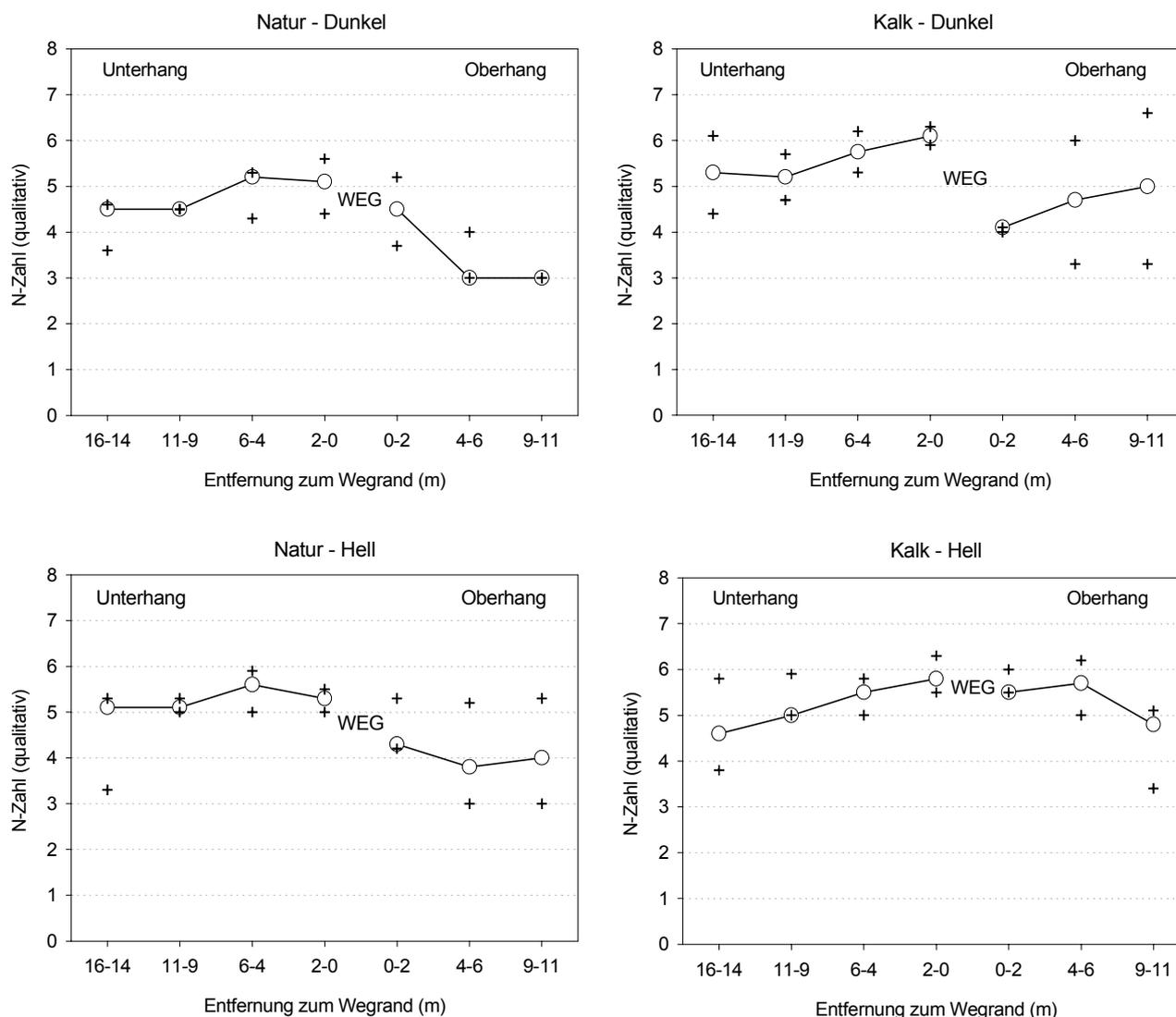


Abbildung 2-10: Mediane sowie Minimum und Maximum der Stickstoff-Zeigerwerte in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten. (n = 3)

Soziologische Artengruppen

Für die Auswertung der soziologischen Artengruppen wurden nur die Transektstreifen 0-2 m, 4-6 m und 9-11 m berücksichtigt, um eine getrennte Analyse der Daten vom Ober- und Unterhang zu ermöglichen (gleiche Stichprobengröße).

Bei der Analyse der soziologischen Artengruppen nach ELLENBERG et al. (1992) zeigen sich vor allem zwei auffällige Tendenzen (Abb. 2-11). Sowohl der Anteil der „typischen Waldarten“ (= Arten der Laub- und Nadelwälder) als auch der Anteil der „typischen Ruderalarten“ (= krautige Vegetation oft gestörter Plätze) ist in allen Varianten am Unterhang höher als am Oberhang. Der Anteil der „indifferenten Arten“ ist

dagegen am Oberhang höher als am Unterhang. Der Anteil der „typischen Waldarten“ variiert zwischen 33 – 49 %, während der Anteil der „typischen Ruderalarten“ zwischen 0 – 14 % liegt.

Wegebaumaterial

Der Muschelkalk hat einen deutlich fördernden Einfluß auf die Arten aus der Gruppe der „Krautigen Vegetation oft gestörter Plätze“. Mit 1,6-14,4 % ist der Anteil deutlich höher als bei den mit Buntsandsteinmaterial befestigten Wegen mit 0-6,1 %. Kein eindeutiger Effekt ist dagegen bei den typischen Arten der Laub- und Nadelwälder zu erkennen. Zwar ist der Anteil der „typischen Waldarten“ in der Variante „Kalk / dunkel“ insgesamt am höchsten, dafür ist in der Variante „Kalk / hell“ aber kein Unterschied zu den Wegabschnitten mit autochthonem Wegebaumaterial zu erkennen.

Lichtgenuß

Ein höherer Lichtgenuß hat insgesamt einen fördernden Einfluß auf die Arten der „Krautigen Vegetation oft gestörter Plätze“, wobei diese Wirkung in der Gruppe der mit Kalk befestigten Wege sehr viel größer ist als bei den mit Buntsandsteinmaterial befestigten Wegabschnitten.

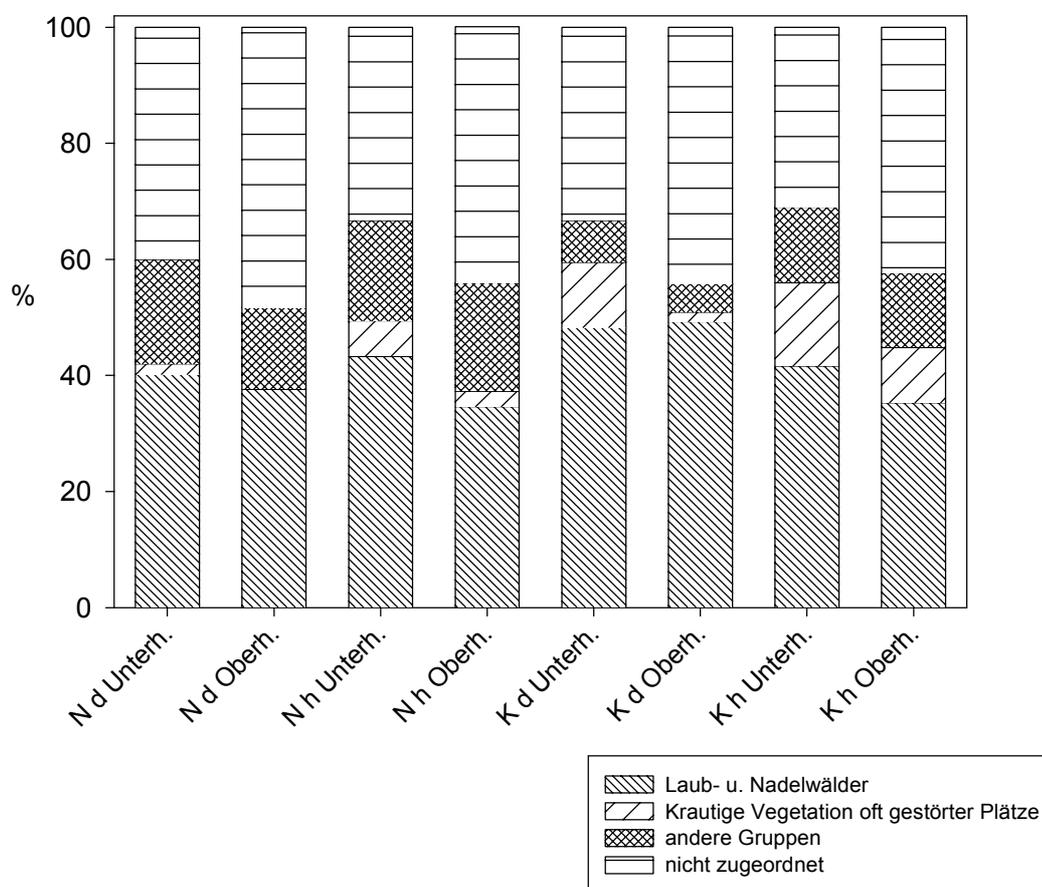


Abbildung 2-11: Relative Anteile der soziologischen Artengruppen in den verschiedenen Varianten nach ELLENBERG et al. (1992) getrennt in Unter- und Oberhang. (N = Buntsandsteinmaterial; K = Muschelkalk; h = „hell“; d = „dunkel“)

Relative Beleuchtungsstärke

In der Regel weisen die Transektstreifen mit zunehmender Nähe zur Fahrbahn einen Anstieg der relativen Beleuchtungsstärke auf, der durch die „Lückensituation“ im Bereich der Wege zu erklären ist. Insgesamt reicht der mittlere relative Lichtgenuß in den untersuchten Transektstreifen von 3,2 % - 19,0 %. Von allen untersuchten Faktoren weisen die Ergebnisse zum relativen Lichtgenuß innerhalb der verschiedenen Varianten die größte Streuung auf. Diese ist oftmals größer als der jeweilige Mittelwert, was die kleinräumig stark variierenden Lichtverhältnisse in den angrenzenden Beständen deutlich charakterisiert.

Unterschiede zwischen den Varianten

Die tatsächlichen Lichtverhältnisse weisen zwischen den beiden Lichtgenuß-Varianten der mit Muschelkalk befestigten Wegabschnitte eine größere Abweichung auf als zwischen den entsprechenden Varianten der mit Buntsandsteinmaterial befestigten Flächen. Die Variante „hell“ weist an den mit Kalk befestigten Wegabschnitten mit 6,5 bis zu 23,7% im Vergleich zu den an mit Buntsandsteinmaterial befestigten Wegen stockenden Bestände mit 10,4 bis 14,1% eine etwas höhere Beleuchtungsstärke auf. Dagegen liegt die relative Beleuchtungsstärke in den dunkleren Natur-Flächen mit 4,1 bis 8,5% gegenüber Bestandeshelligkeiten von 3,2 bis 7,1% in den dunkleren Kalk-Aufnahmestreifen etwas höher.

Insgesamt sind die Lichtverhältnisse in den Varianten „Natur / dunkel“ und „Kalk / dunkel“ sowie in den Varianten „Natur / hell“ und „Kalk / hell“ aber gut vergleichbar, so daß eine deutliche Beeinflussung der in den vorherigen Kapiteln dargestellten Ergebnisse durch unterschiedlichen Lichtgenuß weitgehend ausgeschlossen werden kann.

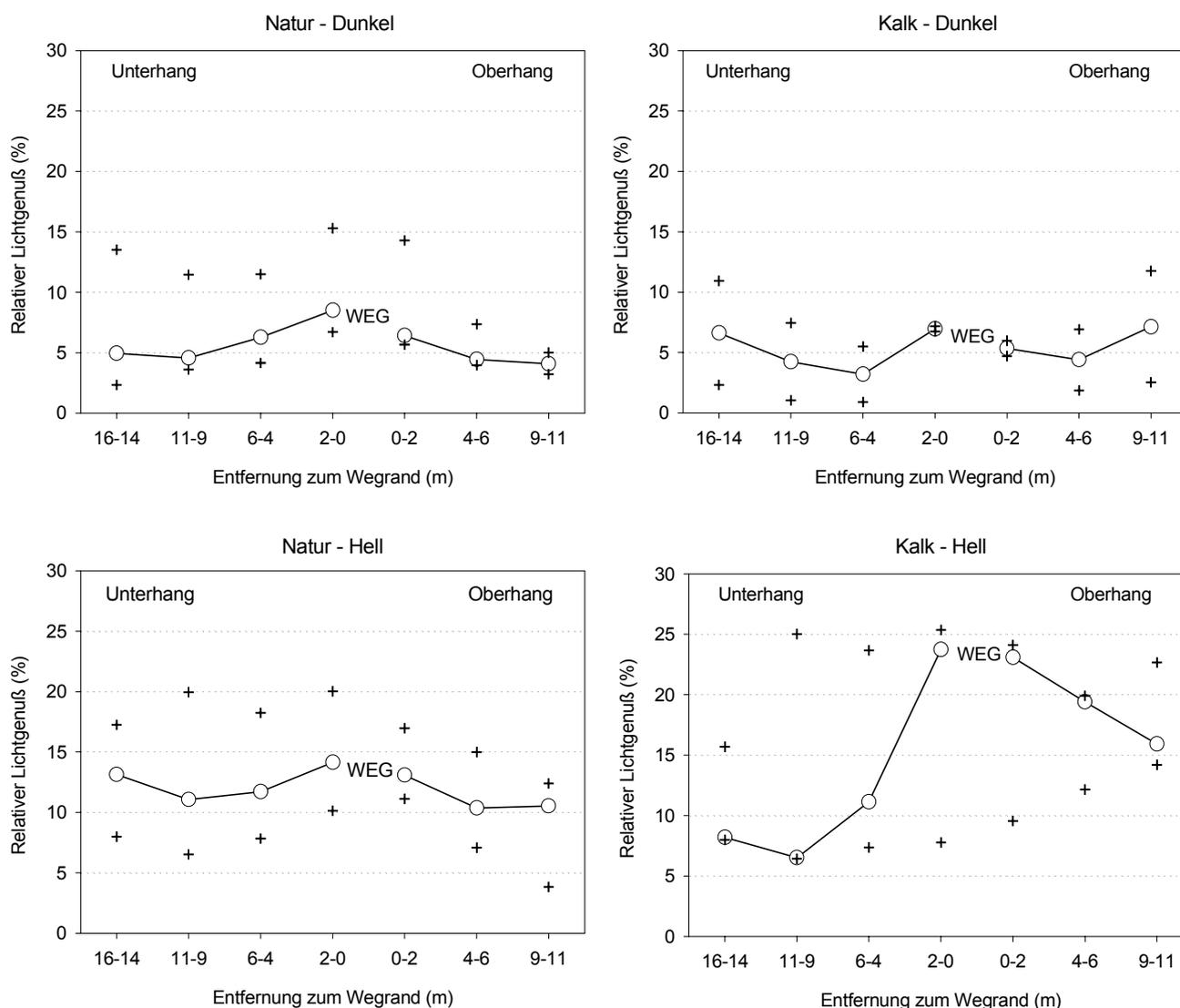


Abbildung 2-12: Mediane sowie Minimum und Maximum des mittleren relativen Lichtgenusses in den einzelnen Transekten der vier Varianten. (n = 3)

pH – Wert

Mit zunehmender Nähe zum Weg weisen alle Transektstreifen einen Anstieg der $pH_{(H_2O)}$ -Werte auf. Unabhängig vom verwendeten Wegebaumaterial ist dabei am Unterhang ein stärkerer Anstieg festzustellen als am Oberhang. In allen Varianten sind die $pH_{(H_2O)}$ -Werte in 14-16 m Entfernung am Unterhang höher als die $pH_{(H_2O)}$ -Werte in 9-11 m Entfernung am Oberhang. Insgesamt reichen die mittleren $pH_{(H_2O)}$ -Werte in den untersuchten Transektstreifen von $pH_{(H_2O)}$ 3,6 – 7,0.

Wegebaumaterial

Das verwendete Wegebaumaterial beeinflusst den pH-Wert im oberen Mineralboden des angrenzenden Bestandes ganz deutlich. Im direkten Wegrandbereich am Unterhang liegt der pH-Wert bei den mit Muschelkalk befestigten Wegen um 1-2 pH-Wert-Stufen über den vergleichbaren Werten der mit Buntsandsteinmaterial befestigten Wegabschnitte. Bei den weiter entfernten Transektstreifen ist dieser Effekt weniger deutlich ausgeprägt. Am Oberhang kommt es insgesamt zu einer deutlich geringeren Beeinflussung der pH-Werte der oberen Mineralbodenschicht durch das Wegebaumaterial. Hier erhöht sich der $pH_{(H_2O)}$ -Wert im oberen Mineralboden durch das kalkhaltige Wegebaumaterial um maximal 0,5 pH-Wert-Stufen.

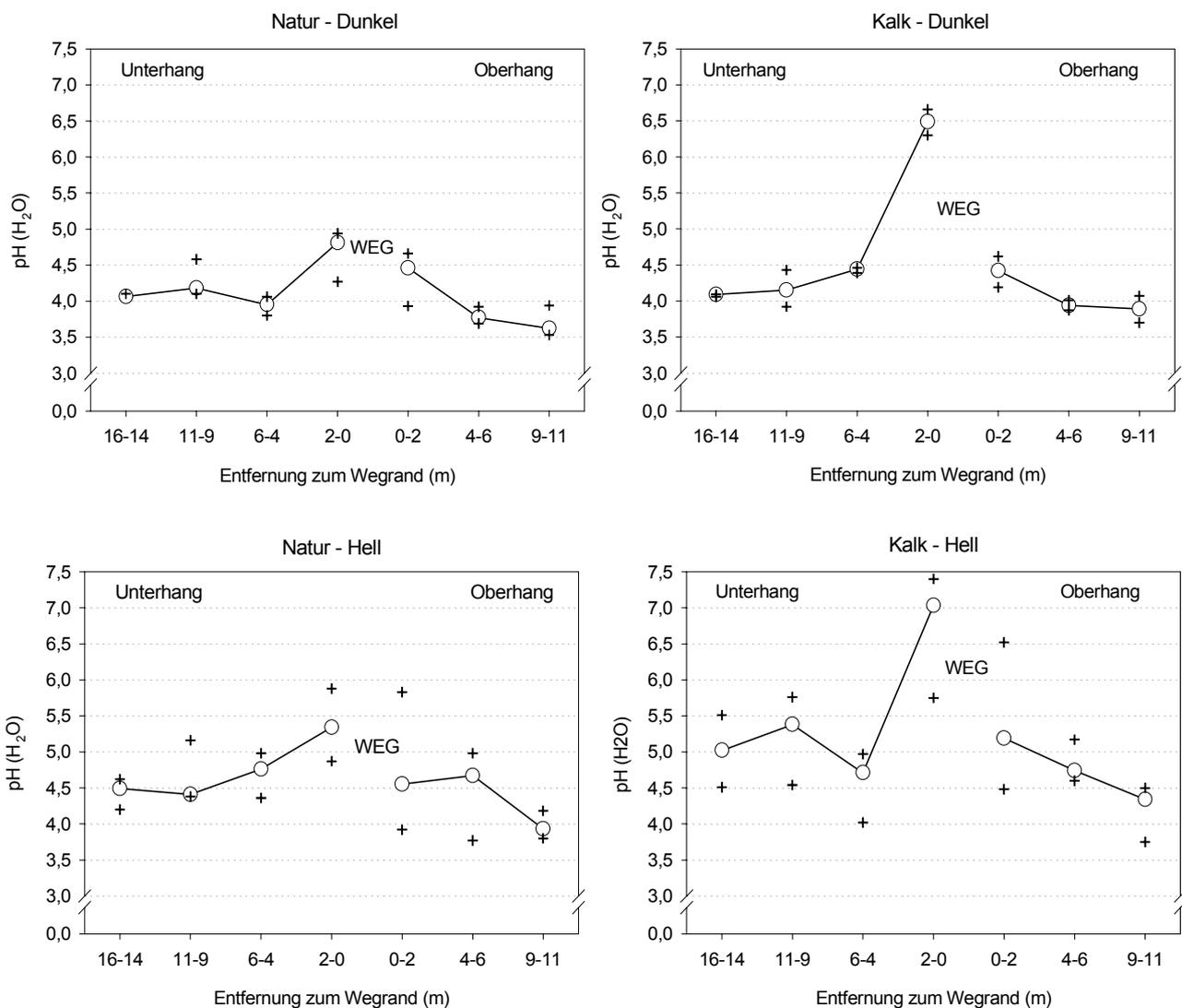


Abbildung 2-13: Mediane sowie Minimum und Maximum der mittleren $pH_{(H_2O)}$ -Werte im oberen Mineralboden (0-3 cm) in den einzelnen Transekten der vier untersuchten Varianten (n = 3 bzw. 2).

2.5.4. Diskussion

Waldwege haben vielfältige Auswirkungen auf die angrenzenden Bestände. Zum einen kommt es beim Bau in der Regel zu einer intensiven Störung des Bodens und durch die erheblichen Bodenbewegungen und Bodenverdichtungen zu einer mehr oder weniger starken Beeinflussung der angrenzenden Bereiche, die je nach Bauweise und Hangneigung unterschiedlich weit in den Bestand reichen kann. Nach der Anlage des Weges kommt es durch Pflegemaßnahmen, Befahren der Bankette, Holzlagerung und ähnliches weiterhin zu regelmäßigen Störungen im direkten Wegrandbereich (vgl. MROTZEK & SCHMIDT 1993). Neben diesen direkten Störungen haben aber vor allem zwei Faktoren einen ganz deutlichen Einfluß auf den angrenzenden Bestand. Zum einen ist dies das Wegebaumaterial, das je nach chemischer Zusammensetzung zu einem Eintrag von Basen führen kann, zum anderen ist es der gesteigerte Lichtgenuß, der durch die Auflichtung des Kronendaches im Wegbereich bedingt ist (vgl. GLOWIENKA 1994). Ziel der vorliegenden Untersuchung ist, den räumlichen Einfluß von Muschelkalk als Wegebaumaterial auf die Vegetation im angrenzenden Bestand zu untersuchen. Da der Einfluß des Stoffeintrages jedoch in Abhängigkeit vom Lichtgenuß sehr unterschiedliche Auswirkungen haben kann, wurde zusätzlich ein Lichtgradient berücksichtigt.

Neben den genannten Faktoren ist zu berücksichtigen, daß Grenzbereiche zwischen verschiedenen Lebensräumen, wie beispielsweise Waldwege, sich oftmals durch einen besonderen Artenreichtum auszeichnen (SCHALL, 1988; ZACHARIAS 1989). Dies ist durch den Kontakt zweier in ihren Umweltverhältnissen unterschiedlicher Standorte bedingt, was zu einer breiteren Amplitude von Standortfaktoren wie Nährstoffgehalte, Lichtverhältnisse oder auch Bodenfeuchtigkeit führt.

Wegebaumaterial

Die Befestigung von Waldwegen mit standortfremdem Material wie Muschelkalk führt zur Anreicherung von Nährstoffen (z. B. Calcium) und zur Erhöhung des pH-Wertes (KOPECKY, 1988; GLOWIENKA, 1994). Im Allgemeinen steigen die in Wasser und Salzlösung gemessenen pH-Werte mit zunehmender Nähe zum Wegrand an (vgl. Abb. 2-13). Am stärksten sind dabei die talseitigen direkt an den Weg angrenzenden Ränder von 0-2 m dem kalkhaltigen Material ausgesetzt (vgl. SCHALL 1988; GLOWIENKA, 1994). Ein sprunghafter Anstieg um bis zu annähernd 3 pH-Einheiten auf

einen pH_(H₂O)-Wert von 6,5 bzw. 7,0 im oberen Mineralboden ist ausschließlich an den mit Kalk befestigten Wegabschnitten festzustellen. Im zweiten Transektstreifen mit einer Distanz von 4-6 m zum Wegrand pendeln sich die pH_(H₂O)-Werte um 4,5 ein und liegen nur noch geringfügig über den pH-Werten in den entsprechenden naturfesten Wegbereichen. Insgesamt sind die Auswirkungen am Unterhang wesentlich stärker ausgeprägt als am Oberhang. Ein leichter Anstieg der pH-Werte im direkten Wegerandbereich ist auch bei den naturfesten Wege festzustellen und vermutlich auf die Bodenumlagerungen während des Wegebaus zurückzuführen (vgl. auch GLOWIENKA, 1994; WAGNER, 1997).

Während sich die Mineralböden der direkten Randbereiche der mit Kalk befestigten Wege im Übergangsbereich vom Carbonat- zum Silikat-Pufferbereich befinden, liegen die Böden der Flächen in 4-6 m Entfernung zum Wegrand bereits im Austausch-Pufferbereich und sinken danach vielfach noch weiter ab (FORSTLICHE STANDORTSAUFNAHME, 1996). GLOWIENKA (1994) bestimmte an mit Kalk befestigten Wegen im Harz sogar pH_(H₂O)-Werte um pH 8 in einem Einflußbereich von bis zu 5,5 m Entfernung vom unteren Wegrand. Nicht nur die pH-Werte zeigen, daß die talseitigen Wegränder einer stärkeren Beeinflussung durch das Wegematerial ausgesetzt sind (vgl. SCHALL, 1988; GLOWIENKA, 1994), sondern auch die floristische Zusammensetzung weist auf Unterschiede im Nährstoffangebot und den pH-Werten an Unter- und Oberhang hin. Die Artengruppe, welche die Vegetationsaufnahmen an den mit Kalk befestigten Wegen kennzeichnet, besteht überwiegend aus Arten, die typisch für basen- und kalkreiche Standorte sind (R-Zeigerwerte 7-8). Aufgrund der charakteristischen Eutrophierung in der nächsten Umgebung von Waldwegen, die vor allem durch standortfremde Baumaterialien wie beispielsweise Kalk verursacht wird, können sich nitrophile Arten wie *Impatiens parviflora* oder *Urtica dioica* in Gebieten mit von Natur aus basenarmen Böden ausbreiten (KOPECKY, 1988). Ähnlich wie bei der Waldkalkung führt die Zufuhr von Calcium zu einer gesteigerten Nitrifikationsrate und damit insgesamt zu einer verbesserten Nährstoffversorgung im Oberboden, wodurch nitrophile Arten gefördert werden (MROTZEK & SCHMIDT, 1998). Bei der Ausbildung dichter Dominanzbestände dieser konkurrenzstarken Arten kann es zu Problemen bei der Naturverjüngung der Buchen kommen (EICHHORN, 1995; MROTZEK, 1998). Die in Tab. 2-5 dargestellte Artengruppe mit Schwerpunkt an den mit Kalk befestigten Wegen findet sich in vergleichbarer Zusammensetzung auch in vielen Untersuchungen über die Auswirkungen der Waldkalkung (vgl. SCHMIDT, 1992; WERNER, 1995). Auch der deutlich höhere Anteil von Ruderalarten (Abb. 2-11) wie

Mycelis muralis, *Lapsana communis*, *Geranium robertianum*, *Galium aparine* und *Urtica dioica* an den mit Kalk befestigten Wegen ist darauf zurückzuführen. An den mit Buntsandstein-Material befestigten Wegen sind dagegen krautige Säurezeiger wie *Carex pilulifera*, *Carex leporina*, *Lonicera periclymenum* und *Luzula campestris* sowie das Moos *Dicranella heteromalla* zu finden (vgl. Tab. 2-5).

Im Gegensatz zu den talseitigen Wegrändern und Unterhängen, die einerseits durch hangabwärts verlagerte Kalksteinchen direkt beeinflußt werden und andererseits mit dem abfließenden Niederschlagswasser Nährstoffe und Basen von den Wegetrassen zugeführt bekommen, stellen die steilen Wegböschungen der Oberhänge oft ausgehagerte Standorte dar (SCHALL, 1988). Dieser Unterschied wird anhand der niedrigeren Reaktions- und Stickstoff-Zeigerwerte und den niedrigeren pH-Werten an den Oberhängen deutlich. Vereinzelt kommen hier sogar an den mit Kalk befestigten Wegen säurezeigende Arten wie *Vaccinium myrtillus*, *Calluna vulgaris* und *Hieracium laevigatum* oder die Moose *Pohlia nutans* und *Lepidozia reptans* vor. Sowohl an den mit Muschelkalk befestigten als auch an den naturfesten Wegen liegen die $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ -Werte der oberen Mineralbodenschicht an den bergseitigen Böschungen im Austausch-Pufferbereich (pH 4,2 bis 5,0) (FORSTLICHE STANDORTSAUFNAHME, 1996).

Lichtgenuß

Die Beleuchtungsstärke im Bestand nimmt stets von oben nach unten ab, wobei die Lichtverhältnisse im Bestand wesentlich von der vertikalen Bestandesstruktur bestimmt werden (OTTO, 1994). Mit abnehmender Deckung der Baumschicht steigt die relative Beleuchtungsstärke im Bestand an, die mit Deckung der Kraut- und Mooschicht positiv korreliert ist. Jedoch verliert der Deckungsgrad der ersten Baumschicht bei Vorhandensein einer zweiten Baumschicht und / oder Strauchschicht an Bedeutung (BORNKAMM et al. 1993). Die Lichtverhältnisse im Bestand können durch die Messung der relativen Beleuchtungsstärke bei diffusem Tageslicht zuverlässig charakterisiert werden (Dohrenbusch, 1987).

Das Lichtangebot an Waldwegen ist je nach Breite des Weges, Höhe der Bäume und Größe der Kronen im Vergleich zum Bestandesinneren erhöht (SCHALL, 1988). Mit zunehmender Entfernung zum Wegrand nimmt der relative Lichtgenuß tendenziell ab, wobei sich das höchste Lichtgefälle für die talseitigen direkt an den Weg angrenzenden Seitenbereiche (0-2 m) zu den sich dort anschließenden Aufnahmestreifen in 4-6 m Entfernung zum Wegrand ergibt (Abb. 2-12). Wie GLOWIENKA

(1994) in seinen Untersuchungen zu Waldwegen im Harz berichtet, liegen für den direkten Wegbereich, wozu auch die Seitenstreifen zählen, die höchsten relativen Beleuchtungsstärken vor. Allgemein beeinflusst die Beleuchtungsstärke die Deckung und Artenzahl der Krautschicht (EBER, 1972; ELLENBERG, 1996). Dieser Einfluß der Deckungsgrade der Baumschichten auf die Deckung der Krautschicht wird in den lichterem talseitigen Aufnahmeflächen der beiden untersuchten Wegmaterialgruppen deutlich. Bei niedrigeren Gesamtdeckungen der übergeordneten Vegetationsschichten an den talseitigen Wegrändern weisen die beiden Aufnahmestreifen 0-2 m und 4-6 m höhere Deckungsgrade in der Krautschicht auf. Mit relativen Beleuchtungsstärken von 3,2 bis 7,1% handelt es sich bei der dunkleren Kalk-Variante im Vergleich zu den übrigen untersuchten Flächen um die dunkelsten Bestände. Im Vergleich zu ungestörten Buchenwäldern, in denen der Lichtgenuß häufig unter 3-4 % liegt (EBER, 1972; MROTZEK, 1998), sind somit auch die Transektstreifen in 4-6 m, 9-11 m und 14-16 m Entfernung zum Wegrand zum Teil relativ hell.

Die Ergebnisse zeigen auch sehr deutlich, daß die Nährstoffversorgung einen deutlichen steuernden Einfluß auf die Bedeutung des Lichtgenusses für die Vegetation hat. Während sich die Artenzahlen der hellen und dunklen Variante an den Wegabschnitten mit Muschelkalk praktisch nicht unterscheiden (28 bzw. 29), ist die Artenzahl bei den mit Buntsandsteinmaterial befestigten Wegen positiv mit der relativen Beleuchtungsstärke korreliert. Das heißt, daß mit zunehmender Helligkeit zum Wegrand hin auch die Artenzahl zunimmt. Diese Interaktion von Licht und Nährstoffversorgung ist bereits vielfach beschrieben. STOTTELE (1981) fand beispielsweise in Randbereichen von Autobahnschneisen in dicht geschlossenen Buchenbeständen eines *Luzula-Fagetum* durch den erhöhten Lichtgenuß eine Verdoppelung der Artenzahl, während MROTZEK & SCHMIDT (1998) die Zunahme der lichtbedürftigen Brennessel (*Urtica dioica*) durch die Waldkalkung beschreiben. Trotz des höheren Lichtgenusses in der dunkleren Natur-Variante liegt die Artenzahl vor allem in den talseitigen Aufnahmestreifen 0-2 m und 4-6 m weit unterhalb der Artenzahl in der entsprechenden Kalk-Variante, was den signifikanten Einfluß des Wegebaumaterials unterstreicht.

2.6. Chemisch, bodenkundliche Untersuchung der Wegebau-Deckschichtmaterialien

2.6.1. Zielsetzung

In den Kap. 2-2 bis 2-5 konnte gezeigt werden, daß Flora und pH-Wert des Oberbodens im Umfeld von Waldwegen mit Deckschichten aus basischem Gestein deutliche Veränderungen zu Referenzflächen neben naturfesten Wegen ausweisen. Durch die pflanzensoziologischen Aufnahmen wurde auch deutlich, daß die Nährstoffversorgung in Verbindung mit dem veränderten Strahlungsregime Einfluß auf die Vegetation hat.

