Beiträge zur räumlichen Planung

66

Baumwurzeln unter Verkehrsflächen

Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung

Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur
Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover

Herausgeber: Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur
Institut für Landschaftspflege und Naturschutz
Institut für Landesplanung und Raumforschung
Institut für Freiraumentwicklung und freiraumbezogene Soziologie 0721-6866

Druck:
Copy-Team Hannover, 2002
ISBN 3-923517-53-X
ISSN: 0721-6866

Vertrieb:
Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur
Herrenhäuser Str. 2A
30419 Hannover
Tel.: 0511/ 762-2691
Fax: 0511-762-4043
eMail: gruenplanung @igg.uni-hannover.de

PDF-Ausgabe der vergriffenen Originalschrift, herausgegeben von der Verfasserin am 12.12.2014

BEITRÄGE ZUR RÄUMLICHEN PLANUNG

Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover

Heft 66

Sabine Reichwein

Baumwurzeln unter Verkehrsflächen

Untersuchungen u Schäden an Verkehrsflächen durch Baumswurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung

Hannover 2002

Abstraktum

Sabine Reichwein:

Baumwurzeln unter Verkehrsflächen

Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung

Baumwurzeln unter Verkehrsflächen können durch Dickenwachstum zu Schäden an Wegedecken und Randeinfassungen führen. Betroffen sind vor allem Flächen mit geringer Verkehrsbelastung wie Geh- und Radwege, Fußgängerzonen, Stadtplätze und Parkplätze. Die zur Instandhaltung der Verkehrsfläche und zur Wahrung der Verkehrssicherheit notwendigen Reparaturen verursachen Kosten und führen häufig zu Wurzelverlusten. Die Problematik ist bisher in Deutschland nicht thematisiert oder systematisch untersucht worden. Forschungsergebnisse aus dem Ausland sind nicht immer auf hiesige Verhältnisse übertragbar und lassen bisher keine wirksame Methode zur Problemlösung erkennen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die systematische Aufarbeitung der Problematik, um Grundlagen für die Entwicklung anwendungsreifer Lösungen zu schaffen. Hierzu wird der derzeitige Kenntnisstand anhand der verfügbaren Literatur und exemplarischer Praxiserfahrungen aufgearbeitet. Die Größenordnung, die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden wurden in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern durch eine statistisch auswertbare Kartierung von 2881 Bäumen in Verkehrsflächen im Stadtgebiet von Hannover erfasst. Die Entstehung und die Ursachen von Schäden wurden anhand exemplarischer Aufgrabungen untersucht. Hierzu wurden schadensträchtige Wurzelpartien von neun Bäumen in Verkehrsflächen freigelegt. Das Wurzelwachstum wurde fotografisch dokumentiert. Bodenphysikalische Eigenschaften wurden im Labor analysiert.

Als Ergebnis werden in einer Schadenstypisierung Zusammenhänge zwischen der Schadensursache und dem Schadbild für verschiedene Wegedeckenarten und Randeinfassungen dargestellt. Aus den Erkenntnissen wurden Ansätze zur Schadensbehebung und zur Schadensvermeidung abgeleitet. Die Methoden zur Schadensbehebung beruhen auf gängigen Vorgehensweisen und werden im Hinblick auf ihre bautechnische und baumpflegerische Eignung diskutiert. Es wird ein Konzept vorgestellt, das verschiedene Maßnahmen integriert und als Ausgangspunkt für die Entwicklung schadensreduzierender Bauweisen dienen soll. Es basiert auf einer vertikalen, funktionsräumlichen Trennung der oberen Wegebauschichten und eines definierten Wurzelraumes. Um Schäden vorzubeugen oder zumindest zu reduzieren sind drei Aspekte gleichzeitig zu beachten: Erstens die Abstimmung von Baumgröße und Platzverhältnissen, zweitens die Schaffung von Wurzelraum unterhalb der obersten Tragschicht sowie drittens die nicht durchwurzelbare Ausbildung der Deckschicht und der obersten Tragschicht.

Abstract

Sabine Reichwein:

Tree roots under road surfaces

Examination of road surface damage caused by tree roots and approaches for repair and damage prevention

Tree roots growing below road surfaces can cause damage to pavements and kerbs by thickening. This affects mainly areas built for low traffic, such as pavements, cycle tracks, pedestrian zones squares and parking lots. Repair is necessary in terms of maintenance and road safety, causing costs and often leading to root loss. In Germany, the problem has neither been made subject of discussion nor has it been systematically examined. The results of research in foreign countries cannot always be transferred to local conditions. Reliable methods to prevent damage are still missing.

The aim of this dissertation is a systematic analysis of the subject to serve as a basis for developing concrete solutions. The state of knowledge is revealed by an evaluation of available literature and examples of practical experience. The general dimension, the frequency and size of damage are recorded and evaluated by surveying 2881 street trees in the city of Hannover. Information about the development and the cause of damage is gathered by partial excavations of root systems of nine street trees below damaged surfaces. Root growth is documented, mainly by photographs. Soil samples are taken to analyze physical soil conditions.

As a result, the connections between cause and appearance of damage are shown in a damage typification for several surfaces and for kerbs. Conclusions for repair and damage prevention are drawn. Based on common methods, approaches for repair are discussed in regard of technical and arboricultural suitability. In terms of damage prevention or reduction, a constructional approach for new methods of street tree planting is introduced, based on a vertical separation of a defined rooting space and the upper layer of road foundation and surface. Three steps have to be followed at the same time in order to avoid or to reduce damage: First, the adjustment of tree size and available space, second, the establishment of rooting space below the upper layer of road foundation and, third, the root-safe building of the surface and the upper layer of road foundation.

Vorwort

Bäume in dicht besiedelten Räumen sind Teil moderner urbaner Lebensqualität. Dank intensiver Forschung hat sich in den letzten Jahrzehnten das Wissen um die Ansprüche der Straßenbäume gemehrt. Die Bedeutung der unterirdischen Standortbedingungen für die Baumvitalität ist erkannt worden. Zu den wenig geklärten Fragen gehören das Wurzelwachstum unter Verkehrsflächen und die mit dem Dickenwachstum der Wurzeln einhergehende Anhebung von Wegebelägen.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Wurzelfreilegungen haben bemerkenswerte Einblicke in das verborgene Leben der Straßenbäume gegeben. Sie zeigen einerseits die erstaunliche Anpassungsfähigkeit der Baumwurzeln, die selbst unter Wegebelägen weitläufige und differenzierte Systeme ausbilden. Andererseits wird aber auch deutlich, dass Verkehrsflächen um Bäume äußerst sensible Bereiche darstellen, denen nicht immer die angemessene Achtsamkeit zuteil wird. Bedingt durch die Fragestellung handelt diese Arbeit in weiten Teilen von Schäden an Wegebelägen durch Baumwurzeln. Die Schäden, welche Bäume umgekehrt durch Baumaßnahmen im Wurzelbereich erleiden, sind ungleich schwerer zu „beheben“ und führen häufig zum langsamen Baumtod. Als Ergebnis dieser Arbeit wird ein neuer Umgang mit den unterirdischen Standortbedingungen von Straßenbäumen angeregt, der einerseits den Lebensbedingungen von Bäumen besser als bisher Rechnung trägt und andererseits sensible Wegebauschichten schützt, um so Schäden zu reduzieren.

Den zahlreichen Personen aus dem beruflichen und privaten Umfeld, die meine Arbeit unterstützt haben, möchte ich an dieser Stelle herzlich danken. Besonders erwähnen möchte ich meinen Betreuer, Herrn Prof. Gilbert Lösken, der diese Arbeit von Anfang an begleitete und förderte, sowie Herrn Prof. Dr. Hans-Joachim Liesecke, der freundlicherweise die Ko-Betreuung übernahm und wertvolle Anregungen gab (beide Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur der Universität Hannover). Die Freilegung von Wurzelbereichen städtischer Bäume erforderte die Koordination und die Mitwirkung der kommunalen Verwaltung. Mein Dank gilt daher Herrn Thomas Beyer (Abteilung Grünflächen der Stadt Wunstorf), Herrn Günther Heger und Herrn Carsten Heger (beide Tiefbauamt der Stadt Hannover) sowie Herrn Dr. Joachim Bauer und Herrn Jörg Meindl (beide Amt für Landschaftspflege und Grünflächen der Stadt Köln), die das Vorhaben ermöglichten. Herrn Martin Kminek herzlichen Dank für seine tatkräftige Mitarbeit bei Kartierung und Aufgrabungen. „One part of a PhD-dissertation is to finish“ (Prof. Anne Whiston Spirn) – special thanks to all the people abroad for inspiration and support!

Hannover, im April 2002 Sabine Reichwein

Inhaltsverzeichnis

Abstraktum		III
Abstract		IV
Vorwort		V
Inhaltsverzeichnis		VI
Abbildungsverzeichnis		X
Darstellungsverzeichnis		XII
Tabellenverzeichnis		XVI
Abkürzungsverzeichnis		XVII
1.	**Einleitung**	**1**
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Vorgehensweise	4
2.	**Grundlagen**	**7**
2.1	Verkehrsflächen	7
	2.1.1 Allgemeiner Schichtaufbau nach RStO	7
	2.1.2 Unterbau / Untergrund und Planum	9
	2.1.3 Tragschichten	9
	2.1.4 Deckschichten	10
	2.1.5 Randeinfassungen	13
2.2	Baumwurzeln	13
	2.2.1 Funktion	14
	2.2.2 Anatomie und Wachstumsprozesse	14
	2.2.3 Wurzelwachstum und Bodeneigenschaften	16
	2.2.4 Wurzelarchitektur	18
2.3	Wurzelraum und Wurzelwachstum von Straßenbäumen	24
	2.3.1 Bauweisen für Baumstandorte in Verkehrsflächen	24
	2.3.2 Kennzeichen der unterirdischen Standortbedingungen	27
	2.3.3 Wurzelraumvolumen von Straßenbäumen	30
2.4	Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln in der Literatur	32
	2.4.1 Ursachen, Entstehung, Schadensbilder und Vermeidung	32
	2.4.2 Spezielle Wurzelbarrieren	37
	2.4.3 Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen	37
2.5	Bedeutung der Problematik für Städte und Gemeinden	37
	2.5.1 Rechtliche Aspekte	38
	2.5.2 Schadensbehebung	41
	2.5.3 Reparaturhäufigkeit und Kosten	43

3. Erfassung von Baumstandorten in Verkehrsflächen 45
3.1 Zielsetzung 45
3.2 Methodik 45
3.2.1 Kartiermethode 46
3.2.2 Auswertungsmethode 50
3.3 Durchführung 52
3.4 Auswertung der Dimension der Problematik 53
3.5 Auswertung der Einflussfaktoren 54
3.5.1 Gattungen 54
3.5.2 Stammdurchmesser 63
3.5.3 Baumscheibengröße 66
3.5.4 Art der Baumscheibe 68
3.5.5 Art der Wegedecke 70
3.5.6 Art der Randeinfassung 72
3.6 Auswertung der Schadbilder 75
3.6.1 Zustand der Baumscheibe 76
3.6.2 Zustand der Wegedecke 78
3.6.3 Zustand der Randeinfassung 81
3.6.4 Lokalisierung 84
3.7 Ergebnis und Diskussion 86
3.7.1 Dimension der Problematik 86
3.7.2 Einflussfaktoren 87
3.7.3 Schadbilder 92

4. Fallbeispiele: Freilegung von Wurzelbereichen unter Verkehrsflächen 95
4.1 Zielsetzung 95
4.2 Methodik 96
4.2.1 Messungen und Dokumentation der Ergebnisse 97
4.2.2 Auswahlkriterien 99
4.2.3 Auswertungsmethode 99
4.3 Durchführung 100
4.4 Auswertung 100
4.4.1 Fallbeispiel 1: Quercus robur, Hannover 102
4.4.2 Fallbeispiel 2: Quercus robur, Hannover 112
4.4.3 Fallbeispiel 3: Acer saccharinum, Hannover 120
4.4.4 Fallbeispiel 4: Acer platanoides, Hannover 131
4.4.5 Fallbeispiel 5: Sophora japonica, Wunstorf 140
4.4.6 Fallbeispiel 6: Platanus x acerifolia, Wunstorf 149
4.4.7 Fallbeispiel 7: Robinia pseudoacacia I, Köln 156
4.4.8 Fallbeispiel 8: Robinia pseudoacacia II, Köln 164

	4.4.9 Fallbeispiel 9: Tilia x intermedia, Köln	172
	4.4.10 Bodeneigenschaften der untersuchten Wurzelbereiche	180
4.5	Diskussion der Ergebnisse	188
	4.5.1 Allgemeine Bodeneigenschaften von Schüttstoffen	188
	4.5.2 Wurzelwachstum in Deckschichten	189
	4.5.3 Wurzelwachstum in Tragschichten	192
	4.5.4 Wurzelwachstum im Unterbau	193
	4.5.5 Wurzelwachstum in Bauschutt und organischer Substanz	194
	4.5.6 Wurzelwachstum an starren Baukörpern	194
	4.5.7 Gattungsspezifische Unterschiede	195
	4.5.8 Fazit	196
5.	**Schadenstypisierung**	**199**
5.1	Wegedecken	199
	5.1.1 Wurzeln in Fugen	199
	5.1.2 Wurzeln unter dem Belag	201
	5.1.3 Wurzeln in der obersten Tragschicht	206
	5.2.4 Wurzeln unter der obersten Tragschicht	207
5.2	Randeinfassungen	208
	5.2.1 Wurzeln in Stoßfugen	208
	5.2.2 Wurzeln unter Fundamentierungen	209
	5.2.3 Wurzeln zwischen Fundamentierung und Stein	211
5.3	Befestigte Baumscheiben	212
5.4	Einflussfaktoren ohne eigenes Schadbild	212
5.5	Schadensrelevanz im Vergleich	214
6	**Ansätze zur Schadensbehebung**	**217**
6.1	Schadensbehebung in der Fachliteratur	217
6.2	Grundsätze bei der Schadensbehebung	217
6.3	Wurzelerhaltende Verfahren	219
	6.3.1 Baumscheibenerweiterung	219
	6.3.2 Wurzelbrücken	220
	6.3.3 Wassergebundene Wegedecken	221
	6.3.4 Asphaltdecken	222
	6.3.5 Wiederherstellung der Wegedecke in erhöhtem Niveau durch Materialauftrag	223
	6.3.6 Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau durch Materialabtrag	224

6.3.7 Wiederherstellung der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Materialabtrag oder Bordsteinbrücke 225
6.3.8 Verzicht auf Randeinfassung in Teilstück 226
6.4 Verfahren mit Wurzelentfernung 226
6.4.1 Wiederherstellung der Wegedecke nach Wurzelentfernung 226
6.4.2 Wiedereinbau der Randeinfassung nach Wurzelentfernung 227
6.4.3 Wiederherstellung der Verkehrsfläche nach Baumentfernung 227
6.5 Fazit 227

7 Ansätze zur Schadensvermeidung 231
7.1 Schadensvermeidung in der Fachliteratur 231
7.1.1 Auswahl der Baumart 232
7.1.2 Vegetations- und Pflanztechnik 232
7.1.3 Bautechnik 232
7.1.4 Wurzelbarrieren 233
7.1.5 Zusammenfassung 235
7.2 Einflussfaktoren und planerische Maßnahmen 236
7.2.1 Schadenshäufigkeit 236
7.2.2 Schadensausmaß 237
7.2.3 Reparaturintervalle 238
7.2.4 Zusammenfassung planerischer Ansatzpunkte 239
7.3 Lösungsansatz: Vertikale Funktionsräumliche Trennung von Wurzelraum und Verkehrsfläche 239
7.3.1 Baum: Baumgröße und Standzeit 241
7.3.2 Vegetationstechnik: Baumscheibe und Wurzelraum 241
7.3.3 Bautechnik: Wegeoberbau und Randeinfassung 243
7.4 Fazit 247

8. Schlussbetrachtung 249

Quellenverzeichnis 253
Anhang 259

Abbildungsverzeichnis

Abbildung		Seite
1	Angehobenes Klinkerpflaster	1
2	Pflasterdecke nach Ausbesserungsarbeiten	2
3	Schadbild Fallbeispiel 1	103
4	Wurzelbild unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 1	104
5	Feinst- und Feinwurzeln in vererdeten Fugen bei Fallbeispiel 1	105
6	Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung und in der Tragschicht bei Fallbeispiel 1	106
7	Wurzel unter der Randeinfassung bei Fallbeispiel 1	107
8	Reaktionsholz an einer Wurzel unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 1	107
9	Gesamtes Wurzelbild im Unterbau bei Fallbeispiel 1	108
10	Wurzelbild im Unterbau in einem Teilbereich bei Fallbeispiel 1	109
11	Wurzeln unter der Randeinfassung an der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 1	109
12	Schadbild Fallbeispiel 2	113
13	Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung und in der Tragschicht bei Fallbeispiel 2	114
14	Richtungsänderung an einem Widerstand bei Fallbeispiel 2	115
15	Wurzeln unter der Randeinfassung bei Fallbeispiel 2	116
16	Wurzelgabelung unter einer Gehwegplatte bei Fallbeispiel 2	116
17	Wurzeln unter der Randeinfassung an der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 2	117
18	Schadbild Fallbeispiel 3	121
19	Schadbild an der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 3	122
20	Wurzelbild unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 3	123
21	Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung und in der Tragschicht bei Fallbeispiel 3	124
22	Wurzelschichten unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 3	125
23	Matte aus Feinwurzeln bei Fallbeispiel 3	125
24	Wurzeln über Bauschuttbeimengung bei Fallbeispiel 3	126
25	Erschließung organischer Substanz bei Fallbeispiel 3	127
26	Wurzeln in der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 3	127
27	Wurzeln unter der Pflasterrinne bei Fallbeispiel 3	128
28	Schadbild Fallbeispiel 4 (Ausschnitt)	132
29	Wurzelbild unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 4	133
30	Wurzelbild unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 4	133
31	Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung bei Fallbeispiel 4	134
32	Junge Wurzelspitzen im Pflastersand bei Fallbeispiel 4	135
33	Wurzelbild in der Pflasterbettung unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 4	136
34	Wurzeln in der Pflasterbettung unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 4	136
35	Wurzelbild in der Tragschicht und unter der Randeinfassung bei Fallbeispiel 4	137
36	Schadbild Fallbeispiel 5	141
37	Schadbild im Übergang der Baumscheibe zur Verkehrsfläche bei Fallbeispiel 5	142

Abbildung **Seite**

38	Wurzelbild unter Deckschicht bei Fallbeispiel 5	143
39	Starke Richtungswechsel der Wurzeln und verdickte Auflagepunkte bei Fallbeispiel 5	143
40	Wurzeln zwischen Pflaster und gebundener Plasterbettung bei Fallbeispiel 5	144
41	Junge Wurzelspitzen unter dem Belag bei Fallbeispiel 5	145
42	Wurzelbild in der Tragschicht bei Fallbeispiel 5	146
43	Wurzeln unter der Pflasteraufwölbung bei Fallbeispiel 5	146
44	Schadbild Fallbeispiel 6	150
45	Wurzelbild unter der Deckschicht bei Fallbeispiel 6	151
46	Junge Wurzelspitzen in Pflasterbettung bei Fallbeispiel 6	151
47	Durchwurzelung von abgestorbenen Wurzeln bei Fallbeispiel 6	152
48	Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung bei Fallbeispiel 6	153
49	Wurzelbild am Schacht bei Fallbeispiel 6	154
50	Schadbild Fallbeispiel 7	157
51	Gesamtes Wurzelbild bei Fallbeispiel 7	158
52	Wurzel in der Bordsteinfuge bei Fallbeispiel 7	158
53	Lage der Wurzeln zwischen der Tragschicht und der Deckschicht bei Fallbeispiel 7	159
54	Punktuelle Verdickungen an einer Schwachwurzel bei Fallbeispiel 7	160
55	Verdickungen und Deformationen an einer Derbwurzel bei Fallbeispiel 7	160
56	Abgestorbenes Gewebe auf der Wurzeloberseite bei Fallbeispiel 7	161
57	Wurzelwachstum in tieferen Schichten bei Fallbeispiel 7	162
58	Schadbild Fallbeispiel 8	165
59	Wurzelbild unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 8	166
60	Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung bei Fallbeispiel 8	168
61	Abgeplattete Wurzel im Bereich der Bordsteinfuge bei Fallbeispiel 8	169
62	Tellerartige Verdickungen an den Auflagestellen der Pflastersteine bei Fallbeispiel 8	169
63	Wurzel in einer Längsfuge bei Fallbeispiel 8	170
64	Schadbild Fallbeispiel 9	173
65	Wurzelbild unter dem Belag bei Fallbeispiel 9	174
66	Wurzelbild in der Tragschicht bei Fallbeispiel 9	175
67	Wurzelbild im Unterbau bei Fallbeispiel 9	176
68	Verdickungen an Wurzelverwachsungen und an Auflagepunkten des Belags bei Fallbeispiel 9	177
69	Starkwurzel unter einer Aufwölbung bei Fallbeispiel 9	177

Darstellungsverzeichnis

Darstellung		Seite
1	Vorgehensweise	4
2	Regelaufbau von Verkehrsflächen und maßgebliche Regelwerke	7
3	Aufbau gepflasterte Fläche	11
4	Aufbau Fläche mit Plattenbelag	11
5	Aufbau asphaltierte Fläche	13
6	Aufbau Randeinfassung	13
7	Bau der Wurzel (Quelle: HARRIS 1992, 45)	15
8	Wurzelbezeichnungen (Quelle: JENIK (1957) zitiert in KÖSTLER et al. 1968, verändert)	19
9	Baumstandort in Verkehrsfläche nach DIN 18916 (Quelle: LÖSKEN 2001, verändert)	26
10	Baumstandort in Verkehrsfläche nach allgemein üblicher Bauweise (Quelle: LÖSKEN 2001, verändert)	27
11	Lage der kartierten Stadtteile im Stadtgebiet von Hannover (Quelle: DGK 1 : 5000, Hannover, Übersicht, verändert)	52
12	Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen gesamt sowie differenziert nach Wegedecken und Randeinfassungen	53
13	Ausmaß der Schäden an Wegedecken	54
14	Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen	54
15	Prozentuale Zusammensetzung der Gattungen	55
16	Gattungszusammensetzung der Straßenbäume in Hannover (Quelle: Umweltbericht Stadt Hannover 2001)	55
17	Durchschnittlicher Stammdurchmesser der untersuchten Gattungen	56
18	Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Gattungen	57
19	Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Gattungen und Stammdurchmesser	57
20	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Gattungen	58
21	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Gattungen und Stammdurchmesser	58
22	Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Gattungen	58
23	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Gattungen	59
24	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Gattungen und Stammdurchmesser	60
25	Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Gattungen	60
26	Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Gattungen	61
27	Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Gattungen und Stammdurchmesser	61
28	Prozentuale Zusammensetzung der Stammdurchmesserklassen	63
29	Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Stammdurchmesser	63
30	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Stammdurchmesser	64
31	Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Stammdurchmesser	64
32	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Stammdurchmesser	64
33	Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Stammdurchmesser	65
34	Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Stammdurchmesser	65
35	Prozentuale Zusammensetzung der Baumscheibengrößen	66

Darstellung		Seite
36	Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Baumscheibengrößen	66
37	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Baumscheibengrößen	67
38	Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Baumscheibengrößen	67
39	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Baumscheibengrößen	67
40	Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Baumscheibengrößen	67
41	Prozentuale Zusammensetzung der Baumscheiben	68
42	Veränderungen an Baumscheiben nach Art der Baumscheibe	69
43	Prozentuale Zusammensetzung der Wegedecken	70
44	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Art der Wegedecke	70
45	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Art der Wegedecke	71
46	Prozentuale Zusammensetzung der Randeinfassungen	72
47	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Art der Randeinfassung	72
48	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Art der Randeinfassung	73
49	Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Art der Randeinfassung	73
50	Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen nach Art der Randeinfassung	74
51	Prozentuale Zusammensetzung des Zustands der Baumscheibe	76
52	Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Zustand der Baumscheibe	77
53	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Zustand der Baumscheibe	77
54	Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Baumscheibe	77
55	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Zustand der Baumscheibe	78
56	Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Baumscheibe	78
57	Prozentuale Zusammensetzung des Zustands der Wegedecke	78
58	Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Wegedecke	79
59	Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Wegedecke	79
60	Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Zustand der Wegedecke	80
61	Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen nach Zustand der Wegedecke	80
62	Prozentuale Zusammensetzung des Zustands der Randeinfassung	81
63	Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Zustand der Randeinfassung	82
64	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Zustand der Randeinfassung	82
65	Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Zustand der Randeinfassung	83
66	Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen nach Zustand der Randeinfassung	83
67	Prozentuale Zusammensetzung der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen	84
68	Berechnungsgrundlage für das Verhältnis von Eck- zu Seitenbereichen	84
69	Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Lokalisierung	85
70	Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Lokalisierung	85
71	Standort und Schadbild Fallbeispiel 1	102
72	Schadensursache der Anhebung der Gehwegplatten bei Fallbeispiel 1	110
73	Schadensursache der Anhebung der seitlichen Kantensteine bei Fallbeispiel 1	110
74	Schadensursache der Anhebung der Kantensteine an der Ecke bei Fallbeispiel 1	110
75	Standort und Schadbild Fallbeispiel 2	112

Darstellung		Seite
76	Schadensursache der Anhebung der Gehwegplatten an der Ecke bei Fallbeispiel 2	118
77	Schadensursache der Anhebung der seitlichen Gehwegplatten bei Fallbeispiel 2	118
78	Schadensursache der Anhebung der seitlichen Kantensteine bei Fallbeispiel 2	118
79	Schadensursache der Anhebung der Kantensteine an der Ecke bei Fallbeispiel 2	118
80	Standort und Schadbild Fallbeispiel 3	120
81	Schadensursache der gleichmäßigen Anhebung der Gehwegplatten bei Fallbeispiel 3	129
82	Schadensursache der Aufkantung der Gehwegplatten bei Fallbeispiel 3	129
83	Schadensursache der Plattenanhebung an der Ecke und der Pflasterwölbung bei Fallbeispiel 3	129
84	Schadensursache der Anhebung der Pflasterrinne bei Fallbeispiel 3	129
85	Standort und Schadbild Fallbeispiel 4	131
86	Schadensursache der Anhebung des Belags bei Fallbeispiel 4	138
87	Schadensursache der Anhebung der Kantensteine bei Fallbeispiel 4	138
88	Schadensursache der Aufweitung der Fugen und des Fundamentrisses bei Fallbeispiel 4	138
89	Standort und Schadbild Fallbeispiel 5	140
90	Schadensursache der Aufkantung des Klinkerpflasters bei Fallbeispiel 5	147
91	Schadensursache der Aufwölbung des Naturstein- und Klinkerpflasters bei Fallbeispiel 5	147
92	Standort und Schadbild Fallbeispiel 6	149
93	Schadensursache der Anhebung des Pflasters bei Fallbeispiel 6	155
94	Schadensursache der Anhebung des Pflasters und des Schachtaufsatzes bei Fallbeispiel 6	155
95	Standort und Schadbild Fallbeispiel 7	156
96	Schadensursache der Anhebung des Asphaltbelags bei Fallbeispiel 7	162
97	Schadensursache an der Bordsteinfuge bei Fallbeispiel 7	162
98	Standort und Schadbild Fallbeispiel 8	164
99	Schadensursache der Anhebung des Pflasters bei Fallbeispiel 8	170
100	Schadensursache der Anhebung des Bordsteins bei Fallbeispiel 8	170
101	Standort und Schadbild Fallbeispiel 9	172
102	Schadensursache der Aufkantungen und Risse im Asphaltbelag bei Fallbeispiel 9	178
103	Schadensursache der Aufwölbung im Asphaltbelag bei Fallbeispiel 9	178
104	Schadbild bei Wurzeln in Fugen des Pflasterverbandes	200
105	Schadbild bei Wurzeln in Fugen zwischen Belag und Randeinfassung	200
106	Schadbild bei dicken Fein- und Schwachwurzelmatten unter Pflasterbelägen (Plattenbeläge analog)	202
107	Schadbild bei Wurzeln unter Pflasterbelägen – Aufkantung	203
108	Schadbild bei Wurzeln unter Pflasterbelägen – Anhebung ganzer Steine	203
109	Schadbild bei Wurzeln unter Plattenbelägen	204
110	Schadbild bei Wurzeln unter Asphaltbelägen – dicke Deckschichten oder Gussasphalt	205
111	Schadbild bei Wurzeln unter Asphaltbelägen – dünne Deckschichten oder Walzasphalt	205
112	Schadbild bei Wurzeln in der obersten Tragschicht unter Pflasterbelägen	206

Darstellung **Seite**

113 Schadbild bei Wurzeln in der obersten Tragschicht unter Plattenbelägen 206

114 Schadbild bei Wurzeln in der obersten Tragschicht unter Asphaltbelägen 207

115 Schadbild bei Wurzeln unter der obersten Tragschicht unter Pflasterbelägen (Platten- und Asphaltbeläge analog) 208

116 Schadbild bei Wurzeln in Stoßfugen von Randeinfassungen 209

117 Schadbild bei Wurzeln unter der Fundamentierung von Randeinfassungen 210

118 Schadbild bei Wurzeln zwischen Fundamentierung und Stein bei Randeinfassungen 211

119 Schadhafte Verkehrsfläche als Ausgangssituation für Maßnahmen zur Schadensbehebung 219

120 Schadensbehebung durch Baumscheibenerweiterung mit offener Baumscheibe 220

121 Schadensbehebung durch Baumscheibenerweiterung mit befestigter Baumscheibe 220

122 Schadensbehebung durch Einbau einer Wurzelbrücke 221

123 Schadensbehebung durch Einbau eines Mineralgemischs mit Ausbau der Randeinfassung 222

124 Schadensbehebung durch Einbau von Asphalt unter Beibehaltung der Randeinfassung 223

125 Schadensbehebung durch Wiederherstellung der Wegedecke in erhöhtem Niveau durch Materialauftrag 223

126 Schadensbehebung durch Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau durch Materialabtrag 224

127 Schadensbehebung durch Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Materialabtrag 225

128 Schadensbehebung durch Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Bordsteinbrücke ohne Aussparung 225

129 Schadensbehebung durch Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Bordsteinbrücke mit Aussparung 225

130 Schadensbehebung durch Verzicht auf Randeinfassung in Teilstück 226

131 Einflussfaktoren auf Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln 236

132 Prinzip der vertikalen funktionsräumlichen Trennung von Verkehrsfläche und Wurzelraum als Maßnahme zur Schadensvermeidung 240

Tabellenverzeichnis

Tabelle		Seite
1	Schichtdicken und Tragfähigkeit als E_{v2}-Modul nach RStO 01	8
2	Mindestschichtdicken für Tragschichten von Verkehrsflächen	10
3	Schichtdicken für Deckschichten von Verkehrsflächen	12
4	Angaben von Regelwerken zur Bauweise von Baumstandorten in Verkehrsflächen	25
5	Wissenschaftliche Untersuchungen und Fachbeiträge zur Thematik	33
6	Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Schadbildern	87
7	Zusammenhänge zwischen den Schadbildern	92
8	Untersuchte physikalische Bodeneigenschaften	98
9	Mess- und Dokumentationsmethoden bei der Wurzelfreilegung	98
10	Wurzelklassen nach Wurzeldurchmesser (nach KÖSTLER et al. 1968)	99
11	Überblick über die Standorte der Fallbeispiele	101
12	Korngrößenverteilung nach Wegebauschicht und Durchwurzelungsintensität	185
13	Rohdichte, Volumenabnahme nach Verdichtung, Wasserhaltekapazität und Wasserdurchlässigkeit nach Wegebauschicht und Durchwurzelungsintensität	186
14	Gehalt an organischer Substanz, pH-Wert, Carbonatgehalt und Salzgehalt nach Wegebauschicht und Durchwurzelungsintensität	187
15	Schadensrelevanz	215
16	Maßnahmenkatalog zur Schadensbehebung bei befestigten Flächen	228

Abkürzungsverzeichnis

ATV	Allgemeine Technische Vertragsbedingungen
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BS	Baumscheibe
DIN	Deutsches Institut für Normung
d_{10}	Körnungsgröße bei 10 Gew.-%
d_{60}	Körnungsgröße bei 60 Gew.-%
EAE	Empfehlungen für die Anlage von Erschließungsstraßen
E_{v2}	Verformungsmodul, Maßeinheit MN/m²; bezeichnet die Tragfähigkeit, ermittelt durch Plattendruckversuch nach DIN 18134
FB LAUM	Fachbereich Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.
g	gleichförmig (nur im Zusammenhang mit Ungleichförmigkeitskoeffizient)
GG	Grundgesetz
Gew.-%	Gewichtsprozent
Kf mod	Wasserdurchlässigkeit in cm/s
KCl	Kaliumchlorid
MN/m²	Mega-Newton pro Quadratmeter; Maßeinheit für Verformungsmodul E_{v2}
MPa	Mega-Pascal, Maßeinheit für Druck
$Na_4P_2O_7$	Pyrophosphat
NStrG	Niedersächsisches Straßengesetz
pF	pF-Wert, Maß für die Wasserspannung, bezeichnet die Bindungskräfte des Wassers an den Boden
pH	potentia hydrogenii; pH-Wert, negativer dekadischer Logarithmus der Konzentration von Hydronium-Ionen (H^+) [mol] in wässriger Lösung; bezeichnet die Reaktion, auch Bodenreaktion (7 = neutral, < 7 sauer, >7 alkalisch)
sug	sehr ungleichförmig
U	Ungleichförmigkeitskoeffizient d_{60}/d_{10}
ug	ungleichförmig
Vol.-%	Volumen-Prozent
WK max.	Maximale Wasserkapazität
µm	Mikrometer, 1 µm = 0,001 mm
% D_{PR}	Prozent Proctordichte, bezeichnet den Verdichtungsgrad des Bodens bzw. Mineralstoffes in Relation zum durch Proctorversuch nach DIN 18127 ermittelten Verdichtungsgrad
RAS	Richtlinien für die Anlage von Straßen
RE	Randeinfassung
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien

1. Einleitung

Bäume tragen durch ihren ökologischen und gestalterischen Wert zur Erhöhung der Lebensqualität in Siedlungsräumen bei. Deshalb werden sie gerade auch an Orten mit hohem Versiegelungsgrad wie in Straßen, auf Plätzen und Parkplätzen oder in Fußgängerzonen gepflanzt. Dabei ist häufig zu beobachten, dass Baumwurzeln, die aus der Pflanzgrube in den Schichtaufbau einer Verkehrsfläche hineinwachsen, zu Unebenheiten führen. Mit dieser Problematik setzt sich die vorliegende Arbeit auseinander.

1.1 Problemstellung

Wenn Baumwurzeln Wegedecken und deren Einfassung in ihrer Lage verändern, äußert sich dies beispielsweise in aufgeworfenem Pflaster, aufgebrochenen Asphaltdecken oder angehobenen Bordsteinen. Die Verkehrssicherheit und die Funktionalität der Wegeflächen können dadurch erheblich beeinträchtigt werden (Abbildung 1). Auch Baumscheibenbefestigungen wie Baumroste aus Beton oder Stahl werden häufig durch Wurzeln angehoben oder verschoben und erfüllen so kaum noch ihren Zweck. Die ständige Behebung der Mängel ist kostenintensiv und bautechnisch schwierig. Nicht selten müssen Wurzeln entfernt werden, so dass die Regulierungsarbeiten einen Eingriff in das Wurzelsystem darstellen. Verkehrsflächen um Baumstandorte befinden sich durch Deckenaufbrüche oder sichtbare Ausbesserungsstellen oftmals in einem ästhetisch unbefriedigenden Zustand (Abbildung 2). Aus Sicht der Kommunalverwaltungen sind Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln ein ebenso alltägliches wie hartnäckiges Problem.

Abbildung 1: Angehobenes Klinkerpflaster

Abbildung 2: Pflasterdecke nach Ausbesserungsarbeiten

In der Fachwelt herrschen unterschiedliche Annahmen über die Ursachen der Problematik:

- Als Urheber von Belagsanhebungen werden verschiedene Baumarten herausgestellt, deren Wurzelsysteme sich sogenannten „Flachwurzlern“ zuordnen lassen oder sich durch besonders „aggressives“ Wurzelverhalten auszeichnen sollen.
- Der hohe Verdichtungsgrad im Boden zwinge Straßenbäume zur Flachwurzligkeit und somit zur Anhebung von Wegebelägen, während das Problem bei gut durchlüfteten Böden nicht auftrete.
- Das Problem werde durch zu kleine Baumscheiben und daraus resultierender mangelhafter Wasserversorgung verursacht.
- Von Wegebelägen wird angenommen, dass sie Baumwurzeln durch Feuchtigkeit in Form von Kondenswasser „anziehen“ oder durch nährstoffreiche chemische Substanzen locken. Diese Eigenschaft wird Bitumen oder sogar dem giftigen und mittlerweile nicht mehr verwendeten Teer nachgesagt.

Andererseits ist es eine weit verbreitete Meinung, dass bei Straßenbaumstandorten die an die Pflanzgrube angrenzenden Bodenbereiche durch für Wasser und Luft undurchlässige Beläge und den hohen Verdichtungsgrad des Schichtaufbaus kaum durchwurzelbar sind. Dies steht im Widerspruch zu den beobachteten Anhebungen von Verkehrsflächen durch Baumwurzeln.

Den obigen Annahmen stehen trotz der Alltäglichkeit des Problems wenige wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse gegenüber. Forschung über Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln erfolgte nach bisherigen Erkenntnissen ausschließlich im Ausland. Aus Deutschland sind derzeit keine syste-

matischen Untersuchungen bekannt. Auch ist nicht geklärt, ob und wie weit die Erkenntnisse der im Ausland durchgeführten Forschung auf deutsche Verhältnisse übertragbar sind. Der Markt bietet Baustoffe und Systeme zur Vermeidung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln an, wie spezielle Wurzelbarrieren aus Kunststoff oder Vlies. Die Eignung dieser Produkte für in Deutschland übliche Bauweisen ist ebenfalls nicht geklärt. Gängige Meinungen auf der einen und ein Mangel an fundierten Erkenntnissen auf der anderen Seite sind Anlass, sich der Problematik von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln von wissenschaftlicher Seite zu nähern.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, zum Thema „Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln“

1. die Dimension der Problematik festzustellen,
2. Ursachen, Entstehung und Wirkungszusammenhänge zu klären,
3. die Ergebnisse mit den Erkenntnissen anderer Forschungsarbeiten zu diskutieren und gängige Meinungen zu hinterfragen,
4. Schadbilder zu typisieren,
5. Ansätze zur Schadensbehebung und zur Schadensvermeidung aufzuzeigen.

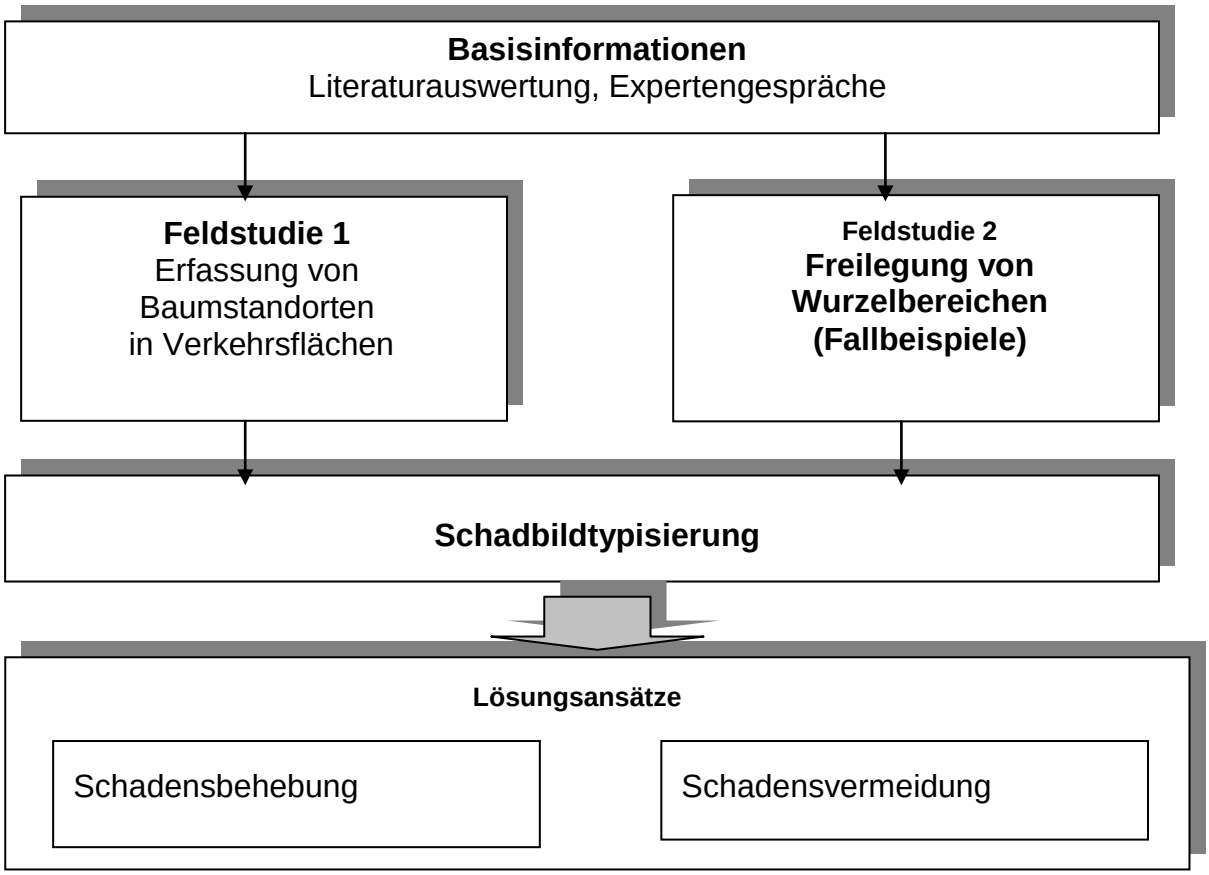
Als Schaden im Sinne dieser Arbeit wird jede auf Baumwurzeln zurückzuführende Veränderung an Verkehrsflächen bezeichnet. Hierzu zählen auch geringfügige Veränderungen, die jedoch später zu Gefahrenstellen werden und dann reguliert werden müssen.

Im Mittelpunkt der Untersuchung sollen Bäume in gering belasteten Verkehrsflächen wie Geh- und Radwege, Fußgängerzonen, Plätze und Parkplätze stehen. Die Problematik wird bei diesen Flächen besonders deutlich, da die Schäden hier einerseits durch die relativ schwache Dimensionierung des Wegeoberbaus gehäuft auftreten und andererseits Gefährdungen für Fußgänger darstellen. Von den verschiedenen Wegedeckenarten sollen schwerpunktmäßig Pflasterdecken, Plattenbeläge und Asphaltdecken betrachtet werden. Betondecken werden für die skizzierte Nutzung eher selten eingesetzt und bei wassergebundenen Wegedecken sind durch die materialspezifischen Eigenarten und den begrenzten Einsatzbereich weniger Probleme für die Verkehrssicherheit zu erwarten.

Die Vitalität von Straßenbäumen soll ebensowenig behandelt werden wie oberirdische Maßnahmen bei der Pflanzung von Straßenbäumen wie Verankerung, Anfahrschutz, Stammschutz etc. oder nachträgliche Standortverbesserungsmaßnahmen wie Belüftung, Düngung oder Substrataustausch. Nicht betrachtet werden soll auch die nachträgliche Befestigung von Baumscheiben, da die Problematik bei Bestandsbäumen eine andere Sichtweise erfordert. Maßnahmen innerhalb der Pflanzgrube sollen nur insoweit einbezogen werden, wie es die Fragestellung erfordert.

1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise ist in Darstellung 1 grafisch dargestellt. Zunächst sollen durch Literaturauswertung und Expertengespräche Basisinformationen gewonnen werden. Im theoretischen Teil dieser Arbeit werden Grundlagen zur Bauweise von Verkehrsflächen, zum Wachstum von Baumwurzeln und zu den unterirdischen Standortbedingungen von Straßenbäumen unter Einbeziehung technischer Regelwerke und der verfügbaren Fachliteratur dargestellt. Bestehende Forschungsansätze zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln werden diskutiert. Die Bedeutung der Problematik für die kommunale Verwaltung im Hinblick auf rechtliche und wirtschaftliche Aspekte sowie das Vorgehen bei der Schadensbehebung wird exemplarisch behandelt (Kapitel 2).



Darstellung 1: Vorgehensweise

Um Erkenntnisse über Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln zu gewinnen, sollen praktische Untersuchungen in Form von Feldstudien durchgeführt werden. Ein experimentelles Vorgehen z. B. durch Versuchspflanzung ist unzweckmäßig, da die tatsächlichen Verhältnisse am Straßenstandort auf diese Weise nicht abgebildet werden können und in einem überschaubaren Zeitraum keine Ergebnisse zu erwarten sind. Die praktischen Untersuchungen gliedern sich in zwei Teile: Eine systematische Erfassung von Daten über Schäden an Verkehrsflächen erfolgt in Form einer Kartierung durch

Inaugenscheinnahme von Baumstandorten in Verkehrsflächen. Hierbei soll eine aussagekräftige Menge an Informationen über Häufigkeit, Ausmaß und Lokalisierung der Schäden, Gattung und Größe der Bäume, Beschaffenheit von Baumscheiben, Decken und Randeinfassungen erhoben werden. Die Ergebnisse werden mit denen vergleichbarer Untersuchungen diskutiert (Kapitel 3). Das Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen, die Ursachen und Mechanismen der Schadensentstehung sowie der Einfluss der Wegebauweisen und der Bodenverhältnisse unter Verkehrsflächen wird in einer zweiten Feldstudie untersucht. Hierfür werden exemplarisch Wurzelbereiche, die Schäden an Verkehrsflächen verursachen, teilweise freigelegt. Die Erkenntnisse zum Wurzelwachstum unter Verkehrsflächen werden mit den Ergebnissen anderer Forschungen diskutiert (Kapitel 4).

Die Ergebnisse der beiden Untersuchungsblöcke werden dann zusammengeführt, um in einer Schadenstypisierung den Zusammenhang zwischen Schadbild, Wurzeltiefe und Wurzeldicke darzustellen (Kapitel 5).

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus der Literaturauswertung, aus Expertengesprächen und aus den praktischen Untersuchungen werden Ansätze zur Vermeidung und zur wurzelschonenden Behebung von Schäden an Verkehrsflächen aufgezeigt (Kapitel 6 und 7).

In der Schlussbetrachtung werden die Ergebnisse resümiert und es wird ein Fazit aus den Untersuchungen gezogen (Kapitel 8).

2. Grundlagen

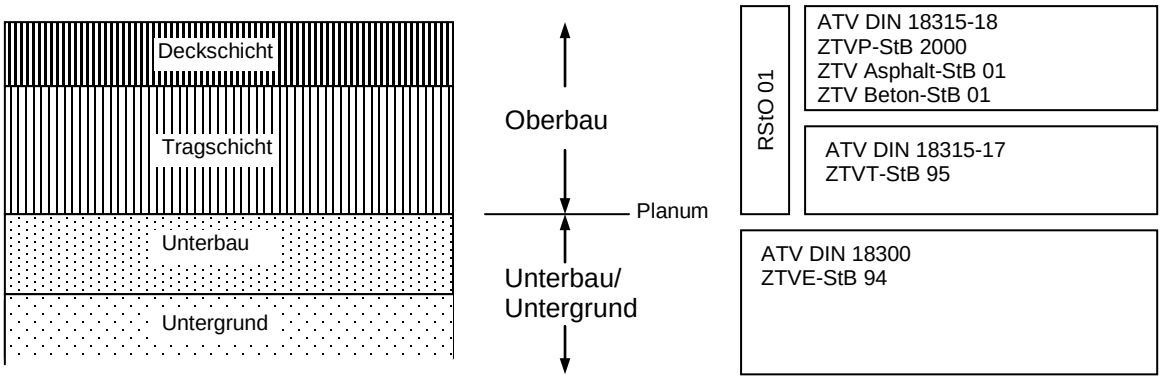
Die Problematik von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln bewegt sich an der Schnittstelle zwischen den Themenbereichen Straßenbau und Baumkunde bzw. Baumpflege. Zum Verständnis des Untersuchungsgegenstandes sollen im folgenden Abschnitt Grundkenntnisse zu beiden Themenbereichen (Abschnitt 2.1 und 2.2) und zu den besonderen unterirdischen Standortbedingungen von Straßenbäumen (Abschnitt 2.3) dargestellt werden. Außerdem wird die Behandlung der Thematik in Forschung und Fachliteratur (Abschnitt 2.4) und deren Bedeutung für Städte und Gemeinden erörtert (Abschnitt 2.5).

2.1 Verkehrsflächen

Für den Entwurf und die Bauausführung von Verkehrsflächen existieren zahlreiche Regelwerke. Im Rahmen dieser Arbeit ist vor allem der Aufbau von Flächen für geringe Verkehrsbelastung wie Geh- und Radwege, Fußgängerzonen, Plätze oder Parkflächen von Interesse, da hier die Problematik von Anhebungen durch Baumwurzeln besonders deutlich wird. An dieser Stelle sollen wesentliche Merkmale von Verkehrsflächen soweit dargestellt werden, wie es zum Verständnis der weiteren Ausführungen erforderlich ist. Für umfassendere Informationen sei auf die Regelwerke verwiesen.

2.1.1 Allgemeiner Schichtaufbau nach RStO

Der Schichtaufbau von Verkehrsflächen ist in den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen geregelt (RStO 01; FGSV 2001). Er besteht generell aus dem Oberbau und dem Untergrund, gegebenenfalls mit einem dazwischen eingebauten Unterbau (Darstellung 2). Der Oberbau setzt sich aus einer oder mehreren Tragschichten und der Deckschicht zusammen. Er wird auf das Planum aufgebracht, das die obere Begrenzung des Untergrundes bzw. des Unterbaus bildet.



Darstellung 2: Regelaufbau von Verkehrsflächen und maßgebliche Regelwerke

Dicke des Oberbaus

In Abhängigkeit von der Bauweise und der Bauklasse legt die RStO 01 Schichtdicken und verschiedene Möglichkeiten für den Schichtaufbau von Verkehrsflächen fest. Die Dicke des Oberbaus richtet sich nach der erforderlichen Tragfähigkeit und der Frostsicherheit. Hinsichtlich der Tragfähigkeit werden die Bauklassen SV (Schwerlastverkehr) und I bis VI unterschieden, welche sich aus den maßgebenden Verkehrsbelastungszahlen ableiten lassen. Durch die Auswahl geeigneter Baustoffe und ei-

nes ausreichend dicken Gesamtaufbaus soll der Oberbau frostsicher, das heißt, vor Schäden durch Frosteinwirkung geschützt sein. Die Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus orientiert sich an den Frostempfindlichkeitsklassen für Böden nach ZTVE-StB (Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdbauarbeiten im Straßenbau; FGSV 1994/97). Außerdem sind weitere Faktoren zu berücksichtigen, die je nach örtlichen Verhältnissen zu Mehr- oder Minderdicken führen, wie z. B. klimatisch bedingte Frosteinwirkungszonen. Die RStO 01 geht von einem Nutzungszeitraum für Fahrbahnen von 30 Jahren aus.

Tragfähigkeit und Verdichtung

In Abhängigkeit von der Bauklasse legt die RStO 01 die Anforderungen an die Tragfähigkeit auf den verschiedenen Schichten als Verformungsmodul E_{v2} in MN/m² fest. Sie wird durch den Plattendruckversuch nach DIN 18134 ermittelt. Innerhalb des Schichtaufbaus muss die Tragfähigkeit von unten nach oben zunehmen. Hierzu muss der Aufbau schichtweise verdichtet werden. Der Verdichtungsgrad ist von den mechanischen Eigenschaften von Baustoffen und Böden abhängig und in den jeweiligen Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) geregelt. Er wird prozentual zur Proctordichte (% D_{PR}) angegeben und bezeichnet den Verdichtungsgrad eines Bodens bzw. Baustoffs in Relation zur standardisierten Verdichtung im Labor, die durch den Proctorversuch nach DIN 18127 erzielt wird. Der Verdichtungsgrad von Böden und mineralischen Schüttstoffen ist ein maßgeblicher Faktor für deren Durchwurzelbarkeit (siehe Abschnitt 2.3).

Anforderungen an gering belastete Verkehrsflächen

Im Mittelpunkt dieser Untersuchung stehen Verkehrsflächen mit geringer Belastung. Geh- und Radwege sind von den Bauklassen und dem Verfahren zur Bestimmung des frostsicheren Oberbaus ausdrücklich ausgenommen und werden in der RStO 01 gesondert aufgeführt. Der Aufbau berücksichtigt ein Befahren durch Fahrzeuge des Straßenunterhaltungsdienstes, nicht jedoch eine Belastung durch andere Kraftfahrzeuge (RStO 01, 25). Häufig müssen Geh- und Radwege jedoch auch höheren Belastungen Stand halten, wie dem Lieferverkehr in Fußgängerzonen, Fahrzeugen von Wochen- oder Jahrmärkten oder dem Kfz-Verkehr auf Grundstückszufahrten. Da es bautechnisch zweckmäßig ist, eine gleichbleibende Dicke des frostsicheren Oberbaus über längere Abschnitte beizubehalten, werden die Flächen dann nach einer zutreffenden Bauklasse bemessen. Es ist daher auch möglich, dass die untersuchten Verkehrsflächen der Bauklassen V oder VI zuzuordnen sind. Die Zuordnung von Verkehrsflächen zu den Bauklassen bzw. zu Geh- und Radwegen ist für die vorliegende Fragestellung insofern von Bedeutung, als dass sich Schichtdicken, Materialien und Anforderungen an die Tragfähigkeit unterscheiden und sich auf eine mögliche Durchwurzelung auswirken (Tabelle 1).

	Geh- und Radwege	**Bauklasse V - VI**	**Bauklasse III - IV**	**Bauklasse SV, I - II**
Dicke des frostsicheren Oberbaus	20 - 50 cm	35 - 65 cm	45 - 75 cm	55 - 85 cm
Tragfähigkeit auf Tragschichten	80 MN/m²	120 MN/m²	150 MN/m²	150 MN/m²
Tragfähigkeit auf Frostschutzschichten	keine Anforderungen	100 MN/m²	120 MN/m²	120 MN/m²
Tragfähigkeit auf Planum	45 MN/m²	45 MN/m²	45 MN/m²	45 MN/m²

Tabelle 1: Schichtdicken und Tragfähigkeit als E_{v2}-Modul nach RStO 01

2.1.2 Unterbau / Untergrund und Planum

Im Straßenbau wird zwischen Unterbau und Untergrund unterschieden. Als Unterbau wird „die unter dem Oberbau liegende Dammschüttung“ bezeichnet, als Untergrund der „unmittelbar unter dem Oberbau oder dem Unterbau vorhandene Boden oder Fels“ (ZTVE-StB 94, 10; FGSV 1997). Der erforderliche Mindestgrad der Verdichtung von Untergrund bzw. Unterbau wird in Abhängigkeit von der Bodengruppe nach DIN 18196 und der Tiefenlage unter dem Planum bestimmt und beträgt zwischen 95 und 100 % D_{PR} (ZTVE-StB 94; FGSV 1994/97). Er ist für gemischt- und feinkörnige Böden geringer als für grobkörnige und für tiefere Lagen geringer als für höhere. Das Planum ist „profilgerecht, eben und tragfähig“ auszubilden (ZTVE-StB 94; FGSV 1997, 38). Die erforderliche Tragfähigkeit des Planums beträgt mindestens 45 MN/m² (siehe Tabelle 1).

2.1.3 Tragschichten

Aufgabe der Tragschichten ist es, die auf die Deckschicht wirkenden Lasten aufzunehmen und gleichmäßig an den Unterbau bzw. Untergrund abzuleiten. Sie liegen zwischen der Deckschicht und dem Unterbau bzw. Untergrund. Es wird zwischen Tragschichten ohne Bindemittel, mit hydraulischen Bindemitteln und Asphalttragschichten unterschieden. Zu den Tragschichten ohne Bindemittel gehören Frostschutzschichten sowie Kies- und Schottertragschichten, zu denen mit hydraulischen Bindemitteln Verfestigungen, hydraulisch gebundene Tragschichten und Betontragschichten (vgl. ZTVT-StB 95, FGSV 1998). Im folgenden werden Tragschichtbauweisen vorgestellt, die für die zu untersuchende Fragestellung von Bedeutung sind.

Frostschutzschichten werden bei frostempfindlichen Böden als untere Tragschicht auf dem Planum eingebaut, um Frostschäden im Oberbau vorzubeugen. Als Baustoffe werden rundkörnige Mineralstoffe (Kiese und Sande), gebrochene Mineralstoffe (Brechsand, Splitt und Schotter) oder Mineralstoffgemische verwendet, deren Anforderungen in den Regelwerken definiert werden (siehe ZTVT-StB 95, FGSV 1998). Die Mindesteinbaudicke der verdichteten Schichten richtet sich nach dem Größtkorn (Tabelle 2). Die nach RStO 01 erforderliche Schichtdicke des Gesamtaufbaus bleibt davon unberührt. Für Verkehrsflächen der Bauklasse VI und für Geh- und Radwege beträgt der Verdichtungsgrad der Frostschutzschicht(en) mindestens 100 % D_{PR}, für höhere Bauklassen bis zu 103 % D_{PR}. Frostschutzschichten sind stets ungebunden und damit für Straßenbäume potenziell durchwurzelbar.

Kies- und Schottertragschichten werden auf dem Planum oder der Frostschutzschicht eingebaut. Sie bestehen aus Kies-Sand-Gemischen, Splitt-Sand-Gemischen oder Schotter-Splitt-Sand-Gemischen definierter Sieblinien (siehe ZTVT-StB 95, FGSV 1998). Analog zu den Frostschutzschichten sind in Abhängigkeit vom Größtkorn Mindestschichtdicken zu beachten (Tabelle 2). Der Verdichtungsgrad muss für alle Bauklassen mindestens 103 % D_{PR} betragen und darf nur in Ausnahmefällen (z. B. an Schächten) 100 % D_{PR} aufweisen. Kies- und Schottertragschichten stellen für Straßenbäume je nach Kornzusammensetzung und Verdichtung potenziell durchwurzelbare Räume dar.

Tragschichten mit bituminösen oder hydraulischen Bindemitteln werden insbesondere bei höher belasteten Verkehrsflächen eingesetzt, sind jedoch auch bei Geh- und Radwegen vorzufinden. Bi-

tuminös gebundene oder Asphalttragschichten unterscheiden sich im Bitumengehalt. Sie bestehen zumeist aus Asphaltfeinbeton oder aus Mineralstoffgemischen mit bitumenhaltigen Bindemitteln wie z. B. Bitukies. Da sie einen Hohlraumgehalt von bis zu 20 Vol. % aufweisen, ist ein Einwurzeln nicht auszuschließen. Betontragschichten als eine gängige Tragschichtbauweise mit hydraulischen Bindemitteln werden mindestens in der Betongüte B 10 hergestellt. Als feste Körper können sie nicht durchwurzelt werden. Die Mindestschichtdicken für Asphalt- und Betontragschichten sind in Tabelle 2 angegeben.

Art der Tragschicht		**Mindestschichtdicke verdichteter Zustand [cm]**	**Regelwerke**
Frostschutzschichten, Körnung [mm]	0/22*	10	ATV DIN 18315 ZTVT-StB 95
	0/32	12	
	0/45	15	
	0/56	18	
	0/63	20	
Kies- und Schottertragschichten, Körnung [mm]	0/32	12	ATV DIN 18315 ZTVT-StB 95
	0/45	15	
	0/56	18	
Asphalttragschichten	Asphaltfeinbeton	6	ATV DIN 18317 ZTVT-StB 95
	mit bitumenhaltigen Bindemitteln verfestigt	15	
Betontragschichten		6	ATV DIN 18316 ZTVT-StB 95

Tabelle 2: Mindestschichtdicken für Tragschichten von Verkehrsflächen * nur Geh- und Radwege

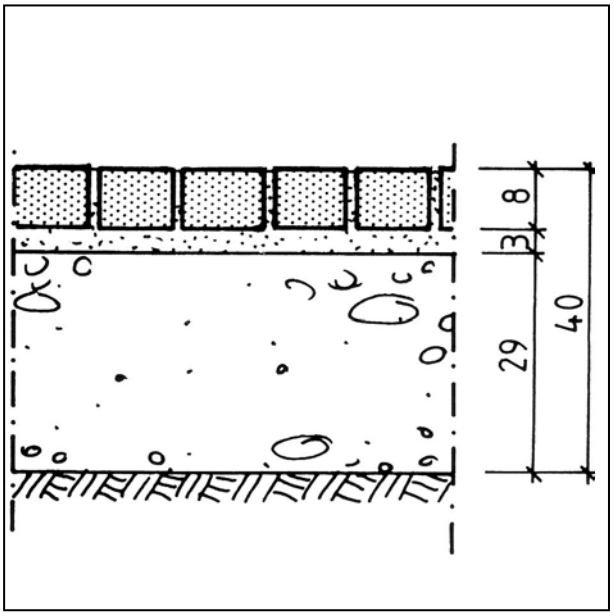
2.1.4 Deckschichten

Die Deckschicht ist die obere Schicht des Oberbaus einer Verkehrsfläche. Sie besteht aus dem Belag und ggf. einer Sandschicht als Pflaster- oder Plattenbettung. Man unterscheidet Deckschichten ohne Bindemittel, bituminöse Decken oder Asphaltdeckschichten, Betondecken und Pflasterdecken. Zu den Pflasterdecken können auch die Plattenbeläge gezählt werden, die sich zwar im Format vom Pflaster unterscheiden, von der Bauweise jedoch vergleichbar sind.

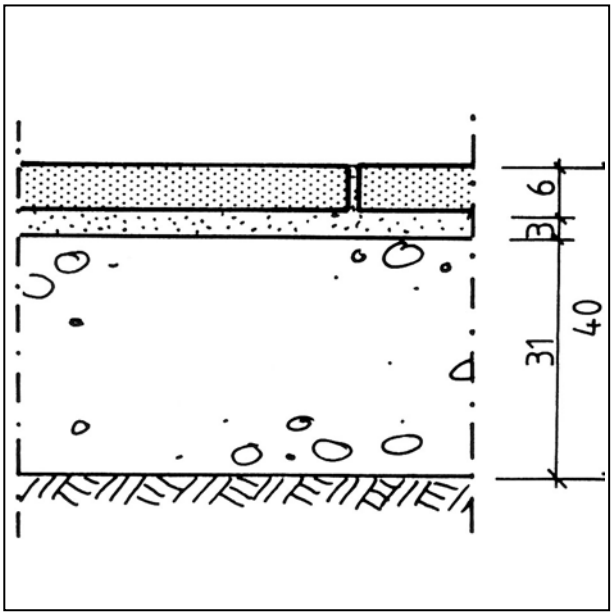
Deckschichten ohne Bindemittel bestehen aus Kies-Sand-, Schotter-Splitt-Sand- oder Splitt-Sand-Gemischen. Sie erreichen ihren Zusammenhalt durch einen Anteil an Feinstoffen und Feuchtigkeit und werden deshalb auch als wassergebundene Wegedecken bezeichnet. Deckschichten ohne Bindemittel sind für gering belastete Wege wie Gehwege in Parkanlagen oder Wege, Zufahrten und Parkplätze im ländlichen Raum geeignet. Die RStO 01 enthält hierzu keine Regelungen. Ihre Mindestschichtdicken in Abhängigkeit vom Größtkorn ist in Tabelle 3 aufgeführt. Deckschichten ohne Bindemittel werden auf ungebundene Tragschichten aufgebracht. Sie können tendenziell durchwurzelt werden, sind im Hinblick auf Schäden durch Baumwurzeln aufgrund des begrenzten Einsatzbereiches und der Anpassungsfähigkeit des Materials jedoch als wenig problematisch einzuschätzen. Bei Anhebungen entstehen keine Stolperkanten.

Pflasterdecken und Plattenbeläge werden sehr häufig bei Flächen mit geringer Verkehrsbelastung eingebaut und sind hinsichtlich der Schadensproblematik von großem Interesse. Pflasterdecken unterscheiden sich von Plattenbelägen im Steinformat bzw. im Maßverhältnis von Breite zu Höhe. Als Materialien werden im Straßenbau Naturstein, Beton und Klinker verwendet. Die Anforderungen an Pflastersteine sind normativ geregelt (DIN 485, DIN 18501, DIN 18503, DIN 18158, DIN EN 1341, DIN EN 1342).

Die grundsätzliche Bauweise für Pflaster- und Plattenbeläge ist nahezu identisch. Deckschichten aus Pflaster und Plattenbelägen bestehen aus dem Stein selber und der Pflasterbettung. Diese wird in der Regel aus Sand (Körnung 0/2 mm, 0/4 mm), Splitt (1/3 oder 2/5 mm) oder einem Brechsand-Splittgemisch (0/5 mm) hergestellt. Seltener wird auch Kalk- oder Zementmörtel als Bettung verwendet. Die Schichtdicke soll im verdichteten Zustand 3 bis 5 cm betragen (bei Natursteinpflaster ggf. 4 bis 6 cm bzw. 3 bis 4 cm). Die Fugenbereite muss für Beton- und Klinkerpflaster mindestens 3 mm betragen. Für Natursteinpflaster ist geregelt, dass die Fugenbreite maximal 15 mm (Großpflaster) bzw. 10 mm betragen darf, wobei keine Pressfugen mit aneinander stoßenden Steinen entstehen dürfen. Das Fugenmaterial muss mit dem Bettungsmaterial abgestimmt sein und kann aus denselben Baustoffen wie die Bettung bestehen. Beim Bau wird die Pflasterbettung auf die verdichtete Tragschicht aufgebracht und profilgerecht planiert. Anschließend werden die Pflastersteine oder Platten versetzt, die Fugen mit dem Fugenmaterial eingekehrt und die Decke verdichtet. Das Einkehren der Fugen ist auch nach dem Verdichten möglich. Da das Pflastermaterial selber starr ist, erfolgt die Verdichtung in der Bettung. Für Pflasterdecken ist eine Randeinfassung vorzusehen. Einen möglichen Schichtaufbau zeigen die Darstellungen 3 und 4. Zumindest neu eingebaute Deckschichten aus Pflaster- und Plattenbelägen sind wasser- und luftdurchlässig. Diese Eigenschaft lässt bei älteren Belägen nach (BORGWARDT 1995). Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Pflaster- und Plattenbeläge bei ungebundener Bettung in den Fugen und in der Bettung durchwurzelt werden können. Durch verschiedene Steinformate und Fugenbreiten treten Unterschiede im Fugenanteil und somit im potenziell durchwurzelbaren Raum auf.



Darstellung 3: Aufbau gepflasterte Fläche



Darstellung 4: Aufbau Fläche mit Plattenbelag

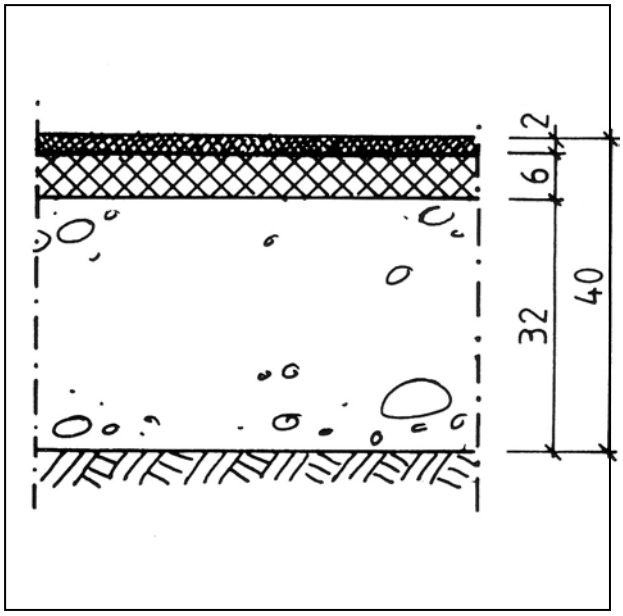
Bituminöse Decken werden bevorzugt für Straßen für den Kfz-Verkehr eingesetzt, finden sich aber auch auf Geh- und Radwegen oder auf Parkplätzen. Sie bestehen nach RStO 01 bei gering belasteten Verkehrsflächen der Bauklasse V und VI aus einer Deckschicht auf bituminöser Tragschicht oder aus einer Tragdeckschicht, die beide Funktionen beinhaltet (RStO 01, 17). Letztere ist auch für Geh- und Radwege vorgesehen (RStO 01, 26). Je nach Zusammensetzung der Mineralstoffe und der Bindemittel werden verschiedene Asphaltbauweisen unterschieden, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Asphaltbeton oder Splittasphaltmastix werden als kombinierte Tragdeckschicht oder als Deckschicht eingebaut. Da sie verdichtet werden, bezeichnet man sie auch als Walzasphalt. Gussasphalt wird in der Regel nicht verdichtet und ausschließlich als Deckschicht eingesetzt. Die Schichtdicken sind Tabelle 3 zu entnehmen. Ein exemplarischer Schnitt durch eine asphaltierte Fläche ist in Darstellung 5 zu sehen. Bituminöse Decken sind relativ elastisch und daher im Hinblick auf Schadbilder bei Anhebungen durch Baumwurzeln anders zu bewerten als Pflasterdecken und Plattenbeläge. Eine Durchwurzelung der hohlraumarmen Deckschicht selber ist unwahrscheinlich.

Betondecken werden aus Beton der Güte B 25 und in der Regel ohne Bewehrung hergestellt. Sie bilden eine großflächige, starre Flächenbefestigung und werden insbesondere bei Straßen und Radwegen im ländlichen Raum eingebaut. Eine Durchwurzelbarkeit ist nicht gegeben.

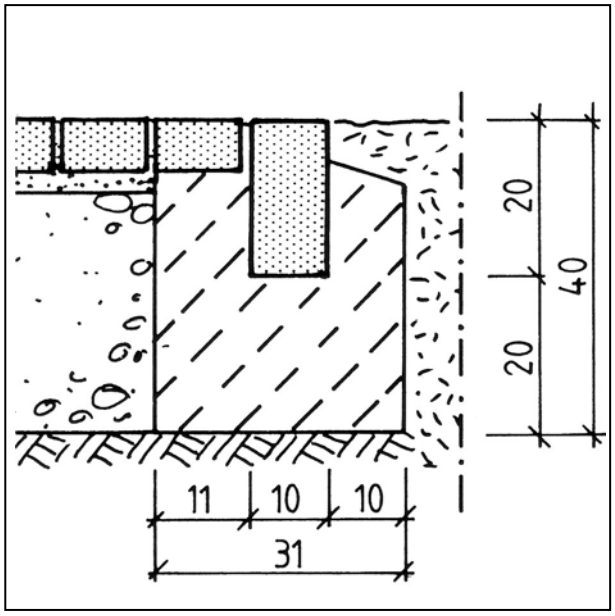
Wasserdurchlässige Befestigungen stellen eine Sonderbauweise dar, die unter anderem für nachträgliche Befestigungen im Bereich von Baumbeständen verwendet wird. Regelungen hierzu sind im „Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen für Verkehrsflächen“ (FGSV 1998) enthalten. Deck- und Tragschichten müssen hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit abgestimmt werden und einen großen Hohlraumgehalt aufweisen. Der Aufbau ist daher potenziell durchwurzelbar. Als Deckschichtmaterial kommen wasserdurchlässige Pflaster- und Plattenbeläge, wasserdurchlässiger Asphalt, wasserdurchlässiger Beton oder Deckschichten ohne Bindemittel in Frage.

Art der Deckschicht		**Schichtdicke**	**Regelwerke**
Deckschichen ohne Bindemittel, Körnung	bis 11 mm	min. 3 cm	ATV DIN 18315
	bis 16 mm	min. 5 cm	
	bis 22 mm	min. 7 cm	
Pflasterdecken		5 bis 14 cm	ATV DIN 18318 ZTVP-StB 2000
Plattenbeläge		3 bis 5 cm	
Asphaltbeton, Splittasphaltmastix	Tragdeckschichten	Im Mittel 7 cm, min. 5 cm	ATV DIN 18317 ZTV Asphalt-StB 01
	Binderschichten	im Mittel 4 cm, min. 3 cm	
	Deckschichten	im Mittel 2,5 cm, min. 1,5 cm (min. das 2,5fache des Größtkorns)	
Gussasphalt	Deckschichten	im Mittel 2,5 cm, an keiner Stelle unter 1,5 cm	
Betondecken		min. 10 cm	ATV DIN 18316 ZTV Beton-StB 01
Wasserdurchlässige Befestigungen		unterschiedlich (hängt von der Art der Deckschicht ab, siehe dort)	Merkblatt wasserdurchlässige Befestigungen

Tabelle 3: Schichtdicken für Deckschichten von Verkehrsflächen



Darstellung 5: Aufbau asphaltierte Fläche



Darstellung 6: Aufbau Randeinfassung

2.1.5 Randeinfassungen

Einfassungen dienen zum einen als seitliches Widerlager für die oberste Tragschicht und die Deckschicht und zum anderen der Trennung verschiedener Schichtaufbauten. Hinsichtlich der untersuchten Thematik kommen Randeinfassungen als Abschluss der Verkehrsfläche zur Pflanzgrube bzw. zur Baumscheibe in Betracht. Als Baumscheibe wird eine dauerhaft wasser- und luftdurchlässige Fläche in Stammnähe bezeichnet (HÖSTER 1993, 18; DIN 18916, 4.4.1), die an befestigte Verkehrsflächen grenzt. Oftmals bildet die Baumscheibe zugleich den oberen Abschluss der Pflanzgrube. Für Einfassungen werden zumeist Bord- und Kantensteine aus Beton oder Naturstein verwendet. Die genormten Betonbordsteine weisen Maße von 8 bis 18 cm Breite, 20 bis 30 cm Höhe und 100 cm Länge auf (DIN 482). Naturbordsteine werden seltener als Randeinfassung für Baumscheiben eingesetzt und sind bezüglich ihrer Maße weniger stark reglementiert (DIN EN 1343). Kantensteine sind dünner als Bordsteine, wobei die Formate nicht genormt sind. Es kann außerdem zwischen Hoch- und Tiefbord bzw. zwischen ebenerdigem und erhöhtem Einbau unterschieden werden. Bordsteine sind nach ATV DIN 18318 auf ein 20 cm dickes Betonfundament der Betongüte B 15 zu setzen und mit einer 10 cm dicken Rückenstütze aus Beton derselben Güte zu versehen (Darstellung 6). Zwischen den einzelnen Steinen sollen 5 mm breite Stoßfugen verbleiben, die nicht verfugt werden müssen. Die Bauweise einer Einfassung ist exemplarisch in Darstellung 6 zu sehen. Außer Einfassungen aus Bordsteinen können auch Pflastersteine als Randeinfassung verbaut werden, wobei für Fundament und Rückenstütze dieselben Anforderungen wie bei den Bordsteinen bestehen.

2.2 Baumwurzeln

Um die Entstehung von Schäden an Verkehrsflächen nachvollziehen zu können, ist es hilfreich, zu verstehen, wie Wurzeln wachsen und welche Einflüsse auf sie wirken. Die Erkenntnisse zum Wachstum von Baumwurzeln wurden zumeist anhand von Bäumen auf annähernd natürlichen Standorten

oder durch Versuchspflanzungen gewonnen. Auf die Besonderheiten von Straßenstandorten für Bäume soll in Abschnitt 2.3 eingegangen werden. Im folgenden werden solche Aspekte des Wachstums von Baumwurzeln dargestellt, die für das Verständnis der Problematik von Bedeutung sind. Sie umfassen grundlegende Kenntnisse zur Funktion, zum Bau und zum Wachstum von Wurzeln, zum Einfluss verschiedener Bodeneigenschaften und zur Wurzelarchitektur. Für umfassendere Darstellungen sei auf die Literaturangaben verwiesen.