Ursache für die bodenchemischen Veränderungen ist verlagertes Wegebau-material, daß in Staubform, mit dem Spritzwasser und lateral abfließendem Wasser eingetragen wird. Die nachfolgend auftretende Verwitterung von Carbonaten oder Primärsilikaten setzt Nährstoffe frei und führt zu einer potentiellen Pufferung von H⁺-Ionen im benachbarten Boden.

Mit einer ergänzenden ökochemischen Analyse des Wegematerials soll gezeigt werden, inwieweit das Deckschichtmaterial von Waldwegen hinsichtlich seiner mineralischen Ausstattung für die beobachteten Effekte verantwortlich sein kann. Mit Hilfe einer Modell-Kalkulation soll am Beispiel des Elementes Calcium der Versuch unternommen werden, den möglichen Eintrag an Nährelementen in das Wegeumfeld zu quantifizieren.

2.6.2. Material und Methoden

Im Los Angeles Versuch wurden die in Kap 1.5.1 beschriebenen mineralischen Baustoffe auf ihre Schlagabriebresistenz untersucht. Das im Versuch erzeugte, abgeschlagene bzw. abgeriebene Feinmaterial in der Korngröße < 1mm wurde vor dem Reinigen der Trommel aufgefangen und gesammelt. Zur weiteren chemischen Untersuchung wurde die Masse des Feinmaterials und für die weitere Verarbeitung trocken gelagert. Dieses Material entspricht in seinem Feinheitsgrad weitgehend dem, beim Verschleiß der Wegedecken infolge der Befahrung und durch den natürlichen Frost-Tau-Wechsel (vgl. Kap. 1.6) entstehenden Material.

Im Labor des Instituts für Bodenkunde und Waldernährung (IBW) der Universität Göttingen wurden an den Feinmaterialien im Herbst 1999 bodenchemische Untersuchungen durchgeführt. Die in Kap. 1.5.1 näher beschriebenen Feinmaterialien sind im einzelnen:

Tabelle 2-6: Herkunft und Probenbezeichnung der im IBW untersuchten Materialien

Mineralstoffart	Steinbruchbetreiber / Standort des Werkes	Feinmaterial nach LA Versuch / Proben Nr. zur Analyse im IBW
Basalt	Basalt-Vertrieb GmbH & Co. KG Hermann Wegener Werk 37139 Adelebsen	8= 0/22 Forstwegematerial 12= 0/32 Güteüberwacht B2
Buntsandstein (Helmshausen-Solling- Folge)	Bunk GmbH & Co. KG Werk 34385 Bad Karlshafen	4= 0/100 6= 0/100
Diabas	Telge & Eppers GmbH & Co. KG Werk Huneberg , 38640 Goslar	2= 0/22 braun 11= 0/32 Güteüberwacht B2
Devonkalk	Felswerke GmbH Werk Münchehof , 38604 Gos- lar	5= 0/32 Güteüberwacht B2 10= 0/30 Vorabsiebung
Grauwacke	Hartsteinwerk Ilfeld Werk Unterberg , 99768 Ilfeld	3= 0/22 2. Wahl Forst 9= 0/22 1. Wahl
Muschelkalk	Oppermann Kiesgewinnungs- und Vertriebs-GmbH Werk Emmenhausen , 34346 Hann. Münden	1= 0/40 Vorabsiebung 7= 0/32

Diese Feinmaterialien wurden durch eine weitere Siebung in zwei Fraktionen, nämlich < 63µm und 63 bis 1000 µm getrennt. Die Fraktion < 63 µm entspricht den Korngrößenklassen Schluff und Ton. Aufgrund ihrer geringen Oberfläche stellt sie zum einen den reaktivsten Anteil des Abriebs dar, zum anderen ist diese Fraktion leicht durch Wasser und Wind verlagerbar.

Die folgende Darstellung, bei der die beiden Proben einer Gesteinsart zusammengefaßt sind, zeigt die Verteilung der Fraktionen. Die Kalke, als eindeutig den Peliten zuzuordnende Sedimentgesteine zeigen den höchsten Anteil an Feinmaterial < 63µm. Demgegenüber ist bei der Grauwacke (Psammit mit breitem Spektrum von pelitischen bis zu grobklastischen Anteilen) der höchste Anteil an etwas groberem Material verblieben. Die Unterschiede in der Kornzertrümmerung bzw. Verfeinerung (vgl. Kap. 1.5.5) sind mit rd. 10% zwischen dem am stärksten zerkleinerten Muschelkalk und der am wenigsten zerkleinerten Grauwacke allerdings insgesamt relativ gering. Dies wird bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der Absiebung des abge-

splitterten Materials aus dem Frost-Tau-Wechsel-Versuch (vgl. Abb. 1-16 in Kap. 1.6.2) besonders deutlich. Der dort höhere Grad der Kornzertrümmerung wird durch die starke mechanische Einwirkung auch auf bereits zerleinerte Kompartimente des Gesteins in der LA-Trommelmühle erklärt.

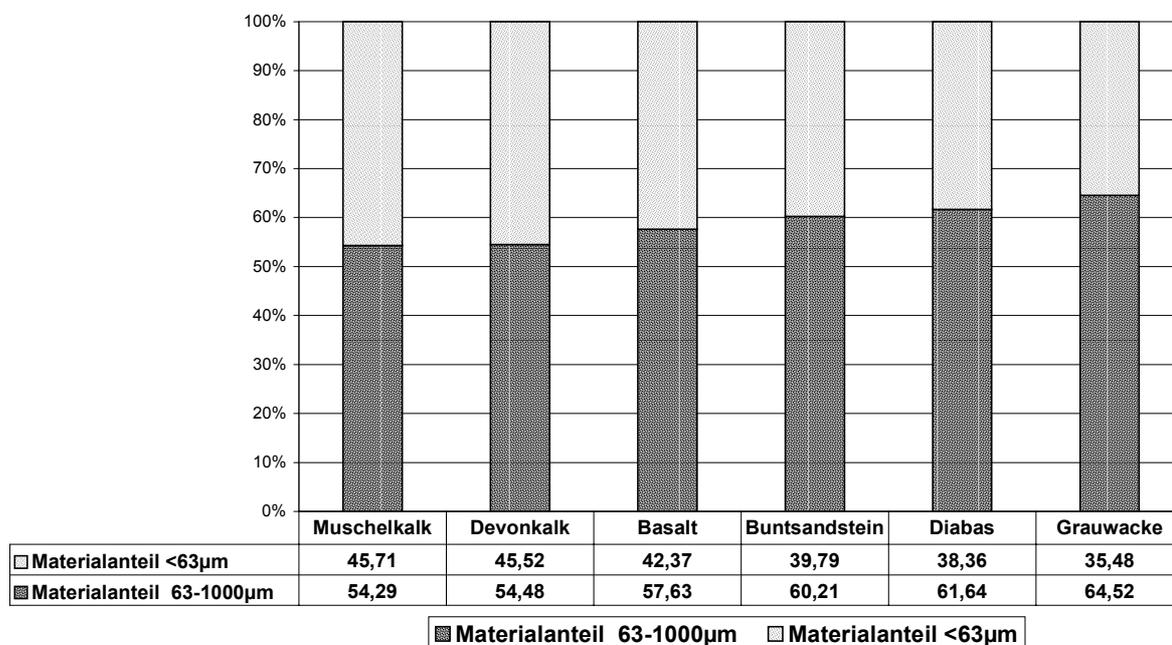


Abbildung 2-14: Fraktionierung des Feinmaterials aus dem LA-Versuch

Der Elementargehalt der Feinmaterialien wurde anschließend im Wege des HNO₃ - Druckaufschlusses ermittelt. Das Verfahren wird von KÖNIG und FORTMANN (1999) beschrieben als oxidierender Säureaufschluß, bei dem Nitrat (mit N^V) zu nitrosen Gasen (NO_x, mit N^{II-IV}) umgewandelt wird und der dabei abgespaltene Sauerstoff die Oxidation der aufzuschließenden Substanzen bewirkt:



Dabei werden organische Substanzen vollständig aufgeschlossen:



Mineralische Substanzen werden je nach Art und Zusammensetzung teilweise ganz (z.B. leicht lösliche Oxide), teilweise jedoch unvollständig (z.B. Silikate) oder gar nicht (z.B. schwer lösliche Sulfide) aufgeschlossen. Elemente wie Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, P, Pb, S oder Zn werden aus Böden zu 80 – 100 % mit Salpetersäure extrahiert, während Elemente wie Al, Cr, K, Na, oder Si nur zu 5 – 50 % in die Lösungsphase überführt werden. Der Aufschluß wird in einem Druckgefäß mit Teflon-

becher durchgeführt, weil so mit der leicht flüchtigen Salpetersäure bei 170 bis 190 °C aufgeschlossen werden kann.

Bislang hat der HNO_3 -Aufschluß als Methode zur Ermittlung pflanzlicher Inhaltsstoffe eine weite Anwendung gefunden. Neuere Untersuchungen von LOFTFIELD und BEESE (1999) zeigen, daß die Methode auch für Mineralböden und Mineralstoffe sinnvoll einsetzbar ist. Der Vergleich dieses Verfahrens mit dem gebräuchlichen Königswasser-Aufschluß zeigt, daß die Resultate ganz überwiegend in enger Relation zueinander stehen. Für die wichtigsten pflanzlichen Nährionen Ca, Mg, K, P, Na, S, Mn, und Fe aus Mineralbodenproben wurde zwischen den beiden Verfahren ein durchschnittliches Bestimmtheitsmaß von 90 % (r^2 von 0,73 bis 0,99) ermittelt.

Die Ergebnisse der chemischen Analyse an den Wegebaumaterialien werden mit den Analysen aus fünf verschiedenen Oberböden (0 – 5 cm) von Buchenwald-ökosystemen verglichen, die von CORNELIUS (1996) ebenfalls im Wege des HNO_3 – Druckaufschlusses erstellt wurden. Diese Bodenuntersuchungen entstammen aus den folgenden Untersuchungsflächen:

1. **Göttinger Wald** / Braunerde Terra fusca auf unterem Muschelkalk (muW2) mit Lößeinwehungen / Hordelymo-Fagetum latyretosum
2. **Kleiner Gudenberg** (bei Zierenberg, Nordhessen) / humose Braunerde auf tertiären Basaltschuttlagen / Melico Fagetum
3. **Solling** / podsolige Braunerde auf mittlerem Buntsandstein der Solling Folge / Luzulo Fagetum typicum
4. **Unterlüß** / podsolige Braunerde auf saaleeiszeitlichem (Drenthe-2) Endmoränenzug / Luzulo Fagetum
5. **Hamburg** (Wohldorfer Wald) / podsolige Braunerde auf sandigem Geschiebelehm über Schmelzwassersanden (weichseiszeitlich) / Luzulo Fagetum

In einer weiteren Untersuchung wurde das Wegebaumaterial im IBW mit Wasser eluiert und die chemischen Bestandteile dieses Eluats untersucht. Bei diesem Verfahren werden Boden bzw. mineralische Proben in destilliertem Wasser über 24 Stunden geschüttelt. Das Feststoff / Wasser Verhältnis ist 1 zu 5, d. h. pro 2 g Feststoffprobe werden 10 ml Wasser verwendet. Der Vergleich zwischen den beiden Aufschlußverfahren informiert über die sofortige Verfügbarkeit einzelner Elemente und Nährionen (Elution), während mit dem Salpetersäureaufschluß annähernd die gesamten Mengen an chemischen Elementen ermittelt werden.

2.6.3. Ergebnisse

HNO₃ – Druckaufschlüsse:

Die mit dem HNO₃-Druckaufschluß analysierten Elementgehalte der mineralischen Wegebaumaterialien und der von CORNELIUS (1996) untersuchten fünf Waldböden sind in Anhang 5 und 6 tabellarisch dargestellt. In dieser tabellarischen Darstellung sind die Proben zunächst nach den Fraktionen < 63µm und 63 bis 1000 µm sowie nach dem Gehalt an Calcium sortiert. Ein Vergleich der Elementarzusammensetzungen der beiden Fraktionen zeigt, daß es beim Abrieb nicht zu einer stofflichen Differenzierung kommt, da die Resultate der beiden Fraktionen einer Herkunft weitgehend übereinstimmen. Dies zeigt darüber hinaus, daß mit dem gewählten Aufschlußverfahren unabhängig von der Korngröße die vorhandenen Silikate aufgeschlossen werden. Die verschiedenen Herkünfte der untersuchten Materialien weisen dagegen sehr große Unterschiede hinsichtlich der aufschließbaren Mengen und der Elementverteilungen auf.

In den beiden folgenden Abbildungen sind die Gehalte der für das Pflanzenwachstum wichtigen Elemente Calcium, Magnesium, Kalium und Phosphor im Waldwegematerial im Vergleich zu den fünf genannten Waldbodentypen dargestellt. Zur besseren Kennzeichnung sind die Punktsymbole für die Einzelwerte bei den Waldböden etwas größer dargestellt:

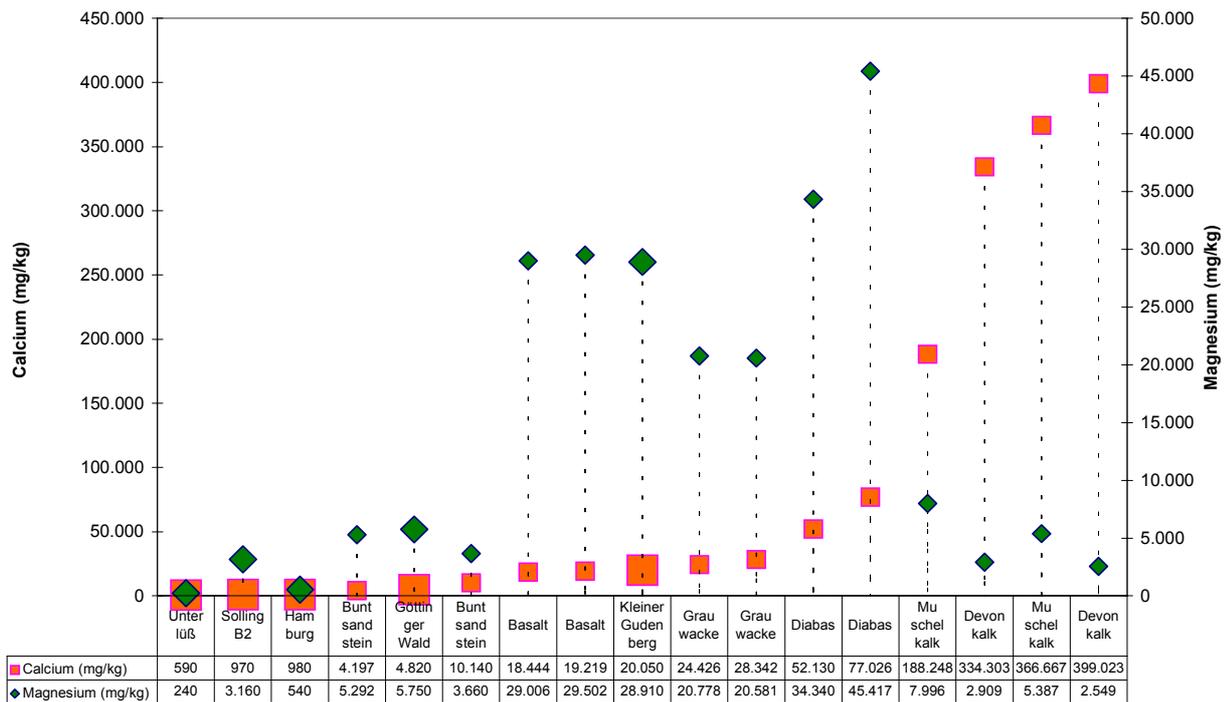


Abbildung 2-15: Ca und Mg Gehalte (mg/kg) im Wegebaumaterial im Vergleich zu den Waldbodentypen (sortiert nach Ca Gehalt)

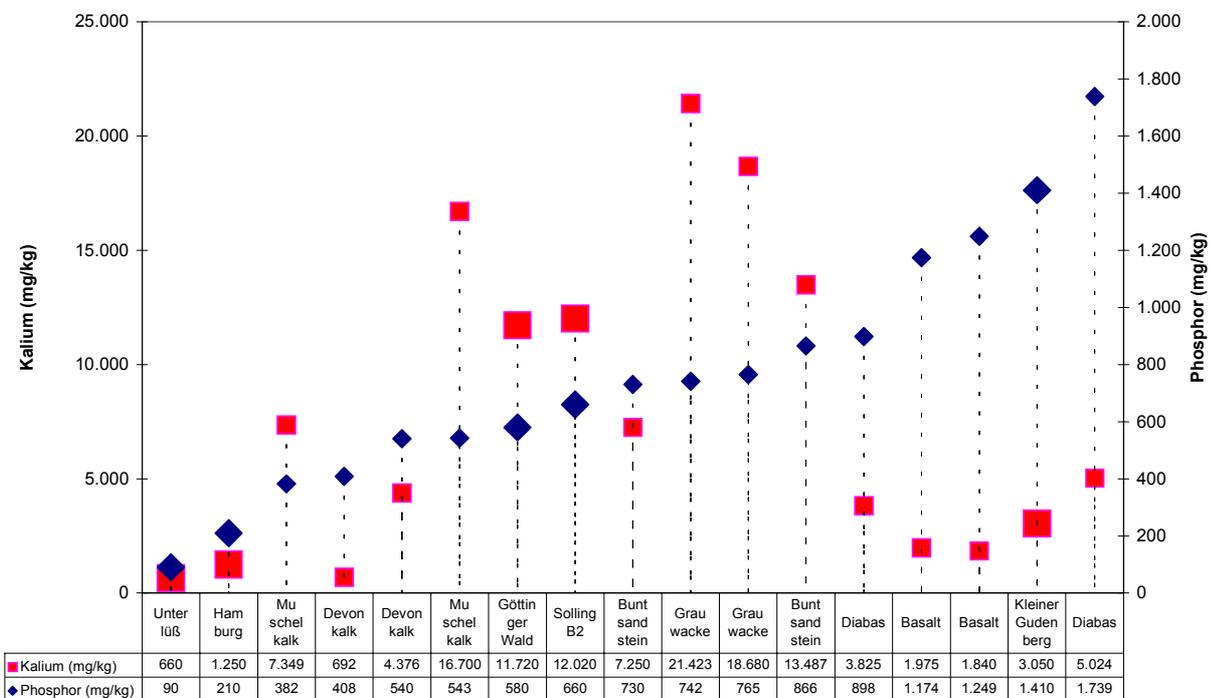


Abbildung 2-16: K und P Gehalte (mg/kg) im Wegebaumaterial im Vergleich zu den Waldbodentypen (sortiert nach P Gehalt)

Zur Beurteilung der gemessenen Elementgehalte der Gesteinsanalysen die Ergebnisse den Resultaten der bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE) im Wald (WOLFF, B., RIEK, W., 1997) gegenübergestellt. Es muß hierbei jedoch betont werden, daß es sich bei den BZE Angaben um die austauschbaren Vorräte handelt. Vom Arbeitskreis Standortkartierung (1996) wurden zur Bewertung der Elementvorräte im Wurzelraum (incl. Humusauflage) die folgenden Wertebereiche in kg/ha festgelegt:

Tabelle 2-7: Bewertung der Ca, Mg und K Vorräte in Waldböden durch den Arbeitskreis Standortkartierung

Bewertung laut AK SK	Wertebereich (kg/ha)			
	Calcium	Magnesium	Kalium	Phosphor
sehr gering	< 200	<50	< 200	keine Angaben
gering	200 – 400	50 – 100	200 – 400	
mäßig	400 – 800	100 – 200	400 – 600	
mittel	800 – 2000	200 – 500	600 – 800	
mäßig hoch	2000 – 4000	500 – 1000	800 – 1200	
hoch	4000 – 8000	1000 – 2000	1200 – 1600	
sehr hoch	> 8000	> 2000	> 1600	

Zu den, in der vorliegenden Arbeit untersuchten Bioelementen liefert die BZE auf der Grundlage von annähernd 1200 Bodenanalysen die folgenden Verteilungen:

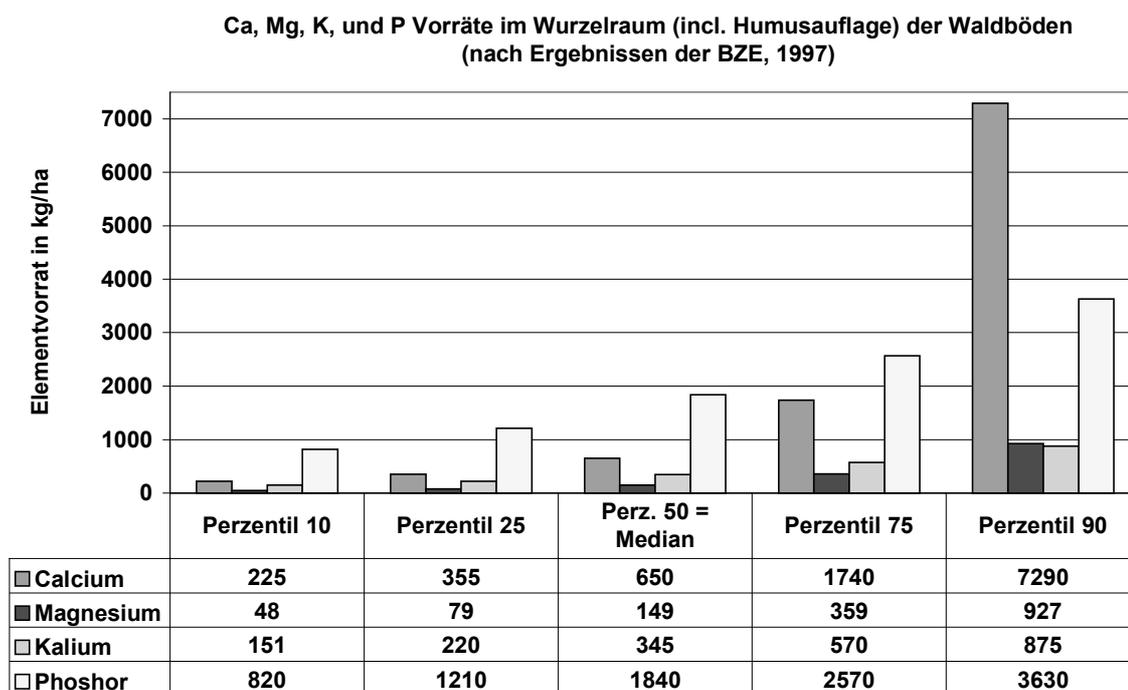


Abbildung 2-17: Austauschbare Elementvorräte in Waldböden nach Ergebnissen der BZE

Die Aussagen der BZE zu den untersuchten Bioelementen sind im Folgenden *kursiv* dargestellt. Die chemischen Formeln sind immer Summenformeln:

Calciumgehalt: Die Ca-Gehalte der Wegebaumaterialien schwanken in Abhängigkeit der Herkunft und Entstehung in einem sehr weiten Rahmen von rd. 4 g/kg beim Buntsandstein aus dem Solling bis zum Devonkalk aus Münchehof mit einem 100-fach höheren Ca-Gehalt. Alle untersuchten Kalke, mit Ausnahme einer verunreinigten Muschelkalkprobe (Vorabsiebung) haben hohe Ca-Gehalte von 330 bis zu 400 g/kg. Die Oberböden der Buchenwälder haben vergleichsweise geringe Ca-Gehalte von ca. 0,6 bis 1 g/kg. Beachtenswert ist der Ca-Gehalt des Basaltstandortes „Kleiner Gudenberg“ von 20 g/kg, der damit etwa 5x mehr Ca-Gehalt aufweist, als der im Oberboden bereits deutlich verarmte Muschelkalk-Standort im Göttinger Wald. Ursache dafür ist die Entstehung des Muschelkalks, bei der bereits stark verwitterte Tone und Schluffe nach langem Transport im Meer sedimentierten. Dagegen weisen Basalte und besonders die Diabase hohe Ca-Werte auf, was sich auch in den Böden, die sich auf ihnen entwickelt haben, widerspiegelt. Vergleichsweise gut versorgt sind auch die Grauwacken, mit ihrem hohen Anteil an „dunkel“ gefärbten Mineralen.

Ein Viertel der BZE-Standorte weisen im Wurzelraum (0 – 60 cm) nur sehr geringe bis geringe (< 400 kg/ha) Ca-Vorräte auf. Anspruchsvollere Bestandestypen können durch die geringen Ca-Vorräte in ihrem Wachstum limitiert werden. Lediglich 15% der BZE-Standorte – mit Ausnahme der carbonatbeeinflussten Böden – haben eine besser als mittelmäßig (> 2000 kg/ha) zu beurteilende Ca-Versorgung.

Magnesiumgehalt: Die Wegebaumaterialien Diabas, Basalt und Grauwacke zeichnen sich durch hohe Mg-Gehalte zwischen 20 und 45 g/kg aus. Der auffällig hohe Mg-Gehalt des Diabas ergibt sich aus dem hohen Anteil an Augit $(Ca,Mg,Fe^{II},Fe^{III},Ti,Al)_2[(Si,Al)_2O_6]$, einem Kettensilikat sowie dem zur Olivin-Gruppe gehörenden Inselsilikat Forsterit $Mg_2[SiO_4]$ (MATTHES, 1993). Augit und Olivin gehören ebenfalls zu den sog. Hauptgemengteilen¹⁴ des Basalts, der im Nebengemenge zudem Magnesium im Biotit (Glimmer, zu den Schichtsilikaten zählend) $K(Mg,Fe^{II})_3[(OH)_2/(Al,Fe^{III})]Si_3O_{10}$ und in Hornblenden $(Ca,Na,K)_2(Mg,Fe,Al)_5[(OH,F)/(Al,Si)Si_3O_{11}]_2$ enthält. Diese drei letztgenannten Gesteine stellen auch hinsichtlich ihrer Mg-Ausstattung Besonderheiten dar, mit Gehalten die weit über denen

¹⁴ Hauptgemengteile = Minerale die den Charakter des Gesteins bestimmen. Nebengemengteile = Minerale die mengenmäßig gering in jedem Gestein vorkommen (KIRSCH, 1965)

der untersuchten Kalke liegen. Sie werden nur von Dolomiten $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ übertroffen, die hier nicht untersucht wurden.

Bemerkenswert ist beim Vergleich der Waldstandorte der Mg-Gehalt im Oberboden des Basaltstandortes „Kleiner Gudenberg“ der auf dem Niveau des unverwitterten Wegebau Basaltes liegt. Extrem gering sind die beiden pleistozänen Standorte mit 0,2 bis 0,5 g/kg mit Mg versorgt. Auch hier gibt es Unterschiede von bis zu zwei Zehnerpotenzen im Elementgehalt zwischen (typisch) schlecht versorgten Waldstandorten und den magnesiumreichen Wegebau-Gesteinen.

Nach den Angaben der BZE befinden sich, bei einer Betrachtung der Mg-Vorräte in der Humusaufgabe und im Wurzelraum (0 – 60 cm), etwa ein Drittel der Standorte mit geringen und sehr geringen Mg-Vorräten (< 100 kg/ha) im Bereich einer potentiellen Mg-Mangelsituation. Ein weiteres Drittel der Standorte ist nur mäßig (< 200 kg/ha) mit Magnesium ausgestattet.

Kaliumgehalt: Während die, mit hohem Mg-Gehalt ausgestatteten Gesteine Basalt und Diabas einen nur geringen Kaliumgehalt besitzen, sind es vor allem Grauwacke und Buntsandstein, die diesbezüglich die höchsten Werte zeigen. Die Muschelkalkprobe mit 16.700 mg/kg Kalium ist die verunreinigte Probe (Vorabsiebung), die relativ geringe Ca-Anteile besitzt. Besonders hervorzuheben ist der gute potentielle K-Vorrat der Waldböden „Göttinger Wald“ und „Solling“.

Der hohe Kaliumgehalt der Grauwacke wird durch den hohen Anteil an Gerüstsilikaten der Feldspatklaste Orthoklas $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ begründet. Die Harzer Grauwacken enthalten einen hohen Anteil von etwa 20 – 30 % Feldspat (REINHARDT, 1998).

Die Ergebnisse der BZE zeigen, daß im Wurzelraum und der Humusaufgabe mit durchschnittlich (Median) 345 kg/ha weniger Kalium als in der durchschnittlichen Biomasse eines Waldbestandes (etwa 400 kg/ha) zu finden ist. Es befinden sich über die Hälfte der Standorte bei geringen bis sehr geringen Vorräten im Wurzelraum in einer potentiellen K-Mangelsituation. Es wird jedoch darauf verwiesen, daß auch auf Boden mit guter Versorgung die K-Aufnahme gehemmt sein kann. Dies gilt vor allem bei guter Ca-Versorgung (K-Ca-Antagonismus) und bei lehmigen aggregierten Böden.

Phosphorgehalt: Die höchsten Phosphorgehalte zeigen die Gesteine Diabas und Basalt sowie der entsprechend gut versorgte Waldstandort „Kleiner Gudenberg“ (Basaltverwitterungsboden). Ursächlich ist der hohe Anteil des phosphatischen Minerals

Apatit $\text{Ca}_5[\text{F},(\text{OH}),\text{Cl}/(\text{PO}_4)_3]$ in diesen Gesteinen. Die noch vergleichsweise hohen Phosphorgehalte von Buntsandstein und Grauwacke, beides diagenetisch verfestigte Sedimentgesteine, die zur Gruppe der Psammite (überwiegend aus Sand 0,063 bis 2 mm bestehend) gehören, werden ebenfalls durch kristallisierte Einschlüsse von Apatit bedingt (MATTHES, 1993).

Phosphor liegt im Waldböden in anorganischen und organischen Bindungsformen vor. Insbesondere im sauren und im neutral bzw. alkalischen Milieu kommt es zur Bildung sehr schwer löslicher Al- und Fe-Phosphate bzw. Calciumphosphaten (Carbonatpufferbereich). Die beste Zugänglichkeit für Pflanzen besteht im mittleren pH-Bereich (pH 4 –6) in dem ein hoher Anteil des Bodenphosphats austauschbar an Sesquioxide gebunden ist. Die P-Vorräte betragen in der Auflage im Durchschnitt (Median) lediglich 42 kg/ha. Demgegenüber sind im Wurzelraum im Mittel 1840 kg/ha Phosphor fixiert. Dies entspricht mehr als dem 40-fachen der Auflagevorräte. Hierin zeigt sich, daß das im Mineralboden gebundene, anorganische Phosphat mengenmäßig eine erhebliche Rolle für den gesamten P-Vorrat im Wurzelraum spielt.

Extraktion mit Wasser:

Die Analyseergebnisse (vgl. Anhang 7) des wässrigen Eluats der Wegebau-materialien werden in den beiden folgenden Abbildungen mit dem Ergebnis des HNO_3 -Druckaufschluß verglichen. Bei beiden Materialien handelt es sich wiederum um den Probenanteil < 63 μm . Somit wird ein Vergleich der unmittelbaren Verfügbarkeit der wichtigen Elemente Ca, Mg, K, und P mit den potentiell verfügbaren Massen dieser Elemente in den Gesteinen erstellt. Wegen der deutlichen quantitativen Unterschiede ist es notwendig, eine logarithmierte Darstellungsform zu verwenden:

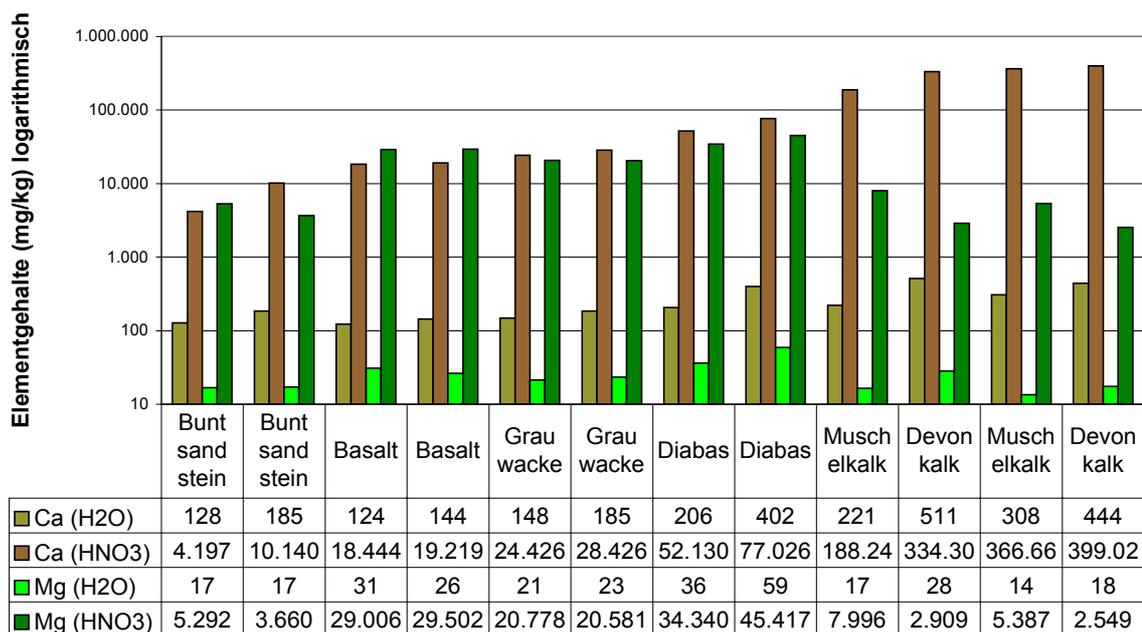


Abbildung 2-18: Vergleich der wässrigen Eluate von Ca und Mg mit dem HNO₃-Druckaufschluß

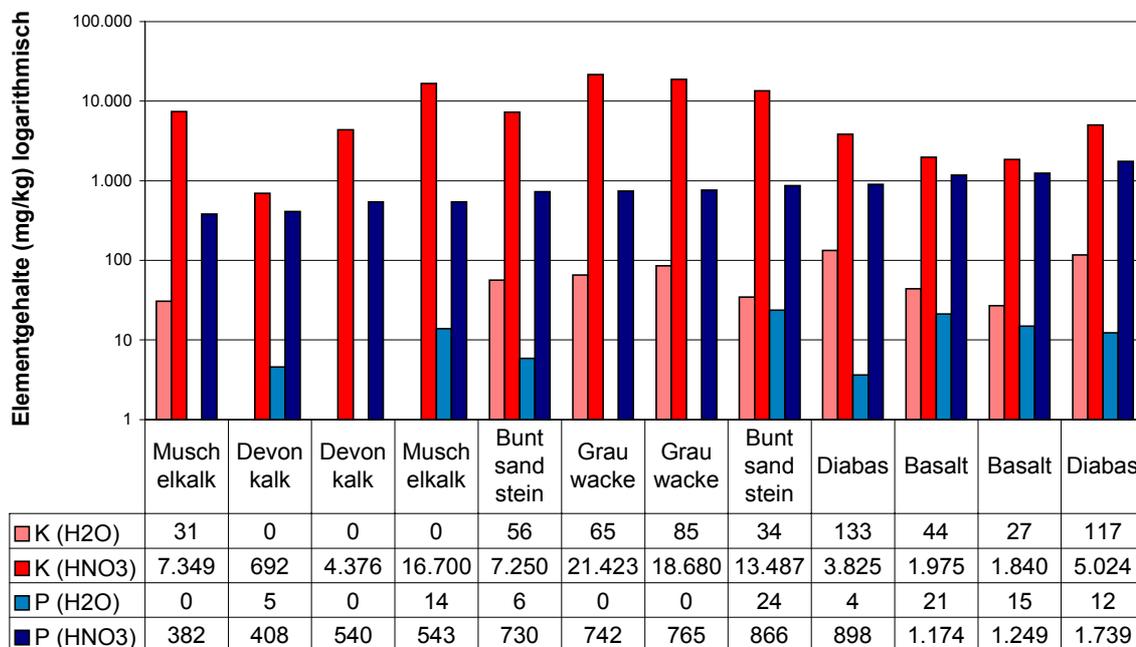


Abbildung 2-19: Vergleich der wässrigen Eluate von K und P mit dem HNO₃-Druckaufschluß

Der Vergleich zwischen dem wässrigen Eluat und dem Salpetersäureaufschluß zeigt, daß die Menge an kurzfristig verfügbaren Nährelementen sehr deutlich unter den Elementpotentialen der Wegebaugesteine liegt. Sehr häufig liegt der potentielle Elementgehalt 100- bis 1000-fach über der kurzfristig im Versuch auswaschbaren Menge.

Der Vergleich zeigt auch, daß keine engen Bezüge zwischen den potentiell verwitterbaren Elementvorräten und denen vorhanden sind, die mit Wasser extrahierbar sind. Mineralarten, Kristallisationsgrad, spezifische Oberfläche, Verunreinigungen der Minerale sind nur einige Faktoren, die die aktuelle Löslichkeit bestimmen. Diese Vielfalt der Einflußgrößen erschwert die Ermittlung der realen Verwitterungsraten der von den Wegen in die benachbarten Böden gelangenden Wegebaumaterialien. Im Folgenden soll daher lediglich eine grobe Abschätzung der verlagerten Materialien und ihrer Inhaltsstoffe vorgenommen werden, um das Ausmaß der möglichen Veränderungen zu verdeutlichen.

2.6.4. Diskussion

Betrachtung der potentiell verfügbaren Bioelemente:

Mit Hilfe einer einfachen Modellrechnung kann, am Beispiel des Elements Calcium, die Depositionsrates im Umfeld eines mit einer Deckschicht aus Kalkschotter versehenen Weges kalkuliert werden. Im Sinne einer kalkulatorischen Vorsicht werden die Werte nach unten gerundet. Die folgenden Annahmen werden gemacht:

1. Der jährliche Verschleiß der Deckschicht auf einem ungebundenen Waldweg kann, bezogen auf die Waldfläche, wie in einer Kalkulation in Kap. 2.1.4 dargestellt wurde, mit etwa **270 kg x ha⁻¹ x a⁻¹** beziffert werden.
2. Von dieser Materialmenge werden etwa 40 % bis 60 %, durchschnittlich 50 % durch Niederschläge in die Vorflut ausgetragen. Die andere Hälfte, etwa **110 bis 160 kg x ha⁻¹ x a⁻¹** unterliegen der Erosion durch Wind und Verwehungen. Dieser Annahmewert ist im Sinne einer kalkulatorischen Vorsicht sehr gering gewählt. Die Verteilung der Staubemissionen an Wegen in aeolische und aquatische Anteile wurde bislang nicht empirisch untersucht (WINKLER, 1992).

3. Nach Untersuchungen von TAMM und TROEDSSON (1952) sowie anhand der Messung der Oberboden pH-Werte in Harz, Solling und Bramwald (Kap. 1.2) kann weiterhin unterstellt werden, daß rd. 90% des Feinmaterials (ca. 100 bis 140 kg·x ha⁻¹·x a⁻¹) nach Aufwirbelung und Windtransport im Umfeld von bis zu 10 m beidseitig der Waldwege abgelagert wird, bzw. hier mit dem Niederschlagswasser in den Boden gelangt.
4. Die Erschließungsdichte an Waldwegen mit pflegbaren ungebundenen Decken beträgt im Bergland rd. 20m pro ha.

Somit werden 90% des äolisch transportierten Feinmaterials auf einer Fläche von etwa 400 m² je ha beidseitig der Wege abgelagert. Die Ausbringungsmenge von 100 bis 140 kg x ha⁻¹ x a⁻¹ auf der Bezugsfläche von 400m² entspricht einer Gabe von **2,5 bis 3,5 t x ha⁻¹ x a⁻¹**.

Wie die chemische Analyse gezeigt hat, beträgt der Elementgehalt des Wegematerials im Falle von Muschelkalk oder Devonkalk rd. 330 bis 400 kg elementares Calcium pro t Kalk. Somit wird nach dieser Kalkulation eine äquivalente Menge von **0,8 bis 1,4 t x ha⁻¹ x a⁻¹ elementares Calcium** in das Umfeld der Wege verlagert.

Bei einer üblichen kompensatorischen Waldkalkung mit einer Ausbringungsmenge von 3 t x ha⁻¹ kohlenstoffsaurem Kalk (42 – 53, Ø 47% CaO ¹⁵) beträgt die ausgebrachte Menge an elementarem Calcium etwa 1t x ha⁻¹. Kompensationskalkungen werden üblich in einem Turnus von 10 Jahren durchgeführt. Somit werden hierbei jährlich rd. 100kg x ha⁻¹ x a⁻¹ ausgebracht. Das bedeutet, aus Staubemission von Waldwegen mit einer Kalkdeckschicht kann im Wegeumfeld mit 0,8 bis 1,4 t x ha⁻¹ x a⁻¹ die **8 bis 14-fache Menge an elementarem Calcium als bei einer üblichen Kompensationskalkung** auf den Seitenstreifen und den angrenzenden Waldboden gelangen.

Die maximale Auflösung von oberflächlich ausgebrachtem Kalk (Calcit und Dolomit) ist wegen des, bei diesem Vorgang erforderlichen Verbrauchs an H⁺-Ionen begrenzt. In einer theoretischen Herleitung konnte PRENZEL (1985) zeigen, daß neben den bekannten Faktoren Temperatur, CO₂-Partialdruck und pH-Wert des Lösungsmediums (= Verfügbarkeit an H⁺-Ionen) unter den besonderen Verhältnissen im Freiland bzw. Wald auch die jährliche Niederschlagsmenge einen erheblichen Einfluß auf die Lösungsrate hat. Bei dolomitischen Kalken beeinflusst zudem die Bildung von anorganischen Komplexen die Lösungsrate. Unter der Annahme von ex-

¹⁵ Calcium-Gehalte in Kalken werden historisch bedingt meist in %-CaO angegeben. Die Umrechnung von CaO auf Ca erfolgt über das Molgewicht (Faktor 0,715).

tremen Bedingungen, nämlich einer durchschnittlichen Temperatur von 10°C, 1000 mm Jahresniederschlag mit einem pH-Wert von 3 (saurer Regen) und einem CO₂-Partialdruck, der mit 0,3 % weit über dem Wert der freien Atmosphäre liegt, errechnet PRENZEL eine maximale Auflösung von 20 kmol (eq)/ha. Dies entspricht etwa 1 t Kalk x ha⁻¹ x a⁻¹. Eine t Kalk enthält etwa 330 kg elementares, überwiegend karbonatisch gebundenes Calcium. In der Realität liegt die Lösungsrate wohl immer unter diesem Maximalwert.

Somit kann die Menge an karbonatisch gebundenem Calcium, die bei einer üblichen Kompensationskalkung oberflächlich ausgebracht wird, nämlich ca. 100 kg x ha⁻¹ x a⁻¹ gelöst werden. Dies bestätigen auch die Erfahrungen mit der Waldkalkung. Eine Auflösung von bis zu 0,8 bis 1,4 t x ha⁻¹ x a⁻¹ überwiegend karbonatisch gebundenem Calcium, wie sie in der oben dargestellten Modellkalkulation als mögliche Emissionsmenge in das Umfeld eines mit Kalk gedeckten Weges verlagert werden können, ist unter Freilandbedingungen chemisch nicht möglich! Dies ist im Einklang mit den von GLOWIENKA (1994) und WAGNER (1997) gefundenen pH-Werten von > 7, teilweise bis zu pH 8 im Bereich der Wegerandstreifen bzw. auf der Bankette und am angrenzenden Waldrand, die ein eindeutiges Indiz für die Anwesenheit von freiem Kalk sind. In Einzelfällen können somit in direkter Nachbarschaft zu Kalkschotterwegen Zustände wie bei Kalkverwitterungsböden auftreten. Ein Einfluß auf die Vegetation ist zu erwarten und erklärbar.

Für den Kalk kann, wie die Herleitung von PRENZEL (1985) gezeigt hat, eine Lösungs- bzw. Verwitterungsrate von 10 bis max. 20 kmol x ha⁻¹ x a⁻¹ unterstellt werden. Nach Untersuchungen und Kalkulationen von ULRICH (Forstliche Standortsaufnahme, 1996) liegen die Verwitterungsraten in Böden unterschiedlicher Ausgangsgesteine um etwa Faktor 10 bis 20 unter diesem Wert. So nennt ULRICH für Böden aus Basalt eine jährliche Silikatverwitterungsrate von etwa 2 kmol x ha⁻¹ und für Böden aus Grauwacke und Buntsandstein eine Rate von 0,2 kmol x ha⁻¹ x a⁻¹. Diese Verwitterungsraten sind in Kalkulationen zur möglichen Nachlieferung von Ionen im Umfeld von Wegen aus diversen Gesteinen zukünftig zu beachten.

Durch die vorliegenden Materialuntersuchungen und die Kalkulation der Emissionsmenge kann am Beispiel des Elementes Calcium gezeigt werden, daß es im Umfeld der Wege zu Depositionen an Elementen kommen kann, die deutlich über der Verwitterungsrate von Kalken oder Primärsilikaten liegt und somit letztlich nicht mehr von der Vegetation aufgenommen werden kann. Analoge Kalkulationen lassen sich für andere Gesteinsarten mit hohen Gehalten an Nährelementen, etwa Diabas

mit einem sehr hohen Anteil von etwa 40 g/kg Magnesium, unter Beachtung der Verwitterungsraten durchführen.

Betrachtung der unmittelbar verfügbaren Bioelemente:

Mit den Ergebnissen der Wasserextraktanalyse läßt sich die folgende Hochrechnung machen: Unter der gleichen Annahme einer Deposition von jährlich 270 kg Gesteinsmehl aus Wegebaumaterial auf einer Fläche von 400 m² errechnet sich ein Materialeintrag von 0,675 kg/m². Eine Reduzierung um mit dem Wasserabfluß ausgetragene Nährstoffe, wird nicht vorgenommen, da es sich um mobile, unmittelbar pflanzenverfügbare Bioelemente handelt. Bei einer beispielhaft gelösten Menge von 10 mg/kg eines Elements sind das 0,675 mg/m². Diese Menge wurde im Versuch in 5 l Wasser gelöst. Das Verhältnis von Gestein zu H₂O war im Versuch 1/5. Bei einer unterstellten Niederschlagsmenge von 500 mm (800 mm durchschnittlicher Jahresniederschlag und 300 mm Interzeptionsverlust), das sind 500 l/m², und Einstellung eines Gleichgewichts ergibt sich eine gelöste Menge von 67,5 mg/m², die jährlich zugeführt werden. Sofern 100 mg/kg eines Elements gelöst wurden somit das 10fache, bei 500 mg/kg das 50fache.

Rechnet man diese Werte auf den Hektar um, so ergeben sich bei einem:

- ⇒ eluierbaren Gehalt von 10 mg/kg gelöste Mengen von 0,675 kg x ha⁻¹ x a⁻¹
- ⇒ " 100 mg/kg " 6,75 kg x ha⁻¹ x a⁻¹
- ⇒ " 500 mg/kg " 33,75 kg x ha⁻¹ x a⁻¹.

Diese Mengen verdeutlichen, daß auch bei einer Betrachtung der mobilen Vorräte erhebliche Mengen an Bioelementen in gelöster Form aus den Wegebaugesteinen bereitgestellt werden können. Wie ein Vergleich mit der jährlichen Aufnahme des Waldes (Tab. 2-8) zeigt, kann im Umfeld der Wege die unmittelbar pflanzenverfügbare Nachlieferung von Nährelementen die gleiche Größenordnung wie die im Zuwachs physiologisch fixierte Aufnahme, oder wie die Aufnahme an sich, erreichen.

Tabelle 2-8: Jährliche Elementaufnahme typischer Waldgesellschaften (BEESE, 2000)

Baumart, Ort, Standort	Verwendung	Elementaufnahme in kg x ha ⁻¹ x a ⁻¹		
		Calcium	Magnesium	Kalium
Buche, GÖ.-Wald Muschelkalk	Zuwachs	21,8	1,8	6,3
	Aufnahme	102,0	8,4	48,9
Buche, Harste Silikat (Löß)	Zuwachs	14,8	2,3	3,5
	Aufnahme	68,3	7,5	28,5
Fichte, Solling Buntsandstein	Zuwachs	8,8	1,2	6,6
	Aufnahme	30,1	2,8	32,1

2.7. Bewertung der Ergebnisse und Folgerungen für den Waldwegebau

Im Rahmen einer effizienten Forstwirtschaft stellen Waldwege die einzige Möglichkeit zur Erschließung der Bestände dar. Neben dieser notwendigen und sinnvollen Funktion kommt es jedoch zu vielfältigen Auswirkungen auf das angrenzende Ökosystem, die je nach Wegetyp sehr unterschiedlich sein können. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, daß standortfremde Wegebaumaterialien einen deutlichen Einfluß auf den Stoffhaushalt und die Vegetation der angrenzenden Bestände haben können, der aus naturschutzfachlicher Sicht nicht wünschenswert ist, sofern das Leitbild dieser Bewertung die möglichst unbeeinflusste Entwicklung des natürlichen Artenspektrums des Waldstandortes ist. Bei der künftigen Anlage und Erhaltung von Forstwegen sollte daher untersucht werden, ob auf Material zurückgegriffen werden kann, das in seiner chemischen Zusammensetzung möglichst weitgehend mit dem autochthonen Ausgangssubstrat übereinstimmt und auch den technischen Anforderungen für den Bauzweck entspricht. Insbesondere sollte in Gebieten, in denen die Belange des Naturschutzes Vorrang haben, etwa in Naturschutzgebieten, der Einsatz von basischem und vor allem kalkreichem Material auf Standorten mit basenarmen Ausgangssubstraten besonders kritisch hinterfragt und nach Alternativen gesucht werden.

Geht man von der Vorstellung aus, daß der Wegebau keine chemischen Veränderungen in den benachbarten Waldböden verursachen darf oder sollte, so dürfte nur Wegebaumaterial eingesetzt werden, das der chemischen Ausstattung der Böden entspricht oder ähnlich ist. Mit zunehmender Differenz zwischen dem Wegebaumaterial und den Böden muß längerfristig mit einer Veränderung des chemischen Zustandes der benachbarten Böden gerechnet werden. Wie schnell diese Änderungen auftreten, hängt von der Körnung, der mineralogischen Zusammensetzung des Abriebs und vom Grad der Versauerung der Böden ab. Dies ist im Einzelfall sehr schwer zu quantifizieren. Will man dagegen die notwendigerweise anzulegenden Wege nutzen, um gleichzeitig Vielfalt in den Wäldern zu schaffen, so sollten gezielt stark von den Böden unterschiedliche Materialien verwendet werden, da auf diese Weise eine partielle Regeneration von versauerten und nährstoffverarmten Waldböden erreicht werden kann. Weitere Folgerungen siehe Diskussion in Kap. 5.

3. Betriebswirtschaftliche Aspekte der Weegerhaltung

3.1. Stand der Kenntnisse

In der Literatur des Waldwegebaues war bis in die 70er Jahre dieses Jahrhunderts die Meinung vorherrschend, mit einer Steigerung des Ausbaustandards der Waldwege ließen sich die Erhaltungskosten dauerhaft auf einem niedrigen Niveau halten. So bemerkt HIRT im Jahr 1977 „die höchsten Baukosten verursacht die Betonplatte; dagegen ist ihr Unterhalt verschwindend klein“. Die Zusammenhänge zwischen Ausbaustandard und Kosten werden, wie in der folgenden Abb. 3-1 dargestellt, in einen grundsätzlich unbestrittenen Zusammenhang gebracht:

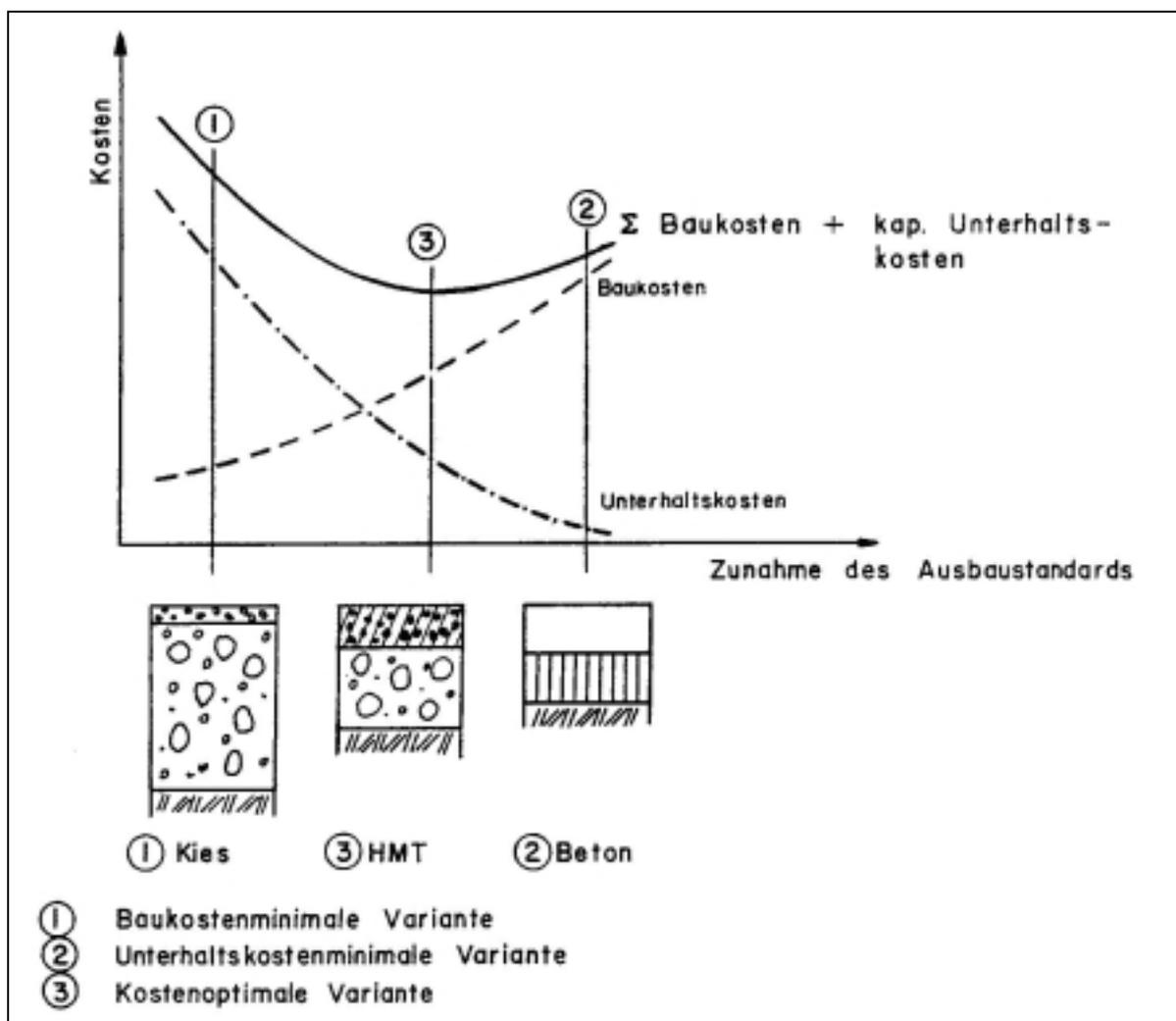
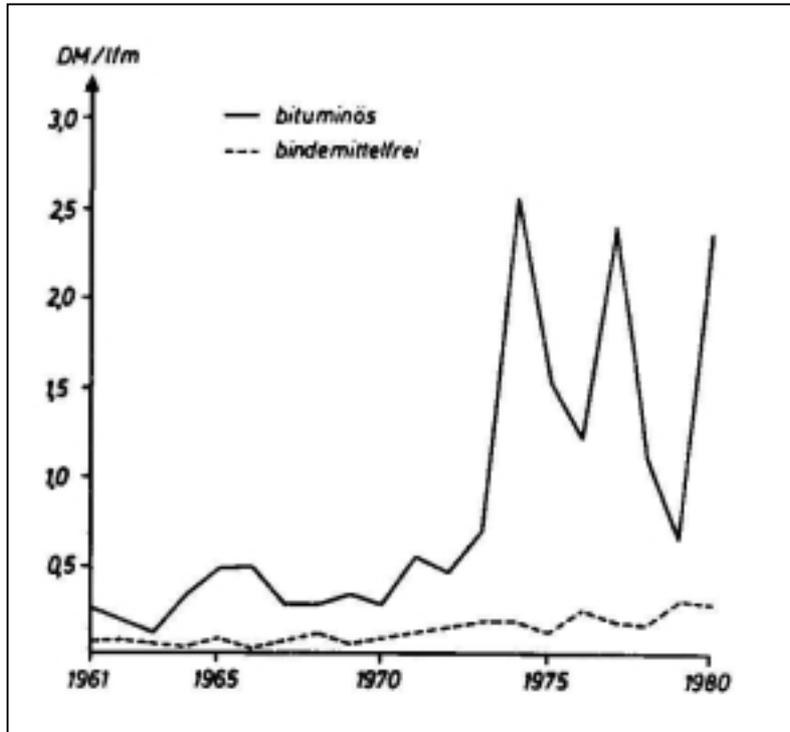


Abbildung 3-1: Ausbaustandard und Kosten aus Hirt (1977)

Beginnend in den 70er Jahren traten an den vergleichsweise jungen Waldwegen mit gebundenen Decken Schäden auf (SCHULTZENDORFF, 1985). Diese waren nur mit einem sehr hohen Kostenaufwand und tlw. unter Hinzuziehung spezialisierter Firmen zu beheben (Abb. 3-2). Die Schäden, sowohl an bitumen- wie auch hydraulisch gebundenen Decken



und auch an Waldwegen aus Betonplatten, die sich auf der Tragschicht verschoben oder vertikal versetzt hatten, waren in den überwiegenden Fällen auf einen zu wenig tragfähigen und nicht frostsicheren Unterbau zurückzuführen (SCHULTZENDORFF, 1985, Piest, 1990, 1997). Somit mußte, aus den Erfahrungen der letzten 25 Jahre,

Abbildung 3-2: Erhaltungskosten im Wegenetz des südniedersächsischen Berglandes (aus SCHULTZENDORFF 1985)

der von Hirt dargestellte, grundsätzlich richtige Zusammenhang für die speziellen Verhältnisse des Waldwegebaues korrigiert werden. Eine Minimierung der Erhaltungskosten kann offensichtlich nur mit deutlich aufwendigeren, frostsicheren Unterbauten und somit höheren Baukosten, bzw. mit einer sehr steilen Baukostenkurve (in Abb. 3-1) erreicht werden. Vor dem Hintergrund der geringen Wirtschaftserlöse der Forstwirtschaft wird eine weitere Steigerung der Baukosten aus betriebswirtschaftlichem Kalkül nicht akzeptiert (JANSEN, 1990).

Sehr umfassende Untersuchungen zum Erhalt ländlicher Wege wurden von SCHMUCK und KRAUSE (1984) in Bayern durchgeführt. In der Einleitung des „Technischen Teils“ (Kap. 1.1) sind die für den Waldwegbau übertragbaren und bedeutsamen Ergebnisse dieser Autoren dargestellt.

Im Folgenden sollen anhand der dynamischen Investitionsrechnung sowie auf der Basis aktueller Kostenwerte ein Vergleich von gebundenen und ungebunden Bauweisen vorgenommen, sowie gezeigt werden, welche betriebswirtschaftliche Bedeutung mit der Nutzungsdauer ungebundener Wegedecken verbunden ist.

3.1.1. Methodik: Die Investitionsrechnung im Waldwegebau

Mit Hilfe der dynamischen Investitionsrechnung, in Folge die Kapitalwert- und Annuitätenmethode, wie sie von KROTH (1973) mit Bezug auf den Waldwegebau ausführlich dargelegt und vom Verfasser um einen Bauteuerungsfaktor erweitert wurde, läßt sich eine Vergleichsrechnung unterschiedlicher Bauvarianten aufstellen. Als theoretische Grundlage der Berechnungen dienen die folgenden Gleichungen:

Gleichung 3-1:
$$KD = K_0 \cdot r$$

Gleichung 3-2:
$$K_0 = K_{neu} + \sum_{t=1}^n \frac{k \cdot 1,0i^t}{1,0p^t}$$

Gleichung 3-3:
$$r = \frac{1,0p^n \cdot 0,0p}{1,0p^n - 1}$$

hierin bedeuten:

KD	Kapitaldienst für eine Investition (Annuität)
K_0	Kapitalwert (Vorwert) der Investition
K_{neu}	Neubaukosten der jeweiligen Bauausführung (DM/m)
k	Jährliche Kosten für die Wegeerhaltung (DM/m)
r	Rentifizierungsfaktor zur Umwandlung eines Kapitalwertes in eine zeitlich begrenzte „Rente“ (= Kapitaldienst aus Abschreibung und Verzinsung) von jährlich gleicher Höhe (= Annuität)
p	Kalkulationszinsfuß in Prozent ¹⁶
i	Bauteuerungsrate (Konstanz erwartet) in Prozent
n	Abschreibungszeitraum (linear) in Jahren (30 Jahre für Waldwege von Finanzbehörden anerkannt).

¹⁶ Der Zinsfaktor $q = 1 + \frac{p}{100}$ wird aus historischen Gründen bei Zinssätzen unter 10% forstüblich $1,0p$ (über 10% = $1, p$) geschrieben.

3.2. Vergleich der gebundener und ungebundener Bauvarianten

3.2.1. Kosten des Wegeausbaus

Im norddeutschen Raum sind zur Zeit keine repräsentativen Angaben über die Neubau- bzw. Ausbaurkosten von Waldwegen mit unterschiedlichen Deckenausführungen verfügbar, da der Wegeneubau und der Ausbau mit gebundenen Decken keine quantitative Bedeutung mehr hat. Aus dem Schwarzwald, wo verstreut liegende Gehöfte mit tlw. aufwendigen Hofzufahrten erschlossen werden, liegen jedoch neuere Werte von Ausbaumaßnahmen aus Unternehmertätigkeit vor. Nach Angaben aus dem Amt für Flurneueordnung und Landentwicklung Freiburg (BIELKA, 1998) lassen sich die Kosten für verschiedene Bauweisen von Hofzufahrten, die durch Wälder führen, am besten als Ergebnis von Mischkalkulationen wiedergeben. Ursächlich hierfür sind unterschiedliche Ausgangsbedingungen bei Baubeginn (lediglich Planum oder aber schadhafte bindemittelfreie Tragschicht vorhanden). Die Kosten für die Bauweisen belaufen sich dort etwa wie folgt:

Tabelle 3-1: Kosten verschiedener Bauweisen nach Mischkalkulationen (BIELKA, 1998)

Bauweise	Unterbau (Tragschichtbau, bzw. Tragschichtsanierung, Frostschutz- und Sauberkeitsschichten)	Kosten für Deck- bzw. Tragdeck-schichtbau	Gesamtkosten
Asphalt	~175,- DM/m	~45,- DM/m	~220,- DM/m
HGM ¹⁷	~160,- DM/m	~60,- DM/m	~220,- DM/m
Bindemittelfrei	~100,- DM/m	~20,- DM/m	~120,- DM/m

Somit kann die **Differenz der Baukosten zwischen den gebundenen und ungebundenen Ausführungen mit etwa 100,- DM/m beziffert** werden.

Nach Einschätzung hiesiger Wegebaupraktiker (HERWIG, 1998) liegen die in Tab. 3-1 dargelegten Kosten auf einem insgesamt sehr hohen Niveau. Die Kostendifferenz von rd. 100,- DM/m zwischen der gebundenen und ungebundenen Ausführung wird jedoch auch nach den örtlichen, norddeutschen Erfahrungen bestätigt.

¹⁷ HGM = Hydraulisch gebundenes Mineralstoffgemisch. Eine magerbetonähnliche Ausbauvariante, die z. Zt. im Schwarzwald erprobt wird.

3.2.2. Kosten der Weegerhaltung

Repräsentative Angaben zu den Kosten von Weegerhaltungsmaßnahmen wurden am Beispiel des niedersächsischen Berglandes von BERTRAM (1997) zusammengestellt. In dieser Arbeit wird in einem Langzeitvergleich über 12 Jahre die Kostenentwicklung in zwei Forstinspektionen verglichen, in denen die Erhaltungsmaßnahmen unterschiedlich organisiert sind. Die untersuchten Forstinspektionen im Solling und im südniedersächsischen Bergland haben ungebundene Wege auf rd. 1.500 km Länge, die eine Waldfläche von etwa 55.000 ha erschließen.

Die von BERTRAM beschriebenen durchschnittlichen Kosten für die Weegerhaltung liegen zwischen 0,77 und 0,91 im Mittel bei ca. 0,85 DM pro Meter und Jahr. Wenn, wie üblich auch die Instandsetzungen nach Manövern eingerechnet werden, liegen sie zw. 0,91 und 1,08 im Mittel bei **ca. 1,00 DM pro m und Jahr** (Abb. 3-3):

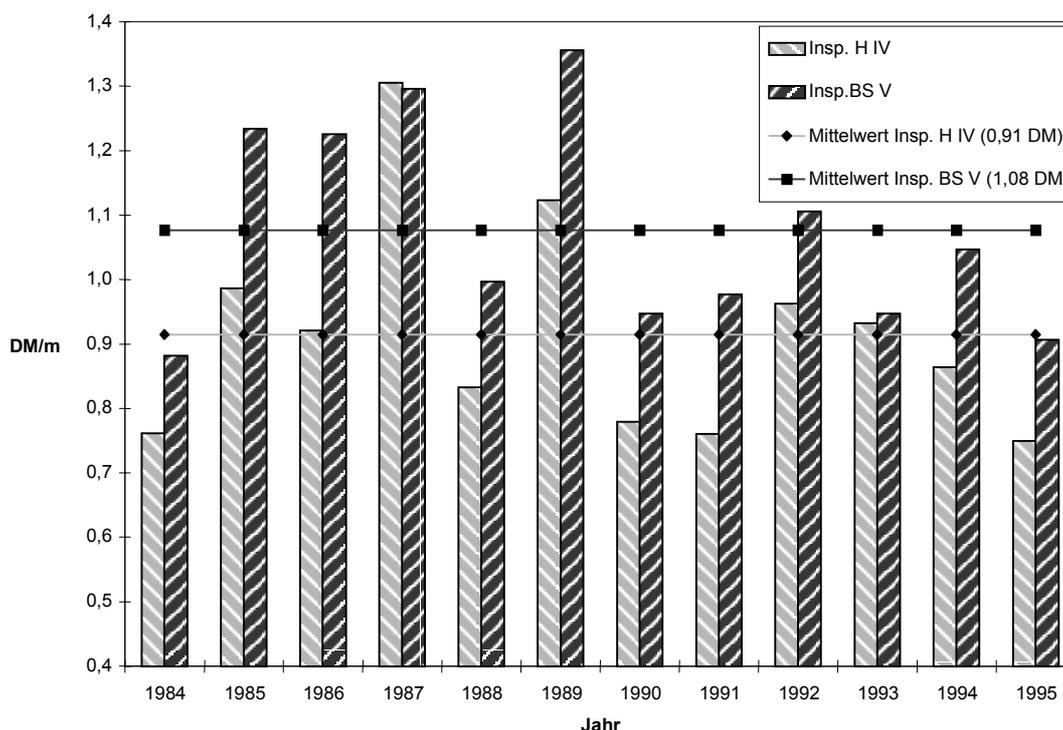


Abbildung 3-3: Jährliche Gesamtkosten der Weegerhaltung in zwei Inspektionen des südniedersächsischen Berglandes. Aus BERTRAM, 1997.