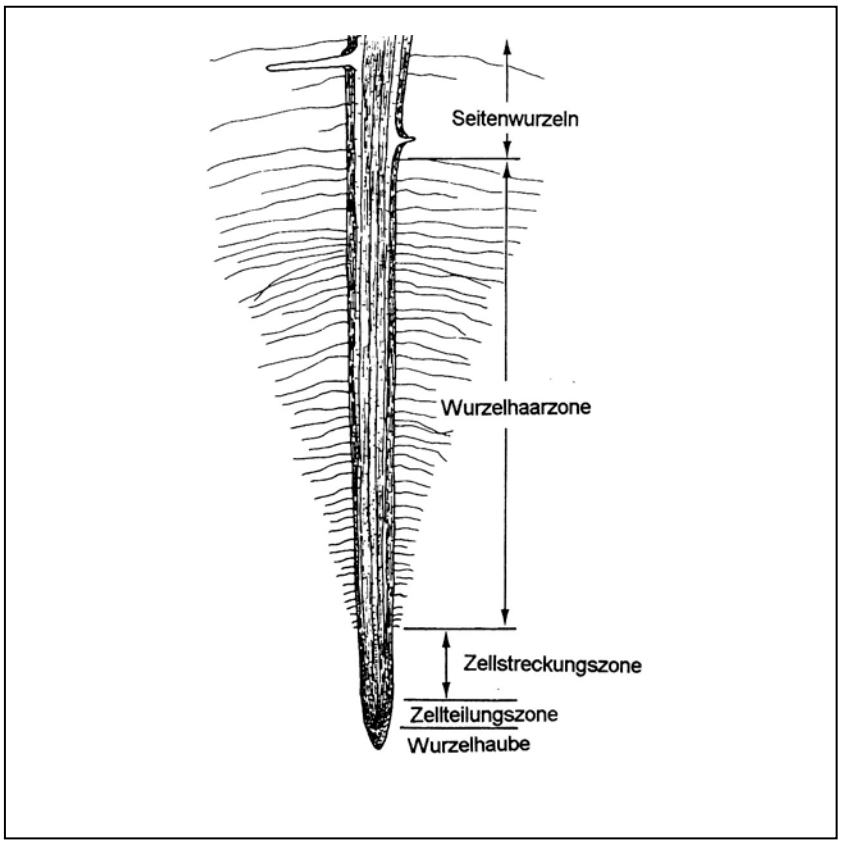
2.2.1 Funktion

Baumwurzeln dienen der Verankerung des Baumes im Boden, der Aufnahme von Wasser und den darin gelösten Nährstoffen sowie der Speicherung von Reservestoffen. Außerdem sind sie Orte der Hormonsynthese. Diese Funktionen werden innerhalb des Wurzelsystems je nach Alter und Dicke der Wurzel und je nach Wuchsort differenziert wahrgenommen. Statische Funktion besitzen vor allem dicke, verholzte Wurzeln. Die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen hingegen erfolgt über feine, junge Wurzeln. Sie besitzen noch unverkorktes, aufnahmefähiges Gewebe und können durch feine Wurzelhaare kleinste Poren erschließen. Die absorbierende Oberfläche kann durch die Symbiose mit Mykorrhizapilzen erheblich vergrößert werden. Die Speicherung von Reservestoffen in Form von Stärke, Fett, Mineralsalzen und Wasser erfolgt vor allem in Wurzeln mittlerer Dicke (BRAUN 1998, 75 u. 80; HÖSTER 1993, 45). Alle Wurzeln besitzen zugleich eine Leitungsfunktion. Bei reifen Wurzeln werden im innen liegenden Holzteil, dem so genannten Xylem, Wasser und Nährsalze mit dem Transpirationsstrom zu den photosyntheseaktiven Pflanzenteilen geleitet. Der außen liegende Bastteil, das s genannte Phloem, führt die im oberirdischen Pflanzenteil gebildeten Assimilate. Der Aufbau einer reifen Wurzel ist also im Wesentlichen mit dem des Stammes und der Äste vergleichbar. Für die optimale Erfüllung dieser Aufgaben ist eine qualitative und quantitative Differenzierung des Wurzelgewebes erforderlich. In Anpassung an die Erfordernisse unterscheidet sich daher der Aufbau insbesondere der jungen Wurzel von dem der oberirdischen Pflanzenteile und der Aufbau der jungen Wurzel von dem der alten.

2.2.2 Anatomie und Wachstumsprozesse

Wurzeln wachsen analog zum oberirdischen Spross ausschließlich an der Spitze in die Länge. Die Wurzelspitze gliedert sich in mehrere Zonen (Darstellung 7): Teilungsfähiges Gewebe bildet den Vegetationspunkt. Im Kern befindet sich das so genannte Ruhende Zentrum aus sich nicht oder nur wenig teilenden Zellen, an das sich das teilungsaktive meristematische Gewebe anschließt. Nach hinten werden die noch undifferenzierten Zellen der eigentlichen Wurzel gebildet. Zum Schutz der teilungsfähigen Zellen gegen mechanische Beschädigungen werden nach vorne Zellen abgesondert, die die Kalyptra (Wurzelhaube) formieren. Diese wird von innen ständig erneuert. Ihre äußeren Zellen sterben ab, verschleimen und erleichtern der Wurzelspitze als Gleitschicht das Durchdringen des Bodens. In der an die Wurzelhaube anschließenden, wenige Millimeter langen Zellstreckungszone erfolgt das eigentliche Längenwachstum, welches die Wurzelspitze durch den Boden treibt. Hier beginnt auch die Ausdifferenzierung des Gewebes. Ihr folgt die Wurzelhaarzone als Hauptort der Wasser- und Nährstoffaufnahme. Die extrem feinen Wurzelhaare werden bis zu 10 mm lang (NULTSCH 1996, 250) und vergrößern die absorptionsfähige Oberfläche. Nach einiger Zeit sterben sie ab und werden durch die

Exodermis als primäres Abschlussgewebe ersetzt. Diese ist zunächst nur schwach verkorkt und verfügt über Durchlasszellen. Sie ist daher, wenn auch in geringerem Maße, zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen fähig. Hinter der Wurzelhaarzone entstehen Verzweigungen durch die Bildung von Seitenwurzeln. Wie der Spross, so ist auch die Wurzel durch das teilungsfähige Kambium zu sekundärem Dickenwachstum in der Lage. Das zunächst sternförmig angelegte Kambium wächst sich bei der etwas älteren Wurzel zu einem Ring aus. Es gibt nach innen Xylemzellen ab, während es nach außen Phloemzellen bildet. Die äußeren Gewebe halten dem Dickenwachstum nicht stand und zerreißen schließlich. Verkorkende Zellen bilden das Periderm als Abschlussrinde, die der Rinde von Stamm und Ästen ähnlich ist. Ältere Wurzeln können deshalb nur in geringem Maße Luft und Nährstoffe aufnehmen, so dass Bäume auf ständige Wurzelneubildung angewiesen sind.



Darstellung 7: Bau der Wurzel (aus HARRIS 1992, 45)

Die Wurzelspitze bestimmt den Weg, den die Wurzel durch das Substrat – sei es gewachsener Boden oder Wegebaustoff – nimmt. Beim Erschließen des Bodenkörpers wird sie unterstützt vom festeren Gewebe dahinter anschließender, älterer Wurzelzonen und dem seitlichen Druck der Bodenpartikel (CRAUL 1992, 125). Sie bevorzugt den Weg des geringsten Widerstandes. Bei günstigen Bodenbedingungen kann die Wurzelspitze mit geringem Energieaufwand in Poren oder Räume eindringen, die mindestens so groß sind wie sie selber. Hierzu müssen die Poren mindestens Grobporengröße (ab 10 µm = 0,01 mm) aufweisen. Sind die Böden locker genug, können unter Energieaufwand auch kleinere

Poren erschlossen und Bodenpartikel verdrängt werden (POLOMSKI u. KUHN 1998, 60; CRAUL 1992, 125). Die Penetrationskraft der Wurzeln hängt von verschiedenen Faktoren ab und wird mit maximalen Eindringwiderständen von 2 bis 5 MPa beziffert (POLOMSKI und KUHN 1998, 62). Doch auch die Wurzeln selber schaffen sich Raum, indem sie das Porenvolumen in ihrer unmittelbaren Umgebung durch seitlichen Druck auf die Bodenpartikel beim Längen- und Dickenwachstum vergrößern (CRAUL 1992, 125). Der dabei auf die Umgebung ausgeübte Druck beträgt bis zu 4,9 MPa (LYR et al. 1992, 397). Leicht durchwurzelbare, durchgehende Poren entstehen auch durch die Tätigkeit der Bodentiere, insbesondere der Regenwürmer, und durch abgestorbene Wurzeln. Diese werden nach ihrer Zersetzung wie Kanäle erschlossen. CRAUL berichtet von wiederholten Beobachtungen in Waldbeständen, wonach mehrere Wurzelsysteme denselben Wurzelkanälen folgten und mehrere ineinander geschachtelte Rindenlagen bildeten (CRAUL 1992, 150).

2.2.3 Wurzelwachstum und Bodeneigenschaften

Die Wurzelsysteme von Bäumen sind einerseits genetisch beeinflusst und bilden sich andererseits als Reaktion auf die örtlichen Standortbedingungen aus. Eine Schlüsselrolle für die Wurzelarchitektur nehmen die Bodeneigenschaften ein, wobei der Einfluss der physikalischen Bodeneigenschaften den des Nährstoffhaushaltes überwiegt (vgl. KÖSTLER et al. 1968, 84). Im folgenden Abschnitt sollen daher insbesondere Kennzeichen der Bodenmechanik und des Wasser- und Lufthaushaltes von Baumwurzeln dargestellt werden.

Bodenmechanik

Der mechanische Bodenwiderstand und das Porenvolumen bzw. die Porenverteilung im Boden bestimmen die Durchwurzelbarkeit von Böden. Die noch tolerierbare Bodendichte hängt von der Korn- und Porengrößenverteilung ab. Vergleichsweise dichte Böden können bei einem ausreichenden Gehalt an durchgehenden Grobporen besser durchwurzelbar sein, als weniger dichte Böden, die durch einen hohen Feinanteil über weniger Grobporen verfügen (CRAUL 1992, 230). Exemplarisch seien hier einige maximale Dichten angeführt: 1,5 bis 1,7 g/cm³ für feinteilhaltige Böden und 1,7 bis 1,9 g/cm³ für sandige Böden (VEIHMEYER u. HENDRICKSON 1948, zitiert in: LIESECKE 1970, 62); 1,3 g/cm³ für Tonböden und 1,8 g/cm³ für Lehmböden (GREACAN et. al. 1969, zitiert in: CRAUL 1992, 139f.). Die Auswirkungen der Bodenverdichtung auf die Bodeneigenschaften und das Wurzelwachstum werden in Abschnitt 2.3.2 skizziert.

Bodenwasser

Das Bodenwasser liegt im Boden in unterschiedlicher Bindungsintensität durch Adhäsions- und Kapillarkräfte vor, die von den Porengrößen abhängig sind. Wurzeln verfügen durch den Transpirationsstrom über eine artspezifische Saugspannung. Pflanzenverfügbares Wasser liegt in Bindungskräften vor, die einerseits so gering sind, dass es von Wurzeln aufgenommen werden kann, und andererseits so groß sind, dass die Bodenporen nicht rasch entwässern. Der Bereich der Bindungskräfte, in dem das Wasser für Pflanzen verfügbar ist, wird als nutzbare Feldkapazität von Böden bezeichnet. Er liegt bei einer Wasserspannung zwischen pF 1,8 und pF 4,2 (SCHROEDER 1994, 52). Die Hauptquelle des pflanzenverfügbaren Wassers liegt vor allem als kapillares Haftwasser in Mittelporen vor (∅ 0,2 bis 10

µm; pF 2,5 bis 4,2). Wasser in kleineren Poren und Quellungswasser ist so fest an die Bodenpartikel gebunden, dass es kaum noch aufgenommen werden kann (pF > 4,2). Grobporen (∅ > 10µm; pF < 1,8) hingegen können Wasser nicht gegen die Schwerkraft halten („gegen das Feld“) und entwässern. Durch die Wasseraufnahme wird die Saugspannung des Bodens in der Umgebung der Wurzeln erhöht, so dass Bodenwasser durch Kapillare nachfließt. Der Fließweg beträgt dabei einige Millimeter (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL et al. 1998, 212, 214). Die Wasserleitfähigkeit des Bodens ist ausschlaggebend dafür, wie schnell das Wasser zu den Wurzeln gelangt. Je nach Standortamplitude der Baumart sind die Saugkraft und der Wasserverbrauch unterschiedlich hoch. In Anpassung an die Standortverhältnisse können diese Unterschiede auch zwischen Bäumen derselben Art bestehen. Es gibt außerdem Hinweise, dass innerhalb eines Wurzelsystems die Verlagerung von Wasser von einer Wurzelpartie in die nächste möglich ist (MOLTSCHANOW 1957, zitiert in: KÖSTLER et al.1968, 65), so dass die Standortbedingungen effektiv ausgenutzt werden können.

Wurzelatmung

Wurzeln atmen wie die oberirdischen Pflanzenteile, um aus kohlehydratreichen Verbindungen Energie zu gewinnen. Der dafür benötigte Sauerstoff wird hauptsächlich aus der Bodenluft aufgenommen, deren Zusammensetzung zumindest in den oberen Bodenschichten mit der atmosphärischen Luft vergleichbar ist (SCHROEDER 1992, 56). Der Sauerstoff wird in Oxidationsprozessen verbraucht und als Kohlendioxid abgegeben. Durch Diffusionsprozesse innerhalb des Bodens und zwischen Boden und Atmosphäre wird der Bodenluft erneut Sauerstoff zugeführt. Diese befindet sich insbesondere in den Grobporen (>10 µm) und in größeren Hohlräumen und Spalten im Bodengefüge. Der Luftgehalt im Boden beträgt je nach Bodenart und Dichte bei Feldkapazität bis zu 40 % (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL et al. 1998, 219). Zu geringe Sauerstoffgehalte in der Bodenluft führen zu Wachstumsdepression und zum Absterben von Wurzeln. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL et al. geben 10 % O_2 als Minimum und 5 % CO_2 als Maximum für Pflanzenwachstum an. Das nötige Luftvolumen im Boden beziffern sie mit ca. 15 %, wobei ab Gehalten unter 4 bis 6 % mit einem Sauerstoffmangel zu rechnen ist (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL et al. 1998, 223). Die geringe Toleranz von Mykorrhizapilzen gegen Sauerstoffmangel kann außerdem zu einer verringerten Aufnahme von Wasser und Nährstoffen führen. Durch die Abhängigkeit von der Baumart, der Bodenart, der Temperatur und der Porengrößenverteilung kann der Mindestsauerstoffgehalt nur als Anhaltswert angegeben werden. Eichen erdulden beispielsweise Sauerstoffwerte bis zu 5 %, ohne eine Beeinträchtigung des Wurzelwachstums zu erleiden (SIKES u. PETTIT 1980, zitiert in: LYR et al. 1992, 146). Die stoffwechselaktiven Wurzelspitzen besitzen den Hauptanteil an der Atmung. Bei älteren Wurzeln geht die Atmungsaktivität deutlich zurück und ist schließlich mit der Atmung von Ästen und Stamm vergleichbar (YODA 1967, zitiert in: LYR et al. 1992, 244).

Nährstoffe

Bäume benötigen verschiedene Nährstoffe in unterschiedlichen Mengen für ihren Stoffwechsel. Während Kohlenstoff als Kohlendioxid über die oberirdischen Pflanzenteile aus der Luft aufgenommen wird, werden die übrigen Nährstoffe (z. B. Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, u. v. m.) über die Wurzeln als An- oder Kationen aus der Bodenwasserlösung aufgenommen. Die Ionen gelangen über

Massenfluss und Diffusion mit dem Konzentrationsgefälle zu den Wurzelspitzen (LYR et al. 1992, 58). Sie diffundieren durch das Konzentrationsgefälle zwischen Bodenlösung und Zellplasma in die Rhizodermiszellen ein oder werden mit der Bodenwasserlösung im Transpirationsstrom aufgenommen. Auch der aktive Transport über Trägerstoffe ist möglich. Nährstoffmangel kann sich in Blattverfärbung, Wuchsdepression und mangelnder Vitalität äußern. Da die physikalischen Bodeneigenschaften den größeren Einfluss auf das Wurzelwachstum haben (s. o.), soll hier auf den Nährstoffhaushalt von Böden und dessen Auswirkungen nicht näher eingegangen werden.

Organische Substanz

Der Gehalt und die Art organischer Substanz wirken sich auf die bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften sowie die biologische Aktivität im Boden aus. Sie besteht aus der Substanz abgestorbener und mehr oder weniger zersetzter Tiere und Pflanzen sowie aus überwiegend tierischen Stoffwechselprodukten. Rein organische oder rein mineralische Böden können hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Pflanzenstandort nachteilig sein. PERRY beziffert einen Anteil von 2 bis 3 Gew.-% organischer Substanz im Boden als förderlich (PERRY 1994, 8). Auch die Wurzeln selber tragen nach ihrem Absterben zu einem nicht unerheblichen Teil zum Gehalt organischer Substanz im Boden bei (CRAUL 1992, 149).

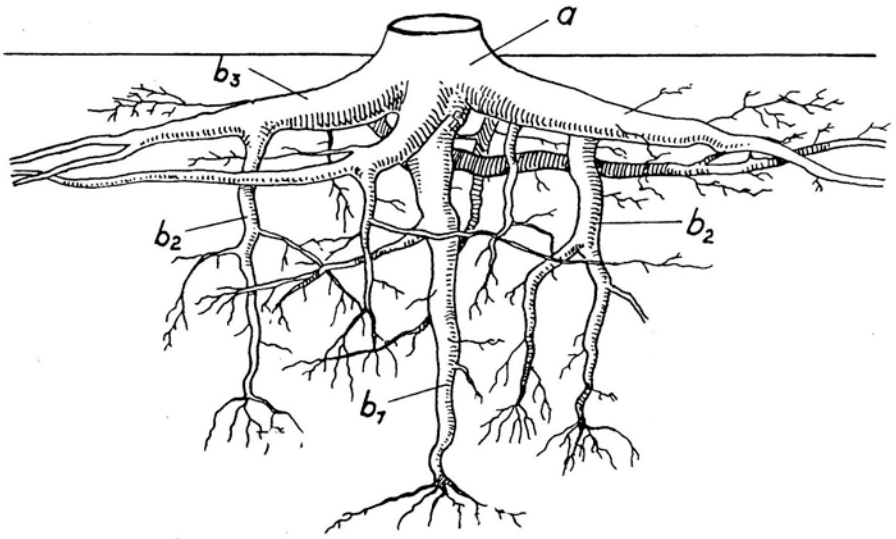
Bodenreaktion

Die Bodenreaktion, gemessen als pH-Wert, ist unter natürlichen Bedingungen abhängig vom Ausgangsgestein des Bodens, von der Art und dem Gehalt an organischer Substanz und von biochemischen Prozessen im Boden. Wurzeln tolerieren einen pH-Wert von 4 bis 8 (CRAUL 1992, 146). Da die Bodenreaktion jedoch die Nährstoffverfügbarkeit beeinflusst und Mykorrhizapilze im alkalischen Milieu nicht gedeihen, liegen günstige pH-Werte zwischen 5 und 7 (schwach sauer bis neutral).

2.2.4 Wurzelarchitektur

Die Wurzelarchitektur wird insbesondere durch die langlebigen, verholzten Skelettwurzeln geprägt (Darstellung 8). Die unverholzten Feinwurzeln sind relativ kurzlebig und können im Jahresverlauf z. B. bei Trockenheit oder geringen Bodentemperaturen periodisch absterben, um sich bei günstigen Bedingungen wieder zu regenerieren (KÖSTLER et al. 1968, 44; PERRY 1994, 3f.; POLOMSKI u. KUHN 1998, 178 ff.). Dieser Prozess kann grundsätzlich auch bei größeren, verholzten Wurzeln auftreten und zeigt, dass das Wurzelsystem von Bäumen eine gewisse Dynamik aufweist (KÖSTLER et al. 1968, 44).

Nach der Wuchsrichtung werden horizontale und vertikale Wurzeln unterschieden. Zu letzteren zählen die in die Tiefe wachsenden Senker oder Senkwurzeln und die primäre Pfahlwurzel, welche jedoch bei den meisten Bäumen nur im Jungstadium von Bedeutung ist. Senker erschließen ausreichend sauerstoffreiche tiefere Bodenschichten und verstärken die Stabilität. Wurzeln, die vom Wurzelstock ausgehend schräg nach unten wachsen, werden auch als Herzwurzeln bezeichnet (vgl. CRAUL 1992; HARRIS 1992; KÖSTLER et al. 1968; PERRY 1992).



Schematische Darstellung des Wurzelwerks von Waldbäumen (nach JENIK, 1957): a. Wurzelanläufe, b_1 vertikale Skelettwurzel, Pfahlwurzel, b_2 vertikale Skelettwurzeln-Senkwurzeln, b_3 horizontale Skelettwurzeln.

Darstellung 8: Wurzelbezeichnungen (Quelle: JENIK (1957) in KÖSTLER et al. 1968, verändert)

Charakteristika reifer Wurzelsysteme

Das Wurzelsystem eines Baumes ist von zahlreichen, auf komplexe Weise miteinander verwobenen Faktoren von Standortbedingungen und genetischen Informationen abhängig und verändert sich zudem mit dem Alter bzw. verschiedenen Entwicklungsstadien. Dennoch können aus der Literatur einige grundsätzliche Kennzeichen abgeleitet werden. Die dort entnommenen Maßangaben sind exemplarisch aufgeführt, um die Proportionen zu verdeutlichen. Im Einzelfall sind erhebliche Abweichungen möglich.

Dem Wurzelstock entspringen vier bis elf Horizontalwurzeln mit einem Durchmesser von 20 bis 40 cm Durchmesser (PERRY 1982, 201; LYRFORD 1975, zitiert in: CRAUL 134). Sie verjüngen sich auf den ersten ein bis vier Metern (KÖSTLER et al. 1968, 42: 1 m; PERRY 1982, 201: 1 bis 4 m; CRAUL 1992, 134: 2 m) rasch bis auf 2 bis 4 cm im Durchmesser (CRAUL 1992, 134) was in der englischsprachigen Literatur auch als „zone of rapid taper“ (Zone rascher Verjüngung) bezeichnet wird. Danach verzweigen sich die Hauptwurzeln mehrmals in Intervallen von ca. 1 bis 5 m (LYRFORD 1975, zitiert in: CRAUL 1992, 134). Der Durchmesser der Horizontalwurzeln bleibt dann relativ konstant bei 1 bis 2,5 cm (PERRY 1992, 201). Vertikal- oder Senkwurzeln zweigen zumeist in Stammnähe von den Horizontalwurzeln ab (HAMILTON 1984, 40; HARRIS 1992, 47). Ihr Wachstum verläuft langsamer als das der Horizontalwurzeln (KÖSTLER et al. 1968, 42).

KÖSTLER et al. unterscheiden drei genetisch bedingte Grundtypen von Wurzelsystemen (KÖSTLER et al. 1968, 25 - 29). Es sind dies das Pfahlwurzelsystem, das Herzwurzelsystem und das Senkerwurzelsystem. Bei Bäumen mit **Pfahlwurzelsystem** bleibt die Primärwurzel dominierend, das Wachstum der Seitenwurzeln ist nur schwach ausgeprägt. Es kann sehr tief reichen, ggf. auch bis zum Grundwasser,

und ist gut geeignet für die Anpassung an periodische Trockenheit (LYR et al. 1992, 145). Reine Pfahlwurzelsysteme liegen bei Kiefer und Tanne vor. Laubbäume verfügen nur in der Jugendphase über ein Pfahlwurzelsystem. Bei Eiche und Ulme dominiert dieses längere Zeit und geht erst spät in ein Herzwurzelsystem über.

Bei anderen Arten stellt die Keimwurzel ihr Wachstum zugunsten der Seitenwurzeln ein. Von einem **Herzwurzelsystem** wird gesprochen, wenn mehrere fast gleich starke Hauptwurzeln schräg abwärts wachsen und den Boden halbkugelförmig erschließen. Es ist in gemäßigten Breiten am häufigsten anzutreffen, da es gut an Böden mit mittlerem Feuchtigkeitsgehalt angepasst ist. Typische Vertreter sind Erle, Birke, Hainbuche, Rotbuche, Linde, Lärche und Douglasie. Die Feinwurzelentwicklung ist bei diesem Wurzelsystemtyp in der Regel stärker als bei den beiden anderen (KÖSTLER et al. 1968, 31).

Beim **Senkerwurzelsystem** bildet sich eine klare Trennung zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln heraus: Von kräftigen, horizontal verlaufenden Hauptwurzeln zweigen Senkerwurzeln vertikal in die Tiefe ab. Dieses eher flache Wurzelsystem ermöglicht die Durchwurzelung flachgründiger Böden und die Ausnutzung rasch abfließenden Niederschlagswassers. Solche Bedingungen sind z. B. im Gebirge gegeben. Vertreter dieses Typs sind Fichte, Esche, Pappel, Eberesche. Daneben treten Übergangsformen zwischen verschiedenen Wurzelsystemtypen auf. Ahorn beispielsweise bildet ein Herzsenkerwurzelsystem aus (HÖSTER 1993, 44; KÖSTLER et al. 1968, 25 - 29; LYR et al. 1992, 145).

Diese Wurzelsystemtypen haben sich in der deutschen Fachliteratur weitgehend etabliert und werden häufig zitiert, um die Wurzelsysteme verschiedener Arten zu charakterisieren. Die Autoren betonen, dass diese Wurzelsystemtypen nur bei „ungehemmter“ Entwicklung nachvollziehbar sind (KÖSTLER et al. 1968, 24). Da die unterirdischen Standorteigenschaften bei Straßenbäumen keine ungehemmte Entwicklung zulassen, ist die Anwendbarkeit dieser Einteilung auf die vorliegende Problematik zu hinterfragen.

Wuchsrichtung

Im Allgemeinen wird angenommen, dass Wurzeln das Bestreben haben, nach unten zu wachsen. Dies ist nur teilweise richtig. In der Literatur besteht Übereinstimmung, dass die Wuchsrichtung der Primärwurzeln mit der Wurzelordnung zusammenhängt. Die Keimwurzel von Gehölzen folgt geotropen Reizen und wächst im lockeren Boden senkrecht nach unten. Die Seitenwurzeln erster Ordnung sind plagiotrop beeinflusst und wachsen schräg abwärts nach unten. Seitenwurzeln zweiter und höherer Ordnung sind geotrop unempfindlich, wachsen also in jede beliebige Richtung. Die sich rasch entwickelnde Keimwurzel dominiert zunächst das Wurzelsystem. Durch ihr streng abwärts gerichtetes Wachstum wird sie auch als Pfahlwurzel bezeichnet. Bei den meisten Baumarten ist sie jedoch nur im Jungstadium von Bedeutung, da anschließend das Wachstum der Wurzeln höherer Ordnung dominiert (BRAUN 1998, 28; CRAUL 1992, 135; HAMILTON 1984, 38f.; KÖSTLER et al. 1968, 41, 44).

Die verholzten Horizontalwurzeln verbleiben tendenziell ungeachtet des Bodenreliefs bzw. der Geländeneigung in einer Bodentiefe (HARRIS 1992, 47). Ihre Hauptrichtung ist radial und horizontal (PERRY 1982, 201). Das Wachstum der Nebenwurzeln ist weitgehend durch die Bodenbedingungen bestimmt. Um den Bodenkörper optimal zu erschließen, neigen sie dazu, „ihre Mutterwurzel radial zu verlassen und bei der weiteren Verzweigung möglichst weit voneinander entfernt zu bleiben“, was auch „Exotropie“ genannt wird (KÖSTLER et al. 1968, 44). Nach erzwungenen Richtungsänderungen in horizontaler oder vertikaler Richtung sind sie bestrebt, die ursprünglich radiale Wuchsrichtung erneut einzunehmen (VOLZ 1959, 66; WILSON 1984, zitiert in: HARRIS 1992, 48). Ein großer Teil der Wurzeln, nämlich die Feinwurzeln, wächst einigen Autoren zufolge nach oben, um die günstigen Eigenschaften des Oberbodens auszunutzen (CRAUL 1992, 134; HARRIS 1992, 47; PERRY 1982, 202; PERRY 1994, 3).

Trotz der skizzierten Grundtendenzen richtet sich das Wurzelwachstum letztlich nach den örtlichen Gegeben- und Gelegenheiten, was auch als „opportunistisches“ Wurzelwachstum bezeichnet wird (vgl. PERRY 1994, 6). Im allgemeinen Sprachgebrauch heißt es auch unter Fachleuten, dass Wurzeln dorthin wachsen, wo Feuchtigkeit, Sauerstoff und Nährstoffe vorhanden sind. BALDER beispielsweise schreibt: „Auf trockenen Standorten werden die Wurzeln von geringen Wassermengen regelrecht angezogen, wie sie unter Versiegelungsbelägen (...) regelmäßig angetroffen werden können“ (BALDER 1999, 12). Wie andere Autoren auch verwendet er den Begriff „Suchwurzeln“ für die Ausprägung von langen Feinwurzeln auf Sandböden (BALDER 1999, 13) und implementiert damit ein zielgerichtetes Wachstum. PERRY hingegen konstatiert: „Roots grow, where the sources of life are available. They do not grow to or towards anything. They cannot grow where there is no oxygen or where the soil is compacted and hard to penetrate” (Wurzeln wachsen dort, wo die Quellen des Lebens verfügbar sind. Sie können nicht zu etwas hin wachsen. Sie können nicht dort wachsen, wo kein Sauerstoff vorhanden ist oder wo der Boden verdichtet und schwer zu durchdringen ist; PERRY 1982, 203). Die Frage, ob Wurzeln zielgerichtet wachsen oder nicht, ist anhand der gesichteten Literatur also nicht eindeutig zu beantworten. Da sie im Hinblick auf die Entstehung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln von Interesse ist, wären weiter gehende Erkenntnisse darüber anzustreben.

Wurzel-Spross-Relation

Die Relation zwischen dem Wurzelwerk und den oberirdischen Organen von Bäumen ist unter anderem von den Bodeneigenschaften abhängig. Trockenheit und Nährstoffarmut fördern die Ausbildung von weitreichenden Wurzelsystemen mit größeren Wurzeldicken, da ein großes Bodenvolumen zur Bedarfsdeckung erschlossen werden muss. Gut mit Feuchtigkeit und Nährstoffen versorgte Böden bringen dagegen dichtere und weniger weitläufige Wurzelsysteme hervor. Somit schwankt auch die Wurzel-Spross-Relation in gewissen Bandbreiten. „Ärmere“ Böden bedingen mehr Wurzelmasse im Verhältnis zum Spross als „reichere“ (KÖSTLER et al. 1968, 37; POLOMSKI u. KUHN 1998, 42). In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zum Verhältnis der Wurzelmasse zur Masse des oberirdischen Teils des Baumes. Die Angaben schwanken je nach Baumart, Baumalter und Bodenart zwischen 1:1 und 1:6 (BURGER 1930, zitiert in: POLOMSKI u. KUHN 1998, 42; KRAMER 1969 u. PERRY 1982, zitiert in: HARRIS 1992, 49; LYR u. HOFFMANN 1967, zitiert in: CRAUL 1992; OVINGTON 1957, zitiert in: KÖSTLER et al. 1968). PERRY macht zu den Massenproportionen einer reifen Pflanze folgende Anga-

ben: 5 % Feinwurzeln, 15 % größere Wurzeln, 60 % Stamm, 15 % Äste und Zweige und 5 % Blätter (PERRY 1982, 198). Die Wurzel-Spross-Relation beträgt demnach ungefähr 1:5.

Wurzeltiefe

Das Tiefenwachstum von Wurzeln wird bei den meisten Böden durch Sauerstoffmangel in den tieferen Bodenschichten begrenzt. Ein Zusammenhang zwischen Wurzeltiefe und Baumhöhe besteht nach KÖSTLER et al. (1968) nicht. Zwar wird von Wurzeltiefen von 10 m berichtet, diese sind jedoch Ausnahmen (KÖSTLER et al. 1968, 42f.). Die Wurzeltiefe ist daher geringer, als auch von Fachleuten allgemein angenommen wird. Die meisten Wurzeln wachsen einigen Autoren zufolge im oberen Meter des Bodens (COILE 1937, zitiert in: PERRY 1982, 198; CRAUL 1992, 135; HARRIS 1992, 48). PERRY gibt die Tiefe für die Hauptmasse der verholzten Horizontalwurzeln mit 20 bis 30 cm, CRAUL mit 40 cm an (PERRY 1982, 201; CRAUL 1992, 134). Feinwurzeln konzentrieren sich auf die obersten Bodenschichten (PERRY 1982, 203) und befinden sich hauptsächlich in einer Tiefe von bis zu 15 cm (CRAUL 1992, 135). HOFFMANN beschreibt für verschiedene Baumarten bei homogenen Substraten und vergleichbaren Bedingungen maximale Wurzeltiefen zwischen 0,4 und 2,0 m (HOFFMANN 1966, zitiert in: KÖSTLER et al. 1968, 42). Ein Vergleich verschiedener in der Literatur aufgeführter minimaler und maximaler Wurzeltiefen in Abhängigkeit von Baum- und Bodenart (POLOMSKI u. KUHN 1998, 172) lässt große Schwankungsbreiten erkennen und macht deutlich, dass generelle Aussagen kaum zu treffen sind. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptmasse der Wurzeln relativ oberflächennah wächst. Dies ist plausibel, wenn man bedenkt, dass der Oberboden in der Regel die besten Bedingungen für Wurzelwachstum bietet, während tiefere Bodenhorizonte auch am Naturstandort Verdichtung und Staunässe aufweisen oder aus festem Ausgangsgestein bestehen können. Bei Waldbäumen kommt hinzu, dass der Boden mit einer lockeren, nährstoffreichen Humusauflage bedeckt ist, so dass die Feinwurzeln nach oben wachsen müssen, um diese auszunutzen. CRAUL bemerkt, dass häufig irrtümlich angenommen wird, dass Bäume tiefreichende Wurzelsysteme ausbilden, und die flachen Wurzeln deshalb nur eine geringe Bedeutung für die Vitalität des Baumes haben. Als „kritische“ Bodentiefe nimmt er ungefähr die obersten 30 cm an (CRAUL 1992, 137).

In der Literatur und in Verwendungshinweisen für Bäume z. B. in Baumschulkatalogen werden die Begriffe „Flach“- und „Tiefwurzler“ verwendet (z. B. LYR et al. 1992, 145; RAS LP4, FGSV 1999, 10; KIERMEIER 1996, VI-60ff.). PERRY hingegen hält diese Einteilung für unzulässig: „There is no such thing as a ‘shallow rooted’ or a ‘deep rooted’ species of tree” (PERRY 1982, 206). Diese Eigenschaft wird häufig mit der Entstehung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln in Verbindung gebracht. So wird Flachwurzlern ein besonders hohes Schadenspotenzial nachgesagt. Die Einteilung ist daher im Rahmen dieser Arbeit zu hinterfragen.

Wurzelausdehnung

Die seitliche Ausdehnung der Baumwurzeln wird auch in Fachkreisen häufig mit dem Kronenradius bzw. der Kronentraufe in Verbindung gebracht. Aus der Literatur lässt sich ein solcher Zusammenhang nicht ableiten. Nach KÖSTLER et al. besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen seitlicher Ausdehnung und Kronentraufe (KÖSTLER et al. 1968, 43f.). Vielmehr betonen verschiedene Autoren,

dass die Wurzeln häufig darüber hinauswachsen, und zwar bei hinsichtlich der Wasser- und Nährstoffversorgung ungünstigen Bodenbedingungen weiter als bei günstigen (MEYER 1982, 97; HARRIS 1992, 48). Quantitative Angaben sprechen z. B. vom dreifachen Kronenradius (ZIMMERMANN u. BROWN 1971, zitiert in: HARRIS 1992, 49; MEYER 1982, 99) oder der zwei- bis dreifachen Baumhöhe (PERRY 1992, 202). LAITAKARI stellte bei 70 bis 90jährigen Birken Horizontalwurzeln auf einer Fläche von 220 m² fest (LAITAKARI 1935, zitiert in: KÖSTLER et al.1968, 43f.). Eine Zusammenstellung von in der Literatur zu findenden Längenangaben für horizontale Skelettwurzeln verschiedener Laubbäume in Abhängigkeit von Baumalter und Bodenart in POLOMSKI und KUHN lässt große Schwankungsbreiten erkennen. Für 60jährige Eichen beispielsweise wurden auf vergleyter Braunerde Längen von 0,8 bis 2,10 m gemessen, auf Braunerde-Podsol (Grobsand) hingegen 6,90 bis 170 (!) m (POLOMSKI und KUHN 1998, 167ff.). Diese Beispiele illustrieren, dass die Reichweite von Wurzeln individuell sehr verschieden sein kann und nicht vom Kronenradius abhängt. CRAUL gibt die Länge von Horizontalwurzeln als Faustzahl mit 15 bis 20 m an (CRAUL 1992, 134). Es ist zu bedenken, dass sich einige der in der Literatur angegebenen maximalen Wurzellängen auf die Gesamtlänge vom Wurzelstock bis zur äußersten Wurzelspitze beziehen dürften, es sich dabei also teilweise um sehr feine Wurzeln handelt, die für die hier behandelte Fragestellung eine untergeordnete
Rolle spielen.

Zuwachsraten

Der Lebensrhythmus der Wurzeln unterscheidet sich von dem der oberirdischen Pflanzenteile. Das Wurzelwachstum setzt vor dem Sprosswachstum ein. Bei ausreichenden Bodentemperaturen, wie sie insbesondere in tieferen Schichten bisweilen gegeben sind, können Wurzeln auch im Winter einen geringen Zuwachs aufweisen (KÖSTLER et al. 1968, 61f.). Das Dickenwachstum hingegen setzt ca. 4 Wochen nach dem des Sprosses ein und kann bis November andauern (LYR et al.1992, 401). Während Beginn und Ende der Wachstumsperiode bei Wurzeln in erster Linie durch die Bodentemperatur bestimmt sind, ist der Zuwachs im Sommer und Herbst vor allem durch die Bodenfeuchtigkeit limitiert (KÖSTLER et al. 1968, 61f.). Wie die oberirdischen Pflanzenteile unterliegt auch der Zuwachs der Wurzeln dem Einfluss von Standort, Baumart und Baumalter. Die in der Literatur angegebenen Zuwachsraten weisen große Schwankungen auf. Exemplarisch seien hier einige Werte aufgeführt: Für das jährliche Längenwachstum von Pappelwurzeln maß JOACHIM Werte von 80 bis 85 cm auf „mittleren“ und 3 bis 4 m auf „humusfreien Anschüttböden“ (JOACHIM 1953, zitiert in: KÖSTLER et al. 1968, 42). WILSON maß ein Längenwachstum der Wurzeln von Rotahorn (*Acer rubrum*) von 45 bis 100 cm pro Jahr (WILSON 1964, zitiert in: CRAUL 1992). Der maximale tägliche Längenzuwachs beträgt bei einigen Autoren ungefähr zwischen 5 und 10 mm (LADEFOGED 1939, zitiert in: KÖSTLER et al. 1968, 40; POLOMSKI u. KUHN 1998, 177). LYR et al. geben Messwerte zwischen 1 mm (Zuckerahorn) und 56 mm (Robinie) an(LYR et al. 1992, 412). CRAUL beziffert den maximalen täglichen Zuwachs mit ca. 5 mm (CRAUL 1992, 125). Analog zu den oberirdischen Pflanzenteilen wachsen Wurzeln im Jungstadium stärker als im Alter (KÖSTLER et al. 1968, 40). Ferner müssen sie bei raschwüchsigen, kurzlebigen Arten schneller wachsen als bei Arten mit langsamer Entwicklung, um die oberirdischen Pflanzenteile ausreichend versorgen zu können. Angaben zu Zuwachsraten im Dickenwachstum von Baumwurzeln wurden in der gesichteten Literatur nicht gefunden.

Wurzelform

Die Form von Baumwurzeln weicht häufig von dem idealtypischen, annähernd runden Querschnitt ab. Wurzeln können sich einerseits in ihrer Form den Bodenbedingungen anpassen und andererseits durch verstärktes Wachstum reagieren. In dieser Arbeit soll zwischen Deformationen als erzwungenen Formanpassungen und Verdickungen als Reaktion auf Zug- und Druckbelastungen unterschieden werden. In Anpassung an mechanische Widerstände entstehen häufig Deformationen. Hierzu gehören z. B. abgeplattete, bandförmige Wurzeln, die in Felsspalten wachsen. KÖSTLER et al. beschreiben für abgeplattete Wurzeln von Waldbäumen Proportionen von 6 : 1 von Höhe zu Breite. Bei Wachstum in Schotter ist neben zahlreichen Deformationen durch Steine ein Zickzackwuchs zu beobachten (KÖSTLER et al. 1968, 78f.). Im Gegensatz dazu kann die Wurzel auf Stressoren durch verstärke Gewebebildung reagieren. Auf diese Weise kann das Wurzelholz analog zum Holz der oberirdischen Organe Druck- und Zugbelastung ausgleichen (SIEWNIAK u. KUSCHE 1994, 36f.). Dieses so genannte Reaktionsholz führt bei enger lokaler Begrenzung zu Verdickungen in Form von Beulen. Verletzungen werden überwallt und bewirken ebenfalls eine Verdickung.

2.3 Wurzelraum und Wurzelwachstum von Straßenbäumen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden für diese Arbeit relevante Wegebauweisen und Aspekte des Wachstums von Baumwurzeln vorgestellt. Als nächstes sollen der Wurzelraum und das Wurzelwachstum von Straßenbäumen als Schnittstelle beider Themenbereiche betrachtet werden. Im Mittelpunkt sollen Kenntnisse darüber stehen, welche unterirdischen Bedingungen Straßenbäume vorfinden und wie sie darauf reagieren. Auf diese Weise sollen die Rahmenbedingungen charakterisiert werden, unter denen Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln entstehen.

2.3.1 Bauweisen für Baumstandorte in Verkehrsflächen

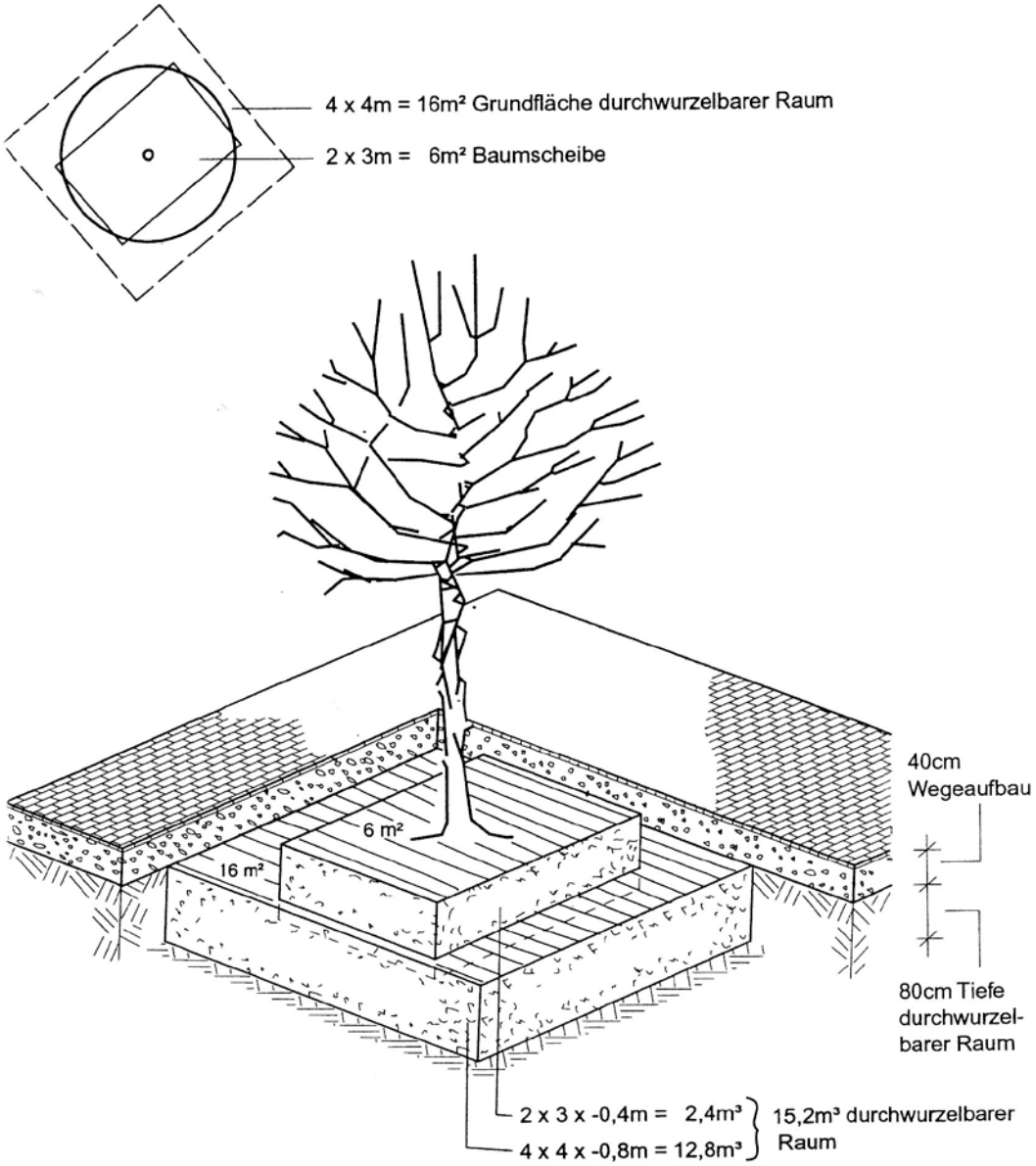
Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit werden hier ausschließlich Bauweisen mit Baumscheiben betrachtet. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass eine offene oder wasser- und luftdurchlässig befestigte Fläche um den Stammfuß des Baumes zu allen Seiten an Verkehrsflächen grenzt (s. Abschnitt 2.1.5). In der Fachwelt werden verschiedene Gesichtpunkte der Pflanzung von Straßenbäumen diskutiert. Anhand maßgeblicher Regelwerke sollen Bauweisen für Baumstandorte in Verkehrsflächen hinsichtlich Baumscheibengröße, Pflanzgrube und Wurzelraum charakterisiert werden. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Angaben gibt Tabelle 4. Ausstattungs- und Schutzelemente wie Bewässerungseinrichtungen oder Baumscheibenbefestigungen werden nicht berücksichtigt.

In den Regelwerken finden sich unterschiedlich hohe und unterschiedlich differenzierte Maßangaben. Einige lassen die Unterschreitung der Vorgaben zu, wenn geeignete Maßnahmen als Ausgleich vorgenommen werden. Insgesamt bleiben die Vorgaben wenig konkret. Für regelgerechte Baumpflanzungen ist die DIN 18916 „Pflanzen und Pflanzarbeiten“ anzuwenden (ATV DIN 18320, 3.3). Anhand der DIN 18916 soll exemplarisch die Bauweise eines Baumstandortes in einer Verkehrsfläche vorgestellt werden.

Regelwerk	Baumscheibe	Pflanzgrube	Wurzelraum
DIN 18916 Pflanze und Pflanzarbeiten (Deutsches Institut für Normung 1990)	≥ 6 m²	Breite: 1,5 x ∅ Wurzelballen Tiefe: der Pflanzenart anzupassen Regel: so tief wie vorher gestanden Oberboden vom Aushub trennen und bei Pflanzung wieder als oberste Schicht einzubringen Verfestigungen der Pflanzlochwände und -sohle beseitigen	≥ 16 m² Grundfläche, ≥ 0,8 m Tiefe
EAE 85/95 Empfehlung für die Anlage von Erschliessungsstraßen (FGSV 1985/95)	≥ 4 m², besser 9 m²	keine Angabe	keine Maßangabe bei Unterschreiten der Maße für Baumscheiben/Pflanzstreifen „ausreichende Lebensbedingungen“ durch “besondere Maßnahmen“ im Wurzelraum sicherstellen (Beispiele)
Empfehlungen zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten (FGSV 1991)	kleiner Baum: ≥ 6 m² großer Baum: ≥ 10 m²	2 x 2 m, 1,0 - 1,5 m tief Pflanztiefe: wie vorher gestanden undurchlässige Schichten durch Bohrung durchstoßen, Pflanzlochaushub in Stadtstraßen i. d. R. nicht verwendbar, zu 50 % mit geeignetem Füllboden mischen	keine Maßangabe ggf. „Vergrößerung des Lebensraums unter befestigten Flächen“ Baumstreifen auf Wurzelsysteme (Flach-, Pfahl-, Herzwurzler) ausrichten Bautechnische Maßnahmen zur Vergrößerung des durchwurzelbaren Bodenvolumens (Beispiele)
Empfehlungen für das Pflanzen von Bäumen (FLL 1999)	keine Angabe	Breite: 1,5 x ∅ Wurzelballen bzw. Wurzelwerk Sohle und Wände der Pflanzgrube lockern Ober- und Unterboden getrennt einbauen ggf. Bodenverbesserung oder Substrataustausch	¾ m³ pro m² Kronenprojektionsfläche (nach BAKKER und KOPINGA; KOPINGA 1997) mittel und stark wachsende Baumarten: 16 m² Grundfläche, 0,8 m, besser 1,5 m tief (in Anlehnung an DIN 18916) schwach wachsende Baumarten: 12 m² Grundfläche „Ergänzungsmaßnahmen“, falls keine ausreichend großen Baumscheiben und Pflanzgruben (Beispiele)

Tabelle 4: Angaben von Regelwerken zur Bauweise von Baumstandorten in Verkehrsflächen

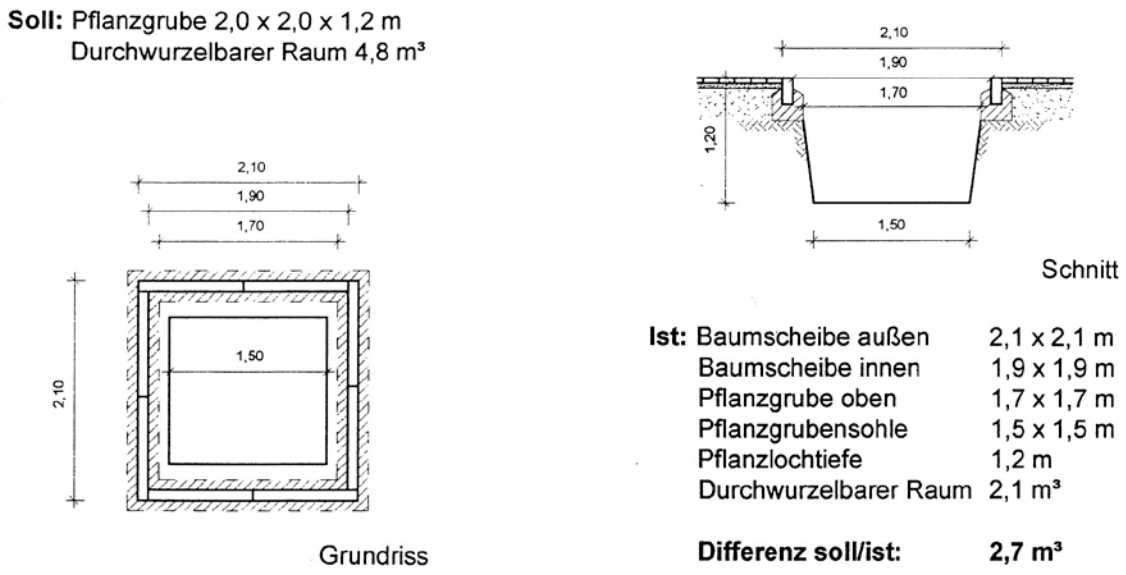
Eine „offene oder wasser- und luftdurchlässig befestigte Fläche“ (DIN 18916, 4.4.1) von 6 m² kann durch eine Baumscheibengröße von 2 x 3 m erzielt werden. Eine Grundfläche des durchwurzelbaren Raumes von 16 m² entspricht den Abmessungen 4 x 4 m. Vegetationstechnisch ungeeignete Böden sind zu verbessern bzw. auszutauschen (DIN 18915, 6.2). Innerhalb der eigentlichen Pflanzgrube ist daher ein Substrataustausch allgemein üblich. Es wird in diesem Beispiel davon ausgegangen, dass das gesamte Bodenvolumen unter der Baumscheibe bis zur erforderlichen Pflanztiefe durchwurzelbar ist. Für die Tiefe des durchwurzelbaren Raumes ist 0,8 m vorgegeben, woraus sich bei einer Grundfläche von 16 m² ein Volumen von 12,8 m³ ergibt. Die DIN 18916 lässt offen, worauf sich das Maß von 0,8 m bezieht. Nach derzeit gängigen Bauweisen müsste die durchwurzelbare Tiefe eigentlich unter der Tragschicht des Wegeoberbaus beginnen, der mit ca. 0,4 cm anzusetzen ist. Für den durchwurzelbaren Raum ergibt sich ein Volumen von 15,2 m³ (Darstellung 9).



Darstellung 9: Baumstandort in Verkehrsfläche nach DIN 18916 (Quelle: LÖSKEN 2001, verändert)

Die Städte können für Baumpflanzungen im Bereich ihrer Zuständigkeit eigene Standards festlegen, die von der DIN-Norm abweichen können. In der Praxis dürften die Vorgaben der DIN 18916 eher selten umgesetzt werden. Die Baumscheibengröße bleibt mit dem weit verbreiteten Standardmaß von 2 x 2 m zumeist unter dem geforderten Mindestmaß. Durch die hohe Verdichtung der an die Pflanzgrube angrenzenden Bereiche kann der geforderte durchwurzelbare Raum an Straßenstandorten im Regelfall nur durch besondere Maßnahmen wie den Einbau tragfähiger und durchwurzelbarer Schüttstoffe unter dem Belag gewährleistet werden (s. u.), was eher die Ausnahme sein dürfte. Ein Substrataustausch im Bereich der Pflanzgrube bzw. der Baumscheibe oder eine Verbesserung des anstehenden Bodens hingegen ist allgemein üblich. Rechnet man bei einer Baumscheibengröße von 2 x 2 m jeweils 15 cm an jeder Seite für die Randeinfassung und die Fundamentierung ab, multipliziert diese mit einer Pflanzgrubentiefe von 1,2 m und berücksichtigt die bautechnisch meist erforderliche Abschrägung der Pflanzgrubenwände, so ergibt sich ein durchwurzelbarer Raum von 2,1 m³ (Darstel-

lung 10). Dies ist weniger als ein Siebtel der DIN-Vorgaben. Ferner ist zu bedenken, dass die Norm erst 1990 eingeführt wurde, und schon aus diesem Grunde die meisten Straßenbäume mit sehr viel beengteren Platzverhältnissen auskommen müssen. Der tatsächliche Wurzelraum ist daher im Regelfall wesentlich kleiner als 15,2 m³.



Darstellung 10: Baumstandort in Verkehrsfläche nach allgemein üblicher Bauweise (Quelle: LÖSKEN 2001, verändert)

2.3.2 Kennzeichen der unterirdischen Standortbedingungen

Bei Stadtböden handelt es sich im Regelfall nicht um natürlich gewachsene sondern um durch Bautätigkeit stark veränderte bzw. aufgetragene Böden. Bäume in Verkehrsflächen finden schon aus diesem Grund andere unterirdische Bedingungen vor als Bäume in Wäldern oder in der Landschaft außerhalb von Siedlungsgebieten. Durch den allgemein üblichen Substrataustausch sind innerhalb der eigentlichen Pflanzgrube gute Vorraussetzungen für das Wurzelwachstum zu erwarten. Über die Anforderungen an Baumsubstrate liegen umfangreiche Untersuchungsergebnisse vor (z. B. KRIETER 1996; LIESECKE 1994; LIESECKE U. HEIDGER 2000).

Die Pflanzgrube der hier betrachteten Bäume in Verkehrsflächen grenzt zu allen Seiten an den Schichtaufbau der umgebenden Verkehrsflächen und an den darunter anstehenden Boden an. Bei diesem handelt es sich häufig um aufgetragene Füllböden. Baustoffe und Bauweisen für den Bau von Verkehrsflächen müssen tiefbautechnischen Anforderungen genügen. Eine hohe Tragfähigkeit wird durch den Einbau geeigneter Baustoffe und deren Verdichtung gewährleistet (s. Abschnitt 2.1), was das Wurzelwachstum behindert. Da der Schichtaufbau dennoch durchwurzelt wird, sollen an dieser Stelle einige vegetationstechnische Eigenschaften typischer an die Pflanzgrube angrenzender Bereiche erörtert werden. Für umfassendere Ausführungen sei auf die Literatur verwiesen (z. B. CRAUL 1992). Die unterirdischen Standortbedingungen von Straßenbäumen weisen eine große vertikale und

horizontale Heterogenität auf. Verschiedene Autoren berichten, dass sich die Böden von benachbarten Bäumen gravierend unterscheiden können (BALDER 1998, 25; CRAUL 1992, 88ff.; PATTERSON 1976, 97). Daraus folgt, dass auch ihre Wurzelentwicklung sehr unterschiedlich sein kann und schwer vorhersagbar ist.

Generell sind die an die Pflanzgrube angrenzenden Bereiche am Straßenstandort durch einen hohen Verdichtungsgrad gekennzeichnet. Verdichtung entsteht dadurch, „dass sich die einzelnen Bodenteilchen unter dem aufgebrachten Druck plastisch verformen, verschieben und die Hohlräume ausfüllen“ (LIESECKE 1970, 9). Bei der Verdichtung von Boden nimmt das Gesamtporenvolumen ab, so dass er quasi entlüftet wird. Dadurch sinkt das Bodenvolumen, wobei die Masse pro Volumeneinheit, also die Bodendichte, steigt. Dabei werden insbesondere die luftführenden Grobporen und bei sehr starker Verdichtung auch die Mittelporen vernichtet (LIESECKE 1970, 65f.). Die Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften sind vielfältig (vgl. HARRIS 1992, 141ff.; CRAUL 1992, 255; MEYER 1982, 101f.):

- hoher Eindringwiderstand für Wurzeln, mechanische Barriere für die Erschließung des Bodenkörpers
- geringerer Luft- und damit Sauerstoffgehalt, verminderter Gasaustausch, Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes
- reduzierte Infiltration, mehr Oberflächenabfluss
- evt. geminderte Wasserhaltekapazität
- Staunässe
- verminderte biologische Aktivität, auch Mykorrhizapilze beeinträchtigt
- verminderte Wasser- und Nährstoffaufnahme

Eine starke Bodenverdichtung wirkt sich daher negativ auf das Wurzelwachstum und die Vitalität von Bäumen aus. Nach LIESECKE ist davon auszugehen, dass sich die Veränderungen im Wasser- und Lufthaushalt noch vor der mechanischen Behinderung durch einen erhöhten Eindringwiderstand bemerkbar machen (LIESECKE 1970, 63). Die Verdichtungsneigung bzw. die Verdichtbarkeit von Böden und Baustoffen hängt insbesondere von der Bodenart bzw. der Körnung ab. Weit gestufte Böden (verschiedene Korngrößen) und Mineralstoffe mit hohem Feinanteil sind hoch verdichtbar, weil sich die feinen Bodenpartikel unter Druckeinwirkung in die Hohlräume zwischen größeren Bodenpartikeln setzen können. Hingegen erleiden nach CRAUL eng gestufte Straßenbaustoffe mit hohem Sand- und Skelettanteil durch ihre Einzelkornstruktur bei Verdichtung einen relativ geringen Verlust an Porenvolumen (CRAUL 1992, 211). Die Bodenverdichtung am Straßenstandort resultiert vor allem aus den Belastungen durch Baufahrzeuge, aus der zielgerichteten Verdichtung von Baugrund und Wegeoberbau zur Erhöhung der Tragfähigkeit und aus der Vibration des Bodenkörpers durch fahrende Kraft- und Schienenfahrzeuge. CRAUL berichtet, dass sich der Unterboden einer Baumpflanzung nach einigen Jahren durch Vibration von 1,6 auf 1,8 g/cm³ erhöhte (CRAUL 1991, 211f.)

Der Wasser- und Lufthaushalt von Böden am Straßenstandort wird durch weitere Faktoren beeinträchtigt: Die Wegedecken sind nicht oder nur teilweise durchlässig für Wasser und Luft und mindern so die Infiltration von Wasser und den Gasaustausch im Wurzelraum. Außerdem können die Wasser-

zufuhr und der Gasaustausch über die Baumscheibe durch Krustenbildung gestört sein: Unbedeckte Böden neigen dazu, an der Oberfläche eine undurchlässige, ca. 2 mm dicke, hydrophobe Schicht auszubilden. Als Ursache hierfür kommt der Aufprall von Regen auf den ungeschützten Boden in Kombination mit chemischen Reaktionen mit Stoffen aus Ablagerungen an der Oberfläche in Betracht (CRAUL 1992, 92ff.). Bei rein mineralischen Schüttstoffen ohne oder mit geringen Feinanteilen ist außerdem von einem geringen Gehalt an Nährstoffen und organischer Substanz auszugehen, so dass neben dem Wasser- und Lufthaushalt auch die Nährstoffversorgung häufig suboptimal sein dürfte. Weitere Charakteristika von Stadtböden, die negative Auswirkungen auf das Wurzelwachstum haben können, sind die Anwesenheit von Bauschuttresten, erhöhte pH-Werte, ein gestörter Nährstoffkreislauf, geringe biologische Aktivität und erhöhte Bodentemperaturen. Außerdem schränken Ver- und Entsorgungsleitungen den Wurzelraum zusätzlich ein. Auf die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Faktoren soll hier nicht näher eingegangen werden. Zusammenfassend ergibt sich, dass der Wurzelraum von Bäumen in Verkehrsflächen durch zahlreiche Faktoren quantitativ und qualitativ beeinträchtigt ist.

Tatsächlich kann bei Straßenbäumen häufig beobachtet werden, dass ihre Wurzeln die Pflanzgrube intensiv erschließen, nicht aber in die angrenzenden Bereiche einwurzeln. Dieser so genannte „Blumentopfeffekt“ führt auf Dauer zur Wuchsdepression des Baumes (vgl. BALDER 1998, 25; CRAUL 1992, 153). Andererseits weist ein Teil der Straßenbäume trotz der erschwerten Bedingungen im Wurzelraum eine zufriedenstellende Vitalität auf. Beispielsweise werden rund 48 % der hannoverschen Straßenbäume der Zustandstufe „gesund“ (guter Allgemeinzustand, sehr gute Vitalität, höchstens unbedeutende Mängel) zugeordnet (STADT HANNOVER 2001, Tabelle 2: Zustandsstufen der Straßenbäume). Auch aus angehobenen Wegebelägen und Randeinfassungen kann geschlossen werden, dass Bäume häufig in den Wegeoberbau einwurzeln und hier offenbar hinreichend günstige Bedingungen vorfinden (s. Kapitel 4).

Durch Freilegung des Wurzelbereiches von Straßenbäumen in mehreren deutschen Städten untersuchte KRIETER (1989, 1996) deren Durchwurzelungsintensität. Insbesondere Substrate mit geringem Ton-/Schluffanteil und hohem Anteil an Kies und Sand werden demnach gut durchwurzelt, während sowohl rein kiesige oder sandige Substrate ohne Feinanteile als auch verdichtete, lehmige Substrate kaum erschlossen werden. Eine Beziehung zwischen Bodenchemie und Durchwurzelungsintensität konnte in den wenigsten Fällen festgestellt werden. KRIETER kommt daher zu dem Schluss, dass das Bodengefüge, welches den Wasser- und Lufthaushalt bestimmt, ausschlaggebend ist. Die Nährstoffmenge im Boden scheint dagegen von untergeordneter Bedeutung zu sein, da ihre Verfügbarkeit maßgeblich von der Erreichbarkeit durch die Wurzeln und somit von den bodenphysikalischen Eigenschaften des Substrats abhängen (KRIETER 1989, 29ff.; KRIETER 1996, 9).

In den USA untersuchte URBAN (1992, 1999) exemplarisch das Wurzelverhalten von Straßenbäumen. Außerhalb der Pflanzgrube wurzelten die Bäume durch die Fugen von als Randeinfassung verwendeten Pflasterbändern in den Wegeoberbau und den darunter anstehenden Boden oder unterwuchsen

die Randeinfassung. Pflasterbettungen aus Sand, Kiestragschichten und anstehende Böden wurden unterschiedlich intensiv durchwurzelt, während in Schlacketragschichten keine Wurzeln eindrangen. Sandige und hohlraumreiche Wegebaustoffe boten insbesondere bei geringer Verdichtung gute Wachstumsvoraussetzungen, wurden aber auch bei sehr hohen Verdichtungsgraden noch in begrenztem Maße erschlossen (URBAN 1999). Entlang von Kabelschächten, Bordsteinen und Bewässerungseinrichtungen wurde eine gute Durchwurzelung festgestellt, was eine Leitungsfunktion dieser Elemente nahe legt. Zwischen der Vitalität der untersuchten Bäume und dem Verdichtungsgrad des Bodens konnte ein Zusammenhang festgestellt werden (URBAN 1992). Diese Beobachtungen stützen die Vermutung, dass die Bodenverdichtung ein entscheidender Faktor für die Wurzelentwicklung bei Straßenbäumen ist.

Ein weiterer Aspekt bei der Betrachtung von Bäumen in Verkehrsflächen ist das Vorhandensein unterirdischer Ver- und Entsorgungsanlagen, mit denen sich Baumwurzeln oftmals denselben Raum teilen müssen. Dies führt zu bau- und vegetationstechnischen Problemen. Baumwurzeln können in Leitungen eindringen und so Schäden verursachen oder Reparaturarbeiten an Leitungen behindern. Nach den Bestimmungen der DIN 1998 (1978) sind bestehende Leitungstrassen von Bäumen frei zu halten und bei Baumpflanzungen Mindestabstände zu Leitungen zu beachten. Umgekehrt beschränken Leitungen den Wurzelraum von Bäumen. Beide Problemfelder werden im „Merkblatt über Baumstandorte und unterirdische Ver- und Entsorgungsanlagen“ (FGSV 1997) zusammengefasst. Hier finden sich Angaben zu Abständen und Schutzmaßnahmen für Bäume wie Leitungen.

Eingriffe in den Wurzelraum eines Straßenbaums können ihm schwere Schäden zufügen. Sie werden unter anderem bei Wartungsarbeiten an unterirdischen Ver- und Entsorgungsanlagen erforderlich. Aber auch die Behebung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln stellt häufig einen Eingriff in das Wurzelsystem dar. Die DIN 18920 (1990) und die RAS-LP 4 (FGSV 1999) enthalten Bestimmungen für Schutzmaßnahmen bei Bautätigkeiten im Bereich von Baumbeständen. Die Baumschutzsatzungen der Städte und Gemeinden bieten weiteren Schutz. Übliche Vorgehensweisen bei der Behebung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln sind in Abschnitt 2.5 beschrieben.

2.3.3 Wurzelraumvolumen von Straßenbäumen

Anders als in Gärten und Parks müssen Bäume am Straßenstandort durch konkurrierende Raumansprüche seitens des Hoch- und Tiefbaus mit einem beschränkten Wurzelraum auskommen. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass bei Straßenbäumen gewisse Vitalitätseinbußen im Vergleich zu Bäumen in Wäldern und Parks hingenommen werden müssen, da man nicht gänzlich auf sie verzichten will (vgl. EAE 85/95 1995, 5.2.1.15). Um Mindestvoraussetzungen zu gewährleisten, werden in den Regelwerken praxisnahe Festlegungen getroffen, die in unterschiedlichem Maß umgesetzt werden (siehe Abschnitt 2.3.1). Gleichzeitig wird in der Fachwelt diskutiert, welches Bodenvolumen Bäume tatsächlich benötigen und wie dieses in Verkehrsflächen realisiert werden kann.

Mehrere Autoren haben den erforderlichen Wurzelraum unter verschiedenen Gesichtpunkten ermittelt. Die Einschätzungen basieren auf Feldstudien, auf Berechnungen zum Wasserhaushalt oder im Hinblick auf eine ausreichende Nährstoffversorgung (KOPINGA 1991, 57). Einige geben absolute Volumina an, andere das Volumen im Verhältnis zur Baumgröße. Ein Vergleich der Volumenangaben (z. B. in LINDSEY u. BASSUK 1991, 1992; KOPINGA 1997) zeigt die große Bandbreite der Werte und die Diskrepanz zwischen den fachlich empfohlenen und den tatsächlichen Maßen. BAKKER (1983) geht von einem Bodenvolumen von 0,75 m³ pro m² Kronenprojektionsfläche aus. Dieses Maß ist in die „Empfehlungen für das Pflanzen von Bäumen“ (FLL 1999) eingeflossen. Bei einem Kronendurchmesser von 10 m ist demnach ein Bodenvolumen von 59 m³ erforderlich. Auf Grundlage der Stickstoffversorgung beziffert KOPINGA (1991) das Bodenvolumen für einen Baum mit demselben Kronendurchmesser mit 30 m³. Unter der Annahme, dass die fachlich gewünschten Maße in der Praxis nicht zu realisieren sind und gewisse Einschränkungen hinzunehmen sind, haben LINDSEY und BASSUK (1991) eine auf den Wasserbedarf gestützte Methode entwickelt, um das Bodenvolumen unter Berücksichtung der Baumgröße, des Bodens und des Klimas zu berechnen. Für Großbritannien ergaben die Berechnungen für typische Bedingungen ein Bodenvolumen von 0,15 m³ pro m² Kronenprojektionsfläche (LINDSEY u. BASSUK 1992). Für einen Baum mit einem Kronendurchmesser von 10 m ergibt sich daraus ein Bodenvolumen von 11,8 m³. Dieses Volumen nähert sich dem aus der DIN 18916 abzuleitenden Volumen von 15,2 m³ an. Tatsächlich müssen viele Bäume mit einer Pflanzgrube von rund 2 m³ auskommen (s. Abschnitt 2.3.1).

Um für Straßenbäume trotz der eingeschränkten Raumverhältnisse einen hinreichend großen Wurzelraum zu schaffen, sind verschiedene Ansätze zur Erweiterung des Wurzelraumes unter Verkehrsflächen entwickelt worden. Zum einen wurden strukturstabile, verdichtbare Substrate entwickelt, welche die nötige Tragfähigkeit zum Einbau unter gering belastete Verkehrsflächen erfüllen und trotzdem von Wurzeln erschlossen werden können (vgl. COUENBERG 1994; GRABOSKY u. BASSUK 1996; KRISTOFFERSEN 1999; LINDSEY 1997; LIESECKE u. HEIDGER 1994; LIESECKE U. HEIDGER 2000; LÖSKEN, LIESECKE u. HEIDGER 2001; STADT OSNABRÜCK 1997). Hierzu gehören so genannte „unterbaufähige Substrate“, „structural soils“ oder „Amsterdam Tree Soil“. Dabei gibt es auch Ansätze, den für das Wurzelvolumen benötigten Raum als Hohlraum zwischen dem Bodenskelett zu spezifizieren, um unter anderem Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln vorzubeugen (LINDSEY 1997). Zum anderen wird versucht, durch Belüftungsmaßnahmen in Form von linearen Schottergräben, Flächen- und Tiefenbelüftung oder Belüftungsmatten den vorhandenen Boden für Wurzeln besser erschließbar zu machen (LIESECKE u. HEIDGER 1994; LÖSKEN, LIESECKE U. HEIDGER 2001; URBAN, SIEVERT u. PATTERSON 1988; URBAN 1998, mündl.). Um möglichst weit reichende, großvolumige Wurzelräume zu erzielen, wird außerdem angestrebt, die Wurzelräume benachbarter Bäume unter der Verkehrsfläche zu verbinden (COUENBERG 1994; LIESECKE 1991; STADT OSNABRÜCK 1997, URBAN 1998, 84). Einige Maßnahmen zur Wurzelraumvergrößerung fanden durch die „Empfehlungen für das Pflanzen von Bäumen“ (FLL 1999) Eingang in deutsche Regelwerke. Erfahrungen, über die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die untersuchte Schadensproblematik liegen noch nicht vor.

2.4 Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln in der Literatur

Die Behandlung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln in Forschung und Fachliteratur wurde durch Literaturrecherche, Internetrecherche und Expertengespräche ermittelt. Die Literaturrecherche erstreckt sich hauptsächlich auf deutsch- und englischsprachige Fachzeitschriften, Forschungsberichte und die einschlägige Fachliteratur. Eine systematische Recherche erfolgte in den Fachzeitschriften „Stadt + Grün“ (1975 bis Oktober 2001), „Neue Landschaft“ (1975 bis Oktober 2001), „Landschaftsarchitektur“ (Jg. 1998 bis Oktober 2001), „Arboricultural Journal“ (Vol. 2 1971/76 bis Vol. 24 Nr. 2+3 Nov. 2000) und „Journal of Arboriculture“ (1975 bis 2000). In anderen ausländischen Fachzeitschriften, wie „Landscape Architecture“ und „Tuin & Landschap“, wurde nach Verfügbarkeit oder aufgrund von Literaturhinweisen recherchiert. Einschlägige Fachliteratur wurde in den Themenbereichen Technik im Garten- und Landschaftsbau, Stadtbäume, Baumpflege und Baumbiologie untersucht. Außerdem wurden der Hauptkatalog und verschiedene Literaturdatenbanken der Technischen Informationsbibliothek der Universität Hannover nach Schlagworten durchsucht. Bei der gesichteten Literatur seien auch die Regelwerke von DIN (Deutsches Institut für Normung), FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) und FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) genannt, die in die Abschnitte 2.1 und 2.3 eingeflossen sind. Die Internetrecherche erfolgte einerseits gezielt in den Webseiten der ISA (International Society of Arboriculture), ASA (Arboricultural Association) und MSU (Michigan State University) sowie in den darin enthaltenen Datenbanken. Andererseits wurde mit Hilfe verschiedener Suchmaschinen nach Stichworten recherchiert. Expertengespräche erfolgten mit Mitarbeitern von Grünflächenämtern und Tiefbauämtern sowie mit Wissenschaftlern, die sich der Fragestellung aus verschiedenen Blickwinkeln nähern.

Trotz intensiver Recherche konnten nur wenige Beiträge ermittelt werden, die sich direkt mit dem Thema befassen. In der einschlägigen deutschen Fachliteratur wird das Problem zumeist nicht thematisiert. Hier und da finden sich einzelne Hinweise auf die Problematik (z. B. TAUCHNITZ 1988, 1994, 1997) oder Notizen zu Fragen der Verkehrssicherheit. Sie werden jedoch als Nebenaspekt behandelt und nicht weiter vertieft. Bisweilen werden Schadpotenziale einzelner Arten angeführt, wobei die Quellen oder Begründungen kaum nachvollziehbar sind (BALDER 1998; STOLK u. HOFFMANN 2000; Katalog Baumschule Lorenz VON EHREN 1998). Auch die weit verbreitete Meinung, dass vor allem so genannte „Flachwurzler“ Wegebeläge und Randeinfassungen anheben (deren Existenz wissenschaftlich umstritten ist, siehe Abschnitt. 2.2) schlägt sich bisweilen in den Fachzeitschriften nieder (z. B. HORST-BRUGGEMANN 1987). Es konnten jedoch auch einige wissenschaftliche Untersuchungen ermittelt werden, die sich der Problematik systematisch nähern. Diese sind in der folgenden Übersicht dargestellt (Tabelle 5).

2.4.1 Ursachen, Entstehung, Schadensbilder und Vermeidung

Obwohl das Problem in allen Städten gegenwärtig ist, konnten nur wenige gezielte und noch weniger systematische wissenschaftliche Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln recherchiert werden. Diese fanden ausschließlich im Ausland statt. Es ist zu prüfen, ob und in welcher Weise sich die Ergebnisse auf deutsche Verhältnisse übertragen lassen und inwiefern sie zur vorliegenden Fragestellung beitragen können. Im folgenden werden die wesentlichen Untersuchungen kurz beschrieben und ihre Aussagekraft und Übertragbarkeit diskutiert. Daran anschließend werden

die grundlegenden Aussagen zusammengefasst, um einen Überblick über den recherchierten Stand der Forschung zu vermitteln. Auf die Aussagen im einzelnen wird in der Diskussion der Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit eingegangen.

Thema		**Jahr der Veröffentlichung**	**Autoren**	**Art der Untersuchung bzw. Fachbeiträge**	**Land**
Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln	**Ursachen, Entstehung, Schadbilder, Vermeidung**	**Untersuchungen**			
		1983	Wagar u. Barker	Kartierung, Statistik	USA
		1988	Wong, Good u. Denne	Kartierung, Statistik	GB
		1992	Kopinga	Aufgrabungen, Versuche	NL
		1996	Francis, Parresol u. de Patiño	Kartierung, mathematisches Modell	USA, Mexiko
		1998	Nicoll u. Armstrong	Aufgrabung	GB
		2000	Sydnor et al.	Statistik, Aufgrabung	USA
		Fachbeiträge			
		1984	Hamilton	Aufsatz Fachzeitschrift	USA
		1991	Day	Aufsatz Fachzeitschrift, Aufgrabung	USA
		1994	Urban	Aufsatz Fachzeitschrift,	USA
		1995	Meyboom u. Kopinga	Aufsatz Fachzeitschrift	NL
		2000	Stolk u. Hoffmann	Aufsatz Fachzeitschrift	NL
	Spezielle Wurzelbarrieren	**Untersuchungen**			
		1992	Kopinga	Versuchspflanzung u. Straßenstandort	NL
		1994	Barker	Versuchspflanzung	
		1994	Barker u. Peper		USA
		1995	Peper u. Barker		
		1996	Gilman	Versuchspflanzung	
		1997	Costello, Ellemore u. Steinmaus	Versuchspflanzung	USA
		1999	Peper u. Mori	Versuchspflanzung	USA
		1999	OMEGAM	Versuchspflanzung u. Straßenstandort	USA NL
		Fachbeiträge			
		1994	Lesser u. Augsdorfer	Aufsatz Fachzeitschrift	USA
		1994	Urban	Aufsatz Fachzeitschrift	USA
sonstige	**Wurzeln von Straßenbäumen**	**Untersuchungen**			
		1989	Krieter et al.	Aufgrabungen	D
		1992, 1999 (unveröffentlicht)	Urban	Aufgrabungen	USA

Tabelle 5: Wissenschaftliche Untersuchungen und Fachbeiträge zur Thematik

Zu unterscheiden sind zwei Arten von Untersuchungen: Bei statistischen Erhebungen werden Bäume kartiert, aber nicht aufgegraben, um daraus Erkenntnisse zur Schadensverhütung abzuleiten. Bei Untersuchungen bei Versuchspflanzungen und am Straßenstandort unter definierten Bedingungen wird das Wurzelwachstum selber untersucht. Neben Wissenschaftlern, die systematische Untersuchungen durchgeführt haben, melden sich in der Fachpresse auch Autoren zu Wort, die sich mit dem Problem

in ihrer beruflichen Praxis außerhalb von Forschungseinrichtungen befassen oder selber keine Untersuchungen durchgeführt haben.