Eine ebenfalls neuere, grundlegende Untersuchung aus der Schweiz vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (FRIEDEN et al., 1995) beinhaltet einen Vergleich der Erhaltungskosten von Belagwegen (asphaltisch oder hydraulisch gebun-

den) und ungebundenen Mineraldecken in und außerhalb des Waldes. Untersucht wurden 16 Belagwege (ca. 88 km) und 17 ungebundene Wegedecken (ca. 390 km) über einen Zeitraum von 14 Jahren. Im Ergebnis (Preisbasis des Jahres 1995) ist die Erhaltung der Belagwege mit durchschnittlichen Kosten pro m und Jahr von **5,93 Fr. (ca. 7,10 DM)** deutlich kostenaufwendiger als die Erhaltung der ungebundenen Wegedecken mit **2,70 Fr. (ca. 3,20 DM)**. Der direkte Vergleich mit den von BERTRAM ermittelten unbereinigten Erhaltungskosten (ca. 1,00 DM pro m und Jahr) ist allerdings nicht zulässig, da es sich bei den Wegen in der Schweiz nicht ausschließlich um Waldwege handelt, die Erhaltung anders organisiert ist und teilweise Verwaltungskosten eingeflossen sind.

3.2.3. Vergleich anhand der Kapitalwerte

Ein direkter Vergleich der Kapitalwerte für die Wahl unterschiedlicher Deckschichten (hier ungebunden verglichen mit einer Asphaltdecke) kann unter der folgenden Annahme getätigt werden:

1. Die in Kap. 3.2.1 genannten Neubaukosten werden zur Berechnung verwendet.
2. Die jährlichen Erhaltungskosten werden für die ungebundene Ausführung in der einfachen, doppelten und vierfachen Höhe der von BERTRAM (1997) ermittelten Werte angenommen. Es wird für die Kalkulation vereinfacht unterstellt, daß diese Erhaltungskosten jährlich (nicht wie in der Praxis in unregelmäßigem Turnus) über einen Zeitraum von 30 Jahren anfallen.
3. Die Asphaltdecke wurde als Vergleichsobjekt gewählt. Als eine sehr optimistische Variante wird in einem Fall angenommen, daß im gesamten Abschreibungszeitraum (30 Jahre) keine Unterhaltungskosten anfallen

In der folgenden Tabelle 3-2 sind die Kapitalwerte der Wegeerhaltung, errechnet nach Gleichung 2, wiedergegeben. Die Kalkulation erfolgte mit Hilfe einer Tabellenkalkulation im Programm EXCEL.

Tabelle 3-2: Kapitalwerte der Ausbauvarianten bei variablen Erhaltungskosten

Kosten (DM/km)	Varianten					
	Ungebundener Ausbau			Asphaltdecke		
K_{neu}	120.000,- DM			220.000,- DM		
k (jährlich z. Zt.)	1000,-	2000,-	4000,-	0,-	2.000,-	4.000,-
K_0 (i=2%, p=5%)	139.750,-	159.501,-	199.001,-	220.000,-	259.501,-	299.001,-

Mit Hilfe der Kalkulationstabelle (Anhang 8) lassen sich sehr schnell, durch Veränderung der drei Eingangsgrößen, nämlich jährliche Erhaltungskosten, Bauteuerungs-

rate und Kalkulationszinsfuß (hier exemplarisch 2.000,- DM, 2% und 5%) die Kapitalwerte für die Wegeerhaltung über 30 Jahre gemäß Gleichung 3-2 errechnen¹⁸. Weiterhin wird die Differenz der Kapitalwerte zwischen den gewählten Varianten als Kapitaldienst (rentifiziert mit einem Kalkulationszinsfuß von 5%, [Gleichungen 3-1 und 3-3]), somit als Umwandlung in eine zeitlich begrenzte „Rente“ von jährlich gleicher Höhe (= Annuität) ausgedrückt. Die Höhe dieses Kapitaldienstes pro km Weglänge, somit die höhere Belastung für die Asphaltdecke, errechnet aus der Differenz der Kapitalwerte, zeigt die folgenden Tabelle:

Tabelle 3-3: Jährlich höhere Belastung der Asphaltdecke (Kapitaldienst)

		Asphaltdecke mit jährlichen Erhaltungskosten von		
		0,- DM/km	2.000,- DM/km	4.000,- DM/km
Ungebundener Ausbau mit jährlichen Erhaltungskosten von	1.000,- DM/km	5.220,- DM/km	7.790,- DM/km	10.359,- DM/km
	2.000,- DM/km	3.936,- DM/km (Bsp. in Anhang 8)	6.505,- DM/km	9.075,- DM/km
	4.000,- DM/km	1.366,- DM/km	3.936,- DM/km	6.505,- DM/km

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt deutlich die Größenordnung der kalkulatorische Belastung im Vergleich der Ausbauvarianten, die sich mit Hilfe der Annuitätenmethode in der Investitionsrechnung nachweisen läßt! In Anhang 8 ist die Kalkulation am Beispiel des grau unterlegten Ergebnisses erläutert. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß die Annahme von 0,00 DM jährlichen Unterhaltungskosten bei der Asphaltdecke völlig unrealistisch ist (Abb. 3-2).

Mit Hilfe iterativer Berechnungen läßt sich zeigen, daß, bei den derzeitigen Erhaltungskosten von jährlich 1.000,- DM/km für die ungebundene Ausführung und der sehr optimistischen Unterstellung, daß die Asphaltvariante über 30 Jahre keine Erhaltungskosten verursacht, die Kapitalwerte des Variantenvergleiches annähernd gleich (220.000,- DM/km) sind, wenn eine Berechnung der Verzinsung für die Investitionen unterlassen wird ($p \Rightarrow 0$) und eine fast 7-prozentige Bauteuerungsrate unterstellt wird.

¹⁸ Mit steigender Bauteuerung vergrößert sich K_0 . Mit steigendem Zinsfuß verkleinert sich K_0 .

3.3. Instandsetzungskosten in Abhängigkeit der Nutzungsdauer

3.3.1. Ankauf von Gesteinskörnungen - Mengen und Ausgaben

Die betriebswirtschaftliche Bedeutung des Ankaufs von Gesteinskörnungen für die Erhaltung von Deckschichten und Tragdeckschichten wird neben den Lieferpreisen der Anbieter vor allem durch die Transportkosten für das Material bestimmt. Die beförderten Mineralbaustoffe werden pro Tonne mit Transportkosten von ca. 10 DM pro 30 km belastet (HERWIG, 1998).

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu den von den beiden Stützpunktförstämtern Riefensbeek und Seelzerthurm in den letzten zehn Jahren angekauften Mengen an mineralischen Baustoffen für die Erhaltung von Deckschichten und Tragdeckschichten (Auszüge aus der Kostenträgerrechnung der Forstverwaltung, NLF, 1996). Angaben in Tonnen:

Tabelle 3-4: Ankauf (t) und Kosten der Wegebaustoffe

FWJ	Basalt / Gabbro	Diabas	Devonkalk	Sonstige Kalke
87	1.670	31.508	15.550	34.000
88	1.230	22.391	20.192	28.100
89	760	23.325	22.636	26.700
90	432	23.594	19.202	11.900
91	50	35.962	35.261	14.660
92		22.903	31.260	22.810
93	370	11.688	24.792	24.959
94	13	13.400	20.211	16.440
95	1.978	9.637	22.587	12.090
96	1.050	11.887	14.934	14.330
Summen	7.553	206.295	226.625	205.989
Durchschnittspreis DM/t (incl. MWSt.) ca.:	13 DM	7 DM	7 DM	6 DM
Zwischensummen	98.189 DM	1.444.065 DM	1.586.375 DM	1.235.934 DM
	Gesamt ca.:	4.400.000 DM		

Die Kalkulation der Lieferpreise erfolgte nach Angaben von Wegebaupraktikern (HERWIG, KREUZKAM, mdl. Mttlg. 1998). Sie erhebt lediglich den Anspruch, als grober kalkulatorischer Überblick zu dienen.

3.3.2. Instandsetzungskosten für ungebundene Wegedecken

Nach langjährigen Erfahrungswerten von Wegebaupraktikern lassen sich die Instandsetzungskosten (Grundinstandsetzung) für ungebundene Wegedecken im Solling zur Zeit mit Kosten beziffern, wie sie in der folgenden Tabelle aufgeführt sind. HERWIG (1998) unterstellt bei der Herleitung dieser Kosten die folgenden Prämissen:

1. Die Instandsetzung einer neuen graderpflegbaren Deckschicht beinhaltet eine **Materialaufbringung** von etwa 5 bis 6 cm. Ein Quadratmeter verdichteter mineralischer Baustoff hat ein Gewicht von ca. 25 kg pro cm Schichtdicke. Bei einer Wegebreite von 3 m und 5,5 cm Schichtdicke sind dies etwa 0,4 t/m, somit rd. **400 t pro km**. Verwendet werden sog. Vorabsiebungen im Mineralgemisch 0/22 oder 0/32 (Preise incl. MwSt).
2. Die **Transportkosten** (incl. MwSt), Ergebnis einer Nachkalkulation, beziehen sich auf einen zentralen Ort im Solling bei Fahrstrecken zwischen 20 und 90 km.
3. Die **Aufbringung** des Materials verursacht z. Zt., unabhängig vom Gestein, Kosten in Höhe von etwa **2.000 DM pro km** für das Verteilen mit dem Grader und Verdichten mit der Vibrationswalze.
4. Die **Nutzungsdauer (n)** der verfügbaren Materialien variiert in einem Zeitraum von **15 bis 25 Jahren** abhängig von der Verschleißresistenz, die sich aus Schlagabriebwiderstand und chemisch- physikalischer Kohäsion des Materials ergibt. Die in der folgenden Tabelle dargestellte Nutzungsdauer entspricht Erfahrungswerten aus der Praxis der Wegeinstandsetzung (HERWIG, 1998).

Tabelle 3-5: Kosten und Nutzungsdauer verschiedener Gesteinskörnungen

Mineralgestein Vorabsiebung	n (a)	Material- kosten ¹⁹ (DM/t)	Tranport- kosten (DM/t)	Material- kosten ²⁰ (DM/km)	Einbau- kosten (DM/km)	Gesamt- kosten (DM/km)
Basalt	25	13,30	9,70	9.200,-	2.000,-	11.200,-
Diabas Sauerland	25	6,00	19,90	10.400,-	2.000,-	12.600,-
Diabas Harz	25	7,00	19,90	10.800,-	2.000,-	12.800,-
Devonkalk	25	6,40	14,60	8.400,-	2.000,-	10.400,-
Dolomit	20	20,00	12,90	13.200,-	2.000,-	15.200,-
Trochitenkalk	20	6,50	11,10	7.000,-	2.000,-	9.000,-
Muschelkalk	15	14,00	11,10	10.000,-	2.000,-	12.000,-
Sandstein	15	14,00	7,70	8.700,-	2.000,-	10.700,-

¹⁹ frei Steinbruch

²⁰ frei Baustelle, gerundet auf volle 100,- DM

3.3.3. Kapitalwerte für Grundinstandsetzungen

Für eine Vergleichskalkulation unter der Annahme unterschiedlicher materialbedingter Nutzungsdauern ist es von besonderer Bedeutung, einen gemeinsamen **Bemessungszeitraum** zu definieren. Dieser Bemessungszeitraum wird von den Deckenschichtmaterialien mit der längsten Nutzungsdauer (n_l) bestimmt. Materialien mit einer kürzeren Nutzungsdauer (n_k) verursachen noch im Zeitraum n_l **Folgekosten**. Unterstellt man einen linearen Verschleiß der Wegedecke und eine Erneuerung mit gleichem Material zu einem konstanten Kostenniveau, läßt sich die Höhe der Folgekosten nach Ablauf von n_k für den Zeitraum $n_l - n_k$ linear kalkulieren. Nach den Grundsätzen der Investitionslehre (ROLFES, 1992) sollten bei einem solchen Vergleich unterschiedlicher Nutzungszeiträume die Kapitalwerte der Investitionen zu Beginn des Bemessungszeitraumes verglichen werden. Hierzu sind Investitionen, die zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen (hier am Ende von n_k), auf den Anfangszeitpunkt zu diskontieren. Dem entgegen steht die bauteuerungsbedingte Kostensteigerung, die zu berücksichtigen ist, wenn heutige und zukünftige Kosten bzw. Investitionen miteinander verglichen werden. In der folgenden Kalkulation wurde der Zinsfuß für die Diskontierung (p) mit 5% und die Bauteuerungsrate (i) mit 2% gewählt.

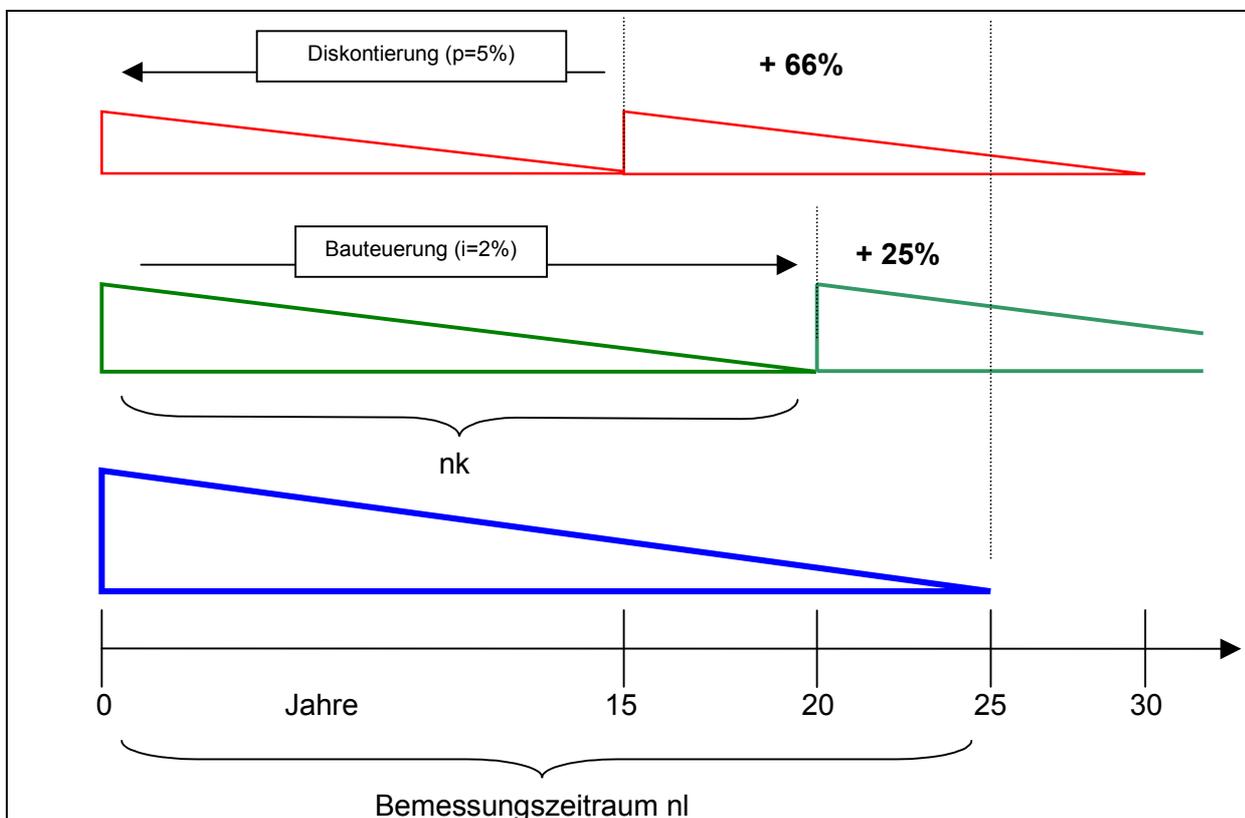


Abbildung 3-4: Modellbetrachtung zur Instandsetzung bei unterschiedlicher Nutzungsdauer

Die Skizze zeigt das Modell zur Herleitung der Kapitalwerte von Instandsetzungsmaßnahmen bei unterschiedlichen Nutzungszeiträumen (n). Der lange Bemessungszeitraum n_l wird durch das untere Dreieck (blau) symbolisiert. Das Dreieck wurde als Darstellungsform gewählt, um den linearen Verschleiß auszudrücken. Bei den Materialien mit einer kürzeren Verschleißdauer und somit kürzerem Bemessungszeitraum (20 Jahre = grün, 15 Jahre = rot) wird unterstellt, daß die Folgeinvestition am Ende von n_k mit dem gleichen Material erfolgt. Die Höhe der in den Vergleich eingehenden Folgeinvestition wird durch lineare Berechnung des anteiligen Betrages für den Zeitraum $n_l - n_k$ berechnet (hier 66% bzw. 25% der Folgeinvestition). Dieser Betrag wird dann unter Anwendung von Gleichung 3-2 (Kap. 3.1.1) um die erwartete Bauteuerung erhöht (Prolongierung mit der Bauteuerungsrate) und verzinst (Diskontierung mit dem Kalkulationszinsfuß), um vergleichbare Kapitalwerte zu erhalten.

In der folgenden Abbildung sind die Kosten für die Grundinstandsetzung mit verschiedene Deckschichtmaterialien, wie in Tabelle 3-5 dargelegt, als Rauten dargestellt, der die Kapitalwerte für eine Instandsetzung mit einem Bemessungszeitraum von 25 Jahren als Quadrate gegenüber gestellt werden:

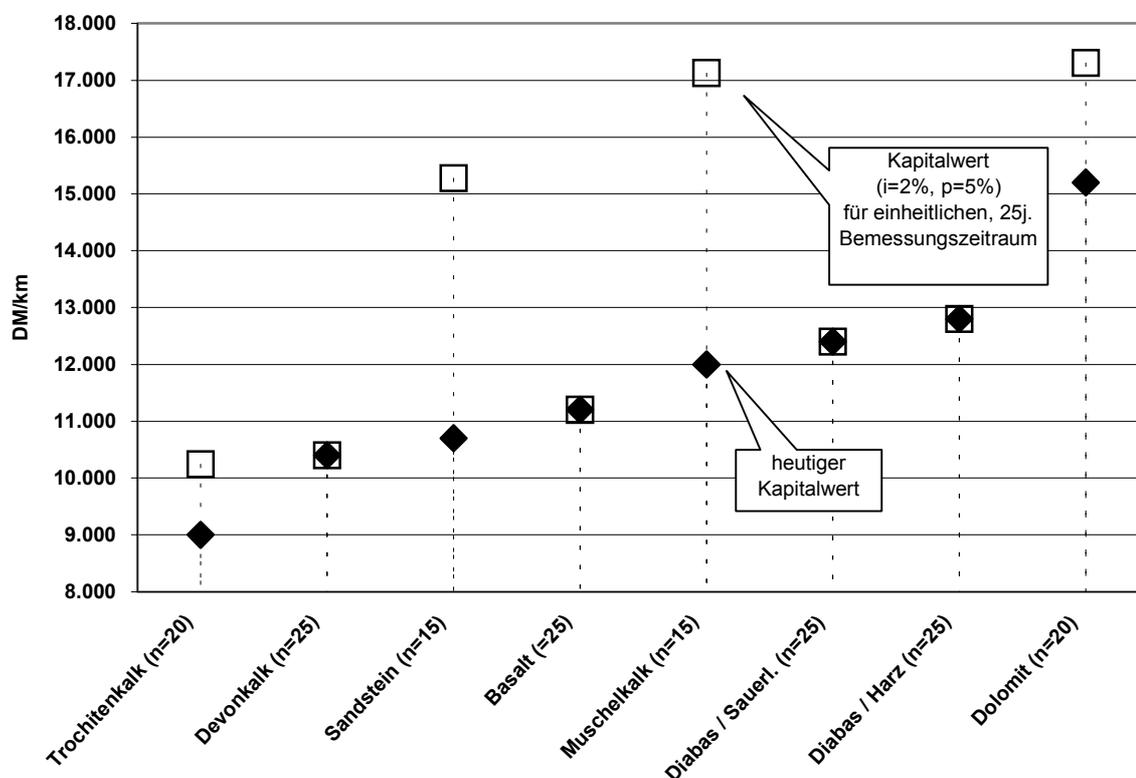


Abbildung 3-5: Kapitalwerte für die Instandsetzung (unterschiedliche Nutzungsdauer)

Es zeigt sich, daß die zu kalkulierenden Kosten bei den Materialien mit verkürzter Nutzungsdauer wegen der Folgekosten markant ansteigen. Einen Überblick zu diesem Kostenanstieg gibt die folgende Tabelle:

Tabelle 3-6: Instandsetzungskosten und Kostenzuschlag (bei einem Bemessungszeitraum von 25 Jahren)

Gesteinskörnung (Vorabsiebung)	Nutzungszeitraum(a)	Grundinstandsetzung (DM/km) (Tab. 3-5)	Folgekosten diskontiert* (DM/km)	Kostenzuschlag in %
Dolomit	20	15.200,-	2.100,-	13 %
Trochitenkalk	20	9.000,-	1.200,-	13 %
Muschelkalk	15	12.000,-	5.100,-	43 %
Sandstein	15	10.700,-	4.600,-	43 %

* Zinsfuß der Diskontierung 5%, Bauteuerung 2%

Ausgehend von der Prämisse, daß die dargelegte empirische Einschätzung der Instandsetzungskosten und der Nutzungsintervalle im Solling repräsentativ für die Verhältnisse im Staatswald des Niedersächsischen Berglandes einschließlich des Harzes sind, läßt sich die folgende **Hochrechnung** erstellen:

- Südlich der Linie Elm – Mittellandkanal – Palsterkamp findet sich eine Holzbodenfläche von 167.599 also **rd. 170.000 ha**. Nds. Staatswald.
- Diese Holzbodenfläche im Bergland hat eine vergleichbare Erschließung. Nach Angaben von BERTRAM (1997), bestätigt durch Ermittlung von Wegebaupraktikern (HERWIG, 1998), kann für das Gebiet eine Erschließungsdichte von **35 m Waldwege pro ha** als repräsentativ angesehen werden. Nach den gleichen Quellen haben **ungebundene Wegen mit einer graderpflegbaren Deckschicht** hieran einen Anteil von **rd. 55%**.
- Somit sind Wegedeckschichten auf einer Länge von 3272,5 also **rd. 3.300 km** ($170.000 \times 35 \times 0,55 / 1000$) periodisch zu erneuern.
- Wird ein Instandsetzungsintervall von 25 Jahren unterstellt, so beträgt die **jährlich** instandsetzungsbedürftige Wegelänge im betrachteten Gebiet ($3.300 / 25$) **rd. 130 km**.

Nach der oben angeführten Kostenkalkulation am Beispiel der derzeitigen Verhältnisse im Solling (Tab. 3-6) bedingt die Materialwahl eine Kostendifferenz von rd. 5.000,- DM/km (diskontiert). Bei einer Hochrechnung auf das gesamte südniedersächsische Bergland, zeigt die Kalkulation, daß durch die Wahl geeigneter, langlebiger Deckschichtmaterialien Kosten von **jährlich rd. 650.000,- DM** ($130 \times 5.000,-$ DM) bestimmt werden können!

4. Exkurs: Recyclingbaustoffe und Industrielle Nebenprodukte

4.1. Einleitung und Begriffsbestimmungen

Bauschutt ist gemäß des Abfallkataloges der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) definiert als: „feste Stoffe, die bei Bauwerksabbrüchen anfallen und überwiegend mineralische Bestandteile enthalten“. Den Hauptanteil im Bauschutt Deutschlands machen die mineralischen Bestandteile wie Beton, Mauerwerk, Natursteine, Putz, Estrich und Ziegel mit 60 bis 80 Gew.% aus. Davon entfallen nach WALKER (1993) rund 30 bis 68 M.-% auf Beton, 3 bis 28% M.-% auf Mauerwerk und 25 bis 50 M.-% auf Sand. Bituminengebundene Stoffe sind mit 1 bis 10% M.-% vertreten und unter „Sonstiges“ (Holz, Dämmaterialien, Metalle, Schadstoffe, etc.) zusammengefaßte Materialien haben gewichtsmäßig nur einen unbedeutenden Anteil.

Der Weg vom Bauschutt zum Recycling-Baustoff ist nach OFFERMANN (1988) grundsätzlich gekennzeichnet durch die Verfahrensschritte:

- **Vorsortierung** = Manuelle Aussortierung aller nichtmineralischen Materialien und sonstiger Bestandteile vor dem Abbruch des Bauwerkes
- **Zerkleinerung** = Zerkleinerung auf gewünschtes Größtkorn
- **Klassierung** = Erzeugen von definierten Kornfraktionen
- **Separierung** = Abscheidung von Metallen, Leichtstoffen, Stör- und Schadstoffen, Trennung der Leicht- und Schwerfraktion von schadstofffreiem Material

Für die Klassierung finden verschiedene Siebungstechniken Verwendung. Die Zerkleinerung wird überwiegend in Prallmühlen durchgeführt, aber auch andere Brechertypen, wie Backenbrecher, Kegelschnecken, Rotorschnecken, etc. sind geeignet. Für die Abscheidung von Störstoffen sind, beginnend mit dem Magnetabscheider für Metalle, verschiedene Windsichtungs- und Naßaufbereitungsverfahren, bis hin zur manuellen Nachsortierung bekannt, deren nähere Erläuterung an dieser Stelle zu weit führen würde.

Der von der LAGA vorgeschriebene Weg vom Bauschutt zum RC-Baustoff ist in einem Fließdiagramm in Anhang 9 schematisch dargestellt.

RC-Baustoffe sind somit Gesteinskörnungen, die zuvor schon als natürliche oder künstliche mineralische Baustoffe in gebundener oder ungebundener Form eingesetzt waren. Sie werden, so die Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000) beim Umbau, Rückbau oder Abbruch gewonnen und dem neuen Verwendungszweck entsprechend aufbereitet .

Über die bautechnischen Anforderungen werden in der TL Min-StB die zulässigen Stoffgruppen wie folgt begrenzt:

- | | |
|---|-------------------|
| 1) Asphaltgranulat | auf max. 30 M.-% |
| 2) Klinker, dichte Ziegel und Steinzeug im Anteil > 4 mm | auf max. 25 M.-% |
| 3) Kalksandstein, weich gebrannte Ziegel, Putze und ähnliche Stoffe im Anteil > 4mm | auf max. 5 M.-% |
| 4) mineralische Leicht- und Dämmstoffe, wie Gasbeton und Bimsbeton | auf max. 1 M.-% |
| 5) Fremdstoffe wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien | auf max. 0,2 M.-% |

Seit nunmehr 10 Jahren wird vom Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum (KRASS, et al, 1999) eine Umfrage zu Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten durchgeführt. Die letzten Ergebnisse für das Jahr 1997 zeigen, daß jährlich rd. 100 Mio. t RC-Baustoffe in Deutschland anfallen. Davon entfallen 45 % auf Bauschutt. Der überwiegende Rest ist Ausbauasphalt und Straßenaufbruch, der, bei sehr hohen Verwertungsraten, überwiegend direkt (in situ Recycling) oder nach Aufbereitung in einer stationären Anlage, wieder im Straßenbau verwendet wird. Der Anteil von aufbereitetem Bauschutt, der als RC-Baustoff im ländlichen Wegebau Verwendung findet, ist mit einem Anteil am verwerteten Material von 9 - 10 % im langjährigen Mittel, als gering einzustufen.

Die sog. „industriellen Nebenprodukte“ werden in den neuen Regelwerken des klassifizierten Straßenbaues als künstliche Gesteine oder künstliche Gesteinskörnungen“ mineralischen Ursprungs bezeichnet, die in einem industriellen Prozess unter Einfluß einer thermischen oder sonstigen Behandlung entstanden sind. Zu ihnen gehören Hochofenschlacke, Metallhüttenschlacke sowie andere durch Aufschmelzen, Brennen oder Sintern hergestellte Gesteinskörnungen (TL Min-StB 2000).

4.2. Rechtliche Rahmenbedingungen für die Verwendung von RC-Baustoffen

4.2.1. Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz

Das „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) trat am 7. Oktober 1996 in Kraft und löste das alte Abfallgesetz von 1986 ab. Ziele des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes sind die „Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ (§1 KrW-/AbfG). Es werden weitgehend geschlossene Kreisläufe angestrebt (HOLZAPFEL, 1997), wobei die Beseitigung der Abfälle nicht mehr als Bestandteil der Kreislaufwirtschaft betrachtet wird, sondern als eigenständiger Zweck des Gesetzes neben der Kreislaufwirtschaft steht (Fritsch, 1996).

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz ist eingebunden in europäisches Recht und setzt die Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 91/156/EWG) sowie die Richtlinie über gefährliche Abfälle (Richtlinie 94/31/EG) in nationales Recht um (KÖLLER, 1996). Damit einhergehend übernimmt das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz den europäischen Abfallbegriff, den FRITSCH (1996) als den „Schlüssel“ zur Anwendung des Abfallrechts bezeichnet, und auch den Europäischen Abfallkatalog (EWC) (Köller, 1996). Als Abfälle gelten nunmehr alle Produkte und Produktionsrückstände, die zu den in Anhang I des Gesetzes aufgeführten Gruppen gehören und derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will (subjektiver Abfallbegriff) oder entledigen muß (objektiver Abfallbegriff). Dabei unterscheidet das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz zwischen Abfällen zur Verwertung und Abfällen zur Beseitigung (WENDENBURG, 1995). Die Differenzierung des alten Abfallgesetzes von 1986 zwischen „schon Abfall einerseits und noch Wirtschaftsgut andererseits“ (FRITSCH, 1996) besteht damit nicht mehr, der Abfallbegriff wird auch auf „Reststoffe und sogenannte Wirtschaftsgüter“ (WAGNER, 1996) erweitert. Die „Veredelung“ von Abfall zu gebrauchsfähigen Gütern ist somit eines der Hauptziele dieses Gesetzes (EDOM, 1998).

In § 4 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes werden die Grundsätze der Kreislaufwirtschaft festgelegt. Danach sollen Abfälle primär vermieden werden, ins-

besondere durch Verminderung ihrer Menge und Schädlichkeit (§ 4 Abs. 1 KrW-/AbfG). Ist die Vermeidung von Abfällen nicht möglich, sind diese stofflich oder thermisch zu verwerten. Erst in letzter Linie kommt die Abfallbeseitigung, der eine Verwertung grundsätzlich vorgeht. Der Vorrang der Verwertung wird jedoch durchbrochen, wenn die Beseitigung von Abfällen die umweltverträglichere Lösung darstellt (§ 5 Abs. 5 KrW-/AbfG). Als Kriterien für die Abschätzung der Umweltverträglichkeit werden die zu erwartenden Emissionen, die Schonung der natürlichen Ressourcen, die einzusetzende oder zu gewinnende Energie und die Anreicherung von Schadstoffen in Produkten und Abfällen angeführt.

Ein wichtiger Grundgedanke des neuen Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetzes ist das Verursacherprinzip, demzufolge die Erzeuger und Besitzer von Abfällen für die Vermeidung, Verwertung und umweltverträgliche Beseitigung der anfallenden Abfälle selbst verantwortlich sind (ERNST et al., 1998). Nach dem alten Abfallgesetz von 1986 lag die Entsorgungspflicht noch bei den nach Landesrecht zuständigen öffentlich-rechtlichen Körperschaften (FRITSCH, 1996).

Eine Folge der Verlagerung der Verantwortung für Abfallaufkommen und -behandlung auf Industrie, Handel und auch Verbraucher ist die neu definierte Produktverantwortung (§ 22 KrW-/AbfG). Danach sind Produkte bereits so zu produzieren, daß bei ihrer Herstellung und Gebrauch Abfälle vermindert werden und eine umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung nach ihrem Gebrauch gewährleistet ist. Der Hersteller bleibt für den gesamten Lebenszyklus des Produkts in der Pflicht, „die sich auch auf die Rücknahme gebrauchter Produkte erstreckt“ (Herbell, 1997).

4.2.2. Bauschutt, RC-Baustoffe und künstliche Gesteine im Abfallrecht

Die Verwertung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen stellt ein wichtiges abfallwirtschaftliches und volkswirtschaftliches Instrument zur vom Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) geforderten Abfallvermeidung und Ressourcenschonung dar. Für die Umsetzung des § 5 KrW-/AbfG sind allgemeine Anforderungen an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung einzuhalten.

Die Dauer der Abfalleigenschaft beim Bauschutt auf dem Weg zum RC-Baustoffe wird seit langem strittig diskutiert. Im Hinblick auf die Dauer der Abfalleigenschaft gibt die LAGA eine auf die folgende Grundthese reduzierte Antwort: „In der Regel dauert bei der stofflichen Verwertung die Abfalleigenschaft fort, bis sie tat-

sächlich als Substitut (Rohstoff, Ersatzstoff) genutzt werden. Erst mit dem tatsächlichen Einsatz des Abfalls ist das gesetzgeberische Ziel der Verwertungspflicht, die Schonung natürlicher Ressourcen (§ 1 KrW-/AbfG), erreicht.“ Dies würde bedeuten, daß erst wenn der recycelte Baustoff eingesetzt wird, auch seine Abfalleigenschaft endet (EDOM, 1998). Über eine Ausnahmeregelung wird versucht, die Verwertungspflicht auch schon mit dem Gewinnen von Stoffen aus Abfällen zu erfüllen und damit die Abfalleigenschaft zu beenden. Für den hier aufgezeigten, noch unscharfen Rechtsbereich wird eine juristische Grundsatzentscheidung erwartet (EDOM, 1998).

Im Waldwegebau ist die Frage von Interesse, ob unsortierter Bauschutt und tlw. auch Bodenaushub als Baumaterialien unter den Abfallbegriff fallen. Somit wären sie keine geeigneten Wegebaustoffe, sondern vielmehr als entweder aufzubereitende oder zu deponierende Stoffe zu verstehen. Diese Frage wurde bereits von der alten Rechtsprechung zur Zeit des Abfallgesetzes von 1986 recht eindeutig beantwortet (BECKER et al., 1995): Unsortierter Bauschutt aus dem Abriß eines Wohnhauses ist Abfall im objektiven Sinne²¹ des Abfallgesetzes von 1986. In der Urteilsbegründung ist das stärkste Argument, daß das „Fehlen eines Marktpreises“ ein wesentliches Indiz dafür ist, daß ein gemeinwohlgefährdender Altstoff als Abfall entsorgt werden muß“. In den Fällen, in denen die Anbieter von Bauschutt Deponierungskosten zahlen müssen, bzw. eine zusätzliche Gebühr für die Abnahme des Bauschutts als vermeintliches Wegebaumaterial zahlen, muß vielmehr von einem „negativen Marktpreis“ gesprochen werden. Dieses Urteil des OVG Koblenz wurde durch ein Urteil des 7. Senats des Bundesverwaltungsgerichts vom 24.06.93 bestätigt. In der Begründung wird noch einmal herausgestellt, daß der objektive Abfallbegriff bereits dadurch erfüllt wird, daß Bauschutt typischerweise neben unbedenklichem mineralischen Material zahlreiche potentiell schadstoffhaltige Bestandteile wie Installations- teile, Fußböden, Wand- und Deckenverkleidungen, Holzbaustoffe aller Art, etc. enthält, von denen nachteilige Wirkungen auf Boden und Grundwasser ausgehen können.

Mineralische Baustoffe, die bei Bau -oder Abbruchtätigkeit anfallen, unterliegen dem Abfallrecht. Der Einsatz von unsortiertem Bauschutt im forstwirtschaftlichen Wegebau ist daher grundsätzlich nicht zulässig.

²¹ Der „objektive Abfallbegriff“ von 1986 beschrieb Abfall als eine bewegliche Sache, deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit, insbesondere des Schutzes der Umwelt geboten ist.

4.2.3. Bodenschutz

Das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz- BBodSchG) ist am 17. März 1998 (BGBl. I S. 502) in Kraft getreten. Zweck dieses Gesetzes (§1) ist es, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Bei Einwirkungen auf den Boden sollen Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte soweit wie möglich vermieden werden.

Die Forstwirtschaft und auch der Straßen- und Wegebau erhalten durch § 3, (Anwendungsbereich) einen besonderen Status, wonach das Gesetz auf schädliche Bodenveränderungen und Altlasten Anwendung findet, soweit nicht andere Vorschriften Einwirkungen auf den Boden regeln. In einem Katalog der anderen Vorschriften werden unter anderem das Bundeswaldgesetz und die Forst- und Waldgesetze der Länder sowie Vorschriften über Bau, Änderung, Unterhaltung und Betrieb von Verkehrswegen oder Vorschriften, die den Verkehr regeln, aufgezählt.

Die Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BodSchV) bestimmt die Anforderungen an die Untersuchung und Bewertung von Verdachtsflächen.

Für Straßen- und Wegebaumaßnahmen mit potentiell wassergefährdenden Baustoffen ist die BodSchV im Hinblick auf das Untersuchungsverfahren bedeutsam. Nach §3 soll *„das Vorliegen einer durch eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast verursachten Gefahr für das Grundwasser untersucht werden, wenn die vom Boden oder der Altlast ausgehende Schadstoffkonzentration im Sickerwasser oder andere Schadstoffausträge eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften erwarten lassen. Ort der Gefahrenbeurteilung für das Grundwasser ist hierbei der Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Zone“*. In Anhang 3.2 der BodSchV heißt es weiter: *„die Prüfwerte gelten für den Ort der Gefahrenbeurteilung. Der Ort der Bodenprobennahme stimmt nicht notwendigerweise mit dem Ort der Gefahrenbeurteilung für das Grundwasser überein. Die Schadstoffkonzentrationen werden vorzugs-*

weise als Sickerwasser-Prognosewerte auf der Grundlage von Eluatanalysen der Bodenproben ermittelt.“ Weiterhin werden in diesem Anhang Grenzwerte für die Prognosewerte tabellarisch festgelegt, die „in Ermangelung eigenständiger Meßwerte“ an den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung orientiert wurden (KRASS, 2000, I). Dies ist im Hinblick auf die Verwendung aller künstlicher Gesteine und RC-Baustoffe im Straßen- und Wegebau, wie vom KrW-/AbfG gefordert, problematisch, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird. KRASS regt an, diesen Widerspruch zwischen den Gesetzeswerken durch eine klärende Entscheidung auf bundesministerieller Ebene zu beseitigen.

4.2.4. Wasserschutz

Nach §3 Abs. 2, Nr. 2 des Wasserhaushaltgesetzes (WHG) gelten *Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen*, als erlaubnispflichtige Benutzung eines Gewässers. Das Grundwasser ist ein Gewässer im Sinne des WHG und genießt wegen der langen Zeiträume, in denen Verunreinigungen durch langandauernde Perkolation von Schadstoffen aus dem überlagernden Boden in das Grundwasser gelangen können und der langwierigen Selbstreinigungsprozesse einen zumindest genau so hohen Schutzstatus wie stehende oder fließende Gewässer (SCHINK, 1989).

Im Umfeld des Straßen- und Wegebbaus stehen somit Fragen des Gewässerschutzes im Vordergrund. In einigen Anwendungsfällen können auch andere Schutzgüter betroffen sein. Nach wasserrechtlichen Grundsätzen (§§ 26 Abs. 2 und 34 Abs. 2 WHG) hat die Verwertung von Stoffen so zu erfolgen, daß eine schädliche Verunreinigung des Grund- und Oberflächenwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist.

4.3. Umweltgerechte Verwendung künstlicher Gesteine und RC-Baustoffe

Aus den genannten Gesetzen lassen sich keine konkreten Anforderungen an Straßen- und Wegebaustoffe²² im allgemeinen sowie an industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe im besonderen ableiten. Es ist daher erforderlich, die wasserwirtschaftlichen Eigenschaften der künstlichen Baustoffe, die verschiedenen Bauweisen und die hydrogeologisch unterschiedlichen Einbaugebiete miteinander zu verknüpfen.

Für eine Reihe von industriellen Nebenprodukten sowie für Recycling-Baustoffe gibt es schon seit langem Technische Lieferbedingungen (TL) und auch Merkblätter, in denen bautechnische Anforderungen sowie Mindestanforderungen an wasserwirtschaftliche Merkmale festgelegt sind. Während die jeweils erforderlichen bautechnischen Anforderungen in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) berücksichtigt werden, blieben Folgerungen aus der unterschiedlichen wasserwirtschaftlichen Verträglichkeit der genannten Straßenbaustoffe im Regelwerk des Straßenbaus bislang offen. Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA, 1996) hat Empfehlungen für die stoffliche Verwertung solcher Straßenbaustoffe erarbeitet.

In den, im Jahr 1999 aktualisierten Richtlinien werden diese Empfehlungen aufgegriffen, soweit sie für den jeweiligen Straßenbaustoff bereits existieren und in das Regelwerk des Straßenbaus eingearbeitet. Somit liegt mit der neuen TL Min-StB 2000 in Verbindung und dem Entwurf der „Richtlinien für die Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau aus wasserwirtschaftlicher Sicht“ (RAwas-StB) **erstmalig ein bundeseinheitliches Regelwerk** vor. Es wird erwartet, daß die endgültige Fassung im Spätsommer 2000 vom BMVBW in Kraft gesetzt werden kann. Eine Änderung in der Benennung der RAwas-StB durch Einbeziehung des Bodenschutzes in den Titel des Regelwerkes ist geplant (KRASS, 2000, II).

²² Nennenswerte Auswirkungen natürlicher Gesteinskörnungen auf den Wasserschutz sind bislang nur in Wasserschutzgebieten Gegenstand der Diskussion. Nach den Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete (DVGW, 1995) ist auch in der Zone III der Schutz durch Verwendung (oder Freilegung) von auslaugbaren Materialien beim Wegebau gefährdet. Hierzu können bei strenger Auslegung der Richtlinien neben den Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten auch auslaugbare natürliche Materialien, etwa Gipskeuper, der Sulfat freisetzen kann, gerechnet werden (Becker et al., 1995).

Das von der LAGA (1996) entwickelte System von „Zuordnungswerten“ Z0 bis Z5 wurde in der RAwas-StB aus Gründen der besseren praktischen Handhabung durch das dargestellte System ersetzt (KRASS, 2000, II).

Voraussetzungen für die Anwendung eines Stoffes nach diesen Richtlinien sind:

1. Die wasserwirtschaftlichen Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000²³ werden eingehalten.
2. Die Bauweisen mit der Schicht, in der der Baustoff zum Einsatz kommen soll, ist in Verbindung mit der Anordnung der Schicht im Bauwerk zu bewerten. Wesentliche Kriterien sind dabei eine eventuelle Bindung mit einem Bindemittel und die Wasserdurchlässigkeit der Überbauung dieser Schicht.
3. Die Lage der Baumaßnahme ist bezüglich der Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung zu bewerten. Dabei spielen Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebiete eine besondere Rolle.

²³ Für Kesselasche und Waschberge (ein Nebengestein der Steinkohle) existieren eigene TL bzw. Merkblätter. Diese Stoffe kommen allerdings, wie gezeigt wird, nicht für eine Verwendung im ungebundenen Deckschichtbau in Frage.

Ad 1 – Wasserwirtschaftliche Anforderungen

Die Technischen Lieferbedingungen enthalten Anforderungen an wasserwirtschaftliche Merkmale, die bezüglich Prüfumfang und auch Grenzwerten stoffspezifisch festgelegt worden sind. Die Einhaltung dieser Grenzwerte ist Grundvoraussetzung für die Verwendbarkeit im Straßen- und Wegebau überhaupt. Zur Eluatanalyse findet nach der TP Min-StB Teil 7.1.1 das modifizierte DEV-S4-Verfahren, bei Schotter und Werksteinen nach Teil 7.2 das Trogverfahren Anwendung (MESTERS, 1998). Ein Beispiel anhand der drei Klassen für RC-Baustoffe zeigt folgende Tabelle:

Tabelle 4-1: Wasserwirtschaftliche Anforderungen an Recycling-Baustoffe nach TL Min-StB 2000

Merkmal		RC-1	RC-2	RC-3	Zulässige Überschreitung in %	
1		2	3	4	5	
Eluatanalyse	pH-Wert ¹⁾	-	7 - 12,5	7 - 12,5	7 - 12,5	-
	el. Leitf.	mS/m	150	250	300	5
	SO ₄	mg/l	150	300	600	5
	Cl	mg/l	20	40	150	10
	As	mg/l	0,01	0,04	0,05	20
	Cd	mg/l	0,002	0,005	0,005	20
	Cr ges.	mg/l	0,03	0,075	0,1	20
	Cu	mg/l	0,05	0,15	0,2	20
	Hg	mg/l	0,0002	0,001	0,002	10
	Ni	mg/l	0,05	0,1	0,1	20
	Pb	mg/l	0,04	0,1	0,1	20
	Zn	mg/l	0,1	0,3	0,4	10
	Phenolindex	mg/l	0,01	0,05	0,1	20
	PAK (EPA)	mg/l	0,005	0,008	- ²⁾	50
Feststoffanalyse	PAK (EPA)	mg/kg	20	50	100	-
	EOX	mg/kg	3	5	10	-

¹⁾ kein Grenzwert, stofftypischer Bereich; bei Überschreitung sind die Ursachen zu prüfen
²⁾ zur Erfahrungssammlung zu bestimmen; Wert wird nicht zur Beurteilung herangezogen

Ad 2 – Lage der Baumaßnahme

Bei der Bewertung der Bauweise sind wesentliche Kriterien eine eventuelle Bindung des betrachteten Baustoffes mit Bindemittel sowie die Wasserdurchlässigkeit der Überbauung dieser Schicht. Im einzelnen werden daher die Einsatzmöglichkeiten für industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe aufgelistet; getrennt nach - wasserunddurchlässigen Bauweisen, - teildurchlässigen Bauweisen sowie - wasserdurchlässigen (ungebundenen) Bauweisen. Im Anhang der RAwas-StB werden die einzelnen möglichen Bauweisen, wie nachstehend am Beispiel der wasserdurchlässigen Bauweisen exemplarisch dargestellt, aufgelistet:

- | | |
|-------|--|
| 3. | Einbau in oder unter wasserdurchlässiger Schicht |
| 3.1 | Deckschicht ohne Bindemittel |
| 3.2 | Tragschicht ohne Bindemittel unter wasserdurchlässiger Schicht |
| 3.3 | Unterbau unter wasserdurchlässiger Schicht |
| | |
| 3.9 | Lärmschutzwälle und Dämme unter kulturfähigem Boden |
| 3.10 | Bettungsmaterial unter wasserdurchlässigen Pflasterdecken |

Auf die Ziffern wird im Folgenden zurückgegriffen.

Ad 3 –Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung

Gewässer und Böden bilden ein zusammenhängendes System mit zahlreichen Wechselwirkungen. Daher sind Böden für den Grundwasserschutz von besonderer Bedeutung, weil einerseits Stoffe durch Filterwirkung zurückgehalten, andererseits organische Stoffe mikrobiologisch abgebaut oder umgewandelt werden können, so daß auslaugbare Stoffe nur verzögert oder gar nicht in grundwasserführende Schichten verlagert werden. Bei der Lage der Baumaßnahme wird davon ausgegangen, daß der Boden diese wichtige Funktion erfüllt.

Die Verweildauer der Stoffe in der ungesättigten Zone (Grundwasserüberdeckung) und ihre Ausbreitung in der gesättigten Zone (vor allem im Grundwasserleiter, aber auch in wenig wasserwegsamem Untergrund) hängen wesentlich von der Durchlässigkeit und Ausbildung des Untergrundes ab. Aus diesen Gründen sind Durchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausbildung des Untergrundes die wesentlichsten Kriterien für seine Bewertung im Hinblick auf das Rückhalte- und Umwandlungsvermögen.

Die Durchlässigkeit des Bodens wird über den sog. „Durchlässigkeitsbeiwert“ k_f in der Dimension m/s definiert. Bei $k_f = 10^{-6}$ m/s wird im allgemeinen die Grenze

zwischen durchlässigen und undurchlässigen Böden angesetzt. Als praktisch wasserundurchlässig sind Substrate mit $k_f < 10^{-9}$ anzusehen (DIETZ et al., 1984).

In Grundwasserleitern spielen für die Ausbreitung der Stoffe außerdem die Abstandsgeschwindigkeit (Fließgeschwindigkeit) und die Mächtigkeit des Grundwassers eine große Rolle (KRASS, 2000, I).

In der folgenden Tabelle 4-2 sind die in der RAwas-StB zugrunde gelegten Kategorien für die Schutzwirkung der Überdeckung dargestellt. Die verwendete Farbsymbolik findet sich in den folgenden Matrizen analog (Tab. 4-3 und 4-4).

Tabelle 4-2: Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung gemäß RAwas-StB

Durchlässigkeit *)	Mächtigkeit **)	Schutzwirkung ***) der GW-Überdeckung
$k_f < 10^{-6}$ m/s z.B. feinkörnige Böden und Festgesteine mit vergleichbarer Durchlässigkeit	> 5 m	groß
	2 bis 5 m	mittel bis groß
	< 2 m	gering bis mittel
$k_f = 10^{-4}$ bis 10^{-6} m/s z. B. gemischtkörnige Böden und Festgesteine mit vergleichbarer Durchlässigkeit	> 15 m	groß
	4 bis 15 m	mittel bis groß
	< 4 m	gering bis mittel
$k_f > 10^{-3}$ bis 10^{-4} m/s z.B. feinkörnige Böden und Festgesteine mit vergleichbarer Durchlässigkeit	> 20 m	groß
	5 bis 20 m	mittel bis groß
	4 bis 5m	gering bis mittel
	< 4 m	gering

*) Für Festgesteine sind besondere zusätzliche Untersuchungen erforderlich, die Angaben über die Inhomogenitäten im Hinblick auf die Durchlässigkeiten ermöglichen.

**) Für die Beurteilung der Mächtigkeit ist der mittlere Höchstgrundwasserstand zugrundezulegen.

***) Zur Bestimmung der Schutzwirkung sind im Einzelfall die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse (z. B. Durchlässigkeit und Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung, Locker-/ Festgesteinsbereich, Lagerungsverhältnisse, tektonisches Inventar, Abstandsgeschwindigkeit und Mächtigkeit des Grundwasserleiters usw.) einzubeziehen.

Verknüpfung der Punkte 1 - 3

Für jeden Baustoff wurden in einer Matrix aus Bauweise und Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung die Möglichkeiten des Einsatzes des jeweiligen Baustoffes beschrieben, so daß hierfür insgesamt 18 übersichtliche Tafeln entstanden. Die Tafeln stellen eine Orientierung dar, wobei je nach Baustoff und entsprechender Ab-

dichtung / Wasserzutrittsmöglichkeit eine Anwendung abgeleitet werden kann. Spezifische örtliche Gegebenheiten oder andere stoffliche Eigenschaften mit den für die wasserrechtliche Erlaubnis zuständigen Behörden auch zu abweichenden Einsatzmöglichkeiten führen. Ein Einsatz von Industriellen Nebenprodukten und RC-Baustoffen in den Zonen I und II von Wasser- sowie Heilquellenschutzgebieten (WSG und HSG) ist ausgeschlossen. Schutzgebiete von Trinkwassertalsperren sind wie Wasserschutzgebiete IIIA zu behandeln. Der Abstand zwischen höchstem Grundwasserstand zum Planum bzw. zur Schüttkörperbasis soll in allen Fällen 1m nicht unterschreiten. Daneben sieht die RAwas-StB Anweisungen für die Einordnung von Gemischen aus diesen Baustoffen vor. Für den Waldwegebau kommen, vorbehaltlich der Prüfung im Einzelfall, bei der wasserwirtschaftlich sensiblen Anwendung „Deckschicht ohne Bindemittel“ (Nr. 3.1 der Anlage zur RAwas-StB) nur folgende „künstliche Baustoffe“ in Frage: Hochofenstückschlacke-1 (HOS-1), Hüttensand (HS), Gießerei-Kupolofenschlacke (GKOS), Schmelzkammergranulat (SKG) und der „sauberste“ Recycling-Baustoff (RC-1). Als Beispiele zeigen die Tabellen 4-3 und 4-4 die Einsatzmöglichkeiten der jeweils „saubersten“ Zusammenstellungen von Hochofenstückschlacke (HOS-1) und von RC-Baustoff (RC-1).

Tabelle 4-3: Einsatzmöglichkeiten für Hochofenschlacke-1 (HOS-1) aus RAwas-St

Einsatzmöglichkeiten bei Einbauweise (Anhang 1 der Rawas-StB)		Schutzwirkung der GW-Überdeckung			WSG III B HSG IV	WSG III A ¹ HSG III
		groß	mittel bis groß	Gering bis mittel	Schutzwirkung der GW-Überdeckung groß	
		1	2	3	4	5
1	Einbau <u>wasserundurchlässig</u>	+	+	+	+	+ nur 1.1 bis 1.3, 1.11
2	Einbau <u>teildurchlässig</u>	+	+ nur 2.1 bis 2.3*, 2.11	+ nur 2.1 bis 2.3*, 2.11	+ nur 2.1 bis 2.3*, 2.11	+ nur 2.1, 2.11
3	Einbau <u>waserdurchlässig</u>	- nur 3.1*, 3.2*, 3.10	- nur 3.1*, 3.2*, 3.10	- nur 3.1*, 3.2*, 3.10	- nur 3.1*, 3.2*, 3.10	- nur 3.1*, 3.2*, 3.10

+ = Anwendung zulässig; - = Anwendung nicht zulässig

¹⁾ einschl. Schutzgebiete von Trinkwassertalsperren

* Bauweise 2.3, 3.1 und 3.2 nur in Schichtdicken bis 25 cm

Tabelle 4-4: Einsatzmöglichkeiten für Recycling-Baustoff-1 (RC-1) aus RAwas-StB

Einsatzmöglichkeiten bei Einbauweise (Anhang 1 der RAwas-StB)		Schutzwirkung der GW-Überdeckung			WSG III B HSG IV	WSG III A ¹ HSG III
		groß	mittel bis groß	gering bis mittel	Schutzwirkung der GW-Überdeckung groß	
		1	2	3	4	5
1	Einbau <u>w</u> aser <u>d</u> urchlässig	+	+	+	+	+ nur 1.1 bis 1.3, 1.11
2	Einbau <u>t</u> eildurchlässig	+	+	+	+	+ nur 2.1 bis 2.11
3	Einbau <u>w</u> aser <u>d</u> urchlässig	+	+	+	+	+ nur 3.10

+ = Anwendung zulässig; - = Anwendung nicht zulässig

¹⁾ einschl. Schutzgebiete von Trinkwassertalsperren

Die Anwendung der Tafeln gilt unter der Voraussetzung, daß die bautechnische Eignung für den jeweiligen Verwendungszweck gegeben ist

4.4. Technische Eignung von Recyclingbaustoffen als Deckschichtmaterial

Wie bereits von BECKER et al. (1995) dargestellt, sind im forstlichen Wegebau bislang überwiegend sehr negative Erfahrungen mit der Verwendung von Bauschutt gemacht worden. Es sind in der Waldwegebau-Literatur allerdings keine Erfahrungen mit güteüberwachten RC-Baustoffen beschrieben. Daher ist es auch hier notwendig, Ergebnisse aus dem klassifizierten Straßenbau analog zu interpretieren und anzuwenden.

Im Folgenden sollen Recyclingmaterialien nur dann als RC-Baustoffe verstanden werden, wenn sie auch dem System der Güteüberwachung unterliegen. Dieses System wird im „Technischen Teil“ in Kap. 1.3.1 beschrieben. Alle anderen mineralischen Reststoffe sind entweder Bauschutt und als solcher im Sinne des KrW-/AbfG zu behandeln; oder sind als nicht klassifiziertes, nicht güteüberwachtes Material in

keinem Fall für die Verwendung als Waldwegebaustoff zulässig. RC-Baustoffe werden, abweichend zu natürlichen Gesteinen, vierteljährlich von der Fremdüberwachung untersucht.

4.4.1. Verwitterungsbeständigkeit von RC-Material

Umfangreiche Untersuchungen zur Verwitterungsbeständigkeit von Recyclingbaustoffen wurden von GUTH im Jahr 1993 sowie von TOUSSAINT im Jahr 1998 an der BAST durchgeführt. Beide Autoren betonen die Notwendigkeit zur Untersuchung der Frostbeständigkeit (s. Kap. 1.6) für RC-Baustoffe, da in älteren Versuchen häufig mangelhafte Verwitterungsbeständigkeiten von RC-Baustoffen verzeichnet wurden.

TOUSSAINT berichtet von einem wichtigen Vorversuch, der zeigt, daß mangelnder Frostwiderstand nicht, wie landläufig vermutet wurde, auf den Anteil „roter“ Bestandteile, also Ziegelsteinbruch zurückzuführen ist. Separiert von den anderen Bestandteilen des RC-Materials zeigten die roten Bestandteile nur eine sehr geringe Absplitterung nach FTW von 1,6 % während der ausgelesene Betonbruch fast 11 % seiner Masse im FTW-Versuch verlor. Die Frostabsplitterung bei Betonbruch bestand überwiegend aus Sand, dem ursprünglichen Betonzuschlag.

Die sogenannten „roten“ Bestandteile umfassen sowohl dichte, bis zur Sinterung gebrannte Ziegel, die als Dachziegel oder Straßenklinker ihre Frostbeständigkeit bewiesen haben, als auch bei niedriger Temperatur gebrannte, daher mürbe und wassersaugende Mauerziegel, „wie sie z.B. in den Gründerjahren in Massen für den schnellen Bau von Mietskasernen hergestellt wurden“. Ebenso sind Betone nicht immer widerstandsfähig gegen Frost sondern reagieren entsprechend ihrer Festigkeit sehr unterschiedlich. Die Versuchsergebnisse verdeutlichen, so TOUSSAINT, daß eine „augenscheinliche stoffliche Einordnung nicht zur Beurteilung des Frostwiderstandes der RC-Baustoffe ausreicht“.

Bedingt durch die Vielfalt der aufbereiteten Stoffe ist Recyclingmaterial in seiner Zusammensetzung sehr variabel. Dies verdeutlicht die folgende Abb. 4-1 der von GUTH untersuchten Materialien:

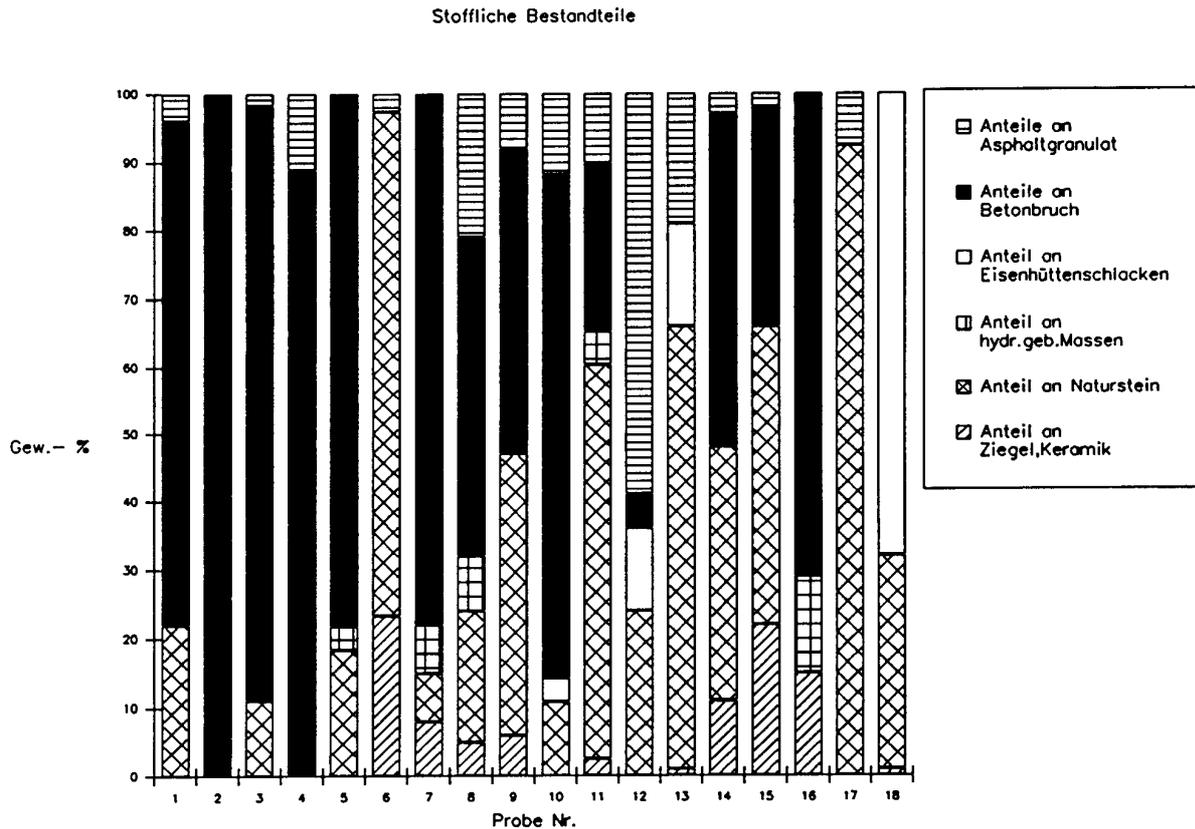


Abbildung 4-1: Stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen (aus GUTH, 1993)

Ähnlich „bunt“ ist auch die Zusammensetzung der von TOUSSAINT untersuchten RC-Baustoffe. Die Ergebnisse beider Untersuchungen sind in ihrer Aussage zur FTW-Resistenz weitgehend deckungsgleich. Toussaint berichtet, daß an allen untersuchten Proben der Wasseraufnahmegrad $W_{m,a}$ (s. Kap. 1.6) mit 1,1 bis 3,8 über dem Grenzwert der TL Min-StB von 0,5 M.-% lag. In dem folgenden FTW-Versuch konnte die Hälfte der untersuchten RC-Baustoffe die Anforderung der TL mit einem höchstzulässigen Grenzwert von 3 M.-% Absplitterung nicht erfüllen. Beide Autoren berichten, daß insbesondere die RC-Baustoffe aus Hochbauschutt, trotz hoher Betonanteile, die höchsten FTW-Absplitterungen von bis zu 11 M.-% zeigten. Nur zwei von elf Splitten aus Hochbauschutt und Straßenaufbruch erreichten in der von GUTH durchgeführten Versuchsreihe die von der TL Min-StB bestimmte Anforderung. Deutlich anders war das Ergebnis bei besonders hochwertigen Betonen, die aus den Deckschichten von Autobahnen recycelt wurden. Sie verhielten sich in der FTW-Prüfung ähnlich wie im Straßenbau bewährte Natursteine. Ihre Versuchsergebnisse, FTW-Absplitterungen von 1 bis 3 M.-%, entsprachen den Anforderungen.

In einer Projektarbeit aus dem Jahr 1996 hat TABBERT die Qualität mineralischer Straßenbaustoffe aus den alten und neuen Bundesländern sowie von Importen untersucht. Anhand der Angaben aus der Fremdüberwachung gemäß den Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau – RG Min-StB - wurden Daten aus über 1.500 Natursteinbetrieben erfaßt. Für die hier vorliegende Untersuchung können aus dieser Projektarbeit Vergleiche zwischen Recyclingbaustoffen und natürlichen Baustoffen auf der Basis eines großen Stichprobenumfangs gezogen werden.