Die früheste recherchierte, systematische statistische Untersuchung fand 1980 in den USA durch WAGAR und BARKER in der San Francisco Bay statt (WAGAR u. BARKER 1983). Eine Gesamtzahl von 763 Bäumen in 10 Arten bzw. Gattungen wurde im Hinblick auf die Parameter Spezies, Baumgröße, Pflanzstreifenweite und Boden kartiert. Die Auswertung erfolgte mit statistischen Verfahren. Die Ergebnisse sind aus mehreren Gründen nur bedingt auf deutsche Verhältnisse übertragbar und somit für die Fragestellung eingeschränkt relevant:

- Die Untersuchung erfolgte an Bäumen, die gemäß der ortsüblichen Pflanzung in Pflanzstreifen zu einer Seite an einen Gehweg und zur gegenüber liegenden Seite an eine Straße grenzen, von der sie durch einen Bordstein getrennt sind. Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit hingegen sind Bäume in Verkehrsflächen, die im innerstädtischen Bereich üblicherweise in Baumscheiben gepflanzt werden.
- Die Bauweise für Gehwege weicht stark von den hier zu Lande üblichen ab: Es werden großflächige Betonplatten verwendet, die nach eigenen Beobachtungen häufig als Ortbeton gegossen werden. Darunter befindet sich der anstehende Boden, der, wie dem Bericht zu entnehmen ist, nicht immer verdichtet wird.
- Aussagen zu einzelnen Spezies sind durch die abweichenden Baumarten bis auf Platane (*Platanus x acerifolia*) nicht zu vergleichen. Hierbei muss ein erheblicher Klimaunterschied berücksichtigt werden
- Als Kriterium für das Schadensausmaß wurde die Höhe der Anhebungen gewählt. In Deutschland wird die Anhebungshöhe durch ständige Regulierungsarbeiten gering gehalten und hängt in erster Linie von den Reparaturintervallen ab. Die gewählte Skalierung enthält folglich bereits in der geringsten Schadensstufe Aufkantungshöhen, die in Deutschland kaum vorzufinden sind.
- Grundsätzlich muss auch hinterfragt werden, wie Aufkantungshöhen zu messen sind, da in der Regel auch die Umgebung angehoben ist und somit eine Bezugshöhe fehlt.
- Die Entnahme von Bodenproben in den oberen 7 cm des Pflanzstreifenbodens ist bei den in Deutschland üblichen Bauweisen nicht sinnvoll, um Aussagen über die Bodenverhältnisse unter Verkehrsflächen zu erlangen.

Aus dieser Untersuchung sind grundlegende Erkenntnisse und Größenordnungen für vergleichende Betrachtungen von Interesse, nicht jedoch quantifizierte Ergebnisse und Aussagen zu Details. Sie soll als typisches Beispiel für die Nichtübertragbarkeit statistischer Untersuchungen auf andere Rahmenbedingungen herausgestellt sein.

In Anlehnung an WAGAR und BARKER wurde 1986 in Großbritannien eine zweite statistische Untersuchung durchgeführt, die durch WONG, GOOD und DENNE veröffentlicht wurde (WONG, GOOD u. DENNE 1988). Im Stadtgebiet von Manchester wurden mit adaptierter und erweiterter Methode 2232 Bäume

kartiert. Die Ergebnisse hinsichtlich der Spezies können durch gleiche Arten bzw. Gattungen und ähnliches Klima auf deutsche Verhältnisse übertragen werden. Mit Asphalt- und Plattenbelägen sind die Bauweisen von der Art vergleichbar. Auch wurden Bäume in Verkehrsflächen, also mit Baumscheiben, untersucht. Die Klassifizierung der Schäden nach Anhebungshöhe ist jedoch aus den bereits erwähnten Gründen kaum übertragbar und methodisch mit Vorbehalt zu betrachten. Das gilt in gleicher Weise für die Einführung des Parameters „Abstand der höchsten Anhebung zum Stamm“.

Auf Grundlage einer Kartierung von 1507 Bäumen in Mexiko berechneten FRANCIS, PARRESOL und DE PATIÑO ein statistisches Modell für Belagschäden in Abhängigkeit von den Parametern Baumart, Stammdurchmesser und Abstand zum Gehweg bzw. zum Bordstein (FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1996). Aufgrund großer Unterschiede hinsichtlich Klima, Bauweisen und Baumarten ist dieses Modell wie die Untersuchung von WAGAR u. BARKER (1983) nicht vorbehaltlos auf deutsche Verhältnisse übertragbar.

In den Niederlanden führte KOPINGA ab 1980 umfangreiche Untersuchungen durch (KOPINGA 1992, 1994). Es handelte sich um Felderkundungen, Umfragen in Straßenbauverwaltungen, Aufgrabungen, Bodenanalysen und Langzeitversuche zur Schadensvermeidung. Untersuchungsgegenstand sind mit Bäumen gesäumte asphaltierte Rad- und Versorgungswege. Aus den Erkenntnissen wird ein Modell für die Wurzelentwicklung abgeleitet. Zur grundsätzlichen Problemerkundung werden die Schad- und Wurzelbilder unter den Belägen, die Baumarten und Cultivare, die Bauweise der Beläge, das Alter und die Entwicklung der Pflanzen, die Art der Pflanzung, der Pflanzabstand und der Abstand zur Straßenbefestigung, die Eigenschaften des Wuchsortes sowie die Geschwindigkeit der Wurzelentwicklung charakterisiert. Bodenuntersuchungen erfolgen hinsichtlich Eindringwiderstand, Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Sauerstoffgehalt. Der Einfluss von Asphalt als chemische Substanz wird experimentell untersucht. In mehrjährigen Versuchen werden Methoden zur Lenkung von Baumwurzeln und zur Vermeidung von Belagschäden erprobt. Hierzu gehören der Einbau von reinem Schotter als Tragschichtmaterial, der Einsatz von Wurzelherbiziden und der Einbau von Wurzel-„Schirmen“. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse dürfte mit Ausnahmen im Detail möglich sein. Die Straßenbauweise weicht hinsichtlich des Tragschichtmaterials (Sand) von der in Deutschland üblichen ab. Mit Wegebreiten von 2 bis 3,50 m werden zwar nicht Bäume in Verkehrsflächen betrachtet, für Fragen des generellen Wurzelwachstums unter Verkehrsflächen ist dies jedoch unerheblich. Die untersuchten Baumarten (in erster Linie Pappeln) werden in Deutschland im innerstädtischen Bereich nicht als Straßenbäume gepflanzt, so dass gattungsspezifische Aussagen für die vorliegende Fragestellung wenig aufschlussreich sind.

Systematische Aufgrabungen in kleinerem Umfang wurden durch die Forstwissenschaftler NICOLL und ARMSTRONG in Großbritannien durchgeführt (NICOLL u. ARMSTRONG 1998), um den Zusammenhang zwischen Schäden und Wurzelarchitektur zu studieren. Hierzu wurden die Wurzelsysteme von fünf 30jährigen Kirschen (*Prunus serrulata 'Kazan'*) in einem Gehweg mit Asphaltbelag frei gelegt. Alle freigelegten Wurzeln über 10 mm Durchmesser wurden genau vermessen und zeichnerisch dokumentiert. Wenn auch die Wegebauweise durch kleinere Baumscheiben und einen geringer dimensionier-

ten Schichtaufbau von der in Deutschland üblichen abweicht, so dürften generelle Erkenntnisse zum Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen dennoch übertragbar sein. Die untersuchte Baumart, das Klima sowie der grundsätzliche Wegeaufbau weisen keine gravierenden Unterschiede auf.

In einer Kombination von statistischer Auswertung und Aufgrabung untersuchten SYDNOR et al. in Cincinnati (Ohio, USA) den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Schäden an Bürgersteigen, deren Alter und Bauweise, der anstehenden Bodenart und der Nähe eines Baumes (SYDNOR et al. 2000). Sie gehen der Frage nach, inwiefern Bäume überhaupt ausschlaggebend für Schäden an Gehwegen sind und ob ein Zusammenhang zwischen Baugrund und Reparaturhäufigkeit besteht. Aufgrund der abweichenden Bauweise sind die Ergebnisse im Hinblick auf hiesige Verhältnisse nur bedingt aussagekräftig: Die untersuchten Gehwege bestehen aus großformatigen, dicken Betonplatten, die ohne Tragschicht direkt auf den anstehenden Boden gegossen werden. Daraus können bautechnische Probleme erwachsen, die bei den hier zu Lande üblichen Bauweisen nicht zu erwarten sind.

Weitere Fachbeiträge basieren auf Erfahrungen aus der Praxis. Da es sich im Wesentlichen um generelle Aussagen handelt, sind die Erkenntnisse zumeist auf deutsche Verhältnisse anwendbar. Aus Sicht des Bauingenieurs erörtert DAY die Anhebung von Tiefbauwerken anhand von drei Fallbeispielen freigelegter Wurzelpartien (DAY 1991). Hierbei stehen grundsätzliche konstruktive Gegebenheiten im Mittelpunkt.

Der amerikanische Landschaftsarchitekt und Fachmann für Stadtbäume URBAN veröffentlicht auf Grundlage eigener Beobachtungen und Erfahrungen sowie verschiedener wissenschaftlicher Untersuchungen eine Einschätzung von Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Eindämmung der Schäden (URBAN 1994). Darin geht er auch auf eigene Aufgrabungen an 30 jährigen Robinien und auf Strategien zur Vermeidung von Schäden ein.

Unterschiedliche wissenschaftliche Veröffentlichungen sind auch die Grundlage für Artikel von HAMILTON, der keine eigenen Untersuchungen vorstellt (HAMILTON 1984a und 1984b). Er geht auf das Wurzelwachstum als Ursache für Schäden an Wegebelägen ein und erörtert Maßnahmen zur Schadensreduzierung.

Zur Schadwirkung einzelner Baumarten veröffentlichen STOLK und HOFFMANN in den Niederlanden eine Auswertung verschiedener Quellen (STOLK u. HOFFMANN 2000). Die Liste ist grundsätzlich hinsichtlich der Baumarten und der Rahmenbedingungen auch für deutsche Verhältnisse aussagekräftig. Die Einschätzung der Baumarten ist unter dem Vorbehalt der in der Veröffentlichung nicht näher beschriebenen Bewertungsmethodik zu sehen.

Die unterschiedlichen Untersuchungen und Fachbeiträge tragen jeweils Teilaspekte zur Klärung der Ursache von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln bei und bieten davon ausgehend un-

terschiedliche Lösungswege. Sie fließen in die Diskussion der Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ein. Insgesamt konnten nur wenige fachlich fundierte Informationen zu der untersuchten Problematik recherchiert werden. Auch in jüngeren Veröffentlichungen wird Forschungsbedarf zu grundlegenden Fragestellungen konstatiert (z. B. NICOLL u. ARMSTRONG 1998).

2.4.2 Spezielle Wurzelbarrieren

Relativ wenigen Forschungsvorhaben, in denen die Ursachen von Belagsanhebungen untersucht werden, stehen zahlreiche Fachbeiträge über spezielle, industriell hergestellte Wurzelbarrieren gegenüber. Insbesondere in den USA werden diese Systeme seit längerem vermarktet und angewendet. Zwar werden spezielle Wurzelbarrieren seit einigen Jahren auch in Deutschland vertrieben, es sind jedoch noch keine Erfahrungsberichte darüber gefunden geworden. Wissenschaftliche Untersuchungen und Fachbeiträge von Berufspraktikern aus den USA und den Niederlanden setzen sich hingegen dezidiert mit der Thematik auseinander (s. Tabelle 5). Es entsteht der Eindruck, dass intensiver Forschung auf dem Gebiet spezieller Wurzelbarrieren nur wenige systematische Untersuchungen der Ursachen und Schadbilder von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln gegenüberstehen. Die Forschungsergebnisse werden in Kapitel 7 „Ansätze zur Schadensvermeidung“ erörtert.

2.4.3 Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen

Neben Untersuchungen über die Entstehung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln sind auch allgemeine Erkenntnisse über das Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen von Interesse, wie bereits in Abschnitt 2.3 dargestellt wurde. Obwohl in Fachbeiträgen und Büchern häufig Bilder und Anmerkungen zu freigelegten Wurzelpartien von Straßenbäumen veröffentlicht werden, sind kaum gezielte Untersuchungen des Wurzelwachstums unter Verkehrsflächen außerhalb der Pflanzgrube bekannt. Ein Grund dafür mag der hohe Aufwand für Aufgrabungen sein. In die Auswertung einbezogen wurden die Arbeiten von KRIETER et al. (1989, 1996) in Deutschland und von URBAN (1992, 1999) in den USA. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.3 eingeflossen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Problematik von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln hier zu Lande kaum untersucht wird, während im Ausland mehrere Forschungsprojekte zu verschiedenen Aspekten der Thematik durchgeführt wurden. Aus diesen lassen sich jedoch nur bedingt Erkenntnisse für die hiesigen Verhältnisse ableiten, so dass auf diesem Gebiet Forschungsbedarf besteht.

2.5 Bedeutung der Problematik für Städte und Gemeinden

Der Gegenstand dieser Arbeit betrifft vor allem Städte und Gemeinden als die Eigentümer von Verkehrsflächen und Straßenbäumen. Im folgenden Abschnitt soll die Bedeutung der Problematik hinsichtlich rechtlicher Aspekte und der Praxis der Schadensbehebung unter Berücksichtigung der Kosten erörtert werden.

2.5.1 Rechtliche Aspekte

Die rechtlichen Aspekte der untersuchten Schadensproblematik betreffen vor allem die Kommunen, so dass sich der folgende Abschnitt auf die kommunale Haftung bezieht. An dieser Stelle soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass unter Umständen auch Planungsbüros für durch Baumwurzeln verursachte Schäden haftbar gemacht werden können, so sie auf einen Planungsfehler zurückzuführen sind (ARMBRUSTER 2001). Dieses Fallbeispiel wirft die Frage auf, inwieweit Planer generell für Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln haftbar gemacht werden können. Die Frage soll hier nicht weiter vertieft werden, da die Schadensproblematik in erster Linie die Kommunen betrifft.

Die Kommunen sind für öffentliche Verkehrsflächen einschließlich der darin wachsenden Straßenbäume verantwortlich. Daraus erwächst die Haftpflicht für Schäden und Unfälle, die durch Unebenheiten in Verkehrsflächen verursacht werden. An dieser Stelle stehen öffentliche Gehwege im Mittelpunkt der Betrachtung. Fußgänger können schon durch geringe Anhebungen in Wegedecken zu Fall gebracht und geschädigt werden. Dies gilt außer für Gehwege im engeren Sinn auch für Park- und Veranstaltungsplätze, die für die regelmäßige Nutzung durch Fußgänger bestimmt sind. Wenn auch nicht explizit untersucht, so dürften für Radwege ähnliche Maßstäbe gelten, da eine gelegentliche Nutzung durch Fußgänger wahrscheinlich ist. Für tiefer gehende juristische Fragen sei auf die Literaturangaben verwiesen.

Rechtsgrundlage

Die Haftpflicht der Kommunen für Schäden und Unfälle durch Unebenheiten in Verkehrsflächen ist in der so genannten Verkehrssicherungspflicht begründet. Sie leitet sich aus § 823 BGB „Schadensersatzpflicht“ her:

> 1. *Wer vorsätzlich oder fahrlässig das Leben, den Körper,*
> *die Gesundheit, die Freiheit, das Eigentum oder ein sonstiges Recht*
> *eines anderen widerrechtlich verletzt, ist dem anderen zum Ersatze*
> *des daraus entstehenden Schadens verpflichtet.*
>
> § 823 (1) BGB

Das bedeutet, dass „wegen Verletzung der ihm obliegenden Verkehrssicherungspflicht haftet, wer einen Dritten dadurch schuldhaft schädigt, dass er Gefahrenquellen geschaffen hat oder sonst für sie verantwortlich ist, ohne notwendige Schutzvorkehrungen gegen die daraus drohenden Risiken getroffen zu haben (...)“ (ROTERMUND 1999, 17).

Die Straßenverkehrssicherungspflicht ist ein Teilaspekt der allgemeinen Verkehrssicherungspflicht. Die hier betrachteten Verkehrsflächen wie Geh- und Radwege, öffentliche Plätze, Fußgängerzonen und Parkplätze fallen rechtlich unter die Länderstraßengesetze. Exemplarisch wird im Folgenden auf das Niedersächsische Straßengesetz (NStrG) Bezug genommen. Zu den öffentlichen Straßen gehören nach § 2 (1) NStrG auch öffentliche Wege und Plätze. Geh- und Radwege werden dem „Straßenkörper“ zugerechnet (§ 1 (2) 1 NStrG) bzw. gehören zur Straße, wenn sie mit dieser in Zusammen-

hang stehen (§ 3 (2) NStrG). Bäume zählen als „Bewuchs“ zum „Zubehör“ der Straße. Je nach Verkehrsbedeutung werden die Straßen in Landes-, Kreis-, Gemeinde- und sonstige öffentliche Straßen eingeteilt, zu denen auch Geh- und Radwege mit eigenem Baukörper gehören (§ 3 NStrG). Mit der Widmung der Straßen nach dieser Einteilung ist die Frage der Straßenbaulast, also die Verantwortlichkeit für Bau und Unterhaltung der Straßen, verknüpft (§ 9 NStrG). Hierzu regelt § 10 NStrG „Hoheitsverwaltung, bautechnische Sicherheit“:

> *(1) Der Bau und die Unterhaltung der öffentlichen Straßen einschließlich der Bundesfernstraßen sowie die Überwachung der Verkehrssicherheit obliegen den Organen und Bediensteten der damit befassten Körperschaften als Amtspflichten in Ausübung öffentlicher Gewalt.*
> *(2) Die Träger der Straßenbaulast haben dafür einzustehen, dass ihre Bauten technisch allen Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen.*
> § 10 NStrG

Bezüglich der untersuchten Thematik ist hiermit zugleich festgelegt, dass die Haftung bei Verletzung der Verkehrssicherungspflicht nach den Grundsätzen der Amtshaftpflicht (§ 839 BGB und Art. 34 GG) und nicht nach Privatrecht zu beurteilen ist (vgl. ROTERMUND 1999, 17, 27; WENDRICH 1994, 51). Das bedeutet, dass nur die verantwortliche Körperschaft und nicht der verantwortliche Amtsträger bzw. Angestellte als Privatperson haftbar gemacht werden kann. Die verantwortlichen Körperschaften, also die Träger der Verkehrssicherungspflicht „sind diejenigen Körperschaften, die den Verkehr auf der Straße eröffnet haben oder andauern lassen und imstande sind, dieser Gefahr zu begegnen, also für die Verwaltung zuständig sind“ (WENDRICH 1999, 52). Baulastträger und Verwaltung sind zumeist in derselben Körperschaft vereint, andernfalls ist der Träger der Verwaltung in der Pflicht.

Die in dieser Arbeit untersuchten Verkehrsflächen gehören schwerpunktmäßig zu den Gemeindestraßen. Die weiteren Ausführungen beziehen sich daher auf diesen Straßentypus. Es sei angemerkt, dass die Gemeinden je nach Größe außer für die Gemeindestraßen häufig auch für übergeordnete Straßen verkehrssicherungspflichtig sind (vgl. ROTERMUND 1999, 28; WENDRICH 1994, 52).

Umfang der Straßenverkehrssicherungspflicht

Die gängige Rechtsprechung erkennt die Grenzen der Verkehrssicherungspflicht der Gemeinden trotz insgesamt hoher Anforderungen an. Unter dem Vorbehalt der Zumutbarkeit muss der Verkehrssicherungspflichtige lediglich einen „hinreichend sicheren“, nicht jedoch völlig gefahrlosen Zustand der Verkehrsflächen herbeiführen: „Der Verkehrssicherungspflichtige muss in geeigneter und objektiv zumutbarer Weise alle, aber auch nur diejenigen Gefahren ausräumen und erforderlichenfalls vor ihnen warnen, die für den Benutzer, der seinerseits die erforderliche Sorgfalt walten lässt, nicht oder nicht rechtzeitig erkennbar sind bzw. auf die er sich nicht rechtzeitig einzurichten vermag“ (OLG Saarland Urteil v. 21.07.1998, Az. 4 U 886/97-235). Die Verkehrssicherungspflicht entbindet den Verkehrsteilnehmer nicht von seiner eigenen Verantwortlichkeit: „Vielmehr muss sich der Verkehrsteilnehmer grundsätzlich den gegebenen Straßenverhältnissen anpassen, die Straßen und Plätze so hinnehmen,

wie sie sich erkennbar darbieten, und sich den gegebenen Verhältnissen mit der notwendigen Sorgfalt anpassen“ (ebd., mit weiteren Nennungen; vgl. ROTERMUND 1999, 29). Für Gehwege bedeutet dies, dass Unebenheiten nicht automatisch eine Verletzung der Verkehrssicherungspflicht darstellen (OLG Düsseldorf, Urteil v. 23.12.1996, Az. 18 U 139/96). Bei den Anforderungen an Gehwege wird außerdem berücksichtigt, ob der Fußgänger möglicherweise z. B. durch Schaufenster abgelenkt werden kann. Hier sind an die Ebenheit von Wegedecken höhere Anforderungen zu stellen, ebenso bei Fußgängerflächen, die überdurchschnittlich häufig von alten oder hilfsbedürftigen Menschen genutzt werden. Generell gilt: An Orten, wo mit einer Ablenkung der Verkehrsteilnehmer gerechnet werden muss, dürfen Niveauunterschiede in Form von Kanten oder Vertiefungen, durch die Fußgänger zu Fall gebracht werden könnten, maximal 2 cm betragen (ROTERMUND 1999, 42-43). Im Einzelfall wird jedoch nach den jeweiligen Konstellationen geurteilt, so dass auch höhere Aufkantungen nicht automatisch zur Schadensersatzpflicht führen und umgekehrt diese bei flacheren bestehen kann. Entscheidend ist, ob sich der aufmerksame Verkehrsteilnehmer rechtzeitig auf eine Gefahrenstelle einstellen kann. Dies sei durch ein beispielhaftes Gerichtsurteil verdeutlicht: Eine Frau stolpert über die 4 cm hohe Kante einer Betonplatte. Sie kann nicht nachweisen, dass dies für sie eine überraschende oder nicht ohne weiteres erkennbare Gefahrenlage darstellt. Die Klage wird abgewiesen (OLG Saarland, Urteil v. 21.07.1998 – Az. 4 U 886/97 235).

Verkehrssicherungspflicht bei Unebenheiten durch Baumwurzeln in Gehwegen

Unebenheiten durch Baumwurzeln in Gehwegen werden prinzipiell genauso behandelt wie Unebenheiten in Gehwegen allgemein. Auch hier wird das maximal tolerierbare Höchstmaß von 2 cm für Anhebungen zugrunde gelegt (KUNZE mündl. 2001). Die Rechtsprechung geht allerdings davon aus, dass im Bereich von Straßenbäumen mit Unebenheiten in Verkehrsflächen zu rechnen ist und dies den Verkehrsteilnehmern in der Regel bekannt sein dürfte. Ein richtungsweisendes Urteil hierzu fällte das OLG Düsseldorf (Urteil v. 23.12.1996 – 18 U 139/96): Ein Passant stolpert über eine Erhebung im Plattenbelag im Bereich von Straßenbäumen. Die Klage wird abgewiesen, da er „bei der gebotenen Sorgfalt die Erhebung im Plattenbelag rechtzeitig“ hätte „erkennen können, zumal derartige Bodenerhebungen im Bereich von Straßenbäumen nicht selten sind und daher allen Passanten hinlänglich bekannt sein dürften.“

Regresskosten

Eine Klage ist nur erfolgreich, wenn der Kläger die nötige Sorgfalt hat walten lassen und dem Beklagten ein schuldhaftes Verhalten nachgewiesen werden kann. Viele Unfälle dürften daher mangels Aussicht auf Erfolg nicht vor Gericht verhandelt werden. Kläger sind zum einen die Krankenkassen, welche die Behandlungskosten einklagen, und andererseits die verunfallten Personen, die auf Schmerzensgeld oder auf Ersatz von materiellen Schäden z. B. an der Bekleidung klagen. Das Ausmaß, in dem Prozesse aufgrund von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln angestrengt werden oder zumindest Beschwerden durch gestürzte Personen eingehen, sowie der Umfang der Regresskosten sind kaum zu beziffern, da sie statistisch nicht differenziert erfasst werden. Die folgenden Angaben sollen exemplarisch einen Eindruck von der Größenordnung vermitteln: In Hannover werden jährlich ein bis zwei Prozesse erfolgreich gegen die Stadt geführt. Je nach Verletzung fallen Kosten

zwischen 500,- und 5000,- Euro an (KUNZE mündl. 2001). In der Stadt Wunstorf wurden in den vergangenen 3 Jahren ca. 5 Unfälle von Fußgängern vor Gericht verhandelt, die mittelbar oder unmittelbar durch Baumwurzeln verursacht worden waren. Zwei davon waren erfolgreich, wobei hier weitere Faktoren wie eine unzureichende Beleuchtung dazu führten, dass die Geschädigten die Gefahrenstelle nicht oder nicht rechtzeitig wahrnehmen konnten. Die Regresskosten schwanken je nach Verletzung in großen Bandbreiten: Zumeist handelt es sich um Beträge in drei bis vierstelliger Höhe (bis max. 5000,- Euro). Es ist jedoch auch ein Fall bekannt, in dem die Schwere der Verletzung Schadensersatz in Höhe von rund 50000,- Euro erforderte (BEGEROW mündl. 2001). Die Beispiele zeigen, dass generelle Aussagen zum Umfang von Schadensfällen durch Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln kaum möglich sind. Klagen wegen Verletzung der Verkehrssicherungspflicht im Falle von Unebenheiten im Gehwegebereich halten sich insgesamt in Grenzen. Dies dürfte jedoch darauf zurückzuführen sein, dass sich die Wegebeläge unter Bäumen durch ständige Mängelbehebung insgesamt in einem sehr guten Zustand befinden. Der wirtschaftliche Schaden besteht also in der Notwendigkeit der Reparaturarbeiten, um Unfälle und die daraus erwachsenden Schadensersatzforderungen im Voraus abzuwenden.

2.5.2 Schadensbehebung

Der Zustand der Verkehrsflächen wird durch regelmäßige „Begehungen“ durch die straßenverkehrssicherungspflichtigen Körperschaften bzw. deren Bedienstete überprüft. Art und Häufigkeit der Kontrollen werden in Dienstanweisungen und Kontrollplänen verankert. Die Kontrollen müssen nicht zu Fuß, sondern können auch von einem langsam fahrenden Auto aus durchgeführt werden. Die Kontrollhäufigkeit richtet sich nach der Verkehrsbedeutung der Straßen und reicht von einmal wöchentlich bis vierteljährlich. Mängel und Maßnahmen zu deren Behebung werden in Kontrollbüchern der Straßenbauabteilungen und Bauämter dokumentiert. Sie dienen vor Gericht als Beweismittel und sind bis zu 5 Jahre nach der letzten Eintragung aufzubewahren (vgl. ROTERMUND 1999, 30, 99ff.; KUNZE mündl. 2001).

Die Gemeinden legen für die verschiedenen Bereiche ihrer Zuständigkeit Standards fest, so auch für die Behebung von Unebenheiten in Wegebelägen. Für Gehwege sehen die Kommunen in der Regel den bereits erwähnten Höchstwert von 2 cm für Niveauunterschiede vor. Allerdings ist neben der örtlichen Lage – z. B. in einer belebten Fußgängerzone oder in einer gering frequentierten Seitenstraße – auch die Ausprägung der Anhebung entscheidend. Eine 2 cm hohe Kante in einem Plattenbelag kann eine zu behebende Stolperfalle darstellen, während eine 4 cm hohe, flach anlaufende Aufwölbung in einer asphaltierten Fläche möglicherweise tolerierbar ist.

Allgemein ist anerkannt, dass Wegeflächen unter Bäumen häufig Unebenheiten aufweisen und diese mit zumutbarem Aufwand durch die Gemeinden kaum gänzlich behoben werden können. Das Herbeiführen eines ebenen Zustandes des Gehwegs kann insbesondere bei älteren Bäumen auch gravierende Schäden verursachen, was wiederum ökologischen Zielen und den Baumschutzsatzungen der Gemeinden zuwiderläuft. Die Gemeinde hat grundsätzlich die Pflicht, vor nicht vermeidbaren Gefahrenstellen zu warnen, weshalb in diesen Fällen bisweilen Warnschilder aufgestellt werden. Dies ent-

bindet die Gemeinden zwar nicht generell von ihrer Haftpflicht, hat aber im Schadensfall zumindest ein Mitverschulden des Geschädigten zur Folge.

Für die Behebung der durch Baumwurzeln verursachten Gefahrenstellen werden im Wesentlichen folgende technische Lösungen angewendet:

- **Baumscheibenvergrößerung**
- **Entfernen oberflächennaher Wurzeln**
  Wiederherstellung des Belags im ursprünglichen Niveau
- **Erhalten oberflächennaher Wurzeln**
  Einbau desselben Belags in höherem Niveau
  oder
  Einbau eines anderen Belags (Asphalt, wassergebundene Wegedecke),
  zumeist in höherem Niveau
- **Erhalten tieferer Wurzeln**
  Entfernung von Tragschichtmaterial,
  Einbau des Belags in ursprünglichem oder in höherem Niveau
  oder
  Einbau eines anderen Belags (Asphalt, wassergebundene Wegedecke)
  in ursprünglichem oder in höherem Niveau

In Extremfällen können Bäume entfernt werden, aber dies ist keine Regellösung. Die Wiederherstellung von Belägen ist bautechnisch schwierig und löst das Problem in der Regel nur für kurze Zeit. Erneute Anhebungen sind unter Umständen bereits im Folgejahr zu beobachten. Allerdings kann in seltenen Fällen wie bei alten Bäumen auch über einen längeren Zeitraum keine neue Maßnahme erforderlich werden. Die Zuständigkeit und die Durchführung der Maßnahmen werden in den Städten und Gemeinden unterschiedlich gehandhabt. Grundsätzlich sind die Straßen- oder Tiefbauämter für die Behebung von Gefahrenstellen in Verkehrsflächen zuständig. Da hier jedoch auch Bäume betroffen sind, werden die Grünflächenämter in unterschiedlichem Maß hinzugezogen. Bei geringen Anhebungen entscheiden oftmals die ausführenden Bautrupps vor Ort über die Art der Maßnahme und entfernen kleinere Wurzeln selbständig. Bei größeren Schäden bzw. größeren Wurzeln werden Mitarbeiter der Grünflächenämter hinzugezogen und treffen Entscheidungen über Baumscheibenerweiterungen oder Wurzelentfernungen. In manchen Städten und Gemeinden dürfen Wurzeln nur in Absprache mit dem Grünflächenamt entfernt werden. Für Baumscheibenerweiterungen sind in der Regel die Grünflächenämter zuständig, für andere Belagsregulierungen die Tiefbauämter. Daraus wird deutlich, dass die Problematik häufig eine Absprache zwischen den verschiedenen Fachämtern erfordert (mündliche Auskunft BEYER, MAAG, MEINDL, RICKERS, SCHROER 2001; KOOLWAY, LAMBERT 2002).

2.5.3 Reparaturhäufigkeit und Kosten

Die Statistiken der Ämter weisen Arbeiten zur Beseitigung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln in der Regel nicht gesondert aus. Häufig werden die Arbeiten als Sammelaufträge für Regulierungen aller Art geführt bzw. vergeben. Es konnten weder Informationen über den Zeitpunkt nach der Pflanzung, an dem zum ersten Mal mit einem Schaden zu rechnen ist, noch über die Reparaturintervalle eingeholt werden. Es gibt Hinweise, dass diese Werte von der Baumart und der Baumscheibengröße abhängen (BEYER u. RICKERS mündl. 2001). Die folgenden Angaben sollen beispielhaft einen Eindruck des Kostenrahmens vermitteln.

Die Stadt Köln führte 1995 eine Schätzung der Kosten zur Behebung von Schäden an Verkehrflächen durch Baumwurzeln für einen der neun ca. 100000 Einwohner zählenden Stadtbezirke durch. Dabei wurden nicht nur akute Gefahrenstellen erfasst, sondern auch Kleinstschäden, die später zu Gefahrenstellen werden und dann behoben werden müssen. Der Schätzwert beträgt 12,5 Mio DM (6,4 Mio Euro; RICKERS mündl. 2001). Bei einer Teuerungsrate von 2,5 % pro Jahr entspricht dies in 2001 rund 7,7 Mio Euro. Hochgerechnet auf das gesamte Stadtgebiet von Köln ergäben sich rund 69 Mio Euro. Zum Vergleich: Jährlich müsste die Stadt Köln rund 110 Mio DM (56 Mio Euro) aufbringen, um alle akuten Unfallgefahrenstellen in Verkehrsflächen – auch solche, die nicht auf Baumwurzeln zurückzuführen sind – zu beseitigen (RICKERS mündl. 2001).

Ein Grund für die hohen Kosten ist im relativ hohen zeitlichen Aufwand für Reparaturarbeiten im Vergleich zu Neubaumaßnahmen zu suchen. Wird der Anhaltswert für den Neubau einer Verkehrsfläche mit ca. 75 Euro pro m² veranschlagt, so sind für Ausbesserungsarbeiten rund 125 Euro anzusetzen (RICKERS mündl. 2001). Bei 2 m² auszubessernder Fläche ergäbe dies rund 250 Euro pro Maßnahme bzw. Baum. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Schätzungen auf Grundlage des Arbeitsaufwandes: Bei einer Arbeitsdauer von 4 Stunden mit zwei Arbeitskräften ergibt sich bei einem Stundensatz von 25 Euro und einer geringen Kostenpauschale für Material von 5 Euro ein Kostenaufwand von 205 Euro pro Maßnahme bzw. Baum (BEYER mündl. 2001).

Auch wenn die Zahlen nur als Anhaltswerte zu verstehen sind, so zeigt sich doch, dass die Kosten für die Behebung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln die öffentliche Hand nicht unerheblich belasten.

3. Erfassung von Baumstandorten in Verkehrsflächen

Die systematische Erfassung einer hinreichenden Anzahl von Straßenbäumen soll Daten liefern, die Aussagen über Dimension, Schadensmuster, Ursachen und Wirkungszusammenhänge von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln erlauben. Nicht durch Inaugenscheinnahme zu klärende Fragen werden durch die partielle Freilegung des Wurzelbereiches anhand von Fallbeispielen untersucht (siehe Kapitel 4).

3.1 Zielsetzung

Die Erfassung von Baumstandorten in Verkehrsflächen dient folgenden Zielen (siehe Kapitel 1):

(1) Feststellung der Dimension der Problematik

Die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln soll erfasst werden, um die Größenordnung der Problematik und das Schadpotenzial beziffern zu können. Deshalb wird in dieser Arbeit jede auf Baumwurzeln zurückzuführende Veränderung an Verkehrsflächen als Schaden bezeichnet. Auch zunächst geringfügige Veränderungen können im Laufe der Zeit die Funktionalität, die Verkehrssicherheit und die Gestaltung von Wegebelägen erheblich beeinträchtigen, so dass eine Regulierung erforderlich ist.

(2) Ursachen, Entstehung und Wirkungszusammenhänge klären

Häufigkeit und Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln sollen in Abhängigkeit potenzieller Einflussfaktoren erfasst werden, um daraus Ursachen und Entstehung ableiten zu können

a) Der <u>Einfluss des Baumes</u> wird über die Baumgattung und den Stammdurchmesser hergeleitet.

b) Die <u>Einflussfaktoren aus der Bauweise</u> von Baumstandorten werden über die Baumscheibengröße, die Art der Baumscheibe, die Art der Randeinfassung und die Art der Wegedecke hergeleitet.

(3) Typisierung von Schadbildern

Das Schadbild soll hinsichtlich Lokalisierung, Form und Stärke der Schäden erfasst werden. Zusammenhänge zwischen Schadensformen sollen untersucht werden. Sollten sich typische Muster ergeben, so könnten sich daraus Hinweise auf Ursachen und Entstehungsweisen und somit auf mögliche Gegenmaßnahmen ableiten lassen.

3.2 Methodik

Für die Erfassung wird eine Kartiermethode entwickelt, mit der sich Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln erfassen lassen. Die Daten werden quantitativ ausgewertet.

3.2.1 Kartiermethode

Die Kartierung erfolgt durch Inaugenscheinnahme, das heißt, es werden nur solche Informationen erfasst, die durch den Betrachter ohne Eingriff in das Baumumfeld festzustellen sind. Die Datenerhebung erfolgt flächendeckend für innenstadtnahe Bereiche von Hannover, da hier aufgrund des hohen Versiegelungsgrades eine große Dichte an Bäumen in Verkehrsflächen zu erwarten ist. Als praktikable Kartiereinheiten werden die Stadtteile herangezogen. Für die Untersuchung wird ein Kartierbogen entwickelt, der zunächst an 50 Bäumen erprobt und optimiert wird. Auf die ursprünglich geplante Einbeziehung von Daten des örtlichen Baumkatasters musste verzichtet werden, da seitens des zuständigen Grünflächenamtes eine Bearbeitung des Themas nicht sinnvoll erschien. Die Erhebung ist jedoch auch ohne diese Daten aussagekräftig.

Es sollen nur Bäume innerhalb von Verkehrsflächen kartiert werden. Die untersuchten Schäden treten auch an einseitig befestigten Baumstandorten wie beispielsweise bei Radwegen in der freien Landschaft auf. Um jedoch die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten und ausschließlich Bäume in Verkehrsflächen zu betrachten, werden für diese Untersuchung lediglich allseitig befestigte Baumstandorte berücksichtigt. Als Aufnahmekriterium wird eine maximale Baumscheibengröße von 9 m² festgelegt. Diese gängige und gut messbare Größe entspricht überdies dem Stand der Technik (siehe Abschnitt 2.3).

Aufgrund der hohen Quote von Baumstandorten, welche die untersuchten Schäden aufweisen und dem daraus resultierenden hohen Zeitaufwand für die Kartierung werden zwei Kartierungsabschnitte mit variierten Kartierbögen vorgenommen: Der erste Durchgang umfasst ca. 750 Bäume. Nach einer Zwischenauswertung wird festgestellt, ob eine für die Typisierung von Schäden ausreichende Anzahl an Beispielen gegeben ist.

Kartierbogen 1. Kartierabschnitt

Der doppelseitige Kartierbogen beinhaltet einen Kopfteil für das Verzeichnen von Rahmendaten, einen Ankreuzteil mit den festgelegten Untersuchungsparametern, Leerzeilen für Bemerkungen sowie Platz für ein Photo und eine Skizze, die bei Standorten mit Schäden an der Verkehrsfläche durch Baumwurzeln angefertigt werden (Beispiel für Kartierbogen im Anhang). Ein vorgezeichnetes Raster sowie die Festlegung von Zeichen, Farben und Kürzeln erleichtern und präzisieren das Skizzieren.

Auf dem Kartierbogen werden allgemeine Daten erhoben wie Ort und Lage im Stadtgebiet. Hier werden auch die Einflussfaktoren Baumgattung und Stammumfang in 130 cm Höhe (siehe unten) vermerkt. Für die Verortung des Baumes im Stadtgebiet werden die Bäume pro Stadtteil durchlaufend nummeriert und in Kombination mit einem Buchstabenkürzel notiert. Jeder Baum wird in einer Kartengrundlage im Maßstab 1 : 5000 eingezeichnet. Als potenzielle Einflussfaktoren werden die Merkmale Gattung, Stammdurchmesser, Baumscheibengröße, Baumscheibenart, Wegedeckenart und Randeinfassungsart erfasst. Für die untersuchten Merkmale werden Klassen gebildet. Als Schadbilder werden der Zustand der Baumscheibe, der Zustand der Wegedecke, der Zustand der Randeinfassung und die Lokalisierung der Schäden erhoben. Auch sie sind klassifiziert. Skizze und Photo dienen der Feststel-

lung typischer Schadbilder. Es werden die Baumgattungen bestimmt, nicht jedoch Arten und Sorten. Aufgrund der begrenzten Anzahl zu kartierender Bäume sind bei weiterer Aufschlüsselung des Merkmals nach Sorten voraussichtlich keine fundierten Aussagen möglich, da die daraus resultierende Anzahl zu gering ist. Eine weitergehende Differenzierung ist erst nach Feststellung eines gattungsspezifischen Einflusses und im Rahmen einer neuen Untersuchung sinnvoll.

Als Indikator für Baumalter und Wachstumsstärke dient der Stammdurchmesser, der im Gegensatz zum Stammumfang eine visuell gut vorstellbare Größe ist. Er wird aus dem vor Ort exakt messbaren Stammumfang errechnet, wobei von einem kreisförmigen Stammquerschnitt ausgegangen wird. Der Stammumfang wird in 130 cm Höhe ab Stammfuß gemessen, wobei zum vollen Zentimeter ab- oder aufgerundet wird. Die sonst übliche Messhöhe von 100 cm ist international und in der Forstwirtschaft nicht verbreitet (vgl. WONG, GOOD u. DENNE 1988; HÖSTER 1992, 184). Die Klassifizierung erfolgt nach einer für diese Arbeit festgelegten Einteilung in Stammdurchmesserklassen:

bis 10 cm
11 bis 20 cm
21 bis 35 cm
36 bis 50 cm
ab 51 cm

Die Mehrzahl der Merkmale wird im Ankreuzteil erfasst. Es sind dies:

Baumscheibengröße

bis zu 1 m² = kleine Baumscheibe
über 1 bis 4 m² = mittlere Baumscheibe
über 4 bis 9 m² = große Baumscheibe

Baumscheibe – Art, überwiegend

Hier wird die Beschaffenheit der Baumscheibe angegeben. Da Mischformen möglich sein können, wie bei Steinen nur im Randbereich, wird die flächenmäßig überwiegende Klasse eingetragen.

offen = blanker Boden oder Schüttstoffe wie Lava, Schlacke, Schotter, Rindenmulch
Rost = Abdeckung aus Stahl; Gitter oder Rost
Steine = Abdeckung aus natürlichen oder künstlichen Steinen, Pflaster (z. B. Natursteingroßpflaster) oder Abdeckelementen (z. B. Baumscheibenelemente aus Beton, Rasengittersteine)
bepflanzt = Bodendecker und andere absichtlich eingebrachte Vegetation

Baumscheibe – Zustand

Es wird der Zustand der Baumscheibe im Hinblick auf Veränderungen durch Baumwurzeln erhoben. Hierdurch können Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Baumscheibe und dem des Umfeldes untersucht werden. Es wird der Begriff „Veränderung“ anstelle von „Schaden“ verwendet, da es sich hier nicht immer um Schäden im Sinne von jetzt oder zukünftig zu behebenden Gefahrenstellen oder

Funktionsbeeinträchtigungen handelt. Unerwünschte Erscheinungen wie starker Wildkrautaufwuchs, Hundekot oder Unrat werden nicht erfasst.

keine Auffälligkeiten

Abdeckung verändert = Roste oder Steine durch Wurzeln in ihrer Lage verändert, zum Beispiel angehoben oder zur Seite geschoben
Ausschluss: Absenkung der Elemente durch andere Einflüsse wie beispielsweise mangelnde Fundamentierung oder Befahren werden nicht berücksichtigt.

Wurzeln sichtbar = bei offener Baumscheibe sind Baumwurzeln an der Oberfläche sichtbar.

Wegedecke – Art, überwiegend

Hier wird die Art des die Baumscheibe umgebenden Wegebelags angegeben. Bei Mischformen wird die flächenmäßig überwiegende Belagsart notiert.

Asphalt = asphaltierte Fläche

Platten = Gehwegplatten unterschiedlicher Abmessungen

Pflaster = Pflaster wie Naturstein-, Beton-, Klinkerpflaster

[Beton = betonierte Fläche; wurde mangels Treffer nicht mehr erhoben]

Wegedecke – Zustand

Erfasst werden die Schäden der Wegedecke, die nach Einschätzung des Kartierenden durch Baumwurzeln entstanden sind. So kann durch Inaugenscheinnahme untersucht werden, welchen Einfluss die Deckschicht einer Verkehrsfläche ausübt. Veränderungen, die auf Einflüsse wie Bauungenauigkeiten, Punktlasten oder Befahren zurückzuführen sind, müssen durch den Kartierenden erkannt und ausgeschlossen werden. Jede erkennbare Veränderung ist eine potenzielle Schadstelle und wird als „Schaden“ erfasst (siehe Abschnitt 3.1). Die Klassifizierung erfolgt nach der Anzahl der Wurzelstränge, die unter der Wegedecke zu vermuten ist. Auf diese Weise wird das Ausmaß des Schadens erfasst. Auf die Messung der Höhe der Unebenheiten muss verzichtet werden, da sie wegen mangelnder Bezugshöhe in der Praxis nicht durchführbar ist. Ferner ist es für die Untersuchung nicht ausschlaggebend, wie hoch die Unebenheiten sind, sondern ob überhaupt Schäden am Wegebelag zu erkennen sind. Es ist davon auszugehen, dass Wurzeln unter Wegebelägen je nach Wuchstiefe durch ihr Dickenwachstum früher oder später zu Anhebungen führen. Die relevante Wuchstiefe soll anhand der Fallbeispiele (Kapitel 4) untersucht werden.

kein Wurzelstrang erkennbar = kein Schaden

ein Wurzelstrang erkennbar = geringer Schaden

2 bis 5 Wurzelstränge erkennbar = mittelstarker Schaden

über 5 Wurzelstränge erkennbar = starker Schaden(fast vollflächig)

Randeinfassung – Art

Als Randeinfassung werden sichtbare bauliche Elemente zwischen Baumscheibe bzw. Pflanzgrube und angrenzender Verkehrsfläche betrachtet. Es soll festgestellt werden, wie stark diese durch

Baumwurzeln geschädigt werden. Im Zusammenhang mit den auftretenden Schäden an Wegedecken kann daraus abgeleitet werden, ob sie eine Barrierewirkung haben und ob es diesbezüglich Unterschiede zwischen verschiedenen Arten von Randeinfassungen gibt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Wurzel vor Erschließung der übrigen Verkehrsfläche zunächst eine mögliche Barriere durch Randeinfassungen überwinden muss. Es kommt daher weniger auf das Material als auf die Bauhöhe an. Es wird unterschieden in:

keine Randeinfassung

eben	= niveaugleiche, ebenerdige Randsteine, Kantensteine, Bordsteine, Stahleinfassungen, Pflasterbänder
erhöht	= wie vor, jedoch erhöht; Hochborde, bis ca. 20 cm über angrenzendem Niveau
Mauer, Trog	= höher als ca. 20 cm über Niveau, zum Beispiel Sitzmauern, Fertigelemente, gestapelte Holzschwellen

Randeinfassung – Zustand

Der Zustand der Randeinfassung wird analog zu dem der Wegedecken erfasst.

kein Wurzelstrang erkennbar	= kein Schaden
ein Wurzelstrang erkennbar	= geringer Schaden
2 bis 5 Wurzelstränge erkennbar	= mittelstarker Schaden
über 5 Wurzelstränge erkennbar	= starker Schaden (fast vollflächig)

Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen

Schäden an Wegedecken und an Randeinfassungen werden hinsichtlich der Lokalisierung zusammengefasst. Es wird Aufschluss erwartet darüber, ob es Stellen gibt, die bevorzugt durchwurzelt werden und somit potenzielle Schwachstellen darstellen, wie beispielsweise die Baumscheibenecken. Da die Lokalisierung für die gesamte Verkehrsfläche betrachtet wird, müssen Randeinfassung und Wegedecke nicht differenziert erfasst werden.

keine	= bei Standorten ohne Schäden anzukreuzen
über Seite	= ausschließlich über die Seiten der meist viereckigen Baumscheiben; auch bei runden Baumscheiben anzukreuzen
über Ecke	= ausschließlich über die Ecken der meist viereckigen Baumscheiben
Wurzelanlauf	= Anhebung durch den stammnahen Bereich (Wurzelanlauf)
Seiten + Ecken	= sowohl über die Seiten als auch über die Ecken, an je mindestens einer Stelle
Seiten + Anlauf	= sowohl über die Seiten als auch über den Anlauf, an je mindestens einer Stelle
Ecken + Anlauf	= sowohl über die Ecken als auch über den Anlauf, an je mindestens einer Stelle
Seiten + Ecken + Anlauf	= sowohl über die Seiten als auch über die Ecken und den Anlauf, an je mindestens einer Stelle

Kartierbogen 2. Abschnitt

Der zweite Kartierabschnitt erfolgt mit optimiertem und vereinfachtem Kartierbogen ohne Photo und Skizze. Die nicht verwendeten Datenfelder des 1. Kartierbogens entfallen. Dies erlaubt eine beschleunigte Fortführung der Kartierung, um eine hinreichend große Menge an Daten erheben zu können (Beispiel im Anhang). Die Kartierung erfolgt ansonsten jedoch wie im ersten Abschnitt, so dass die Datensätze beider Abschnitte zusammengefasst werden können. Bei besonders auffälligen Exemplaren kann eine fotografische Aufnahme bzw. eine Bemerkung in den letzten beiden Spalten notiert werden.

3.2.2 Auswertungsmethode

Für die Auswertung wird die Abweichung vom Durchschnittswert bestimmt. Dazu werden Signifikanzen festgelegt. Für prozentuale Angaben beträgt diese ± 5% (Durchschnittsbereich = 11 %), bei den Intensitätszahlen ± 5 Punkte (Durchschnittsbereich 11 Punkte). Die Auswertung erfolgt in drei Schritten:

(1) Die **Dimension der Problematik** ergibt sich aus dem Gesamtergebnis der Erfassung. Von Interesse ist dabei die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen insgesamt und differenziert nach Wegedecke und Randeinfassung sowie das Ausmaß der Schäden (Abschnitt 3.4).

(2) Danach werden die **Einflussfaktoren** Gattung, Stammdurchmesser, Baumscheibengröße, Art der Baumscheibe, Art der Wegedecke und Art der Randeinfassung betrachtet (Abschnitt 3.5). Die Auswirkungen der fünf Einflussfaktoren auf die Schadbilder werden untersucht, indem jeweils ein Einflussfaktor mit den Schadbildern in Beziehung gesetzt wird. Es erfolgt ein Vergleich der Einflussfaktoren hinsichtlich Ausmaß und Häufigkeit von Schäden. Überdurchschnittlich viele Schäden bedeuten einen verstärkenden Einfluss des untersuchten Merkmals. Die Gesamtzahl der Schäden an Verkehrsflächen ist die Summe der Standorte, an denen Schäden an der Wegedecke und/oder an der Randeinfassung auftreten. Die Zahl lässt sich aus der Spalte „Lokalisierung“ ablesen, da diese für die gesamte Verkehrsfläche erhoben wird. Die Schäden an Wegedecke und Randeinfassung werden jedoch auch nach Häufigkeit und Ausmaß der Schäden getrennt erhoben und ausgewertet.

Beim „Zustand der Baumscheibe“ können Schäden an bepflanzten Baumscheiben nicht beobachtet werden. Der prozentuale Anteil veränderter Baumscheiben bezieht sich daher auf die Anzahl der Bäume mit „offenen“ Baumscheiben oder mit den Baumscheibenabdeckungen „Rost“ oder „Steine“. Eine Veränderung der Abdeckung wird auf oberflächennahe Wurzeln zurückgeführt und deshalb mit den oberflächlich sichtbaren Wurzeln bei offenen Baumscheiben zusammengefasst, die Varianten „offen“ und „Abdeckung“ werden also insgesamt betrachtet. Für die Auswertung ergibt sich so die Kategorie „veränderte Baumscheibe“. Eine differenzierte Betrachtung soll ausschließlich bei der Auswertung des Einflussfaktors „Art der Baumscheibe“ erfolgen.

Analog zum Zustand der Baumscheibe beziehen sich beim Zustand der Randeinfassung die prozentualen Anteile der Schäden auf die Gesamtzahl der Standorte, wo Veränderungen bzw. Schäden überhaupt auftreten können, das heißt, wo eine Randeinfassung vorhanden ist.

Bei der Betrachtung von Wegedecken- und Randeinfassungszustand wird neben der Häufigkeit das Ausmaß der Schäden erhoben. Bezogen auf die Gesamtzahl geschädigter Standorte wird hierfür die prozentuale Zusammensetzung der Schäden gemäß der Anzahl der Wurzelstränge bestimmt. Zur Quantifizierung der Schäden werden die Klassen für das Ausmaß der Schäden mit Punkten bewertet. Das Produkt aus dem prozentualen Anteil und dem Punktewert wird als „Intensitätszahl“ bezeichnet. Auf diese Weise kann im direkten Vergleich ermittelt werden, welcher Einflussfaktor das höchste Schadpotenzial besitzt. Die Punkteverteilung lautet wie folgt:

1 Wurzelstrang	= 1 Punkt
2 bis 5 Wurzelstränge	= 2 Punkte
über 5 Wurzelstränge	= 3 Punkte.

Beispiel:

	Häufigkeit	Punktzahl x Häufigkeit	Produkt
1 Wurzelstrang	36 %	1 x 36	= 36
2 bis 5 Wurzelstränge	62 %	2 x 62	= 124
über 5 Wurzelstränge	2 %	3 x 2	= 6
geschädigte Standorte	100 %	Summe	= 176

Die Intensitätszahl beträgt 176.

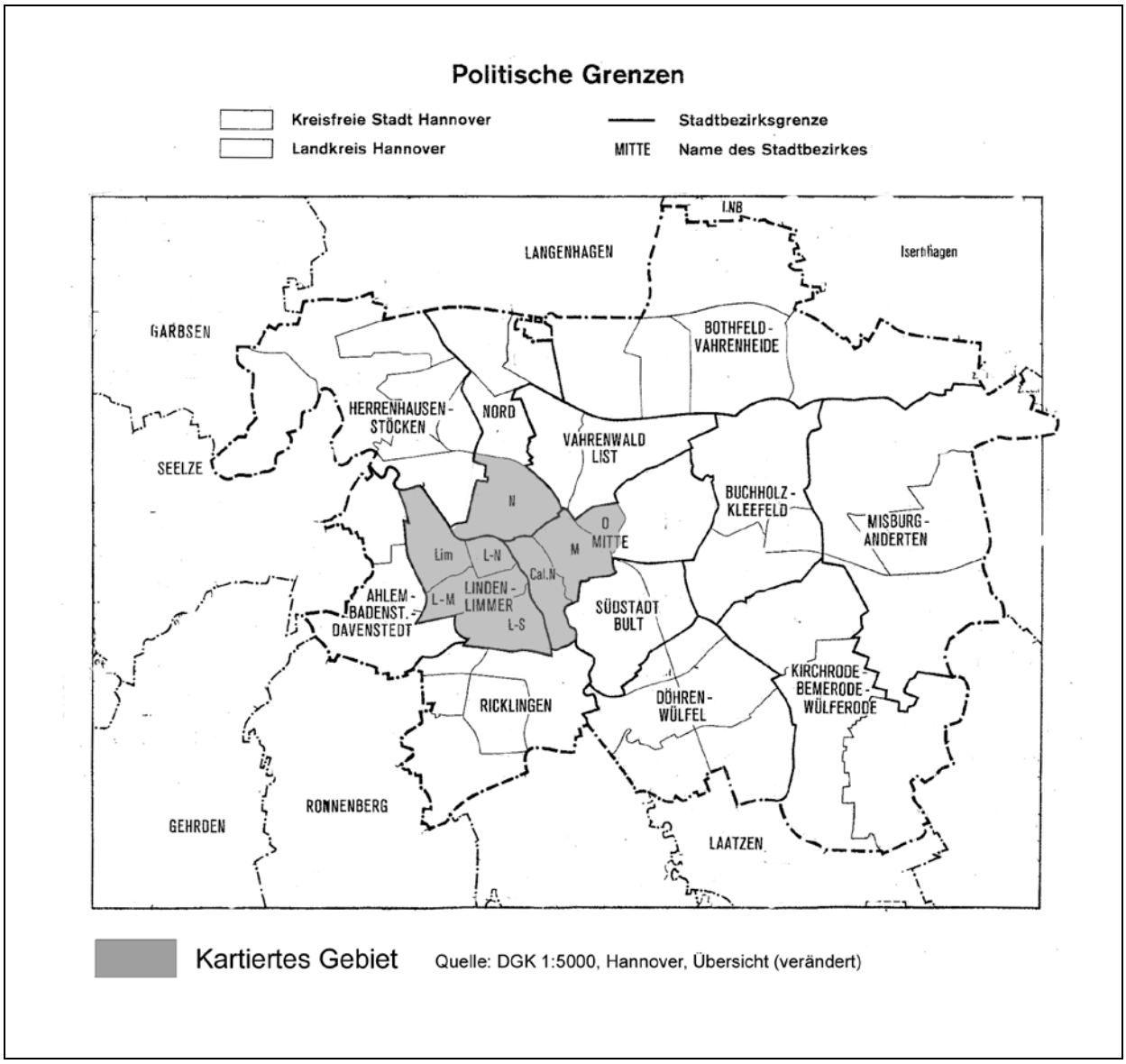
Hinsichtlich der Lokalisierung der Schäden bezogen auf die gesamte Verkehrsfläche (Wegedecke und Randeinfassung) wird hinterfragt, ob bzw. wie sich die Einflussfaktoren auf die räumliche Verteilung der Schäden auswirken. Auch hier wird die Gesamtzahl schadhafter Standorte als Basis für die prozentualen Anteile eingesetzt, um eine Vergleichbarkeit zu erzielen.

Im dritten Schritt werden die **Zusammenhänge der Schadbilder** Zustand der Baumscheibe, Zustand der Wegedecke, Zustand der Randeinfassung und Lokalisierung untereinander untersucht (Abschnitt 3.6). Sie sind der quantifizierbare Teil der Typisierung der Schadbilder. Die in Skizze und Bild dokumentierten Schadbilder sowie sonstige Beobachtungen werden als nicht quantifizierbare Schadensmuster zusammen mit den Ergebnissen aus den Fallbeispielen (Kapitel 4) in Kapitel 5 „Schadenstypisierung“ erörtert.

Die **Gesamtbetrachtung** der Ergebnisse aller Auswertungsschritte erfolgt in Abschnitt 3.7 – Ergebnis.

3.3 Durchführung

Nach dem ersten Kartierabschnitt erfolgte eine Zwischenauswertung der 735 kartierten Exemplare. Trotz der relativ hohen Gesamtzahl erwies sich die verbleibende Anzahl bei Aufteilung der Daten nach bestimmten Kriterien wie zum Beispiel Gattung oder Baumscheibengröße als für sinnvolle Aussagen zu gering. Die im ersten Abschnitt erfassten Schadbilder in Form von Fotos und Skizzen wurden hingegen aufgrund der hohen Schadensquote als hinreichend aussagekräftig betrachtet. Der zweite Kartierabschnitt konnte daher mit vereinfachtem Kartierverfahren durchgeführt werden.



Darstellung 11: Lage der kartierten Stadtteile im Stadtgebiet von Hannover.

Zwischen März und Dezember 1999 wurden im ersten Abschnitt 735 Bäume kartiert. Die Kartierung erstreckte sich über die Stadtteile Limmer, Linden-Nord und Nordstadt. Zwischen März und April 2000 wurden im zweiten Abschnitt 2146 Bäume in den Stadtteilen Linden-Mitte, Linden-Süd, Calenberger Neustadt, Mitte und Oststadt erfasst (Darstellung 11). Die geringen prozentualen Abweichungen zu den Ergebnissen des ersten Abschnittes ließen keine Veränderung der Aussagen bei der Kartierung

von weiteren Stadtteilen erwarten. Die Kartierung wurde daher abgeschlossen. Die Gesamtzahl der kartierten Bäume beträgt 2881.

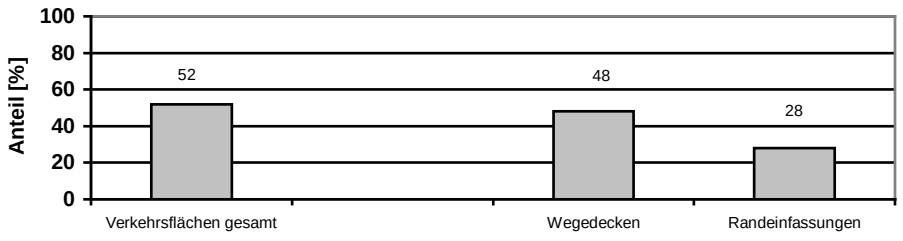
Das Erkennen auch sehr leichter Schäden im Wegebelag wie beispielsweise eine kaum wahrnehmbare Anhebung von Gehwegplatten oder sehr leichte Verschiebungen der Randeinfassungen erforderte ein geschultes Auge, bereitete letztlich jedoch keine Schwierigkeiten. Auch die Zuordnung wenig eindeutiger Schäden konnte zumeist sicher bestimmt werden. Die Anzahl der irrtümlich erfassten oder nicht erfassten Schäden führt zu einer unbedeutenden, nicht genau zu beziffernden Fehlerquote. Ebenso verhält es sich mit der Einstufung des Ausmaßes der Schäden. Bei Sonderfällen wie mehrstämmigen Bäumen, mehreren Bäumen pro Baumscheibe oder schlecht einsehbarem Baumumfeld wurde auf eine Erhebung verzichtet. Die exakte Erfassung mit Foto und Skizze im ersten Kartierabschnitt erwies sich als sehr zeit- und materialaufwendig und somit nur für eine begrenzte Anzahl Bäume praktikabel. Zudem verfügen einige Aufnahmen durch die schwierigen Lichtverhältnisse unter den Bäumen sowie durch den geringen Anhebungsgrad mancher Flächen über nur wenig Aussagekraft. Es wurde deshalb dazu übergegangen, die Stellen mit farbigen Pfeilen auf dem Bild kenntlich zu machen. Je nach Standort erwies sich eine Detailaufnahme günstiger als eine Totalaufnahme.

Nach der manuellen Erfassung in Kartierbögen wurden die Ergebnisse für die statistische Auswertung in Excel-Tabellen übertragen und diese nach Parametern getrennt ausgewertet. Kartierungs- und Übertragungsfehler wurden durch stichprobenhafte Überprüfung und die Schlüssigkeit der Teil- und Gesamtsummen minimiert. Dennoch ist eine geringe Fehlerquote aufgetreten, die jedoch aufgrund der hohen Gesamtzahl keine Auswirkung auf das Ergebnis hat.

3.4 Auswertung der Dimension der Problematik

Insgesamt 52 % der untersuchten Verkehrsflächen lassen Schäden durch Baumwurzeln erkennen (Darstellung 12).

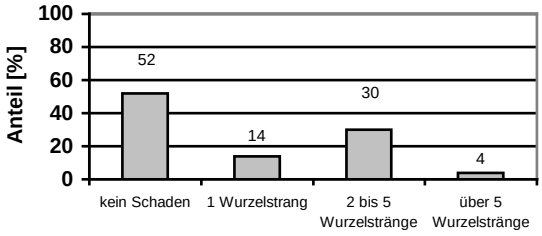
Darstellung 12: Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen gesamt sowie differenziert nach Wegedecken und Randeinfassungen



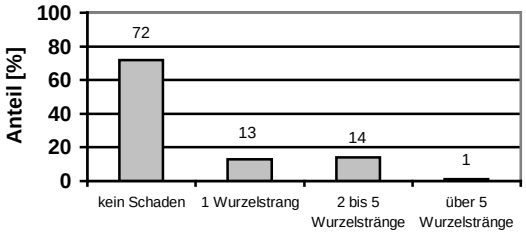
Bei 14 % der Verkehrsflächen wurden geringe Schäden (ein Wurzelstrang), bei 30 % mittelstarke Schäden (2 bis 5 Wurzelstränge) und bei 4 % starke Schäden (über 5 Wurzelstränge) an der Wegedecke vorgefunden (Darstellung 13). Die gesamte Verkehrsfläche wurde in unterteilt. Der Anteil Standorte ohne Schaden an der Wegedecke beträgt 52 %. Bei 13 % aller Verkehrsflächen – also auch bei solchen ohne Randeinfassung – wurden geringe Schäden, bei 14 % mittelstarke Schäden und bei

1 % starke Schäden an der Randeinfassung kartiert (Darstellung 14). Das Ausmaß der Schäden ist also insgesamt etwas geringer als bei den Wegedecken. Mit 72 % liegt der Anteil Standorte ohne Schaden an der Randeinfassung über dem der schadensfreien Wegedecken.

Darstellung 13: Ausmaß der Schäden an Wegedecken



Darstellung 14: Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen



Baumscheibenabdeckungen aus Stahlrosten oder Steinen, die man als zu der Verkehrsfläche gehörig betrachten kann, werden im Durchschnitt zu 45 % verändert vorgefunden (siehe Abschnitte 3.5.4, 3.6.2). Dies entspricht annähernd der Schadensquote für Wegedecken.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass rund die Hälfte aller untersuchten Verkehrsflächen Schäden durch Baumwurzeln aufweist. Das Ausmaß der Schäden ist in über der Hälfte der Fälle mittelstark, das heißt, es sind 2 bis 5 Wurzelstränge erkennbar. Hierbei handelt es sich um die zum Zeitpunkt der Kartierung sichtbaren Schäden bezogen auf die Gesamtzahl der kartierten Bäume. Es werden also auch Neupflanzungen erfasst, bei denen keine Schäden zu erwarten sind. Insgesamt weisen Verkehrsflächen an Baumstandorten eine hohe Schadensquote hinsichtlich Häufigkeit und Schadensmaß auf (vollständiger Datensatz siehe Tabelle 1, Anhang).

3.5 Auswertung der Einflussfaktoren

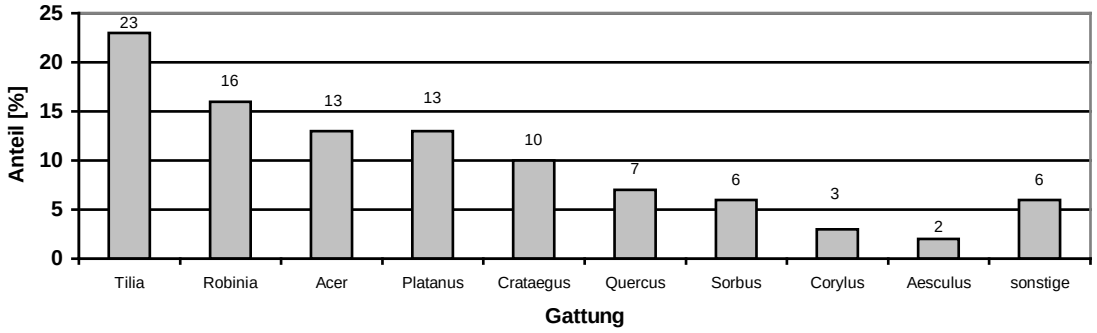
Im Folgenden werden die Einflussfaktoren Gattung, Stammdurchmesser, Baumscheibengröße, Art der Baumscheibe, Art der Wegedecke und Art der Randeinfassung ausgewertet.

3.5.1 Gattungen

Der Einfluss der Baumgattung wird für Gattungen ab 50 erfassten Exemplaren untersucht. Alle anderen Gattungen werden unter der Rubrik „sonstige“ zusammengefasst. Die angegebenen Durchschnittswerte beziehen sich auf die Gesamtzahl der kartierten Bäume (vollständiger Datensatz siehe Tabellen 2 bis 7, Anhang). Bei der Auswertung des Einflussfaktors „Gattungen“ wird hinsichtlich des jeweiligen Kriteriums neben der Abweichung vom Durchschnittswert auch die ungefähre Rangfolge in den Tendenzen hoch, mittel und niedrig einbezogen.

Anmerkung zur Methode
Die Kartierung erfasst einige wichtige Gattungen für Straßenbäume in aussagekräftiger Anzahl (Darstellung 15).

Darstellung 15: Prozentuale Zusammensetzung der Gattungen



Für die Untersuchung ist die Erfassung der *gängigen* Straßenbaumgattungen eine Voraussetzung, da die Betrachtung von „Exoten“ unter den Straßenbäumen wenig sinnvoll ist. Wichtige Gattungen für Straßenbäume werden durch die Kartierung erfasst, wie der Vergleich mit der prozentualen Zusammensetzung der Straßenbäume in Hannover zeigt (Darstellung 16):

1. Tilia (30%)	5. Sorbus (6%)	9. Crataegus (2%)
2. Quercus (20%)	6. Robinia (5%)	10. Betula (2%)
3. Acer (14%)	7. Aesculus (4%)	sonstige (8%)
4. Platanus (7%)	8. Fraxinus (3%)	

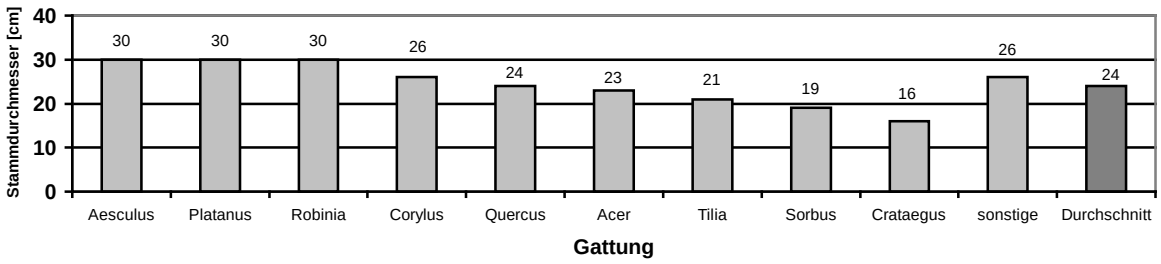
Darstellung 16: Gattungszusammensetzung der Straßenbäume in Hannover
(Quelle: Umweltbericht Stadt Hannover 2001)

Fraxinus und *Betula* wurden nicht in relevanten Mengen erfasst, dafür *Corylus.* Dies und die teilweise deutlichen Abweichungen in den prozentualen Anteilen sind für die Untersuchung unerheblich, da die genaue Abbildung der Verhältnisse in Hannover nicht erforderlich ist. Die Untersuchung erfolgt zwar exemplarisch in Hannover, ihre Ergebnisse sind grundsätzlich jedoch ortsunabhängig.

Der durchschnittliche Stammdurchmesser (Darstellung 17) muss bei der Beurteilung der Gattungen hinsichtlich ihrer Schadwirkung berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 3.5.2 darlegt wird, ist der Stammdurchmesser als Indikator für Wuchsstärke ein wichtiger Einflussfaktor, der den Einflussfaktor „Gattung“ überlagert. Gattungen, die zwar einen hohen Anteil an geschädigten Standorten und zugleich im Durchschnitt einen großen Stammdurchmesser aufweisen, besitzen demnach ein geringeres gattungsspezifisches Schadpotential als solche mit geringerem Stammdurchmesser bei gleichem Anteil. Dieser Einfluss wird bei der Auswertung der Ergebnisse wie folgt einbezogen: Für einige Gat-

tungen (*Acer*, *Crataegus*, *Platanus*, *Robinia*, *Tilia*) wurde exemplarisch eine weitere Unterteilung nach Stammdurchmesserklassen vorgenommen (siehe Abschnitt 3.5.2). Für den Fall, dass der Stammdurchmesser der stärkere Faktor ist, ist bei dieser Unterteilung innerhalb der Stammdurchmesserklassen keine signifikante Abweichung der Werte für die Gattungen zu erwarten. Umgekehrt bestätigen unterschiedliche Werte die Vermutung, dass das gattungsspezifische Wurzelverhalten unabhängig vom Stammdurchmesser des Baumes einen eigenen Einflussfaktor darstellt. Die Aufteilung der Werte für die Gattungen nach einer zweiten Ebene, den Stammdurchmesserklassen, ergibt je nach Verteilung für einzelne Klassen nur wenige Werte. Daher wurde die Mindestzahl von 300 Exemplaren als Kriterium für die Auswahl der zu untersuchenden Gattungen festgesetzt. Dennoch können innerhalb einer Gattung bei der Auswertung verschiedener Parameter keine Aussagen getroffen werden, da die Anzahl der Werte pro Klasse zu gering ist. Innerhalb der Gattungen wurden nur Ergebnisse mit mindestens 20 Exemplaren pro Klasse eines Parameters gewertet und in den Grafiken dargestellt.

Darstellung 17: Durchschnittlicher Stammdurchmesser der untersuchten Gattungen



Abschnittsthese:

Das gattungsspezifische Wurzelverhalten beeinflusst

a) die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen,

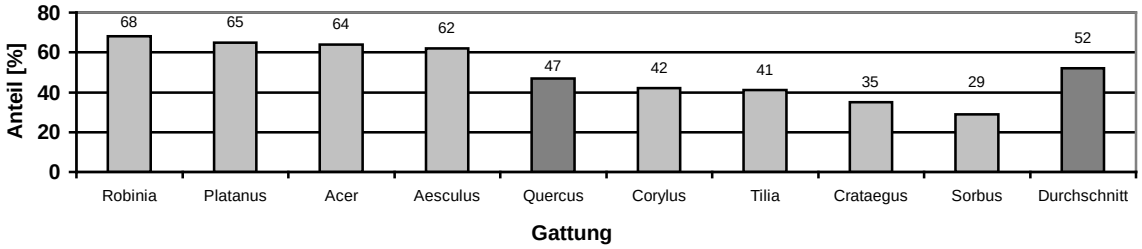
b) das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen und

c) die Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben.

a) Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen

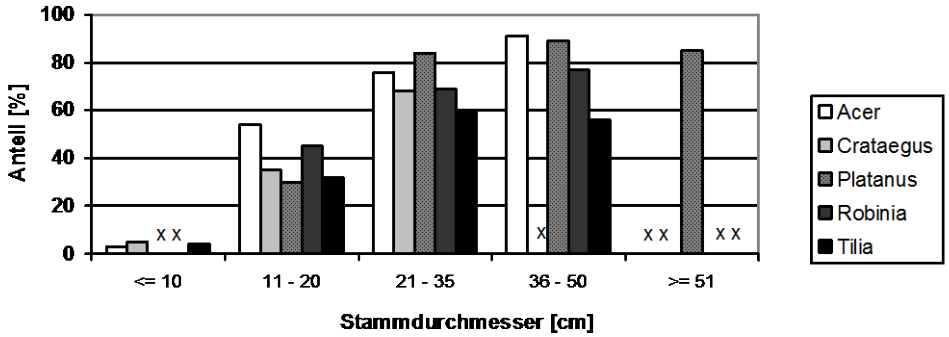
Die Anteile geschädigter Verkehrsflächen schwanken zwischen 29 % (*Sorbus*) und 68% (*Robinia*) und weisen somit signifikante Unterschiede auf. *Robinia*, *Platanus*, *Acer* und *Aesculus* liegen über, *Quercus* liegt im, *Corylus*, *Tilia*, *Crataegus* und *Sorbus* liegen unter dem Durchschnittsbereich (Darstellung 18).

Darstellung 18: Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Gattungen



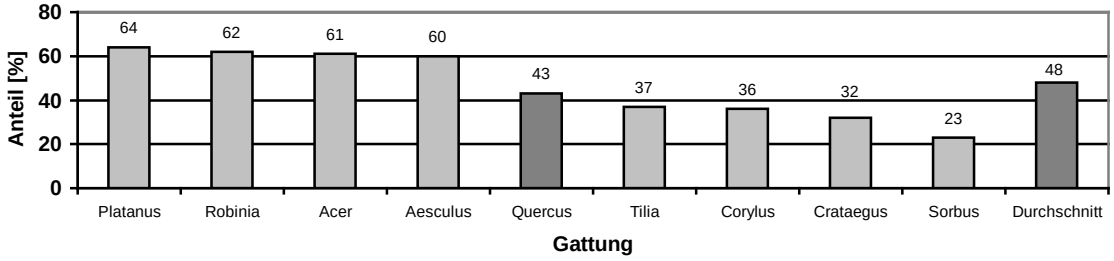
Bei der Aufteilung der Ergebnisse für die Gattungen *Acer*, *Crataegus*, *Platanus*, *Robinia* und *Tilia* in die Stammdurchmesserklassen ergeben sich ebenfalls deutliche Unterschiede in der Höhe der Werte (Darstellung 19; an mit „x“ gekennzeichneten Stellen liegen für eine Auswertung zu wenig Daten vor). Der Verlauf der Werte hingegen ist ähnlich: Sie steigen mit zunehmendem Stammdurchmesser zunächst stärker, dann schwächer an. Die Werte für *Platanus* und *Tilia* sinken sogar wieder (*Platanus*: ab 51 cm, *Tilia*: ab 36 - 50 cm).

Darstellung 19: Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Gattungen und Stammdurchmesser

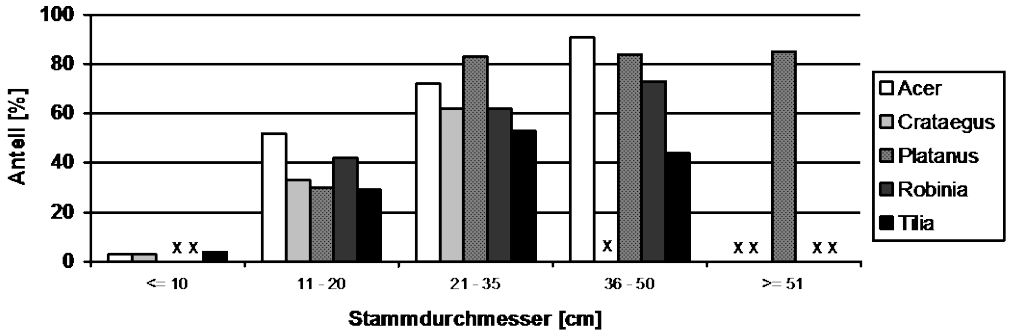


Bei der Differenzierung der Verkehrsflächen nach Wegedecken und Randeinfassung ergeben sich ähnliche Werte wie für Schäden an Verkehrsflächen insgesamt. Bei den Wegedecken gilt dies sowohl für den durchschnittlichen Gesamtanteil als auch für die nach Stammdurchmesserklassen aufgeschlüsselten Anteile (Darstellung 20, Darstellung 21). Bei den Randeinfassungen sind die Ergebnisse tendenziell ähnlich (Darstellung 22). Die nach Stammdurchmesserklassen aufgeteilten Werte wurden für die Randeinfassungen aufgrund der zu geringen Datenmenge nicht in die Wertung einbezogen.

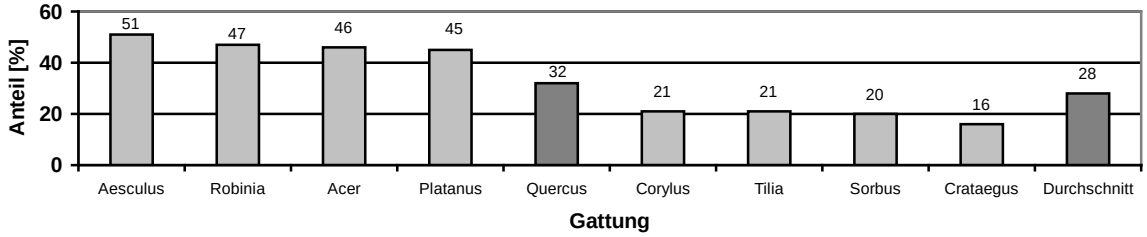
Darstellung 20: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Gattungen



Darstellung 21: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Gattungen und Stammdurchmesser



Darstellung 22: Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Gattungen



Interpretation

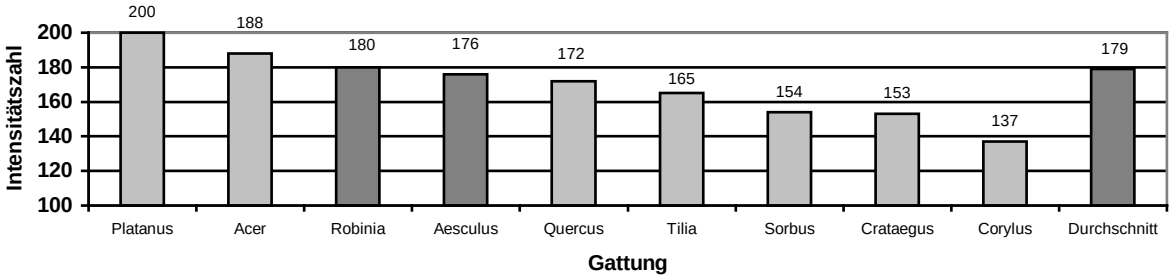
Gemäß der Einteilung nach Stammdurchmesserklassen besitzen *Acer* und *Platanus* ein ähnlich hohes Schadpotential, wobei *Acer* schon bei relativ geringem Stammdurchmesser häufig Schäden verursacht. Es folgen *Robinia* vor *Crataegus* vor *Tilia*. Es erfolgt eine ständige Behebung der Schäden, bei der häufig Wurzeln entnommen werden. Das Wurzelwachstum der älteren Bäume verlangsamt sich mit dem Zuwachs an oberirdischer Masse, so dass sich nur langsam neue Wurzeln im Wegeoberbau entwickeln und Schäden somit nur langsam oder nicht mehr auftreten.

Die untersuchten Gattungen zeigen auch innerhalb einer Stammdurchmesserklasse Unterschiede in der Schadenshäufigkeit. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass das gattungsspezifische Wurzelverhalten die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen beeinflusst.

b) Ausmaß der Schäden an Verkehrsflächen

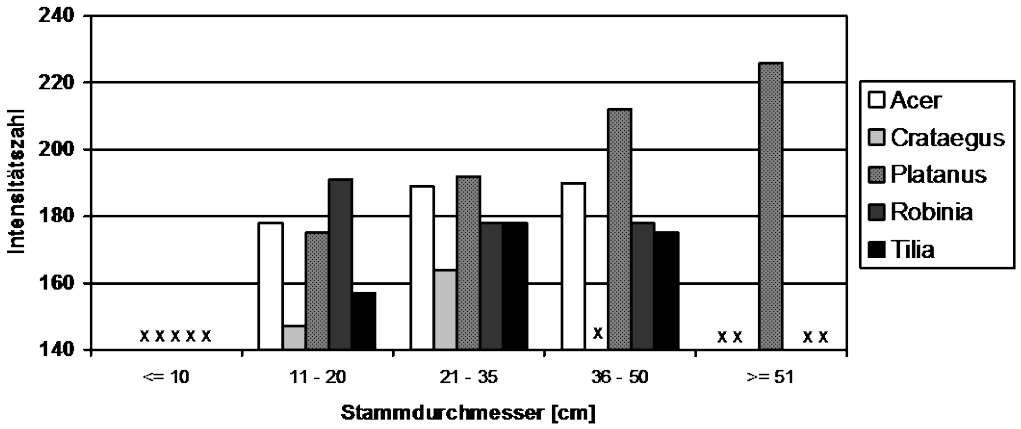
Das Ausmaß der Schäden wurde für Wegedecke und Randeinfassung getrennt aufgenommen und ausgewertet. Es wird als Intensitätszahl dargestellt (siehe Abschnitt 3.2). Bei den Wegedecken lässt sich aus den unterschiedlich hohen Intensitätszahlen ein Einfluss der Gattungen hinsichtlich des Ausmaßes der Schäden ableiten (Darstellung 23). Dabei zeigt sich, dass die Reihenfolge der Gattungen nach Ausmaß der Schäden tendenziell der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen und speziell an Wegedecken entspricht. Die Gattungen, die häufiger zu Schäden führen, verursachen demnach auch die stärkeren Schäden. Über dem Durchschnittsbereich liegen *Platanus* und A*cer*, darin liegen *Robinia* und *Aesculus*, darunter *Quercus*, *Tilia*, *Sorbus*, *Crataegus* und *Corylus.* Abweichend von der Rangfolge nach der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen zeigen *Acer* und *Sorbus* stärkere Schäden.

Darstellung 23: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Gattungen



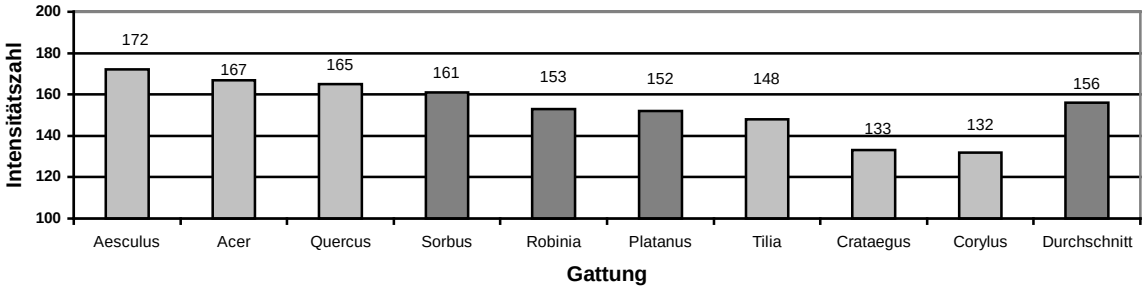
Bei der Differenzierung der Intensitätszahlen nach Stammdurchmesserklassen weisen die höheren Stammdurchmesserklassen innerhalb der Gattungen auch höhere Intensitätszahlen auf. Zwischen den Gattungen bestehen jedoch deutliche Unterschiede in der Höhe der Intensitätszahlen, so dass auch für das Ausmaß der Schäden ein Einfluss des gattungsspezifischen Wurzelverhaltens abgeleitet werden kann (Darstellung 24). Wie bei der Häufigkeit der Schäden ist auch beim Ausmaß eine Stagnation bzw. ein Absinken der Werte bei Bäumen mit größerem Stammdurchmesser festzustellen. Bei *Platanus* nimmt das Ausmaß stetig zu, bei *Acer* und *Tilia* stagniert es annähernd ab einem Stammdurchmesser von 36 bis 50 cm, bei *Robinia* nimmt es bei einem Stammdurchmesser von 21 bis 35 cm wieder ab. Dies ist ebenfalls ein Hinweis, dass der Wurzelzuwachs mit zunehmendem Stammdurchmesser bzw. Alter der Bäume nachlässt. Für *Crataegus* konnten nur zwei Werte festgestellt werden, so dass diesbezüglich keine Aussage möglich ist.

Darstellung 24: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Gattungen und Stammdurchmesser



Bei den Randeinfassungen ergeben sich ebenfalls Unterschiede im Ausmaß der Schäden, was auf einen gattungsspezifischen Einfluss schließen lässt. Es zeigen sich Unterschiede beim Vergleich mit der Schadensquote der Wegedecken: *Aesculus*, *Sorbus* und *Quercus* verursachen stärkere Schäden, *Robinia* und *Platanus* hingegen schwächere (Verschiebung in der Reihenfolge um mehr als einen Platz; Darstellung 25). Die größten Verschiebungen sind bei *Aesculus* (von Platz 4 auf Platz 1) und bei *Platanus* (von Platz 1 auf Platz 6) zu verzeichnen. Hierfür kann bisher keine Erklärung gefunden werden. Für eine Aufteilung der Ergebnisse für die Gattungen nach Stammdurchmesserklassen standen zu wenige Exemplare mit vorhandener Randeinfassung zur Verfügung, als dass Aussagen getroffen werden könnten.

Darstellung 25: Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Gattungen



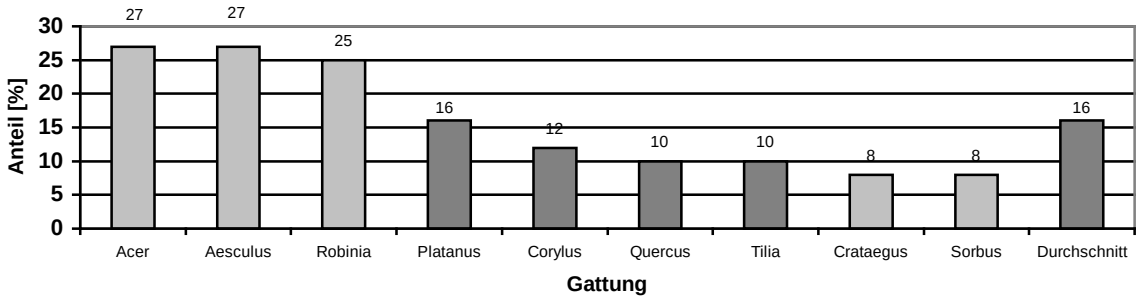
Die untersuchten Gattungen lassen auch innerhalb einer Stammdurchmesserklasse Unterschiede im Schadensausmaß erkennen. Daher gilt, dass das gattungsspezifische Wurzelverhalten das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen beeinflusst.

c) Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben

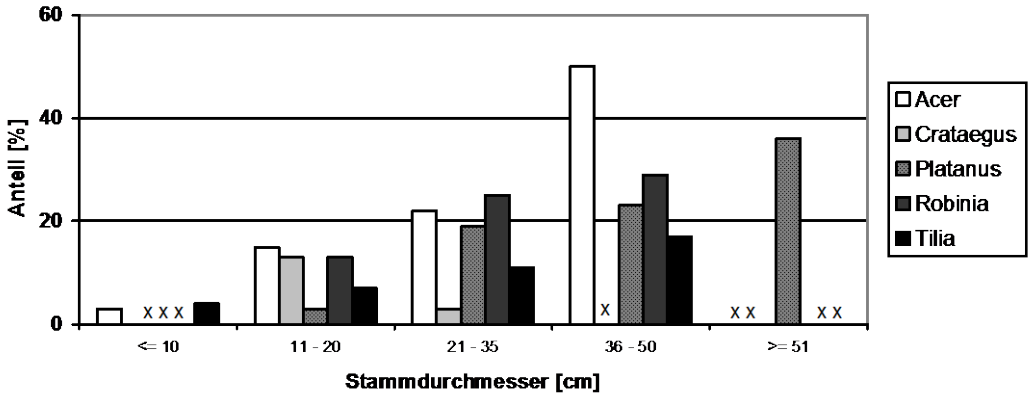
Die Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben in Form oberflächlich sichtbarer Wurzeln oder angehobener Abdeckungen (Rost, Steine) entspricht hinsichtlich der Einschätzung der Gattungen tendenziell den Ergebnissen für die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen. Dies gilt sowohl für die Gesamtbetrachtung als auch für die Einteilung nach Stammdurchmesserklassen. Überdurch-

schnittlich viele Standorte mit Veränderungen der Baumscheibe zeigen *Acer*, *Aesculus* und *Robinia*. Im Durchschnittsbereich liegen *Platanus, Corylus, Quercus und Tilia*. Geringere Anteile zeigen *Crataegus* und *Sorbus* (Darstellung 26). Aus der Einteilung nach Stammdurchmesserklassen ist ersichtlich, dass die Häufigkeit von Veränderungen generell mit zunehmendem Stammdurchmesser steigt und zwischen den untersuchten Gattungen signifikante Unterschiede in der Höhe der Werte bestehen (Darstellung 27). Die Reihung lautet hier *Acer*, *Robinia*, *Platanus*, *Tilia*. Insbesondere *Acer* fällt durch einen hohen Anteil Veränderungen in der Stammdurchmesserklasse 36 bis 50 cm auf. Für *Crataegus* konnten nur drei Werte ermittelt werden, deren Verlauf im Widerspruch zu der eben gemachten Aussage steht. Das Ergebnis kann daher nicht gewertet werden.

Darstellung 26: Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Gattungen



Darstellung 27: Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Gattungen und Stammdurchmesser



Hinsichtlich der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben sind bei den untersuchten Gattungen auch innerhalb einer Stammdurchmesserklasse Unterschiede festzustellen. Das gattungsspezifische Wurzelverhalten beeinflusst daher die Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben.

Einschätzung der Gattungen

Hinsichtlich des Schadpotenzials der untersuchten Gattungen kann eine erste Einschätzung gegeben werden. Es muss berücksichtigt werden, dass das gattungsspezifische Wurzelverhalten von den jeweiligen bodenbedingten Standortfaktoren abhängig ist. Diese erste Einschätzung gilt daher nur im

Rahmen der vorliegenden Standortverhältnisse. Sie könnte Anlass für weiterführende Untersuchungen sein.
Acer zeigt sowohl hinsichtlich der Häufigkeit als auch des Ausmaßes von Schäden an Verkehrsflächen ein hohes Schadpotenzial. Dies gilt auch für Veränderungen an Baumscheiben. Das Schadpotenzial von *Acer* wird daher im Hinblick auf die untersuchten Merkmale als überdurchschnittlich schadensträchtig eingestuft.

Platanus und *Robinia* sind auf die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen bezogen ähnlich schadensträchtig wie *Acer*. Beim Ausmaß der Schäden verursachen diese Gattungen bei den Randeinfassungen im Unterschied zu den Wegedecken eher geringe Schäden. Dieses Phänomen soll anhand der Freilegungen (Kapitel 4) näher untersucht werden. Bei beiden können außerdem überdurchschnittlich häufig Veränderungen an Baumscheiben beobachtet werden.

Aesculus ist vermutlich ähnlich einzustufen wie die bereits besprochenen Gattungen. Aufgrund der geringen Anzahl kartierter Exemplare konnte jedoch keine differenzierte Untersuchung nach Stammdurchmesserklassen vorgenommen werden.

Quercus liegt bei Häufigkeit und Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen sowie bei der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben stets im Durchschnittsbereich. Das Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen hingegen ist überdurchschnittlich hoch. Auch hier sei auf Kapitel 4 verwiesen. Eine Aufschlüsselung der Werte nach Stammdurchmesser konnte bei *Quercus* wegen der geringen Datenmenge nicht erfolgen.

Corylus besitzt ein unterdurchschnittliches Schadpotenzial für die untersuchten Merkmale, konnte aber ebenfalls nicht nach Stammdurchmesserklassen differenziert betrachtet werden.

Tilia liegt sowohl bei den gesamten als auch bei den nach Stammdurchmesser aufgeteilten Werten stets unter dem Durchschnitt und ist daher im Schadpotenzial eher gering einzustufen.

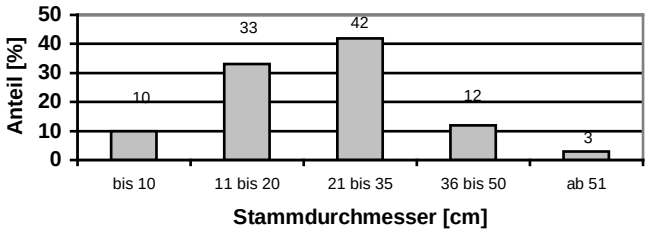
Crataegus besitzt hinsichtlich der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen eine relativ geringe Schadwirkung. Allerdings rangiert *Crataegus* bei den auf den Stammdurchmesser bezogenen Werten im oberen Drittel und liegt beim Ausmaß der Schäden vor *Corylus* und *Tilia*. *Crataegus* verursacht also insgesamt zwar geringe, auf den Stammdurchmesser bezogen jedoch höhere Schäden. Da *Crataegus* zu den schwachwüchsigen Bäumen gehört, kann dies mit der längeren Standzeit bzw. dem höheren Alter im Vergleich zu stärker wachsenden Bäumen des selben Stammdurchmessers begründet werden.

Sorbus ist ähnlich einzuschätzen wie *Crataegus.* Wie bei *Quercus* liegt auch bei *Sorbus* das Ausmaß der Schäden bei den Randeinfassungen höher als bei den Wegedecken. Hierfür kann bisher keine Erklärung geliefert werden. Auf den Stammdurchmesser bezogene Werte konnten wegen der geringen Anzahl nicht in die Auswertung einbezogen werden.

3.5.2 Stammdurchmesser

Die prozentualen Anteile der Stammdurchmesserklassen sind Darstellung 28 zu entnehmen (vollständiger Datensatz siehe Tabelle 8, Anhang).

Darstellung 28: Prozentuale Zusammensetzung der Stammdurchmesserklassen



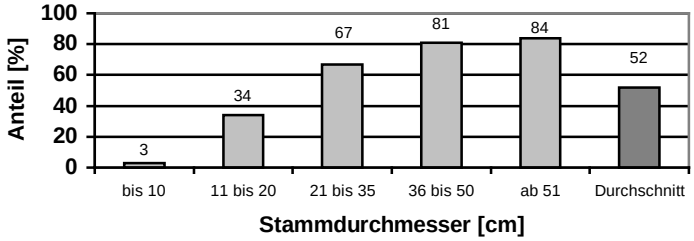
Abschnittsthese:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Stammdurchmesser und
a) der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen,
b) dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen und
c) der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben.

a) Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen

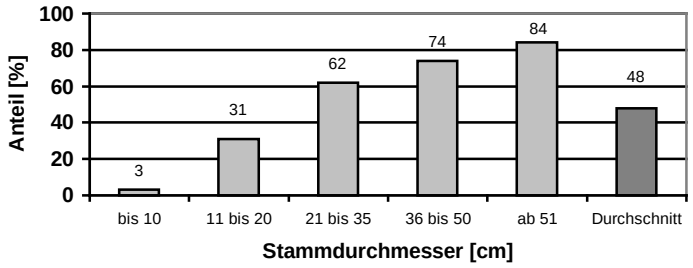
Die Häufigkeit der Schäden an Verkehrsflächen steigt mit dem Stammdurchmesser stetig an (Darstellung 29). Die durchschnittliche Häufigkeit liegt bei 52%. Dieser Durchschnittswert wird ab einer Stammdurchmesserklasse von 21 bis 35 cm deutlich überschritten (67%) und erreicht mit 84% bei über 50 cm Stammdurchmesser den Spitzenwert.

Darstellung 29: Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Stammdurchmesser



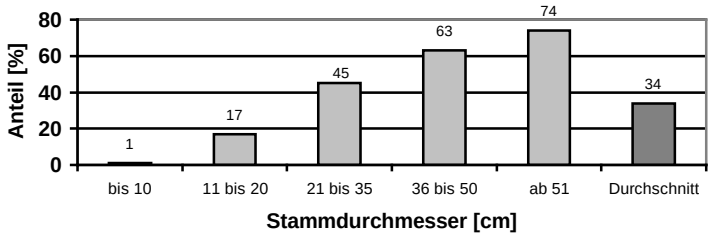
Die These bestätigt sich auch bei differenzierter Betrachtung von Wegedecke und Randeinfassung.
Mit dem Stammdurchmesser nimmt die Häufigkeit der Schäden an Wegedecken zu (Darstellung 30). Überdurchschnittlich hohe Werte sind ab einer Stammdurchmesserklasse von 21 bis 35 cm zu verzeichnen.

Darstellung 30: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Stammdurchmesser



Auch die Häufigkeit der Schäden an Randeinfassungen nimmt mit dem Stammdurchmesser zu (Darstellung 31). Überdurchschnittlich hohe Werte treten auch hier ab einer Stammdurchmesserklasse von 21 bis 35 cm auf. Insgesamt ist die Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen geringer als an Wegedecken.

Darstellung 31: Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Stammdurchmesser

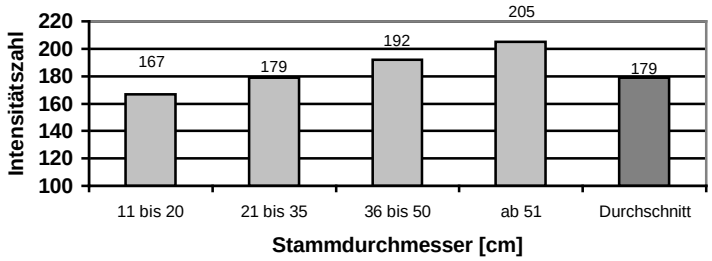


Somit besteht ein Zusammenhang zwischen Stammdurchmesser und der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen. Je größer der Stammdurchmesser, desto größer ist die Häufigkeit der Schäden.

b) Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen

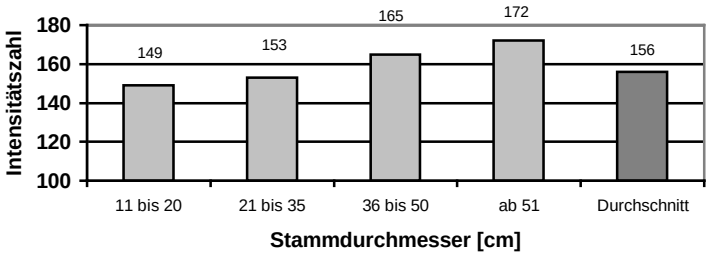
Die Stammdurchmesserklasse bis 10 cm wird wegen der geringen Anzahl kartierter Standorte mit Schaden an der Wegedecke bzw. an der Randeinfassung nicht gewertet. Bei Schäden an Wegedecken steigt die Intensitätszahl als Maß für das Ausmaß der Schäden mit zunehmendem Stammdurchmesser (Darstellung 32).

Darstellung 32: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Stammdurchmesser



Tendenziell steigt auch bei den Randeinfassungen die Intensitätszahl mit zunehmendem Stammdurchmesser (Darstellung 33). Der Verlauf der Zunahme ist jedoch anders als bei den Wegedecken: Die Werte sind zunächst annähernd konstant und liegen etwas unter dem Durchschnitt. Erst ab einer Stammdurchmesserklasse von 36 bis 50 cm ist ein Anstieg zu verzeichnen. Insgesamt sind die Schäden geringer als bei den Wegedecken.

Darstellung 33: Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Stammdurchmesser



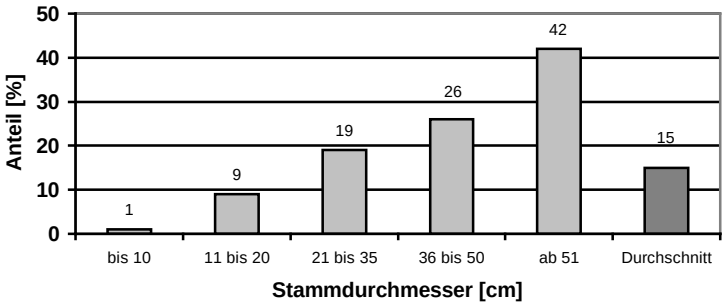
Interpretation

Eine Erklärung bietet die in der Regel massivere Bauweise von Randeinfassungen gegenüber Wegedecken. Zur Veränderung der Lage von Randeinfassungen ist also ein größerer Kraftaufwand erforderlich als bei den schwächer dimensionierten Wegedecken. Dadurch ist erst bei stärkerem Dickenwachstum eine Veränderung möglich und sichtbar. Die Intensität nimmt daher erst bei größeren Stammdurchmesserklassen zu. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen dem Stammdurchmesser und dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen. Je größer der Stammdurchmesser, desto größer ist das Ausmaß der Schäden.

c) Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben

Mit dem Stammdurchmesser nimmt der Anteil der Schäden an Baumscheiben in Form oberflächlich sichtbarer Wurzeln oder durch in ihrer Lage verschobene Baumscheibenabdeckungen als Indikator für oberflächennah wachsende Wurzeln zu (Darstellung 34).

Darstellung 34: Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Stammdurchmesser

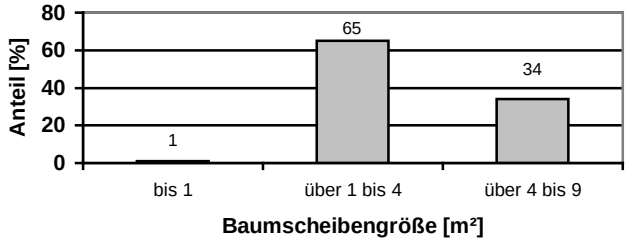


Deutlich überdurchschnittlich hohe Werte treten ab einer Stammdurchmesserklasse von 36 bis 50 cm auf. Es besteht daher ein Zusammenhang zwischen dem Stammdurchmesser und der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben. Je größer der Stammdurchmesser, desto häufiger sind Veränderungen an der Baumscheibe.

3.5.3 Baumscheibengröße

Kleine Baumscheiben von bis zu 1 m² Größe machen mit 1 % einen äußerst geringen Anteil aus. Ungefähr zwei Drittel der Baumscheiben weisen eine mittlere Größe von über 1 bis 4 m², ein Drittel große Baumscheiben von über 4 bis 9 m² auf (Darstellung 35; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 9, Anhang)

Darstellung 35: Prozentuale Zusammensetzung der Baumscheibengrößen



Aufgrund der geringen Anzahl von 32 kleinen Baumscheiben (bis zu 1m²) sind Aussagen hierzu nur bedingt zuverlässig. Sie unterstützen jedoch die aus den Ergebnissen für mittlere und große Baumscheiben gewonnenen Erkenntnisse und werden daher in die Wertung einbezogen.

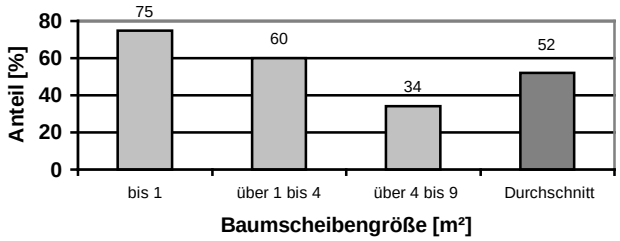
Abschnittsthese:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Größe der Baumscheibe und
a) der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen und
b) dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen.

a) Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen

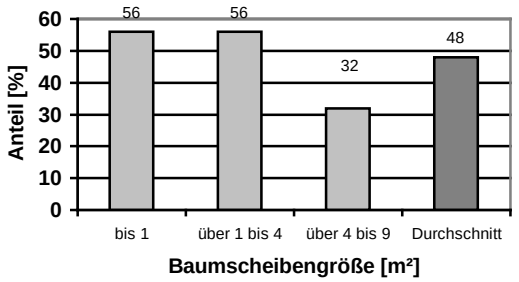
Mit zunehmender Baumscheibengröße nimmt die Häufigkeit von Veränderungen an Verkehrsflächen deutlich ab (Darstellung 36).

Darstellung 36: Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Baumscheibengrößen

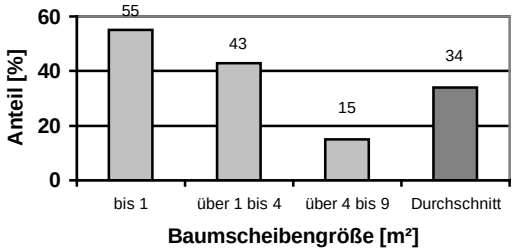


Diese Aussage bestätigt sich bei der differenzierten Betrachtung von Wegedecke (Darstellung 37) und Randeinfassung (Darstellung 38). Die Unterschiede treten bei den Randeinfassungen jedoch deutlicher hervor als bei den Wegedecken, wo kleine und mittlere Baumscheiben gleiche Werte aufweisen. Rein rechnerisch lässt dies darauf schließen, dass bei den Kleinbaumscheiben offenbar viele Standorte eine Veränderung der Wegedecke, nicht aber der Randeinfassung aufweisen, während bei den übrigen Klassen mehr Überschneidungen auftreten.

Darstellung 37: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Baumscheibengrößen



Darstellung 38: Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Baumscheibengrößen



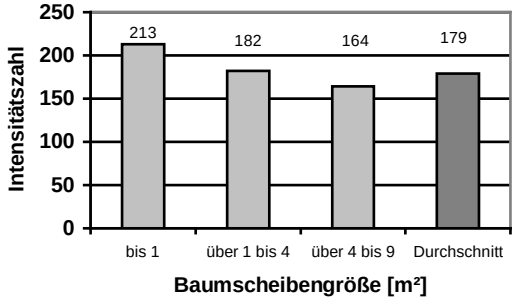
Interpretation

Es kommen zwei Erklärungen in Frage: Zum einen könnte mit einem Anteil von 56 % bei den Wegedecken ein Höchstsatz erreicht sein, da Regulierungen ständig vorgenommen werden. Randeinfassungen liegen in der Regel nicht unmittelbar in der Lauffläche, so dass weniger Reparaturbedarf besteht. Zudem ist die Behebung von Unebenheiten aufgrund der massiveren Bauweise schwieriger als bei Wegedecken. Zum anderen könnte es sich um eine zufällige Verteilung aufgrund der geringen Anzahl kleiner Baumscheiben handeln. Diese Besonderheit stellt jedoch die Kernaussage nicht in Frage. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Größe der Baumscheibe und der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen besteht. Je größer die Baumscheibe, desto geringer ist die Häufigkeit von Schäden.

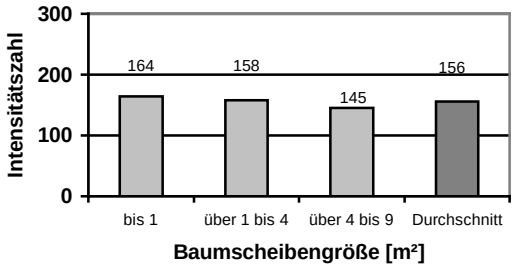
b) Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen

Mit zunehmender Baumscheibengröße nimmt die Intensitätszahl als Quantifizierung für das Ausmaß von Schäden ab. Dies gilt sowohl für Schäden an Wegedecken (Darstellung 39) als auch für Schäden an Randeinfassungen (Darstellung 40). Bei den Randeinfassungen ist das Ausmaß der Schäden insgesamt geringer und die Unterschiede zwischen den Klassen sind weniger deutlich. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen der Größe der Baumscheibe und dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen. Je größer die Baumscheibe, desto geringer ist das Ausmaß der Schäden.

Darstellung 39: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Baumscheibengrößen



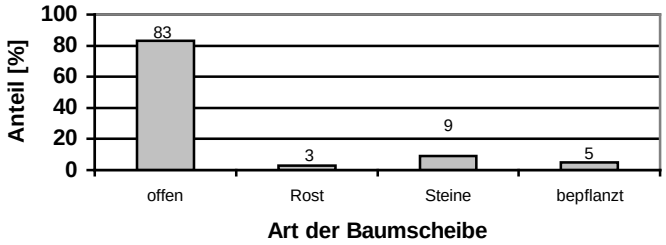
Darstellung 40: Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Baumscheibengrößen



3.5.4 Art der Baumscheibe

Mit über 4/5 der kartierten Standorte zählt der weitaus größte Teil der Baumscheiben zu den offenen Baumscheiben (Darstellung 41; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 10, Anhang).

Darstellung 41: Prozentuale Zusammensetzung der Baumscheiben



Der Einfluss der Art der Baumscheibe kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht sicher bestimmt werden:

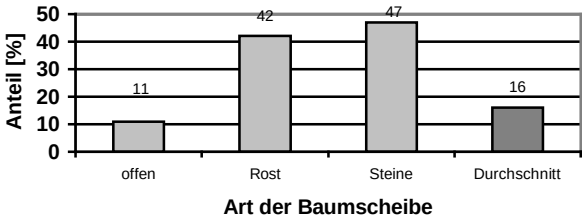
(1) Die Durchschnittswerte werden maßgeblich durch die Ergebnisse für offene Baumscheiben bestimmt. Der Bezug auf den Durchschnittwert ist somit immer auch ein Bezug auf eine bestimmte Art der Baumscheibe.

(2) Die übrigen kartierten Parameter weichen deutlich von den Durchschnittwerten ab. Das bedeutet, dass die Randbedingungen nicht annähernd konstant sind und somit andere Einflussfaktoren die Ergebnisse für den Einflussfaktor „Art der Baumscheibe“ zu stark überlagern. Ein direkter Vergleich ist daher unzulässig. Insbesondere die geringeren Stammdurchmesser und die damit verbundene geringere Baumgröße bei „Rost“ und „bepflanzt“ dürften die Ergebnisse beeinflusst haben. Sie sind bedingt durch die Tatsache, dass zum einen Roste bei älteren Bäumen häufig entfernt werden, da sie stark angehoben sind oder der Ausschnitt für den Stammfuß zu klein geworden ist. Zum anderen sind bepflanzte Baumscheiben hauptsächlich bei jüngeren Bäumen vorzufinden, da sie bei älteren Bäumen durch die hohe Wurzelkonkurrenz bzw. Trockenheit nur mit hohem Pflegeaufwand zu halten ist. Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus den Randeinfassungen: Roste für Baumscheiben lagern oftmals zumindest im Randbereich auf einem Metallrahmen. Je nach Tiefe könnte dieser eine Barrierewirkung für Baumwurzeln haben. Bei bepflanzten Baumscheiben wurde überdurchschnittlich häufig die Einfassungsart „Mauer, Trog“ kartiert. Bei dieser Einfassungsart wurden seltener Schäden an Verkehrsflächen festgestellt als bei den übrigen (siehe Abschnitt 3.5.6). Beide Abweichungen, die im Stammdurchmesser und die bei den Randeinfassungen, könnten einen starken Einfluss auf die geringere Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen bei den genannten Klassen ausgeübt haben, so dass keine Auswertung vorgenommen werden kann. Eine weitere Aufschlüsselung der Daten analog zu den Gattungen ist aufgrund der geringen Datenzahl nicht sinnvoll.

(3) Veränderungen an Baumscheiben in Form an der Oberfläche sichtbarer Wurzeln oder angehobener Abdeckungen können nur bei offenen Baumscheiben bzw. bei Rosten und Steinen festgestellt

werden. Bei bepflanzten Baumscheiben sind derartige Veränderungen nicht sichtbar. Für die Untersuchung der übrigen Einflussfaktoren werden die Anteile „Wurzeln sichtbar“ und „Abdeckung verändert“ zusammengefasst unter „Veränderung an der Baumscheibe“. Bei der Frage nach dem Einfluss der Art der Baumscheibe auf den Zustand der Baumscheibe ist ein direkter Vergleich der Klassen jedoch nicht zulässig. Einem relativ geringen Anteil oberflächlich sichtbarer Wurzeln bei den offenen Baumscheiben steht ein mehr als vierfach so hoher Anteil veränderter Roste und Steine entgegen (Darstellung 42).

Darstellung 42: Veränderungen an Baumscheiben nach Art der Baumscheibe



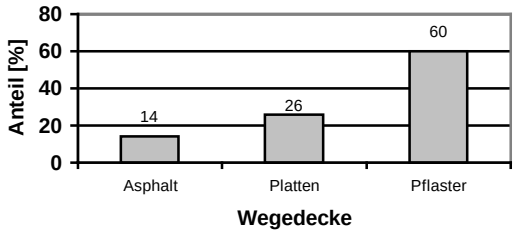
Es ist davon auszugehen, dass auch tiefere Wurzeln, die nicht an der Oberfläche sichtbar sind, eben jene Abdeckungen in ihrer Lage verändern können. Andererseits ist jedoch auch nicht auszuschließen, dass Wurzeln unter Abdeckungen wie Rosten und Steinen durch ausgeglichene Temperaturen, Feuchtigkeit, Schutz vor Tritt- und anderen Belastungen oder Anreicherungen organischer Substanz zu einem verstärkten Wurzelwachstum angeregt werden. Dritte Erklärungsmöglichkeit ist, dass Wurzeln unter aufliegenden Rosten und Steinen, ähnlich wie unter Wegebelägen und Randeinfassungen, Reaktionsholz ausbilden, das eine weitere Ursache für die Anhebung sein kann. Ob und wie stark die genannten Erklärungsmöglichkeiten tatsächlich an dem hohen Anteil angehobener Abdeckungen beteiligt sind, könnte Gegenstand einer gesonderten Untersuchung sein.

Aufschlussreich im Sinne dieser Arbeit ist der bemerkenswert hohe Anteil angehobener Abdeckungen, der mit 42 % (Roste) und 47 % (Steine) mit dem für Wegedecken (48 %) korrespondiert. Unter der Voraussetzung, dass diese Abdeckungen neben dem Schutz der Baumscheibe auch deren Nutzung dienen, ist die Funktionalität dieser Bauweisen stark eingeschränkt. Wie bei den Verkehrsflächen dürfte sich auch hier häufig die Frage nach der Verkehrssicherheit stellen.

3.5.5 Art der Wegedecke

An den untersuchten Standorten wurde am häufigsten Pflaster vorgefunden, gefolgt von Platten und Asphalt (Darstellung 43; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 11, Anhang). Der Belag mit dem höchsten Fugenanteil ist somit am stärksten vertreten.

Darstellung 43: Prozentuale Zusammensetzung der Wegedecken



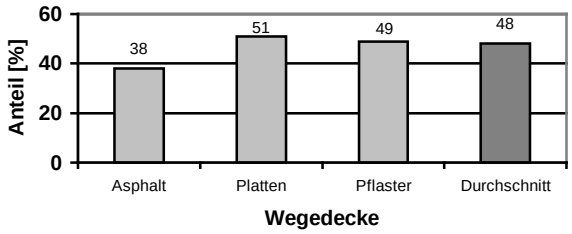
Abschnittsthese:

Die Art der Wegedecke beeinflusst a) die Häufigkeit von Schäden an Wegedecken und b) das Ausmaß von Schäden an Wegedecken.

a) Häufigkeit von Schäden an Wegedecken

Bei Pflaster und Platten treten in der Hälfte der Fälle Schäden auf. Bei Asphalt ist die Häufigkeit geringer (Darstellung 44). Die Art der Wegedecke beeinflusst folglich die Häufigkeit von Schäden an Wegedecken. Platten- und Pflasterbeläge weisen häufiger Schäden auf als Asphaltbeläge.

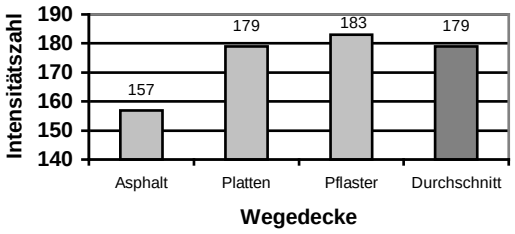
Darstellung 44: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Art der Wegedecke



b) Ausmaß von Schäden an Wegedecken

Platten- und Pflasterbeläge unterscheiden sich auch hinsichtlich des Ausmaßes der Schäden nur geringfügig (Darstellung 45). Asphaltbeläge hingegen weisen eine geringere Intensität auf. Die Art der Wegedecke beeinflusst daher das Ausmaß von Schäden an Wegedecken. Platten- und Pflasterbeläge weisen stärkere Schäden auf als Asphaltbeläge.

Darstellung 45: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Art der Wegedecke



Interpretation

Platten und- Pflasterbeläge lassen sowohl hinsichtlich der Häufigkeit als auch der Intensität der Schäden so gut wie keine Unterschiede erkennen. Asphaltbeläge hingegen sind sowohl weniger häufig als auch weniger stark von Schäden betroffen. Bei Asphalt treten also weniger Schäden auf oder die Schäden sind zeitlich verzögert optisch feststellbar.

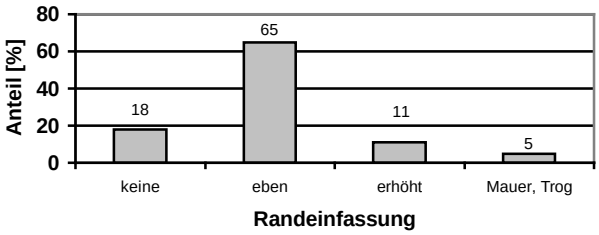
Die Standardbauweisen für Platten- und Pflasterbeläge unterscheiden sich wesentlich von der für Asphaltflächen (siehe Abschnitt 2.1). Platten- und Pflasterbeläge weisen mehrere Gemeinsamkeiten auf: Einzelne Pflastersteine und Gehwegplatten sind in sich starr. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Größe. Die Steine werden in ein Pflasterbett aus Sand oder Splitt verlegt, das durch Wurzeln erschlossen werden kann. Einzelne Pflastersteine oder Platten sind relativ leicht durch Wurzeln geringen Durchmessers anzuheben. Sie treten als hochstehende Kanten im Wegebelag hervor und verursachen so Stolperfallen. Je nach Höhe der Anhebung kippeln die Steine beim Betreten oder Befahren, wobei die Wurzel als Auflager die Kippachse bildet. Insbesondere bei den großformatigen Platten sind Brüche zu beobachten. Bei den kleineren Pflastersteinen tritt dies durch die geringeren Hebelkräfte und häufig auch die größere Materialstärke eher selten auf. Durch diese Eigenschaft des Materials und der Bauweise führen Wurzeln unter Platten- und Pflasterbelägen schnell zu sichtbaren Schäden und Mängeln im Wegebelag. Außerdem weisen diese Beläge im Verband einen hohen Fugenanteil auf. Je kleiner die Steine sind, desto eher können sie von unmittelbar unter der Deckschicht wachsenden Wurzeln aus dem Verband gehoben werden. Tiefer liegende Wurzeln mit größerem Durchmesser verursachen bei kleinteiligem Belag eine sanfte Aufwölbung der Fläche. Diese wird erst bei größerem Durchmesser sichtbar und führt zunächst nicht zwingend zu einer Gefährdung der Verkehrssicherheit. Weiterhin kann vermutet werden, dass die Bedingungen für Wurzelwachstum unter Platten- und Pflasterbelägen durch das hohe Porenvolumen und die bessere Luftführung in der Sandbettung günstiger sind als unter Asphaltflächen.

Asphaltierte Flächen hingegen sind fugenfrei und in gewissem Maße elastisch. Es ist anzunehmen, dass die Wurzeln hier häufig nur in tieferen Bodenschichten wachsen können. Bis ***eine Veränderung*** an Asphaltflächen sichtbar wird, dürfte ein stärkeres Wurzelwachstum erforderlich sein und somit mehr Zeit vergehen. Der Wurzelstrang wird als Aufwölbung an der Oberfläche wahrnehmbar. Eine Verkehrsgefährdung ist erst bei höheren Aufwölbungen gegeben, die schließlich aufreißen und so die Oberfläche zerstören.

3.5.6 Art der Randeinfassung

Mit einem Anteil von zwei Dritteln verfügt der größte Teil der untersuchten Baumstandorte über eine ebene Randeinfassung. Es folgen Baumscheiben ohne Randeinfassung, erhöhte Randeinfassungen und schließlich Mauer- und trogartige Randeinfassungen (Darstellung 46; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 12, Anhang).

Darstellung 46: Prozentuale Zusammensetzung der Randeinfassungen



Abschnittsthese:

Die Art der Randeinfassung beeinflusst

a) die Häufigkeit von Schäden an Wegedecken,

b) das Ausmaß von Schäden an Wegedecken,

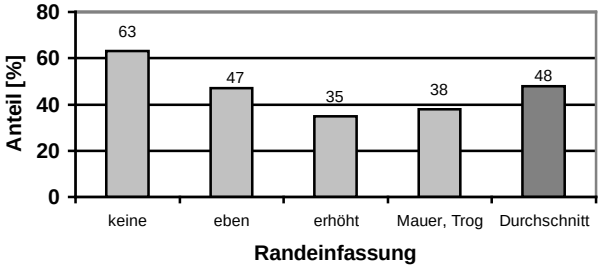
c) die Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen und

d) die Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen.

a) Häufigkeit von Schäden an Wegedecken

Schäden an Wegedecken treten bei fehlender Randeinfassung überdurchschnittlich häufig auf (Darstellung 47). Die Schadenshäufigkeit bei ebenen Randeinfassungen entspricht der durchschnittlichen Häufigkeit von Veränderungen an Wegedecken. Bei erhöhten Randeinfassungen und Mauern bzw. Trögen als Randeinfassung dagegen liegt die Häufigkeit unter dem Durchschnitt. Im Vergleich zur fehlenden Randeinfassung ist die Häufigkeit von Veränderungen an Wegedecken bei erhöhten Randeinfassungen nur annähernd halb so groß. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Art der Randeinfassung die Häufigkeit von Schäden an Wegedecken beeinflusst. Die Schadenshäufigkeit ist bei Wegedecken ohne Randeinfassung am größten. Bei höheren Randeinfassungen ist sie geringer als bei ebenerdigen.

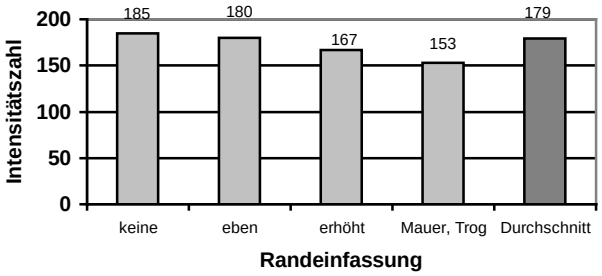
Darstellung 47: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Art der Randeinfassung



b) Ausmaß von Schäden an Wegedecken

Das Ausmaß der Schäden ist bei fehlender Randeinfassung am höchsten und sinkt mit zunehmender Höhe der Randeinfassung (Darstellung 48). Es liegt ohne Randeinfassung über dem Durchschnittsbereich. Ebene Randeinfassungen liegen im Durchschnittsbereich, erhöhte Randeinfassungen und Mauern oder Tröge darunter. Die Art der Randeinfassung beeinflusst folglich das Ausmaß von Schäden an Wegedecken. Ohne Randeinfassung weisen Wegedecken die stärksten Schäden auf. Je höher die Randeinfassung, desto geringer das Ausmaß der Schäden.

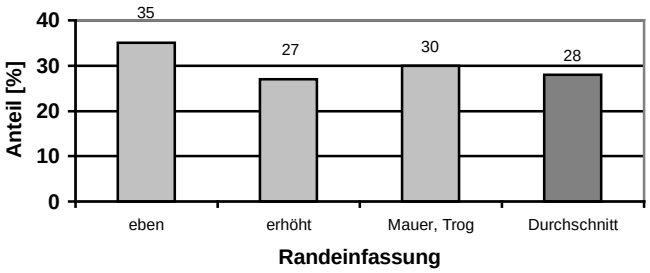
Darstellung 48: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Art der Randeinfassung



c) Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen

Die verschiedenen Arten von Randeinfassungen weisen nur geringe Unterschiede in der Häufigkeit von Schäden auf (Darstellung 49). Insgesamt liegt die Schadenshäufigkeit von ebenen Randeinfassungen jedoch über der von erhöhten Randeinfassungen und Mauern bzw. Trögen als Randeinfassung. Die Art der Randeinfassung beeinflusst somit die Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen. Ebene Randeinfassungen weisen häufiger Schäden auf als erhöhte Randeinfassungen und Mauern oder Tröge.

Darstelung 49: Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Art der Randeinfassung

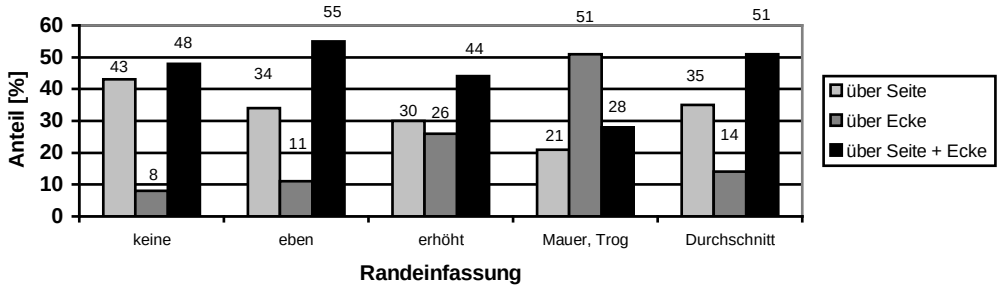


Beim Ausmaß der Schäden beträgt der Anteil schwacher Schäden 46%, der Anteil mittlerer Schäden 52% und der Anteil starker Schäden 2%. Die Schäden sind also insgesamt geringer als bei den Wegedecken. Ein Unterschied im Ausmaß der Schäden beim Vergleich der verschiedenen Arten der Randeinfassung kann nicht festgestellt werden.

d) Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen

Bei Baumscheiben ohne Randeinfassung verläuft ein überdurchschnittlicher Anteil der Schäden ausschließlich über die Seite, während der Anteil ausschließlich über die Ecke unter dem Durchschnitt liegt (Darstellung 50). Bei ebenen Randeinfassungen liegt die Verteilung im Durchschnitt. Bei erhöhten Randeinfassungen verläuft ein überdurchschnittlich hoher Anteil ausschließlich über die Ecken, während der Anteil über Seiten und Ecken etwas unter dem Durchschnitt liegt. Diese Tendenz wird bei Mauern und Trögen noch deutlicher: Hier verlaufen die meisten Schäden ausschließlich über die Ecken, während der Verlauf ausschließlich über Seiten oder über Seiten und Ecken deutlich unter dem Durchschnitt liegt. Die Art der Randeinfassung beeinflusst somit die Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen. Je höher die Randeinfassung ist, desto stärker verlaufen Schäden an Verkehrsflächen ausschließlich über die Ecke und um so weniger Schäden verlaufen ausschließlich über die Seiten.

Darstellung 50: Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen nach Art der Randeinfassung



Interpretation

Sowohl die Häufigkeit von Schäden an Wegedecken als auch deren Ausmaß ist bei fehlender Randeinfassung am höchsten und wird mit zunehmender Höhe der Randeinfassung geringer. Bei erhöhten Randeinfassungen und bei Mauer bzw. Trog als Randeinfassungen verlaufen die Schäden verstärkt über Ecke, während dies bei fehlender Randeinfassung eher selten auftritt. Offenbar ist durch die Randeinfassung eine Barrierewirkung gegeben, die je nach Bauweise schwächer oder stärker ist. Die für diese Untersuchung wesentlichen Unterschiede zwischen den Bauweisen sind:

- Bauhöhe
- Bautiefe, Fundamentierung
- Anzahl Fugen, Anzahl der Elemente
- Gewicht der einzelnen Elemente

Wenn die **Höhe** der Randeinfassung eine Rolle spielt, bedeutet dies, dass die Wurzeln die Randeinfassungen überwachsen. Dies wurde zwar des Öfteren, allerdings nur an den Fugen beobachtet.

Die Höhe der Randeinfassung korrespondiert häufig mit der **Tiefe der Fundamentierung** (in der Regel Beton) und somit mit der potenziellen Barrierewirkung für Wurzeln. Eine Erklärung für die Lokalisierung der Schäden verstärkt über Ecke könnte also sein, dass die Wurzeln mit zunehmender Fundamenttiefe seitlich abgelenkt werden und bei den meist viereckigen Baumscheiben erst in den In-

nenecken der Randeinfassung in die Tiefe geleitet werden, um dann die Baumscheibe bzw. die Pflanzgrube zu verlassen. Gegen diese Annahme spricht, dass erhöhte Randeinfassungen wie Hochborde oder noch höhere Randeinfassungen wie flache Mauerelemente aus Betonfertigteilen oftmals nicht tiefer fundamentiert sind als ebene Randeinfassungen zum Beispiel aus Randsteinen.

Weitere Unterscheidungsmerkmale ergeben sich aus der Größe der einzelnen Bauelemente und somit der **Anzahl der Fugen**. Baumwurzeln können auch engste Fugen durchwachsen und so in den Wegeoberbau eindringen. Für ebene Randeinfassungen werden in der Regel bis zu 1 m lange Kantensteine verwendet. Pro Baumscheibe ergeben sich zwischen acht und zwölf Fugen. Häufig wurden auch hochgestellte Klinkersteine oder Pflasterreihen als Randeinfassung vorgefunden. Die seitliche Fundamentierung, die zugleich die Fugen verschließt, endet in der Regel einige Zentimeter unter der Oberkante des Kanten- oder Bordsteines. Dadurch bleibt genug Platz für die aufliegende Deckschicht der angrenzenden Wegefläche bzw. für die Substratüberdeckung der Baumscheibe. Bei ebenen Randeinfassungen endet die seitliche Fundamentierung unter Bodenniveau. Wurzeln könnte auf diese Weise eine bessere Eindringmöglichkeit gegeben werden als bei Hochborden, wo zumindest die baumseitige Rückenstütze aus Beton auf oder über der Oberkante der angrenzenden Verkehrsfläche endet. Mauerelemente aus Betonfertigteilen, wie sie in den meisten Fällen für „Mauer/Trog“ festgestellt wurden, sind in der Regel großteiliger und verfügen nur in den Ecken über Fugen. Gemauerte oder gegossene Mauern können sogar noch weniger Fugen aufweisen.

Je länger, größer und breiter das einzelne Element der Randeinfassung ist bzw. je stärker die Fundamentierung, desto größer ihr **Gewicht**. Man könnte annehmen, dass schwere Randeinfassungen wie Hochborde oder Mauerelemente weniger leicht von Wurzeln in ihrer Lage verändert werden können als kleinere und leichtere. Allerdings können auch große Granitbordsteine (Gewicht bis 300 kg) oder Mauern von Baumwurzeln angehoben werden, so dass hier allenfalls eine zeitliche Verzögerung zu erwarten ist. Die tatsächliche Hebekraft von Baumwurzeln ist bisher nicht bekannt. Hinsichtlich der Schäden an Wegedecken ist die Gewichtsfrage unerheblich, da sie vermutlich auch angehoben werden können, ohne dass eine Lageveränderung der Randeinfassung bemerkbar ist.

Die plausibelsten Erklärungen liefern bisher die Bauhöhe bzw. -tiefe sowie die Anzahl der Fugen. Sie sind anhand der Fallbeispiele in Kapitel 4 näher zu untersuchen.

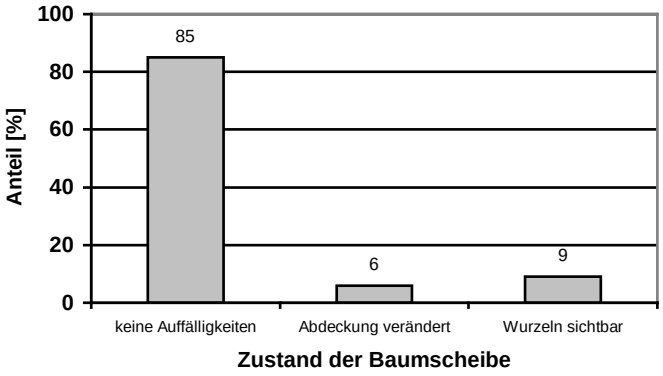
3.6 Auswertung der Schadbilder

Ziel der Auswertung der Schadbilder ist das Erkennen von Zusammenhängen zwischen den Schadbildern. Diese Zusammenhänge sind, anders als bei den Einflussfaktoren, nicht ursächlicher Natur. Als Besonderheit bei der folgenden Auswertung sei darauf hingewiesen, dass auch in der Klasse „kein Schaden“ die Lokalisierung von Schäden angegeben werden kann. Dabei handelt es sich um Schäden ausschließlich an Wegedecken bzw. Randeinfassungen. Dies resultiert daraus, dass sich die Lokalisierung von Schäden auf die gesamte Verkehrsfläche bezieht, während das Ausmaß der Schäden, gemessen als Anzahl wahrnehmbarer Wurzelstränge, für Wegedecken und Randeinfassungen getrennt erhoben wird.

3.6.1 Zustand der Baumscheibe

Bei 15% der Baumscheiben treten keine Veränderungen in Form angehobener Abdeckungen oder sichtbarer Wurzeln auf (Darstellung 51; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 13, Anhang). Zur differenzierten Betrachtung der veränderten Anteile siehe Abschnitt 3.5.4, Darstellung 52. Es sei angemerkt, dass der durchschnittliche Stammdurchmesser der Klasse „Wurzeln sichtbar“ mit 35 cm weit über dem Durchschnitt von 24 cm liegt, „Abdeckung verändert“ mit 26 cm hingegen kaum vom Durchschnitt abweicht. Der Einfluss des Stammdurchmessers ist hier also stark. Abdeckungen werden bei größeren Bäume in der Regel entfernt, wenn die Öffnungen am Stammfuß zu klein werden oder aufgekantete Roste und Steine die Verkehrssicherheit gefährden. Größere bzw. ältere Bäume, bei denen häufigere und im Ausmaß stärkere Schäden auftreten, wurden daher bei den Abdeckungen kaum erfasst.

Darstellung 51: Prozentuale Zusammensetzung des Zustands der Baumscheibe



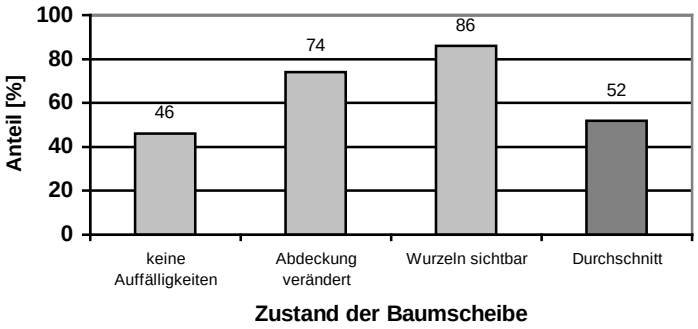
Abschnittsthese:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Baumscheibe und a) der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen und b) dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen.

a) Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen

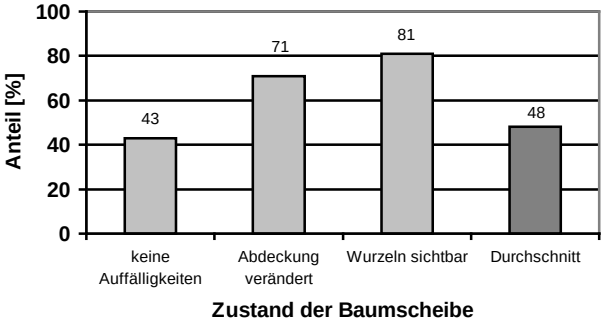
Bei veränderter Abdeckung oder an der Oberfläche sichtbaren Wurzeln ist die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen überdurchschnittlich hoch (Darstellung 52). Die Tendenz zu mehr Schäden tritt bei den oberflächlich sichtbaren Wurzeln deutlicher hervor als bei den veränderten Abdeckungen (Stahlroste oder Steine). Bei Baumscheiben ohne Auffälligkeiten hingegen liegt die Häufigkeit knapp unter dem Durchschnittsbereich.

Darstellung 52: Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen nach Zustand der Baumscheibe

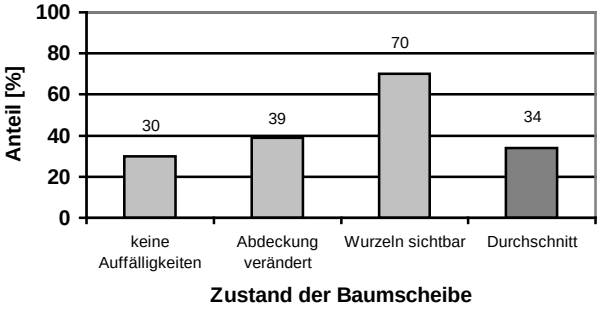


Diese Aussage wird durch die differenzierte Betrachtung von Wegedecken und Randeinfassungen bestätigt. Allerdings wird bei den Randeinfassungen der Unterschied der Schadenshäufigkeit bei den oberflächlich sichtbaren Wurzeln im Vergleich zu den veränderten Abdeckungen noch deutlicher als bei den Wegedecken (Darstellung 53 u. 54). Dies spricht für die Vermutung, dass Veränderungen der Abdeckungen eher bzw. früher wahrnehmbar werden, als oberflächlich sichtbare Wurzeln (siehe Abschnitt 3.5.4). Ferner bestätigt sich, dass es offenbar länger dauert, bis Schäden an Randeinfassungen auftreten, da es hierzu stärkerer Wurzeln bedarf (siehe Abschnitt 3.5.6).

Darstellung 53: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Zustand der Baumscheibe



Darstellung 54: Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Baumscheibe

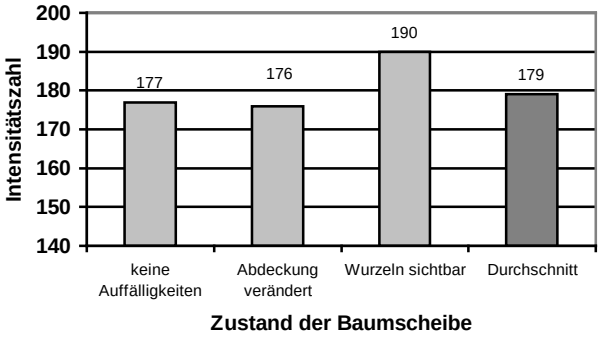


Es gilt: Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Baumscheibe und der Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen. Bei oberflächlich sichtbaren Wurzeln liegt die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen deutlich über dem Durchschnittswert. Bei veränderten Abdeckungen der Baumscheibe (Roste, Steine) ist diese Tendenz schwächer.

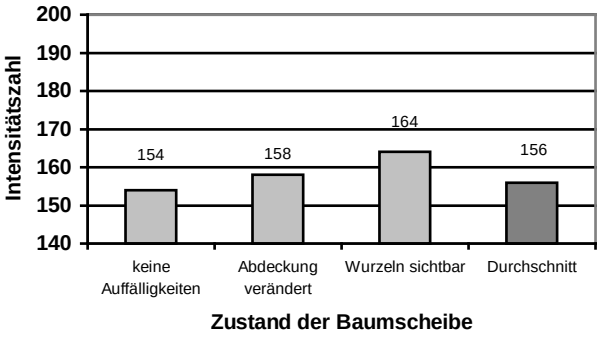
b) Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen

Wenn Wurzeln an der Oberfläche sichtbar sind, ist gleichzeitig das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen überdurchschnittlich hoch (Darstellung 55 u. 56). Dies gilt sowohl für Schäden an Wegedecken als auch an Randeinfassungen.

Darstellung 55: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Zustand der Baumscheibe



Darstellung 56: Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Baumscheibe

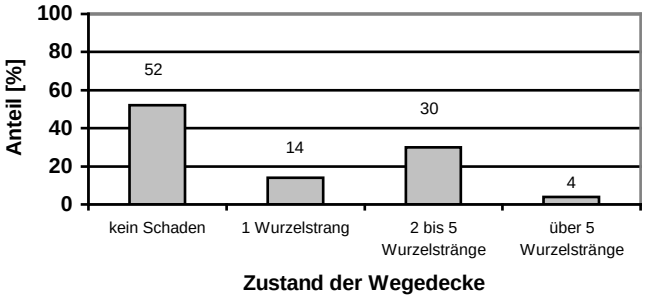


Veränderungen an Baumscheibenabdeckungen hingegen zeigen keinen Zusammenhang mit dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen. Dies bestätigt abermals die Vermutung, dass Veränderungen der Abdeckungen eher bzw. früher wahrnehmbar werden, als oberflächlich sichtbare Wurzeln (siehe oben, siehe Abschnitt 3.5.4). Zwischen dem Zustand der Baumscheibe und dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen besteht deshalb ein Zusammenhang. Bei oberflächlich sichtbaren Wurzeln liegt das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen deutlich über dem Durchschnittswert.

3.6.2 Zustand der Wegedecke

Über die Hälfte der Wegedecken sind schadensfrei. Bei den geschädigten Wegedecken liegt in rund der Hälfte der Fälle ein mittelstarker Schaden mit 2 bis 5 Wurzelsträngen vor (Darstellung 57; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 14, Anhang).

Darstellung 57: Prozentuale Zusammensetzung des Zustands der Wegedecke



Abschnittsthese:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Wegedecke und

a) der Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen,

b) dem Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen,

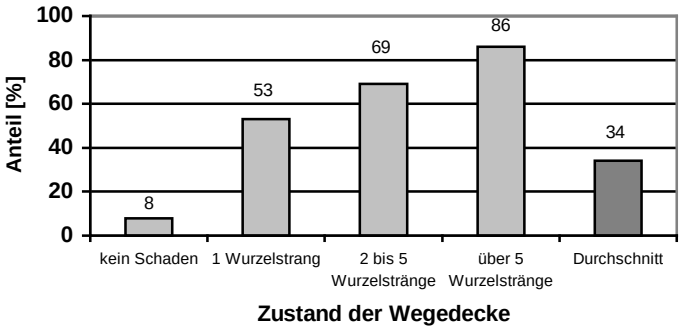
c) der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben und

d) der Lokalisierung von Schäden.

a) Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen

Die Häufigkeit der Schäden an Randeinfassungen steigt mit zunehmendem Ausmaß der Schäden an Wegedecken (Darstellung 58).

Diagramm 58: Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Wegedecke

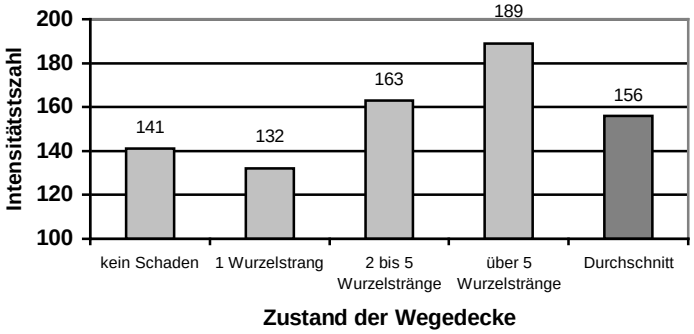


Es lässt sich also ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Wegedecke und der Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen ableiten. Je größer das Ausmaß der Schäden an einem Standort, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass auch die Randeinfassung geschädigt ist.

b) Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen

Das Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen steigt mit zunehmendem Ausmaß der Schäden an Wegedecken, so überhaupt ein Schaden an der Wegedecke vorliegt (Darstellung 59).

Darstellung 59: Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Zustand der Wegedecke



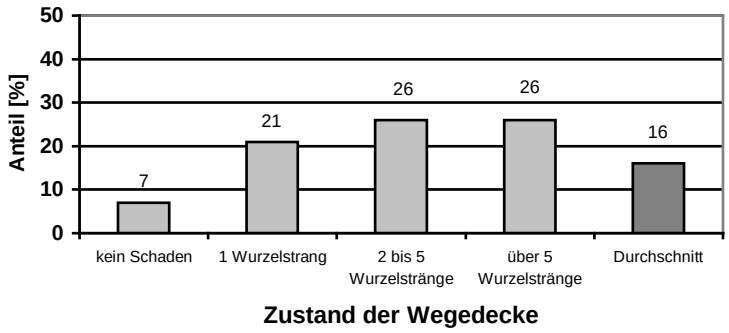
Bei einem Schaden an der Randeinfassung ohne Schaden an der Wegedecke liegt das Ausmaß dieses Schadens zwar unter dem Durchschnittsbereich, ist jedoch etwas größer als bei der niedrigsten Schadensklasse (1 Wurzelstrang) der Wegedecken. Diese Beobachtung ist nicht erklärbar, da Wurzeln zunächst die Randeinfassung passieren müssen, bevor sie in den Oberbau der Wegedecke eindringen können. Unter der Vorraussetzung, dass Wegedecken häufiger und stärker geschädigt werden als Randeinfassungen (siehe Abschnitte 3.5.5., 3.3.6), ist bei den gering geschädigten Wegedecken ein höheres Schadensmaß an der Randeinfassung zu erwarten als bei den nicht geschädigten Wegedecken. Ob es sich hier um eine zufällige Abweichung von den zu erwartenden Werten handelt oder aber eine plausible Erklärung aus dem Wurzelwachstum unter Verkehrsflächen abzuleiten ist,

kann allein aufgrund der Kartierung durch Inaugenscheinnahme nicht geklärt werden. Insgesamt jedoch gilt, dass ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Wegedecke und dem Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen besteht. Je größer das Ausmaß der Schäden an einem Standort, an dem ein Schaden an der Wegedecke vorliegt, desto größer das Ausmaß der Schäden an der Randeinfassung.

c) Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben

Die Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben ist bei Standorten mit Schäden an Wegedecken größer als an schadensfreien Standorten. Bei Schäden mittlerer und höchster Intensität (2 bis 5 und über 5 Wurzelstränge; Darstellung 60) besteht diesbezüglich kein Unterschied. Mit maximal 26 % bewegt sich diese Häufigkeit auf eher geringem Niveau.

Darstellung 60: Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Zustand der Wegedecke

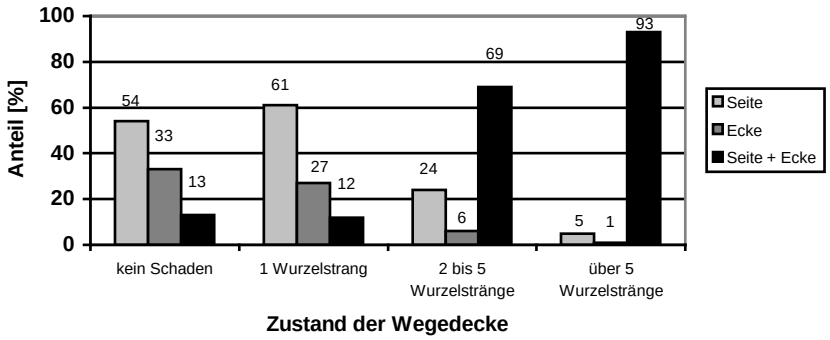


Es gilt: Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Wegedecke und der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben. An Standorten mit Schäden an der Wegedecke ist die Häufigkeit höher als an Standorten ohne Schäden.

d) Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen

Mit zunehmendem Ausmaß der Schäden an Wegedecken sinkt der Anteil der Schäden, die ausschließlich über die Seiten oder über die Ecken verlaufen, während der Anteil der Schäden, die über Seiten und Ecken verlaufen, zunimmt (Darstellung 61).

Darstellung 61: Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen nach Zustand der Wegedecke

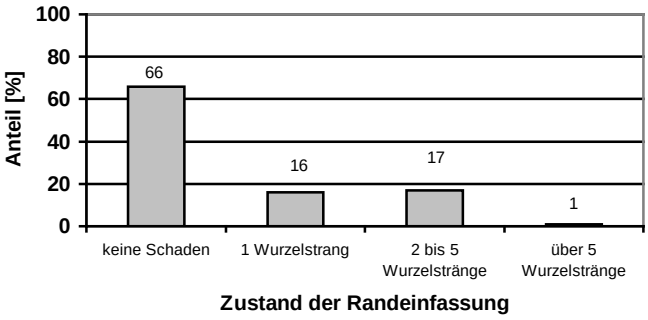


Die Werte für die Klassen „kein Schaden“ (also Schaden ausschließlich an der Randeinfassung) und „ein Wurzelstrang“ weisen geringe Unterschiede auf. Insgesamt verlaufen weniger Schäden ausschließlich über die Ecken als ausschließlich über die Seiten. Ab 2 bis 5 Wurzelsträngen kehrt sich das Verhältnis der Lokalisierung um und die Schäden verlaufen verstärkt sowohl über die Seiten als auch über die Ecken. Es ist daher ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Wegedecke und der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen feststellbar. Je größer das Ausmaß der Schäden an Wegedecken, desto mehr Schäden verlaufen sowohl über die Seiten als auch die Ecken von Baumscheiben, während der Anteil ausschließlich über die Seiten oder über die Ecken verlaufender Schäden abnimmt.

3.6.3 Zustand der Randeinfassung

Bei den Baumstandorten, die über eine Randeinfassung verfügen, treten in 66 % der Fälle keine Schäden an Verkehrsflächen auf (Darstellung 62; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 15, Anhang). Somit ist der Anteil schadensfreier Standorte größer als der Anteil schadensfreier Wegedecken mit 52 %. Dies unterstützt die Annahme, dass Randeinfassungen aufgrund ihrer massiveren Bauweise weniger häufig und weniger stark von Schäden betroffen sind.

Darstellung 62: Prozentuale Zusammensetzung des Zustands der Randeinfassung



Für das höchste Schadensmaß (über 5 Wurzelstränge) wird im weiteren keine Aussage getroffen, da in dieser Klasse nur 16 Exemplare kartiert wurden.

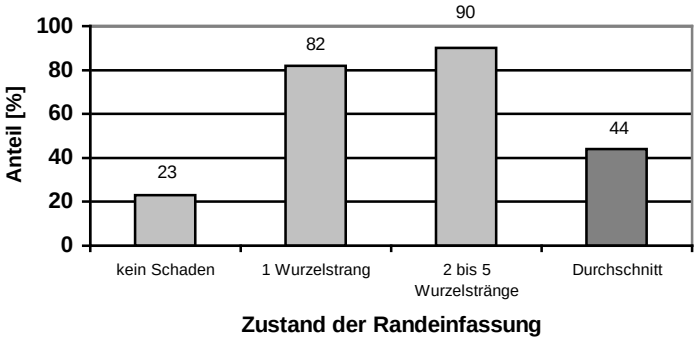
Abschnittsthese:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Randeinfassung und
a) der Häufigkeit von Schäden an Wegedecken,
b) dem Ausmaß von Schäden an Wegedecken,
c) der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben und
d) der Lokalisierung von Schäden.

a) Häufigkeit von Schäden an Wegedecken

Analog zu den Wegedecken (Abschnitt 3.6.2) steigt die Häufigkeit der Schäden an Wegedecken mit zunehmendem Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen (Darstellung 63). Ein alleiniger Schaden der Wegedecken ist bei 23% der untersuchten Standorte zu verzeichnen.

Darstellung 63: Häufigkeit von Schäden an Wegedecken nach Zustand der Randeinfassung

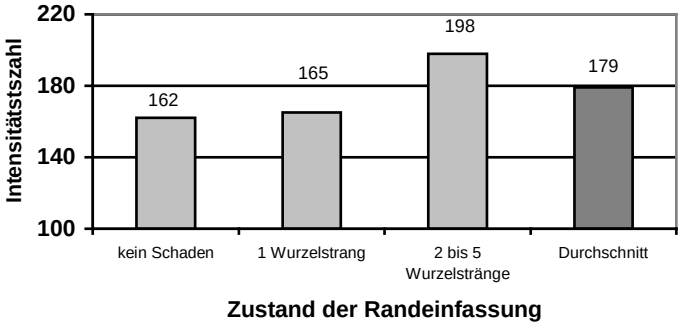


Daraus lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Randeinfassung und der Häufigkeit von Schäden an Wegedecken ableiten. Je größer das Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass auch die Wegedecke geschädigt ist.

b) Ausmaß von Schäden an Wegedecken

Das Ausmaß der Schäden an Wegedecken ist bei einem mittelstarken Schaden an der Randeinfassung (2 bis 5 Wurzelstränge) höher als bei einem geringen Schaden (1 Wurzelstrang) bzw. wenn kein Schaden vorliegt (Darstellung 64).

Darstellung 64: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Zustand der Randeinfassung

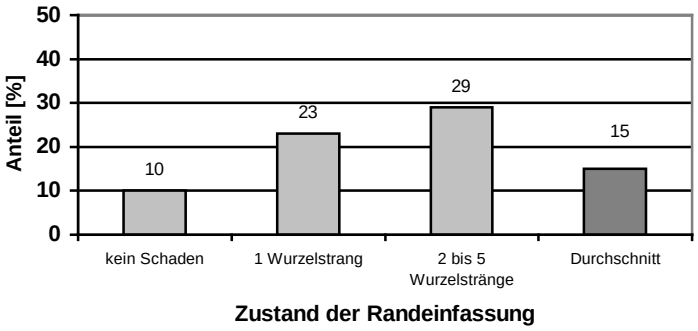


Daher gilt: Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Randeinfassung und dem Ausmaß von Schäden an Wegedecken. Je größer das Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen an einem Standort, an dem ein Schaden an der Wegedecke vorliegt, desto größer das Ausmaß der Schäden an der Wegedecke.

c) Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben

Die Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben steigt mit dem Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen (Darstellung 65). Das Niveau liegt geringfügig höher als bei der Auswertung „Zustand der Wegedecke“ (Abschnitt 3.6.2) und die steigende Tendenz ist etwas deutlicher.