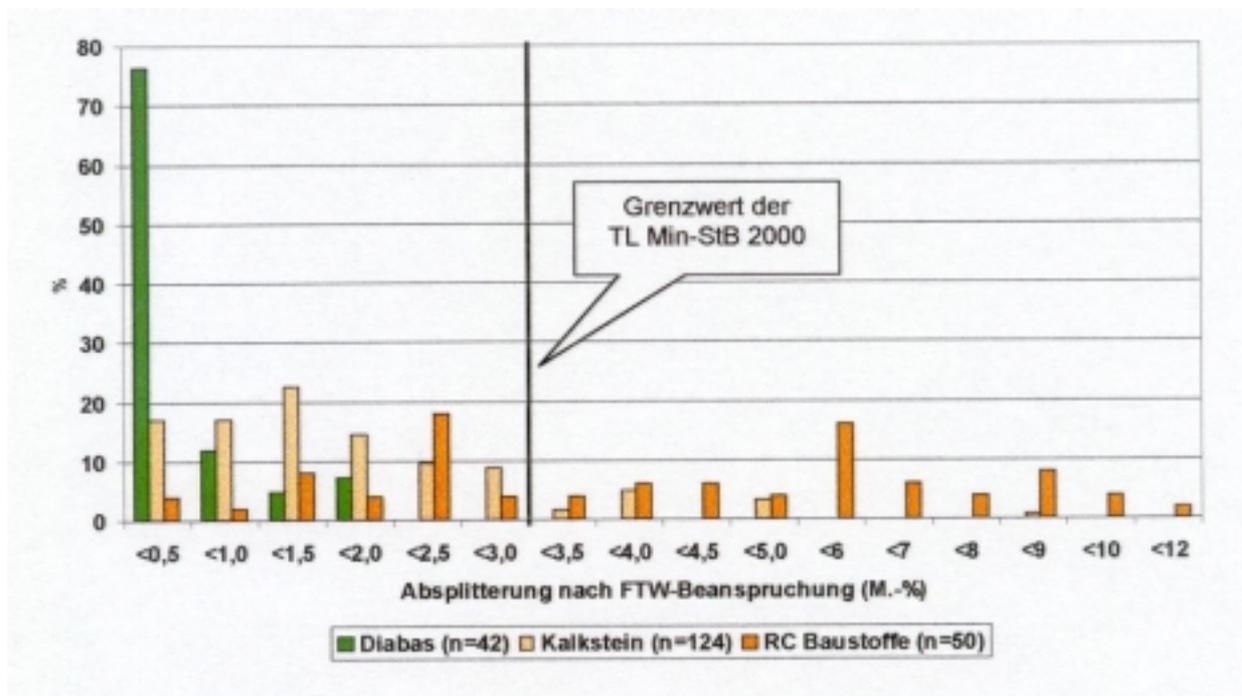


Abbildung 4-2: FTW-Ergebnisse an natürlichen Gesteinskörnungen und RC-Baustoffen nach Ergebnissen von Tabbert (1996)

4.4.2. RC-Baustoffe in der Schlagbeanspruchung

Die von TABBERT zusammengestellten Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12}$ (Vergl. Kap. 1.5.6 und 4.4.1) zeigen bei 107 Prüfergebnissen an Basalt einen Mittelwert von 14,5. Diabas hat bei 89 Prüfungen einen Mittelwert von 13,8. Bei den 75 untersuchten Recyclingbaustoffen liegt dieser Mittelwert der Schlagzertrümmerung bei 27,5. Der Unterschied zwischen den natürlichen Mineralbaustoffen, am Beispiel

Basalt und dem Recyclingmaterial wird anhand der prozentualen Verteilung der $SZ_{8/12}$ -Werte in der folgenden Abbildung 4-3 besonders deutlich:

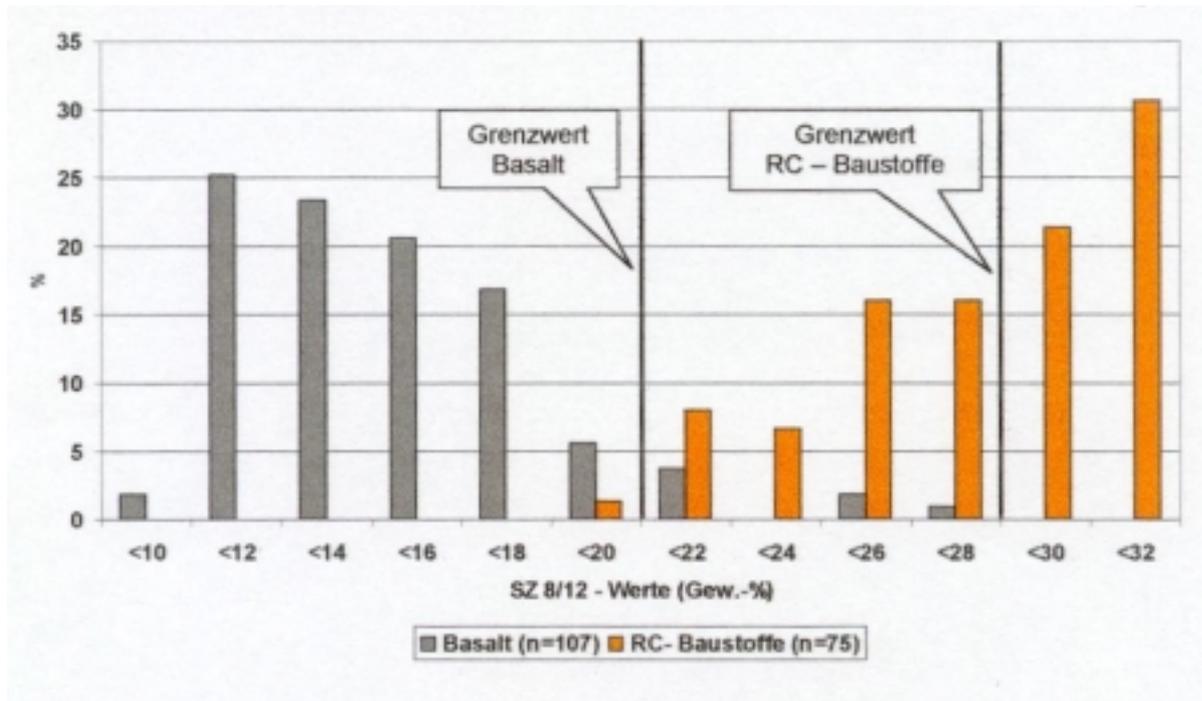


Abbildung 4-3: Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12}$ an Basalten und RC-Baustoffen nach Ergebnissen von Tabbert (1996)

Das Ergebnis, von TABBERT anhand von 75 Schlagzertrümmerungsversuchen an RC-Baustoffen zusammengestellt, zeigt eine eindeutige Tendenz. Über die Hälfte der untersuchten RC-Baustoffe hat die Grenze des höchstzulässigen $SZ_{8/12}$ -Wertes überschritten. Ein ähnliches Bild liefert auch eine Untersuchung von HINRICHS (1998), der Schlagzertrümmerungswerte eines Ringversuches auswertete. Im Hauptversuch lagen die 14 gefundenen $SZ_{8/12}$ -Werte in einer Spanne zwischen 24,5 und 31,5. Wiederum konnten in dieser Versuchsreihe, bei einem Mittelwert von 28,6, über 60% der untersuchten RC-Baustoffe nicht den von der TL Min-StB geforderten Grenzwert von $SZ_{8/12} \leq 28$ einhalten.

4.4.3. Industrielle Nebenprodukte als Deckschichtmaterial

Im Wegebau liegen für die Verwendung von Schlacken ausreichende Erfahrungen vor, die keinen Zweifel lassen, daß diese „künstlichen Gesteine“ eine den natürlichen Gesteinen ebenbürtige technische Eignung haben. Bei der Verwendung als ungebundenes Deckschichtmaterial scheinen Hochofenschlacke und Hüttensand durch ihre „latent hydraulischen“ Eigenschaften sogar technisch einen Vorteil zu be-

sitzen. Latent hydraulisch ist ein Stoff, der unter Gegenwart eines sulfatischen oder alkalischen Anregers hydraulisch erhärtet, d. h. unter Wasser oder an der Luft steinartig erhärtet und fest bleibt (GEISELER, 1992). Durch diese hydraulischen Effekte wird die Grenzziehung zwischen ungebundenen und gebunden Bauweisen bei der Verwendung solcher Schlacken allerdings unscharf. Solche Baumaterialien sind daher nicht in die vorliegende Untersuchung einbezogen worden (vgl. Kap. 1.2).

Die periodisch wiederholte Erhebung von KELLERMANN (Krass et al., 1999) zeigt, daß von den industriellen Nebenprodukten, die nach Kap. 4.3 für eine qualifizierte Verwendung im Waldwegebau in Frage kommen, nur verschwindend geringe Mengen im Wegebau eingesetzt werden, bzw. zukünftig für diesen Zweck zur Verfügung stehen. Die Verwertungsraten dieser künstlichen Gesteine liegen zwischen 98 und 100 %. Diese Verwertung findet ganz überwiegend im klassifizierten Straßenbau statt, da diese Stoffe als bewährte und vorzügliche Baumaterialien gelten (MOTZ, 1991, GEISELER, J., BIALUCHA, R. 1994). Eine gesteigerte Verwendung dieser Materialien im Wegebau ist somit, zur Unterstützung der Ziele des KrW-/AbfG, nicht notwendig.

4.5. Diskussion

Eine Verwendung von güteüberwachten Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten ist im Rahmen eines umweltbewußten Waldwegebau nur denkbar, wenn zumindest jene Anforderungen an Umwelt-, Boden- und Wasserverträglichkeit der eingesetzten Stoffe gelten, die für den klassifizierten Straßenbau nach gegenwärtigem Recht, bzw. zukünftig folgenden Regelungen, gültig sind und dargestellt wurden. Somit scheidet jede Verwendung von Reststoffen, die nicht kontrolliert aufbereitet und güteüberwacht werden, aus.

Wie gezeigt wurde, ist die qualifizierte, umweltgerechte Verwendung von güteüberwachten RC-Baustoffen unter Beachtung der in der TL Min-StB in Verbindung mit der RAwas-StB formulierten Vorgaben (Kap. 4.3) im Einzelfall möglich und im Sinne des KrW-/AbfG willkommen.

Durch die Auswertung spezieller technischer Untersuchungen im Straßenbau wird gezeigt, daß die generelle Eignung und Langlebigkeit von RC-Baustoffen als Deckschichtmaterial auf ungebundenen Wegen bezweifelt werden muß. Der Grund sind die überwiegend mäßigen bis schlechten Versuchsergebnisse zur Frostbeständigkeit und zur Resistenz gegen Schlagzertrümmerung,

Im „Technischen Teil“ wurde gezeigt, daß Materialien, die in die Schlagzertrümmerungskategorie SZ₂₂ (entsprechend einer LA-Kategorie LA₂₅) fallen, als besonders geeignetes Material für den Bau von ungebundenen Deckschichten anzusehen sind. Dieser Anforderung entspricht nur ein geringer Teil des RC-Materials. Nach den übereinstimmenden Aussagen der technischen Untersuchungen sind RC-Baustoffe mit Schlag- bzw. Schlagabriebfestigkeiten in dieser Größenordnung vor allem bei den hochwertigen RC-Baustoffen aus Betonaufbruch bzw. aus hochwertigen Straßenaufbrüchen zu erwarten.

Über die wasserrechtlichen Anforderungen hinaus hat der Waldwegebau in der Regel den Anspruch, erweiterten ökologischen Anforderungen weitestgehend gerecht zu werden. Dies erfordert die ökologische Wertigkeit und Sensibilität des angrenzenden Waldes als Naturraum. Es sollten somit die im „Ökologischen Teil“ formulierten Anmerkungen analog, auch für eine Verwendung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten gelten.

Chemische Untersuchungen an Schlacken (GEISELER, 1992) weisen sehr hohe Gehalte von 30 – 40 % Calcium aus. Das Calcium liegt, als Ergebnis der Entstehung bei sehr hohen Temperaturen, zum Teil in der chemisch reaktiven Form als gebrannter Kalk (CaO) in den künstlichen Gesteinen vor. Auch die RC-Baustoffe reagieren in wässriger Lösung deutlich alkalisch. Der stofftypische pH-Wert-Bereich liegt, wie Tabelle 4-1 zeigt, zwischen 7 und 12,5 im Eluat.

Eine Verwendung deutlich alkalisch wirkender Reststoffe kann in jenen Gebieten bzw. Fällen nicht empfohlen werden, wo eine laterale Wasserbewegung zu einer Verlagerung von Nährstoffen führen kann, die dann eine Veränderung des umgebenden Standortes zur Folge hat. Das gleiche gilt für die Verwendung von Reststoffen als Deckschichtmaterial in Gebieten, in denen eine Verstaubung des basisch wirkenden Materials eine unerwünschte Veränderung des wegbegleitenden Florenbestandes hervorrufen könnte. Eine solche Belastung wird vorrangig in bodensauren, schutzwürdigen Biotopen und in Naturschutzgebieten von Bedeutung sein und ist zu vermeiden.

Von einem großen Teil der Bevölkerung wird der Anblick von RC-Material, ohne Ansehen seiner Qualität und wasserwirtschaftlichen Eignung, vor allem wegen seiner meist „bunten“ Zusammensetzung mit roten Bestandteilen und ggf. mit einem sichtbaren Anteil an Fremdstoffen (Gummi, Kunststoffe, etc.), als ästhetisch störender Anblick empfunden, der nicht in den Naturraum Wald paßt. Dies gilt insbesondere für

ungebundenes Deckschichtmaterial, das großflächig den ästhetischen Eindruck des Wegekörpers bestimmt.

Für den Bau von Tragschichten, die mit einer Deckschicht aus verschleißresistenten natürlichen Gesteinskörnungen überbaut werden, treffen die genannten technischen und ästhetischen Einwände nicht zu. Eine qualifizierte Verwendung von künstlichen Gesteinen und RC-Baustoffen für diesen Zweck muß befürwortet werden.

Es gehört zu den eigentumsrechtlich zu sichernden Freiheiten des Waldbesitzers, die Wahl seiner Wegebaustoffe selbst zu treffen, sofern geltendes Naturschutz-, Wasser- und Bodenrecht dem nicht entgegenstehen (BECKER et al. 1995). Der Verfasser unterstützt diese Auffassung. Im Wegebau werden allerdings nur in seltenen Fällen große Mengen an Baumaterial nachgefragt. Daher ist abzuwägen, ob der Aufwand für die Beantragung einer wasserrechtlichen Genehmigung (nach § 7 und § 8 WHG, s. Kap. 4.2.4) und für das in Kap. 4-3 dargestellte Anwendungs- und Prüfverfahren in einem vernünftigen Verhältnis zur gesamten Baumaßnahme steht.

BECKER et al. (1995) empfehlen zum schnelleren Erhalt einer wasserrechtlichen Erlaubnis nach §7 und 8 WHG (s. Kap. 4.2.4) auch im Waldwegebau (wie schon z.Zt. von den öffentlich rechtlichen Trägern einer Straßenbaulast praktiziert) das von der unteren Wasserbehörde durchzuführende Prüfverfahren zu erleichtern. Das könnte einerseits durch die Erklärung des Antragstellers erfolgen, daß die Bestimmungen der RAwas-StB in Verbindung mit der TL Min-StB, wie in Kap. 4-3 dargestellt, uneingeschränkt Anwendung finden soll, und andererseits durch eine Übertragung des Nachweises der Gütesicherung auf den Lieferanten des Reststoffes.

Für den Nachweis der Gütesicherung sind durch den Verkäufer oder Lieferanten des Materials neben dem Eignungsnachweis die Ergebnisse der Eigen- und Fremdüberwachung zu erbringen. Weiterhin wird empfohlen, für jede angelieferte Lkw-Ladung eine Bestätigung der Materialeigenschaft und Herkunft durch einzelne, vom Fahrer des Lkw mitgezeichnete Lieferscheine zu verlangen.

In der praktischen Anwendung der Gütesicherung (s. Kap. 1.3.1) liegt ein bedeutendes Problem bei der Verwendung von RC-Baustoffen. Auch die Verpflichtung zur vierteljährlichen Fremdüberwachung ist kein ausreichendes Instrument zur Gewährleistung einwandfreier Materialeigenschaften. In diesem System gelingt es den sog. „schwarzen Schafen“ der RC-Branche immer wieder, die Materialien zu vermischen und das Prinzip der Kreislaufwirtschaft in Verruf zu bringen (KRASS, 2000, II).

5. Synoptische Diskussion

Bei Auswertung der aktuellen Literatur zu dem Lehr- und Forschungsgebiet „Waldwegebau“ läßt deutlich werden, daß die moderne, computergestützte Forschung in den letzten Jahren vor allem die funktionenbezogene Optimierung des Waldwegernetzes unter Anwendung geografischer Informationssysteme zum Gegenstand hat (JAEGER, 1995, HENTSCHEL, 1999). Sachfragen zur Wahl geeigneter Wegbaumaterialien wurden seit Mitte der 80er Jahre (SCHUTZENDORFF, 1985, DIETZ, et al., 1984) nicht mehr systematisch untersucht.

Vor dem Hintergrund der Tatsache, daß in den alten Bundesländern der Neubau von Waldwegen weitgehend abgeschlossen ist, kann ohne prophetischen Anklang behauptet werden, daß die Erhaltung des funktionstüchtigen Erschließungssystems aus Waldwegen, auch in den zukünftigen Dekaden, eine zentrale und kostenintensive Aufgabe der Forstwirtschaft sein wird. Bei dieser Erhaltung spielt, neben der Arbeit effizient und umweltgerecht funktionierender Baumaschinen und deren Einsatzplanung, die Wahl geeigneter Baumaterialien, insbesondere von Gesteinskörnungen für die periodisch zu erneuernden Deckschichten, eine zentrale Rolle.

Zur Erreichung der Ziele im „Technischen Teil“ (Seite 6) der vorliegenden Untersuchung war es von großer Bedeutung, die Literatur des klassifizierten Straßenbaues auszuwerten. Die hier in weitaus größerem Umfang vorliegenden experimentellen Ergebnisse konnten für den eigenen Untersuchungszweck analog interpretiert werden. Schwerpunkt des technischen Teils sind Untersuchungen zur Resistenz der Deckschichtmaterialien gegen Schlagabriebbelastungen mit der Los Angeles (LA)-Trommel und durch Frost-Tau-Wechsel-Belastungen.

Die wesentlichen Ergebnisse des Technischen Teils können wie folgt aufgelistet werde:

- Der im klassifizierten Straßenbau bewährte Los Angeles-Versuch ist besonders geeignet, die Verschleißbedingungen, denen Gesteinskörnungen in ungebundenen Deckschichten unterworfen sind, zeitgerafft zu simulieren.
- Die Versuchsergebnisse des LA-Pilotversuches decken sich weitgehend mit empirischen Beobachtungen aus der Praxis, die besonders hohen Materialverschleiß auf Wegdecken beschreiben, die mit Gesteinskörnungen gedeckt sind, die hohe Schlagabriebverluste im Versuch aufweisen.

- Im LA-Versuch wurde kein signifikanter Unterschied zwischen klassifiziertem, güteüberwachtem Material und preiswerteren, nicht klassifizierten Gesteinskörnungen, bzw. Vorabsiebungen gefunden.
- Auffällig ist weiterhin die besondere Korngrößenverteilung (KGV) der nicht klassifizierten Wegebaugesteine mit einem auffallend hohen, durchschnittlich 13%igen Massenanteil in der Schluff- und Feinstfraktion (Ton) $< 0,063$ mm (s. Kap. 1.5.2). Die Regelwerke im Straßenbau und ländlichen Wegebau (ZTV LW 99) begrenzen den zulässigen Anteil dieses Feinmaterials bei 7 % im eingebauten Zustand.

Die Feinteilnachbildung innerhalb des Korngefüges nimmt eine zentrale Stellung für die Haltbarkeit ungebundener Wegedecken ein. Sie wird in einem eigenen Kap. 1.3.4. dargestellt. Auf ländlichen Wegen wird eine Schadensabfolge aus Verstaubung des Feinkornanteils durch starke Besonnung und häufigen Verkehrsübergang mit anschließendem Feinteilmangel durch zu geringe Nachbildung beobachtet. Im Gegensatz hierzu bleiben „die bindenden Kräfte des Wassers“ durch das Waldinnenklima länger wirksam. Eine zu geringer Feinteilnachbildung aufgrund großer Schlagabriebresistenz der Gesteine ist in ungebundenen Waldwegedecken wesentlich seltener die Ursache für die auf ländlichen Wegen anzutreffende Schadensfolge. Dies bestätigen auch die Erfahrungen von Praktikern und die Ergebnisse von umfangreichen, neueren Untersuchungen aus Idaho von FOLTZ und TRUEBE (1996, s. Kap. 1.3.3).

In der Praxis treten meist die negativen Eigenschaften einer zu großen Feinteilnachbildung bei den weichen Gesteinskörnungen in den Vordergrund. Die hieraus resultierende Schadensfolge beginnt meist mit Aufweichen der Wegedecke durch einen zu hohen Anteil an Kapillarwasser. Nachfolgend kommt es zu einer Labilisierung des Stützgefüges und Verdrückung beim Lastübergang in Wechselwirkung mit Spurrinnenbildung. In diesen Rinnen fließt später Niederschlagswasser mit erodierender Wirkung.

Zukünftig ist aus technischen Gründen zu wünschen, daß die Erprobung des Deckschichtmaterials mit der vorgestellten Prüfmethode Eingang in die Praxis des Waldwegebaues hält. Sofern keine Auskünfte aus der Fremd- und Eigenüberwachung der Steinbruchbetriebe zur Verschleißresistenz vorliegen, scheint im Einzelfall eine Prüfung des Materials über den Los-Angeles Versuch oder die ersatzweise Ermittlung des Schlagzertrümmerungswertes (SZ) sinnvoll zu sein. Dies gilt insbesondere für Materialien mit einer erwarteten Kategorie LA₃₀ bzw. entsprechend SZ₂₆ und darüber, im Sinne der in Kap. 1.3.1 und 1.7 vorgestellten prEN 13242. Solche

Tests sollten auch routinemäßig vor der Abnahme großer Mengen an Gesteinskörnungen ohne Güteüberwachung oder Vorabsiebungen erfolgen. Ergänzend kann in Einzelfällen auch die Ermittlung der Frostbeständigkeit (Kap. 1.6) empfohlen werden.

Die Diskussion um die Auswirkungen der Deckschichtmaterialien auf den umgebenden Waldstandort durch Verstaubung und laterale Verlagerung von Feinmaterial mit dem Niederschlagswasser war, wie in der Einleitung dargestellt, entscheidend für die Entstehung der vorliegenden Untersuchung.

Die wesentlichen Ergebnisse der ökologischen Untersuchungen im Hinblick auf die Auswirkungen des Deckschichtmaterials auf den angrenzenden Waldstandort sind:

- Sowohl mit Hilfe der pflanzensoziologischen Methodik nach ELLENBERG, wie auch durch unterstützende Ermittlung des pH-Wertes im Oberboden, sind in der Umgebung der untersuchten Wege deutliche Einflüsse zu verzeichnen. Diese stammen von der Verlagerung des Wegematerials, und lassen sich anhand signifikant erhöhter pH-Werte (tlw. pH 7 bis 8) und dem vermehrten Auftreten von Basenzeigern in der Vegetation nachweisen.
- Die Auswirkungen lassen sich bislang nur in einem begrenzten Bereich, der in der Regel eine Breite von 4 bis 6 Metern, teilweise bis zu 10 m, beidseitig des Weges hat, nachweisen. Die pH-Erhöhung hängt sehr stark vom Bodentyp ab. Zur genaueren, feiner gestaffelten Darstellung der Auswirkung basischer Stoffe im sauren Bodenmedium wird von ROFFAEL (2000) aus chemischer Sicht bei zukünftigen Untersuchungen die ergänzende Ermittlung der Pufferkapazität des Bodens empfohlen.
- Es kann gezeigt werden, daß die Nährstoffversorgung einen deutlichen steuernden Einfluß auf die Bedeutung des Lichtgenusses für die Vegetation hat. Wegerandbereiche zeigen mit dem Eintrag von basisch wirkenden Materialien, unabhängig von einer Steigerung des Lichtgenusses, eine signifikant erhöhte Artenzahl verbunden mit dem vermehrten Auftreten von Basenzeigern in der krautigen Vegetation.
- Eine umfassende chemische Analyse verschiedener Wegbaumaterialien stützt die vegetationskundlichen Beobachtungen. Mit Hilfe einer einfachen Modellrechnung wird, am Beispiel des Elements Calcium, die Depositionsrates im Umfeld eines mit einer Deckschicht aus Kalkschotter versehenen Weges kalkuliert. Auch unter kalkulatorisch vorsichtig gewählten Annahmen wird gezeigt, daß aus Staubemission im Wegeumfeld die 8 bis 14-fach größere Menge an Calcium als

bei einer üblichen Kompensationskalkulation auf den Wegeseitenstreifen und den angrenzenden Waldboden gelangen können.

Entscheidend für die Bewertung dieser Vorgänge ist der Standpunkt des Betrachters. Sofern das Leitbild dieser Bewertung die möglichst unbeeinflusste Entwicklung des natürlichen Artenspektrums des Waldstandortes ist, muß gefolgert werden, daß besser auf Material für den Deckschichtbau zurückgegriffen werden sollte, das in seiner chemischen Zusammensetzung möglichst weitgehend mit dem autochthonen Ausgangssubstrat übereinstimmt. D. h. es müßte auf der überwiegenden Zahl der Standorte auf „saure Gesteine“, mit einem SiO_2 -Gehalt von mehr als 65 %, zurückgegriffen werden (s. Kap. 1.5.1). Eben diese Gesteine bzw. Gesteinskörnungen zeigen aber häufig nicht die geforderten technischen Eigenschaften, vor allem im Hinblick auf die Schlagabriebresistenz und die Frostbeständigkeit.

Mit einer Forderung nach der überwiegenden Verwendung autochthoner, bzw. in chemischer Hinsicht dem umgebenden Waldstandort möglichst ähnlicher (i.d.R. saurer) Gesteinskörnungen, wäre somit eine deutliche Verkürzung des Instandsetzungsintervalls verbunden. Eine Verkürzung dieses Intervalls von rd. 25 Jahren auf 15 Jahre, wie es sich beispielsweise aus der Forderung, im Solling ausschließlich Wegedecken mit autochthonem Buntsandstein zu erneuern, ergeben würde, hat darüber hinaus bedeutsame ökonomische Auswirkungen.

Unter Anwendung der dynamischen Investitionsrechnung (Kapitalwertmethode) wird im ökonomischen Teil die betriebswirtschaftliche Bedeutung der richtigen Wahl geeigneter, langlebiger Deckschichtmaterialien untersucht. In dem oben angenommenen Fall, einer Verkürzung des Erneuerungsintervalls um 10 Jahre, würden sich, nach einer Kalkulation anhand einfacher Kennziffern, für den Bereich des Staatswaldes im südniedersächsischen Bergland, die Gesamtkosten der Wegeerhaltung um jährlich rd. 0,6 Mio. DM erhöhen. Genauere kalkulatorische Ergebnisse lassen sich kaum erstellen, da sie vor allem von der Wahl des unterstellten Zinsfußes für die dynamische Kalkulation und von der allgemeinen Bauteuerungsrate bestimmt werden.

Die Forderung nach einer weitgehenden Verwendung autochthoner, bzw. „saurer“ Gesteine gewinnt aus naturschutzfachlicher Sicht auf bodensauereren und natürlicherweise (nicht erst durch die anthropogene Einflußnahme) nährstoffarmen Standorten eine besondere Bedeutung. Hier gilt es, der „allgemeinen Nivellierung zu einem mesotrophen Niveau“ (DRACHENFELS, 1998) keinen weiteren Vorschub durch den Einfluß von Wegebaumaterialien zu leisten. Dieser Prozeß der Nivellierung erfolgt vor allem durch die atmosphärischen Schadstoffeinträge auf großer Fläche des Wal-

des (Forstliche Standortaufnahme, 1996). Besondere Beachtung sollten in diesem Zusammenhang auch die Sonder- und Refugialbiotope seltener, an dystrophe Standorte gebundene Pflanzen- und auch Tierarten bekommen. Solche Refugien sind allerdings häufig erst durch den Waldwegebau im Bereich der Böschungsschnitte entstanden.

Ein weiterer Bewertungsansatz sieht überwiegend positive Auswirkung in der Wirkung basischer Wegebaumaterialien. Zum einen stellen die erhöhten pH-Werte im Seitenstreifen zwar die Grundlage zur Florenveränderung eines Gebietes dar (z.B. *Urtica dioica*, *Galium album*, div. *Arctium*-Arten). Auf der anderen Seite bieten sie solchen Pflanzen einen Rückzugsraum, die auf den, durch die anthropogene Beeinflussung stark versauerten Böden nur noch selten zu finden sind, aber natürlicherweise vorkämen (z.B. *Dentaria bulbifera*, *Polygonatum verticillatum*, *Galium sylvaticum*, *Scrophularia nodosa* / GLOWIENKA, 1994, s. Kap. 2.3).

Folgt man diesem Bewertungsansatz, so ergeben sich durch die Wahl des Wegematerials sogar gestalterische Möglichkeiten. Das Wegematerial und die von ihm ausgehenden Effekte können genutzt werden, um gleichzeitig Vielfalt in den Wäldern zu schaffen. Dann sollten gezielt stark von den Böden unterschiedliche Materialien verwendet werden, da auf diese Weise eine partielle Regeneration von versauerten und nährstoffverarmten Waldböden im Wegeumfeld erreicht werden kann (Beese, 2000). Nach Ansicht des Verfassers ist auch dieser Ansatz, in Abhängigkeit von der Zielsetzung des Waldbesitzers legitim und fachlich begründet.

Die Folgerungen aus dem Exkurs „Recyclingbaustoffe und Industrielle Nebenprodukte“ sind in Kap. 4.5 dargelegt und sollen hier nicht weiter erörtert werden. Es sei jedoch noch einmal betont, daß für den Zweck der vorliegenden Untersuchung (Materialwahl für ungebundene Deckschichten), diese Baustoffe keine Alternative zu den natürlichen Gesteinskörnungen darstellen. Dies wird vor allem technisch aber auch ästhetisch begründet. Das vorgestellte, mit großer Wahrscheinlichkeit bald bundesweit einheitliche System zur Verwendung dieser Baustoffe nach wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten (RAwas-StB in Verbindung mit TL Min-StB) eröffnet dem Waldbesitzer jedoch weitere Möglichkeiten zur qualifizierten Verwendung von RC-Baustoffen und künstlichen Gesteinen, etwa zum Bau von Tragschichten.

Bei einer „vernünftigen“ Entscheidung zur Materialwahl im Sinne einer ökosystemaren Gesamtbilanz muß der Faktor Transportentfernung entsprechend gewichtet werden. Ein unverhältnismäßig hoher Aufwand für den Antransport von mineralischem Baustoff kann ein wesentliches Argument für die Verwendung einer orts-

nah verfügbaren, technisch etwas weniger geeigneten, natürlichen Gesteinskörnung oder eines zugelassenen und güteüberwachten künstlichen Gesteins-, bzw. für einen hochwertigen RC-Baustoff sein.

Dem Praktiker können aus der vorliegende Untersuchung keine rezeptiven Empfehlungen zur Wahl eines bestimmten Materials gegeben werden. Dies soll auch aus Gründen der Wettbewerbsverzerrung zwischen den Betreibern der Steinbrüche (Produzenten der hier untersuchten Materialien) unterbleiben. Mit dem aufgezeigten Instrumentarium lassen sich jedoch in technischer, ökologischer und letztlich auch in betriebswirtschaftlicher Hinsicht Entscheidungen zur Materialwahl treffen und sachlich begründen.

6. Zusammenfassung

Die Bedeutung der Materialwahl für den Bau und die Erhaltung von ungebundenen Deckschichten im Waldwegebau ist in den letzten Jahren in den Blickpunkt einer, in Sachfragen des Umwelt- und Naturschutzes sensibilisierten Öffentlichkeit gerückt. Ursächlich sind Änderungen der Bodenflora und des Standortes im Umfeld von Waldwegen, die in Zusammenhang mit basischem Wegebaumaterial (Gesteinskörnungen) in der Deckschicht der Wege gebracht werden. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, diese ökologischen Aspekte nicht isoliert, sondern im Kontext mit einer gleichrangigen, parallelen Einbeziehung der technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkte zu betrachten. Dies soll zeigen, inwieweit ökologisch günstige Lösungen mit einer angemessenen technischen Eignung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte in Einklang gebracht werden können.

Dem technischen Teil der Untersuchung geht eine Darstellung des heute üblichen Bauverfahrens und der wesentlichen technischen Anforderungen an das Baumaterial für Waldwege-Deckschichten, wie in den Regelwerken des klassifizierten Straßen- und Wegebaues dargelegt, voraus. Entscheidende, für den speziellen Bereich der Deckschichtmaterialien auf Waldwegen verwertbare Aussagen finden sich insbesondere in der neuen prEN 13242, in der TL Min-StB 2000, der RLW 99 sowie der zugehörigen ZTV LW 99. Betrachtet und diskutiert werden vor allem die Aussagen zur Korngrößenverteilung, zum Feinkornanteil ($< 63 \mu\text{m}$), zur Resistenz gegen Schlagzertrümmerung und Schlagabrieb, zur Polierresistenz, und zur Verwitterungsresistenz im Hinblick auf Frost-Tau-Wechsel-Belastungen. Anschließend werden Aspekte, die für eine möglichst lange Nutzungsdauer der Deckschichten bedeutsam sind, im Wege von Pilotversuchen an 15 Gesteinsproben näher untersucht.

Es wird gezeigt, daß der im klassifizierten Straßenbau bewährte Los Angeles (LA)-Versuch besonders geeignet ist, die Schlagabriebbelastungen, denen Gesteinskörnungen in ungebundenen Deckschichten unterworfen sind, zeitgerafft zu simulieren. Im Pilotversuch wird eine Bildung von zwei unterschiedlich schlagabriebresistenten Klassen nachgewiesen. Es wurden „harte“ Gesteine mit LA- Werten von ca. 13 bis 17 untersucht, die sich deutlich von den „weicheren“ Gesteinen abgrenzen. Die Versuchsergebnisse decken sich weitgehend mit Beobachtungen aus der Praxis über die Dauerhaftigkeit solcher Materialien als Deckschichtmaterial.

Ein Vergleich der untersuchten güteüberwachten und klassifizierten Gesteine mit preisgünstigem, nicht klassifiziertem Material bzw. Vorabsiebungen zeigt, mit

durchschnittlich 13%, einen deutlich erhöhten, über den maximal zulässigen Grenzwerten der Regelwerke liegenden Massenanteil an Feinmaterial ($< 63 \mu\text{m}$). Demgegenüber hat das nicht klassifizierte Material bei der Schlagabriebbelastung im LA-Versuch den gleichem Widerstand gegen Zertrümmerung wie das teurere, güteüberwachte Material gezeigt. Die Bedeutung eines erhöhten Anteiles an Feinmaterial für die Wegedecken sowie die Bedeutung der Feinkornnachbildung wird diskutiert.

Eine Kategorienbildung zur Schlag- und Schlagabriebresistenz aus den neuesten Europäischen Normen für Gesteinskörnung im Straßenbau wird vorgestellt und ein Vorschlag für deren Anwendung bei Waldwege-Deckschichtmaterial unterbreitet.

Weiterhin werden Frost-Tau-Wechsel-Versuche zur Darstellung der Witterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit am Deckschichtmaterial durchgeführt und diskutiert.

Im ökologischen Teil der Untersuchung werden vor allem die Auswirkungen basischer Gesteine in Deckschichten und Tragdeckschichten auf den umgebenden Waldstandort untersucht. Den eigenen Untersuchungen geht eine Literaturrecherche zur Wegerandvegetation und zur Staubausbreitung im Wegeumfeld voraus. In Harz, Solling und Bramwald können mit Hilfe der pflanzensoziologischen Methodik (nach ELLENBERG) durch das Wegematerial bedingte Änderungen der wegbegleitenden Flora dokumentiert werden. Eine Interaktion von Licht- und Nährstoffversorgung mit einem signifikanten Einfluß des Wegematerials auf die Flora kann gezeigt werden.