Darstellung 65: Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nach Zustand der Randeinfassung

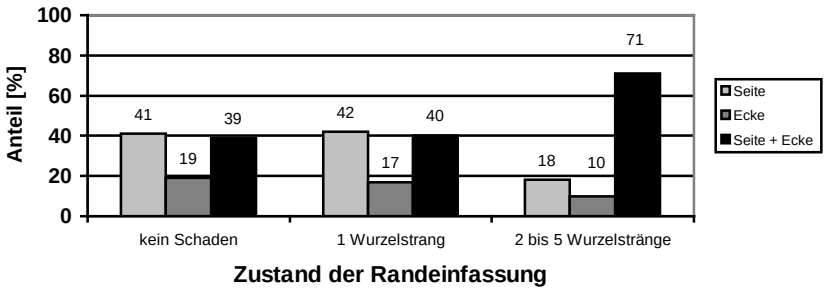


Es gilt: Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Randeinfassung und der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben. Je größer das Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen, desto größer die Häufigkeit von Veränderungen an der Baumscheibe.

d) Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen

Wie bei den Wegedecken sinkt mit steigendem Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen der Anteil der Schäden, die ausschließlich über die Seiten oder über die Ecken verlaufen, während der Anteil der Schäden, die über Seiten und Ecken verlaufen, zunimmt (Darstellung 66). Insgesamt verlaufen weniger Schäden ausschließlich über die Ecken als ausschließlich über die Seiten (siehe Abschnitt 3.6.1). Da für die höchste Schadensklasse aufgrund unzureichender Datenmenge keine Auswertung vorgenommen werden kann, kann der Trend weniger deutlich als bei den Wegedecken herausgearbeitet werden. Analog zu den Wegedecken zeigen die Werte für die Klassen „kein Schaden“ (also Schaden ausschließlich an Wegedecken) und „ein Wurzelstrang“ kaum Unterschiede hinsichtlich der Lokalisierung.

Darstellung 66: Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen nach Zustand der Randeinfassung

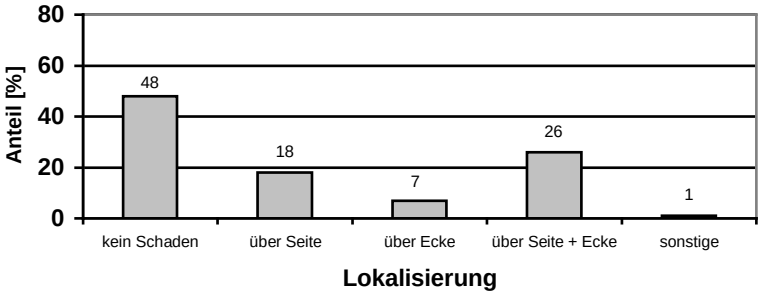


Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Randeinfassung und der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen. Bei größerem Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen verlaufen die Schäden verstärkt sowohl über die Seiten als auch über die Ecken von Baumscheiben, während der Anteil ausschließlich über die Seiten oder über die Ecken verlaufender Schäden abnimmt.

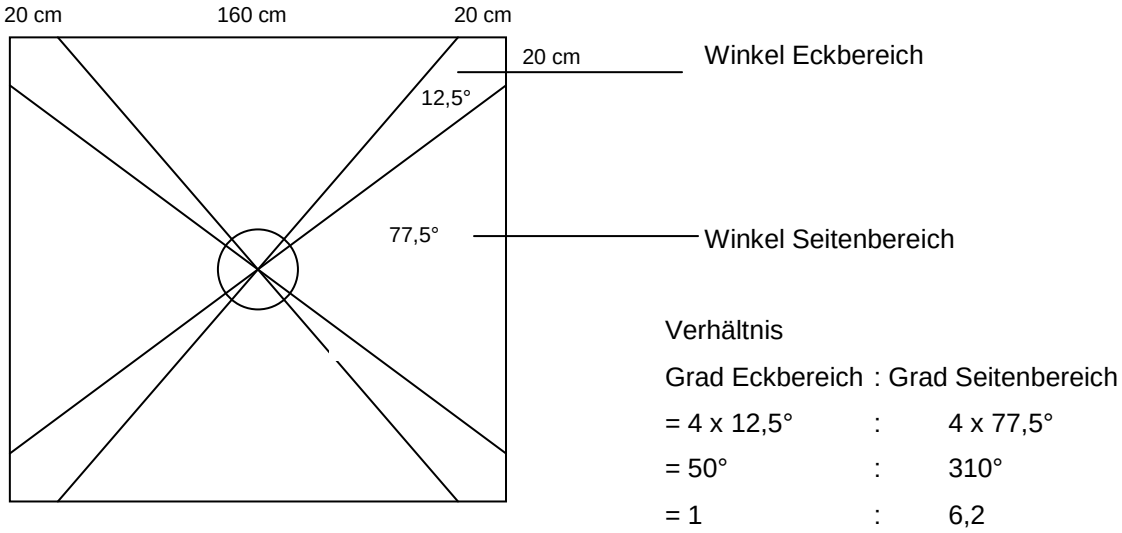
3.6.4 Lokalisierung

Rund die Hälfte der Schäden verläuft über die Seiten und die Ecken der meist viereckigen Baumscheiben (Darstellung 67; vollständiger Datensatz siehe Tabelle 16, Anhang). Es folgen Schäden ausschließlich über Seite mit ca. einem Drittel der Schäden, danach die Schäden ausschließlich über Ecke. Alle anderen Klassen (Schadensverlauf über den Wurzelanlauf) liegen zusammen unter einem Prozent und sind mit 11 kartierten Exemplaren für die Untersuchung unerheblich.

Darstellung 67: Prozentuale Zusammensetzung der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen



Schäden an Verkehrsflächen verlaufen in der Relation häufiger über die Ecken von Baumscheiben als über die Seiten. Überschlägig wird anhand der Größe der Winkel der verschiedenen Segmente einer Baumscheibenfläche errechnet, wie hoch der theoretische Anteil an Schäden ausschließlich über Ecke sein müsste, wenn von einer Gleichverteilung des Wurzelwachstums ausgegangen wird (siehe Darstellung 68). Das Verhältnis „über Ecke“ zu „über Seite“ beträgt 1 : 6,2. Das tatsächliche Verhältnis der kartierten Werte beträgt 1 : 2,5. Demnach ist der tatsächliche Anteil an Schäden über Ecke 2,5fach höher als bei der Gleichverteilung theoretisch zu erwarten wäre. Daraus lässt sich ableiten, dass Schäden relativ häufiger über die Ecke als über die Seite von Baumscheiben verlaufen. Aus der Klasse „über Seite und über Ecke“ können diesbezüglich keine Erkenntnisse gewonnen werden, da keine differenzierte Erhebung vorgenommen wurde.



Baumscheibengröße 2 m x 2 m

Darstellung 68: Berechnungsgrundlage für das Verhältnis von Eck- zu Seitenbereichen

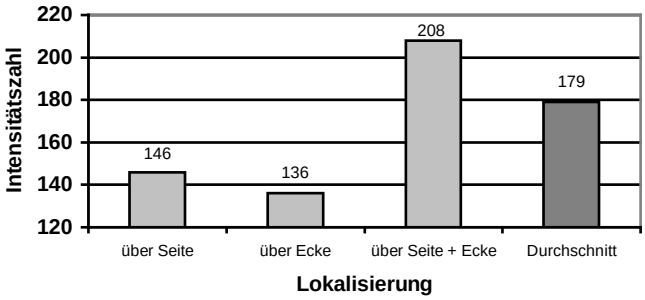
Abschnittsthese:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen und
a) dem Ausmaß von Schäden an Wegedecken und
b) dem Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen.

a) Ausmaß von Schäden an Wegedecken

Das Ausmaß der Schäden an Wegedecken ist bei der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen „über Seite und Ecke“ sehr viel höher, als wenn die Schäden entweder „über Seite“ oder „über Ecke“ verlaufen (Darstellung 69).

Darstellung 69: Ausmaß der Schäden an Wegedecken nach Lokalisierung

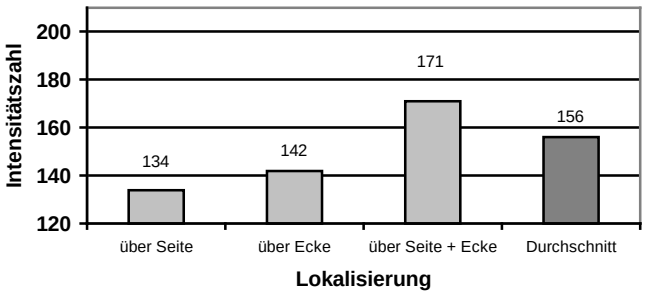


Es gilt: Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen und dem Ausmaß von Schäden an Wegedecken. Bei der Lokalisierung der Schäden „über Seite und Ecke“ liegen stärkere Schäden vor als bei dem Verlauf von Schäden entweder „über Seite“ oder „über Ecke“

b) Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen

Das Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen ist, wie das Ausmaß der Schäden an Wegedecken, bei der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen „über Seite und Ecke“ am höchsten (Darstellung 70). Es ist bei der Lokalisierung der Schäden „über Ecke“ größer, als bei der Lokalisierung „über Seite“. Das Ausmaß der Schäden an Wegedecken erreicht dagegen in dieser Klasse den niedrigsten Wert (siehe Abschnitt 3.6.2) Dies unterstreicht abermals die Bedeutung der Randeinfassung für die Lokalisierung der Schäden und somit ihren Einfluss auf den Schadensverlauf.

Darstellung 70: Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen nach Lokalisierung



Es gilt: Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen und dem Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen. Bei der Lokalisierung der Schäden „über Seite und Ecke“ liegen deutlich stärkere Schäden an der Randeinfassung vor als bei dem Verlauf von Schäden „über Seite“ oder „über Ecke“.

3.7 Ergebnis und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kartierung zusammengefasst und diskutiert. Die Kartierung hat die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln offengelegt und Hinweise auf die zugrunde liegenden Einflussfaktoren und Zusammenhänge (Schadensmuster) gegeben. Es lassen sich ursächliche Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Schadbildern sowie phänomenologische Zusammenhänge bei den Schadbildern untereinander ableiten.

3.7.1 Dimension der Problematik

Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln sind keine Seltenheit: Über die Hälfte der untersuchten Verkehrsflächen um Bäume weisen Schäden durch Baumwurzeln auf. Bei 48 % liegt ein Schaden an der Wegedecke, bei 34 % ein Schaden an der Randeinfassung vor. Über die Hälfte der Schäden sind mittelstarke Schäden, lassen also 2 bis 5 Wurzelstränge erkennen. Die Schäden an Randeinfassungen sind insgesamt seltener und im Ausmaß etwas geringer als bei den Wegedecken. 6 % der Verkehrsflächen besitzen veränderte Baumscheibenabdeckungen aus Stahlrosten oder Steinen, das sind 45 % aller Standorte mit Baumscheibenabdeckung. Die Schadensquote ist also ähnlich hoch wie bei den Wegedecken. Da man sie als zu der Verkehrsfläche gehörig betrachten kann, geht auch hiervon in vielen Fällen eine Gefährdung der Verkehrssicherheit aus.

Die angegebenen Durchschnittwerte umfassen alle kartierten Standorte, also auch Neupflanzungen, bei denen kein Schaden zu erwarten ist. Die Schadensrate für Verkehrsflächen steigt mit zunehmendem Stammdurchmesser und beträgt 67 % für Bäume mit einem Stammdurchmesser von 21 bis 35 cm, 81 % bei 35 bis 50 cm und 84 % ab 50 cm Stammdurchmesser. Zusammen mit dem Sachverhalt, dass ständig Ausbesserungen an Verkehrsflächen durchgeführt werden und ein Teil der Schäden daher nicht sichtbar ist, ergibt sich, dass nahezu jeder Baum früher oder später zu Schäden an Verkehrsflächen führt, die zur Wahrung der Verkehrssicherheit behoben werden müssen. Das Problem erreicht somit eine nennenswerte Dimension.

Eine Vergleichbarkeit der Schadenshäufigkeit und des Schadensausmaßes mit Ergebnissen anderer wissenschaftlicher Untersuchungen ist nur sehr bedingt möglich. Zum einen weichen sowohl die Rahmenbedingungen als auch die Untersuchungs- bzw. Kartiermethoden von der hier vorgestellten Untersuchung ab (siehe Kapitel 2). Zum anderen sind die Häufigkeiten weder bei WAGAR und BARKER (1983) noch bei FRANCIS, PARRESOL und DE PATIÑO (1996) in den recherchierten Veröffentlichungen genannt. HAMILTON berichtet von einer Schadenshäufigkeit von 60 %, die bei einer Untersuchung in Städten der San Francisco Bay Area (1974) festgestellt wurde (HAMILTON 1984a, 37). WONG, GOOD und DENNE verzeichneten bei ihrer Untersuchung in Manchester bei 30 % der Fälle Schäden an der

Verkehrsfläche. Bordsteine wurden zu 13 % geschädigt und gingen mit einem Schaden an der Wegedecke einher (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 28). Der Anteil geschädigter Verkehrsflächen ist also geringer als in der vorliegenden Untersuchung. Da nach eigenen Beobachtungen vor Ort (Reichwein 1998) der Zustand der Verkehrsflächen um Bäume in Manchester augenscheinlich nicht besser ist als hierzulande, sondern im Gegenteil offenbar wesentlich höhere Anhebungshöhen toleriert werden, dürfte ein Grund für die niedrigere Schadensrate in der Art der Erhebung liegen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden bereits sehr geringe Veränderungen als „Schaden“ gerechnet, sofern sie auf Wurzelaktivität zurückzuführen waren. Übereinstimmung zeigt sich hingegen bei der niedrigeren Schadensrate für die Bordsteine, wenngleich die Anteile im Vergleich zu den Wegedecken differieren. Übereinstimmend ist ein hoher Prozentsatz von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln festzustellen.

3.7.2 Einflussfaktoren

Bei den für die Kartierung angenommenen potenziellen Einflussfaktoren erweist sich lediglich die Art der Baumscheibe für die untersuchte Fragestellung als nicht relevant. Die festgestellten ursächlichen Zusammenhänge sind als Übersicht in Tabelle 6 aufgeführt.

Schadbilder / Einflussfaktoren	Veränderungen an Baumscheiben	Schäden an Verkehrsflächen				Lokalisierung
		Schäden an Wegedecken		Schäden an Randeinfassungen		
		Häufigkeit	Ausmaß	Häufigkeit	Ausmaß	
Gattung	X	X	X	X	X	
Stammdurchmesser	X	X	X	X	X	
Baumscheibengröße		X	X	X	X	
Art Baumscheibe						
Art Wegedecke		X	X			
Art Randeinfassung		X	X	X		X

Tabelle 6: Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Schadbildern

Die Einflussfaktoren können sich überlagern, da bei der durchgeführten Vorgehensweise anders als zum Beispiel bei Laborversuchen die Randbedingungen zur Betrachtung eines Merkmals nicht konstant gehalten werden können. Eine Quantifizierung der Bedeutung der Einflussfaktoren für die Schadensrate ist auf Grundlage dieser Kartierung nicht möglich. Durch Einschätzung der Relevanz kann allerdings eine plausible Rangfolge der Einflussfaktoren erstellt werden:

I. Stammdurchmesser
II. Art der Randeinfassung
III. Baumscheibengröße
IV. Gattung
V. Art der Wegedecke

I. Stammdurchmesser

Für den Stammdurchmesser als Indikator für Baumalter und Wuchsstärke kann ein Zusammenhang mit der Häufigkeit und dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen sowie der Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben nachgewiesen werden. Kleine, jüngere bzw. schwachwüchsige Bäume besitzen demnach ein geringeres Schadpotential. Bereits ab einer Stammdurchmesserklasse von 21 bis 35 cm (reifer Baum) wurden in 67 % der untersuchten Fälle Schäden an Verkehrsflächen verzeichnet. Bei der differenzierten Betrachtung von Wegedecke und Randeinfassung zeigt sich, dass das Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen erst bei den beiden größten Stammdurchmesserklassen steigt. Für alle untersuchten Merkmale kann eindeutig festgestellt werden, dass die Schadenshäufigkeit und das Schadensausmaß mit zunehmendem Stammdurchmesser steigen. Die Baumgröße, gemessen als Stammdurchmesser, wird daher als gewichtigster Einflussfaktor bewertet. Ein Zusammenhang zwischen Stammdurchmesser und Lokalisierung der Schäden kann anhand der Untersuchung nicht festgestellt werden.

Andere wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen den deutlichen Einfluss von Baumgröße, Baumalter und Wuchsstärke, der sich im Stammdurchmesser ausdrückt (WAGAR u. BARKER 1983; WONG, GOOD u. DENNE 1988; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1996). FRANCIS, PARRESOL und DE PATIÑO nahmen eine sehr genaue statistische Auswertung des Zusammenhangs zwischen Stammdurchmesser und Schäden vor und entwickelten daraus ein mathematisches Modell. Sie stellen fest, dass die Wahrscheinlichkeit eines Schadens bei geringeren Stammdurchmessern nur langsam steigt, bis eine Art „Schwellendurchmesser“ erreicht wird, ab dem die Wahrscheinlichkeit stark steigt (FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1998, 196). WONG, GOOD und DENNE geben für die meisten der untersuchten Baumarten als Schwellenwert für die Entstehung von Schäden einen Stammdurchmesser von 11 bis 20 cm an (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32). HAMILTON kommt anhand einer Untersuchung in 15 Städten der SAN FRANCISCO BAY AREA (1975) zu dem Ergebnis, dass die Dauer, bis Schäden an Verkehrsflächen sichtbar werden, im Durchschnitt 15 Jahre beträgt mit einer Schwankungsbreite zwischen 7 und 20 Jahren. Er erwähnt eine andere Schätzung, wonach die Dauer mit 14 Jahren anzusetzen ist (HAMILTON 1984a, 37). Danach ist für ihn ein Zusammenhang zwischen Baumalter und der Neigung zu Belagsanhebungen nicht erkennbar (HAMILTON 1984a, 42). Im Widerspruch dazu erwähnt er jedoch eine Beobachtung von HARRIS, wonach die Probleme eher von jungen, wüchsigen Bäumen verursacht werden als von reifen Bäumen, die ihre endgültige Größe fast erreicht haben (HARRIS 1983, zitiert in: HAMILTON 1984a, 42f.). Diese Aussagen gelten ausschließlich für die jeweiligen Untersuchungen. Zu viele Einflüsse wie Pflanzqualität, Standort, Pflanzung und Pflege, Bauweise der Verkehrsfläche, Baumart und Klima sind in Hinblick auf die Frage, wann mit Schäden zu rechnen ist, zu berücksichtigen, als dass diese Werte generalisiert werden könnten. Übereinstimmung ist jedoch darin gegeben, dass Baumgröße, Baumalter, Wuchskraft bzw. Zuwachsraten, Standzeit und Entwicklungsphase entscheidende Faktoren bei der Entstehung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln sind.

II. Art der Randeinfassung

Die Art der Randeinfassung beeinflusst die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden an Wegedecken, die Häufigkeit von Schäden an Randeinfassungen sowie die Lokalisierung der Schäden. Bei fehlender Randeinfassung ist die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen am größten. Randeinfassungen vermindern die Häufigkeit von Schäden an Wegedecken. Mit zunehmender Höhe der Randeinfassung nimmt auch das Ausmaß der Schäden an Wegedecken ab und die Schäden verlaufen vermehrt über die Ecken der Baumscheibe. Diese Beobachtung unterstützt die Vermutung, dass Randeinfassungen eine Barriere für Wurzeln darstellen und so einen gewissen Schutz vor Schäden bieten. Insgesamt zeigen höhere Varianten sowie Bauweisen mit wenigen Fugen die größte Wirksamkeit. Die Barrierewirkung von Randeinfassungen und die Lenkungsfunktion für Baumwurzeln soll anhand der Fallbeispiele (Kapitel 4) näher untersucht werden. Hinsichtlich der Schadensanfälligkeit der Randeinfassung selbst weisen ebene Bauweisen eine leicht erhöhte Schadenshäufigkeit auf. Die Randeinfassung ist der einzige Einflussfaktor auf die Lokalisierung der Schäden. Auch lässt sich eine Lenkungsfunktion ableiten. Die Randeinfassung besitzt daher insgesamt eine große Relevanz für Schäden an Verkehrsflächen.

Ein Zusammenhang zwischen Art der Randeinfassung und Zustand der Baumscheibe konnte nicht festgestellt werden. Nicht geklärt werden kann die Beobachtung, dass bei Mauern und Trögen ein größerer Teil der Standorte entweder Schäden der Wegedecke oder der Randeinfassung aufweist, seltener jedoch Schäden an Randeinfassung und Wegedecke zugleich.

Andere Autoren haben den Einfluss der Randeinfassung weniger explizit untersucht. Aus den Untersuchungen geht jedoch ebenfalls hervor, dass Bordsteine (engl. kerb, am. curb; eine Differenzierung verschiedener Bauweisen wird nicht vorgenommen) im Durchschnitt seltener bzw. bei größeren Stammdurchmessern geschädigt wurden als die Wegedecken selber (WAGAR u. BARKER 1983; WONG, GOOD u. DENNE 1988; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1996). WAGAR und BARKER leiten daraus einen günstigen Einfluss der Betonbettung unter Bordsteinen und der Tiefe der Fundamentierung ab (WAGAR u. BARKER 1983, 179), während FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO das Phänomen auf das für Wurzeln undurchdringliche, verdichtete Bett der angrenzenden Straßen zurückführen (FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1998, 196). Da die genauen ortsüblichen Bauweisen nicht bekannt sind, kann dies im einzelnen nicht nachvollzogen werden. Zumeist dürfte hier der Bordstein zwischen Baumscheibe bzw. Pflanzstreifen und angrenzender Straße gemeint sein (siehe Kapitel 2), so dass eine Schutzfunktion für die Wegedecken nicht abgeleitet werden konnte.

III. Größe der Baumscheibe

Bei der Baumscheibengröße kann ein Zusammenhang mit der Häufigkeit und dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen aufgezeigt werden. Verkehrsflächen um große Baumscheiben weisen seltener Schäden auf und die Schäden sind weniger stark. Es ist allerdings zweifelhaft, ob die geringere Schadensquote bei den größeren Baumscheiben auf bessere Standortbedingungen zurückzuführen ist. Vielmehr liegt der Schluss nahe, dass es zeitlich länger dauert, bis Schäden auftreten und dass die befestigte Fläche um den Baum kleiner ist und somit die Schadenshäufigkeit geringer. De

facto bleibt es jedoch bei der Feststellung, dass bei größeren Baumscheiben nach dieser Untersuchung insgesamt weniger Schäden auftreten. Allerdings ist hier auch die nutzbare Verkehrsfläche kleiner. Bei der differenzierten Betrachtung von Wegedecke und Randeinfassung zeigt sich, dass bei der Häufigkeit von Schäden an Wegedecken bei Baumscheiben bis maximal 1 m² und über 1 m² bis 4 m² Größe kein Unterschied besteht. Ob hier ein Maximum erreicht ist oder aber die Daten aufgrund zu geringer Anzahl bei den kleinen Baumscheiben durch Zufall keine Aussage ergeben, kann nicht geklärt werden. Ein Zusammenhang zwischen Baumscheibengröße und Zustand der Baumscheibe besteht nach den Untersuchungsergebnissen nicht. Ein Zusammenhang zwischen Baumscheibengröße und Lokalisierung der Schäden kann anhand der Untersuchung ebenfalls nicht eindeutig festgestellt werden.

Eine Erörterung der Baumscheibengröße als Einflussfaktor auf Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln wurde bei anderen Autoren in dieser Form nicht vorgefunden. Analog dazu kann jedoch die Entfernung zwischen Baumstamm und Verkehrsfläche bzw. zum Schaden herangezogen werden, wie sie in verschiedenen quantitativen Untersuchungen erfasst wurde, die sich auf Bäume in Baumscheiben, in Pflanzstreifen und in Pflanzflächen an Verkehrsflächen beziehen. Aus allen Untersuchungen geht hervor, dass die Schadensquote und das Schadensmaß um so größer sind, je geringer der Abstand zwischen Baum und Verkehrsfläche ist (WAGAR u. BARKER 1983,179; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 17, 31; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1998, 195). WONG, GOOD u. DENNE stellen ausserdem fest, dass die stärksten Schäden in einem Radius von 2 m um den Stammfuß auftreten (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 17, 33). Diese Ergebnisse früherer Untersuchungen werden also bestätigt.

IV. Gattung

Das gattungsspezifische Wurzelverhalten beeinflusst die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen sowie die Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben. Die Baumgattung zeichnet sich durch die in ihr veranlagte Wuchsstärke aus, so dass der Einflussfaktor Stammdurchmesser den Einflussfaktor Gattung überlagert. Es kann jedoch aufgezeigt werden, dass auch in gleichen Stammdurchmesserklassen Unterschiede zwischen den Gattungen hinsichtlich des untersuchten Merkmals bestehen, die Gattung über ihr Wurzelverhalten also einen eigenständigen Faktor darstellt. Die differenzierte Betrachtung von Wegedecke und Randeinfassung bestätigt diese Einschätzung. Gattungsspezifische Einflüsse sind auch beim Ausmaß der Schäden festzustellen. In der Tendenz entspricht die Häufigkeit von Schäden an Verkehrsflächen auch dem Ausmaß der Schäden an Wegedecke und Randeinfassung. Einige Gattungen zeigen jedoch Besonderheiten (siehe Abschnitt 3.5.1). Veränderungen an Baumscheiben in Form angehobener Abdeckungen (Roste, Steine) unterliegen ebenfalls dem Einfluss des gattungsspezifischen Wurzelverhaltens.

In der aufgestellten Rangfolge sind die nicht differenziert betrachteten Gattungen in eckigen Klammern aufgeführt. Der Einflussfaktor Gattung wird in der Relevanz relativ niedrig eingestuft, da im Gegensatz zu den übrigen Faktoren vermutlich eine starke Abhängigkeit vom Standort bzw. von den Bodenverhältnissen besteht. Weiterführende Untersuchungen sind hier zu empfehlen.

Rangfolge Gattungen

I. Acer
II. Platanus, Robinia [Aesculus]
III. [Quercus – durchschnittliches Schadpotenzial]
IV. Tilia [Corylus]
V. Crataegus [Sorbus]

Die Ergebnisse bestätigen frühere Untersuchungen, die ebenfalls zu dem Schluss kommen, dass starkwüchsigere, größere Bäume mehr bzw. größere Schäden verursachen als schwachwüchsige, kleine (WAGAR u. BARKER 1983,178f.; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 29f.; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1998, 197). KOPINGA stellt solche Baumgattungen als besonders schadensträchtig heraus, die als Pionierbäume bekannt sind (KOPINGA 1992, 10.5), was häufig mit Starkwüchsigkeit gekoppelt ist. Ein direkter Vergleich der Schadwirkung einzelner Gattungen mit anderen Untersuchungen ist nur bedingt möglich, da einerseits Abweichungen in den untersuchten Gattungen bzw. Arten bestehen und andererseits abweichende Rahmenbedingen vorliegen. WONG, GOOD und DENNE, deren Artenspektrum teilweise mit dem hier untersuchten übereinstimmt, kommen in der Rangfolge zu einem anderen Ergebnis als die vorliegende Untersuchung (Esche > Linde > Rosskastanie > Ahorn > Eiche > Mehrbeere/Eberesche > Kirsche) und empfehlen beispielsweise Ahorn (neben Eiche) als einen großkronigen Baum mit relativ geringem Schadpotential (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 29f.). Dies zeigt, dass zwar die Tendenz größerer Bäume zu häufigeren und größeren Schäden zutreffen dürfte, die Einschätzung einzelner Arten jedoch divergiert. Möglicherweise überlagern die örtlichen Rahmenbedingungen den Einfluss des genetisch veranlagten Wurzelverhaltens tatsächlich so stark, dass eine generelle Einschätzung schwierig ist und hier noch Forschungsbedarf besteht (vgl. WAGAR u. BARKER 1983,181; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32; KOPINGA 1992, 10.16; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1998, 196). Einige Autoren diskutieren darüber hinaus die züchterische Selektierung weniger schadensträchtiger Bäume als eine Möglichkeit zur Verringerung von Schäden an Verkehrsflächen (WAGAR u. BARKER 1983, 181; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 29f.).

V. Wegedecke

Die Art der Wegedecke beeinflusst die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden an Wegedecken. Schäden an Asphaltbelägen sind seltener und weniger stark als Schäden an Platten- und Pflasterbelägen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der untersuchten Merkmale nicht. Eine Erklärung liegt in der unterschiedlichen Bauweise. Die Art der Wegedecke übt jedoch nur einen Einfluss auf ihren eigenen Zustand aus. Ein Zusammenhang zwischen Art der Wegedecke und Zustand der Baumscheibe, Zustand der Randeinfassung und Lokalisierung der Schäden konnte nicht festgestellt werden. Der Einfluss insgesamt wird daher relativ gering eingestuft.

Unterschiedliche Belagsarten wurden auch von WONG, GOOD und DENNE (1988) hinsichtlich der Schadensrate verglichen. Im Gegensatz zu der vorliegenden Untersuchung verzeichnen sie jedoch bei Asphaltbelägen die höhere Schadensquote im Vergleich zu Plattenbelägen (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 29). Da diese Aussage unabhängig sein dürfte von der Kartiermethode, ist der Grund für die gegensätzlichen Ergebnisse vermutlich in der Bauweise zu suchen, über die wenig bekannt ist.

Sowohl der Einfluss des Baumes über Gattung und Stammdurchmesser als auch der Bauweise der Verkehrsfläche über Baumscheibengröße, Art der Wegedecke und Art der Randeinfassung ist hiermit soweit dargelegt worden, wie es die Inaugenscheinnahme und statistische Erfassung zulässt. Um Ursachen und Entstehung genau zu beschreiben, sind die Erkenntnisse aus den Aufgrabungen der Fallbeispiele erforderlich (Kapitel 4). Um Überschneidungen zu vermeiden, soll eine weitere Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 5 erfolgen.

3.7.3 Schadbilder

Hinsichtlich der Schadenstypisierung liefert die Kartierung nicht quantifizierbare Erkenntnisse aus Beobachtungen, Skizzen und Photos sowie quantifizierbare Ergebnisse durch statistische Auswertung der Schadbilder. Eine Diskussion mit den Ergebnissen anderer wissenschaftlicher Untersuchungen ist mit einer Ausnahme nicht möglich, da vergleichbare Auswertungen in der gesichteten Literatur nicht gefunden wurden. Da die den Schäden zugrunde liegenden Muster nicht nur den oberirdisch sichtbaren Teil umfassen, erfolgt die Gesamttypisierung zusammen mit den Ergebnissen aus den aufgegrabenen Fallbeispielen (Kapitel 4) in Kapitel 5 „Schadenstypisierung“. An dieser Stelle sollen die quantifizierbaren Ergebnisse aus Abschnitt 3.6 „Auswertung der Schadbilder“ vorgestellt werden. Die Untersuchungen lassen einen phänomenologischen Zusammenhang innerhalb der Schadbilder erkennen (siehe Tabelle 7). Sie geben Hinweise auf Schadensentstehung bzw. Verlauf und sind somit auch für die Ursachenforschung relevant. Die Lokalisierung der Schäden an Verkehrsflächen stellt einen Sonderfall innerhalb der Schadbilder dar. Sie gibt nicht Antwort auf die Fragen „ob?“ (Häufigkeit) und „wie stark?“ (Ausmaß), sondern auf die Frage „wo?“.

Schadbilder	Veränderungen an **Baumscheiben**	Schäden an Verkehrsflächen				Lokalisierung
		Schäden an Wegedecken		Schäden an Randeinfassungen		
		Häufigkeit	Ausmaß	Häufigkeit	Ausmaß	
Zustand Baumscheibe	/	X	X	X	X	
Zustand Wegedecke	X	/	/	X	X	X
Zustand Randeinfassung	X	X	X	/	/	X
Lokalisierung			X		X	/

Tabelle 7: Zusammenhänge zwischen den Schadbildern

Zustand der Baumscheibe

Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Baumscheibe und sowohl der Häufigkeit als auch dem Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen. Bei Baumscheiben ohne Auffälligkeiten sind die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden an Verkehrsflächen sowohl im Hinblick auf die Wegedecken als auch bezüglich der Randeinfassungen am geringsten. Die Tendenz ist also für das Merkmal „Baumwurzeln sichtbar“ stärker ausgeprägt als für Veränderungen an Abdeckungen. Bei veränderten Abdeckungen (Roste oder Steine) ist eine größere Häufigkeit von Schäden an Wegedecken, nicht jedoch an Randeinfassungen zu verzeichnen. Das Ausmaß der Schäden ist jedoch nicht erhöht.

Standorte, deren Baumscheiben oberflächlich sichtbare Wurzeln erkennen lassen, weisen weit überdurchschnittliche Werte für Häufigkeit und Ausmaß von Schäden sowohl an Wegedecken als auch an Randeinfassungen auf.

Zustand der Wegedecke

Die Untersuchungen lassen einen Zusammenhang zwischen dem Zustand der Wegedecke und sowohl der Häufigkeit als auch dem Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen, dem Zustand der Baumscheibe sowie der Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen erkennen. Häufigkeit und Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen steigen mit zunehmendem Ausmaß der Schäden an Wegedecken. An Standorten mit Schäden an der Wegedecke ist die Häufigkeit von Veränderungen an der Baumscheibe höher als an Standorten ohne Schäden. Hinsichtlich der Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen verläuft ein umso höherer Anteil Schäden sowohl über die Seiten als auch über die Ecken von Baumscheiben, je größer das Ausmaß der Schäden an Wegedecken ist. Der Anteil ausschließlich über die Seiten oder über die Ecken verlaufender Schäden nimmt gleichzeitig ab.

Zustand der Randeinfassung

Analog zu den Wegedecken besteht bei den Randeinfassungen ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Randeinfassung und sowohl der Häufigkeit als auch dem Ausmaß von Schäden an Wegedecken, dem Zustand der Baumscheibe sowie der Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen. Die Häufigkeit und das Ausmaß der Schäden an Wegedecken und die Häufigkeit von Veränderungen an Baumscheiben steigen mit zunehmendem Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen. Hinsichtlich der Lokalisierung von Schäden an Verkehrsflächen verläuft bei größerem Ausmaß der Schäden an Randeinfassungen ein höherer Anteil Schäden sowohl über die Seiten als auch über die Ecken von Baumscheiben. Der Anteil ausschließlich über die Seiten oder über die Ecken verlaufender Schäden nimmt gleichzeitig ab. Auch WONG, GOOD und DENNE (1988) stellen fest, dass Bäume, die Schäden an Bordsteinen verursachen, zugleich auch Schäden an Wegedecken verursachen, nicht jedoch umgekehrt (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32), und insofern eine Korrelation zwischen beiden Schadensarten besteht.

Lokalisierung

Schäden an Verkehrsflächen verlaufen in der Relation häufiger über die Ecke als über die Seite von Baumscheiben. Die Lokalisierung der Schäden steht in einem Zusammenhang mit dem Ausmaß der Schäden an Wegedecken und Randeinfassungen: Bei der Lokalisierung der Schäden „über Seite und Ecke“ liegen wesentlich stärkere Schäden vor, als bei dem Verlauf von Schäden entweder „über Seite“ oder „über Ecke“. Das Ausmaß von Schäden an Wegedecken ist bei der Lokalisierung der Schäden „über Ecke“ etwas höher bei der Lokalisierung „über Seite“. Das Ausmaß von Schäden an Randeinfassungen verhält sich hingegen umgekehrt. Dies spricht dafür, dass die Art der Randeinfassung den Prozess des Schadensverlaufes beeinflusst (siehe Abschnitt 3.5.6). Schäden an Verkehrsflächen, bei denen auch der Wurzelanlauf einbezogen wird, sind die Ausnahme und werden daher nicht weiter untersucht.

4. Fallbeispiele: Freilegung von Wurzelbereichen unter Verkehrsflächen

Der zweite Untersuchungsblock umfasst die partielle Freilegung von Wurzelbereichen unter Verkehrsflächen. An ausgewählten Fallbeispielen werden Fragestellungen untersucht, die durch bloße Inaugenscheinnahme nicht zu klären sind. Hierzu gehören grundsätzliche Fragen zum Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Des Weiteren werden die aus der Erfassung von Schäden an Verkehrsflächen (Kapitel 3) gewonnenen Erkenntnisse überprüft und offene Fragen erörtert.

4.1 Zielsetzung

Die Freilegung von Wurzelbereichen unter Verkehrsflächen dient folgenden Zielen (siehe Kapitel 1):

(1) Ursachen, Entstehung und Wirkungszusammenhänge klären

Die Ursachen der Schäden werden unmittelbar an den Schadstellen untersucht. Die Entstehung der Schäden, also der zeitliche Ablauf des Schadensverlaufes, kann durch die zeitliche Begrenzung nicht direkt beobachtet werden, sondern wird aus den Ergebnissen dieser Untersuchung und den Ergebnissen aus Kapitel 3 „Erfassung von Baumstandorten in Verkehrsflächen“ hergeleitet.

(1.1) Das Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen soll anhand der Parameter Wuchsort oder durchwurzelte Bereiche, Wuchstiefe, Wurzelform und Wurzel- beziehungsweise Verzweigungsbild unter den örtlich gegebenen Bedingungen charakterisiert werden. Diese Bedingungen sind durch den Baum selbst und die Bodenverhältnisse bestimmt.

(1.2) Als Einfluss des Baumes wird nur die Baumgattung betrachtet. Über gattungsspezifische Unterschiede des Wurzelwachstums kann anhand weniger Fallbeispiele keine generalisierende Aussage gemacht werden. Vielmehr handelt es sich um Einzelbeobachtungen, die mit den Erkenntnissen aus der Kartierung (Kapitel 3) diskutiert werden. Der Einfluss der Baumgröße ist bereits aus der Kartierung deutlich hervorgegangen und wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

(1.3) Der Einfluss der örtlichen Bodenverhältnisse auf das Wurzelwachstum soll erörtert werden. Die physikalischen Bodeneigenschaften werden hinreichend genau beschrieben und mit der Durchwurzelung in Beziehung gesetzt. Zu den relevanten Bodenverhältnissen wird insbesondere der potenziell durchwurzelbare Schichtaufbau der Verkehrsfläche gerechnet und hinsichtlich der vegetationstechnischen Bodeneigenschaften untersucht. Dazu gehören Unterbau, Frostschutz- und Tragschichten sowie Pflasterbettungen. Bei dem so genannten anstehenden Boden oder dem Baugrund unter der Verkehrsfläche handelt es sich an innerstädtischen Standorten selten um gewachsenen Boden. Vielmehr besteht er in der Regel aus stark verdichteten Aufschüttungen, Schutt, Verfüllungen etc., die bodenkundlich als Auftragshorizont und bautechnisch als Unterbau zu bezeichnen sind.

(1.4) Der Einfluss der Bauweise von Verkehrsflächen auf das Wurzelwachstum wird anhand der Bauweisen der Randeinfassungen und der Wegedecken untersucht. Hierzu gehören Kanten- und Bordsteine, Asphaltdecken, Pflastersteine und Platten, Betonfundamente sowie Schüttstoffe für Pflasterbettung und Tragschichten, die zugleich zu den Bodenfaktoren gerechnet werden.

(2) Typisierung von Schadbildern

Der Zusammenhang zwischen den an der Oberfläche auftretenden Schadensformen und dem unterirdischen Wurzelwachstum soll analysiert und typisiert werden (Kapitel 5). Daraus lassen sich Hinweise auf Ursachen und Entstehung und somit auf mögliche Gegenmaßnahmen ableiten.

(3) Überprüfung von Erkenntnissen aus Kapitel 3 – Erfassung von Baumstandorten in Verkehrsflächen

Die Kartierung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln (Kapitel 3) erfolgte durch Inaugenscheinnahme. Sie enthält vornehmlich quantitative Aussagen, aus denen qualitative Aussagen zur Entstehung und zu Ursachen von Schäden an Verkehrsflächen abgeleitet wurden. Diese werden durch die qualitativen Erkenntnisse aus den Fallbeispielen bestätigt oder in Frage gestellt. Spezielle Beobachtungen, die in Kapitel 3 nicht geklärt werden konnten, sind:

a) Einflussfaktor Gattung: Die Schäden, die *Platanus* und *Robinia* an Randeinfassungen verursachen, sind relativ schwächer als an Wegedecken. Die Schäden, die *Quercus* an Randeinfassungen verursacht, sind relativ stärker als an Wegedecken.
b) Einflussfaktor Randeinfassung: Die abgeleitete Barrierewirkung und Lenkungsfunktion von Randeinfassungen soll durch die Aufgrabung schadhafter Bereiche überprüft werden. Die Bedeutung von Bauhöhe, Bautiefe, Gewicht, Fugenzahl und -anordnung ist zu klären.
c) Schäden an Randeinfassungen sind an Standorten mit geringem Schaden an Wegedecken etwas schwächer als an Standorten ohne einen solchen Schaden. Es soll überprüft werden, ob diese Beobachtung erklärt werden kann oder ob es sich um eine zufällige Abweichung handelt.
d) Nicht quantifizierbare Beobachtungen aus der Kartierung fließen zusammen mit den Beobachtungen aus den Fallbeispielen in Kapitel 5 „Schadenstypisierung“ ein.

4.2 Methodik

Aufgrund der bei der Kartierung erfassten Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln (Kapitel 3) als typisch zu bezeichnende Schäden an Verkehrsflächen werden exemplarisch durch Freilegung der schadhaften Stellen untersucht. Durch die Untersuchung einer begrenzten Anzahl von Fallbeispielen werden in erster Linie Erkenntnisse für die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten gewonnen. Um wissenschaftlich exakte, allgemeingültige Aussagen treffen zu können, müssten möglichst viele Parameter, die einen potenziellen Einfluss auf die Wurzelentwicklung ausüben, konstant gehalten werden, wie z. B. Baumart und -sorte, Alter, Stammdurchmesser, Klima, Belagsart, Schichtaufbau, anstehender Boden, Pflanztechnik, Bauweise der Baumscheibe, Nutzung des Baumumfeldes etc. Dies ist in Feldstudien auch bei einer Reihenuntersuchung mit einer statistisch auswertbaren Anzahl kaum möglich. Versuchspflanzungen, bei denen diese Bedingung erfüllt werden könnte, müssten sich über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten erstrecken, um überhaupt Aussagen treffen zu können und

würden gleichzeitig nur für bestimmte Kombinationen von Einflussfaktoren zutreffen. Gerade die Heterogenität der unterirdischen Standortbedingungen ist charakteristisch für den Straßenstandort (siehe Abschnitt 2.3), so dass Versuchspflanzungen methodisch bedingt nur sehr eingeschränkt Rückschlüsse auf die tatsächlichen Bedingungen zulassen würden. In der Literatur wurden nur wenige vergleichbare Forschungsvorhaben mit Wurzelaufgrabungen gefunden, die sich zudem aufgrund des hohen Aufwands für die Aufgrabung auf eine geringe Anzahl an Exemplaren beschränken (KOPINGA 1992 und NICOLL u. ARMSTRONG 1998 zu Belagschäden; KRIETER 1986, 1996 und URBAN 1992, 1999 zu Wurzeln von Straßenbäumen; LÖSKEN, HEIDGER u. LIESECKE 2001 zu Wurzelraum unter Wegebelägen). Ein Ziel der Arbeit ist daher, grundlegende Erkenntnisse zur Fragestellung zu gewinnen. Generelle Aussagen ergeben sich aus wiederholten Beobachtungen oder solchen, die auch von anderen Autoren beschrieben werden. Die Freilegung erfolgt in einem ausgesuchten Teilbereich der schadhaften Verkehrsfläche als sektorale Aufgrabung in horizontaler Ebene. Diese Variante wird in der Literatur als erprobte und wirtschaftliche Methode zur Untersuchung von Baumwurzeln beschrieben (vgl. BÖHM 1979, 14 bis 19). Als Hilfsmittel sollen Handwerkzeuge, Wasserdruck und Industriestaubsauger (vgl. ebd.) erprobt werden. Die Aufgrabung wird schichtweise und manuell vorgenommen, bis die den Schaden verursachende Wurzelpartie deutlich erkennbar ist.

4.2.1 Messungen und Dokumentation der Ergebnisse

Das Wurzelwachstum unter Verkehrsflächen wird hauptsächlich fotografisch dokumentiert. Für jeden Baum wird die Gattung und gegebenenfalls die Art bestimmt. Stammdurchmesser und ungefährer Kronendurchmesser werden erhoben. Eine Fotografie dokumentiert das Baumumfeld und gibt einen Gesamteindruck des Standorts wieder. Das Wurzelbild als Ganzes wird mit jeder frei gelegten Schicht fotografiert. Besonderheiten wie auffällige Wurzelformen, Ein- und Austrittsstellen oder Richtungsänderungen werden im Detail fotografiert. Durch Einfärben der Wurzeln werden kontrastreichere Aufnahmen erzielt (siehe BÖHM 1979, 10). An auffälligen Stellen werden in Einzelfällen die Entfernung zum Stamm, die Wuchstiefe und gegebenenfalls der Durchmesser der freigelegten Wurzeln erhoben. Aufgrund der geringen Anzahl Exemplare und der unterschiedlichen Standortverhältnisse sind diese quantifizierbaren Daten nicht direkt vergleichbar. Der Vermessungsaufwand kann daher gemäß der Zielvorgabe begrenzt werden (siehe BÖHM 1979, 4). Eine systematische Erfassung quantifizierbarer Daten erfolgt nicht.

Zur Charakterisierung des Bodens werden die Schichtdicken des anstehenden Bodens und des Wegeaufbaus im Profil festgestellt. Der visuelle Eindruck und die Lösbarkeit des Bodens als Hinweis auf den Grad der Verdichtung werden notiert. Ferner werden die örtlichen Bodenverhältnisse fotografisch dokumentiert. Für Laboruntersuchungen werden vor Ort gestörte Mischproben entnommen. Die Entnahme ungestörter Bodenproben durch Stechzylinder zur Bestimmung des Gesamtporenvolumens ist aufgrund der intensiven Durchwurzelung und wegen des hohen Anteils an Kies, Schotter und Steinen im Boden beziehungsweise in den Tragschichten und im Unterbau praktisch nicht durchführbar. Dasselbe gilt für den Einsatz eines Penetrometers zur Messung des Eindringwiderstandes, aus dem die Lagerungsdichte des Substrates abgeleitet werden kann. Die untersuchten physikalischen Bodeneigenschaften sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Messgröße	Einheit	Verfahren
Korngrößenverteilung	Gew.-%	- Ansatz mit Pyrophosphat (0,2 molare $Na_4P_2O_7$) - Nasssiebung zur Ermittlung der Kornfraktion ≤ 0,063 mm - Trockensiebung zur Ermittlung der übrigen Fraktionen
Rohdichte	Volumen-Gewicht	- trocken, lieferfeucht, bei max. Wasserkapazität (WK max.)
Volumenabnahme	%	nach Verdichtung mit 12 Schlägen
Wassergehalte/WK max.	Gew.-%, Vol.-%	
Wasserdurchlässigkeit kf mod	cm/s, mm/min	
Organische Substanz	Gew.-%	durch Glühverluste bei 450°C
pH-Wert		in 0,01molarer Kalziumchloridlösung (KCl)
Carbonatgehalt	g/100g, g/l	nach Scheibler: Lösen in 10%iger Salzsäure, Gasdrucksäule
Salzgehalt	g/100g, g/l	als KCl, Messung der elektrischen Leitfähigkeit in Wasserlösung

Tabelle 8: Untersuchte physikalische Bodeneigenschaften

Zur Feststellung der Eigenschaften der Verkehrsfläche werden die Schichtdicken des Wegeoberbaus im Profil gemessen sowie Material und Abmessung der Baustoffe (Pflaster, Platten, Bordsteine etc.) bestimmt. Der Schichtaufbau wird fotografiert und skizziert. Bei Schüttstoffen wie Pflasterbettung und Tragschichten werden Bodenproben entnommen. Für die Schadbildtypisierung werden Übersichts- und Detailaufnahmen fotografiert und Skizzen zum Schichtaufbau und zur Lage der Wurzeln angefertigt. Tabelle 9 zeigt die eingesetzten Mess- und Dokumentationsmethoden im Überblick. Die Überprüfung der in Kapitel 3 getroffenen Aussagen erfolgt nach Auswertung der Ergebnisse der Freilegungen.

	Messung	Foto	Skizze	Sonstiges
1.1 Wurzeln	Reichweite Wuchstiefe Durchmesser	Form Verzweigungsmuster		evt. Probe für Laborfoto
1.2 Baum	Stammdurchmesser Kronendurchmesser	Standort allgemein		Gattung, ggf. Art bestimmen
1.3 Boden	vor Ort: Schichtdicken Labor (gestörte Probe): Korngrößenverteilung Rohdichte Volumenabnahme Wassergehalt Wasserdurchlässigkeit Organische Substanz pH-Wert Carbonatgehalt Salzgehalt	Bodenprofil	Schichtaufbau (s. 1.4)	
1.4 Verkehrsfläche	Oberbau im Profil: Schichtdicken Abmessungen von Material bzw. Bauteilen Bodenproben (s. 1.3) Aufkantungshöhe im Bezug zur angrenzenden Fläche	Gesamtübersicht Details	Schichtaufbau (s. 1.3)	
2. Typisierung von Schäden	Schaden: Reichweite, Stammabstand	Gesamtübersicht Details	Schadbild in An-, Aufsicht, Schnitt Schichtaufbau im Schnitt	
3. Kap. 3 prüfen	erfolgt im Anschluss an die Auswertung der Untersuchungen von 1. und 2., nicht vor Ort			

Tabelle 9: Mess- und Dokumentationsmethoden bei der Wurzelfreilegung

4.2.2 Auswahlkriterien

Es werden solche Standorte ausgewählt, an denen die kommunale Verwaltung zur Wahrung der Verkehrssicherheit ohnehin Reparaturen vornehmen muss. Auf diese Weise werden Aufwand und Kosten gering gehalten. Die Aufgrabungen sollen in unterschiedlichen Städten und Gemeinden stattfinden, um verschiedenartige Bodenverhältnisse zu erfassen und den Koordinierungsaufwand für die einzelnen Gemeinden zu begrenzen. Eine weitere Anforderung an die Standorte ist, dass keine Gefahr durch den Straßenverkehr für die Aufgrabung besteht und umgekehrt. Die Standorte werden in Absprache mit der Verwaltung ausgesucht. Die Entfernung des Wegebelags sowie die Wiederherstellung erfolgt durch die Gemeinden oder autorisierte Firmen. Die Untersuchungen vor Ort beginnen mit der behutsamen Entfernung des Belags und enden mit der Dokumentation der Ergebnisse an der frei gelegten Wurzelpartie.

Wichtigstes Auswahlkriterium für die Standorte ist, dass ein in Anlehnung an Kapitel 3 als typisch zu bezeichnender Schaden an der Verkehrsfläche vorliegt. Es werden so viele Wurzelpartien in Verkehrsflächen freigelegt, bis hinreichend viele Daten im Sinne einer exemplarischen Untersuchung vorliegen. Die Fallbeispiele sollen möglichst unterschiedliche Merkmale hinsichtlich Baum, Bauweise und Schaden der Verkehrsfläche aufweisen, um verschiedenartige Einflüsse zu untersuchen.

4.2.3 Auswertungsmethode

Die Auswertung der Wurzelfreilegungen erfolgt in drei Schritten: Zunächst werden die Fallbeispiele einzeln nach Standort, Schadbild, Wurzelbild und Schadensursache beschrieben und interpretiert. Aus den einzelnen Fallbeispielen werden im Abschnitt 4.5 generelle Erkenntnisse abgeleitet. Diese fließen zusammen mit den Ergebnissen aus der Kartierung in die Schadenstypisierung (Kapitel 5) ein. Als Bezugshöhe für die Angabe der Ausgrabungstiefe wird die Oberkante des Belags gewählt. Das Wurzelwachstum wird nach Durchwurzelungsintensität, Wurzeldicken, Wurzelform und Verzweigungsmuster charakterisiert. Die Klassifizierung der Wurzeldicken erfolgt als Wurzeldurchmesser nach KÖSTLER et. al. (1968, 12; Tabelle 10). Die Wurzeldicken werden überwiegend visuell eingeschätzt, da der genaue Durchmesser für die vorliegende Fragestellung nicht erforderlich ist. Alle übrigen Parameter werden nicht quantifiziert und im Vergleich der Fallbeispiele untereinander beschrieben.

Durchmesser	Bezeichnung
< 1 mm	Feinstwurzel
1 bis 2 mm	Feinwurzel
2 bis 5 mm	Schwachwurzel
5 bis 20 mm	Grobwurzel
20 bis 50 mm	Derbwurzel
> 50 mm	Starkwurzel

Tabelle 10: Wurzelklassen nach Wurzeldurchmesser (nach KÖSTLER et al. 1968)

4.3 Durchführung

Im März und April 1999 wurde die Vorgehensweise an drei Bäumen auf dem Universitätsgelände in Hannover erprobt. Im August und September 1999 wurden in Hannover, Köln und Wunstorf mit Unterstützung der örtlichen Grünflächen- und Tiefbauämter sechs weitere Straßenbäume untersucht. Tabelle 11 zeigt die untersuchten Standorte im Überblick.

Das Entfernen der Beläge erfolgte per Hand oder mit kleinen Maschinen. Für die Freilegung der Wurzeln wurden Handwerkzeuge verwendet wie Schaufeln, Spaten und Spitzhacke, vor allem jedoch kleine Handschaufeln, diverse Kratzer, Esslöffel und Handfeger. Das Freispülen der Wurzeln mit Wasser erwies sich durch die lange Zeitspanne bis zum Versickern des Wassers ebenso wenig praktikabel wie die Verwendung eines Industriestaubsaugers, dessen Saugrohr rasch verstopfte. Die Arbeiten wurden möglichst wurzelschonend durchgeführt. Bei Bedarf wurden einzelne Wurzeln mit Schere und Messer fachgerecht entfernt, um das Wurzelwachstum in tieferen Schichten untersuchen zu können. Für die Fotografien wurden die Wurzeln mit Wasser besprüht, was den Aufnahmen eine intensivere Farbigkeit und mehr Ausdruckskraft verleiht. Bei Bedarf wurden die Wurzeln mit wasserlöslicher Farbe geweißt, um kontrastreichere Fotos zu erzielen. Für einen Teil der Aufnahmen wurden verschieden große Fotomaßstäbe verwendet, um die Größenverhältnisse insbesondere bei Detailaufnahmen deutlich zu machen.

4.4 Auswertung

Die untersuchten Bäume befinden sich optisch alle in einem guten Zustand. Sie weisen keine augenfälligen Schädigungen auf. Die Bodenverhältnisse beziehungsweise der Schichtaufbau des Wegeoberbaus sind sowohl im Vergleich der Fallbeispiele als auch innerhalb von Standorten sehr heterogen. Auf kleinem Raum werden häufig unterschiedliche Materialien vorgefunden. Eine bautechnische Zuordnung zu Wegebauschichten ist durch nicht regelgerechte Ausführungen und nachträgliche Tiefbauarbeiten oftmals schwierig (Fallbeispiele 1, 2, 3, 7, 9). Um eine vergleichende Betrachtung zu ermöglichen, werden im folgenden dennoch eine Zuordnung von Wegebauschichten und -stoffen zum Regelaufbau von Verkehrsflächen vorgenommen. Bei nicht eindeutigen Verhältnissen wird die Zuordnung gewählt, die im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung zweckmäßig ist. So werden z. B. bei den Asphaltbelägen dünne Asphaltfeinbetonschichten und die darunter liegenden Schichten aus Bitukies (Fallbeispiel 7) und Beton (Fallbeispiel 9) als Deckschicht zusammengefasst, obwohl es sich genau genommen um Tragschichten handelt. Füllböden unter Tragschichten werden im Folgenden als Unterbau bezeichnet. Die Auswertung der Bodenanalysen erfolgt in Abschnitt 4.4.10.

Hinweis: Bei den folgenden grafischen Darstellungen der Standorte sind die geschädigten Bereiche durch Schraffuren gekennzeichnet. Die Maßangaben für die Ausdehnung der Schäden sind als Anhaltswerte zu verstehen.

Fall-beispiel	Ort / Straße	Datum d. Aufgra-bung	Baumart	Stamm-/ Kronen-durchmesser	Baumscheibe (BS), Art /Größe	Randeinfassung (RE) im untersuchten Bereich	Wegedecke (WD) im untersuchten Be-reich	Art des Schadens	zuständig
1	Hannover Herrenhäuser Str. (Nr.2)	15. bis 17.03.99	Stieleiche *Quercus robur*	3 Bäume: 40 + 23 + 25 cm/ 9 + 7 + 8 m	bepflanzt ca. 14 m²	Kantenstein, eben	Platten, Mosaikpflaster	WD: Pflaster + Platten angehoben, aufgekantet; RE: Kantensteine schräg angehoben	Universität Hannover, FB LAUM Hr. Lösken
2	Hannover Herrenhäuser Str. (Nr.2)	18. bis 19.03.99	Stieleiche *Quercus robur*	3 Bäume: 40+ 23 + 25 cm/ 9 + 7 + 8 m	bepflanzt ca. 14 m²	Kantenstein, eben	Platten, Mosaikpflaster	WD: Platten angehoben, aufgekantet, Pflaster auf-gewölbt, einzelne Steine angehoben; RE: Kantensteine schräg angehoben	Universität Hannover, FB LAUM Hr. Lösken
3	Hannover Herrenhäuser Str. (Nr.2)	29.03.99 bis 01.04.99	Silberahorn *Acer saccharinum*	mehrstämmig, 18 bis 32 cm / 14 m	bepflanzt ca. 14 m²	Kantenstein, eben	Platten, Mosaikpflaster, Pflasterrinne	WD: Platten angehoben, aufgekantet, zerbrochen, Pflaster aufgewölbt; RE: Kantensteine angeho-ben, z. T. fehlend	Universität Hannover, FB LAUM Hr. Lösken
4	Hannover Rühlmannstraße	17.08.99	Spitzahorn *Acer platanoides*	48 cm / 10 m	offen 4,3 m²	Kantenstein, eben (1 Seite) keine (3 Seiten)	Betonpflaster, Platten	WD: Pflaster angehoben, Platten leicht angehoben RE: angehoben	Stadt Hannover, Tiefbauamt Hr. Heger
5	Wunstorf Fußgängerzone Nordstraße	23. bis 24.08.99	Schnurbaum *Sophora japonica*	30 cm / 8 m	offen, teilw. Stahlroste 4 m²	keine	Betonpflaster, Mosaikpflaster	BS: Roste angehoben, Wurzeln sichtbar WD: Pflaster aufgewölbt, einzelne Pflastersteine hochstehend	Stadt Wunstorf, Grünflächenabtei-lung Hr. Beyer
6	Wunstorf Lange Straße	25.08.99	Platane *Platanus x aceri-folia*	29 cm / 8 m	Betonelemente 4 m²	keine (3 Seiten) Bordstein, hoch (1 Seite)	Klinkerpflaster	BS: Abdeckung aus Beton-elementen aufgekantet WD: Pflaster aufgeworfen	Stadt Wunstorf, Grünflächenabtei-lung Hr. Beyer
7	Köln Vorgebirgsstraße (Nr. 179)	31.08.99	Robinie *Robinia pseudo-acacia*	45 cm / 9 m	offen ca. 5,5 m²	Bordstein, eben	Asphalt	WD: Aufwölbung und Risse im Asphalt	Stadt Köln, Grünflächenamt Hr. Dr. Bauer, Hr. Meindl
8	Köln Vorgebirgsstraße (Nr. 178)	02.09.99	Robinie *Robinia pseudo-acacia*	62 cm / 10 m	offen ca. 5,5 m²	Bordstein, hoch	Großpflaster	RE: Spalt, leicht angehoben WD: Pflaster angehoben	Stadt Köln, Grünflächenamt Hr. Dr. Bauer, Hr. Meindl
9	Köln Mommsenstraße (Nr. 3)	06.09.99	Linde *Tilia x intermedia*	40 cm / 7 m	Offen 1,3 m²	keine	Asphalt	WD: z. T. kantige Aufwöl-bungen, Risse	Stadt Köln, Grünflächenamt Hr. Dr. Bauer, Hr. Meindl

Tabelle 11: Überblick über die Standorte der Fallbeispiele

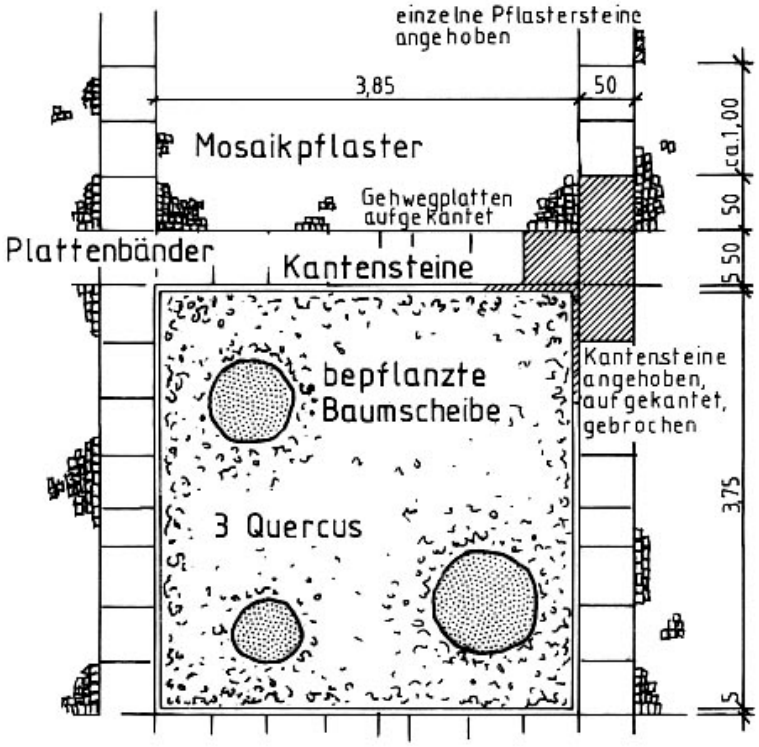
4.4.1 Fallbeispiel 1: Quercus robur, Hannover

Baumart	*Quercus robur* (3x), Stieleiche		
Standort	Hannover, Herrenhäuser Str. 2	**Datum**	15./16.03.1999
Stammdurchmesser	40 + 23 + 25 cm	**Baumscheibe**	bepflanzt (Bodendecker)
Kronendurchmesser	9 + 7 + 8 m	**Baumscheibengröße**	3,75 x 3,75 m = ca. 14 m²

Randeinfassung	Kantenstein (Beton), 2,4/25/100 cm, eben
Wegedecke	Gehwegplatten (Beton) 50/50/5 cm Mosaikpflaster (Naturstein) 5/5/5 cm
Schichtaufbau	Pflasterbettung/Tragschicht: 25 cm Sand (Bodenprobe A) Unterbau: sandiger Füllboden (Bodenprobe B)

Standortbeschreibung

Am Standort wachsen drei *Quercus robur* in einer Baumscheibe. Die mit Mosaikpflaster befestigte Fläche wurde ursprünglich für Fußgängerverkehr ausgelegt, später jedoch als Parkplatz genutzt. Sie dient heute als Fahrradstellplatz und Gehweg. Entlang der Baumscheibe und im Pflaster sind Streifen aus Gehwegplatten verlegt. Für die Aufgrabung wird ein schadhafter Bereich an einer Baumscheibenecke ausgewählt (Darstellung 71). Da drei Bäume in der Baumscheibe wachsen, ist die Schadens- beziehungsweise Wurzelzuordnung zu einzelnen Bäumen nicht möglich.



Darstellung 71: Standort und Schadbild Fallbeispiel 1

Schadbild (Abbildung 3)

Belag: Die Gehwegplatten an der Baumscheibenecke sind angehoben und bis zu ca. 1,5 cm aufgekantet. Entlang des Plattenstreifens sind im Pflaster in ca. 1 m und 2 m Abstand zur Außenkante der Baumscheibe an zwei Stellen einzelne Pflastersteine ca. 0,5 cm angehoben.

Randeinfassung: Die Kantensteine sind an einer Seite und an der Baumscheibenecke angehoben, aufgekantet und gebrochen. Die Aufkantungshöhe kann aufgrund der Hebung des umgebenden Niveaus nicht bestimmt werden.

Abbildung 3: Schadbild Fallbeispiel 1
Die Gehwegplatten und Kantensteine sind an der Baumscheibenecke angehoben und aufgekantet. Die Kantensteine sind gebrochen.

Wurzelbild

0 bis 5 cm Tiefe, Zone unter Belag

Auf der Plattenbettung aus Sand liegt ein extensives Geflecht aus Feinst- und Feinwurzeln (Abbildung 4). In den Fugen- und Randbereichen weisen dunkle Verfärbungen auf die Anreicherung mit organischer Substanz hin. Sie werden durch dichte, mattenähnlich verflochtene Feinstwurzeln erschlossen (Abbildung 5). Es sind einige dickere Wurzeln erkennbar, die bis unter den Belag reichen und Verdickungen an den Auflagepunkten der Platten beziehungsweise Pflastersteine aufweisen.

Abbildung 4: Wurzelbild unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 1
Auf der Pflasterbettung liegt ein Geflecht aus Feinst- und Feinwurzeln. Die vererdeten Fugen zwischen den Platten zeichnen sich dunkel ab. Ein Teilstück des aufgekanteten und gebrochenen Kantensteins wurde entnommen.

Abbildung 5: Feinst- und Feinwurzeln in vererdeten Fugen bei Fallbeispiel 1
In den vererdeten Platten- und Pflasterfugen haben sich fein verzweigte Wurzelgeflechte gebildet. Die Platten wurden entnommen.

5 bis 25 cm Tiefe, Tragschicht/Pflasterbettung

Pflasterbettung und Tragschicht bestehen aus kiesigem Sand und sind hinsichtlich Material und Körnung nicht zu unterscheiden (Bodenprobe A). Der Sand ist mäßig feucht und gut lösbar. Farbschattierungen lassen auf unterschiedliche Beimischungen schließen. Der Kantenstein weist zur Pflanzgrube eine Rückenstütze aus Mörtel auf.

Die Masse der Wurzeln verläuft unter den Gehwegplatten (Abbildung 6). Sie wachsen in ca. 25 cm Tiefe unmittelbar unter der Randeinfassung aus der Pflanzfläche heraus und von dort aufwärts. An den Berührungspunkten mit der Randeinfassung sind die Wurzeln deformiert (Abbildung 7). Die Wuchsrichtung verläuft von der Baumscheibe weg, wobei Kreuzungen und Gabelungen auftreten und stellenweise starke Richtungsänderungen vollzogen werden. Eine Wurzel wächst durch die Eckfuge hindurch, während die übrigen bis zur Ecke an oder unter dem Kantenstein entlang wachsen, um dann von der Ecke diagonal wegzustreben. Die bereits nach Entfernung der Deckschicht erkennbaren Beulen an einigen Derbwurzeln treten nach der Freilegung deutlich hervor (Abbildung 8). An diesen Stellen sind die Gehwegplatten aufgekantet, während die kleineren Mosaikpflastersteine als ganze angehoben werden.

Die Sandschicht wird von Wurzeln unterschiedlichen Durchmessers durchzogen: Der stärkste Wurzelstrang ist mit einem Durchmesser von 5 bis 7 cm den Starkwurzeln zuzurechnen und verzweigt sich in zahlreiche kleinere Wurzeln. Feinstwurzeln sind ausschließlich in humusreichen Bereichen und insgesamt nur in geringen Mengen vorhanden.

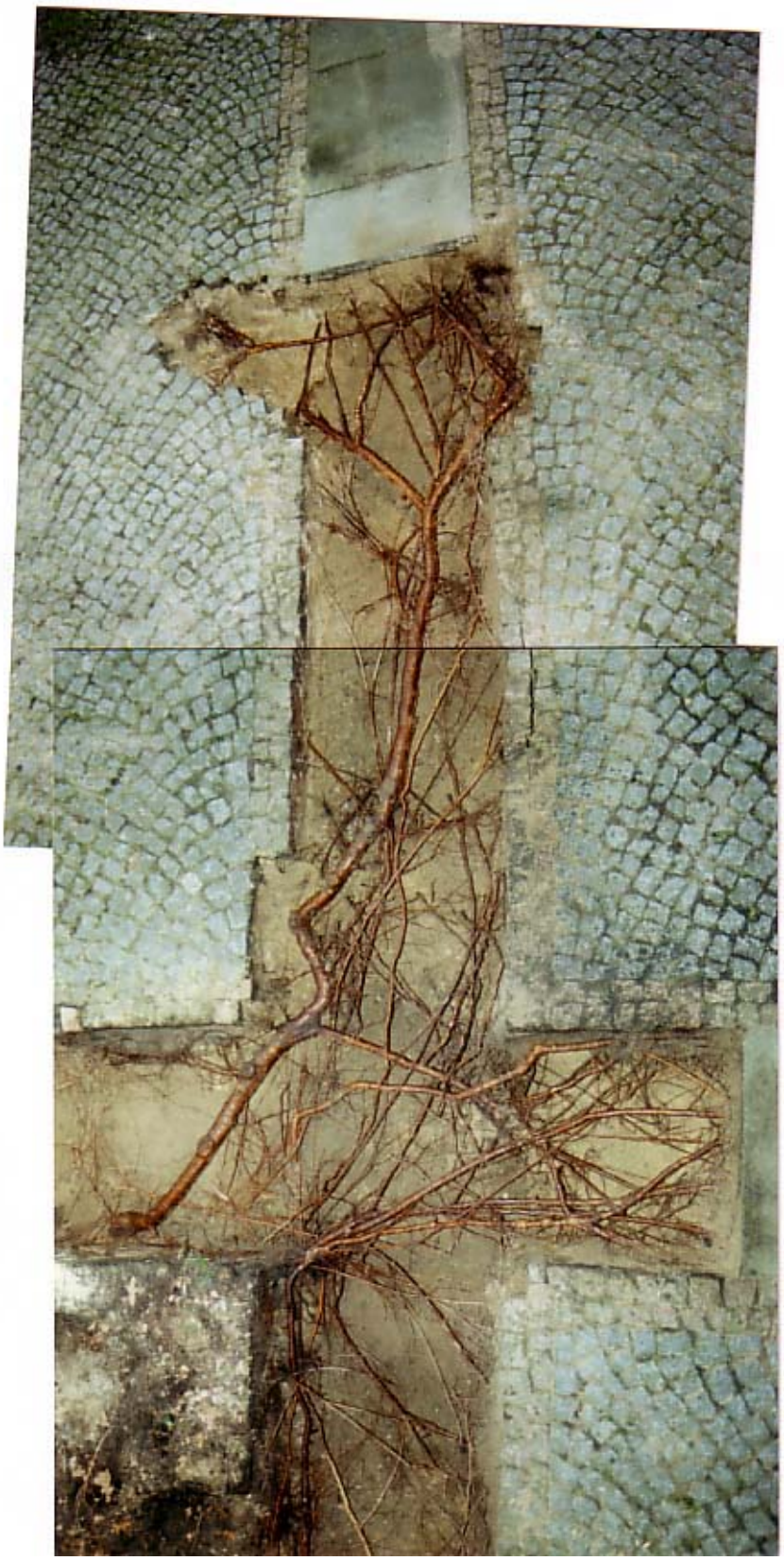


Abbildung 6: Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung und in der Tragschicht bei Fallbeispiel 1
In der Pflasterbettung und der Tragschicht werden Wurzeln unterschiedlicher Dicke freigelegt. Die meisten Wurzeln verlaufen unter den Gehwegplatten. Die Starkwurzel wächst unter der Randeinfassung hervor. An ihr sind verdickte Auflagepunkte des Pflasters bzw. der Platten erkennbar. Mehrere Wurzeln streben diagonal von der Baumscheibenecke weg.

Abbildung 7: Wurzel unter der Randeinfassung bei Fallbeispiel 1
Die Wurzel unterquert die Randeinfassung, hebt diese an, und wächst dann nach oben. Am Auflagepunkt des Kantensteins ist eine Deformation erkennbar. An den Auflagepunkten der Platten hat sich Reaktionsholz gebildet.

Abbildung 8: Reaktionsholz an einer Wurzel unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 1
Die Auflagepunkte des Pflasters auf dieser Derbwurzel sind knollenartig verdickt. Dadurch werden die Anhebungen verstärkt.

25 bis 60 cm Tiefe, Auftragshorizont/Füllboden

Unter der Sandschicht befindet sich ein inhomogenes Mineralgemisch aus Sand, Kies und Bauschutt (Bodenprobe B). Es handelt sich um einen Auftragshorizont beziehungsweise einen Unterbau aus sandigem Füllboden. Obwohl das vorgefundene Mineralgemisch relativ locker ist, wachsen in dieser Schichttiefe relativ wenige Wurzeln außerhalb der Pflanzgrube (Abbildung 9). Parallel zur Baumscheibe verläuft in Nord-Süd-Richtung in ca. 60 cm Tiefe eine mit Betonplatten abgedeckte Fernwärmeleitung.

Abbildung 9: Gesamtes Wurzelbild im Unterbau bei Fallbeispiel 1
Nur wenige Wurzeln wachsen aus der Pflanzgrube in den Unterbau über der Fernwärmeleitung. Die oberste Wurzelschicht wurde entfernt.

Die drei größten Wurzeln gehören zu den Derbwurzeln (20 bis 50 mm), die übrigen zu den Grob- und Schwachwurzeln (5 bis 20 mm). Dem in 60 cm Tiefe anstehenden festen, feinteilhaltigen Boden liegt eine extensive Feinwurzelschicht auf (Abbildung 10). An Bauschuttteilen wie Schlackesteinen finden sich Feinstwurzeln. Unter den Kantensteinen wachsen drei bis vier an den Berührungspunkten mit dem Kantenstein abgeplattete Starkwurzeln von 10 bis 25 cm Durchmesser senkrecht abwärts hinter die Betonwandung der Fernwärmeleitung (Abbildung 11). Die genaue Anzahl ist nicht festzustellen, da es sich bei der dicksten Wurzel sowohl um eine Einzelwurzel als auch um zwei verwachsene Wurzeln handeln kann. Über der Fernwärmeleitung befinden sich in dieser Schichttiefe keine Wurzeln.

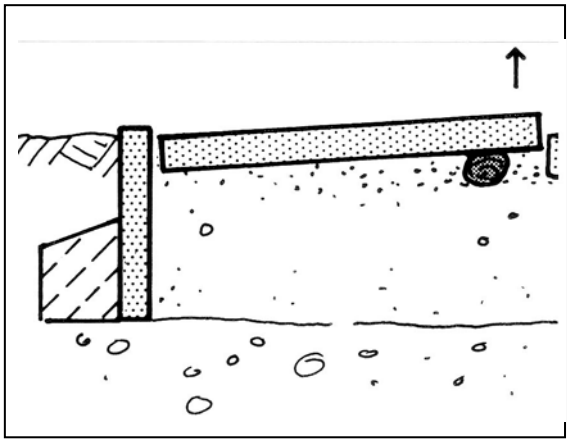
Abbildung 10: Wurzelbild im Unterbau in einem Teilbereich bei Fallbeispiel 1
Einige Wurzeln wachsen im Unterbau. Dem darunter anstehenden feinteilhaltigen Boden liegt eine extensive Schicht aus Feinwurzeln auf.

Abbildung 11: Wurzeln unter der Randeinfassung an der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 1
Dicke Starkwurzeln wachsen unter der Randeinfassung senkrecht abwärts hinter die Fernwärmeleitung. Durch das Dickenwachstum werden die Kantensteine mitsamt Bettung angehoben.

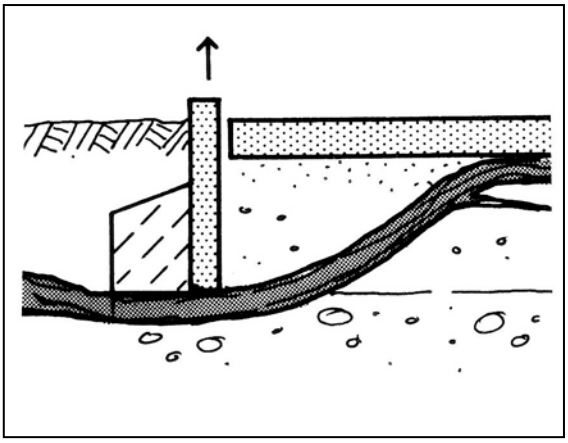
Schadensursachen

Belag: Die Belagsanhebungen werden durch Derbwurzeln (20 bis 50 mm Durchmesser) verursacht, die unmittelbar unter Platten und Pflaster wachsen und an den Berührungspunkten knollenartige Verdickungen aufweisen (Darstellung 72).

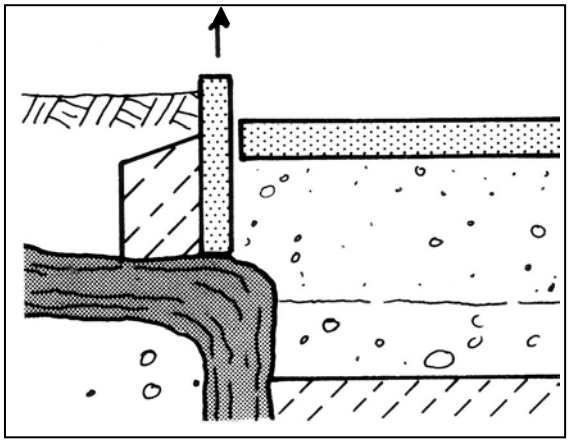
Randeinfassung: Die Anhebung der seitlichen Randeinfassung ist auf eine Starkwurzel (5 bis 7 cm, 25 cm Tiefe) zurückzuführen, die unter dem Kantenstein und dessen Rückenstütze emporwächst und beides anhebt (Darstellung 73). Die Anhebung der Randeinfassung an der Ecke wird durch mehrere sehr dicke Starkwurzeln verursacht (10 bis 25 cm Durchmesser, 25 cm Tiefe), die knieartig unter den Kantensteinen in die Tiefe wachsen und diese mitsamt Rückenstütze anheben (Darstellung 74).



Darstellung 72: Schadensursache der Anhebung der Gehwegplatten bei Fallbeispiel 1



Darstellung 73: Schadensursache der Anhebung der seitlichen Kantensteine bei Fallbeispiel 1



Darstellung 74: Schadensursache der Anhebung der Kantensteine an der Ecke bei Fallbeispiel 1

Interpretation

Platten und Pflaster werden von dickeren Wurzeln mit beulenartigen, punktuellen Verdickungen an den Auflagestellen angehoben. Diese entstehen als Reaktionsholz durch die hohe Druckbelastung (siehe Abschnitt 2.2.4) und bewirken oder verstärken die Anhebungen. Bei einer ausreichend großen Sandschicht zwischen Stein und Wurzel werden keine Verdickungen gebildet und die Wurzeln verursachen keine sichtbaren Aufkantungen. Die unmittelbar unter dem Belag wachsenden Feinwurzeln führen nicht zu erkennbaren Belagsanhebungen. Die Dicke und die Wuchstiefe von Wurzeln sind also entscheidende Faktoren.

Die Wurzeln verlaufen vor allem unter den Platten und kaum unter dem Pflaster. Dem steht die Erwartung gegenüber, dass letzteres durch den höheren Fugenanteil im Mosaikpflaster einen besseren Gasaustausch, eine größere Wasserdurchlässigkeit sowie eine stärkere Anreicherung mit Nährstoffen ermöglicht und somit generell bessere Wachstumsbedingungen bietet. Andererseits ist es möglich, dass die Platten einen besseren Schutz vor Austrocknung bieten. Es ist außerdem anzunehmen, dass die Mosaikpflastersteine in eine Mörtelschicht verlegt wurden, die durch Verkehrsbelastungen, Temperaturschwankungen und Frosteinwirkung heute nicht mehr erkennbar ist. Unter diesen Umständen haben sich die Wurzeln unter der Mörtelbettung möglicherweise weniger gut entwickeln können. Mit Ausnahme der Feinstwurzeln, die sich ausschließlich an feinteil- und humushaltigen Stellen finden, erschließen die Wurzeln auch den vergleichsweise nährstoffarmen Sand. Demnach ist der Nährstoffgehalt nicht ausschlaggebend für die Entwicklung von Wurzeln unter Verkehrsflächen. Wurzeln wachsen offenbar nur tendenziell radial vom Baum weg und in die Tiefe. Kleinsträumigen Reizen folgend wachsen sie in unterschiedlichste Richtungen, um auf diese Weise den Bodenkörper optimal zu erschließen. Dies zeigt das Beispiel einer Wurzel, die unter der Randeinfassung her- und dann direkt in höhere Schichten hinauf wächst und so zu den Belagschäden führt, während an derselben Stelle andere Wurzeln in tieferen Schichten verbleiben und vom Baum weg wachsen.

Dasselbe Beispiel zeigt auch, dass Randeinfassungen eine Barriere für Wurzeln darstellen. Nach Überwinden der Barriere können sie jedoch unmittelbar dahinter wieder empor und unter dem Belag weiter wachsen. Durch das Dickenwachstum der die Randeinfassung unterwachsenden Wurzeln kommt es zum Bruch der Rückenstütze, so dass die Kantensteine unregelmäßig angehoben werden. Dieser Bruch ist bei der Freilegung jedoch nicht sichtbar, da die Rückenstütze aus einem sehr mageren, bröckeligen Beton besteht. Der auffällige, senkrecht abknickende Verlauf der Starkwurzeln unter den Kantensteinen kann sowohl auf die Barrierewirkung der Randeinfassung als auch auf den Bau der Fernwärmeleitung zurückzuführen sein. Der mechanische Widerstand des Kantensteins leitet sie zunächst in die Tiefe. Die genaue Ursache für den weiteren Verlauf ist nicht zu klären. An der Ecke der Baumscheibe verlaufen mehrere Wurzelstränge diagonal weg, nachdem sie zunächst an oder unter der Randeinfassung entlang gewachsen sind. Diese Beobachtung unterstützt die in Kapitel 3 geäußerte Vermutung, dass das Vorhandensein von Randeinfassungen eine vermehrte Lokalisierung der Schäden an Ecken von Baumscheiben bewirkt.

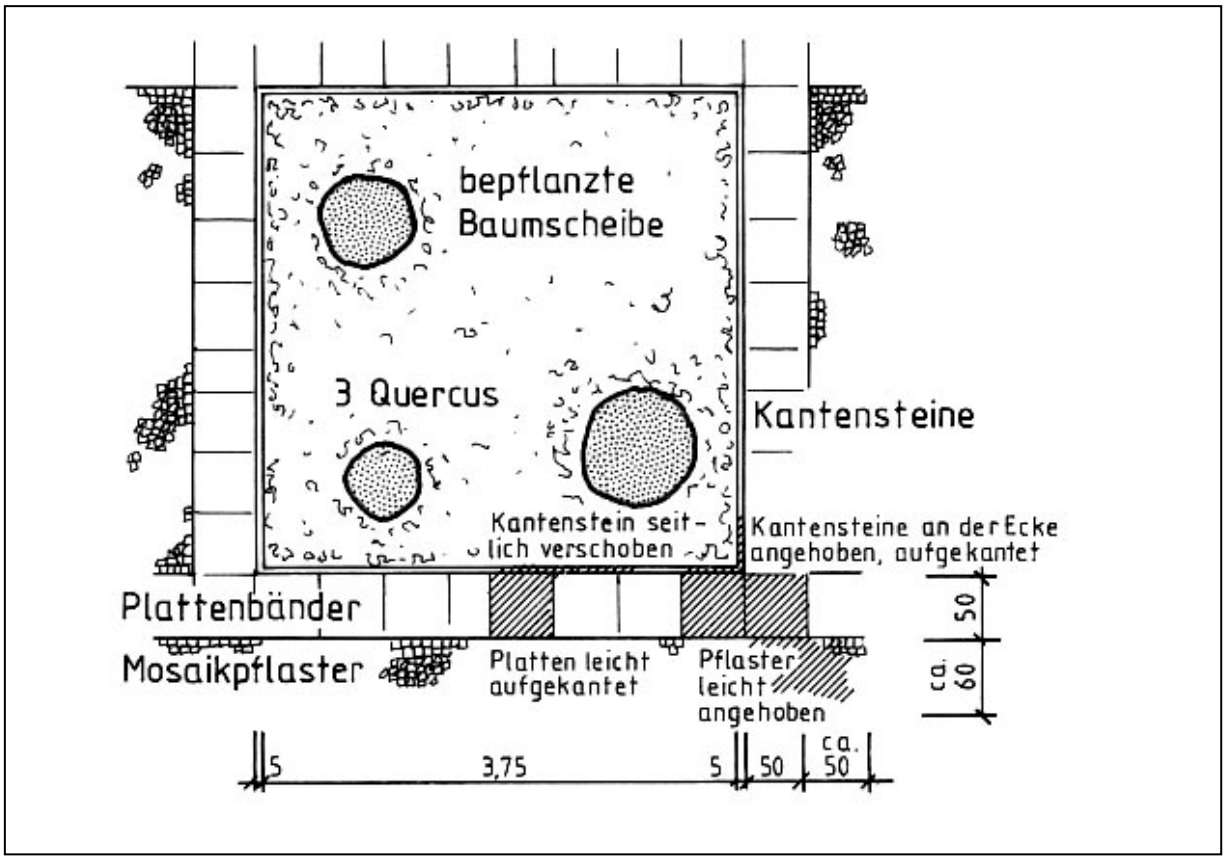
4.4.2 Fallbeispiel 2: Quercus robur, Hannover

Baumart	Quercus robur (3x), Stieleiche		
Standort	Hannover, Herrenhäuser Str. 2	**Datum**	17.03.1999
Stammdurchmesser	40 + 23 + 25 cm	**Baumscheibe**	bepflanzt (Bodendecker)
Kronendurchmesser	9 + 7 + 8 m	**Baumscheibengröße**	3,75 x 3,75 m = ca. 14 m²

Randeinfassung	Kantenstein (Beton), 2,4/25/100 cm, eben
Wegedecke	Gehwegplatten (Beton) 50/50/5 cm Mosaikpflaster (Naturstein) 5/5/5 cm
Schichtaufbau	Pflasterbettung/Tragschicht: 25 cm Sand (Bodenprobe A) Unterbau: sandiger Füllboden (Bodenprobe B)

Standortbeschreibung

Die Baumscheibe ist mit dem aus Fallbeispiel 1 identisch. Für eine weitere Aufgrabung wird ein schadhafter Bereich an einer zweiten Baumscheibenecke ausgewählt (Darstellung 75).



Darstellung 75: Standort und Schadbild Fallbeispiel 2

Schadbild (Abbildung 12)

Belag: Die Gehwegplatten sind sowohl an der Seite als auch an der Ecke der Baumscheibe 0,5 bis 1 cm hoch aufgekantet. Im Pflaster entlang des Plattenstreifens sind kaum Anhebungen wahrnehmbar.

Randeinfassung: Die seitlichen Kantensteine sind bis zu ca. 1 cm angehoben und seitlich verschoben. Zwischen Kantensteinen und Gehwegplatten verläuft ein ca. 5 cm breiter Spalt. Die Kantensteine an der Baumscheibenecke sind angehoben und bis zu ca. 3 cm aufgekantet.

Abbildung 12: **Schadbild Fallbeispiel 2**
Die Gehwegplatten sind leicht angehoben. Die Kantensteine sind angehoben und seitlich verschoben.

Wurzelbild

0 bis 5 cm Tiefe, Zone unter Belag

Wie in Fallbeispiel 1 überzieht ein weitmaschiges Geflecht aus Feinst- und Feinwurzeln die Plattenbettung aus Sand. Die Fugen werden von einem dichten Wurzelfilz aus Feinstwurzeln durchzogen. Die dunkle Farbe des Fugenmaterials lässt auf die Anreicherung mit organischer Substanz schließen. In dem Spalt zwischen Gehwegplatten und Kantenstein ist der leicht deformierte Abschnitt einer Derbwurzel erkennbar.

5 bis 25 cm Tiefe, Tragschicht und Pflasterbettung

Wie in Fallbeispiel 1 wird die Pflasterbettung beziehungsweise die Tragschicht aus schwach kiesigem Sand (Bodenprobe A) entfernt. Der freigelegte Raum wird intensiv mit Wurzeln unterschiedlicher Größe durchzogen (Abbildung 13). Feinstwurzeln treten nur an organischer Substanz oder an Oberbodeneinschlüssen auf. Während Feinwurzeln in relativ geringer Menge vorhanden sind, ist die Masse der meisten Wurzeln den Schwach-, Grob- und Derbwurzeln (2 bis 50 mm Durchmesser) zuzurechnen. Sie weisen an einigen Stellen Deformationen auf. Starkwurzeln werden nicht vorgefunden. Die Hauptwuchsrichtung der Wurzeln verläuft von der Baumscheibe weg, wobei manche auch quer oder diagonal dazu verlaufen. Mechanische Widerstände wie Bauschuttbestandteile (Abbildung 14) führen zu Zickzackwuchs.

Abbildung 13: Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung und in der Tragschicht bei Fallbeispiel 2

Der Bereich wird durch Wurzeln unterschiedlichen Durchmessers in verschiedenen Wuchsrichtungen erschlossen. Die Hauptwuchsrichtung der Wurzeln verläuft von der Baumscheibe weg. Links wachsen mehrere Wurzeln unter der Randeinfassung her. Eine Wurzel wächst quer dazu unmittelbar an der Randeinfassung nach oben und dann wieder bogenförmig nach unten. Sie biegt dann in die Plattenbettung ab, wo sie leichte Anhebungen verursacht.

Abbildung 14: Richtungsänderung an einem Widerstand bei Fallbeispiel 2
Ein in der Tragschicht befindlicher Stein veranlasst die Wurzel zur abrupten Richtungsänderung.

In 25 cm Tiefe wachsen drei Wurzeln an derselben Stelle unter dem Kantenstein hervor (Abbildung 15). Zwei Wurzeln von je ca. 2,5 cm Durchmesser wachsen in dieser Tiefe weiter, eine davon seitlich am Kantenstein entlang, eine andere im rechten Winkel von der Baumscheibe weg. Eine dritte Wurzel mit fast 4 cm Durchmesser verläuft am Kantenstein entlang nach oben bis an die Oberfläche und dann wieder bogenförmig nach unten bis in eine Tiefe von ca. 20 cm. In der Horizontalen verläuft sie von der Randeinfassung weg und wieder darauf zu, um dann an der Ecke diagonal von der Baumscheibe wegzustreben. Sie gabelt sich an einer Stelle in drei Wurzelstränge bis zu 2,5 cm Durchmesser und wächst im Bereich der Plattenanhebung in der Pflasterbettung weiter (Abbildung 16). Es zeigt sich, dass die Wurzeln bei gleicher Ausgangsposition völlig unterschiedliche Wuchsrichtungen einnehmen. Nach der Wegnahme des Kantensteins ist ferner erkennbar, dass die Rückenstütze der Kantensteine unterschiedliche Dicken aufweist, was bei korrekter Bauausführung nicht zu erwarten wäre.

Abbildung 15: Wurzeln unter der Randeinfassung bei Fallbeispiel 2
Die Kantensteine werden an einer Stelle von mehreren Wurzeln unterwachsen. Diese wachsen danach in unterschiedlichen Richtungen und Bodentiefen weiter. Ein Wurzelstrang wächst nach oben, wo er zunächst die Fuge zwischen Kantenstein und Pflaster aufweitet und dort zu Belagsanhebungen führt.

Abbildung 16: Wurzelgabelung unter einer Gehwegplatte bei Fallbeispiel 2
Die Wurzel gabelt sich an einer Stelle zu drei Wurzelsträngen auf. Vermutlich handelt es sich um eine ehemalige Kappungsstelle. Die Gehwegplatte ist hier leicht angehoben.

25 bis 35 cm Tiefe, Auftragshorizont/Füllboden

Alle Wurzeln unter 2 cm Durchmesser werden entfernt, um weitere 10 cm der Pflasterbettung/Tragschicht bis zum Baugrund (Bodenprobe B) ausräumen zu können. Es zeigt sich auch hier eine Durchwurzelung mit Schwach-, Grob- und Derbwurzeln (2 bis 50 mm Durchmesser). In 35 cm Tiefe wächst eine 7 bis 8 cm dicke Starkwurzel unter dem Kantenstein und dessen Bettung her (Abbildung 15). Der Kantenstein ist an dieser Stelle angehoben.

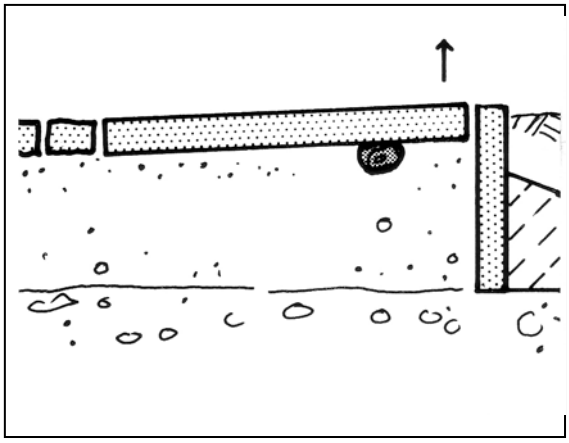
Das Wurzelwachstum an der Baumscheibenecke ist ähnlich wie bei Fallbeispiel 1: Eine Starkwurzel mit 6 cm Durchmesser sowie drei Derbwurzeln mit jeweils 3 bis 4 cm Durchmesser wachsen unter der Ecke des Kantensteins und dessen Rückenstütze hervor und dann senkrecht in den Boden (Abbildung 17). Die Randeinfassung ist hier deutlich angehoben und aufgekantet.

Abbildung 17: Wurzeln unter der Randeinfassung an der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 2
Unter der Kantensteinbettung wachsen Starkwurzeln in die Tiefe und heben so die Randeinfassung an.

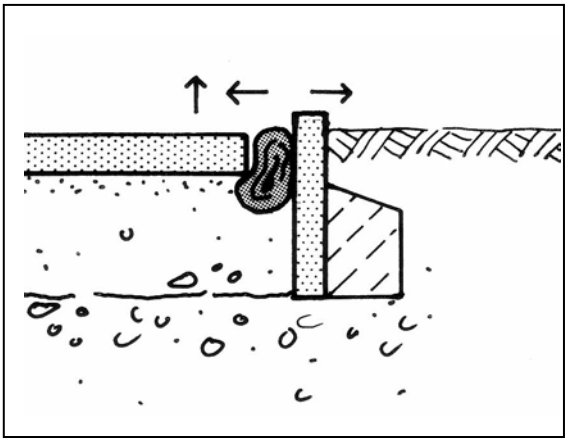
Schadensursachen

Belag: Die Anhebung der Gehwegplatten an der Baumscheibenecke ist auf dicht darunter wachsende Derbwurzeln (20 bis 50 mm Durchmesser) zurück zu führen (Darstellung 76). Die Anhebung der seitlichen Gehwegplatten entsteht im Zuge der Spaltbildung zwischen Kantenstein und Gehwegplatten durch eine von unten nach oben wachsende Derbwurzel (4 cm Durchmesser; Darstellung 77)

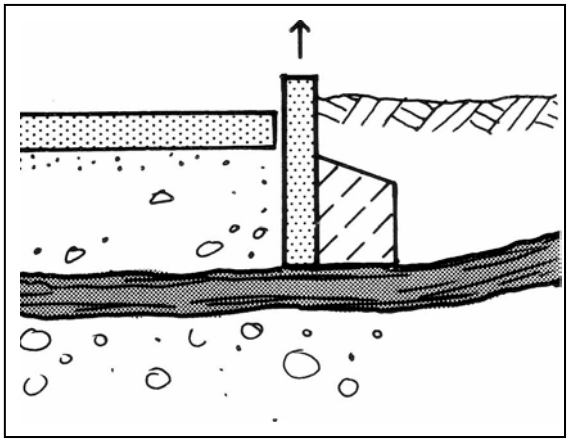
Randeinfassung: Die Anhebung des seitlichen Kantensteins wird durch eine Starkwurzel verursacht (7 bis 8 cm Durchmesser, 35 cm Tiefe), die unter dem Kantenstein und dessen Rückenstütze hervorwächst und beide anhebt (Darstellung 78). Die Anhebungshöhe ist im Vergleich zur Wurzeldicke gering. Die Spalte zwischen Gehwegplatten und Kantenstein bei gleichzeitiger leichter Anhebung der angrenzenden Gehwegplatte ist auf eine Derbwurzel zurückzuführen, die unter dem Kantenstein geradewegs empor und dann eine kurze Strecke innerhalb der Fuge wächst (4 cm Durchmesser, 20 cm bis wenige mm Tiefe). Die Anhebung der Randeinfassung an der Ecke entsteht durch mehrere Stark- und Derbwurzeln (3 bis 4 und 6 cm Durchmesser, 35 cm Tiefe), die unter den Kantensteinen aus der Innenecke hervor- und dann in die Tiefe wachsen. Sie heben die Kantensteine mitsamt Rückenstützen an (Darstellung 79).



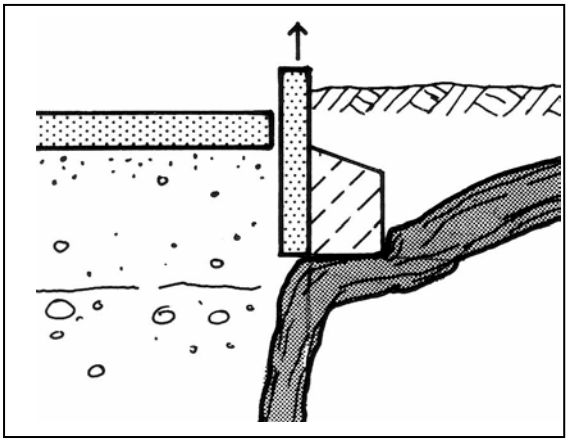
Darstellung 76: Schadensursache der Anhebung der Gehwegplatten an der Ecke bei Fallbeispiel 2



Darstellung 77: Schadensursache der Anhebung der seitlichen Gehwegplatten bei Fallbeispiel 2



Darstellung 78: Schadensursache der Anhebung der seitlichen Kantensteine bei Fallbeispiel 2



Darstellung 79: Schadensursache der Anhebung der Kantensteine an der Ecke bei Fallbeispiel 2

Interpretation

Vier Wurzeln, die an einer Stelle bei annähernd gleichen Bedingungen unter dem Kantenstein her wachsen, verlaufen danach sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen in völlig unterschiedlichen Richtungen. Einer radialen und horizontalen Grundrichtung folgend, richtet sich das Wachstum von Baumwurzeln nach den jeweiligen Bodeneinflüssen. Eine Wurzel wächst aus der Tiefe geradewegs an die Oberfläche und zeigt, wie Barrieren, im vorliegenden Fall Kantensteine, umwachsen werden können. Im weiteren Verlauf wächst sie bis unter den Wegebelag. Die Barriere hat in diesem Falle also im Hinblick auf Schäden am Wegebelag lediglich eine zeitliche Verzögerung bewirkt. Die Anhebung der Kantensteine an der Baumscheibenecke ist mit Fallbeispiel 1 zu vergleichen (siehe dort).

Die Anhebung der Gehwegplatte an der Baumscheibenecke entsteht durch eine Derbwurzel, die sich an dieser Stelle in drei Wurzelstränge teilt. Es sind jedoch trotz der aufliegenden Platte keine verdickten Auflagepunkte erkennbar. Möglicherweise hat sich kein Reaktionsholz gebildet, weil dieser periphere Bereich des ehemaligen Parkplatzes selten genutzt wird und die Druckbelastung früher wie heute gering ist. Die Teilung der Wurzel dürfte durch eine Kappung veranlasst worden sein, da es sich vom natürlichen Verzweigungsbild, wie es an anderen Stellen zu sehen ist, unterscheidet. Es ist nicht auszuschließen, dass diese Kappung im Zuge einer vergangenen Belagsregulierung vorgenommen wurde und die Entstehung der erneuten Anhebung gefördert hat. Eine tiefere Wurzel mit größerem Durchmesser verursacht trotz beachtlicher Dicke relativ geringe Anhebungen. Möglicherweise hat der sandige Füllboden hier nachgegeben und schadensmindernd gewirkt.

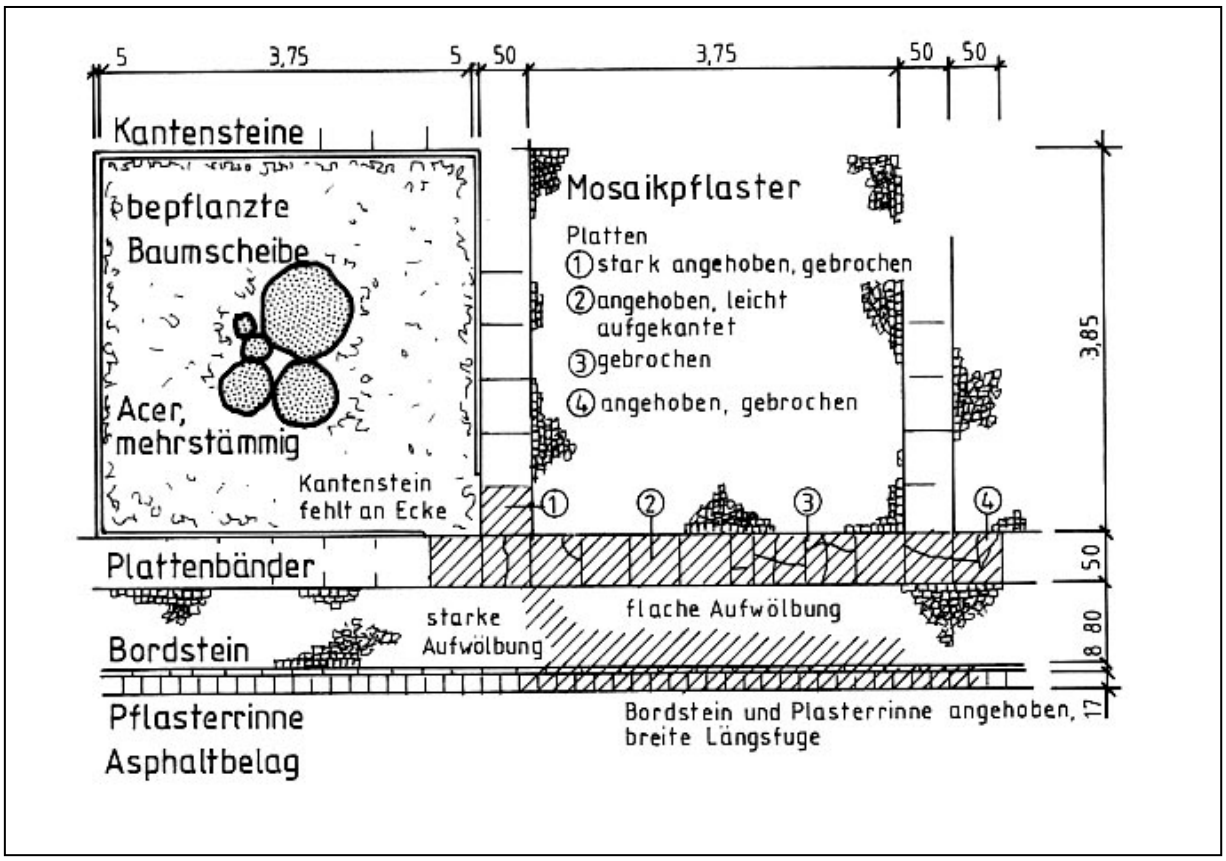
4.4.3 Fallbeispiel 3: Acer saccharinum, Hannover

Baumart	*Acer saccharinum*, Silberahorn		
Standort	Hannover, Herrenhäuser Str. 2	**Datum**	29.03.1999
Stammdurchmesser	mehrstämmig, 18 bis 32 cm	**Baumscheibe**	bepflanzt
Kronendurchmesser	14 m	**Baumscheibengröße**	3,75 x 3,75 m = ca. 14 m²

Randeinfassung	Kantenstein (Beton), 2,4/25/100 cm, eben Rinne: Bordstein 8/28/50 cm, Schlackesteine 16/16/15 cm
Wegedecke	Gehwegplatten 50/50/5 cm Mosaikpflaster 5/5/5 cm Asphalt
Schichtaufbau	Pflasterbettung/Tragschicht: 25 cm Sand, teilweise mit Zement- oder Kalkzusatz (Bodenprobe C)

Standortbeschreibung

Der Standort befindet sich in ca. 15 m Entfernung von Fallbeispiel 1 und 2 (Darstellung 80). Die Baumscheibe ist von Mosaikpflaster und Streifen aus Gehwegplatten umgeben. Die angrenzenden Flächen werden zu drei Seiten durch Kfz befahren oder als Parkplatz genutzt. An einer Seite schließt eine asphaltierte Fläche an das Mosaikpflaster an. Beide Belagsarten sind durch eine Pflasterrinne und einen ebenen Bordstein getrennt, welche beide streckenweise angehoben sind. Von der Pflasterrinne bis zur nächst gelegenen Baumscheibenecke verläuft eine teilweise starke Aufwölbung.



Darstellung 80: Standort und Schadbild Fallbeispiel 3

Schadbild (Abbildung 18 und 19)

Belag: Der Belag ist insgesamt im Niveau leicht erhöht. Die Platten an der Baumscheibenecke sind stark angehoben und bis zu 8 cm gegenüber den angrenzenden Platten aufgekantet. Einige Platten sind gebrochen. Im Verlauf des Plattenstreifens sind mehrere Platten bis 5,50 m von der Baumscheibenaußenkante (ca. 6,50 m ab Stammfuß) angehoben, aufgekantet und gebrochen. Hellere Platten zeugen von bereits erfolgten Ausbesserungen. Das Pflaster ist bis zu einer Entfernung von ca. 3 m ab Außenkante der Baumscheibe bis ca. 5 cm aufgewölbt und hat sich teilweise aus dem Verband gelöst.

Randeinfassung: An der Baumscheibenecke fehlen Kantensteine. Die seitlichen Kantensteine sind angehoben.

Rinne: Die Rinne ist auf einer Länge von 4 m um bis zu bis 3 cm angehoben. Zwischen der Pflasterreihe und dem angrenzenden Asphalt klafft ein bis zu 7 cm breiter Spalt. Der Wurzelverlauf ist auf ca. 8 m erkennbar

Abbildung 18: **Schadbild Fallbeispiel 3**
Die Gehwegplatten sind angehoben und teilweise gebrochen. Von der Baumscheibenecke zieht sich eine Aufwölbung im Mosaikpflaster entlang der Pflasterrinne. Diese und die angrenzenden Bordsteine sind angehoben.

Abbildung 19: Schadbild an der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 3
Die Gehwegplatten an der Baumscheibenecke sind bis zu 8 cm hoch aufgekantet und gebrochen.

Wurzelbild

0 bis 5 cm Tiefe, Zone unter Belag

Ab der Baumscheibenecke wird ein ca. 6 m langer Plattenstreifen aufgehoben. Der zwischen Plattenstreifen und Rinne befindliche Pflasterstreifen wird im Bereich der Wölbung in voller Breite (80 cm) auf ca. 4,50 m Länge entfernt. Unter dem Mosaikpflaster sind kaum Wurzeln sichtbar. Die durch die Aufwölbung aufgeweiteten Fugen sind stark vererdet, vermoost und verkrautet. Unter den Gehwegplatten befindet sich ein dichtes, mattenähnliches Geflecht aus Feinst-, Fein- und Schwachwurzeln (bis 5 mm Durchmesser), das nach Abkehren des losen Pflastersandes gut sichtbar wird (Abbildung 20). Die Feinwurzeln nehmen augenscheinlich das größte Volumen ein. Dort, wo die Plattenbettung noch sichtbar ist, lässt die Festigkeit des sandigen Materials auf einen Mörtel- oder Kalkzusatz schließen. Die dunkle Verfärbung der Fugen weist auf Humusanreicherungen hin.

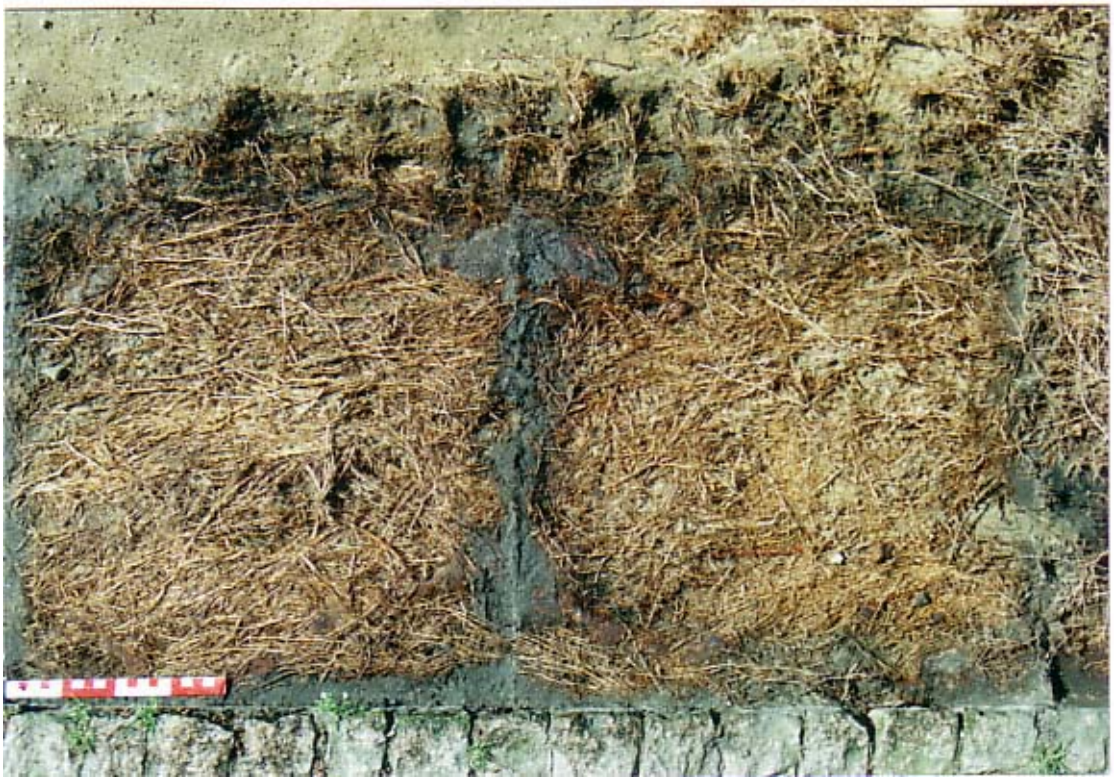


Abbildung 20: Wurzelbild unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 3
Unter den Gehwegplatten wächst ein dichter Filz aus Feinwurzeln. Dazwischen befinden sich im Bereich der Fuge auch größere Wurzeln (oben und unten). Die Masse der feinen Wurzeln hebt die Gehwegplatten gleichmäßig an, während dickere Wurzeln Aufkantungen verursachen.

5 bis 20 cm Tiefe, Tragschicht und Pflasterbettung

Die Pflasterbettung beziehungsweise Tragschicht unter dem Pflaster wird bis zum bauschutthaltigen Unterbau entfernt (Abbildung 21). Das Bettungsmaterial ist locker und gut lösbar. Die Sandschicht unter dem Pflaster wird in mehreren Lagen von ca. 4 cm dicken Wurzelmatten durchzogen (Abbildung 22). Sie bestehen größtenteils aus Feinwurzeln, beinhalten jedoch auch Feinst- und Schwachwurzeln. Die Schichten sind klar abgegrenzt, der Sand dazwischen wird nicht erschlossen. Die Wurzelmatten lassen sich am Stück hochheben (Abbildung 23). Der Wurzelfilz unter den Platten ist dichter als unter dem Pflaster und beinhaltet auch größere Wurzeln bis zu einem Durchmesser von ca. 5 cm (Derb- und Grobwurzeln), die stellenweise bis unter den Belag reichen. An einigen Auflagestellen haben sich schwache Verdickungen ausgebildet. In ca. 6 m Entfernung von der Baumscheibe wird das Feinwurzelgeflecht entfernt, um die darin liegenden Starkwurzeln freizulegen. Hier reicht grober Bauschutt (Ziegelsteine) bis unter die Platten und veranlasst die Wurzel zum Emporwachsen (Abbildung 24). An dieser Stelle sind schwache Druckstellen ausgebildet, die Gehwegplatten sind angehoben und größtenteils gebrochen.

Abbildung 21: Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung und in der Tragschicht bei Fallbeispiel 3
Unter den Gehwegplatten befindet sich ein dichtes Geflecht aus Feinwurzeln. Im vorderen Bereich wurde eine größere Wurzel freigelegt. Sie wächst auf einer Bauschuttbeimengung nach oben und hebt Gehwegplatten an. In der linken Hälfte der Aufgrabungsstelle wurde die Tragschicht entnommen. Sie wird lagenweise von Feinwurzeln erschlossen.

Abbildung 22: Wurzelschichten unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 3
Die Durchwurzelung setzt erst unter der gebundenen Pflasterbettung ein. In der Tragschicht befinden sich mehrere mattenartigen Lagen aus Feinwurzeln.

Abbildung 23: Matte aus Feinwurzeln bei Fallbeispiel 3
Die Feinwurzelgeflechte sind kaum mit dem darunter anstehenden Boden verwurzelt. Sie lassen sich am Stück anheben.

Abbildung 24: Wurzeln über Bauschuttbeimengung bei Fallbeispiel 3
Über einem Bereich aus Ziegeln und anderem Bauschutt wachsen stärkere Wurzeln, die hier zu Anhebungen des Wegebelags und zum Bruch der Platten führen.

An der Baumscheibenecke werden zwei Starkwurzeln mit ca. 12 und 7 cm Durchmesser freigelegt (Abbildung 25). Auf der Innenseite sind die Wurzeln auf 15 bis 20 cm Breite miteinander verwachsen und verlassen die Baumscheibe in diagonaler Richtung. Ein Strang trifft auf die Rinnenbettung und wächst darunter weiter, ein anderer zweigt schon früher ab und verläuft unter den Gehwegplatten. Einige Stark- und Derbwurzeln sowie die sie begleitenden Fein- und Schwachwurzeln wachsen entlang organischer Substanz. Bei dieser kann es sich sowohl um holzige Bauschuttbestandteile als auch um abgestorbene Wurzeln handeln (Abbildung 26).

Abbildung 25: Erschließung organischer Substanz bei Fallbeispiel 3
Organische Substanz wie abgestorbene Wurzeln oder Holzstücke in Bauschuttbeimengungen wird als Nährstoffquelle erschlossen.

Abbildung 26: Wurzeln in der Baumscheibenecke bei Fallbeispiel 3
In der Baumscheibenecke sind mehrere Wurzeln brettartig zusammengewachsen. Die Kantensteine fehlen in diesem Bereich.

20 bis 40 cm Tiefe, Unterbau

Im Abstand von ca. 7 m zur Baumscheibe wird im Bereich der Rinnenanhebung bis ca. 40 cm Tiefe aufgegraben. Der Boden ist hier schwerer lösbar. Er enthält weitere Wurzelmatten. Feinwurzelgeflechte und Bordsteine werden entfernt und geben den Blick auf Wurzelgeflechte zwischen Bordstein und Rinnenpflaster sowie zwischen Bordstein und Rückenstütze frei. Bei der Entfernung des Bordsteins und der Rinne erweist sich die Betonbettung als stellenweise bröselig und rissig. Darunter befindet sich eine Starkwurzel von ca. 18 cm Durchmesser. Sie ist von dichten Wurzelmatten umgeben, welche die Hohlräume zwischen Wurzel, Fundament und Unterbau ausfüllen (Abbildung 27). An einigen Stellen erreichen die Wurzelmatten ca. 8 cm Dicke. Die Starkwurzel scheint mit weiteren Wurzeln verwachsen zu sein. Deren genaue Anzahl ist jedoch nicht zu bestimmen, da zur Schonung der Wurzel keine weiteren Aufgrabungen vorgenommen werden. Auch in diesem Arbeitsabschnitt werden durch Wurzeln erschlossenes Holz und Feinstwurzelnetze an Ziegelsteinen vorgefunden.

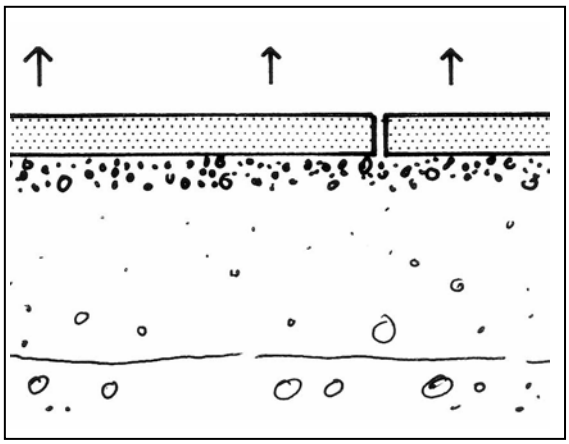
Abbildung 27: Wurzeln unter der Pflasterrinne bei Fallbeispiel 3
Unter dem Betonfundament der Pflasterrinne wächst in Längsrichtung eine dicke Starkwurzel, die von dicken Feinwurzelgeflechten umgeben ist. Sie hebt die Rinne auf mehreren Metern an.

Schadensursachen

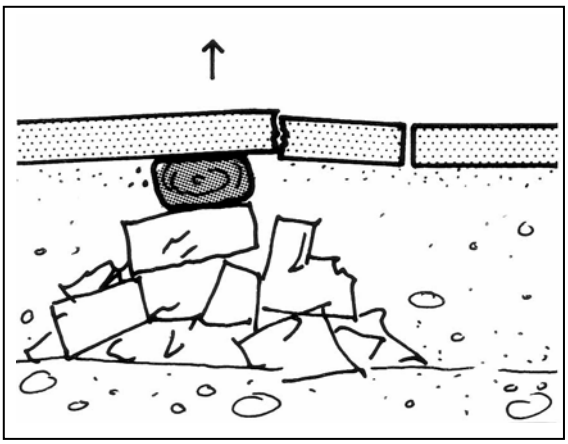
Belag: Die gleichmäßigen Belagsanhebungen von Pflaster und Platten sind auf ca. 4 cm dicke Matten aus Feinst-, Fein- und Schwachwurzeln (bis 5 mm Durchmesser) unter dem Belag zurückzuführen (Darstellung 81). Die aufgekanteten Gehwegplatten werden hingegen durch Derbwurzeln verursacht, die bis unter den Belag reichen (Darstellung 82). Grober Bauschutt direkt unter dem Belag ist als schadensverstärkend anzusehen, da hier die Wurzeln empor wachsen müssen. Die starken Plattenanhebungen an der Baumscheibenecke sowie die aufgewölbte Pflasterfläche werden durch Wurzeln bewirkt, die in der Innenseite auf bis zu 20 cm Breite zusammengewachsen sind und die Baumscheibe dann als Starkwurzelstränge verlassen (Darstellung 83).

Randeinfassung: An der Baumscheibenecke bilden mehrere miteinander verwachsene Wurzeln eine oberflächennahe, brettartige Schicht. Vermutlich ist dies auch der Grund dafür, dass die Randeinfassung an dieser Stelle entfernt wurde. Die Anhebung der seitlichen Kantensteine wurde nicht untersucht.

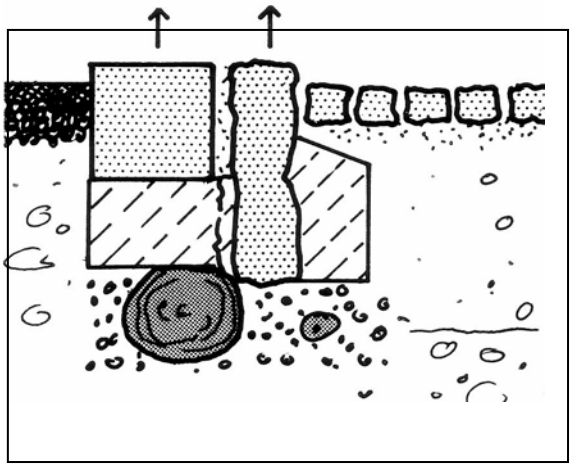
Rinne: Die Anhebung der Pflasterrinne, bestehend aus Pflasterstreifen und Bordstein, wird durch eine, evt. auch mehrere unter der Fundamentierung entlang wachsende Starkwurzeln (bis 18 cm Durchmesser, 40 cm Tiefe) verursacht (Darstellung 84).



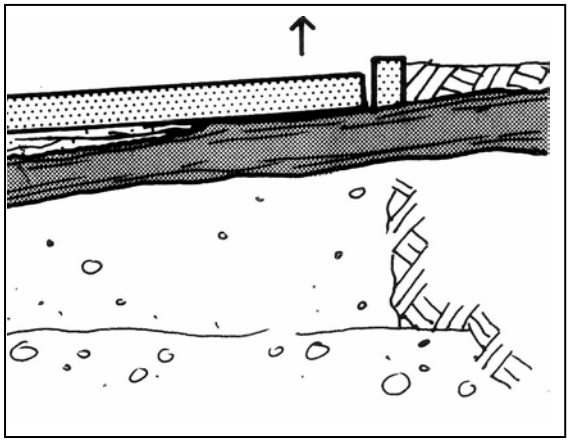
Darstellung 81: Schadensursache der gleichmäßigen Anhebung der Gehwegplatten bei Fallbeispiel 3



Darstellung 82: Schadensursache der Aufkantung der Gehwegplatten bei Fallbeispiel 3



Darstellung 83: Schadensursache der Plattenanhebung an der Ecke und der Pflasterwölbung bei Fallbeispiel 3



Darstellung 84: Schadensursache der Anhebung der Pflasterrinne bei Fallbeispiel 3

Interpretation

Der untersuchte *Acer saccharinum* bildet am untersuchten Standort dichte, mattenähnliche Geflechte aus Feinst-, Fein- und Schwachwurzeln aus, die den Boden schichtweise durchziehen. Die Verdikkungen der Wurzeln unter dem Belag sind schwächer ausgebildet, als an dieser durch Fahrzeuge belasteten Stelle zu erwarten gewesen wäre. Die oberflächennahe Durchwurzelung ist wie in Fallbeispiel 1 und 2 unter den Platten stärker als unter Pflaster. Möglicherweise wirken Kalk- oder Zementbeimischungen im Pflasterbett wachstumshemmend.

Die Ursache des auffällig schichtweisen Wurzelwachstums kann nicht geklärt werden. Die relativ gleichmäßig dicken elastischen Wurzelmatten bewirken eine kaum wahrnehmbare Anhebung des Wegebelags. Die Aufwölbungen im Pflaster und die starken Aufkantungen des Plattenbelags werden durch Derb- und Starkwurzeln (ab 20 mm Durchmesser) verursacht. Der kleinteilige Mosaikpflasterbelag ist hier hinsichtlich der Verkehrssicherheit weniger problematisch als Gehwegplatten. Während ersterer eine Wölbung ausbildet, treten bei den Platten bei gleicher Wurzelgröße beachtliche Stolperkanten auf.

Auch bei diesem Fallbeispiel kommt der Baumscheibenecke besondere Bedeutung zu: Möglicherweise sind oberflächennahe Wurzeln durch die ehemals vollständig vorhandene Randeinfassung in die Ecke gelenkt worden und haben die Baumscheibe durch die Eckfugen verlassen.

Starkwurzeln wachsen hauptsächlich unter dem Betonfundament der Rinne, was auf gute Wachstumsbedingungen schließen lässt. Möglicherweise bieten derartige Bauteile Schutz vor Druck, vor Temperaturschwankungen und Austrocknung. Rand- und Übergangszonen sowie Fundamente können somit eine Lenkungsfunktion für Baumwurzeln besitzen.

Die freigelegte Starkwurzel unter der Rinnenbettung befindet sich außerhalb der Kronentraufe. Dies zeigt, dass auch starke Verankerungswurzeln bis weit über das generell als Faustzahl angenommene Maß von Kronentraufe + 1,5 m hinausreichen und nicht ausschließlich in Stammnähe auftreten.

Auch an diesem Beispiel kann beobachtet werden, wie kleinräumige Änderungen der Bodenbedingungen das Wurzelwachstum beeinflussen. Organische Substanz wie abgestorbene Wurzeln oder Baumaterialien wird als Nährstoffquelle erschlossen. Mechanische Widerstände oder Bereiche geringerer Verdichtung lenken die Wurzeln: Einschlüsse von Bauschutt reichen teilweise bis unter den Belag und veranlassen die Wurzeln zum Emporwachsen. Bei der Freilegung des Bordsteins und der Rinne erweist sich die ohnehin nur schwach dimensionierte Betonbettung als teilweise bröselig, was auf einen unzureichenden Zementgehalt oder mangelhafte Durchmischung schließen lässt und unter Umständen die Entstehung von Schäden begünstigt.

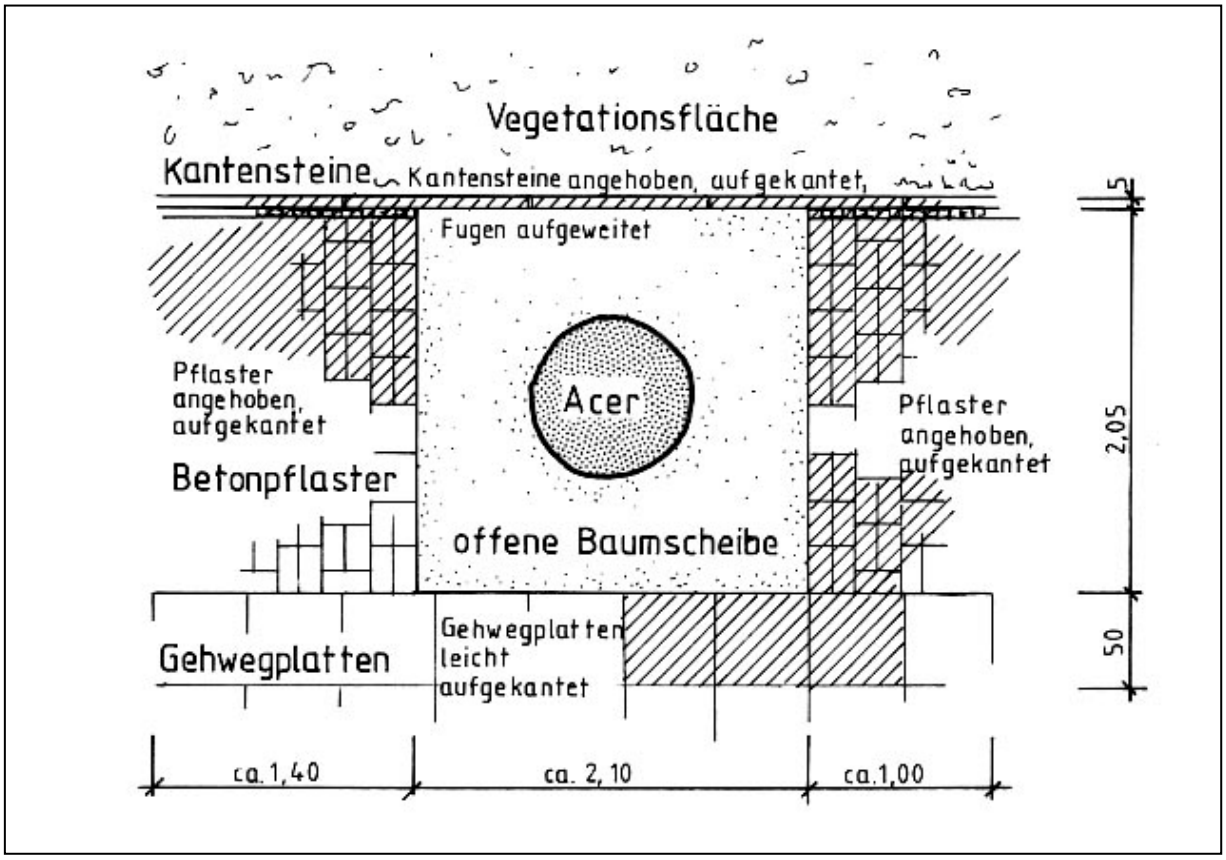
4.4.4 Fallbeispiel 4: Acer platanoides, Hannover

Baumart	*Acer platanoides*, Spitzahorn		
Standort	Hannover Rühlmannstraße	**Datum**	17.08.1999
Stammdurchmesser	48 cm	**Baumscheibe**	offen
Kronendurchmesser	10 m	**Baumscheibengröße**	2,05 x 2,10m = 4,3 m²

Randeinfassung	An drei Seiten fehlend, eine Seite Kantenstein 5/20/100 cm (Beton, eben)
Wegedecke	Gehwegplatten 40/40/5 (Beton) Betonpflaster 10/20/8, Blockverband
Schichtaufbau	Pflasterbettung: 2 cm bis 5 cm, Sand (Bodenprobe 1, unter Platten; Bodenprobe 2, unter Pflaster) Tragschicht: 20 cm Kalksteinschotter (Bodenprobe 3)

Standortbeschreibung

Der Standort befindet sich in einer Anliegerstraße. Die Baumscheibe grenzt zu einer Seite an einen Garten und ist zu den übrigen Seiten durch Pflaster und Gehwegplatten befestigt. Ein Kantenstein verläuft zwischen Pflaster und Garten sowie zwischen Baumscheibe und Garten, fehlt jedoch zwischen Baumscheibe und Wegebelag. Die Fläche wird hauptsächlich als Gehweg genutzt (Darstellung 85).



Darstellung 85: Standort und Schadbild Fallbeispiel 4

Schadbild (Abbildung 28)

Belag: Das Pflaster links der Baumscheibe, Blickrichtung von der Straße aus, ist im hinteren, an den Kantenstein angrenzenden Bereich an einer Stelle stark angehoben und aufgekantet, so dass sich die Steine teilweise aus dem Verband gelöst haben. Eine zweite Stelle vorne ist aufgewölbt und teilweise aufgekantet. Das Pflaster rechts der Baumscheibe ist ebenfalls an zwei Stellen angehoben, wobei der hintere Bereich stärker aufgewölbt und aufgekantet ist als der vordere. Die Gehwegplatten vor der Baumscheibe sind an der linken Baumscheibenecke sowie in der Mitte sehr schwach angehoben.

Randeinfassung: Die Kantensteine zum Garten sind angehoben, aufgekantet und weisen verbreiterte Fugen auf. An der Oberfläche wachsen Wurzeln durch die Fugen in den angrenzenden Garten.

Abbildung 28: Schadbild Fallbeispiel 4 (Ausschnitt)
Das Pflaster in den Seitenbereichen ist aufgewölbt und aufgeworfen. Einzelne Steine haben sich aus dem Verband gelöst.

Wurzelbild

0 bis 5 bzw. 8 cm Tiefe, Zone unter Belag

Es werden bis zu drei Doppelreihen Pflaster sowie eine Reihe zu fünf Platten aufgenommen, was einem Abstand zur Baumscheibe von maximal 75 cm entspricht. Pflaster und Platten liegen in einer Pflasterbettung aus Sand. Unter beiden Belagsarten zeigt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 29 und 30): Die dunklere Farbe lässt auf Humusanreicherung in den Fugen schließen. Insbesondere die Fugen des Pflasters sind im an die Baumscheibe angrenzenden Bereich stark vererdet und werden von Feinstwurzeln erschlossen. Unmittelbar unter den Steinen befinden sich Fein- und Schwachwurzeln bis max. ca. 4 mm Durchmesser. Einige Feinwurzeln weisen auffällige breite, helle Wurzelspitzen auf. Auf beiden Seiten sind im Bereich der stärkeren Pflasteraufwölbung Grobwurzeln mit ca. 1,5 bis 2 cm im Durchmesser erkennbar sowie Wurzeln, die durch die Fugen der Kantensteine in die angrenzende Pflanzfläche wachsen. Unter dem Plattenbelag hingegen befinden sich keine dickeren Wurzeln.

Abbildung 29: Wurzelbild unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 4
Die vererdeten Fugen heben sich farblich deutlich von der Pflasterbettung ab. Während die Fugen intensiv durch Feinstwurzeln erschlossen werden, sind in der Bettung Feinwurzeln erkennbar.

Abbildung 30: Wurzelbild unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 4
Deutlicher noch als beim Pflaster ist unter den Gehwegplatten ein extensives Feinwurzelnetz in der Grenzzone unmittelbar unter den Platten erkennbar.

5 bzw. 8 bis 10 cm Tiefe, Pflasterbettung (Sand)

Im zweiten Arbeitsschritt wird die Pflasterbettung ca. 2 bis 5 cm tief entfernt, um die unter dem Belag wachsenden Wurzeln freizulegen (Abbildung 31). Der Sand ist relativ feucht und wird intensiv durch Wurzeln unterschiedlichen Durchmessers erschlossen. Da eine Randeinfassung fehlt, wachsen sie ungehindert aus der Pflanzgrube beziehungsweise der Baumscheibe in die Pflasterbettung. Fein- und Schwachwurzeln bilden ein dichtes Geflecht. Dazwischen durchziehen zahlreiche Grob- sowie einige Derbwurzeln bis max. 3 cm Durchmesser den Sand. Die Hauptwuchsrichtung verläuft radial von der Baumscheibe weg, wobei jedoch auch schräg wachsende und sich kreuzende Wurzeln zu beobachten sind. Bei Grob- und Derbwurzeln fallen einige dunkler gefärbte, abgeplattete Druckstellen auf, die jedoch kaum verdickt sind.

Abbildung 31: Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung bei Fallbeispiel 4
Die Pflasterbettung wird intensiv von Wurzeln unterschiedlicher Größe erschlossen. Die Hauptwuchsrichtung verläuft radial von der Baumscheibe weg.

In Bereichen mit relativ viel organischer Substanz wachsen stark verzweigte, dunkle Feinstwurzeln. Bei einigen Feinwurzeln sind weitere ca. 2 bis 3 mm keulenförmig verdickte, helle Wurzelspitzen zu sehen (Abbildung 32). Sie wurzeln vornehmlich aus der Pflanzgrube heraus in den Pflastersand.

Unter dem Pflaster links der Baumscheibe befindet sich im Bereich der hinteren Pflasteranhebungen eine unter dem Belag wachsende Derbwurzel von 3 bis 4,2 cm Durchmesser sowie eine parallel dazu tiefer wachsende Grobwurzel. Unter der vorderen, schwächeren Anhebung zeigen sich mehrere Grobwurzeln von 8 bis 14 mm Durchmesser (Abbildung 33). Unter dem Pflaster rechts der Baumscheibe sind eine ca. 3 cm dicke Derbwurzel im Bereich der stärkeren hinteren Aufwölbung sowie zwei 1,5 und 2 cm dicke Grobwurzeln unter der vorderen Aufwölbung zu sehen. Auf beiden Seiten wachsen Grobwurzeln von unten kommend an der Oberfläche durch die Kantensteinfugen in den angrenzenden Garten. Auf der rechten Seite verdickt sich eine vorher 5 bis 6 mm dicke Wurzel kurz vor der Fuge auf 7 bis 8 mm und ist vermutlich zwischen den Kantensteinen abgeplattet. Der Kantenstein ist an dieser Stelle nur wenig versetzt. Eine andere Wurzel wächst am Kantenstein entlang.

Der Bereich unter den Platten bringt keine neuen Erkenntnisse. Der Pflastersand besteht hier aus einem etwas dunkleren Sand und einem helleren Quarzsand. Die Wurzelmasse unter den Platten ist geringer als unter dem Pflaster. Die meisten Wurzeln sind Feinwurzeln, hinzu kommen einige wenige Schwachwurzeln (ca. 8 bis 10 mm Durchmesser; Abbildung 34). Unter der leichten Anhebung der rechten Gehwegplatte wird eine mit ca. 1 cm relativ dünne Grobwurzel sichtbar. Im Bereich der leichten Anhebung der mittleren Gehwegplatte wird nach Entfernen der ersten Wurzelschicht in diesem Bereich bis ca. 15 cm Tiefe aufgegraben. Es werden 1 bis 2 cm tief unter dem Belag wachsende Grob- und Derbwurzeln mit 1,2 bis 1,5 und 3 cm Durchmesser sichtbar.

Abbildung 32: Junge Wurzelspitzen im Pflastersand bei Fallbeispiel 4
Helle, junge Wurzelspitzen in der Pflasterbettung lassen auf Wurzelaktivität schließen.

Abbildung 33: Wurzelbild in der Pflasterbettung unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 4
Die Sandbettung unter dem Pflaster wird intensiv durch Wurzeln unterschiedlicher Größe erschlossen. Die fehlende Randeinfassung ermöglicht einen ungehinderten Zutritt. Die dickeren Wurzeln führen zur Anhebung des Pflasters.

Abbildung 34: Wurzeln in der Pflasterbettung unter den Gehwegplatten bei Fallbeispiel 4
Zahlreiche Wurzeln erschließen den Sand unter den Gehwegplatten. Erst bei größerem Dickenwachstum erlangen sie Kontakt mit der Plattenunterseite und führen so zu Aufkantungen. Die leichte Anhebung der Platten in diesem Bereich ist vermutlich auf tiefer wachsende, dickere Wurzeln zurückzuführen.

10 bis 35 cm Tiefe, Tragschicht, anstehender Boden

Auf der linken Baumscheibenseite wird im Bereich der Kantensteinanhebung tiefer aufgegraben. Hierzu wird die gut lösbare, nicht durchwurzelte Schottertragschicht entfernt. Die Kantensteine liegen auf ca. 10 cm dicken Betonfundamenten, haben jedoch keine Rückenstütze. In der Tragschicht werden in der Grenzzone zum anstehenden Boden in 25 bis 30 cm Tiefe zwei bis drei kräftige Starkwurzeln von 10 bis 12 cm Durchmesser sichtbar (Abbildung 35). Sie wachsen ca. 1 m an und unter der Kantensteinbettung aus Beton entlang, bevor sie in Richtung Garten verschwinden. Das Fundament ist angehoben, unter der bis zu ca. 2 cm aufgeweiteten Fuge gebrochen, und der Kantenstein ist um ca. 3,5 cm angehoben.

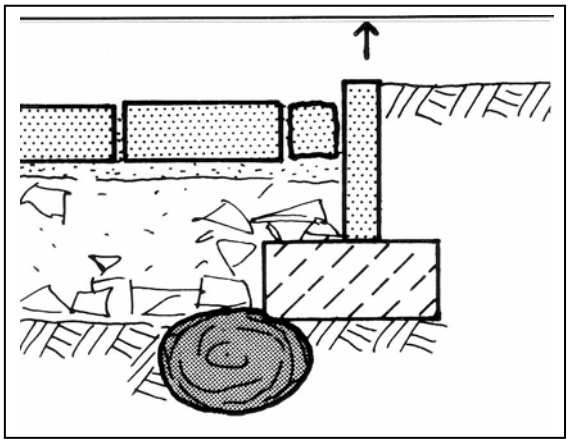
Auf dem Fundamentabsatz und entlang der Kantensteine verlaufen mehrere stark verzweigte Wurzeln bis ca. 2,5 cm Durchmesser. Einige Feinst- bis Schwachwurzeln durchwachsen die aufgeweitete Fuge, eine andere scheint die Fuge zwischen Fundament und Kantenstein zu erschließen.

Abbildung 35: Wurzelbild in der Tragschicht und unter der Randeinfassung bei Fallbeispiel 4
Zwischen Tragschicht und anstehendem Boden befinden sich kräftige Starkwurzeln. Sie wachsen unter der Randeinfassung entlang und heben Kantensteine und deren Fundamentierung an. Es kommt zum Bruch des Fundamentes und zur Aufkantung der Kantensteine.

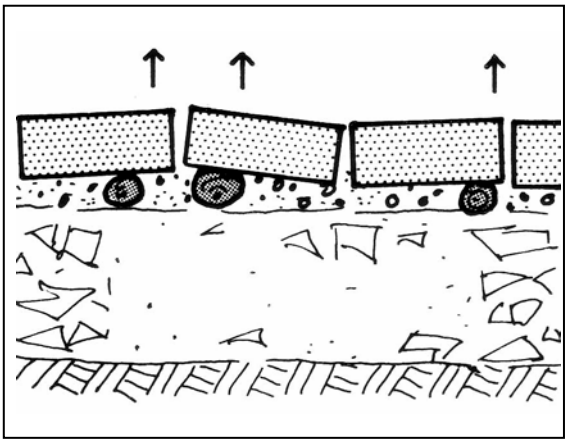
Schadensursachen

Belag: Die Belagsanhebungen im Bereich des Pflasters und der Gehwegplatten sind auf Grob- und Derbwurzeln zurückzuführen, die aus der Baumscheibe beziehungsweise der Pflanzgrube ungehindert in die Pflasterbettung wachsen und bis unter den Belag reichen. Das Ausmaß der Schäden ist verhältnismäßig groß. Wurzelverdickungen an den Druckstellen sind hingegen nur schwach ausgeprägt (Darstellung 86).

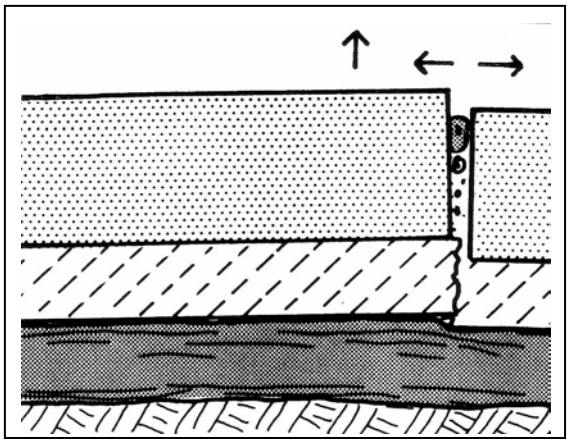
Randeinfassung: Die Anhebung der Randeinfassung wird durch Starkwurzeln bewirkt, die an und unter dem Betonfundament der Kantensteine entlang wachsen (12 cm Durchmesser, 30 cm tief). Dies führt zur Anhebung und zum Bruch des Fundamentes unterhalb der Fuge zwischen den Kantensteinen (Darstellung 87). Die Fuge sowie eine feine Spalte zwischen Fundament und Kantenstein wird durch weitere, neue Wurzeln erschlossen und aufgeweitet (Darstellung 88).



Darstellung 86: Schadensursache der Anhebung des Belags bei Fallbeispiel 4



Darstellung 87: Schadensursache der Anhebung der Kantensteine bei Fallbeispiel 4



Darstellung 88: Schadensursache der Aufweitung der Fugen und des Fundamentrisses bei Fallbeispiel 4

Interpretation

Durch die fehlende Randeinfassung können Wurzeln ungehindert in die Pflasterbettung aus Sand eindringen. Obwohl reiner Pflastersand als nährstoffarm einzustufen ist, bietet er offenbar gute Wachstumsbedingungen und wird intensiv und flächig von Fein- und Schwachwurzeln durchwurzelt. Keulenförmig verdickte, vermutlich mykkhorrhizierte Wurzelspitzen zeugen von hoher Wurzelaktivität. Möglicherweise infiltriert durch die humusreichen Fugen nährstoffhaltiges Wasser. In den vererdeten, nährstoffreichen Pflasterfugen bilden sich stark verzweigte Feinstwurzeln, die hier Nährstoffe aufnehmen. Der relativ lockere Kalksteinschotter der Tragschicht wird zumindest im aufgegrabenen Bereich nicht durchwurzelt. Unter den starken Pflasteranhebungen befinden sich im Vergleich zum Schadensausmaß gering dimensionierte Grob- und Derbwurzeln von bis zu 4 cm Durchmesser. Unklar ist, wieweit auch die Masse der kleineren Wurzeln zur Höhe der Anhebungen beiträgt. Die Anhebung der Gehwegplatte rechts wird durch eine unmittelbar unter der Platte wachsende Grobwurzel von 1 cm Durchmesser verursacht. Im Gegensatz dazu nimmt sich die ebenso starke Anhebung der mittleren Gehwegplatte eher gering aus: Der Durchmesser der darunter wachsenden Wurzeln ist mit dem der größere Schäden verursachenden Wurzeln unter dem Pflaster vergleichbar, allerdings liegen sie 1 bis 2 cm tief unter den Platten. Möglicherweise kann das Volumen dieser tiefer wachsenden Wurzeln bis zu einem gewissen Maße innerhalb der Sandschicht durch Verdrängung des umgebenden Materials ausgeglichen werden, da die Platten – noch – nicht unmittelbar aufliegen. Daraus kann geschlossen werden, dass das Ausmaß der Anhebung umso geringer ausfällt, je tiefer die Wurzeln liegen.

Wie bei Fallbeispiel 3 sind auch bei diesem Ahorn nur schwache Verdickungen an den Auflagestellen des Belags auf der Wurzel ausgebildet. Dies lässt auf artspezifische Unterschiede bei der Bildung von Reaktionsholz von Wurzeln oder aber auf nur geringen Druck schließen. Bei einem ausreichenden Abstand zum starren Bauteil erfolgt keine Reaktion. Ähnlich wie in Fallbeispiel 3 wird die Anhebung der Kantensteine durch dicke Starkwurzeln verursacht, die unter Betonfundamenten wachsen. Abermals ist dies ein Hinweis auf die Lenkungsfunktion von Fundamenten und ähnlichen Bauteilen. Hier wachsen auch zahlreiche dünnere Wurzeln am Kantenstein und dessen Bettung entlang und erschließen Risse und Spalten, die als Folge der Anhebung entstanden sind oder verstärkt wurden. Ihr Dickenwachstum führt wiederum zu Folgeschäden, so dass sich der Prozess beschleunigen dürfte.

Der unterschiedlich farbige Pflastersand unter den Platten zeugt von Reparaturarbeiten. Die Wurzeln haben diesen Bereich jedoch erneut erschlossen, so dass wiederholte Reparaturen erforderlich sein dürften. Die statisch bedeutsamen Starkwurzeln befinden sich in 2 m Entfernung von der Stammmitte in einer Tiefe von nur 30 cm unter der Belagsoberkante. Dies ist ein weiterer Hinweis auf die große Sensibilität von Wurzelbereichen bei Baumaßnahmen.

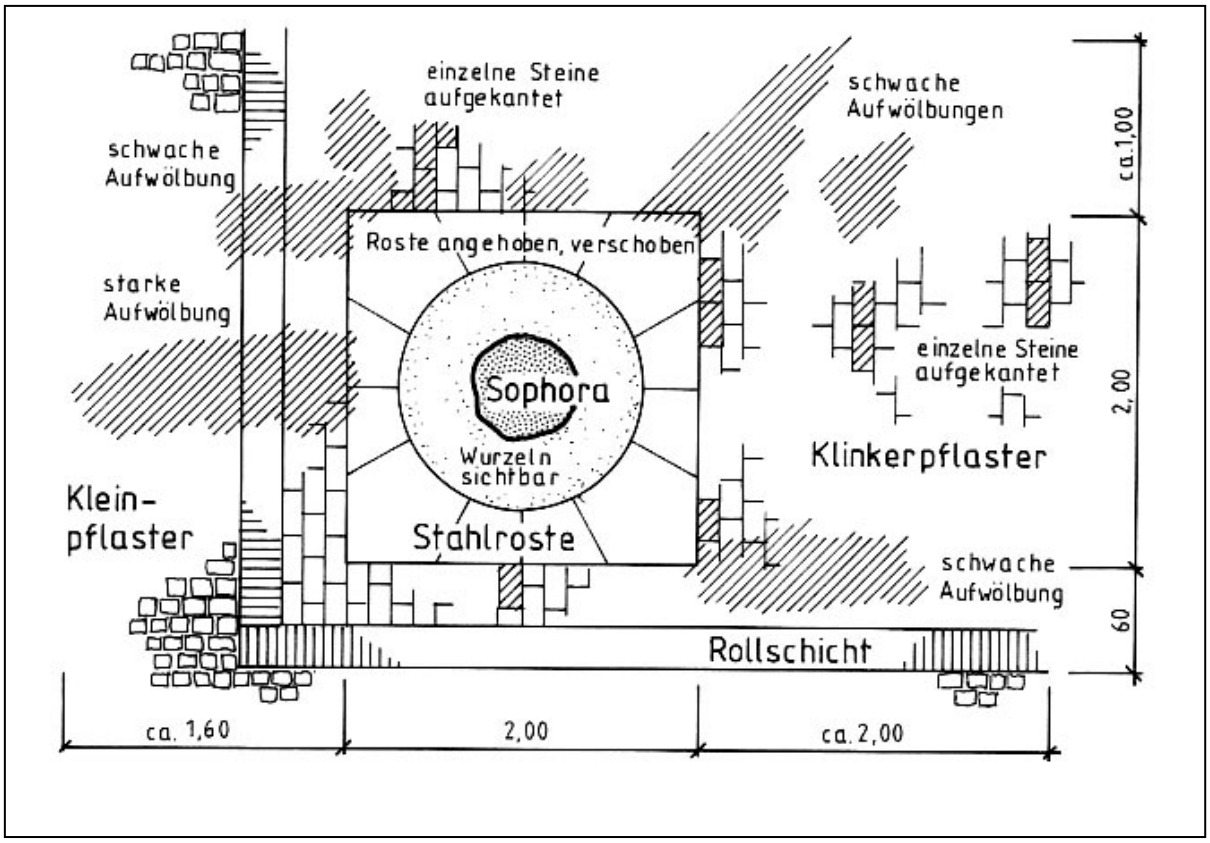
4.4.5 Fallbeispiel 5: Sophora japonica, Wunstorf

Baumart	*Sophora japonica*, Schnurbaum		
Standort	Wunstorf, Nordstraße	**Datum**	23./24.08.1999
Stammdurchmesser	30 cm	**Baumscheibe**	Stahlrost, 12 Elemente
Kronendurchmesser	8 m	**Baumscheibengröße**	2 x 2 m = 4 m²

Randeinfassung	keine
Wegedecke	Klinkerpflaster 12/24/4 cm (Reihenverband und Rollschicht) Natursteinpflaster 9/9/9 cm (Kleinpflaster, Reihenverband)
Schichtaufbau	Pflasterbettung: 10 cm Sand, mit Zement o. Kalk gebunden (Bodenprobe 4) Tragschicht: 15 cm Kalksteinschotter (Bodenprobe 5)

Standortbeschreibung

Der Baumstandort befindet sich in einer Fußgängerzone, die durch Lieferfahrzeuge befahren wird (Darstellung 89). Von der Baumscheibenbefestigung aus Stahlrosten ist noch der äußere Kranz erhalten. Die einzelnen Elemente sind verschoben und teilweise angehoben. Es haben sich Aufkantungen bis zu 2 cm Höhe und Spalten bis zu 5 cm Breite gebildet. Im offenen Teil der Baumscheibe liegen mehrere Wurzeln frei. Der Wegebelag wird aus Klinkerpflaster eingefasst, das teilweise aufgewölbt oder aufgekantet ist. Zu zwei Seiten schließt ein Belag aus Natursteinpflaster an das Klinkerpflaster an. Dieser ist an einer Stelle stark aufgewölbt. Untersucht werden sollen sowohl die Klinkerpflasteranhebungen als auch die Aufwölbung des Natursteinpflasters.



Darstellung 89: Standort und Schadbild Fallbeispiel 5

Schadbild (Abbildung 36 und 37)

Belag: Das Klinkerpflaster verläuft rings um die Baumscheibe und ist an sieben Stellen wellenförmig angehoben und leicht aufgekantet. An fünf Stellen in bis zu 3 m Entfernung ab Baumstamm sind einzelne Steine stark aufgekantet. Das Natursteinpflaster ist an einer Stelle stark aufgewölbt, die Steine liegen jedoch noch fest im Verband.

Abbildung 36: Schadbild Fallbeispiel 5
Das Pflaster ist auf der linken Seite aufgewölbt. An anderen Stellen ist das Klinkerpflaster stark aufgekantet. Außerdem ist die Baumscheibenabdeckung in ihrer Lage verändert.

Abbildung 37: Schadbild im Übergang der Baumscheibe zur Verkehrsfläche bei Fallbeispiel 5
Die starken Aufkantungen der Klinkerpflastersteine und die Veränderung der Baumscheibenabdeckung sind deutlich erkennbar.

0 bis 6 bzw. 10 cm Tiefe, Zone unter dem Belag

Die Roste werden entfernt. Das Klinkerpflaster wird auf einer Breite von 50 bis 70 cm rings um die Baumscheibe und das Natursteinpflaster an der aufgewölbten Stelle auf einer Fläche von ca. 60 x 60 cm aufgenommen. Unter der Baumscheibenabdeckung befindet sich Sand. Das Pflaster ist in eine zementgebundene Bettung verlegt, die jedoch bröckelt und an der Oberfläche sandet. Unter dem Klinkerpflaster, nicht jedoch unter dem Natursteinpflaster, sind Fein- und Schwach- sowie wenige Grobwurzeln erkennbar (bis 5 mm und ab 50 mm Durchmesser). Ein charakteristisches Wurzelbild kann aufgrund einer Schicht losen Sandes nicht beschrieben werden.

6 bzw. 10 bis 15 cm Tiefe, Pflasterbettung (Sand)

Die Oberfläche der Mörtelbettung ist größtenteils locker–sandig und kann ebenso wie der lose Sand unter den Stahlrosten leicht entfernt werden. Im Bereich der Baumscheibe wachsen oberflächennah insbesondere Grob- und Derbwurzeln sowie in Stammnähe Starkwurzeln (Abbildung 38). An den Auflagestellen der Roste auf den Wurzeln sind Deformationen und verbreiterte Stellen erkennbar. die Wurzeln vollziehen teilweise abrupte Richtungswechsel. Zwischen den stärkeren Wurzeln befinden sich einige Schwach- und wenige Feinwurzeln. Die stärkeren Wurzeln enden am Baumscheibenrand und fächern sich in zahlreiche feinere Wurzeln auf (Abbildung 39).

Abbildung 38: Wurzelbild unter Deckschicht bei Fallbeispiel 5
Bereits innerhalb der Baumscheibe befinden sich dicke oberflächennahe Wurzeln. Von ihnen zweigen dünnere, relativ gradlinig wachsende Wurzeln ab, welche die Belagsanhebungen hervorrufen. Die Hauptwuchsrichtung verläuft radial vom Baumstamm weg. Auf der linken Seite wurden im Bereich der Aufwölbung tiefere Schichten freigelegt.

Abbildung 39: Starke Richtungswechsel der Wurzeln und verdickte Auflagepunkte bei Fallbeispiel 5
Bei radialer Grundtendenz vollziehen die Wurzeln teilweise abrupte Richtungswechsel, sodass sich insgesamt ein sparriges Wuchsbild ergibt. An den Auflagepunkten der Roste und des Belags sind Verletzungen und Verdickungen der Wurzel erkennbar, die als Reaktion auf den Druck entstehen (rechts). An ehemaligen Kappungsstellen bilden sich starke Verzweigungen (links).

Direkt unter dem Klinkerpflaster wachsen Fein- und Schwachwurzeln zwischen den Pflastersteinen und der gebundenen Pflasterbettung sowie in Spalten und Rissen innerhalb der Bettung (Abbildung 40). Einige Wurzeln weisen helle, rhizomartig verdickte, leicht brechende Wurzelspitzen auf (Abbildung 41). Das Verzweigungsmuster der Wurzeln ist durch starke Richtungswechsel gekennzeichnet (Abbildung 39). Ungefähr 2 m von der Stammmitte entfernt bildet eine Grobwurzel von ca. 6 mm Durchmesser mehrere eiförmige Verdickungen an den Auflagestellen einzeln angehobener Pflastersteine. Sie erreichen dreifachen Wurzeldurchmesser (Abbildung 40). Im Bereich der Pflasteranhebung hinter der Baumscheibe wird eine sich gabelnde Grobwurzel mit einem Durchmesser von ca. 1 bis 1,5 cm freigelegt. In der festen Bettung unter dem Natursteinpflaster wachsen keine Wurzeln. In einigen Bereichen unter dem Pflaster befindet sich loser, hellerer Sand, der auf frühere Regulierungsarbeiten schließen lässt.