Auch anhand von pH-Wert-Messungen im Oberboden wird in der Arbeit ein signifikanter Materialeinfluß im Wegeumfeld gezeigt, der sich im Regelfall über einen 5 bis 6 m, in einigen Fällen bis zu 10 m breiten wegparallelen Streifen erstreckt. Bei Deckschichten aus Kalken und basischen Gesteinen lassen sich pH-Werte von 7 bis 8 im Wegeumfeld nachweisen.

Die pflanzensoziologischen Beobachtungen werden durch eine chemische Analyse an Feinmaterial von Wegebaugesteinen gestützt. Über den HNO_3 -Druckaufschluß sowie über die Elution mit Wasser werden der absolute Elementgehalt sowie die unmittelbar verfügbare, auswaschbare Menge der Elemente, die für das Pflanzenwachstum bedeutsam ist, ermittelt und in Beziehung zu den Elementvorräten einiger typischer Waldgesellschaften sowie zu den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung (BZE, 1996) gebracht.

Mit Hilfe einer einfachen Modellrechnung wird, am Beispiel des Elements Calcium, die Depositionsrates im Umfeld eines mit einer Deckschicht aus Kalkschotter versehenen Weges kalkuliert. Auch unter kalkulatorisch vorsichtig gewählten Annahmen

wird gezeigt, daß aus Staubemission im Wegeumfeld die 8 bis 14-fach größere Menge an Calcium als bei einer üblichen Kompensationskalkung auf den Wegeseitenstreifen und den angrenzenden Waldboden gelangen können.

Unter Anwendung der dynamischen Investitionsrechnung (Kapitalwertmethode) wird die betriebswirtschaftliche Bedeutung der richtigen Wahl geeigneter, langlebiger Deckschichtmaterialien untersucht. Zunächst wurde die generelle betriebswirtschaftliche Überlegenheit ungebundener Bauweisen im Vergleich zu gebundenen Ausführungen aufgrund der deutlich niedrigeren Neubaukosten, auch unter der Annahme wesentlich höherer Erhaltungskosten, auf der Basis heutiger Preise verdeutlicht. Ein Vergleich von Deckschichtmaterialien verschiedener Haltbarkeit im Hinblick auf ihre Nutzungsdauer zeigt die Bedeutung zukünftiger Folgekosten: Eine Absenkung des Nutzungszeitraumes um 10 Jahre (von 25 auf 15) erhöht die Kosten der Deckschichterneuerung drastisch um rd. 5000,- DM/km, sofern die Folgekosten auf den Stichtag der Erhaltungsmaßnahme diskontiert werden (bei einem Zinsfuß der Diskontierung von 5%, und einer Bauteuerung von jährlich 2%). Für den Bereich des Staatswaldes im südniedersächsischen Bergland würden sich die Gesamtkosten der Wegeerhaltung unter dieser Annahme um jährlich rd. 0,6 Mio. DM erhöhen.

Weiterhin wird der Frage nachgegangen, ob Recyclingbaustoffe und industrielle Nebenprodukte eine Alternative zu natürlichen Gesteinskörnungen für Waldwegedeckschichten darstellen. Die Verwendungsmöglichkeiten dieser „künstlichen Gesteine“ werden in Abhängigkeit von der Bauweise und der Lage der Baumaßnahme und vor dem Hintergrund boden- und wasserrechtlicher Bestimmungen dargestellt. Hierzu liegen erstmalig für den klassifizierten Straßenbau bundeseinheitliche Regelungen im Entwurf vor, die, nach Reduzierung auf die speziellen Anforderungen des Waldwegebaues, analog angewendet werden können. Daneben bestehen weitere administrative Probleme bei der Güteüberwachung. Es kann gezeigt werden, wie die große Variabilität der Festigkeits- und Verwitterungseigenschaften der Recyclingbaustoffe eine breit angelegte Verwendung dieser Materialien als Deckschichtmaterial im Waldwegebau erschwert.

In einer Schlußdiskussion der zusammengestellten Kriterien werden Vorschläge für die Wahl geeigneter Materialien zum Bau und der Erhaltung von Deckschichten, unter Berücksichtigung der Umwelt- und Naturschutzaspekte sowie der technischen und betriebswirtschaftlichen Anforderungen unterbreitet.

7. Literatur- und Quellenverzeichnis / Vorschriften und Richtlinien

- ALBERT, A. (1991):** Im Wald sind asphaltierte Wege völlig überflüssig. – Der Schwarzwald IV/91.
- AFNOR NFP-18-372:** Granulats - Le mode opératoire pour la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats - L'appareil micro-Deval, Association Française de Normalisation, 1990.
- ARBEITSKREIS „WALDBAU UND NATURSCHUTZ“ (1988):** Waldwegebau und Naturschutz; in Natur- und Landschaftskunde 24.
- ARBEITSKREIS STANDORTKARTIERUNG (1996):** Forstliche Standortaufnahme, Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen, 5. Auflage, IHW-Verlag, Eching bei München.
- ASTM C 131-81:** Normprüfverfahren zur Bestimmung des Zerkleinerungswiderstandes von feinkörnigen Mineralstoffen durch Abrieb und Schlag in der Los Angeles-Trommel, American Society for Testing and Materials.
- BALLMANN, P. (1996):** Vergleichende Untersuchungen zwischen Los Angeles-Prüfverfahren und Schlagversuch, Die Naturstein-Industrie, Heft 6, 1996.
- BECKER, G. (1995):** Walderschließung auf dem Prüfstand, AFZ 9, S. 482-483.
- BECKER, G., BARGE, U., RESSMANN, J. (1995):** Umweltverträglicher Waldwegebau in Nordrhein-Westfalen, Gutachten des Instituts für Forstbenutzung, Göttingen, im Auftrag des MURL, NRW.
- BECKER, G.; HOFMANN, R.; ROEDER, A.; EISENBARTH, E.; HANEWINKEL, M.; (1989):** Bodenschäden durch Forstmaschinen auf Tonstandorten, F&H 44 (1989) S. 507-512.
- BEESE, F. (2000):** Informationsgespräche im Institut für Bodenkunde und Waldernährung, mdl. Mittlg., Okt. 1999 bis Juni 2000, Göttingen.
- BEHRENDT, W. (1990):** Waldwegebau und Naturschutz, Forstbetriebliche Aspekte. AFZ 1990, H.48 S. 1177-1181.
- BERG V., W., SCHNIERING, A. (1994):** Neue Technische Lieferbedingungen für Schmelzkammergranulat, Steinkohlenflugasche und Recycling-Baustoffe. S&A 2/94, S. 75.
- BERG, C., MAHN, E.-G. (1990):** Anthropogene Vegetationsveränderungen der Straßenrandvegetation in den letzten 30 Jahren - die Glatthaferwiesen des Raumes Halle/Saale, Tuexenia 10, Göttingen, S. 181-194.
- BERTRAM, A. (1997):** Vergleich der Erhaltungsintensität für das Wegenetz in zwei Inspektionen der Niedersächsischen Landesforstverwaltung anhand wegebau technischer und betriebswirtschaftlicher Kennziffern, Diplomarbeit, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen.

- BIELKA, P. (1998):** Angaben aus dem Amt für Flurneuordnung und Landentwicklung Freiburg, Informationsgespräch am 19.05.1998.
- BORNKAMM, R., MEYER, G., MARKAN, K. (1993):** Über die Wirkung von Kronenschluß und Düngung auf die Entwicklung von Waldbodenarten eines Kiefernforstes in Berlin-Spandau. *Phytocoenologia* 23: 601-610.
- BRAND, W. (1977):** Mineralische Baustoffe, Handbuch des Straßenbaus, Bd. 1, 2 und 3, Springer Verlag, Berlin/München/New York 1977.
- BRAND, W., NIES, V. (1969):** Festigkeit als Maßstab für die Eignung von Naturstein für den Straßenbau bei Prüfung nach deutschen und amerikanischen Normen DIN 52 109 und ASTM C 131 und C 535, Berichte aus der Arbeit des Baustofflaboratoriums Ingenieurbüro Brand und Nies, Heft 1, Köln 1969.
- BRANZ, H. (1994):** Das Wegebaukonzept im Bezirk Darmstadt, *AFZ* 24, S.1329.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1964):** Pflanzensoziologie, 3. Aufl., Springer, Wien, 865 S.
- BURKHALTER, R., SCHADER, S. (1994):** Straßen statt Wiesen und Wälder? Ökologische und ökonomische Beurteilung von Forst- und Güterstraßen, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 1994.
- CORNELIUS, P. (1996):** Tiefengradienten mikrobieller Kenngrößen in Böden von Buchenwaldökosystemen, Diplomarbeit, IBW, Universität Göttingen.
- DAO, N. X. (1971):** Die Stabilität des Bitumenbetons und die Kornverfeinerung seines Mineralgerüsts. *Die Straße* 11 (1971).
- DIENEMANN, B. (1980):** Zusammenhang zwischen Mineralstoffeigenschaften und Feinteilnachbildung sowie Auswirkung auf das rheologische Verhalten von Walzasphalten. Dissertation TU Braunschweig 1980.
- DIETZ, P., TEXTOR, H (1978):** Eignungsvergleich verschiedener Deckenbauweisen für Waldfahrwege, *Forstarchiv* 1978, Heft 10, Seite 193-198.
- DIETZ, P., KNIGGE, W., LÖFFLER, H. (1984):** Walderschließung, Hamburg und Berlin, Vlg. Paul Parey.
- DOHMANN, M., TRÄNKLER, J. (1986):** Abwasser- und abfalltechnische Aspekte bei der Verwendung aufbereiteten Bauschutts. Universitäts-Gesamthochschule Essen, Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen.
- DOHRENBUSCH, A. (1987):** Kann die „relative Beleuchtungsstärke“ die Lichtverhältnisse im Wald zuverlässig charakterisieren? *Forstarchiv* 58: 24-27.
- DRACHENFELS, (1998):** Besprechung zur Thematik „Wegebaumaterial und Wegeumfeld“ mit Mitarbeitern des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie (NLÖ) und der Landesforstverwaltung zur Thematik, im Mai 1998, FoA Dassel, eigene Aufzeichnungen.

- DVGW (1995):** Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete, Teil 1, „Schutzgebiete für Grundwasser“ des Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- EBA-NS 86, Fassung 1997:** Ergänzende Bestimmungen der Niedersächsischen Straßenbauverwaltung zu den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von bituminösen Fahrbahndecken, Niedersächsisches Landesamt, Hannover 1997.
- EBER, W. (1972):** Über das Lichtklima von Wäldern bei Göttingen und seinen Einfluß auf die Bodenvegetation. Scripta Geobot. 3, 150 S.
- EDOM, E. (1998):** Wann wird Abfall zum Baustoff? Vortrag bei der Mineralstofftagung 1997 in Celle, Schriftenreihe der Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“ der FGSV, Heft 7.
- EHLERS, E.-H. (1975):** Möglichkeiten zu einer besseren Ausnutzung des natürlich vorkommenden Frostschutzmaterials für den Straßenbau unter besonderer Berücksichtigung der Frost-Tau-Wechsel Versuche. Dissertation, Fak. f. Bauwesen, TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- EHRENDORFER, F. (HRSG.) (1973):** Liste der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. 2. Auflage, Fischer-Verlag, 318 S.
- EICHHORN, J. (1995):** Stickstoffsättigung und ihre Auswirkungen auf das Buchenwaldökosystem der Fallstudie Zierenberg. Forsch.Z. Waldökosyst., Reihe A, Bd. 124, 175 S.
- ELLENBERG, H. (1996):** Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen, 5. Aufl., Ulmer, Stuttgart, 1095 S.
- ELLENBERG, H., WEBER, H., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W., PAULIßEN, D. (1992):** Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobot. 18, 2. Auflage, 258 S.
- ELLIOT, W.J., HALL, D.E., GRAVES, S.R. (1999):** Predicting sedimentation from forest roads, Journal of Forestry, August 1999, 97(8):23-29. Auch in: <http://forest.moscowsl.wsu.edu/4702/4702pubs.html>
- ENGLERT, K. F. (1952):** Zur Frage der Wirtschaftlichkeit beim Waldstraßenbau, Allg. Forstz. 7, 25/26, S. 281-283.
- EPPENSTEINER, W., KRZEMIEN, R. (1975):** Ergänzende Untersuchungen zur Prüfung von Korngemischen in der Los Angeles-Trommelmühle, Schriftenreihe „Straßenforschung“ des Bundesministeriums für Bauten und Technik der Republik Österreich, Heft 81, Wien 1975.
- ERNST, K., ROFFAEL, E. UND WEBER, A., (1998):** Umweltschutz in der Holzwerkstoffindustrie, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie der Georg-August-Universität Göttingen, 228 S.
- EYMER, W. (1995):** Grundlagen der Erdbewegung, Kirschbaum Verlag.

- FABER, O., DOLDT, A. (1932):** Der Waldstraßenbau, Karlsruhe.
- FGSV (1993):** ARBEITSAUSSCHUß LÄNDLICHE WEGE, Merkblatt für die Erhaltung ländlicher Wege, Köln.
- FOLTZ, R.B. (1996):** Traffic and notraffic on an aggregate surfaced road: sediment production differences, Präsentiert beim FAO Seminar „Environmentally Sound Forest Roads“, Juni 1996, Sinaia, Rumänien, 13 S. Auch: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/4702/4702pubs.html>
- FOLTZ, R.B., ELLIOT, W.J. (1996):** Measuring and modeling impacts of tire pressures on road erosion. Präsentiert beim FAO Seminar (siehe vorherige Quelle), 14 S.
- FOLTZ, R.B., TRUEBE, M.A. (1995):** Effect of Aggregate Quality on Sediment Production from Forest Road. Proceedings of the Sixth International Conference on Low-Volume Roads, VI, p49-57. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/4702/4702pubs.html>
- FRAHM, J. P., FREY, W. (1992):** Moosflora. 3. Auflage, Ulmer-Verlag, 525 S.
- FRIEDEN, P. et al. (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1995):** Forst- und Güterstraßen: Asphalt oder Kies?, Schriftenreihe Umwelt Nr. 247, Bern 1995.
- FRITSCH, K., (1996):** Das neue Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – Aktuelles Recht für Praktiker, Verlag Beck, München: 291 S.
- GANTEN, H. (1974):** Schadensrisiko und Pflichtverletzung im privaten Baurecht: Ein Beitrag zur Zurechnungslehre im Schuldrecht des BGB, Bielefeld, Giese-king.
- GEISELER, J. (1990):** Verwertung von Hochofen- und Stahlwerksschlacken. In: 1. Nordrhein-Westfälischer Recycling-Kongreß. LWA-Materialien 2/90 176-188, Düsseldorf.
- GEISELER, J., (1992):** Verwertung von Hochofen und Stahlwerksschlacken, Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Heft 1, Referate im Zeitraum 1988 – 1991.
- GEISELER, J., BIALUCHA, R. (1994):** Wasserwirtschaftliche Anforderungen an industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe im Straßenbau, Regelungen und erste Erfahrungen. S&A 2/94, S.65.
- GERLACH, A. (1975):** Die technischen und wirtschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten von Mineralgemischen aus gebrochenem Naturstein für Schottertragsschichten im Straßenbau. S&A 26 S. 60-65.
- GLOWIENKA, M (1994):** Waldwege im Harz und ihre Standortfaktoren, Diplomarbeit, Systematisch-Geobotanisches Institut, Göttingen.

- GORTON, F. (1985):** Praxis und Kosten einer landschaftsschonenden Bauausführung von Forststraßen, Österreichische Forstzeitung.
- GUTH, K.-H. (1997):** Verwitterungsbeständigkeit von Recycling-Baustoffen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Straßenbau, Heft S1.
- HAPLA, F. (1993):** Versuchsplanung in der Holzforschung unter Berücksichtigung der Repräsentativität der Ergebnisse sowie des Arbeitsaufwands. Holz als Roh- und Werkstoff 51, 1993, Heidelberg (Springer).
- HAPPE, E. (1995):** Vegetation und Standortverhältnisse im Naturwald und Naturschutzgebiet „Totenberg“ (Bramwald). Dipl.-Arbeit der Forstl. Fakultät Univ. Göttingen, 115 S.
- HENTSCHEL, S. (1999):** Funktionenbezogene Optimierung der Walderschließung im Göttinger Stadtwald unter Einsatz geographischer Informationssysteme, Dissertation, Göttingen, auch:
<http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/1999/hentsche/inhalt.htm>
- HERBELL, J.-D., (1997):** Auswirkungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes auf die Holzwerkstoffindustrie, in „Mobil Holzwerkstoff-Symposium 1997“, Tagungsband herausgegeben von Mobil Schmierstoff GmbH, Hamburg.
- HERWIG, A (1991):** Erhaltung forstwirtschaftlicher Lkw-Fahrwege, AFZ 26/1991 S.1353-1356.
- HERWIG, A. (1998 oder 1999):** Diverse Informationsgespräche und Aufzeichnungen zur Thematik der Untersuchungen, Arbeitstreffen Göttingen Mai 1998 und März '99.
- HERWIG, A., KREUZKAM, H. J., PIEST, K. H. (1998 oder 1999):** Diverse Informationsgespräche in den Wegebaustützpunkten Seelzerthurm und Riefensbeek im Zeitraum 1998 bis 1999.
- HINRICHS, W. (1998):** Schlagversuch an RC-Baustoffen, S&A Nr. 2/97. S. 64 – 68.
- HIRT, R. (1977):** Bau- und Unterhaltungskosten von Wald- und Güterstraßen, Zeitung für Forstwesen, 4, April 1977, Schweiz.
- HÖFLE, H. H. (1997):** Umweltfreundliche Methoden bei Wegebau, Holzernte und Transport, Holz-Zentralblatt Nr. 113 und 118/199, Stuttgart.
- HOLZAPFEL, A.M., (1997):** Kreislaufwirtschaft in der Praxis, Umwelt Bd. 27 (1997), Nr. 1/2: S. 58.
- HUHEEY, J. et al. (1995):** Anorganische Chemie: Prinzipien von Struktur und Reaktivität, de Gruyter Verlag, Berlin.

- JAEGER, D. (1995):** Planung und Bewertung von Baumaßnahmen in der freien Landschaft unter Einsatz geographischer Informationssysteme und computergestützter, interaktiver Planungsmethoden (CAD) am Beispiel der integrierten Erschließung und Projektplanung von Waldwegen, Dissertation, Göttingen, Cuvillier.
- JANSSEN, G. (1990):** Nachhaltige Forstwirtschaft – zukunftsweisende Nutzung naturnaher Ökosysteme. Forstarchiv, 61. Jg. S. 219-225.
- KIESEKAMP, H. (1958):** Gedanken zu aktuellen Wegebaufragen, Forst- u. Holzw., 13, 368-371.
- KIRSCH, H. (1965):** Technische Mineralogie; Angewandte Mineralogie für Ingenieure und Techniker; Vogel-Verlag; Würzburg 1965.
- KNIGGE, W (1988):** Vorlesung Walderschließung und Waldwegebau, Forstwissenschaftlicher Fachbereich Göttingen 1985; Vorlesungsmitschrift des Verfassers, unveröffentlicht.
- KÖLLER, V., H., (1996):** Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz: Textausgabe mit Erläuterungen, 2. Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin: 392 S.
- KÖNIG, N., FORTMANN, H. (1999):** Probenvorbereitungs-, und Untersuchungsmethoden, Qualitätskontrolle und Datenverarbeitung, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd 49., Selbstverlag, Göttingen 1999, ISSN 0939-1339.
- KÖNIG, N., WOLFF, B. (1993):** Abschlußbericht über die Ergebnisse und Konsequenzen der im Rahmen der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) durchgeführten Ringanalysen, Ber. Forschungszentr. Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe B, Bd. 33, 113 S.
- KOPECKÝ, K. (1978):** Die strassenbegleitenden Rasengesellschaften im Gebirge Orlické horý und seinem Vorlande. – Vegetace CSSR, ser. A, Praha, 49: 347-303.
- KOPECKÝ, K. (1988):** Einfluß der Straßen auf die Synanthropisierung der Flora und Vegetation nach Beobachtungen in der Tschechoslowakei, Folia Geobot. Phytotax. 23: 145-171.
- KRASS, K. (2000):** Neugestaltung der Technischen Regelwerke des Straßenbaus durch Einbeziehung der Europäischen Normen, S&A, 1/2000, S. 58.
- KRASS, K. (2000, I):** Richtlinien für die Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen aus wasserwirtschaftlicher Sicht – Ausgabe 2000, Vortrag bei der Mineralstofftagung 2000, 24. März, Magdeburg, bislang unveröffentlicht.
- KRASS, K. (2000,II):** Informationsgespräch im Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau der TU Bochum am 19.06.2000.

- KRASS, K., KELLERMANN, CHR., ROHLEDER, M. (1999):** Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1997 – Teil 1 Recycling Baustoffe. S&A 8/99 –Teil 2 Industrielle Nebenprodukte S&A 9/99.
- KRASS, K., RADENBERG, M. (1993):** Anfall, Aufbereitung und Verwertung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen. S&A 12/93.
- KREBS, H.G., BÖLLINGER, G. (1981):** Temperaturberechnung an bituminösen Straßenkörpern. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347.
- KROTH, W. (1973):** Entscheidungsgrundlagen bei Walderschließungsinvestitionen, Forstwiss. Cbl. 92 (1973) 3. S. 132-151.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA, 1996):** Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen – Technische Regeln - Stand 5. Sept. 1995, E. Schmidt Verlag, Neuburg.
- LANGE, S., SCHMIDT, W. (1989):** Vegetation und Phänologie von Feldwegen östlich von Göttingen, Verh. Ges. Ökol. 19/II, S. 600-605.
- LEERS, K.J. und JOHANNKNECHT, A. (1975):** Beurteilung der Widerstandsfähigkeit von Mineralkörnungen gegenüber mechanischen Beanspruchungen, Straßen- und Tiefbau 29, Heft 2/1975.
- LEHMANN, H. (1964):** Praktische Untersuchungen zur Bestimmung des Ablaufes von Mahlkörperbewegungen in einer Modell-Trommelmühle von 1 m Durchmesser, Tonindustrie-Zeitung 88, Heft 7/8, 1964.
- LEIBUNDGUT, H (1966):** Die Waldpflege, S. 11 Verlag P. Haupt, Bern.
- LEINS, W., DRAEGER, W. (1976):** Verhalten von Naturgestein unter dynamischer Dauerbeanspruchung bei besonderer Berücksichtigung von Mineralgemischen. Bundesminister für Verkehr, Schlußbericht FA 9.210, Aachen 1976.
- LENKER, S. (2000):** Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Ausgabe 2000, Vortrag bei der Mineralstofftagung 2000, 24. März, Magdeburg, S&A 5/2000.
- LEUTNER, R. (2000):** Informationsgespräche im Institut für Straßenwesen, Braunschweig, 1997 –2000.
- LÖFFLER, K. (1971):** Methoden zur Untersuchung der Veränderungen an Splitt durch Frost und deren Beurteilung aus Laborversuchen, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 117, Aachen, TH., Fak. f. Bauwesen, Diss. 1971.
- LOFTFIELD, N., BEESE, F. (1999):** HNO₃-Druckaufschlüsse: Eine brauchbare Methode zur ökochemischen Charakterisierung von Böden, Poster, Jahrestagung der Bodenkundlichen Gesellschaft, 1999 Hannover.

- MADER, H.-J. (1990):** Ökologische Aspekte des Waldwegebaues. AFZ 46-47. S. 1184-1187.
- MADER, H.J., SCHELL, C., KORNAKER, P. (1988):** Feldwege - Lebensraum und Barriere. In: Natur und Landschaft, H.6, S. 252-255.
- MARESCH, W., MEDENBACH, O. (1996):** Gesteine, Mosaik-Verlag, München.
- MATTHES, S. (1993):** Mineralogie, eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- MEDERAKE, R. (1991):** Vegetationsentwicklung und Standortbedingungen von Straßenbegleitflächen bei unterschiedlicher Pflege, Dissertation Math.-Nat. FB, Universität Göttingen, 371 S.
- MEDERAKE, R., SCHMIDT, W. (1991):** Pflege-Versuche zur Sukzessionslenkung auf Straßenbegleitflächen, Systematisch - Geobotanisches Institut der Universität Göttingen, Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn Bad-Godesberg, in Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik – Heft 618.
- MEIBNER, H.-D. (1999):** Die Neufassung der Richtlinien für den ländlichen Wegebau (RLW 1999), S&A, 12/99, S. 642
- MESTERS, K. (1998):** Verfahren zur Auslaugung von Mineralstoffen – Ergebnisse einer Forschungsarbeit, S&A 2/98, S. 69-75.
- MOHR, K. (1964):** 400 Millionen Jahre Harzgeschichte; die Geologie des Westharzes, Piepersche Buchdruckerei und Verlagsanstalt, Clausthal-Zellerfeld.
- MOTZ, H. (1991):** Bewertung der Umweltverträglichkeit von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen, S&A 7/91, S. 394.
- MROTZEK, R. (1998):** Wuchsdynamik und Mineralstoffhaushalt der Krautschicht in einem Buchenwald auf Basalt. Ber. Forsch. Z. Waldökosyst., Reihe A, Bd. 152, 197 S.
- MROTZEK, R., PFIRRMANN, H., BARGE, U. (2000):** Einfluß von Wegebaumaterial und Licht auf die Vegetation an Waldwegen und im angrenzenden Bestand – dargestellt an Wegen im Nds. Forstamt Bramwald, Forstarchiv, zur Veröffentlichung im Jahr 2000 angenommen.
- MROTZEK, R., SCHMIDT, W. (1993):** Untersuchung des Einflusses von Pflegemaßnahmen auf die Entwicklung der Vegetation in Straßenbegleitflächen. Abschlußbericht des Forschungsvorh. FE 02.146 R92L des Bundesamtes für Straßenbau, 65 S.
- MROTZEK, R., SCHMIDT, W. (1998):** Zur Ausbreitung der Großen Brennessel (*Urtica dioica* L.) in Buchenwäldern und deren möglichen Ursachen. Forst & Holz, Bd. 53: 237-240.
- MÜLLER, G. (1980):** Die Sedimentgesteine des Harzes, Clausthaler Geologische Abhandlungen, 37, Verlag Ellen Pilger, Clausthal-Zellerfeld.

- MÜLLER, G., STRAUß, K.-W. (1987):** Gesteine des Harzes, Clausthaler Geologische Abhandlungen, Sonderband Heft 5, Verlag Ellen Pilger, Clausthal-Zellerfeld.
- NAGLER, A., SCHMIDT, W., STOTTELE, T. (1989):** Die Vegetation an Autobahnen und Straßen in Südhessen, Tuexenia 9, S. 151-182.
- NLF (1996):** Jahresbericht der niedersächsischen Landesforstverwaltung 1996, Eigenverlag.
- OFFERMANN, H. (1988):** Recycling von Bauschutt - Technische und ökonomische Kriterien bei der Verfahrenswahl. Dissertation Uni Essen.
- ÖNORM B 3128:** Prüfung von Naturstein und von anorganischen Baustoffen - Prüfung von Körnungen in der Los Angeles-Trommel, Österreichisches Normeninstitut 1986.
- OTTO, H.-J. (1991):** Langfristige, ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Walde 43, 527 S.
- PAURITSCH, G., MADER, H. J., ERZ (1985):** Beziehungen zwischen Straße und freilebender Tierwelt - Faunistische Kriterien und Entscheidungshilfen bei der Trassenwahl. In: Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 444.
- PIEST, K.-H. (1970):** Organisatorische Grundlagen für eine wirtschaftliche Nutzung moderner Technik in der Forstwirtschaft am Beispiel des forstlichen Wegbaus. Forst- u. Holzw. 25, 2, 26-29.
- PIEST, K.H. (1990):** Erhaltung von Waldwegen, AFZ 46/1990, S. 1187-1189.
- PIEST, K.-H. (1997):** Zur Akzeptanz ungebundener Deckschichten auf ländlichen Wegen. Materialiensammlung des Lehrstuhls für Bodenordnung und Landentwicklung der technischen Universität München, Heft 18/1997.
- prEN 13242 (2000):** „Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction“, Association Française de Normalisation, liegt z. Zt. im Entwurf vor, Fassung 11/98.
- PRENZEL, J. (1985):** Die maximale Löslichkeit von oberflächlich ausgebrachtem Kalk, AFZ, 43/1985, S. 1142.
- QUERVAIN, F. DE (1957):** Prüfung der petrografischen Eigenschaften der Gesteine, Handbuch der Werkstoffprüfung III, Bd. 2, Berlin.
- QUERVAIN, F. DE und MOOS, A. v. (1948):** Technische Gesteinskunde, Basel.
- RAP Stra 98:** Richtlinien für die Anerkennung von Prüfstellen für Baustoffe und Baustoffgemische im Straßenbau, Ausgabe 1998, FGSV-Verlag, Köln.

- RAwas-StB:** Richtlinien für die Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau aus wasserwirtschaftlicher Sicht (liegt im Entwurf vor), Fassung Dezember 1999.
- REINHARDT, I. (1998):** Mineralstoffe für den Straßenbau aus dem Großraum Braunschweig und die Beschreibung Ihrer Hafteigenschaften, Entwurfsaufgabe, Institut für Straßenwesen, Braunschweig.
- RG Min-StB 93:** Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau, Bundesministerium für Verkehr 1993, FGSV-Verlag, Köln.
- RITTER, H.-J. (2000):** Gesteinskörnungen für den Straßenbau – Europäische Normen und ihre deutsche Umsetzung, Vortrag bei der Mineralstofftagung 2000, 24. März, Magdeburg, bislang unveröffentlicht.
- RLW (1975):** DVWK - Regeln zur Wasserwirtschaft (1976): RLW 1975, Richtlinien für den ländlichen Wegebau, Hamburg und Berlin, Verlag Paul Parey.
- RLW (1999):** DVWK - Regeln zur Wasserwirtschaft 137/1999: RLW 1999, Richtlinien für den ländlichen Wegebau, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- ROFFAEL, E. (2000):** Diverse Informationsgespräche und Aufzeichnungen zur Thematik der Untersuchungen, Arbeitstreffen Göttingen 1996 bis 2000.
- ROLFES, B. (1992):** Moderne Investitionsrechnung, Oldenbourg, ISBN 3.486-22345-3.
- RUTHSATZ, B., OTTE, A. (1987):** Kleinstrukturen im Raum Ingolstadt: Schutz und Zeigerwert Teil III. Feldwegränder und Ackerraine, Tuexenia 7, S. 139-163.
- SAMUELSSON, C. (1926):** Studien über die Wirkungen des Windes, Bull. geol. Inst. Univ. Upsala, 20.
- SCHALL, B. (1987):** Die Vegetation der Waldwege und ihre Korrelation zu den Waldgesellschaften in verschiedenen Landschaften Süddeutschlands mit einigen Vorschlägen zur Anlage und Pflege von Waldwegen, Diss. Univ. Freiburg i. Br., 210 S.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1967):** Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart, Enke-Verlag 1967.
- SCHEMERL, J. (1807):** Ausführliche Anweisung zur Entwerfung, Erbauung und Erhaltung dauerhafter und bequemer Straßen, Degensche Buchhandlung, Wien 1807.
- SCHINK, A. (1989):** Naturschutz- und Landschaftsrecht in Nordrhein-Westfalen, Köln 1989.
- SCHMIDT, W. (1974):** Die vegetationskundliche Untersuchung von Dauerprobeflächen. Mitt. Florist.-Soziol. Arbeitsgem. N. F. 17: 103-106.