Abbildung 40: Wurzeln zwischen Pflaster und gebundener Pflasterbettung bei Fallbeispiel 5
Diese Grobwurzel wächst zwischen der gebundenen Pflasterbettung und dem Belag. Die starke Reaktionsholzbildung an den Auflagestellen des Pflasters führt zu Verdickungen und dadurch zu deutlichen Anhebungen des Pflasters.

Abbildung 41: Junge Wurzelspitzen unter dem Belag bei Fallbeispiel 5
Helle, junge Wurzelspitzen zeugen von fortgesetztem Wurzelwachstum unter dem Belag.

15 bis 35 cm Tiefe, Tragschicht

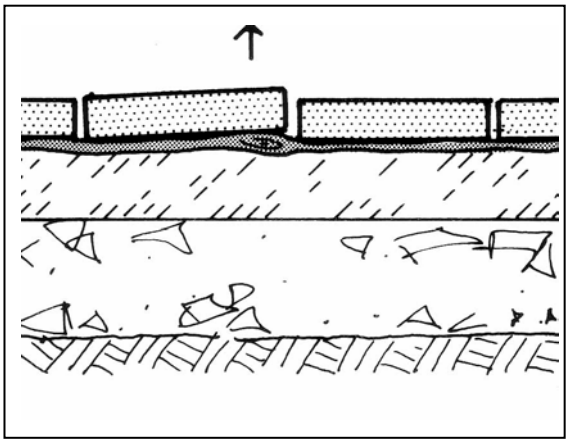
Exemplarisch wird die Tragschicht im Bereich der Aufwölbung des Naturstein- und des angrenzenden Klinkerpflasters bis zu ca. 35 cm Tiefe aufgegraben. Der leicht lösbare Natursteinschotter wird von Grob- und Derbwurzeln durchzogen (Abbildung 43). Im Bereich der Pflasteraufwölbung werden in ca. 30 bis 35 cm Tiefe kräftige Starkwurzeln sichtbar (Abbildung 44). Die stärksten Wurzeln mit einem Durchmesser von 8 und 12 cm teilen sich in Stränge von 3 bis 5 cm Durchmesser. Die genaue Anzahl der verflochtenen Stark- und Derbwurzeln ist nicht feststellbar, da zur Schonung der Wurzeln auf eine tiefere Freilegung verzichtet wird. In der Schottertragschicht wachsen auch einige Fein- und Feinstwurzeln, die jedoch im Gegensatz zu denen in der Pflasterbettung keine hellen, dicken Wurzelspitzen aufweisen. Die Form der vergleichsweise festen Wurzeln unterscheidet sich in diesem gebrochenen Substrat stark von der im rundkörnigen Sand: Sie wachsen im Zickzack, sind deformiert oder weisen knollenartige Verdickungen auf, die den Druckstellen unter dem Klinkerpflaster ähneln.

Abbildung 42: Wurzelbild in der Tragschicht bei Fallbeispiel 5
In der Tragschicht befinden sich dicke Wurzeln, die im vorderen Bereich eine Aufwölbung hervorrufen.

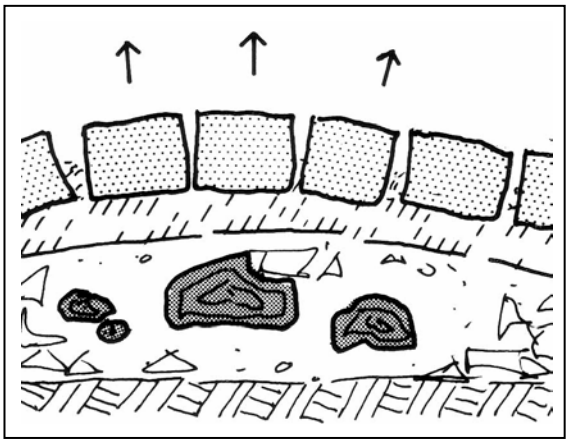
Abbildung 43: Wurzeln unter der Pflasteraufwölbung bei Fallbeispiel 5
Die Wurzeln unter der Pflasterwölbung wachsen durch die Schottertragschicht. Im Vergleich zu den relativ gradlinigen Wurzeln unter dem Belag weisen sie Deformationen und ein unregelmässiges Wuchsbild auf.

Schadensursachen

Belag: Ursache der starken punktuellen Anhebungen des Klinkerpflasters sind direkt unter dem Pflaster wachsende Schwach- und Grobwurzeln mit zum Teil stark ausgeprägten Verdickungen (Darstellung 90). Die Aufwölbung des Natursteinpflasters und des angrenzenden Klinkerpflasters ist auf mehrere große Starkwurzeln (bis 12 cm Durchmesser, ca. 30 cm Tiefe) zurückzuführen, die das Pflaster mitsamt Bettung anheben (Darstellung 91).



Darstellung 90: Schadensursache der Aufkantung des Klinkerpflasters bei Fallbeispiel 5



Darstellung 91: Schadensursache der Aufwölbung des Naturstein- und Klinkerpflasters bei Fallbeispiel 5

Interpretation

Die Schadensformen lassen sich mit der Wuchstiefe der Wurzeln und dem Aufbau des Wegeoberbaus in Verbindung bringen: Die lokal begrenzten, starken Anhebungen einzelner Pflastersteine sind auf stellenweise verdickte Wurzeln zurückzuführen, die sich direkt unter den Steinen befinden. Die gebundene Pflasterbettung verhindert das Einwurzeln nicht gänzlich, da zahlreiche poröse Stellen und Risse durchdrungen werden und der seitliche Zugang aus der Baumscheibe möglich ist. Die Wurzeln wachsen in einer sandigen Zone der gebundenen Pflasterbettung, die im Laufe der Jahre durch das unterschiedliche Wärmeausdehnungsverhalten von Stein und Mörtel sowie den Frost-Tauwechsel entstanden sein könnte. Auf dieser festen Unterlage ist die dicker werdende Wurzel hohem Druck ausgesetzt, was als Reaktion zur Ausbildung der starken Verdickungen und zur Anhebung einzelner Pflastersteine führt.

Die Aufwölbungen im Bereich Naturstein- und angrenzendes Klinkerpflaster werden durch dickere, tiefer wachsende Wurzeln hervorgerufen. Möglicherweise bewirkt der gebundene Sand in Pflasterbettung und Fugen, dass die Aufwölbungen relativ hoch und breit werden können, ohne dass die Steine aufkanten oder sich aus dem Verband lösen.

An diesem Fallbeispiel wird der Einfluss des Substrates auf die Wurzelform deutlich: Im Sand werden gradlinige, fleischig-dicke Wurzeln ausgebildet, in Schotter hingegen vollziehen die Wurzeln häufige Richtungsänderungen und weisen zahlreiche Deformationen und Verdickungen auf. Die feinteilhaltige Kalkschottertragschicht wird intensiver als die gebundene Pflasterbettung durchwurzelt, wobei die Wurzeln aufgrund der fehlenden Randeinfassung aus der Pflanzgrube ungehindert in die Tragschicht wachsen können.

Bei den fächerförmigen Wurzelverzweigungen handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um Kappungsstellen aus ehemaligen Reparaturarbeiten am Wegebelag. Dies stellt die gängige Praxis der Reparatur von Belagsanhebungen in Frage, bei der das Problem möglicherweise zwar zunächst beseitigt, auf Dauer jedoch verstärkt werden könnte.

Auch dieses Fallbeispiel lässt gattungsspezifische Eigenheiten des Wurzelwachstums erkennen: Charakteristisch für das Wurzelbild dieses Schnurbaums sind wenig verzweigte, kräftige, sparrig wachsende Wurzeln, die in sandigem Substrat rhizomartige, fleischige Wurzelspitzen ausbilden. Die Wurzelarchitektur zeigt somit Ähnlichkeit mit der Kronenarchitektur. Auf den Druck an den Auflagestellen des Pflasters reagieren die Wurzeln mit stark ausgeprägten Verdickungen.

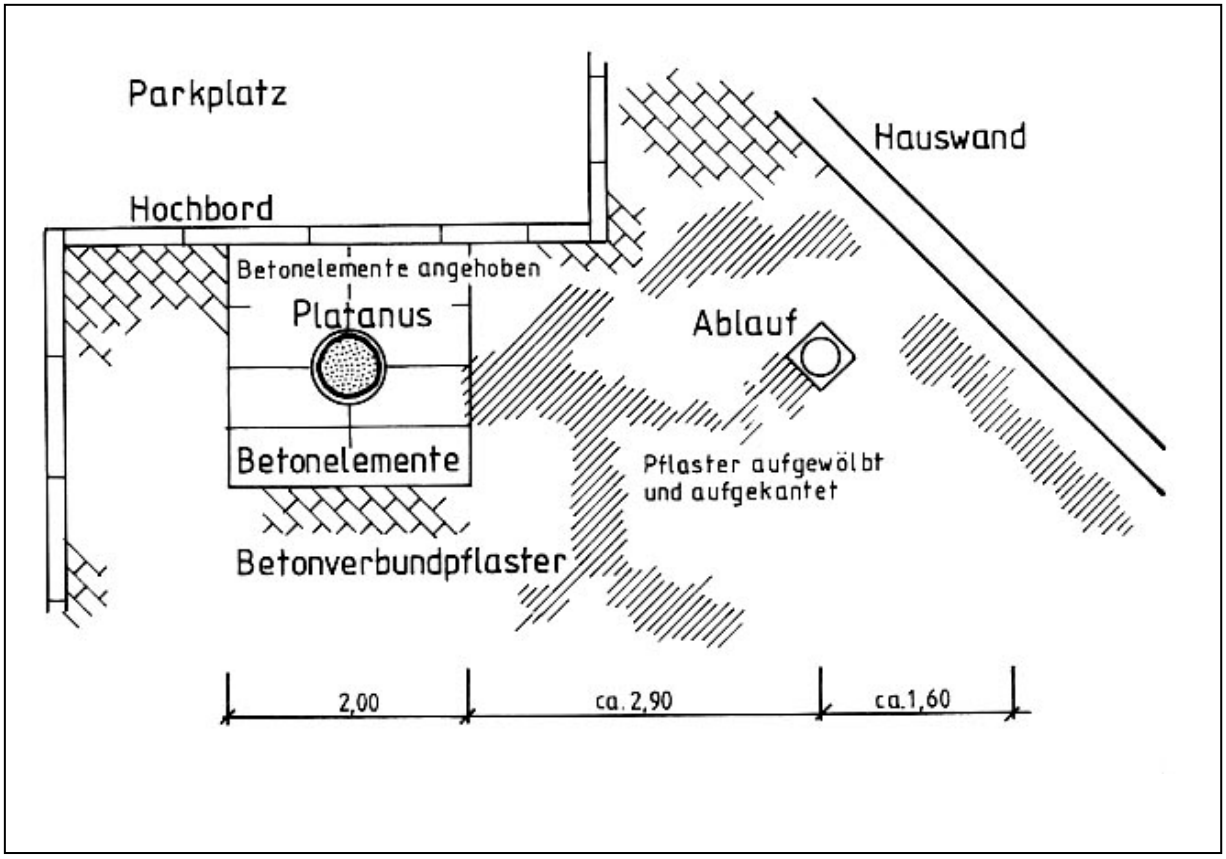
4.4.6 Fallbeispiel 6: Platanus x acerifolia, Wunstorf

Baumart	*Platanus x acerifolia*, Platane		
Standort	Wunstorf, Lange Straße	**Datum**	25.08.1999
Stammdurchmesser	29 cm	**Baumscheibe**	Befestigung aus 8 Betonelementen
Kronendurchmesser	7 m	**Baumscheibengröße**	2 x 2 m = 4 m²

Randeinfassung	3 Seiten: keine 1 Seite: Hochbord
Wegedecke	Betonverbundpflaster 10/20/8 cm
Schichtaufbau	Pflasterbettung: 4 bis 9 cm Sand (Bodenprobe 6) Tragschicht: 13 cm Schotter (Bodenprobe 7) Unterbau: Kiessand

Standortbeschreibung

Der Baumstandort befindet sich im beparkten Seitenbereich eines Wendekreises an einer Anliegerstraße. Der Baum ist zur Straßenseite geneigt. Die Baumscheibe ist mit Betonelementen befestigt, die zu den angrenzenden Steinen bis zu 8 cm hoch aufgekantet sind. Sie ist zu drei Seiten von einem Betonverbundpflaster umgeben, das auf der von der Straße abgewandten Seite stark angehoben ist. Eine Randeinfassung fehlt. Die vierte Seite grenzt über ein Hochbord an die Fahrbahn. In 3,90 m Entfernung ab Stammmitte befindet sich ein Hofablauf (Darstellung 92).



Darstellung 92: Standort und Schadbild Fallbeispiel 6

Schadbild (Abbildung 44)

Belag: Im Betonverbundpflaster verlaufen sich verzweigende Aufwölbungen von der Baumscheibe bis zur nächsten Häuserwand in 5,50 m Entfernung ab Stammmitte und an dieser entlang. Sie lassen den Wurzelverlauf erkennen. Die Pflasterfugen sind bis zu 5 cm Breite aufgeweitet und die Steine bis zu 5 cm zu den angrenzenden Steinen angehoben, so dass der Verband zum Teil aufgebrochen ist. Der Hofablauf liegt teilweise über Geländeniveau. Das daran angrenzende Pflaster ist stellenweise aufgekantet.

Abbildung 44: **Schadbild Fallbeispiel 6**
Das angehobene, aufgekantete und teilweise aus dem Verband gelöste Pflaster lässt den Wurzelverlauf erkennen. Die Baumscheibenbefestigung ist ebenfalls stark angehoben. Der Hofablauf liegt über Geländeniveau.

Wurzelbild

0 bis 8 cm Tiefe, Zone unter Belag

Die beiden mittleren, stark angehobenen Betonelemente der Baumscheibenabdeckung werden entfernt. Daran anschließend wird ein 3,50 m langer und 0,5 m bis ca. 2 m breiter Pflastersteifen aufgenommen (Abbildung 45), so dass der Hauptwurzelstrang frei gelegt wird. Unter den Betonelementen der Baumscheibenbefestigung und in deren Öffnungen hat sich organische Substanz angereichert, die von einem Feinst- und Feinwurzelgeflecht durchzogen wird. Auf dem Pflasterbett aus Sand befindet sich stellenweise eine dünne Oberbodenschicht. Unter dem Pflaster ist ein intensives Geflecht aus Feinst- und Feinwurzeln sichtbar. Hier zeigen sich ebenso wie unter den Betonelementen zahlreiche helle, bis zu 4 mm dicke Wurzelspitzen (Abbildung 46). Dazwischen sind auch stärkere Wurzeln sichtbar, die bis unter den Belag reichen.

Abbildung 45: Wurzelbild unter der Deckschicht bei Fallbeispiel 6
Nach Entfernen des Belags ist nur ein diffuses Wurzelbild erkennbar, das hauptsächlich zahlreiche Feinwurzeln erkennen lässt. Unter dem Pflaster befindet sich stellenweise eine dünne Schicht humosen Bodens.

Abbildung 46: Junge Wurzelspitzen in der Pflasterbettung bei Fallbeispiel 6
Die Pflasterbettung wird intensiv von Feinwurzeln erschlossen, deren helle Spitzen auf Wurzelaktivität schließen lassen.

12 bis 17 cm Tiefe, Pflasterbettung (Sand)

Im zweiten Schritt werden die Wurzeln in der Pflasterbettung aus Sand frei gelegt. Diese wird von Wurzeln verschiedener Größen intensiv erschlossen (Abbildung 48): Eine Starkwurzel von ca. 13 cm Durchmesser verlässt die Baumscheibe und wächst in Richtung Gebäudewand. In einem Abstand von 1,10 m ab Stammmitte verzweigt sie sich ein erstes Mal, ab 1,50 m weitere Male, um sich dann in spitzen Winkeln immer weiter aufzufächern. Ab 2 m Entfernung von der Stammmitte beträgt der Durchmesser der Starkwurzeln relativ gleichmäßig bis zu 6 cm. An den Auflagestellen der Pflastersteine sind einige Druckstellen mit leichten Verdickungen zu erkennen. Die Starkwurzeln verästeln sich mit abnehmendem Durchmesser bis zu Feinstwurzeln. Dabei kreuzen sie sich teilweise, verlaufen über- oder untereinander oder verwachsen miteinander. Ein Einwurzeln in die feste Schottertragschicht ist nicht festzustellen. Auch in 4,50 m Entfernung ab Stammmitte und somit 1,50 m über die Kronentraufe hinaus hat der freigelegte Wurzelstrang noch Starkwurzeldurchmesser (ab 5 cm). Zwei Starkwurzeln wachsen auf den Hofablauf zu und biegen dann entlang des Betonschachtes zu zwei Seiten seitlich ab. Der weitere Verlauf kann in dieser Aufgrabungstiefe nicht nachvollzogen werden.

In der Pflasterbettung werden mehrere abgestorbene Wurzeln von 8 bis 10 mm Durchmesser gefunden. Unter der Rinde der abgestorbenen Wurzel wachsen Feinstwurzeln um das Holz herum und in dieses hinein. Einige tote Wurzeln werden von lebenden Feinst- und Feinwurzeln vollständig durchzogen (Abbildung 47). Im Sand finden sich außerdem zahlreiche Bodenlebewesen.

Abbildung 47: Durchwurzelung von abgestorbenen Wurzeln bei Fallbeispiel 6
Feinwurzeln wachsen zwischen Rinde und Holz einer abgestorbenen Wurzel und erschließen diese als Nahrungsquelle.

Abbildung 48: Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung bei Fallbeispiel 6
Die Pflasterbettung wird von Wurzeln verschiedener Größen bis hin zu Starkwurzeln intensiv erschlossen. Sie gabeln sich gelegentlich, kreuzen sich oder verwachsen miteinander, wobei die Hauptwuchsrichtung radial vom Baumstamm weg verläuft. Ein Einwurzeln in die feste Schottertragschicht ist nicht festzustellen. Im Bereich des Hofablaufes wurde tiefer gegraben.

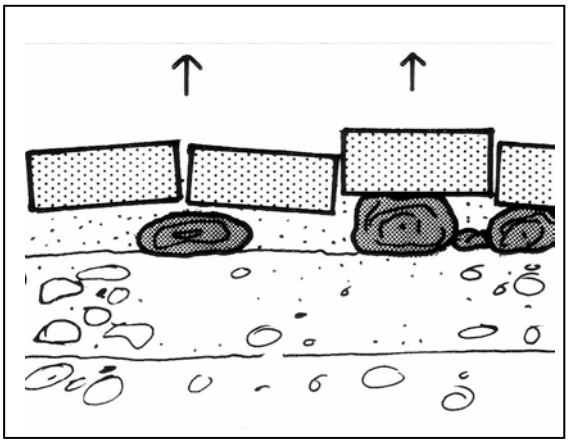
17 bis 47 cm Tiefe, Tragschicht, Unterbau

Da es sich bei der freigelegten Wurzelpartie um statisch bedeutsame Verankerungswurzeln handelt, wird nur in einem eng begrenzten Bereich am Ablauf tiefer gegraben, um festzustellen, ob die Wurzeln in den Regenwasserkanal hineinwurzeln. In der festen Tragschicht finden sich in diesem Bereich kaum Wurzeln. Darunter befindet sich als Unterbau ein relativ lockeres, sandig-kiesiges Füllmaterial, welches gut durchwurzelt wird. Die 1,5 bis ca. 3 cm dicken Grob- und Derbwurzeln wachsen auf den Betonschacht zu, streichen dann in mehreren Strängen seitlich nach unten und verzweigen sich im sandigen Unterbau (Abbildung 49). Eine Grobwurzel wächst waagerecht an einer Fuge zwischen den Schachtringen entlang. Feinere Wurzeln sind nur in geringer Menge vorhanden. Die Wurzeln dieser Schichttiefe haben im Vergleich zu denen in der Pflasterbettung eine intensivere Farbe, eine glattere Rinde und einen annähernd runden Querschnitt. Sie dringen nicht in den Schacht ein.

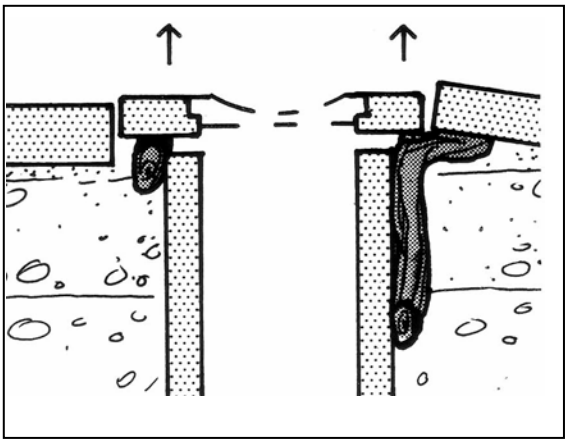
Abbildung 49: Wurzelbild am Schacht bei Fallbeispiel 6
Der Schacht des Hofablaufes wird von mehreren Wurzeln zangenartig umwachsen. Die Wurzeln finden hier den Weg in den lockeren, sandigen Unterbau. Die Tragschicht selber wird nicht durchwurzelt.

Schadensursachen

Belag: Die Pflasteranhebung wird durch eine intensive Durchwurzelung der Pflasterbettung (Sand) mit Wurzeln unterschiedlichen Durchmessers verursacht. Insbesondere zahlreiche Starkwurzeln bis zu 13 cm Durchmesser führen zu hohen Aufwerfungen (Darstellung 93). Die Anhebung des Pflasters und des Schachtaufsatzes am Hofablauf entsteht durch oberflächennahe Starkwurzeln, die an dieser Stelle in die Tiefe wachsen (Darstellung 94).



Darstellung 93: Schadensursache der Anhebung des Pflasters bei Fallbeispiel 6



Darstellung 94: Schadensursache der Anhebung des Pflasters und des Schachtaufsatzes bei Fallbeispiel 6

Interpretation

Die Wurzeln gelangen ungehindert aus der Baumscheibe beziehungsweise der Pflanzgrube in die Pflasterbettung des Wegeoberbaus, da eine Randeinfassung fehlt. Der mit organischer Substanz angereicherte Sand scheint gute Voraussetzungen für Wurzelwachstum zu bieten, da er intensiv von Wurzeln verschiedener Dicken durchzogen wird. Darauf weist auch das Vorhandensein zahlreicher junger Wurzelspitzen sowie eine aktive Bodenfauna hin. Die stark verdichtete Schottertragschicht hingegen wird nicht durchwurzelt. Es ist zu vermuten, dass der Schiefstand des Baumes zur Ausbildung dieser auffällig starken, oberflächlichen Wurzelpartie beigetragen hat, da diese vermehrt Zugkräfte aufnehmen muss.

Der Bereich am Hofablauf bietet den Wurzeln die Gelegenheit, in tiefere Bodenschichten vorzudringen. Vermutlich ist der Verdichtungsgrad der Tragschicht unmittelbar am Betonschacht etwas geringer. Der Hofablauf selber stellt einen mechanischen Widerstand dar. Er wird umwachsen und leitet die Wurzeln in die Tiefe, wo eine lockere Kiessandschicht erschlossen werden kann. Diese nicht durch Druck belasteten Wurzeln weisen eine nicht deformierte, glattere Form auf als die unmittelbar unter dem Belag wachsenden. Das Beispiel einer Wurzel, die waagerecht an einer Fuge zwischen den Schachtringen entlang wächst, zeigt außerdem, wie Wurzeln mit ihrer Wuchsrichtung auf die vorgefundenen örtlichen Bedingungen reagieren.

Ferner zeigt auch dieses Fallbeispiel, wie organische Substanz von abgestorbenen Wurzeln als Nährstoffquelle erschlossen wird und somit das Wurzelwachstum beeinflusst.

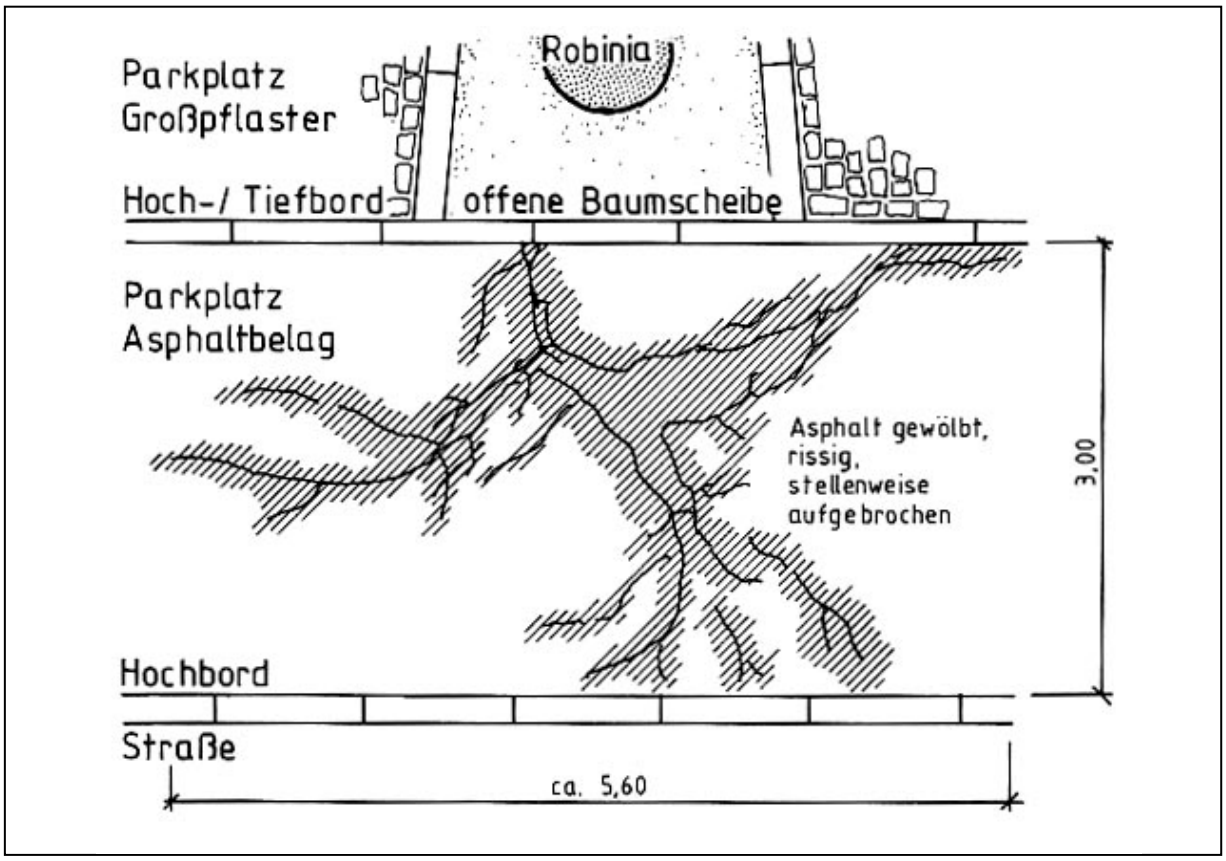
4.4.7 Fallbeispiel 7: Robinia pseudoacacia I, Köln

Baumart	*Robinia pseudoacacia*, Robinie		
Standort	Köln, Vorgebirgsstraße	**Datum**	31.08.1999
Stammdurchmesser	45 cm	**Baumscheibe**	offen
Kronendurchmesser	9 m	**Baumscheibengröße**	2,60 x 1,60/2,60 m = ca. 5,5 m²

Randeinfassung	Bordstein als Tiefbord (Aufgrabungsseite) und Hochbord (übrige Seiten)
Wegedecke	7,5 cm Asphalt (Aufgrabungsseite): 2,5 cm Asphaltfeinbeton, 5 cm Bitukies Großpflaster (übrige Seiten)
Schichtaufbau	Tragschicht: Bauschutt/Recyclingmaterial (Bodenprobe 9) stellenweise: Kiessand (Bodenprobe 10)

Standortbeschreibung

Der Standort befindet sich in der so genannten Mittelallee einer stark befahrenen Straße. An zwei Seiten der Baumscheibe grenzen gepflasterte Parkbuchten an, die zur Baumscheibe durch Hochborde eingefasst sind. Die dritte Seite ist eine asphaltierte und als Parkplatz genutzte Fläche, die von wurzelbedingten Aufwölbungen durchzogen ist. Zwischen Baumscheibe und Asphaltbelag verläuft ein Tiefbord (Darstellung 95).



Darstellung 95: Standort und Schadbild Fallbeispiel 7

Schadbild (Abbildung 50)

Belag: Von einer Bordsteinfuge ausgehend durchzieht ein Netz aus bogenförmigen Rissen und Wölbungen bis 7 cm Höhe eine Fläche von ca. 5,60 x 3,00 m (ca. 17 m²). Der Verlauf des Wurzelsystems ist durch Inaugenscheinnahme nachvollziehbar. Unter dem stellenweise aufgebrochenen Asphalt sind Wurzeln sichtbar.

Randeinfassung: Eine oberflächennahe Wurzel durchwächst die Bordsteinfuge, ohne die Bordsteine anzuheben.

Abbildung 50: **Schadbild Fallbeispiel 7**
Ausgehend von der Baumscheibe durchzieht ein fächerförmiges Netz aus Wölbungen und Rissen den Asphalt. Dieser ist stellenweise aufgebrochen

0 bis 7,5 cm Tiefe, Zone unter Belag

Der Asphalt und die Bordsteine werden unter Maschineneinsatz entfernt. Der zweischichtige Asphaltbelag besteht aus einer festen, hohlraumarmen Asphaltfeinbetondecke auf einem stellenweise gut lösbaren Bitukies. Das Betonfundament der Bordsteine wird im Boden belassen. Nach der Aufnahme des Belags werden einige Wurzeln sichtbar. Um das Wurzelbild beschreiben zu können, wird das durch den erforderlichen Maschineneinsatz gelöste Material aus losem Bitukies entfernt. Auf der stark verdichteten Tragschicht erstreckt sich ein ausgedehntes, fächerartiges Wurzelwerk (Abbildung 51). Der freigelegte Wurzelstrang verlässt die Baumscheibe durch eine Bordsteinfuge (Abbildung 52). In der Fuge wachsen drei Wurzeln übereinander. Sie verdicken sich vor und hinter dem Engpass, während sie dazwischen mit 1,5 cm auf 14 cm mehrfach so hoch wie breit abgeplattet sind. Sie sind teilweise abgestorben.

Abbildung 51: Gesamtes Wurzelbild bei Fallbeispiel 7
Zwischen dem Asphaltbelag und der stark verdichteten Tragschicht wächst ein ausgedehntes, fächerartiges Wurzelwerk. Der freigelegte Wurzelstrang verlässt die Baumscheibe durch eine Bordsteinfuge. Der Bordstein wurde entfernt.

Abbildung 52: Wurzel in der Bordsteinfuge bei Fallbeispiel 7
Durch die Bordsteinfuge wachsen drei Wurzeln aus der Baumscheibe bzw. der Pflanzgrube heraus. Sie sind vor und hinter der Fuge verdickt, während sie darin stark abgeplattet und teilweise abgestorben sind.

Die meisten Wurzeln gehören mit 2 bis 4 cm Durchmesser zu den Derbwurzeln, teilweise jedoch auch zu den Starkwurzeln. Fein- und Feinstwurzeln sind kaum, Schwach- und Grobwurzeln nur in geringerem Umfang vorhanden. Feinstwurzeln sind unter anderem im Bitukies zu finden. Feinere Wurzeln zweigen hauptsächlich von wesentlich dickeren Wurzeln ab. Die Wurzeln scheinen in einer Grenzzone zwischen Tragschicht und Belag zu wachsen (Abbildung 53). An einigen Stellen zeigen sich punktuelle Verdickungen, bei denen es sich um Reaktionsholz handeln dürfte (Abbildung 54). Die Derbwurzeln sind dicht mit knollenartigen Verdickungen besetzt (Abbildung 55). Sie sind auf der Oberseite häufig deformiert und zumeist höher als breit (z. B. 9 cm Höhe bei 4 cm Breite). Die Wurzeln verfügen über eine dicke Epidermis. Einige sind auf der Oberseite abgestorben, wie Schnittproben zeigen (Abbildung 56).

Ein zweiter, kleinerer Wurzelstrang streicht rechts entlang des Bordsteins und wächst dann durch eine Fuge aus der Baumscheibe beziehungsweise der Pflanzgrube in Richtung Parkbucht. Er trägt nicht zum Schaden am Asphaltbelag bei und wird daher nicht weiter untersucht.

Abbildung 53: Lage der Wurzeln zwischen der Tragschicht und der Deckschicht bei Fallbeispiel 7
Die Wurzeln wachsen in einer Grenzzone zwischen der festen Tragschicht und dem Asphaltbelag. Es ist deutlich erkennbar, wie sich der Verlauf der Wurzeln als Rissbild in der Asphaltoberfläche abbildet.

Abbildung 54: Punktuelle Verdickungen an einer Schwachwurzel bei Fallbeispiel 7
Die Wurzeln bilden starke punktuelle Verdickungen aus, die zu einer Verstärkung der Anhebungen führen.

Abbildung 55: Verdickungen und Deformationen an einer Derbwurzel bei Fallbeispiel 7
Dickere Wurzeln sind dicht mit punktuellen Verdickungen besetzt. Sie haben sich als Reaktion auf Druckbelastung und Verletzungen ausgebildet. An der Wurzeloberseite sind Deformationen durch einzelne sich eindrückende Steine aus dem Bitukies erkennbar.

Abbildung 56: Abgestorbenes Gewebe auf der Wurzeloberseite bei Fallbeispiel 7
Schnittproben zeigen, dass die Wurzeloberseite bei vielen Wurzeln abgestorben ist. Dennoch setzt sich das Wurzelwachstum fort.

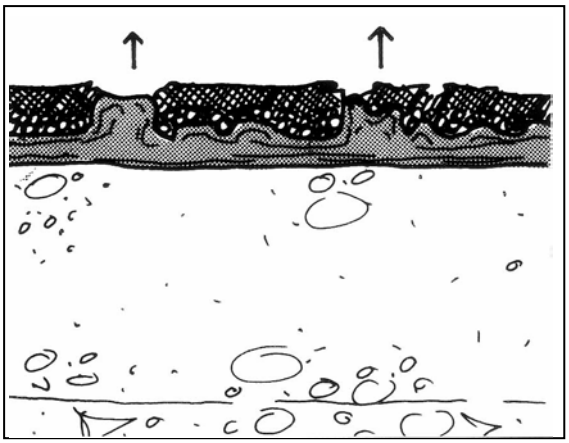
7,5 bis 70 cm Tiefe, Tragschicht

An einigen Stellen wird bis ca. 70 cm Tiefe gegraben, um zu ergründen, ob sich in tieferen Schichten ebenfalls Wurzeln befinden. Das uneinheitliche Tragschichtmaterial besteht größtenteils aus stark verdichtetem, schwer lösbaren Kiessand mit Beimengungen aus Bauschutt oder Recyclingmaterial. Hier werden keine Wurzeln vorgefunden. Im an die Randeinfassung angrenzenden Bereich besteht die Tragschicht aus relativ lockerem Kiessand, der durchwurzelt wird. Eine Wurzel wächst in ca. 70 cm Tiefe unter der Bettung des Bordsteins her, stößt auf die stark verdichtete Schicht und streicht nach oben bis unter den Belag (Abbildung 57). Der Ursprung der oberflächennahen Wurzeln ist nicht mehr nachvollziehbar, da scheinbar auch Verwachsungen mit den aus der Fuge wachsenden Wurzeln erfolgt sind. Die tieferen Wurzeln unterscheiden sich im Aussehen von den oberflächennahen: Deformationen treten schwächer auf, die Epidermis ist dünner und dadurch leichter verletzbar. Nekrotisches Gewebe ist nicht feststellbar. Während die oberflächennahen Wurzeln auf einer horizontalen Ebene fächerförmig vom Baum weg verlaufen, wachsen die unteren mit einigen Richtungsänderungen von unten nach oben. Bei einer zweiten, vom Baum etwas weiter entfernten Aufgrabungsstelle werden keine Wurzeln in der Tiefe gefunden.

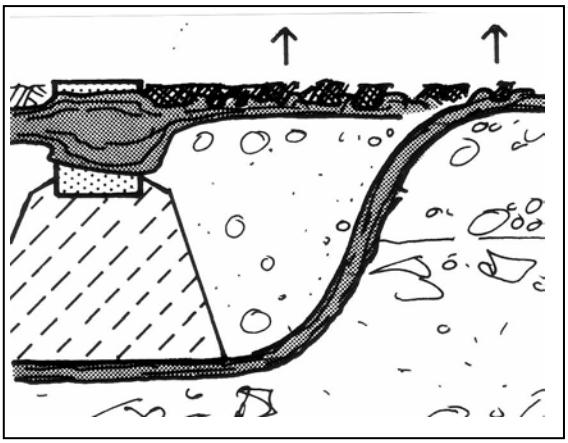
Abbildung 57: Wurzelwachstum in tieferen Schichten bei Fallbeispiel 7
Eine Wurzel wächst unter dem Betonfundament des Bordsteins her, stößt auf die stark verdichtete Schicht und streicht in verschiedenen Richtungen nach oben bis unter den Belag

Schadensursachen

Belag: Ursache der Belagsanhebungen sind Derb- und Starkwurzeln (im Mittel 4 cm Durchmesser) mit zahlreichen knollenartigen Verdickungen, welche unter der Asphaltdecke auf der Tragschicht wachsen (Darstellung 96). Sie gelangen durch eine Fuge in der Randeinfassung sowie unter der Bordsteinbettung in den Wegeaufbau (Darstellung 97).



Darstellung 96: Schadensursache der Anhebung des Asphaltbelags bei Fallbeispiel 7



Darstellung 97: Schadensursache an der Bordsteinfuge bei Fallbeispiel 7

Interpretation

Die den Belagschaden verursachenden Wurzeln finden in der Grenzschicht zwischen stark verdichteter Tragschicht und Asphaltbelag offenbar ausreichend Luft und Feuchtigkeit, um hier ein ausgedehntes Wurzelwerk zu bilden. Begünstigt wird dies durch die eher lockere Beschaffenheit des Bitukieses. Möglicherweise haben auch Temperaturschwankungen und die daraus resultierenden Materialbewegungen des Asphaltes auf der Tragschicht zur Ausbildung einer solchen Grenzzone geführt. Die nur in geringem Maße vorhandenen Fein- und Feinstwurzeln wachsen auf der Unterseite der bituminösen Schicht, was als Hinweis auf das Vorhandensein von Feuchtigkeit und eventuell Nährstoffen gewertet werden kann. Durch das Dickenwachstum der Wurzeln bricht die relativ dünne Asphaltfeinbetondecke auf, so dass weiteres Wurzelwachstum gefördert und der Schadensverlauf beschleunigt wird. Der Wurzelverlauf bildet sich als Rissbild im Asphalt ab.

Eintrittsstellen für die Wurzeln sind gleichermaßen Fugen und unterwachsene Betonfundamente, hinter denen die Wurzeln wieder empor wachsen. Die oberflächennahen Wurzeln haben ihren Ursprung trotz der massiven Randeinfassung also auch in tieferen Bodenschichten. Sie werden durch eine wandähnliche Bodenverdichtung zum Hochwachsen veranlasst. Diese Beobachtung stellt erneut die Wirksamkeit von Barrieren in Frage.

Als Reaktion auf die Standortbedingung haben sich unterschiedliche Wurzelformen ausgebildet: Die oberflächennahen Wurzeln unterliegen großen Temperaturschwankungen, da sich der Asphalt unter Sonneneinstrahlung stark aufheizt. Eine dicke Epidermis bietet Schutz vor Hitze und Verdunstung. Die hohe Druckbelastung durch parkende Autos wirkt durch die einzelnen Steine des Bitukieses als starke Punktlast, so dass sich als Reaktion zahlreiche knollenartige Verdickungen gebildet haben. Möglicherweise haben sowohl Hitze als auch Druck zum oberseitigen Absterben der Wurzeln geführt. Die tieferen Wurzeln hingegen sind vor Hitze und Druck besser geschützt und verfügen daher nur über eine dünne Epidermis. Durch größere Steine im Substrat entstehen vergleichsweise geringfügige Deformationen. Die häufigen Richtungsänderungen sind vermutlich durch mechanische Widerstände bedingt, welche die Wurzeln schließlich in höhere Schichten leiten.

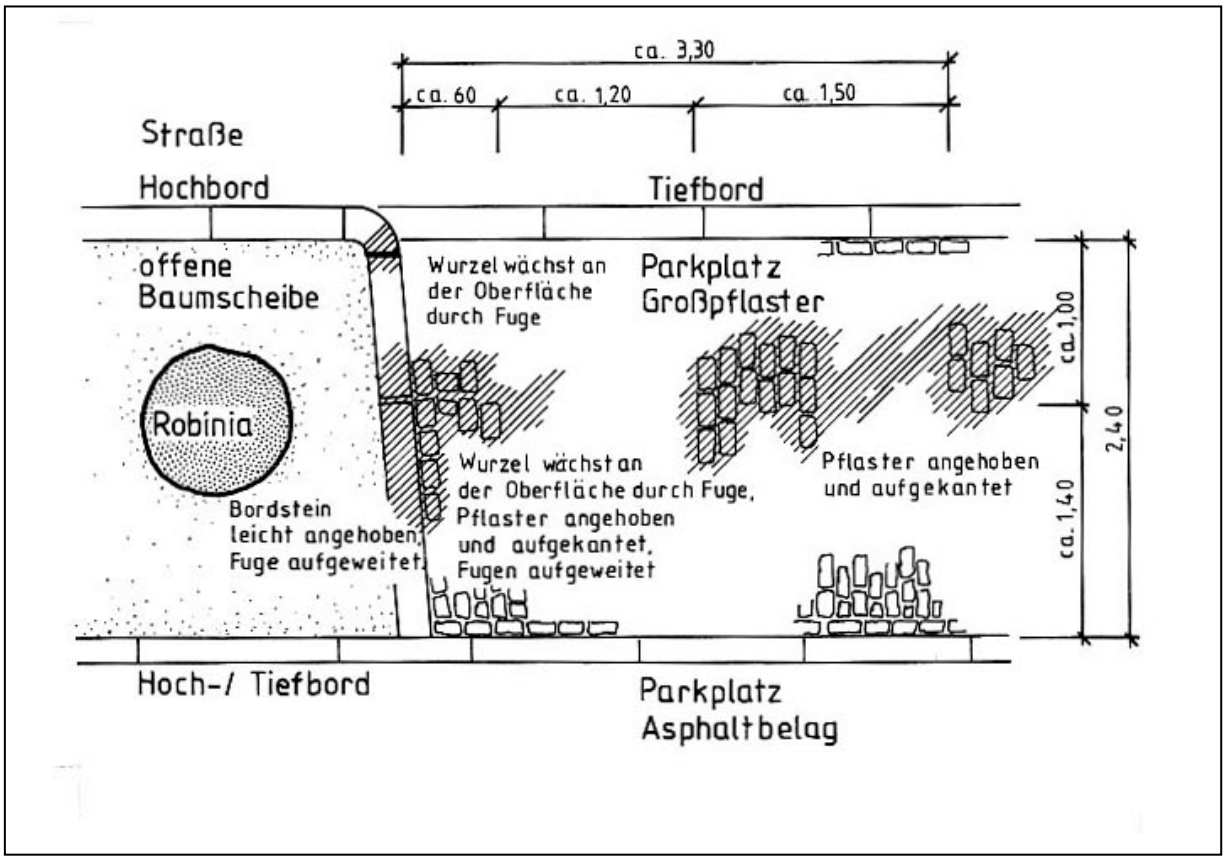
4.4.8 Fallbeispiel 8: Robinia pseudoacacia II, Köln

Baumart	*Robinia pseudoacacia*, Robinie		
Standort	Köln, Vorgebirgsstraße	**Datum**	02.09.1999
Stammdurchmesser	61 cm	**Baumscheibe**	offen
Kronendurchmesser	10 m	**Baumscheibengröße**	2,60 x 1,60/2,60 m = ca. 5,5 m²

Randeinfassung	Bordstein als Tiefbord und Hochbord 20/26 cm (3 Seiten, Aufgrabungsseite)
Wegedecke	Natursteingroßpflaster 12/20/14 cm (Aufgrabungsseite) Asphalt (andere Seiten)
Schichtaufbau	Pflasterbettung: 6 cm Sand (Bodenprobe 11) Tragschicht: Beton

Standortbeschreibung

Der Baum befindet sich ca. 15 m entfernt von dem aus Fallbeispiel 7 in derselben Mittelallee einer stark befahrenen Straße. Zu zwei Seiten grenzen mit Großpflaster befestigte Parkbuchten mit Hochbordsteinen, zu einer Seite ein von der Baumscheibe durch ein Tiefbord getrennter Asphaltbelag an. Das angehobene Pflaster einer Parkbucht ist Gegenstand der Untersuchung (Darstellung 98).



Darstellung 98: Standort und Schadbild Fallbeispiel 8

Schadbild (Abbildung 58)

Belag: Von einer Bordsteinfuge ausgehend verläuft eine unterbrochene Aufwölbung in Längsrichtung vom Baum weg bis ca. 5 m Entfernung ab Stammmitte. Die Steine sind stellenweise aufgekantet oder ganz angehoben. Starke Anhebungen befinden sich unmittelbar im Anschluss an die Baumscheibe in 1,20 m sowie in 3 m und 4,50 m Entfernung ab Stammmitte (ab Außenkante Bordstein 0 m, 1,80 m und 3,30 m).

Randeinfassung: Eine oberflächennahe Wurzel wächst durch die mittlere Bordsteinfuge. Sie verbreitert sich dahinter bis auf ca. 15 cm. Der Bordstein ist geringfügig angehoben und seitlich verschoben. In einer zweiten Fuge ist ebenfalls eine oberflächennahe Wurzel sichtbar, die jedoch deutlich kleiner ist.

Abbildung 58: **Schadbild Fallbeispiel 8**
Das Pflaster ist leicht aufgewölbt und stellenweise angehoben. Der Bordstein ist geringfügig angehoben und seitlich verschoben

Wurzelbild

0 bis 14 cm Tiefe, Zone unter Belag

Das Pflaster wird im Bereich der Anhebungen aufgenommen. Von den Bordsteinen kann nur ein Element ohne Maschineneinsatz entfernt werden, so dass die übrigen in ihrer Position verbleiben. Unter dem Pflaster befindet sich relativ feuchter Sand, der rasch austrocknet. Einige Fugen sind vererdet. Im lockeren Sand unter dem Pflaster befinden sich Schwachwurzeln mit davon abzweigenden Fein- und Feinstwurzeln (Abbildung 59). Letztere treten in geringer Menge insbesondere in den vererdeten Bereichen auf und bilden stellenweise Wurzelknöllchen.

Durch das Entfernen des Bordsteins wird die Höhe der abgeplatteten Wurzel in der mittleren Fuge erkennbar. Hinter der Fuge umwächst sie die Pflastersteine an mehreren Stellen, so dass ein Stein nicht gelöst werden kann. Auch in anderen Bereichen sind stark verbreiterte Auflagestellen der Steine auf den Wurzeln sichtbar. Aus der zweiten Bordsteinfuge wächst eine Derbwurzel in eine durchgehende Längsfuge an einer Läuferschicht entlag, welche zwischen dem Pflasterverband der Parkbucht und dem Bordstein zur angrenzenden Straße verlegt ist. Die weitere Beschreibung des Wurzelbildes erfolgt im nächsten Abschnitt.

Abbildung 59: **Wurzelbild unter dem Pflaster bei Fallbeispiel 8**
Im lockeren Pflastersand sind wenige Schwach-, Fein- und Feinstwurzeln erkennbar. Die Fugen sind vererdet.

0 bis 20 cm Tiefe, Pflasterbettung (Sand)

Der Sand wird bis auf die Betontragschicht entfernt. Es werden zahlreiche kräftige Wurzeln sichtbar, die sich in Längsrichtung der Aufgrabungsstelle erstrecken (Abbildung 60). In der freigelegten Bordsteinfuge ist die Wurzel auf ungefähr 20 x 4 cm abgeplattet (Abbildung 61). Möglicherweise handelt es sich um mehrere miteinander verwachsene Wurzeln. Vor und unmittelbar hinter der Fuge erreichen wulstartige Verdickungen eine Oberfläche von ca. 10 x 16 cm. Aus dieser Stelle entspringt ein Blatt. Eine weitere, weniger starke Wurzel wächst zunächst in die Fuge hinein und dann zwischen Betonbettung und Bordstein entlang und erreicht dabei eine Höhe von 2,5 cm bei 5 cm Breite. Unter dem Bordstein zweigen dünnere Seitenwurzeln ab.

Der Hauptwurzelstrang verzweigt sich hinter der Bordsteinfuge zu einer weitläufigen Wurzelpartie (Abbildung 60). Die Wurzeln verlaufen relativ geradlinig und leicht gebogen vom Baum weg. Sie konzentrieren sich auf den mittleren Bereich der Pflasterfläche. Einzelne Wurzeln streichen am Bordstein der Baumscheibe und an der Läuferreihe entlang. Bei der Mehrzahl der Wurzeln handelt es sich um Grob- und Derbwurzeln mit Dicken zwischen 1,5 und 4 cm. An einigen Auflagestellen des Pflasters haben sich tellerartige Verdickungen ausgebildet, die mit 8 bis 20 cm ein Mehrfaches der ursprünglichen Wurzelbreite erreichen (Abbildung 62). Da sie auch in die Fugen hineinwachsen, malt sich die Pflasterform auf ihrer Oberfläche ab. Unmittelbar hinter der Bordsteinfuge liegen im Bereich der Pflasteranhebungen mehrere Verdickungen dicht beieinander, ebenso im Bereich der beiden anderen Pflasteranhebungen.

Die durch die zweite Bordsteinfuge wachsende Derbwurzel von 2 cm Durchmesser verdickt sich vor und hinter dem Engpass. Sie verläuft gerade am Läuferband zwischen straßenseitigem Bordstein und Reihenpflaster entlang und weist zahlreiche Aufwölbungen bis zu 5 cm Höhe bei kaum veränderter Breite auf (Abbildung 63).

Neben den Stark- und Derbwurzeln finden sich in der Pflasterbettung zahlreiche Schwachwurzeln mit 4 bis 5 mm Durchmesser. Die Menge an Fein- und Feinstwurzeln hingegen ist relativ gering. Feine Wurzeln zweigen häufig von wesentlich dickeren ab. Die Aufgrabungen werden in ca. 3,60 m Entfernung ab Außenkante Baumscheibe (4,80 m ab Stammmitte) beendet. Die Wurzeln wachsen außerhalb des Aufgrabungsbereiches mit einem Durchmesser von bis zu 3 cm unter dem Pflaster weiter.

Abbildung 60: Gesamtes Wurzelbild in der Pflasterbettung bei Fallbeispiel 8
Ausgehend von einer Bordsteinfuge hat sich im Sand zwischen dem Pflaster und der Betontragschicht ein weit reichendes, kräftiges Wurzelwerk entwickelt. Die Hauptwuchsrichtung verläuft vom Baumstamm weg. Unter einzelnen Pflastersteinen haben sich tellerartige Verdickungen ausgebildet, die zu deutlichen Anhebungen des Pflasters führen. Ein Pflasterstein an der Randeinfassung ist vollständig umwachsen und kann nicht gelöst werden. Durch die linke Bordsteinfuge verlässt ein weiterer Wurzelstrang die Baumscheibe. Er wächst entlang einer Längsfuge.

Abbildung 61: Abgeplattete Wurzel im Bereich der Bordsteinfuge bei Fallbeispiel 8
In der Bordsteinfuge ist die Wurzel abgeplattet, davor und dahinter stark verdickt. Der Pflasterstein hinter der Fuge wird vollständig umwachsen. Zwischen dem Betonfundament und dem entnommenen Bordstein wächst eine weitere Wurzel, die eine leichte Anhebung hervorruft.

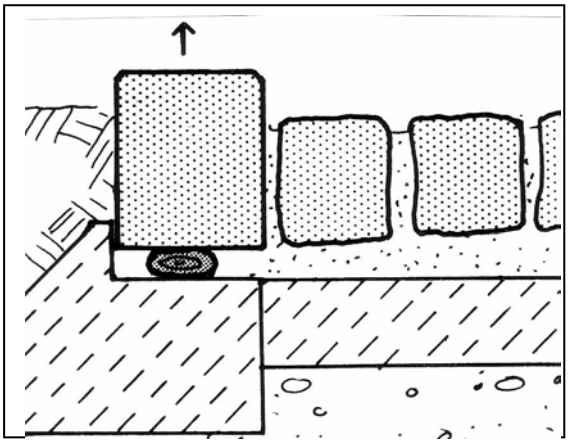
Abbildung 62: Tellerartige Verdickungen an den Auflagestellen der Pflastersteine bei Fallbeispiel 8
Tellerartige Verdickungen unter den Pflastersteinen dürften als Reaktion auf die Druckbelastung entstanden sein. Die Form der Pflastersteine ist als Deformation erkennbar.

Abbildung 63: Wurzel in einer Längsfuge bei Fallbeispiel 8
Ein weiterer Wurzelstrang wächst gerade am Läuferband zwischen straßenseitigem Bordstein und Reihenpflaster entlang. Die Hauptwurzel weist zahlreiche Aufwölbungen auf.

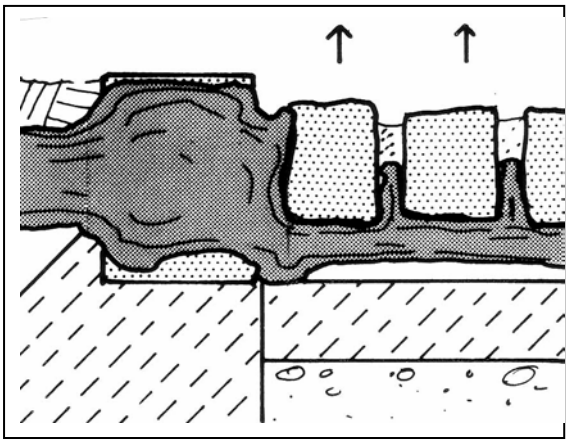
Schadensursachen

Belag: Ursache der Belagsanhebungen sind Grob- und Derbwurzeln (bis ca. 4 cm Durchmesser) mit ausgeprägten tellerartigen Verdickungen (bis ca. 20 cm Durchmesser), die unmittelbar unter dem Pflaster wachsen und die Pflastersteine stellenweise umschließen (Darstellung 99).

Randeinfassung: Ursache der leichten Anhebung und Verschiebung der Randeinfassung sind Derbwurzeln, die durch die Bordsteinfugen sowie zwischen Bordstein und Betonbettung wachsen und sich teilweise erheblich verdicken (Darstellung 100).



Darstellung 99: Schadensursache der Anhebung des Pflasters bei Fallbeispiel 8



Darstellung 100: Schadensursache der Anhebung des Bordsteins bei Fallbeispiel 8

Interpretation

Auch dieses Fallbeispiel untermauert die Bedeutung der Randeinfassung und der Fugen für den Verlauf des Wurzelwachstums: Die Wurzeln wachsen durch die Fuge, weiten diese durch ihr Dickenwachstum auf, verändern die Lage des Steins und schaffen so Platz für neue Wurzeln. Weitere Wurzeln wachsen durch die Fuge zwischen Bettung und Bordstein und bewirken so eine Anhebung. Vermutlich ermöglicht schon ein feiner Riss das Eindringen von Wurzeln. Das häufige und teilweise lineare Wachstum von Wurzeln an Randeinfassungen und Pflasterreihen entlang weist darauf hin, dass diese baulichen Elemente lenkend wirken.

Auch diese Robinie bildet starke Wurzelverdickungen aus, deren Form sich jedoch von denen der Robinie in Fallbeispiel 7 unterscheidet. Die Art der Druckbelastung für die Wurzel dürfte unter dem Großpflaster flächiger sein als unter grobkörnigem Asphalt, so dass tellerähnliche Auswüchse entstehen. Die beulenartigen Verdickungen der in einer Längsfuge im Pflaster verlaufenden Wurzel hingegen können nicht auf Druckbelastung zurückgeführt werden. Die Frage, inwieweit die Eigenschaft der Robinie, Wurzelausläufer zu bilden, hierbei eine Rolle spielt, bleibt offen. Die Blattbildung an der Verdickung um die mittlere Bordsteinfuge ist ein Anzeichen für die Fähigkeit zur Sprossbildung. Die Bedeutung dieser Fähigkeit für die Pflasteranhebungen kann nicht geklärt werden. Angesichts der grossen Wurzelmasse sind die Anhebungen insgesamt relativ gering. Wahrscheinlich ermöglicht die dicke Sandschicht, dass das Volumen zunächst durch kleinräumige Verlagerung des Materials ausgeglichen wird. Erst bei größeren Wurzeldurchmessern oder bei Verdickungen kommt es zu einer deutlichen Pflasteranhebung.

Die starke Wurzelentwicklung widerspricht angesichts der lokalen Standortbedingungen den Erwartungen: Der durchwurzelte Sand liegt auf einer Betontragschicht. Die lebensnotwendige Wasserzufuhr kann also nur über die Fugen des Großpflasters erfolgen. Da die Fläche über ein Gefälle entwässert wird und außerdem die Wasserdurchlässigkeit der Fugen auf Dauer durch das Zusetzen mit Feinteilen stark abnimmt, ist eine geringe Aufnahme von Regenwasser anzunehmen. Beim Aufheben des Pflasters war der Sand jedoch trotz der Jahreszeit (Sommer) relativ feucht, trocknete jedoch rasch aus. Anscheinend bleibt durch die Rauhigkeit des Belages so viel Wasser in den Fugen stehen, dass es in ausreichenden Mengen in das Pflasterbett versickert. Hinzu kommt, dass Robinien auch bei geringer Bodenfeuchtigkeit relativ gut gedeihen.

Die Konzentration der Wurzeln auf den mittleren Streifen der Parkbucht sowie die ungleichmäßige Verteilung der tellerartigen Verdickungen unter dem Pflaster könnte mit der Druckbelastung durch parkende oder einparkende Kraftfahrzeuge zu begründen sein, kann jedoch letztlich nicht geklärt werden.

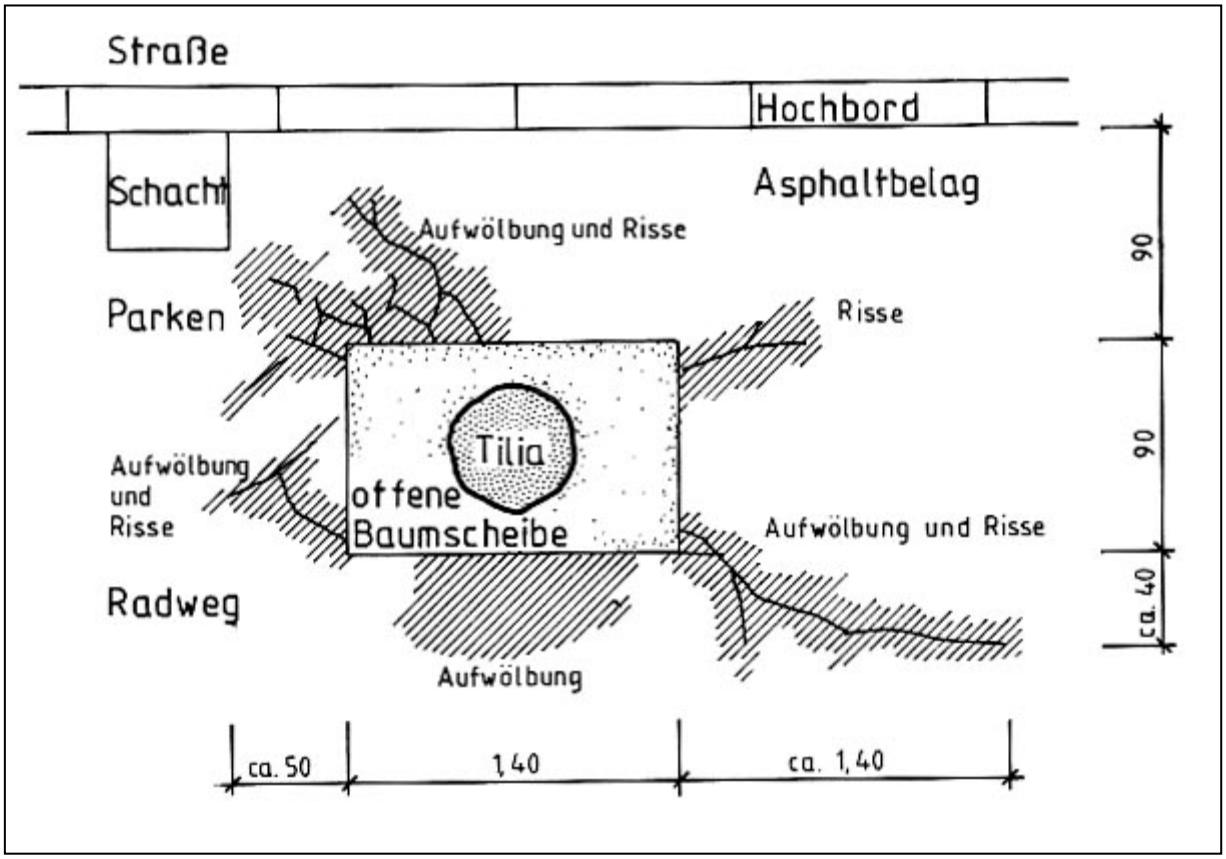
4.4.9 Fallbeispiel 9: Tilia x intermedia, Köln

Baumart	*Tilia x intermedia*		
Standort	Köln, Mommsenstraße 3	**Datum**	06.09.1999
Stammdurchmesser	41 cm	**Baumscheibe**	offen
Kronendurchmesser	6,5 m	**Baumscheibengröße**	0,9 x 1,4 m = ca. 1,3 m²

Randeinfassung	keine
Wegedecke	Asphalt: 2,5 cm Gussasphalt auf ca. 10 cm Beton
Schichtaufbau	kein einheitlicher Schichtenaufbau: ca. 20 cm sandiger Füllboden (Bodenprobe 12) bzw. ca. 20 cm Tragschicht: Mineralgemisch (Bodenprobe 13) Unterbau: sandiger Füllboden (Bodenprobe 14)

Standortbeschreibung

Der Baum befindet sich im asphaltierten Gehwegbereich an einer vielbefahrenen Straße. Zu zwei Seiten wird die Fläche als Parkplatz genutzt. Eine Seite ist durch ein Hochbord von der Straße getrennt, an der vierten Seite verläuft ein Radweg entlang eines stark frequentierten Gehwegs (Darstellung 101). Die Baumkrone ist stark gestutzt.



Darstellung 101: Standort und Schadbild Fallbeispiel 9

Schadbild

Belag: Die Asphaltdecke der als Radweg und Parkplatz genutzten Fläche ist um die Baumscheibe herum an mehreren Stellen aufgewölbt (Abbildung 64). Einige der Wölbungen sind nicht gerundet, sondern kantig geformt. Die Höhe der Anhebungen beträgt bis zu 15 cm, die seitliche Ausdehnung 40 bis 60 cm (max. 140 cm). Die größten Schäden treten in einem Radius von ca. 1,10 m von der Stammmitte auf. Auf dem Grat einiger Aufwölbungen verlaufen Risse. In aufgeweiteten Rissen hat sich Wildkrautbewuchs angesiedelt.

Abbildung 64: **Schadbild Fallbeispiel 9**
Die Asphaltdecke ist an mehreren Stellen angehoben. Die Aufwölbungen sind kantig geformt, was an den Rissen abzulesen ist.

Wurzelbild

0 bis 10 bzw. 12,5 cm Tiefe, Zone unter Belag

Der Asphaltbelag besteht aus einer 2,5 cm dicken Schicht Gussasphalt auf einer unregelmäßigen, im Mittel 10 cm dicken Betonschicht. Er wird auf einer Fläche von 2,25 x 3,70 m (8,3 m²) entfernt. Darunter befindet sich ein sandiges Füllmaterial, in dem wenige Feinwurzeln bis unter die Deckschicht wachsen. Um den Schacht befindet sich reiner Sand, der von Schwach- und Feinwurzeln (1 bis 5 mm Durchmesser) durchzogen wird. Im Bereich der Belagsanhebungen sind einige stärkere Wurzeln erkennbar. Durch den notwendigen Maschineneinsatz beim Entfernen von Beton und Asphalt ist die obere Bodenschicht durchmischt, so dass das ursprüngliche Wurzelbild kaum feststellbar ist (Abbildung 65).

Abbildung 65: Wurzelbild unter dem Belag bei Fallbeispiel 9
Feinere Wurzeln und Starkwurzeln mit Verdickungen sind im lockeren Boden unter dem Asphaltbelag nur undeutlich zu erkennen.

12,5 bis 18 cm Tiefe, Tragschicht/Unterbau

Zunächst wird eine dünne Schicht des inhomogenen, losen Bodens beziehungsweise Wegebaustoffes entfernt. Alle Stoffarten sind relativ trocken. In den an die Baumscheibe angrenzenden Bereichen befindet sich ein fein schiefrig zerfallender, feinteilhaltiger Boden, der intensiv durch Feinst-, Fein- und Schwachwurzeln mit zahlreichen hellen Wurzelspitzen erschlossen und von Regenwürmern besiedelt wird (Abbildung 66). Zwischen den feineren Wurzeln sind die stark verdickten Druckstellen von Starkwurzeln sichtbar, die bis unter den Belag reichen. In einer Ecke der Aufgrabungsstelle zeigt sich ein Geflecht aus Grob- und Derbwurzeln mit zahlreichen Verdickungen und Verwachsungen (siehe unten). Zur anderen Seite und zur Straße hin befindet sich ein stark verdichtetes, bauschuttartiges Material, in dem keine Wurzeln wachsen. Der mit Kiessand verfüllte Bereich am Schacht hingegen wird intensiv durch Feinst-, Fein- und Schwachwurzeln erschlossen.

Abbildung 66: Wurzelbild in der Tragschicht bei Fallbeispiel 9
Die Bereiche unmittelbar an der Baumscheibe sowie am Schacht werden von Feinst-, Fein- und Schwachwurzeln erschlossen, die jedoch keine Anhebungen hervorrufen. Die schadensträchtigen Starkwurzeln sind in dieser Schichttiefe nur schwach erkennbar.

18 cm bis 30 und 50 cm Tiefe, Unterbau

Nach Entfernen der feineren Wurzeln werden die Grob-, Derb- und Starkwurzeln (ab 5 mm Durchmesser) weiter freigelegt (Abbildung 67). Der Durchmesser der Starkwurzeln beträgt zwischen 5 und 14 cm. Die ovalen Auflagestellen des Belages auf den Wurzeln sind in der Höhe und in der Breite um das Anderthalb- bis Zweifache des ursprünglichen Durchmessers verdickt. Bei einigen zeichnen sich die Abdrücke von Steinen ab oder es sind eingewachsene Steine zu sehen. An mehreren Stellen sind kreuzende Wurzeln miteinander verwachsen, was zu einer zusätzlichen Verdickung führt (Abbildung 68).

Unter der mittleren, bogenförmig gewölbten Anhebung auf der Radwegseite (vorne) wird tiefer gegraben. In 30 cm Tiefe zeigt sich eine ca. 10 cm dicke Starkwurzel. Sie stößt auf feste Bauschuttkonglomerate, die sich an dieser Stelle zusammen mit der Betonschicht zu einer starren Schicht verbinden (Abbildung 69). An einer zweiten punktuell aufgegrabenen Stelle (links) werden in 50 cm Tiefe neben wenigen Feinwurzeln Starkwurzeln gefunden, die jedoch keine Anhebung verursachen.

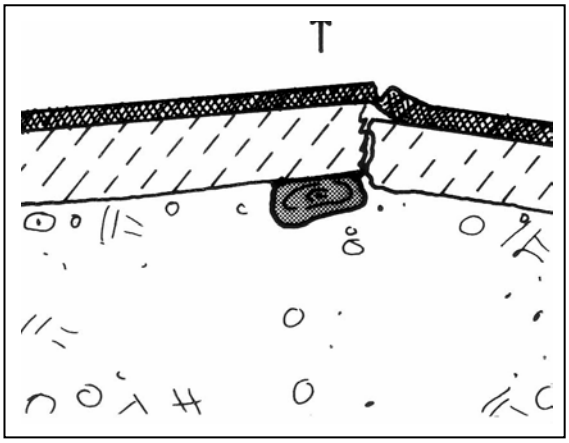
Abbildung 67: **Wurzelbild im Unterbau bei Fallbeispiel 9**
Mehrere Starkwurzeln reichen bis unter den Belag und verursachen die Anhebungen.

Abbildung 68: Verdickungen an Wurzelverwachsungen und an Auflagepunkten des Belags bei Fallbeispiel 9
Die Auflagestellen des Belags auf den Wurzeln sind knieartig verdickt und teilweise deformiert. An Kreuzungspunkten sind die Wurzeln verwachsen und ebenfalls verbreitert.

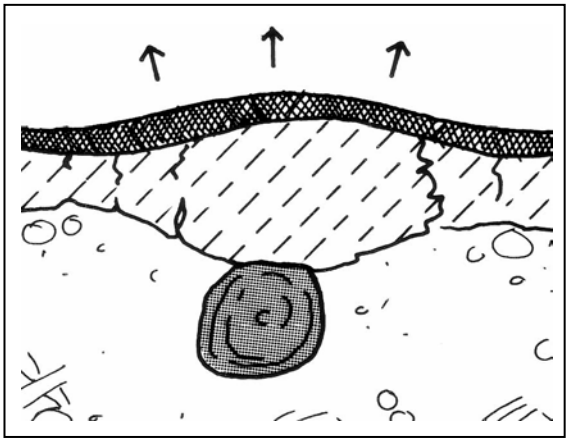
Abbildung 69: Starkwurzel unter einer Aufwölbung bei Fallbeispiel 9
Eine relativ tief wachsende Starkwurzel verursacht eine Aufwölbung. Durch Bauschuttbeimengungen ist die starre Schicht des Belags an dieser Stelle sehr dick, was eine Anhebung begünstigt.

Schadensursachen

Belag: Ursache der aufgefalteten und rissigen Belagsanhebungen sind Derb- und Starkwurzeln bis 14 cm Durchmesser mit ovalen Verdickungen, die unmittelbar unter dem Belag aus Beton und Asphalt wachsen (Darstellung 102). Die bogenförmig aufgewölbte Belagsanhebung ist auf eine Starkwurzel zurückzuführen, die in größerer Tiefe unter der an dieser Stelle dickeren Betonschicht wächst (ca. 10 cm Durchmesser, 30 cm Tiefe; Darstellung 103).



Darstellung 102: Schadensursache der Aufkantungen und Risse im Asphaltbelag bei Fallbeispiel 9



Darstellung 103: Schadensursache der Aufwölbung im Asphaltbelag bei Fallbeispiel 9

Interpretation

Die unterschiedlichen Füllböden unter dem Belag bieten den Baumwurzeln offenbar hinreichend gute Wachstumsbedingungen: Die feinteilhaltigen Bereiche werden von Feinstwurzeln und jungen Wurzelspitzen erschlossen, was trotz der starken Versiegelung auf eine gute Luftführung in Verbindung mit einer ausreichenden Wasser- und Nährstoffversorgung hinweist. Regenwürmer lassen hier auf eine aktive Bodenfauna schließen. Fein- und Schwachwurzeln befinden sich außerdem verstärkt im kiesigen Füllboden um den Schacht, wo ein geringer Verdichtungsgrad anzunehmen ist. Die stark verdichteten, bauschutthaltigen Bereiche hingegen werden nicht erschlossen. Die unter dem Belag wachsenden Starkwurzeln haben an den Auflagestellen starke Verdickungen ausgebildet, welche die Schadwirkung verstärken. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den Starkwurzeln um statisch bedeutsame Verankerungswurzeln in nur 10 cm Tiefe handelt. Dies unterstreicht die Problematik von Ausbesserungsarbeiten an Wegebelägen, da hierbei äußerst behutsames Vorgehen erforderlich ist.

Die Schadensform entsteht vor allem in Abhängigkeit von der Bauweise: Bei der Anhebung durch Wurzeln kommt es zum Bruch des starren Betons, der zunächst noch von der dünnen, elastischen Asphaltdeckschicht überzogen wird. Die Aufwölbungen sind deshalb leicht kantig. Durch das fortgesetzte Dickenwachstum werden die Brüche größer, so dass der Asphalt reißt. Die Wölbungsscheitel und Kanten liegen nicht zwangsweise genau über den schadensverursachenden Wurzeln, sondern an den Bruchstellen des Betons.

Ein weiterer Einflussfaktor ergibt sich aus der geringen Dimensionierung und der nicht regelgerechten Bauweise der Verkehrsfläche: Die Deckschicht aus Beton und Asphalt liegt teilweise auf gut durchwurzelbarem Substrat anstelle einer mineralischen Tragschicht. Die Betonschicht ist ungleichmäßig dick und weist an mehreren Stellen weniger als 10 cm mittlere Schichtdicke auf. Diese Stellen sind am ehesten bruchgefährdet. Durch Bauschutteinschlüsse unter dem Beton befindet sich an einer Stelle eine dickere, starre Schicht. Eine Wurzel in ca. 30 cm Tiefe führt hier zu einer gerundeten Aufwölbung mit nur schwacher Rissbildung. Möglicherweise bedingt die flächenmäßig begrenzte Verdickung des Betons einen oder mehrere Brüche am Übergang zu geringeren Schichtdicken.

Die Schadensform ist außerdem abhängig von der Tiefe der Wurzeln: Die 10 cm dicke Starkwurzel in 30 cm Tiefe führt zu vergleichsweise geringen Anhebungen. An anderer Stelle werden in 50 cm Tiefe ca. 5 cm dicke Starkwurzeln freigelegt, von denen keinerlei Schadwirkung ausgeht.

Auch dieses Fallbeispiel zeigt, wie sich die Wurzelarchitektur als Reaktion auf die örtlichen, heterogenen Bodenverhältnisse entwickelt. Anwohnerberichten zufolge sind am Standort mindestens zweimal Tiefbauarbeiten wegen Belagsanhebungen durch Baumwurzeln durchgeführt worden. Der heute vorgefundene Belag muss daher auf bereits vorhandene Wurzeln aufgebracht worden sein, was die unregelmäßigen Schichtdicken und die unterschiedlichen Füllböden erklärt. Ein begünstigender Faktor für die Belagschäden ist in der unzureichenden Größe der Baumscheibe zu suchen: Die meisten Anhebungen treten in einem Radius von 1,10 m ab Stammmitte auf und würden zum jetzigen Zeitpunkt bei einer DIN-gerechten Baumscheibengröße von 6 m² weit weniger Probleme verursachen.

4.4.10 Bodeneigenschaften der untersuchten Wurzelbereiche

Ein entscheidender Faktor für das Wachstum von Baumwurzeln sind die Bodeneigenschaften. Diese sind am Straßenstandort in der Regel gegenüber dem Naturstandort durch Bautätigkeiten stark verändert. Die Aufgrabungen erstrecken sich auf Bodenschichten, die nicht dem natürlich anstehenden Boden zuzurechnen und somit bodenkundlich als Auftragshorizont zu bezeichnen sind. Es hat sich gezeigt, wie Baustoffe und Bauweisen auf kleinstem Raum variieren können und zahlreiche unterschiedliche Einflüsse auf das Wachstum von Baumwurzeln ausüben. Um die Bodeneigenschaften charakterisieren zu können, werden folgende Probengruppen nach der Zugehörigkeit zu einer Schicht des Wegeoberbaus und nach Stoffart unterschieden:

Wegebauschicht	**Material**
Pflasterbettung	Sand
Tragschicht	Kiessand Schotter Mineralgemische
Unterbau	heterogene Füllböden

Diese Zuordnung erscheint sinnvoller als eine Unterteilung nach bodenkundlichen Gesichtspunkten, da es sich in der Regel nicht um Böden im eigentlichen Sinne sondern primär um Wegebaustoffe handelt, die von Baumwurzeln als Substrat genutzt werden. Tatsächlich sind die Bodenverhältnisse vielfältiger und komplexer, als sie im folgenden dargestellt werden. Eine Reduzierung der Aussagen auf wesentliche Merkmale ist erforderlich, um grundsätzliche Unterschiede herauszustellen und einen Vergleich zu ermöglichen. Es sei angemerkt, dass durch die Fragestellung bedingt ausschließlich Wurzelbereiche von Bäumen aufgegraben wurden, die den Wegeoberbau erschlossen haben. Daraus ergibt sich eine insgesamt relativ hohe Durchwurzelungsintensität im Wegeoberbau.

Bodenverhältnisse allgemein

Die untersuchten Pflasterbettungen bestehen aus lockerem Pflastersand, enthalten vereinzelt aber auch Korngrößen der Kiesfraktion. Einige Pflasterbettungen sind durch Kalk- oder Zementzusatz gebunden, zerfallen zumeist aber leicht. Die Fugen und der darunter befindliche Sand sind häufig von dunkler Farbe und feinteilhaltig, was auf Anreicherungen mit organischer Substanz hinweist. Die untersuchten Tragschichten bestehen aus Stoffen unterschiedlicher Korngröße und -form. Es handelt sich um Sand, Schotter, Kiessand und Mineralgemische. Sie sind beim Ausbau mäßig feucht und trocknen bei warmer Witterung schnell aus. Sie lassen sich leicht bis schwer lösen. Die untersuchten Füllböden bestehen aus verschiedenen gut lösbaren sandigen Füllböden aus Stoffen wie Sand, Kies, Schotter und Bauschuttbeimengungen. Alle Stoffe sind zunächst mäßig feucht, trocknen jedoch nach Entfernen der Deckschichten bei warmer Witterung rasch aus. Sämtliche Pflasterbettungen, über die Hälfte der Tragschichten und alle untersuchten Unterbauten der aufgegrabenen Standorte werden durchwurzelt.