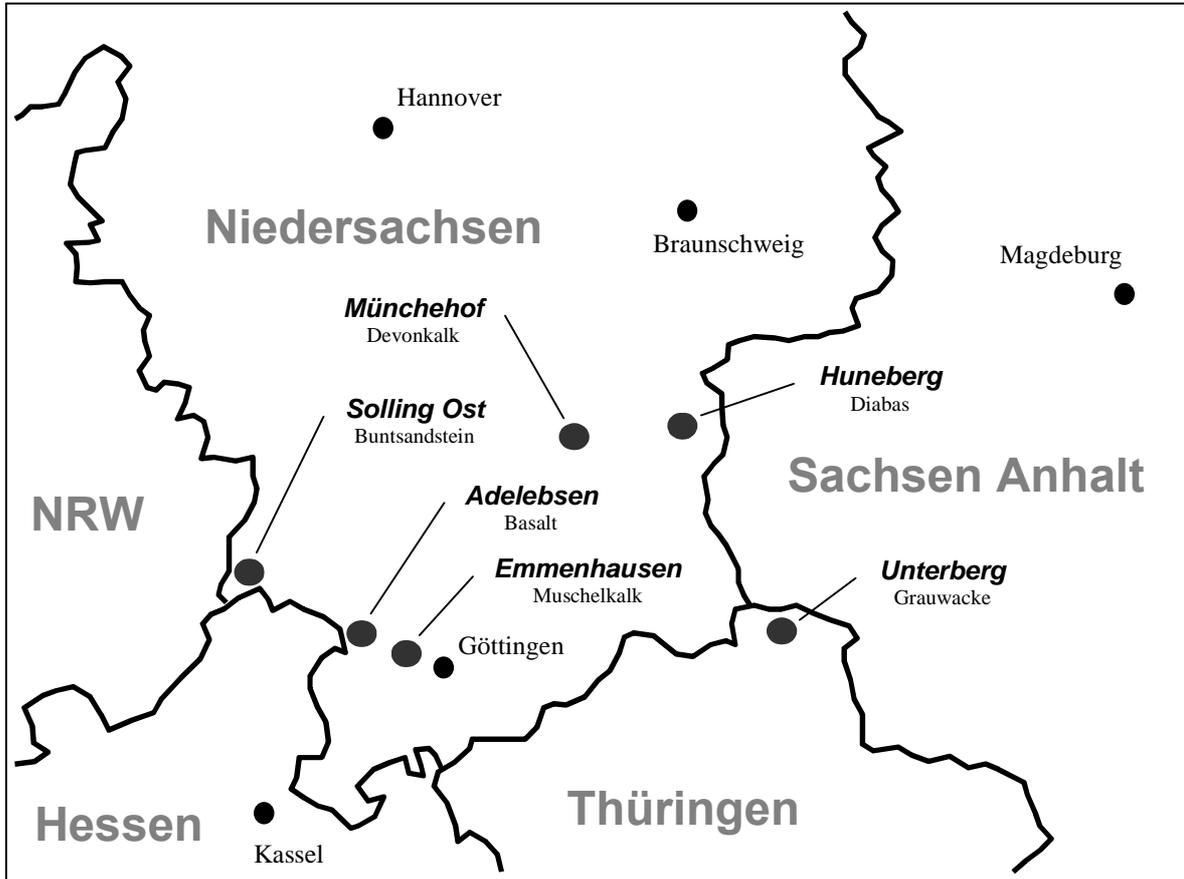
- SCHMIDT, W. (1987):** Straßenbegleitende Vegetation, Zur Erfassung, Bewertung und Lenkung in einer extrem anthropogenen Vegetation, In: HILBIG, W. u. SCHUBERT, R. (Hrsg.): Erfassung und Bewertung anthropogener Vegetationsänderungen, Kongreß- und Tagungsbericht, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Wiss. Beitr., 1987 Teil 1 (P 26), S. 227-250.
- SCHMIDT, W. (1989):** Plant dispersal by motor cars. - Vegetatio 80: 147-152.
- SCHMIDT, W. (1991):** Forschungsbestand und -bedarf des Arten und Biotopschutzes im Bereich Straße aus botanischer Sicht, In: Henle, K., Kaule, G. (Hrsg.): Arten- und Biotopschutzforschung für Deutschland, Berichte aus der Ökologischen Forschung, Bd. 4/1992, Forschungszentrum Jülich, S. 298-303.
- SCHMIDT, W. (1992):** Der Einfluß von Kalkungsmaßnahmen auf die Waldbodenvegetation. Z. Ökologie u. Naturschutz 1: 79-88.
- SCHMUCK, A. (1989):** Erhaltungsbedarf – Methodik und Zuverlässigkeit von Bedarfsermittlungen, S&A, Heft 5/1989.
- SCHMUCK, A. KRAUSE, G. (1994):** Langzeitverhalten von ungebundenen Standardbauweisen der ländlichen Neuordnung in Bayern, Informationen – Verkehrsplanung und Straßenwesen- Universität der Bundeswehr, München.
- SCHRÖDER, R., BÄR, F. (1997):** Theorie vom BGH-Richter und sinner Fru. Theorie zur rechtsdogmatischen, rechtsmethodischen und rechtstheoretischen Klärung der Entstehung der BGH-Auffassung zum Nutzungsausfall für Pkw u. andere Gegenstände, <http://www.rewi.hu-berlin.de/HFR/1-1997/Text.html>
- SCHULTZENDORFF v., H.-A. (1985):** Die technische und wirtschaftliche Entwicklung des Waldwegebau im südniedersächsischen Bergland in der Zeit von 1950 bis 1980. Dissertation Göttingen.
- SCHULTZENDORFF v., H.A.; SCHMIDT, A., (1985):** Untersuchungen über die Wirtschaftlichkeit verschiedener Deckenbauweisen, , FoHo 1985, S. 127-131.
- SCHULZE, K. (1969):** Entwicklungstendenzen bei der Prüfung, Beurteilung und Güteüberwachung von Zuschlagstoffen für bituminöse Beläge, Straßen und Tiefbau, 10.
- SEELING, U., BECKER, G. (1990):** Schadstoffeinträge in Waldböden durch Forstmaschineneinsatz; Teil 2 des Abschlußberichtes Projekt Wasser - Abfall - Boden des Kernforschungszentrums Karlsruhe.
- STOTTELE, T. (1981):** Vegetationsökologischer Vergleich von Pflanzenbeständen nah und fern der Autobahn A7 Fulda-Würzburg. Dipl.-Arbeit im Fachbereich Biologie Univ. Göttingen, 109 S.
- STOTTELE, T. (1995):** Vegetation und Flora am Straßennetz westdeutscher Landschaften, Dissertationes botanicae 248, Berlin, 360 S.

- STOTTELE, T., SCHMIDT., W. (1988):** Flora und Vegetation an Straßen und Autobahnen der Bundesrepublik Deutschland, Systematisch - Geobotanisches Institut der Universität Göttingen, Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg in Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik - 1988- Heft 529.
- STRITTMATTER, P. (1979):** Frost- Tau- Wechsel- Prüfung an Mineralstoffen. Wissenschaftliche Arbeit am Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe.
- TABBERT, G. (1996):** Qualität von mineralischen Straßenbaustoffen, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Bremerhaven, ISBN: 3-89429-780-8.
- TAMM, C.O., TROEDSSON, T. (1955):** An example of the amounts of plants nutrients supplied to the ground in road dust. – Oikos, Copenhagen, 6: 61-70.
- THURM, W. (1994):** Güteüberwachung von Mineralstoffen nach den RG Min-StB 93. S&A 1/94, S.14.
- TL Min-StB 2000:** Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Bundesministerium für Verkehr 2000, FGSV-Verlag, Köln.
- TOUSSAINT, A. (1995):** Neue Technische Lieferbedingungen für natürliche Mineralstoffe, industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe. S&A 1/95, S.18.
- TOUSSAINT, A. (1998):** Zur Verwitterungsbeständigkeit von RC-Baustoffen – Untersuchungen an unterschiedlichen Recyclingbaustoffen, Vortrag bei der Mineralstofftagung 1997 in Celle, Schriftenreihe der Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“ der FGSV, Heft 7, auch in S&A 1998.
- TP Min-StB 94:** Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau, Bundesministerium für Verkehr, Ausgabe 1994, FGSV-Verlag, Köln.
- TUCHOLSKY K. (1995):** Gesammelte Werke, Band 3, Reinbek bei Hamburg 1995, S. 352f. Beachte von diesem Autor auch freilich ohne jeglichen Bezug zu dieser Arbeit: "Manoli linksrum -!" Das Leben ist nur noch in besoffenem Zustand zu ertragen.
- UDDEN, J.A. (1896):** The mechanical composition of wind deposits, Augustana Libr. Publ. 1.
- VANECEK J. (1972):** Zavleone rostliny v chránené krajinné oblasti Šumava. (Synanthrop eingebürgerte Pflanzen im Naturschutzgebiet Šumava, Böhmerwald / Übers. Dr. Hapla) – Chrán. Kraj. Oblast Šumava – Zprav., Ces. Bu d e jovice, 13: 28-31.
- VILLWOCK, R. (1966):** Industriegesteinskunde; Eine Einführung in die technische Petrographie, Stein-Verlag, Offenbach/Main 1966.

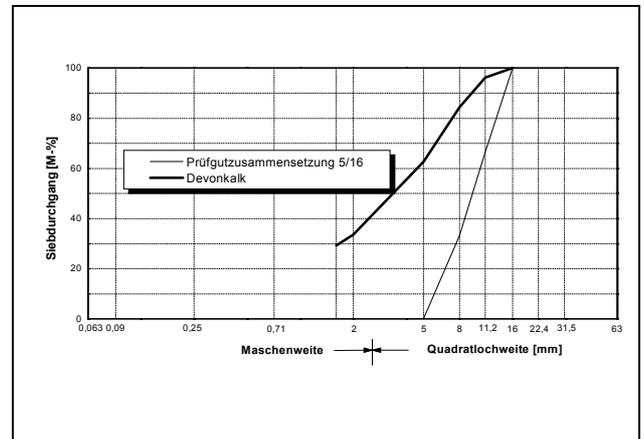
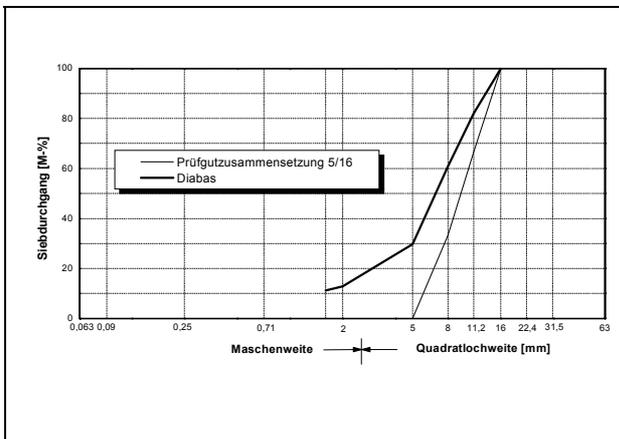
- VOGLER, H. (1988):** Vergleichende Trocken- und Naßprüfungen der Festigkeit von Gesteinskörnungen - Setzungs- und Kugelmühlenversuche - , Die Naturstein-Industrie, Heft 7.
- WAGENBRETH, O. (1977):** Naturwissenschaftliches Grundwissen für Ingenieure des Bauwesens, Band 3 Technische Gesteinskunde, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- WAGNER, L. (1997):** Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Wegebaudeckschichtmaterialien auf die Vegetation im Umfeld der Wege im Solling – Diplomarbeit, FFW Göttingen.
- WAGNER, L., BARGE, U. (1998):** Für die Wegeerhaltung praxisrelevante Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Wegebaudeckschichtmaterialien auf die Vegetation im Umfeld der Wege im Solling, Gutachten für die Niedersächsische Landesforstverwaltung.
- WALKER, I., TRÄNKLER, J. (1993):** Forschungsnetz Abfallwirtschaft und Altlasten des Landes Nordrhein-Westfalen (Verbundprojekt 2, Knoten 3). Untersuchungen zur künftigen Verwertbarkeit von Bauschutt. LWA Materialien Nr. 7/93, Düsseldorf.
- WENDENBURG, H. (1995):** Die Umsetzung des Europäischen Abfallrechts, in: Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht, Nr. 9/1995, S. 833-840.
- WERNER, W. (1995):** Auswirkungen der Waldkalkung auf die Krautschicht eines Fichtenforstes – Eine Fallstudie aus dem Hunsrück. Verh. Ges. Ökol. 24: 343-352.
- WINKLER, N (1992):** Spezielle hydrologische Probleme im Forststraßenbau, Dissertation, Institut für Forsttechnik, BoKu, Wien 1992.
- WOIKE, M (1995):** mdl. Mitteilung, Informationsgespräch am 16.05.1995 in der Landesanstalt für Ökologie..., Recklinghausen, NRW.
- WOLFF, B., RIEK, W. (1997):** Deutscher Waldbodenbericht 1996, Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987 – 1993 (BZE), BMELF, Bonn, Eigenverlag.
- WULFF, S. (1998):** Das Los Angeles- Verfahren als Prüfmethode von Mineralstoffen gegen Zertrümmerung. Entwurfsaufgabe, Institut für Straßenwesen und Erdbau, Technische Universität Braunschweig, 1998.
- ZACHARIAS, D. (1989):** Flora und Vegetation von Waldrändern in Abhängigkeit von der angrenzenden Nutzung – unter Berücksichtigung auch der floristisch schwer charakterisierbaren Bestände. Verh. Ges. Ökol. 19 (2): 336-345.
- ZTV LW 99:** Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Befestigung ländlicher Wege, Ausgabe 1999, FGSV-Verlag, Köln.
- ZTVT-StB 95:** Zusätzliche technische Vertragsbedingungen für den Bau von Trag-schichten im Straßenbau, Ausgabe 1995, FGSV-Verlag, Köln.

8. Anhänge 1 – 9

Lage der Gewinnungsstätten der untersuchten Gesteinskörnungen



Korngrößenverteilung nach dem LA-Versuch bei Diabas und Devonkalk



Liste des Prüfmaterials für den LA-Versuch

Prüfungsnummer	Mineralstoffart	Eimer-Nummer	Korngröße	Bemerkungen	LA-Prüfung am:
1	Diabas	1	0/22	braun	16.06.
	Diabas	2	0/22	braun	
2	Diabas	3	0/22	grau	23.10.
	Diabas	4	0/22	grau	
3	Diabas	5	0/32	B2	23.10.
4	Basalt	1	0/22	zu wenig Material	25.11.
	Basalt	2	0/22	Forstwegematerial	
5	Basalt	3	0/22	Forstwegematerial	23.10.
	Basalt	4	0/22	Forstwegematerial	
6	Basalt	5	0/32	B2	23.10.
7	Devonkalk	1	0/30	Vorabsiebung	28.10.
	Devonkalk	2	0/30	Vorabsiebung	
8	Devonkalk	3	0/32	B2	30.10.
	Devonkalk	4	0/32	B2	
9	Grauwacke	1	0/22	2.Wahl/Forst	06.11.
	Grauwacke	2	0/22	2.Wahl/Forst	
10	Grauwacke	3	0/22	1.Wahl	06.11.
	Grauwacke	4	0/22	1.Wahl	
11	Buntsandstein	1	0/100		18.11.
	Buntsandstein	2	0/100		
	Buntsandstein	3	0/100		
12	Muschelkalk	1	0/32		18.11.
	Muschelkalk	2	0/40	Vorabsiebung	
	Muschelkalk	3	0/45	B2	

Ergebnis der Frost-Tau-Wechselversuche am Waldwegematerial

Gestein	Bezeichnung alt (LA-Versuch)	Korngrößenverteilung vor dem Versuch [mm]	Masse trocken [g]	Masse Rückstand [g]	Masse Durchgang [g]
Probe 1 Diabas	1	1,6 - 16	2273,5	2266,9	6,6
Probe 2 Diabas	2	1,6 - 16	2027,0	2024,7	2,3
Probe 3 Basalt	4	1,6 - 16	2161,6		
Probe 4 Devonkalk	7	1,6 - 16	2605,2	2596,7	8,5
Probe 5 Devonkalk	8	1,6 - 16	2907,4	2897,1	10,3
Probe 6 Grauwacke	11	1,6 - 16	2132,7	2128,9	3,8
Probe 7 Buntsandstein	12	1,6 - 16	2680,1	2660,8	19,3
Probe 8 Buntsandstein	13	1,6 - 22	2411,6	2375,3	36,3
Probe 9 Muschelkalk	14	1,6 - 22	2951,2	2882,2	69,0
Probe 10 Muschelkalk	unbeansprucht	2 - 11,2	2118,8	2018,8	100,0

Ergebnisse der Siebung nach dem FTW-Versuch

Gestein	nächst untere Prüf- korngröße [mm]	0,5 [mm]	0,25 [mm]	0,125 [mm]	0,063 [mm]	Verlust
Probe 1 Diabas	1,0	1,7	1,0	0,6	0,9	2,4
Probe 2 Diabas	1,0	-	-	-	1,4	0,9
Probe 3 Basalt	1,0	0,6	0,3	0,4	0,3	-
Probe 4 Devonkalk	1,0	1,2	0,6	0,5	0,5	5,7
Probe 5 Devonkalk	1,0	-	-	-	2,6	7,7
Probe 6 Grauwacke	1,0	1,5	0,6	0,4	0,4	0,9
Probe 7 Buntsandstein	1,0	-	-	-	18,4	0,9
Probe 8 Buntsandstein	1,0	-	-	-	32,2	4,1
Probe 9 Muschelkalk	1,0	-	-	-	13,9	55,1
Probe 10 Muschelkalk	1,0	7,2	4,5	2,2	3,0	83,1

Probe Nr	Mineral	Fraktion	Rückstand	Al	Ca	Cd	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P
			g/kg	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g
11	Muschelkalk	63-1000 µm	329,63	43.201,80	183.992,00	0,00	35,93	21.790,90	17.805,50	8.340,38	289,22	574,74	541,74
12	Muschelkalk	< 63 µm	339,88	40.858,40	188.248,00	0,00	33,99	20.603,10	16.699,60	7.995,88	284,79	559,31	542,77
21	Diabas	63-1000 µm	627,91	37.610,10	51.747,70	0,00	56,71	69.370,40	3.570,48	35.762,10	970,93	2.680,33	772,34
22	Diabas	< 63 µm	498,28	40.986,30	77.025,70	0,34	96,55	88.968,70	3.824,65	45.417,30	1.507,22	2.460,53	898,09
31	Grauwacke	63-1000 µm	727,56	51.314,00	15.436,80	0,00	12,34	33.767,60	21.334,90	16.774,00	746,36	471,35	508,91
32	Grauwacke	< 63 µm	650,85	54.549,10	28.342,40	0,00	39,49	44.727,10	21.422,50	20.581,20	1.164,00	665,42	741,83
41	Buntsandstein	63-1000 µm	729,37	58.782,30	8.361,05	0,00	161,22	27.021,50	18.890,90	7.862,04	1.326,20	794,82	1.041,75
42	Buntsandstein	< 63 µm	813,38	40.276,70	4.197,06	0,00	114,31	18.452,70	13.487,10	5.291,61	1.124,32	529,11	865,54
51	Devonkalk	63-1000 µm	112,62	11.333,60	333.592,00	0,39	100,97	16.885,50	4.156,89	2.846,41	2.268,74	190,66	524,91
52	Devonkalk	< 63 µm	120,98	12.020,50	334.303,00	0,46	102,14	17.693,10	4.376,27	2.908,73	2.353,91	214,55	540,45
61	Buntsandstein	63-1000 µm	944,37	12.433,70	2.094,99	0,00	12,10	4.757,30	4.157,60	1.795,27	135,28	224,73	407,73
62	Buntsandstein	< 63 µm	867,03	24.192,40	10.140,40	0,00	66,12	1.480,30	7.249,72	3.660,11	609,04	413,59	730,00
71	Muschelkalk	63-1000 µm	892,31	11.621,90	380.384,00	0,00	7,50	5.545,19	5.404,25	4.675,19	104,89	413,48	358,64
72	Muschelkalk	< 63 µm	918,13	15.939,20	366.667,00	0,00	15,79	8.485,00	7.349,11	5.386,74	144,02	411,99	382,44
81	Basalt	63-1000 µm	780,37	14.553,10	14.185,20	0,00	28,19	61.869,00	1.493,44	34.275,60	985,15	5.058,09	1.256,15
82	Basalt	< 63 µm	757,43	16.457,80	19.219,30	0,00	71,45	68.825,30	1.839,77	29.501,70	1.084,47	5.007,75	1.249,24
91	Grauwacke	63-1000 µm	738,37	46.372,10	14.541,70	0,00	20,16	33.800,40	17.990,50	17.082,60	737,67	454,26	555,43
92	Grauwacke	< 63 µm	674,24	51.056,90	24.426,20	0,00	54,36	44.791,60	18.680,20	20.778,00	1.105,97	680,08	764,96
101	Devonkalk	63-1000 µm	27,63	941,85	411.574,00	0,00	14,16	5.296,20	219,66	2.179,45	927,42	123,44	329,65
102	Devonkalk	< 63 µm	46,88	2.290,62	399.023,00	0,00	29,49	11.076,70	691,84	2.549,04	1.286,09	207,13	408,24
111	Diabas	63-1000 µm	717,91	25.424,80	34.942,60	0,00	33,61	67.486,60	4.513,35	25.819,90	680,93	1.643,58	1.449,95
112	Diabas	< 63 µm	593,99	31.573,30	52.129,70	0,00	72,56	94.466,30	5.024,44	34.340,30	1.098,81	2.078,01	1.738,70
121	Basalt	63-1000 µm	776,63	15.486,90	13.997,40	0,00	28,35	62.493,40	1.569,42	33.762,80	995,98	5.336,59	1.520,55
122	Basalt	< 63 µm	761,70	17.752,50	18.443,70	0,00	64,91	67.592,20	1.974,71	29.005,80	1.052,60	5.220,47	1.173,99

Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der HNO₃-Druckaufschlüsse

ID	Herkunft	pH H2O	pH KCl	Al	C	Ca	Fe	K	Mg	Mn	N	Na	P	S
				mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g
4	Unterlüß	3,72	2,78	3,68	29,78	0,59	2,95	0,66	0,24	0,04	1,1	0,05	0,09	0,15
3	Solling B2	3,43	2,62	36,35	54,84	0,97	19,95	12,02	3,16	0,21	2,94	0,45	0,66	0,39
5	Hamburg	3,83	2,89	5,7	34,08	0,98	5,03	1,25	0,54	0,05	1,36	0,09	0,21	0,2
1	Göttinger Wald	5,03	4,06	53,21	67,2	4,82	25,9	11,72	5,75	0,99	4,52	0,46	0,58	0,58

Tabellarische Übersicht der HNO₃-Druckaufschluß Ergebnisse von CORNELIUS (1996) von vier Waldbodentypen

Probe Nr	Mineral	Fraktion	Rückstand	Al	Ca	Cd	Cu	Fe	K	Mg	Mn
			g/kg	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g
122	Basalt	< 63 µm	971,31	35,99	123,61	0,60	0,11	26,81	44,14	30,99	0,00
42	Buntsandstein	< 63 µm	956,24	28,50	127,89	0,60	0,16	12,47	34,40	16,77	0,00
82	Basalt	< 63 µm	919,96	39,15	144,45	0,30	0,45	24,75	27,01	26,36	0,00
92	Grauwacke	< 63 µm	935,70	9,32	148,37	0,60	0,03	6,26	85,15	21,41	0,00
32	Grauwacke	< 63 µm	922,13	0,00	185,20	0,60	0,00	2,55	65,29	23,45	0,00
62	Buntsandstein	< 63 µm	964,46	21,79	185,48	0,60	0,07	6,02	56,31	17,23	0,00
112	Diabas	< 63 µm	938,36	0,00	206,26	0,55	0,12	13,41	117,02	36,48	0,00
12	Muschelkalk	< 63 µm	879,22	52,21	220,86	0,65	0,04	25,67	0,00	16,53	0,00
72	Muschelkalk	< 63 µm	625,16	0,00	308,20	0,75	0,00	2,86	30,76	13,55	0,00
22	Diabas	< 63 µm	905,54	15,16	402,49	0,55	0,18	11,27	133,32	59,41	0,00
102	Devonkalk	< 63 µm	641,38	0,00	443,95	0,55	0,02	3,84	0,00	17,52	0,00
52	Devonkalk	< 63 µm	663,04	0,00	510,62	0,65	0,04	3,08	0,00	28,25	0,00
81	Basalt	63-1000 µm	978,60	97,72	45,11	0,35	1,08	43,54	41,15	30,39	0,00
121	Basalt	63-1000 µm	975,60	34,47	64,83	0,30	0,32	22,45	0,00	22,31	0,00
91	Grauwacke	63-1000 µm	949,08	18,82	68,65	0,55	0,10	16,45	0,00	12,01	0,00
31	Grauwacke	63-1000 µm	946,58	0,00	126,60	0,55	0,02	10,75	0,00	15,41	0,00
41	Buntsandstein	63-1000 µm	935,10	45,86	145,14	0,55	0,37	23,98	49,30	21,15	0,00
61	Buntsandstein	63-1000 µm	983,27	39,26	165,83	0,60	0,11	10,97	42,77	17,51	0,00
21	Diabas	63-1000 µm	953,32	25,15	178,88	0,50	0,02	5,52	61,22	19,63	0,00
111	Diabas	63-1000 µm	960,06	21,34	191,30	0,55	0,15	38,00	58,82	23,41	0,00
11	Muschelkalk	63-1000 µm	861,22	33,26	236,45	0,65	0,03	14,17	0,00	14,13	0,00
71	Muschelkalk	63-1000 µm	923,86	24,52	297,42	0,60	0,02	8,31	31,69	10,01	0,00
51	Devonkalk	63-1000 µm	654,86	0,00	404,60	0,55	0,06	3,48	0,00	23,27	0,00
101	Devonkalk	63-1000 µm	652,08	0,00	433,40	0,65	0,00	19,96	0,00	4,56	0,00

Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der Wasseraufschlüsse

Jahre (t=)	A	B	C	D	E
1	2.000,00 DM	1,020	2.040,00 DM	1,050	1.942,86 DM
2	2.000,00 DM	1,040	2.080,80 DM	1,103	1.887,35 DM
3	2.000,00 DM	1,061	2.122,42 DM	1,158	1.833,42 DM
4	2.000,00 DM	1,082	2.164,86 DM	1,216	1.781,04 DM
5	2.000,00 DM	1,104	2.208,16 DM	1,276	1.730,15 DM
6	2.000,00 DM	1,126	2.252,32 DM	1,340	1.680,72 DM
7	2.000,00 DM	1,149	2.297,37 DM	1,407	1.632,70 DM
8	2.000,00 DM	1,172	2.343,32 DM	1,477	1.586,05 DM
9	2.000,00 DM	1,195	2.390,19 DM	1,551	1.540,73 DM
10	2.000,00 DM	1,219	2.437,99 DM	1,629	1.496,71 DM
11	2.000,00 DM	1,243	2.486,75 DM	1,710	1.453,95 DM
12	2.000,00 DM	1,268	2.536,48 DM	1,796	1.412,41 DM
13	2.000,00 DM	1,294	2.587,21 DM	1,886	1.372,05 DM
14	2.000,00 DM	1,319	2.638,96 DM	1,980	1.332,85 DM
15	2.000,00 DM	1,346	2.691,74 DM	2,079	1.294,77 DM
16	2.000,00 DM	1,373	2.745,57 DM	2,183	1.257,78 DM
17	2.000,00 DM	1,400	2.800,48 DM	2,292	1.221,84 DM
18	2.000,00 DM	1,428	2.856,49 DM	2,407	1.186,93 DM
19	2.000,00 DM	1,457	2.913,62 DM	2,527	1.153,02 DM
20	2.000,00 DM	1,486	2.971,89 DM	2,653	1.120,08 DM
21	2.000,00 DM	1,516	3.031,33 DM	2,786	1.088,07 DM
22	2.000,00 DM	1,546	3.091,96 DM	2,925	1.056,99 DM
23	2.000,00 DM	1,577	3.153,80 DM	3,072	1.026,79 DM
24	2.000,00 DM	1,608	3.216,87 DM	3,225	997,45 DM
25	2.000,00 DM	1,641	3.281,21 DM	3,386	968,95 DM
26	2.000,00 DM	1,673	3.346,84 DM	3,556	941,27 DM
27	2.000,00 DM	1,707	3.413,77 DM	3,733	914,37 DM
28	2.000,00 DM	1,741	3.482,05 DM	3,920	888,25 DM
29	2.000,00 DM	1,776	3.551,69 DM	4,116	862,87 DM
30	2.000,00 DM	1,811	3.622,72 DM	4,322	838,22 DM
Summe	60.000 DM		82.759 DM		39.501 DM

Kalkulation Erhaltungskosten: Variantenvergleich - Kapitalwerte

Spalte A = Heutige jährliche Erhaltungskosten (DM/km)
 Spalte B = Faktor für Bauteuerung in % in Schreibweise 1,0i hoch t
 Spalte C = Erhaltungskosten bauteuerungsbereinigt (Spalte A mal Spalte B)
 Spalte D = Faktor für Kapitalwert in % in Schreibw. 1,0p hoch t
 Spalte E = Kapitalwert der Erhaltung im Jahr t (Spalte C geteilt durch Spalte D)

Eingangsgrößen für Wegeerhaltung:
Erhaltungskosten (DM/km): 2.000 DM
Bauteuerungsrate i: 2 %
Kalkulationszinsfuß p: 5 %

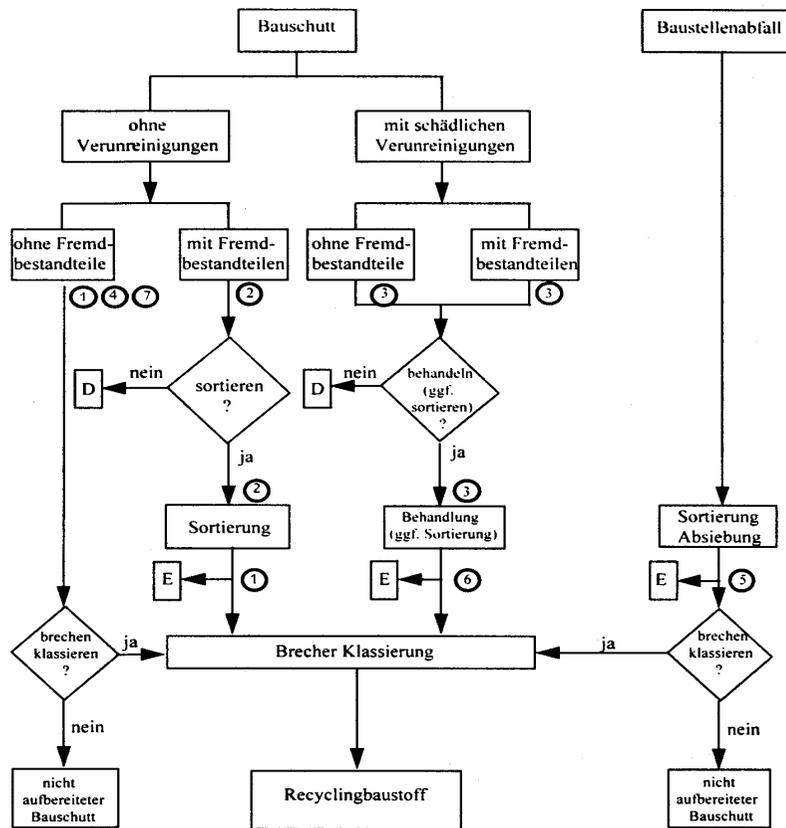
Ergebnis:
 Kapitalwert für Erhaltung k über 30 Jahre (Summe Spalte E) = **39.501 DM**

Vergleich der Wegebauvarianten:

Kosten (DM/km)	ungebunden	Asphalt / HGM
Neubaukosten (Kneu)	120.000 DM	220.000 DM
k	39.501 DM	0 DM
Ko	159.501 DM	220.000 DM
Differenz:	60.499 DM	
Kapitaldienst (KD) für Differenz = rentifizierte Differenz		3.936 DM
Rentifizierungsfaktor (r) =	0,065051435	

Excel- Formel für r: $=((\text{POTENZ}((p/100)+1;n))*p/100)/((\text{POTENZ}((p/100)+1;n)-1))$

EXCEL-Tabellenkalkulation für Kapitalwerte von Erhaltungsmaßnahmen sowie für den Variantenvergleich



→ D Ablagerung von Bauschutt mit Fremdbestandteilen und/oder schädlichen Verunreinigungen nach TASI oder TA Abfall
 → E Entsorgung der Sortierreste und Behandlungsrückstände sowie des mineralischen Absiebmaterials aus der Baustellenabfallsortierung

„Bauschutt“ im Sinne der Technischen Regeln Bauschutt	
①	Bauschutt ohne mineralische und nichtmineralische Fremdbestandteile (314 09)
②	Bauschutt mit erheblichen nichtmineralischen Fremdbestandteilen (>5 Vol.-%) (314 09)
③	Bauschutt und Bodenaushub mit schädlichen Verunreinigungen (314 41)
④	Straßenaufbruch (314 10), insbesondere hydraulisch gebundener Straßenaufbruch, sowie Natur- und Betonwerksteine, der/die gemeinsam mit Bauschutt in Bauschuttrecyclinganlagen aufbereitet werden
⑤	Mineralischer Anteil aus der Sortierung und Klassierung von Baustellenabfällen
⑥	Bauschutt oder Gemische aus Bauschutt und Bodenmaterial, der/die in Behandlungsanlagen gereinigt worden sind
⑦	Fehlchargen und Bruch aus der Produktion von mineralischem Baumaterial

Zuordnung der einzelnen Fraktionen zu den Pfaden im Ablaufdiagramm

Lebenslauf

- 25.02.1961 Geboren als Sohn der Eheleute Dr. Heinz und Dr. Ursula Barge (geb. Werk) in Oberhausen/Rheinland.
- 1966 – 1970 Lutherschule in Oberhausen/Osterfeld.
- 1970 – 1973 Gesamtschule in Oberhausen/Osterfeld.
- 1973 – 1980 Novalis-Gymnasium in Oberhausen mit Abschluß Abitur.
- 1980 – 1981 Wehrdienst in Varel/Oldenburg.
- 1982 – 1987 Student der Forstwissenschaft in Göttingen.
- 1987 – 1988 Beschäftigung als Hilfskraft eines Standortkartierers im Nds. Privatwald.
- 1988 – 1990 Referendarzeit in Niedersachsen mit Absolvierung des Großen Forstlichen Staatsexamens.
- 1.10.1990 – 31.01.1995 Beschäftigt als Forsteinrichter beim Nds. Forstplanungsamt
- 01.02.1995 – 30.09.2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter auf der „grünen Stelle“ am Institut für Forstbenutzung (zwischenzeitlich umbenannt in Institut für Holzbiologie & Holztechnologie) der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen.
- Seit dem 01.10.2000 Leiter (k) des Niedersächsischen Forstamtes Clausthal-Schulenberg im Oberharz.