Ergebnisse der Laboruntersuchung

An allen aufgegrabenen Standorten wurden Proben aus verschiedenen Schichten des Wegeaufbaus entnommen und im Labor analysiert. Ziel der Analysen ist, Erkenntnisse über die Eigenschaften der Wegebaustoffe und deren Auswirkung auf das Wurzelverhalten zu gewinnen. Da es sich um exemplarische Aufgrabungen handelt, ist eine statistische Auswertung der Ergebnisse nicht möglich. Die Erkenntnisse gelten also in erster Linie für die untersuchten Fallbeispiele und sind nur bedingt zu verallgemeinern.

Hauptkriterium für die Beurteilung der Substrateigenschaften der Wegebaustoffe ist die Intensität der Durchwurzelung. Sie wird qualitativ durch visuelle Einschätzung festgestellt. Eine quantitative Messung der Wurzelmasse oder der Wurzelanzahl erfolgt nicht (vgl. Abschnitt 4.2.2). Es werden Stoffe mit hoher Durchwurzelungsintensität von Stoffen mit mäßiger Durchwurzelungsintensität und solchen ohne oder mit äußerst geringer Durchwurzelung unterschieden. Die Einschätzung erfolgt im Vergleich der Fallbeispiele und der freigelegten Wegebauschichten untereinander. Die Tabellen 12 bis 13 enthalten die Ergebnisse der Bodenanalyse aufgeschlüsselt nach Stoffart und Durchwurzelungsintensität. Die bodenphysikalischen Kennwerte wurden im Labor anhand gestörter Stoffproben bestimmt, welche als Mischproben aus verschiedenen Bereichen der Schichten entnommen wurden. Da die Schichten häufig nicht aus homogenen Stoffen bestehen, sondern bereichsweise Verunreinigungen und unterschiedliche Mischanteile enthalten, sind die Laborwerte als Anhaltspunkte zu werten, die nicht die genauen Bodenkennwerte der Stoffart in jedem Bereich der Wegebauschicht wiedergeben. Eine genauere Beprobung ist nicht sinnvoll, da auch sie nicht in jedem Bereich zutreffen würde. Der zusätzliche Aufwand ist außerdem methodisch nicht gerechtfertigt. Es handelt sich ohnehin um Einzelfallbeobachtungen, so dass der zu erwartende Zugewinn an Erkenntnissen gering ist.

Am Standort Hannover-Herrenhausen (Fallbeispiele 1 bis 3) konnten durch die mangelnde Abgrenzung der Materialien keine nach Pflasterbettung und Tragschicht getrennten Proben entnommen werden. Die Proben A (Fallbeispiele 1 und 2) und C (Fallbeispiel 3) werden daher sowohl der Pflasterbettung als auch der Tragschicht zugeordnet. Es ist anzunehmen, dass der Einbau dennoch in mehreren Arbeitsgängen erfolgte (Einbau und Verdichtung der Tragschicht, Aufbringen eines Pflasterbettes, Einbau von Pflaster und Platten, Verdichten der Deckschicht). Deshalb wird im Hinblick auf die Durchwurzelungsintensität dennoch zwischen Pflasterbettung und Tragschicht differenziert. Gemäß der Tiefe wird das Wurzelbild bis ca. 5 cm unter Belag zur Pflasterbettung, darunter zur Tragschicht gezählt.

Probe 8 wurde aus Bitukies entnommen. Sie stellt einen Sonderfall dar und wird nicht gewertet.

Die Kennwerte Rohdichte, Volumenabnahme bei Verdichtung, Wasserkapazität und Wasserdurchlässigkeit (Tabelle 13) geben Aufschluss über die Lagerungsdichte und den Wasser- und Lufthaushalt von Böden. Die Ergebnisse werden der Vollständigkeit halber aufgeführt, jedoch nicht in die Auswertung einbezogen, da eine Abhängigkeit vom Porenvolumen und der Porenverteilung in der festen Bodensubstanz, also vom Bodengefüge, besteht. Da in gestörten Stoffproben das Gefüge zerstört ist,

geben die Analysewerte nur die Eigenschaften unter Laborbedingungen (locker bzw. mit 12 Schlägen verdichtet) wieder. Böden am Straßenstandort sind oftmals hoch verdichtet, so dass Rückschlüsse auf die tatsächlichen vegetationstechnischen Eigenschaften der Wegebaustoffe nicht möglich sind. Ähnliches gilt für die Volumenabnahme bei Verdichtung im Labor: Sie lässt zwar auf die Verdichtbarkeit der Stoffe bei definierten Bedingungen im Vergleich schließen, nicht aber auf die Bedingungen vor Ort. Die vom Gefüge abhängigen Kennwerte werden daher als nicht aussagekräftig verworfen.

Korngrößenverteilung (Tabelle 12)

Bei den untersuchten Stoffen handelt es sich um die Wegebaustoffe Sand, Schotter, Kiessand und Mineralgemische sowie um Füllböden mit hohem Sandanteil oder um Sande. Der Feinboden ist bodenkundlich als Sandboden mit unterschiedlich hohem Gehalt an Schluff und Kies anzusprechen. Der Sandanteil (Korngröße 2 bis 0,063 mm) beträgt zwischen 17,3 und 96,6 Gew.-% mit verschieden hohen Anteilen an Fein-, Mittel- und Grobsand (Sieblinien im Anhang). Einige Proben weisen einen schwachen oder mittleren Schluffanteil auf (bis 9,1 Gew.-%), der die Wasserkapazität und das Adsorptionsvermögen für Nährstoffe erhöht und somit zur Verbesserung der vegetationstechnischen Eigenschaften des Sandes beitragen kann. Dieser wirkt sich jedoch bei den untersuchten Proben nicht auf die Durchwurzelungsintensität aus. Der Anteil an Kies oder Grus (Schotter) beträgt zwischen 1,1 und 78,8 Gew.-% mit verschieden hohen Anteilen an Fein-, Mittel- und Grobkies. Es lässt sich kein Einfluss auf die Durchwurzelungsintensität feststellen. Der Ungleichförmigkeitskoeffizient $U = d_{60}/d_{10}$ weist eine große Bandbreite von gleichförmig bis sehr ungleichförmig aus, lässt aber ebenfalls keinen direkten Zusammenhang mit der Durchwurzelung erkennen. Die Korngrößenverteilung übt demnach bei den untersuchten Fallbeispielen keinen Einfluss auf die Durchwurzelungsintensität aus.

Organische Substanz (Tabelle 14)

Der Gehalt an organischer Substanz in den untersuchten Bodenproben beträgt zwischen 0,3 und 1,9 Gew. % und ist somit erwartungsgemäß niedrig. Ein Zusammenhang mit der Durchwurzelungsintensität ist nicht erkennbar.

pH-Wert (Tabelle 14)

Mit pH-Werten zwischen 6,0 und 7,6 (schwach sauer bis schwach basisch) weisen die Stoffproben für das Pflanzenwachstum relativ günstige Werte auf (je nach Bodenart pH-Werte zwischen 5 und 7). Die höheren pH-Werte sind häufig auf Kalk- oder Zementzusätze im Pflastersand der Pflasterbettung oder auf Mörtelreste an Bauschutteinschlüssen in der Tragschicht oder im Unterbau zurückzuführen. Ein Einfluss des pH-Wertes auf die Durchwurzelungsintensität ist für die untersuchten Fallbeispiele nicht abzuleiten.

Carbonatgehalt (Tabelle 14)

Die Carbonatgehalte der untersuchten Proben weisen eine große Schwankungsbreite auf, wobei die meisten Substrate nicht bis schwach carbonathaltig (unter 2%) sind (vgl. Schroeder 1984, 36). Einige Proben sind als mäßig carbonathaltig, zwei Natursteinschotter als mergelig und kalkig zu bezeichnen. Die hohen Kalkgehalte wirken sich nicht auf den pH-Wert aus, so dass der Kalk hier in schwer lösba-

rer Form vorliegen dürfte. Trotz der großen Schwankungsbreite ist kein Einfluss auf die Durchwurzelungsintensität bei den untersuchten Fallbeispielen feststellbar.

Salzgehalt (Tabelle 14)
Die Salzgehalte der untersuchten Proben liegen zwischen 0,01 g/100 g und 0,045 g/100 g (ausnahmsweise bei 0,08 g/100 g) und sind somit niedrig. In diesen Schwankungsbreiten ist bei den untersuchten Fallbeispielen kein Einfluss des Salzgehaltes auf die Durchwurzelungsintensität nachweisbar.

Interpretation
Ein Zusammenhang zwischen den im Labor analysierten bodenphysikalischen Kennwerten der Wegebaustoffe und der Durchwurzelungsintensität ist in den untersuchten Fallbeispielen nicht erkennbar. Die vom Verdichtungsgrad unabhängigen bodenphysikalischen Kennwerte Korngrößenverteilung, Gehalt an organischer Substanz, pH-Wert, Carbonat- und Salzgehalt weisen bis auf Ausnahmen geringe Schwankungsbreiten auf und lassen keine wachstumshemmenden Faktoren erkennen.

Aussagen zum Wasser- und Lufthaushalt können indirekt aus den Laboruntersuchungen, den Sichtproben und der festgestellten Durchwurzelungsintensität abgeleitet werden: Bei allen Proben handelt es sich um Sande mit unterschiedlich hohem Anteil an Schluff und Kies oder Grus (Schotter). Bei geringem Verdichtungsgrad ist ein hohes Gesamtporenvolumen und somit eine gute Wasserdurchlässigkeit und gute Durchlüftung bei geringer Wasserkapazität zu erwarten. Daraus resultiert eine gute Durchwurzelbarkeit. Bei hoher Verdichtung, wie sie im Straßenbau die Regel ist, gehen diese Eigenschaften verloren. Dies erklärt den Zusammenhang zwischen Schichtenfolge und festgestellter Durchwurzelungsintensität: Sie ist in den untersuchten Pflasterbettungen (Sand) mäßig bis hoch. Diese Schicht wird in der Regel durch das Abrütteln von Pflaster und Platten verdichtet. Der zu erwartende Verdichtungsgrad ist jedoch aufgrund der gleichförmigen engen Kornabstufung (Sand) gering. Daher ist von einem hohen Gesamtporenvolumen auszugehen, das einen geringen Eindringwiderstand und somit eine gute Durchwurzelbarkeit bedingt.

Die Tragschichtmaterialien hingegen weisen zum Teil eine weiter gestufte Kornzusammensetzung mit hohem Anteil an Kies/Grus und Steinen auf. Bei regelgerechtem Bauen werden sie hoch verdichtet, um ihrer tragenden Funktion für den Wegebau gerecht zu werden. Dies bedingt einen hohen Eindringwiderstand bei geringem Gesamtporenvolumen. Bei einigen Standorten mit Tragschichten aus Kiessand und Mineralgemisch kann deshalb keine Durchwurzelung festgestellt werden. Für die Wurzelentwicklung in den Tragschichten bei den übrigen Standorten gibt es folgende Hinweise:

Zum einen enthält der Stoff vermutlich durch seine spezifische Körnung auch nach dem Verdichten ein ausreichend großes Porenvolumen. Dies ist insbesondere bei den Tragschichten aus Schotter zu beobachten. Durch die gebrochene Kornform und die daraus resultierende Verzahnung des Materials bleiben trotz guter Tragfähigkeit Hohlräume, die durchwurzelt werden können (Fallbeispiel 4, Bodenprobe 3; Fallbeispiel 5, Bodenprobe 5). Mineralgemische mit sehr ungleichförmiger Kornform und hö-

herem Feinanteil dagegen besitzen nach Verdichtung nur noch ein geringes Porenvolumen und werden nicht durchwurzelt (Fallbeispiel 9, Bodenprobe 13).

Zum anderen wurde möglicherweise aus nicht mehr genau nachvollziehbaren Gründen ein relativ geringer Verdichtungsgrad erreicht. Dies kann bei nachträglich eingebauten Materialien und bei Randbereichen der Fall sein. Hier ist Fallbeispiel 7 zu nennen, wo im Übergang zwischen Verkehrsfläche und Baumscheibe ein von der sonstigen Fläche unterschiedliches Tragschichtmaterial vorzufinden ist (Bodenprobe 10). Dies lässt auf nachträgliche Tiefbauarbeiten schließen. Das Tragschichtmaterial in den Fallbeispielen 1 bis 3 (Hannover-Herrenhausen, Bodenproben A und C) wurde aufgrund der erwarteten geringen Verkehrsbelastung relativ schwach verdichtet. Mit ausreichendem Porenvolumen und niedrigen Eindringwiderstände kann es gut durchwurzelt werden.

Der Unterbau unter den Tragschichten wird mäßig bis gut durchwurzelt. Er besteht aus sandigen Füllböden ohne spezielle Kornabstufung. Es ist anzunehmen, dass diese Flächen geringer Verkehrsbelastung weniger stark verdichtet werden. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Eindringwiderstand hier geringer sein könnte als bei den Tragschichten.

Aus der Durchwurzelungsintensität in den verschiedenen Wegebauschichten lässt sich schließen, dass der über Lagerungsdichte und Porenvolumen definierte Eindringwiderstand ausschlaggebendes Merkmal für die Erschließung sein dürfte.

Abkürzungen in Tabelle 12:

Durchwurzelung

- = keine oder sehr geringe Durchwurzelungsintensität

o = mittlere Durchwurzelungsintensität

* = hohe Durchwurzelungsintensität

Ungleichförmigkeitskoeffizient

g = gleichförmig

ug = ungleichförmig

sug = sehr ungleichförmig

Tabelle 12: Korngrößenverteilung nach Wegebauschicht und Durchwurzelungsintensität

Schicht	Durch-wurzelung	Probe		Stoffart	Korngrößenanteile, Gew.-%									Ungleich-förmig-keitsko-effizient
					Ton / Schluff	Sand				Kies				
		Nr.	Ort		< 0,063 mm	Feinsand 0,063 – 0,2 mm	Mittelsand 0,2 – 0,63 mm	Grobsand 0,63 – 2,0 mm	Sand gesamt 0,063 – 2 mm	Feinkies 2,0 – 6,3 mm	Mittelkies 6,3 – 20 mm	Grobkies 20 – 60 mm	Kies gesamt 2 – 60 mm	$U = d_{60}/d_{10}$
Pflasterbettung	+	C	Hannover Acer sacch.	Sand	3,0	11,2	62,3	11,9	85,4	10,1	1,5	-	11,6	4,02 g
	+	2	Hannover Acer plat. (Pflaster)	Sand	3,5	31,0	56,8	6,0	93,8	1,5	0,9	-	2,4	4,13 g
	+	6	Wunstorf Platanus	Sand	2,3	17,9	75,6	3,1	96,6	0,9	0,2	-	1,1	3,23 g
	+	11	Köln Robinia II	Sand	1,1	7,0	56,8	27,3	91,1	7,5	0,3	-	7,8	2,75 g
	o	A	Hannover Quercus	Sand	3,8	13,0	64,9	9,6	87,5	4,4	4,3	-	8,7	3,91 g
	o	1	Hannover Acer plat. (Platten)	Sand	3,6	12,6	55,3	18,6	86,5	7,7	2,2	-	9,9	4,36 g
	o	4	Wunstorf Sophora	Sand	8,2	17,1	49,5	20,7	87,5	2,7	1,8	-	4,5	6,32 ug
Tragschicht	+	A	Hannover Quercus	Sand	3,8	13,0	64,9	9,6	87,5	4,4	4,3	-	8,7	3,91 g
	+	C	Hannover Acer sacch.	Sand	3,0	11,2	62,3	11,9	85,4	10,1	1,5	-	11,6	4,02 g
	+	3	Hannover Acer plat.	Schotter	5,9	8,0	14,9	13,6	36,5	19,0	34,7	3,9	57,6	49,56 sug
	+	5	Wunstorf Sophora	Schotter	3,9	3,4	8,1	5,8	17,3	9,9	37,1	31,8	78,8	58,57 sug
	o	10	Köln Robinia I	Kiessand	2,7	5,5	22,0	13,2	40,7	12,5	22,4	21,7	56,6	28,00 sug
	-	7	Wunstorf Platanus	Kiessand	7,3	4,0	10,0	6,0	20,0	11,9	34,9	24,9	71,7	88,28 sug
	-	9	Köln Robinia I	Kiessand	5,3	9,4	22,7	18,7	50,8	16,5	15,4	12,0	43,9	22,73 sug
	-	13	Köln Tilia	Mineral-gemisch	5,0	7,3	28,7	15,4	51,1	16,2	16,7	10,7	43,6	116,67 sug
Unterbau	+	12	Köln Tilia	sandiger Füllboden	8,7	9,1	21,1	31,1	61,3	18,8	6,3	4,9	30,0	21,59 sug
	o	B	Hannover Quercus	sandiger Füllboden	7,1	12,3	51,2	9,5	73,0	6,4	4,9	8,6	19,9	6,23 ug
	o	14	Köln Tilia	sandiger Füllboden	9,1	8,2	19,8	10,7	38,7	9,9	12,1	30,2	42,2	20,59 sug

Tabelle 13: Rohdichte, Volumenabnahme nach Verdichtung, Wasserhaltekapazität und Wasserdurchlässigkeit nach Wegebauschicht und Durchwurzelungsintensität

Schicht	Durch-wurzelung	Probe		Stoffart	Rohdichte					Volumen-abnahme nach Verdichtung, %	Wassergehalt WK max. Vol.-%	Wasser-durch-lässigkeit kf mod cm/s
					locker		verdichtet					
		Nr.	Ort		trocken g/cm³	ausgangs-feucht, g/cm³	trocken g/cm³	ausgangs-feucht, g/cm³	bei WK max. g/cm³			
Pflasterbettung	+	C	Hannover Acer sacch.	Sand	1,45	1,48	1,62	1,65	1,94	10,6	32,1	$8{,}1 \times 10^{-3}$
	+	2	Hannover Acer plat. (Pflaster)	Sand	1,08	1,14	1,55	1,62	1,91	30,0	35,8	$4{,}2 \times 10^{-3}$
	+	6	Wunstorf Platanus	Sand	1,32	1,34	1,52	1,56	1,91	13,2	38,2	$10{,}1 \times 10^{-3}$
	+	11	Köln Robinia II	Sand	1,54	1,60	1,69	1,71	2,02	14,0	27,3	$19{,}4 \times 10^{-3}$
	o	A	Hannover Quercus	Sand	1,25	1,29	1,49	1,54	1,84	16,3	35,1	$8{,}2 \times 10^{-3}$
	o	1	Hannover Acer plat. (Platten)	Sand	1,23	1,27	1,64	1,69	1,94	24,7	30,2	$6{,}4 \times 10^{-3}$
	o	4	Wunstorf Sophora	Sand	1,30	1,36	1,54	1,61	1,90	15,4	36,2	$1{,}7 \times 10^{-3}$
Tragschicht	+	A	Hannover Quercus	Sand	1,25	1,29	1,49	1,54	1,84	16,3	35,1	$8{,}2 \times 10^{-3}$
	+	C	Hannover Acer sacch.	Sand	1,45	1,48	1,62	1,65	1,94	10,6	32,1	$8{,}1 \times 10^{-3}$
	+	3	Hannover Acer plat.	Schotter	1,46	1,46	1,80	1,81	2,01	19,2	21,3	$10{,}8 \times 10^{-3}$
	+	5	Wunstorf Sophora	Schotter	1,46	1,48	1,69	1,71	1,84	13,6	14,8	$26{,}5 \times 10^{-3}$
	o	10	Köln Robinia I	Kiessand	1,79	1,80	2,01	2,03	2,20	11,0	19,0	$1{,}9 \times 10^{-3}$
	-	7	Wunstorf Platanus	Kiessand	1,44	1,47	1,74	1,78	1,95	17,2	21,1	$48{,}6 \times 10^{-3}$
	-	9	Köln Robinia I	Kiessand	1,35	1,43	1,66	1,70	1,98	18,8	31,2	$0{,}9 \times 10^{-3}$
	-	13	Köln Tilia	Mineralge-misch	1,56	1,59	1,83	1,87	2,09	14,0	27,3	$0{,}7 \times 10^{-3}$
Unterbau	+	12	Köln Tilia	sandiger Füllboden	1,20	1,25	1,48	1,53	1,85	18,4	38,0	$0{,}7 \times 10^{-3}$
	o	B	Hannover Quercus	sandiger Füllboden	1,22	1,26	1,49	1,54	1,83	18,1	34,2	$5{,}0 \times 10^{-3}$
	o	14	Köln Tilia	sandiger Füllboden	1,68	1,70	1,90	1,93	2,15	12,0	25,8	$0{,}3 \times 10^{-3}$

Tabelle 14: Gehalt an organischer Substanz, pH-Wert, Carbonatgehalt und Salzgehalt nach Wegebauschicht und Durchwurzelungsintensität

Schicht	Durch-wurzelung	Probe		Stoffart	Organische Sub-stanz Gew.-%	pH-Wert	Carbonatgehalt g/100g	Salzgehalt g/100g
		Nr.	Ort					
Pflasterbettung	+	C	Hannover Acer sacch.	Sand	0,6	7,6	2,460	0,030
	+	2	Hannover Acer plat. (Pflaster)	Sand	0,8	6,9	0,265	0,028
	+	6	Wunstorf Platanus	Sand	1,3	6,9	0,190	0,024
	+	11	Köln Robinia II	Sand	0,6	6,5	0,766	0,022
	o	A	Hannover Quercus	Sand	1,1	7,3	0,760	0,040
	o	1	Hannover Acer plat. (Platten)	Sand	0,6	7,3	0,267	0,025
	o	4	Wunstorf Sophora	Sand	0,7	7,2	2,231	0,045
Tragschicht	+	A	Hannover Quercus	Sand	1,1	7,3	0,760	0,040
	+	C	Hannover Acer sacch.	Sand	0,6	7,6	2,460	0,030
	+	3	Hannover Acer plat.	Schotter	0,3	7,1	55,638	0,026
	+	5	Wunstorf Sophora	Schotter	0,7	7,2	23,326	0,042
	o	10	Köln Robinia I	Kiessand	0,3	7,1	1,521	0,022
	-	7	Wunstorf Platanus	Kiessand	0,6	6,0	0,125	0,010
	-	9	Köln Robinia I	Kiessand	1,4	7,4	3,391	0,042
	-	13	Köln Tilia	Mineral-gemisch	0,5	7,2	1,608	0,045
Unterbau	+	12	Köln Tilia	sandiger Füllboden	1,9	7,2	1,849	0,080
	o	B	Hannover Quercus	sandiger Füllboden	1,2	7,4	0,800	0,040
	o	14	Köln Tilia	sandiger Füllboden	1,3	7,0	2,300	0,038

4.5 Diskussion der Ergebnisse

Entsprechend der in Abschnitt 4.1 dargelegten Zielsetzung der Freilegung von Wurzelbereichen werden im folgenden Abschnitt aus den Fallbeispielen abzuleitende generelle Erkenntnisse zu Ursachen und Entstehung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln zusammengefasst und diskutiert. Zunächst wird das Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen nach Durchwurzelungsintensität, Wurzeldicke, Wurzelform, Wuchsrichtung und Verzweigungsmuster anhand der Parameter Wuchsort beziehungsweise durchwurzelte Bereiche und Wuchstiefe charakterisiert (Abschnitte 4.5.1 bis 4.5.6). Hierzu zählen auch der Einfluss der örtlichen Bodenverhältnisse und der Einfluss der Bauweise von Verkehrsflächen, da diese Faktoren vom Wuchsort und der Wuchstiefe nicht zu trennen sind. Es folgt die Darstellung gattungsspezifrische Unterschiede, die aus den Aufgrabungen hervorgehen (Abschnitt 4.5.7). Die offenen Fragen aus Kapitel 3 „Erfassung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln“ werden in den jeweiligen Abschnitten erörtert. Grundsätzliche Erkenntnisse über das Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen werden im Fazit zusammengefasst (Abschnitt 4.5.8). Erkenntnisse über die Art und die Entstehung der durch die Baumwurzeln verursachten Schäden an Verkehrsflächen fließen in Kapitel 5 „Schadenstypisierung“ ein.

4.5.1 Allgemeine Bodeneigenschaften von Schüttstoffen

Die Aufgrabungen umfassen die Wegebauschichten Deckschicht, Pflasterbettung, Tragschicht und Unterbau. Von den Wegebaumaterialien und Böden wurden Proben entnommenen und im Labor im Hinblick auf ihre physikalischen Bodeneigenschaften analysiert. Die Unterschiede in Körnung, pH-Wert, Gehalt an organischer Substanz, Salz- und Kalkgehalt sind bei den untersuchten Fallbeispielen größtenteils gering und lassen keinen Zusammenhang mit der Durchwurzelungsintensität erkennen. Die vom Bodengefüge abhängigen Kennwerte zur Charakterisierung des Wasser- und Lufthaushaltes werden verworfen, da die Laborwerte der als gestörte Proben entnommenen Stoffe keine Aussage über die tatsächlichen örtlichen Verhältnisse zulassen. Eine Einschätzung lässt sich jedoch aus der Korngrößenverteilung ableiten: Sie weist alle Stoffe als sandige Schüttstoffe mit geringem bis mittleren Schluffgehalt und unterschiedlich hohem Anteil an Kies oder Schotter aus. Bei mäßiger Lagerungsdichte verfügen diese Stoffe in der Regel über eine gute Durchlüftung und einen geringen Eindringwiderstand. Werden sie jedoch maschinell verdichtet, wie dies im Straßenbau für tragende Schichten die Regel ist, dann können sie je nach Kornzusammensetzung so hohe Verdichtungsgrade erreichen, dass sie wegen fehlender Grobporen für Baumwurzeln kaum noch durchdringbar sind (siehe Abschnitt 2.3.2). Ausschlaggebende Kriterien für die Durchwurzelbarkeit von Wegebaustoffen sind demnach der Verdichtungsgrad in Verbindung mit der Kornzusammensetzung und der daraus resultierende Eindringwiderstand.

Der Nährstoffgehalt wurde nicht untersucht. Er ist jedoch gering anzusetzen, da es sich um Wegebaustoffe mit hohem Sand- oder Kies- beziehungsweise Schotteranteil mit zumeist geringem Gehalt an organischer Substanz und Schluff oder Ton handelt. Dennoch wurden zum Teil große Wurzelmassen frei gelegt, so dass auch dieses Kriterium für die Durchwurzelung nicht ausschlaggebend sein kann.

Die gemessenen Bodenkennwerte geben bei der vorliegenden Feldstudie insgesamt kaum Aufschluss über die Zusammenhänge zwischen Wurzelwachstum und Bodeneigenschaften. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch WAGAR und BARKER (1983) und KOPINGA (1992). Zwar sind die dort untersuchten Kennwerte nicht identisch mit denen dieser Untersuchung; grundsätzlich kommen jedoch auch diese Autoren zu dem Schluss, dass die Bodenart letztlich keinen Aufschluss über die Entstehung von Schäden gibt. WAGAR und BARKER berichten, dass Voruntersuchungen zufolge, bei denen Bodenproben in verschiedenen Tiefen sowie bei ausgeprägten Diskontinuitäten genommen wurden, detaillierte Bodenanalysen zur Bodentextur (Korngrößenverteilung) wenig zur Klärung der Fragestellung beitragen (WAGAR u. BARKER 1983, 177ff.). Auch aus den Untersuchungen von KOPINGA lässt sich in Bezug auf den im Bereich der Pflanzstreifen anstehenden Boden kein Zusammenhang zwischen der Bodenart, der Bodenfeuchte, dem Grundwasserstand und der Entstehung von Schäden ableiten (KOPINGA 1992, 10.7). Beobachtungen von KRIETER, wonach der Feinanteil in Böden und der Ungleichförmigkeitskoeffizient der Körnung die Durchwurzelungsdichte beeinflusst (KRIETER 1989, 20), können anhand der untersuchten Fallbeispiele nicht nachvollzogen werden.

Auch wenn die Bodeneigenschaften einen dominierenden Einfluss auf die Wurzelarchitektur ausüben, so lässt sich ein Zusammenhang zwischen den bodenphysikalischen Substrateigenschaften von Wegebaustoffen und deren Erschließung durch Baumwurzeln anhand weniger Fallbeispiele und gestörter Bodenproben nicht ableiten. Es zeigt sich, dass Wurzeln unterschiedliche Wegebaustoffe erschließen können und dem Baum somit das Überleben unter verschiedenartigen Bedingungen ermöglichen.

4.5.2 Wurzelwachstum in Deckschichten

Die untersuchten Deckschichten reichen bis in eine Tiefe von ca. 20 cm. Der eigentliche Belag, der selber nicht durchwurzelbar ist, aber möglicherweise einen Einfluss auf das Wurzelwachstum ausübt, ist von den potenziellen Wuchsorten zu unterscheiden. Es sind dies die Fugen von Pflaster- und Plattenbelägen, die Grenzzone unter dem Belag sowie die Pflasterbettung.

Belag

Der Belag, hier bestehend aus Pflaster- Platten- oder Asphaltbelägen, übt bei den untersuchten Fallbeispielen keinen visuell erkennbaren Einfluss auf die Durchwurzelungsintensität, auf Verzweigungsmuster und Wurzeldicken aus. Erkenntnissen von KOPINGA folgend ist allerdings insbesondere unter Asphaltbelägen aufgrund von Kondenswasserbildung und fehlender Evaporation von einem hohen Feuchtigkeitsgehalt auszugehen, was das Wurzelwachstum begünstigt (KOPINGA 1992, 10.12/13; siehe unten). Da ein Vergleich verschiedener Belagsarten in anderen wissenschaftlichen Untersuchungen nicht vorgenommen wurde, ist eine Diskussion mit anderen Ergebnissen nicht möglich.

Reaktionsholz in Form beulenartiger Wurzelverdickungen ist bei allen Belagsarten in unterschiedlichen Ausprägungen zu finden. Eine schadensverstärkende Wirkung ist anzunehmen. Tendenziell werden Verdickungen bei Pflasterbelägen (Fallbeispiele 1, 4, 5, 6, 8) stärker ausgebildet als bei Plattenbelägen (Fallbeispiele 1, 4), was durch höhere Punktlasten zu erklären sein dürfte. Sehr viele dicht aneinander gereihte Verdickungen mit Deformationen an der Oberfläche sind bei Wurzeln unter grob-

körnigem Bitukies zu beobachten (Fallbeispiel 7), wo jeder Stein eine Verletzung und eine Reaktion hervorruft. Der Ausbildung von Wurzelverdickungen liegt ein Zusammenspiel zwischen der Belagsart, der genetischen Veranlagung und der Höhe der Druckbelastung zugrunde. Anhand weniger Fallbeispiele ist jedoch keine Aussagen zu deren Anzahl und Ausprägung unter bestimmten Bedingungen möglich.

Fugen von Pflaster- und Plattenbelägen

Die vererdeten Fugen von Pflaster- und Plattenbelägen werden intensiv von Feinstwurzeln durchzogen, die häufig ein dichtes, fein verzweigtes Geflecht bilden (Fallbeispiele 1, 2, 3, 4, 6). Sie werden jedoch auch von größeren Wurzeln erschlossen (Fallbeispiele 3, 8), die dann häufig deformiert sind. Die Wurzelmasse in den Fugen ist nicht zuletzt durch den geringen Raum von untergeordneter Bedeutung. URBAN (1992, 1999) hingegen stellte bei Aufgrabungen unter Pflasterbelägen fest, dass die zum Teil aufgeweiteten Fugen nicht von den unter dem Belag wachsenden Wurzeln erschlossen wurden. Möglicherweise sind die Anreicherung mit organischer Substanz und die Feuchtigkeit entscheidende Faktoren. Die Flächen, bei denen eine Fugendurchwurzelung beobachtet werden konnte, waren nur wenig frequentiert und lagen relativ schattig.

Grenzzone unter dem Belag

Zwischen Deckschicht und Pflasterbettung oder Tragschicht kann eine Grenzzone definiert werden, in der Wurzeln verschiedener Größen unmittelbar unter dem Belag wachsen (Fallbeispiele 1 bis 7): Der Bitukies in Fallbeispiel 7 beispielsweise wird nicht direkt durch Wurzeln erschlossen, denn diese wachsen hauptsächlich auf der darunter liegenden Tragschicht. Möglicherweise kommt es erst nach einer Lockerung des Gefüges durch das Dickenwachstum der in der Grenzschicht wachsenden Wurzel zum Einwurzeln in den Bitukies. Der genaue Schadensverlauf ist allerdings im nachhinein kaum feststellbar. Unter Belägen entsteht durch eine fehlende oder geringe Verzahnung zwischen Pflaster oder Platten und Pflasterbettung beziehungsweise zwischen Asphaltbelag und Tragschicht oder durch unterschiedliche Ausdehnung bei Temperaturschwankungen wahrscheinlich eine Zone mit geringem Eindringwiderstand, ähnlich einer Fuge oder einer Spalte. Diese Situation ist auch dann gegeben, wenn dickere Wurzeln oder beulenartige Verdickungen an Wurzeln den Belag anheben und Zwischenräume entstehen (Fallbeispiele 2, 3, 7) oder wenn sich unter dem Belag festere Schichten wie zum Beispiel eine gebundene Pflasterbettung oder stark verdichtete Tragschichten befinden (Fallbeispiele 5, 7). Die Durchwurzelungsintensität in der Grenzzone ist mit der innerhalb der Pflasterbettung zu vergleichen, wobei eine exakte Abgrenzung nicht möglich ist. Feinstwurzeln fehlen hier bisweilen, und bei fester Auflage werden ausgeprägte knollenartige Verdickungen ausgebildet (Fallbeispiele 5, 7). Die Verzweigungsmuster sind in Abhängigkeit von Gattung und Wurzeldurchmesser relativ geradlinig und schwach verzweigt.

Das Vorhandensein einer Grenzzone unmittelbar unter der Deckschicht wird von anderen Autoren beschrieben (vgl. HAMILTON 1984b, KOPINGA 1992). Messungen unter Asphaltbelägen von KOPINGA ergaben, dass, ausgehend von einer Obergrenze für die Wurzelpenetration von 3,0 MPa, der Eindringwiderstand in Sandtragschichten zu hoch ist, als dass Wurzeln hier hineinwachsen könnten. Un-

mittelbar unter der Deckschicht hingegen ist der Eindringwiderstand gering. Daraus schließt KOPINGA, dass „die Wurzeln sich ausschließlich unter den Belägen entwickeln können (...), weil sich dort eine Grenzfläche unterschiedlicher Werkstoffe mit zwei unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten befinden, wodurch dauernd oder aber zeitweise Raum für den Wurzeldurchwuchs entsteht oder anwesend ist“ (KOPINGA 1992, 10.9/11). Wurzelwachstum fast ausschließlich in der Grenzschicht zwischen Deckschicht und Tragschicht wurde in Fallbeispiel 7 beobachtet, bei dem es sich ebenfalls um eine asphaltierte Fläche handelt. Bei anderen Fallbeispielen erfolgte das Einwurzeln auch in die Pflasterbettung oder gegebenenfalls in die Tragschicht oder den Unterbau. Auch NICOLL und ARMSTRONG verzeichnen bei der Aufgrabung von Baumwurzeln in einem asphaltierten Gehweg sowohl Wurzeln unmittelbar unter der Deckschicht, als auch in 40 cm Tiefe (was in diesem Falle dem Unterbau unter der Tragschicht entspricht; NICOLL u. ARMSTRONG 1998). Das Vorhandensein einer Grenzschicht geringen Eindringwiderstandes zwischen zwei Schichten größeren Eindringwiderstandes ist also offenbar nur eines von mehreren Modellen für das Wurzelwachstum unter Verkehrsflächen.

KOPINGA hat außerdem die Feuchtigkeit unter Asphaltbelägen als Saugspannung gemessen. Demnach ist die Feuchtigkeit in verschiedenen Tiefen unter dem Asphalt, auch unmittelbar darunter, stets höher als in derselben Tiefe im Boden am Straßenrand, wo zudem größere Schwankungen auftreten (KOPINGA 1992, 10.11/12). Auch andere Autoren berichten von günstigen Bedingungen für Wurzelwachstum unmittelbar unter der Deckschicht, unter anderem durch Kondenswasser (WAGAR u. FRANKLIN 1994, zitiert in: NICOLL u. ARMSTRONG 1998, 261). Diese Erkenntnisse decken sich mit Beobachtungen, dass die Stoffe unter den verschiedenen Wegebelägen bei den aufgegrabenen Fallbeispielen in der Regel relativ feucht sind. In der Saugspannungsdifferenz zwischen dem Boden unter dem Asphalt und dem unter dem Straßenrand vermutet KOPINGA einen weiteren wachstumsfördernden Faktor, indem Wurzeln einem Gradienten nachwachsen (KOPINGA 1992, 10.12/13; KOPINGA mündlich, 2001). Ergänzenden Untersuchungen zufolge erreichte die Feuchtigkeit unter Asphalt maximal Feldkapazität, so dass kein Massenfluss zu erwarten ist, der Boden bei Wasserentzug relativ schnell austrocknet und die zu erwartende Wasserzufuhr zu gering sein dürfte, um den Wasserbedarf des Baumes zu decken (KOPINGA 1992, 10.13). Dies spricht dafür, dass die Wurzeln „nach vorne“ wachsen, um so die nur langsam kapillar nachfließende Feuchtigkeit zu erschließen. Die Frage nach der Bodenfeuchte und ihrer Auswirkung auf das Wurzelwachstum scheint letztlich noch nicht geklärt. De facto konnte in den Fallbeispielen starkes Wurzelwachstum unter verschiedenen Belägen in verschiedenen Schichttiefen und Stoffen beobachtet werden, was auf eine ausreichende Wasserversorgung schließen lässt. Insbesondere unter Asphaltbelägen ist aufgrund von Kondenswasserbildung bei fehlender Evaporation von einem hohen Feuchtigkeitsgehalt auszugehen.

Die Bodentemperaturen unter Asphaltbelägen sind im Vergleich zum Straßenrand leicht erhöht, jedoch nicht so hoch, als dass Wurzelwachstum gehemmt würde (HALVERSON u. HEISLER 1981; KOPINGA 1992, 10.12/13). Ob möglicherweise ein positiver Einfluss auf das Wurzelwachstum unter Wegedecken besteht, wurde nicht geklärt. Es ist jedoch anzunehmen, dass eine Steigerung der Wachstumsraten durch erhöhte Bodentemperaturen durch die begrenzte Verfügbarkeit von Wasser limitiert wird.

Pflasterbettung

Pflasterbettungen aus lockerem Sand unter Pflaster- und Plattenbelägen werden sehr intensiv von Wurzeln aller Größen durchwurzelt (Feinst- bis Starkwurzeln; Fallbeispiele 1, 2, 3, 4, 6, 8). Zumeist finden sich hier, begrenzt auf den Bereich unter den Fugen, Anreicherungen organischer Substanz, was ein zusätzlicher Anreiz für das Wurzelwachstum sein dürfte. Mit Kalk oder Zement gebundene Pflasterbettungen werden durch Spalten und Risse erschlossen (Fallbeispiel 3). Allerdings bildet sich hier im Laufe der Zeit, wahrscheinlich durch Temperatureinflüsse, eine lockere Sandschicht unter dem Belag (Fallbeispiel 5) oder die gebundene Schicht zerfällt größtenteils zu Sand (Fallbeispiel 3) und wird wie eine lockere Sandschicht durchwurzelt. Als Verzweigungsmuster sind in der Regel relativ geradlinig wachsende aber stark verzweigte Wurzeln zu beobachten (Fallbeispiele 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8). Beulen- oder knollenartige Verdickungen treten häufig an Wurzeln auf, die mindestens Schwachwurzel-Durchmesser aufweisen (2 bis 5 mm) und bis unter den Belag reichen (Fallbeispiele 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8). Es gibt Vermutungen, dass der nährstoffarme Sand in den Schichten des Wegeoberbaus als Substrat die Entstehung eines relativ gering verzweigten, aber weitreichenden Wurzelsystems und große Wurzeldicken hervorbringt und somit der Entstehung von Schäden Vorschub leistet (HAMILTON 1984a, 42; siehe Abschnitt 2.2). Für die Praxis ist diese Beobachtung jedoch letztlich irrelevant, da eine Veränderung dieser Bedingungen mit regelgerechtem Wegebau unvereinbar sein dürfte.

4.5.3 Wurzelwachstum in Tragschichten

Bei den untersuchten Tragschichten (10 bis 35 cm, stellenweise bis 70 cm Tiefe) zeigen sich große Unterschiede hinsichtlich der Durchwurzelung. Diese sind vermutlich auf den Verdichtungsgrad und dem davon abhängigen Eindringwiderstand für Wurzeln zurückzuführen. Um eine ausreichende Tragfähigkeit zu erlangen, werden Tragschichten bei regelgerechter Bauweise stark verdichtet. Wurzeln können nur dort wachsen, wo ausreichendes Porenvolumen das Eindringen der Wurzelspitzen in das Substrat erlaubt. Nach Messungen von KOPINGA sind die Eindringwiderstände in Sandtragschichten unter Asphaltbelägen für Wurzeln zu hoch (KOPINGA 1992, 10.11). Ein geringerer Eindringwiderstand ist bei den untersuchten Fallbeispielen vermutlich dort gegeben, wo aus bautechnischen Gründen eine geringere Verdichtung erreicht wird, wie in Randbereichen (Fallbeispiele 6, 7) oder bei ungünstiger Kornzusammensetzung (Fallbeispiele 1, 2, 3), oder wo körnungsbedingt auch nach der Verdichtung viele Hohlräume verbleiben, wie bei Schotter (Fallbeispiel 4, 5). Der Sauerstoffgehalt der Bodenluft dürfte nach Untersuchungen von KOPINGA als Einflussfaktor auszuschließen sein. Seine Messungen unter Asphaltbelägen und im Boden am Straßenrand ergaben, dass der Sauerstoffgehalt der Bodenluft bis in eine Tiefe von 80 cm zwischen 15 und 19 % schwankt, und somit deutlich über dem Limit von 10 % liegt (KOPINGA 1992, 10.13). KOPINGA führt diese für Wurzelwachstum günstigen Werte auf die Zufuhr von der Seite und den geringen Luftdiffusionswiderstand für „Straßensand“ von 0,001 bis 0,005 cm²/sec zurück (KOPINGA u. BAKKER 1992, zitiert in: KOPINGA 1992, 10.14). Während die durch den Sauerstoff in der Bodenluft zu überwindende Strecke vom offenen Seitenbereich bis zur Mitte unter dem asphaltierten Bereich in den Untersuchungen von KOPINGA maximal 2 m beträgt, befinden sich die in den Aufgrabungen untersuchten Bäume häufig mitten in Verkehrsflächen, wo der einzige nicht befestigte Boden in dieser Reichweite mit einer Ausnahme die Baumscheibe ist. Das bedeutet, dass eine ausreichende Sauerstoffzufuhr aus der Bodenluft oder durch einsickerndes Was-

ser mit darin enthaltenem Sauerstoff über die Baumscheibe, aus entfernter liegenden offenen Bereichen wie Gärten und Pflanzbeeten oder über die Fugen erfolgt.

Bei einem Fallbeispiel wächst die Masse der Wurzeln in der Grenzzone zwischen Schotter und anstehendem Boden (Fallbeispiel 4). Möglicherweise ist der Unterbau im Vergleich zum Schotter weniger hohlraumreich und hat die Wurzeln durch mechanischen Widerstand zum horizontalen Wachstum auf dieser festeren Schicht veranlasst. Diese Beobachtung deckt sich mit denen von LÖSKEN, HEIDGER und LIESECKE: Bei Langzeitversuchen mit schottergefüllten Gräben als Maßnahme, um Wurzeln unter Verkehrsflächen zu leiten, wurzelten die Bäume nach siebenjähriger Standzeit bevorzugt an den Randzonen zwischen dem hohlraumreichen Schotter und der festen Grabenwandung (LÖSKEN, HEIDGER und LIESECKE 2001). Ähnliche Beobachtungen machte auch KRIETER (1989, 1996).

In den Tragschichten treten vermehrt dickere Wurzeln beziehungsweise Verankerungswurzeln mit großem Durchmesser auf. Feinere Wurzeln werden häufig in geringerem Umfang vorgefunden, als es in der Pflasterbettung der Fall ist (Fallbeispiele 1, 2, 7). Hier ist auch die Verzweigung schwächer. Die Wurzelform ist bei Sand und Kiessand relativ glatt und im Querschnitt annähernd kreisförmig (Fallbeispiele 1, 2, 3, 4, 7). Verdickungen treten nicht auf, was auf eine geringere Druckbelastung schließen lässt. Richtungswechsel erfolgen häufig auch in der Vertikalen, was bedeutet, dass die Wurzeln auch von unten nach oben wachsen (Fallbeispiele 1, 2, 5, 7). Wurzelwachstum von unten nach oben wird auch von anderen Autoren berichtet und ist grundsätzlich als ein natürliches Wuchsverhalten von Baumwurzeln zu betrachten (ARMSTRONG u. NICOLL 1998, 260; KRIETER 1989, 1996; URBAN 1999; siehe Abschnitt 2.2). NICOLL und COUTTS begründen dieses Verhalten damit, dass Baumwurzeln durch aufwärts gerichtetes Wachstum in höhere Bodenschichten gelangen und dort nicht näher beschriebene Bedingungen vorfinden, die sie veranlassen, wieder hinunter zu wachsen. Dieses Verhalten soll oberflächennahes Wurzelwachstum auch bei geneigter oder unebener Oberfläche ermöglichen und dazu führen, dass Wurzeln unter Verkehrsflächen häufig aufwärts wachsen, bis sie an die festen Schichten des Wegebelages stoßen (NICOLL u. COUTTS 1997, zitiert in: ARMSTRONG u. NICOLL 1998, 260). Bei Wachstum in Schotter (Fallbeispiel 5) sind Zickzackwuchs und zahlreiche Deformationen zu beobachten, wobei die radiale Grundrichtung beibehalten wird. Auch dies ist ein natürliches Wuchsverhalten, dass bei Waldbäumen zu beobachten ist (siehe KÖSTLER et al. 1968, 78f.)

4.5.4 Wurzelwachstum im Unterbau

Als Unterbau werden in den untersuchten Fallbeispielen sandige Füllböden in einer Tiefe zwischen 30 und 60 cm freigelegt. Sie sind wahrscheinlich nur mäßig stark verdichtet worden, da es sich um Flächen mit geringer Verkehrsbelastung handelt, und werden insbesondere von Wurzeln größeren Durchmessers durchwurzelt (Fallbeispiele 1, 2, 9). Die Durchwurzelungsintensität ist mäßig bis hoch bei geringem Anteil an Fein- und Feinstwurzeln und extensiver Verzweigung. Deformationen und Verdickungen treten nicht auf, so dass von einer geringen Druckbelastung auszugehen ist.

4.5.5 Wurzelwachstum in Bauschutt und organischer Substanz

Wegebaustoffe enthalten oftmals Beimengungen von Bauschutt wie Ziegel, Betonbrocken, Schlackesteine oder organische Substanz wie Holzteile. Sie werden als Nährstoffquellen genutzt, was an der Ausbildung von Feinstwurzelgeflechten zu erkennen ist (Fallbeispiele 1, 2, 3, 6). Insbesondere Ziegel sowie Holzteile werden intensiv erschlossen, und zwar auch, wenn sie in tieferen Schichten wie im Unterbau vorkommen. Zu den Quellen organischer Substanz zählen auch abgestorbene Wurzeln. Auch an der Unterseite einer Bitukiesschicht können Feinstwurzeln beobachtet werden (Fallbeispiel 8). Containerversuche von KOPINGA haben ergeben, dass von Asphalt als chemischer Substanz jedoch keine wachstumsfördernde Wirkung ausgeht (KOPINGA 1992, 10.14). Dies bestätigt die Beobachtungen anderer Untersuchungen, wonach Bauschutt intensiv von Feinwurzelnetzen überzogen und so als Nährstoffquelle genutzt wird (URBAN 1992; LÖSKEN, HEIDGER u. LIESECKE 2001). Bauschutteinschlüsse können auch als mechanischer Widerstand die Wuchsrichtung von Wurzeln auf kleinem Raum beeinflussen (Fallbeispiele 2 und 3).

4.5.6 Wurzelwachstum an starren Baukörpern

Starre Baukörper wie Bord- und Kantensteine, Rinnen, Fundamente und Schächte sowie deren Fugen beeinflussen die Wuchsrichtung der Baumwurzeln in den untersuchten Fallbeispielen in vielerlei Hinsicht: Als mechanischer Widerstand leiten sie Wurzeln in horizontaler oder vertikaler Richtung. (Fallbeispiele 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8). Hierbei wirken vermutlich mehrere Faktoren begünstigend: Der Boden, der unmittelbar an starre Baukörper anschließt, ist möglicherweise aus bautechnischen Gründen etwas weniger stark verdichtet als in der Fläche und verfügt deshalb über einen geringeren Eindringwiderstand und eine bessere Luftführung. Durch unterschiedliche Wärmeausdehnung und durch Frosthebung könnte außerdem auch hier, zumindest in den oberen Schichten, eine spaltenähnliche Grenzfläche mit geringem Eindringwiderstand entstehen. Oftmals wachsen Wurzeln in Längsrichtung unter dem Baukörper entlang (Fallbeispiele 3, 4). Außer den bereits erwähnten Faktoren könnten hier zusätzlich geringere Druckbelastungen als unter der Fläche eine Rolle spielen. Ein Einfluss von Kondensationswasser auf der Unterseite von Baukörpern ist unwahrscheinlich, da die aufwärts gerichtete Bewegung von dampfförmigem Bodenwasser in größeren Schichttiefen durch relativ gleichmäßige Temperaturen gering einzuschätzen ist. Der Einfluss starrer Baukörper auf die Wuchsrichtung ist offenbar nur bei unmittelbarem oder mittelbarem Kontakt gegeben. Besteht dieser nicht mehr, zum Beispiel nachdem eine Wurzel eine Randeinfassung unterwachsen hat, so verläuft das Wachstum in unterschiedlichen Richtungen bei radialer Grundtendenz (Fallbeispiele 1, 2, 7). Die unter freigelegten Baukörpern wachsenden Wurzeln besitzen zumeist Starkwurzeldurchmesser. An den Kontaktstellen entstehen mit zunehmendem Dickenwachstum abgeplattete Deformationen. Auch KRIETER (1989, 1996) und URBAN (1999) berichten, dass Wurzeln bevorzugt an und unter Bordsteinen, Rinnen und Kabelschächten wachsen.

Wenn Wurzelspitzen zufällig auf Fugen und Spalten in Baukörpern treffen, werden diese durchwachsen (Fallbeispiele 4, 7, 8). Eine Ausnahme stellen in dieser Untersuchung die Wurzeln von Eiche dar (*Quercus robur*, Fallbeispiele 1 und 2), welche die Randeinfassung fast ausschließlich unterwachsen. Die Wurzeln in den Fugen sind durch die räumliche Enge deformiert und oftmals mehrfach so hoch

wie breit. Vor und eventuell auch hinter den Engpässen können sie erheblich verdickt sein, was auf einen Assimilatstau zurückzuführen ist. Die Deformationen stellen ein natürliches Anpassungsverhalten an die vorgefundene Umgebung dar, wie es auch in der Literatur beschrieben ist (KÖSTLER et al. 1968, 79; siehe Abschnitt 2.2.4). Unklar ist, inwiefern die Wurzeln in der Lage sind, die Fugen aufzuweiten. Nach Durchwachsen der Fugen wachsen sie ungerichtet weiter (Fallbeispiel 7) oder folgen dem Fugenverlauf in Pflasterbelägen (Fallbeispiel 8). Trotz dieser Engpässe lassen die dahinter ausgebildeten weitflächigen und kräftigen Wurzelpartien keine Wuchsdepression erkennen. Die Entwicklung verläuft vielmehr so, wie sie ohne Engpass zu vermuten wäre (Fallbeispiele 7 und 8). Spalten und Risse zwischen Stein und Betonbettung, wie sie durch die Anhebung von Fundamenten oder die Lageveränderung der Kanten- und Bordsteine entstehen, werden wie Fugen erschlossen (Fallbeispiele 4, 8). Ähnliches Wuchsverhalten beschreibt URBAN (1992).

Die Ergebnisse der Erfassung von Baumstandorten in Verkehrsflächen (Kapitel 3) lassen eine Barrierewirkung und Lenkungsfunktion von Randeinfassungen erkennen. Dies bestätigt sich bei sämtlichen Standorten, an denen eine Randeinfassung vorliegt (Fallbeispiele 1, 2, 7, 8). Allerdings zeigt sich, dass die bei der Kartierung festgestellte geringere Schadensquote für Baumstandorte mit Randeinfassung vorwiegend auf eine zeitliche Verzögerung zurückzuführen ist. Die Barrieren werden zum einen unterquert, wobei die Wurzeln danach häufig wieder nach oben wachsen. Zum anderen wachsen die Wurzeln durch die Fugen hindurch. Die Bedeutung der Bauhöhe, der Bautiefe, des Gewichtes sowie der Fugenzahl und -anordnung wird in Kapitel 5 „Schadenstypisierung“ erörtert.

Schäden an Randeinfassungen sind als Ergebnis der Kartierung an Standorten mit geringem Schaden an Wegedecken etwas schwächer als an Standorten ohne einen solchen Schaden. Diese Beobachtung kann anhand der Fallbeispiele nicht überprüft werden, da an sämtlichen Standorten Schäden an der Wegedecke vorliegen.

4.5.7 Gattungsspezifische Unterschiede

Die untersuchten Fallbeispiele lassen Unterschiede im gattungsspezifischen Wurzelverhalten erkennen, die aufgrund der geringen Anzahl Fallbeispiele jedoch nicht generalisiert werden können. Sie werden außerdem durch die örtlichen Bodeneigenschaften überlagert. Die folgenden Aussagen sind Einzelfallbeobachtungen und sollen als Hinweise für weiterführende Untersuchungen gewertet werden.

Die Durchwurzelung der Pflasterbettung erfolgt bei Ahorn (*Acer saccharinum* und *A. platanoides*) sehr intensiv mit Fein- und Schwachwurzeln (Fallbeispiele 3 und 4), bei Eiche (*Quercus robur*) extensiv mit Wurzeln verschiedenen Durchmessers (Fallbeispiele 1 und 2) und bei Robinie (*Robinia pseudoacacia*) sehr intensiv mit Wurzeln größeren Durchmessers (ab Schwachwurzel-Durchmesser, 2 bis 5 mm, Fallbeispiel 7 und 8). Beim Schnurbaum (*Sophora japonica*) fallen eigentümliche Richtungswechsel und sparrige Verzweigungen sowie rhizomähnliche Wurzelspitzen ins Auge (Fallbeispiel 5). Robinie zeichnet sich durch ausgeprägte knollenartige Verdickungen an Druckpunkten aus (Fallbeispiele 7 und 8). Eiche (*Quercus robur*) erschließt kaum die Fugen zwischen Kantensteinen, unterwächst diese

jedoch und hebt sie an (Fallbeispiel 1 und 2). Robinie hingegen erschließt die Fugen auf ganzer Breite und zeigt in der Morphologie großes Anpassungsvermögen an die beengten Platzverhältnisse (Fallbeispiele 7 und 8).

Die Erfassung von Baumstandorten in Verkehrsflächen (Kapitel 3) ergab gattungsspezifische Unterschiede, die durch Inaugenscheinnahme nicht zu erklären sind und an dieser Stelle diskutiert werden sollen. Die Schäden, die Platane (*Platanus x acerifolia*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) an Randeinfassungen verursachen, sind relativ schwächer als an Wegedecken. Hingegen sind die Schäden, die Eiche (*Quercus robur*) an Randeinfassungen verursacht, relativ stärker als an Wegedecken. Zur Platane kann keine Aussage getroffen werden, da das einzige untersuchte Exemplar nur zu einer Seite eine Randeinfassung aufweist. Diese ist allerdings nicht beschädigt (Fallbeispiel 6). Die beiden Robinien erschließen intensiv die Fugen der Randeinfassung und wachsen unter dieser her. Sie verursachen hier jedoch keine gravierenden Schäden, wohl aber am anschließenden Wegebelag (Fallbeispiele 7 und 8). Die beiden untersuchten Eichen verursachen vergleichsweise große Schäden an der Randeinfassung, indem sie diese unterwachsen und mitsamt Rückenstütze anheben. Die Schäden am Wegebelag sind vergleichsweise gering, da nur ein extensives Wurzelsystem ausgebildet wird (Fallbeispiele 1 und 2). Im Widerspruch dazu kommen WONG, GOOD und DENNE in einer statistischen Untersuchung zu der Feststellung, dass Eiche vergleichsweise geringe Schäden an Bordsteinen verursacht (WONG, GOOD u. DENNE 1984, 29). Anhand dieser Einzelfälle lassen sich keine generalisierenden Aussagen treffen, zumal ein Vergleich verschiedener Standorte nicht möglich ist. Die bei den Aufgrabungen gemachten Beobachtungen bestätigen insofern die Ergebnisse der Kartierung (Kapitel 3), als dass sie weitere Hinweise auf gattungsspezifische Unterschiede im Wurzelwachstum unter Verkehrsflächen liefern. Diese bleiben jedoch vage, widersprechen anderen Untersuchungen und bieten insofern keine Ansätze zur Lösung der Schadensproblematik.

4.5.8 Fazit

Die Standortbedingungen von Straßenbäumen sind heterogen. Sie variieren sowohl innerhalb einer Straße als auch innerhalb eines Baumstandortes. So unterschiedlich die Standorte, so vielfältig sind die Ausprägungen in der Wurzelarchitektur. Baumwurzeln unterliegen am Straßenstandort hinsichtlich der Bodeneigenschaften vielerlei Restriktionen. Sie sind jedoch in der Lage, jede sich bietende Gelegenheit auszunutzen, um das Überleben der Pflanze zu ermöglichen. Diese Gelegenheiten werden offenbar insbesondere durch ein für Wurzelwachstum ausreichendes Porenvolumen und durch geringe Eindringwiderstände in den Schichtaufbau von Wegen definiert. Grobkörnige Wegebaustoffe, die auch bei Verdichtung noch ein relativ großes Porenvolumen aufweisen, können auch unter Wegebelägen hinreichend gute Lebensbedingungen bieten. Wurzeln wachsen nicht nur in den verschiedenen Wegebauschichten, sondern auch dazwischen. Insbesondere unmittelbar unter dem Belag sowie an massiven Bauteilen sind vermehrt Wurzeln zu beobachten. Da sich hier keine Verzahnung verschiedener Materialien erreichen lässt, entstehen durch unterschiedliches Setzungsverhalten, unterschiedliche Wärmeausdehnung und Frosteinwirkung feine Spalten, also Bereiche mit geringerem Eindringwiderstand. Bereiche geringerer Verdichtung wie in Randbereichen zu Randeinfassungen und anderen Baukörpern, Fugen in Baukörpern und Wegebelägen oder schwach verdichtetes Bettungsmaterial

an Ver- und Entsorgungseinrichtungen dienen als Nischen oder Kanäle für Wurzeln. Mechanische Widerstände wie Bodenverdichtung und massive Baukörper im Boden üben demnach einen entscheidenden Einfluss auf die Wurzelverteilung in der Tiefe wie in der Breite aus.

Die Fallbeispiele lassen erkennen, dass das Wachstum von Wurzeln unter Verkehrsflächen denselben Gesetzmäßigkeiten unterliegt wie das am Naturstandort. Wurzelsysteme entwickeln sich im individuellen Zusammenspiel von genetischer Anlage (sowohl Baumart als auch Individuum), Standortbedingungen und Baumalter.

Wurzeln wachsen überall dort, wo die Bodenverhältnisse hinreichend günstig sind, was auch als „opportunistisches“ Wachstum bezeichnet wird. Bei den untersuchten Fallbeispielen werden mit Ausnahme der Tragschichten dreier Standorte (Bodenproben 7, 9 und 13) sämtliche Wegebauschichten unabhängig von Tiefe, Baustoff beziehungsweise Boden und Entfernung vom Stamm durchwurzelt. Die Hauptwuchsrichtung verläuft bei allen Fallbeispielen in der Tendenz ähnlich. Der Prozess des Wurzelwachstums verläuft bei radial-horizontaler Grundrichtung weitgehend ungerichtet. Vor diesem Hintergrund ist es unwahrscheinlich, dass Wurzeln bestimmte Bedingungen in entfernten Bodenbereichen „suchen“ oder zu diesen aktiv hin wachsen können. Dies würde ein zielgerichtetes Wachstum und ein wie auch immer geartetes „Wissen“ um günstigere Bedingungen an entfernten Orten voraussetzen. Bei allen Fallbeispielen treten in Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten jedoch zahlreiche Abweichungen auf. Diese ermöglichen dem Baum die Erschließung des vorgefundenen Bodens und treten in Forstbeständen ebenso wie am Straßenstandort auf (siehe Abschnitte 2.2 und 2.3). Bei einer radial-horizontalen Grundrichtung folgen die einzelnen Wurzeln kleinräumigen Reizen und werden von mechanischen Widerständen wie starren Baukörpern geleitet. Das skizzierte Wuchsverhalten lässt sich an allen Fallbeispielen nachvollziehen. Unterschiede zwischen den einzelnen Fallbeispielen sind hingegen in der Durchwurzelungsintensität, der Wurzeldicke, der Wurzelform und dem Verzweigungsbild zu verzeichnen.

In der deutschen Fachliteratur findet sich die Unterscheidung zwischen Tief- und Flachwurzlern und die Zuordnung zu den Wurzelsystemtypen Herz-, Pfahl- und Senkerwurzelsystem. Beides wird in der Berufspraxis von Landschaftsarchitekten herangezogen, um das Wurzelverhalten von Bäumen auch im Hinblick auf ihr Schadpotenzial für Wegebeläge zu charakterisieren. Diese Unterteilung trifft schon am Naturstandort nur bei ungehemmten Wachstumsbedingungen zu. Am Straßenstandort scheint sie gänzlich unzweckmäßig zu sein. Vielmehr wächst ein Großteil der Baumwurzeln generell bevorzugt in den oberen Bodenschichten und bildet dort ein Wurzelsystem aus, das weit über die Kronentraufe hinausreicht. Die Masse der Wurzeln wird zu einem großen Teil aus Feinwurzeln gebildet und zu einem anderen Teil aus Skelettwurzeln gebildet, die große Dicken erreichen. Dieses Wurzelvolumen muss Raum finden beziehungsweise sich Raum schaffen, übt dabei Kräfte auf die Umgebung aus und kann Verkehrsflächen anheben. Ein besonders „aggressives“ Wurzelverhalten kann in den Fallbeispielen nicht nachvollzogen werden.

In allen Wegebauschichten und Schichttiefen wurden grundsätzlich sämtliche Wurzeldicken von Feinstwurzeln bis zu Starkwurzeln mit über 10 cm Durchmesser vorgefunden. In der Tendenz wachsen die meisten Feinst- und Feinwurzeln jedoch in den oberen Schichten, während stärkere Wurzeln eher in tieferen Schichten anzutreffen sind. Die maximale Tiefe der Aufgrabungen betrug 70 cm, so dass über die Durchwurzelung der darunter liegenden Schichten sowie über den Anteil der freigelegten Wurzelpartien am Gesamtwurzelvolumen keine Aussage gemacht werden kann.

Eine häufig geäußerte Annahme ist die, dass Bäume am Straßenstandort durch Bodenverdichtung zur Flachwurzeligkeit gezwungen würden und dies ein Grund für die Entstehung von Schäden am Wegebelag sei. Dem ist entgegen zu halten, dass die Hauptmasse der Wurzeln auch bei Bäumen am Naturstandort beziehungsweise im Forst oder Park in den oberen Bodenschichten vorzufinden ist (siehe Abschnitt 2.2). Auch bei ungestörten Bodenverhältnissen bildet sich das Wurzelsystem mit gattungsspezifischen Unterschieden als Reaktion auf die örtlichen Bodenverhältnisse aus. Dabei sind sehr tiefreichende Wurzelsysteme eher die Ausnahme und entstehen nur, wenn die Standortbedingungen dies erfordern und ermöglichen. Bei der Erörterung von Lösungsmöglichkeiten für die untersuchte Problematik muss der natürlichen Veranlagung von Bäumen zur Ausbildung oberflächennaher Wurzeln Rechnung getragen werden. Dabei ist außerdem zu berücksichtigen, dass Baumwurzeln am Straßenstandort in der Regel ein eingeschränktes durchwurzelbares Bodenvolumen vorfinden.

Die Reichweite von Wurzeln unter Verkehrsflächen wurde nicht explizit untersucht, da die Freilegungen gemäß der Fragestellung nur in schadhaften Teilbereichen erfolgten. Die freigelegten Partien befanden sich teilweise außerhalb der Kronentraufe und brachten unter anderem Wurzeln mit Starkwurzeldurchmesser hervor (Fallbeispiele 3, 6, 8). Auch am Straßenstandort muss also mit weit über die Kronentraufe hinaus wachsenden Wurzeln unterschiedlicher Größen gerechnet werden.

Es hat sich außerdem gezeigt, dass nicht, wie häufig angenommen, die schlechten Bodenbedingungen am Straßenstandort die Hauptursache der Schadensproblematik sind. Vielmehr wurzeln Bäume auch dann unter Belägen, wenn sie tiefere Schichten erschließen können oder in ihrer unmittelbaren Umgebung gute Wachstumsbedingungen vorfinden.

Die in Kapitel 1 aufgeführten gängigen Meinungen zur Entstehung der Schadensproblematik können anhand der Fallbeispiele nicht bestätigt werden. Straßenbäume wurzeln da, wo die Bedingungen hinreichend gut sind. Dies ist nicht unbedingt dort, wo Planer oder Baumfachleute sie erwarten oder gerne hätten. Insbesondere können Wurzeln auch dort günstige Bedingungen finden, wo sie zu Problemen führen können, nämlich im Oberbau von Verkehrsflächen.

5. Schadenstypisierung

Wegebauweisen und unterirdische Standortbedingungen von Straßenbäumen weisen eine große Vielfalt auf. Die sich darin entwickelnden Wurzelsysteme unterscheiden sich in ihrer räumlichen Verteilung und können in verschiedenen Schäden an Verkehrsflächen resultieren. Dennoch sind sich wiederholende und somit typische Schadbilder bei Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln zu erkennen. Die folgende Schadenstypisierung zeigt wesentliche Zusammenhänge zwischen verschiedenen Schadbildern und deren Ursachen und Entstehung auf. Wichtige Faktoren sind die Bauweise, die Lage und die Tiefe der Wurzeln sowie deren Dicke bzw. Volumen. Die angegebenen Wurzeldicken sind als Anhaltswerte zu verstehen, von denen der Einzelfall stark abweichen kann. Für die verschiedenen Schadbilder wird eine Einschätzung der **Schadensrelevanz** anhand der Parameter Schadpotenzial für die Verkehrsfläche, Gefahrenpotenzial für Verkehrsteilnehmer, Regulierungsaufwand und Schadpotenzial für den Baum vorgenommen. Im **Schadpotenzial für die Verkehrsfläche** werden die Schadenswahrscheinlichkeit und das zu erwartende Schadensausmaß zusammengefasst. Das **Gefahrenpotenzial** bezeichnet die Unfallgefahr für Verkehrsteilnehmer, bewertet also in erster Linie die Stolpergefahr für Fußgänger. Der **Regulierungsaufwand** beinhaltet die Einschätzung des Arbeitsaufwands und des Schwierigkeitsgrades bei der Schadensbehebung. Auf die Problematik der Schadensbehebung wird im nächsten Kapitel ausführlicher eingegangen. Das Schadpotenzial für den Baum schätzt das Ausmaß von Wurzelverlusten im Falle von Regulierungen ein.

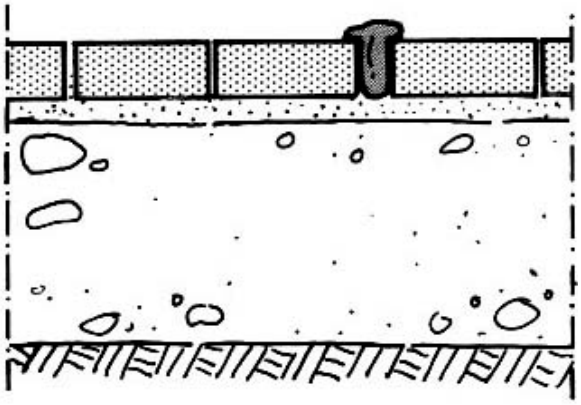
5.1 Wegedecken

Den Wegedecken gilt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit, da sie leichter durch Baumwurzeln geschädigt werden als Randeinfassungen und zugleich das größere Gefahrenpotenzial bergen. Nach der vorliegenden Untersuchung werden nahezu alle Wegedecken, die an Baumscheiben grenzen, früher oder später durch Baumwurzeln angehoben. Während sich die durchschnittliche Schadensquote für Pflasterdecken nicht von der für Plattenbeläge unterscheidet, ist die für Asphaltbeläge geringer (siehe Kapitel 3). Der Grund hierfür wird der unterschiedlichen Verformbarkeit der relativ elastischen, großflächigen Asphaltdecken im Vergleich zu den aus starren Einzelelementen bestehenden, kleinteiligen Pflasterdecken und großformatigen Plattenbelägen gesehen. Bei letzteren entstehen als Schadbild Aufkantungen, die optisch besser wahrnehmbar und aufgrund des höheren Gefahrenpotenzials eher reparaturbedürftig sind. Die Beobachtung, dass bei Asphaltdecken eine geringere Schadensquote auftritt, widerspricht den Aussagen anderer Autoren (KOPINGA 1992, 10.1; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 17, 31). Möglicherweise ist die Art der Asphaltbauweise ein entscheidender Faktor. Diese ist bei Asphaltdecken im Vergleich zu Pflaster- und Plattenbelägen sehr variabel und durch Inaugenscheinnahme kaum zu bestimmen.

5.1.1 Wurzeln in Fugen

Eine Durchwurzelung des Wegebelages selber erfolgt in den Fugen zwischen einzelnen Steinen von Pflasterdecken und Plattenbelägen (Fallbeispiele 4, 6, 8) oder in den Fugen zwischen Wegedecke und Randeinfassung (Fallbeispiele 2, 3, 8). In Asphaltbelägen ist diese Schadensform bauartbedingt

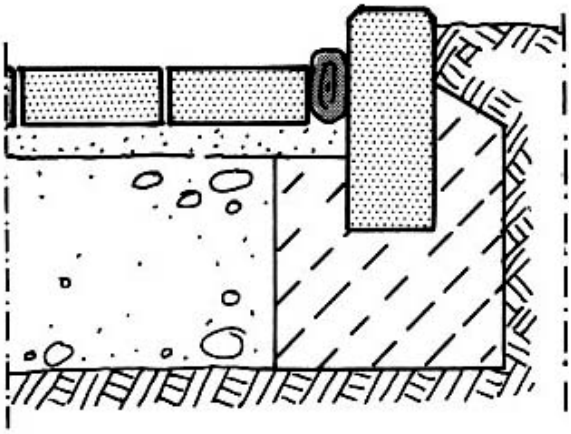
ausgeschlossen. Bei den Plattenbelägen wurden im Rahmen dieser Untersuchung im Gegensatz zu Pflasterdecken keine größeren Wurzeln in den Fugen beobachtet, sind jedoch grundsätzlich auch hier nicht auszuschließen. Die größere Fugenbreite in Pflasterverbänden bietet Raum und eine gute Luftführung und begünstigt so das Entstehen größerer Wurzeln. Oftmals sind die Wurzeln an der Oberfläche von Pflasterbelägen sichtbar und folgen dem Fugenverlauf. Dieses Wurzelverhalten ist insbesondere bei Ahorn häufig zu beobachten. Mit dem Dickenwachstum werden die Fugen aufgeweitet. Ist der Widerstand dafür zu groß, so wachsen die Wurzeln deformiert weiter. Sie erreichen innerhalb von Pflasterverbänden je nach Fugenbreite die Dicke von Grobwurzeln (5 bis 20 mm) und in Fugen zu Randeinfassungen oder anderen Bauteilen die Dicke von Derbwurzeln (20 bis 50 mm). Solange die Wurzel nicht unter dem Stein ansetzt, erfolgt auch das Wachstum größerer Wurzeln ohne Anhebung.



Fugen aufgeweitet

Schnitt **Schadensform**

Darstellung 104: Schadbild bei Wurzeln in Fugen des Pflasterverbandes



Fugen aufgeweitet

Schnitt **Schadensform**

Darstellung 105: Schadbild bei Wurzeln in Fugen zwischen Belag und Randeinfassung

Das Schadpotenzial für den Belag ist daher gering, zumal die Ausbildung größerer Wurzeln relativ selten ist. Auch das Gefahrenpotenzial für Verkehrsteilnehmer ist vergleichsweise gering. Gefahrenstellen können außer durch Aufkantungen vor allem dann entstehen, wenn Wurzeln bei stärkerem Dickenwachstum Wulste an der Belagsoberfläche bilden. Der Reparaturaufwand ist je nach Wurzeldicke und Belagsart mäßig bis hoch. Bei den zumeist dünneren Wurzeln kann der Belag aufgenommen und die Wurzel entfernt werden. Das Schadpotenzial für den Baum ist dann gering. Andernfalls müssen aufwändigere, wurzelschonende Verfahren angewendet werden.

5.1.2 Wurzeln unter dem Belag

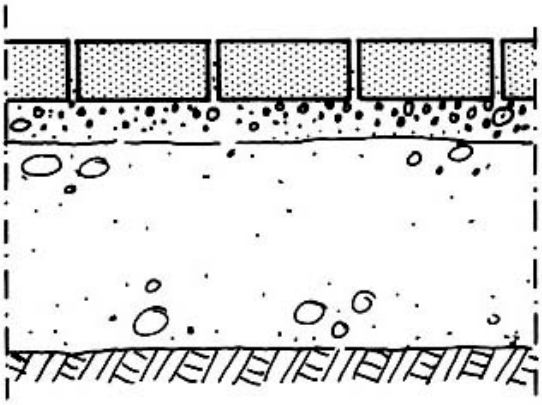
Die wohl häufigste Schadensursache sind Wurzeln, die unmittelbar unter der Wegedecke wachsen. Sie befinden sich in der Pflasterbettung, in der Grenzzone zwischen Stein und Bettung oder zwischen Asphaltdecke und Tragschicht. Dieses Wuchsverhalten wird in der Literatur von mehreren Autoren beschrieben (HAMILTON 1984b; KOPINGA 1992; URBAN 1992, 1999; NICOLL u. ARMSTRONG 1996). Ab einer Wurzeldicke von Grobwurzeln (5 bis 20 mm) können sie den Belag bei direktem Kontakt anheben. Hierzu reichen unter Umständen schon Wurzeln ab einem Durchmesser von 10 mm aus. Dünnere Wurzeln (ab 5 mm) führen nur in Ausnahmefällen oder unter Ausbildung von punktuellen Verdickungen zu Schäden (siehe unten). Vergleiche mit der Literatur sind aufgrund der wenigen Untersuchungen nur bedingt möglich. KOPINGA fand bei Pappeln als Ursache für Schäden an asphaltierten Radwegen Wurzeldicken ab 2 bis 2,5 cm, teilweise auch darunter (KOPINGA 1992, 10.4). Bei Untersuchungen von NICOLL und ARMSTRONG an Kirschen hingegen betrug der Wurzeldurchmesser unter Schäden an Asphaltdecken mindestens ca. 10 cm (NICOLL u. ARMSTRONG 1996, 263f.). Diese Aussagen unterstreichen, dass Angaben zu Wurzeldicken nur als Anhaltwerte gelten können. Das Dickenwachstum unter Deckschichten ist in der Regel nicht begrenzt, so dass auch sehr dicke, statisch bedeutsame Starkwurzeln als Ursache für Belagsanhebungen in Frage kommen. Wegedecken können auch durch Fein- und Schwachwurzeln (bis 5 mm Durchmesser) angehoben werden, wenn diese in dicken mattenähnlichen Schichten auftreten (Fallbeispiel 3, in geringerem Maße auch 4). Diese Art der Belagsanhebung ist jedoch eher selten.

Die Wurzeldicke wirkt sich direkt auf die Anhebungshöhe aus. Anhebungen treten auch dann auf, wenn bei einer in der Pflasterbettung wachsenden Wurzel noch eine dünne Sandschicht zwischen Wurzel und Stein verbleibt, diese jedoch nicht weiter verdichtet oder verdrängt wird. An den Auflagestellen des Belags können durch den punktuellen Druck auf die Wurzel Verdickungen entstehen, indem auf dieser Seite verstärkt Gewebe ausgebildet wird (Reaktionsholz, siehe Abschnitt 2.2.4; Fallbeispiele 1, 5, 7, 8, 9). In Anpassung an die örtlichen Verhältnisse können jedoch auch Kombinationen von Verdickungen und Deformationen in Form von Abplattungen entstehen (Fallbeispiel 8). Beides bewirkt eine Verbreiterung der Auflagefläche und somit eine Reduzierung der Punktlast auf der Wurzel. Verdickungen bewirken außerdem eine verstärkte Anhebung des Belags, was zur Entlastung angrenzender Wurzelabschnitte führt. Nicht alle Anhebungen der Deckschicht mit direktem Kontakt zwischen Stein und Wurzel gehen mit ausgeprägten punktuellen Wurzelverdickungen einher (Fallbeispiele 2, 3, 4, 6). Die Beobachtungen bei den Wurzelfreilegungen lassen darauf schließen, dass die Größe der Punktlast, die Verformbarkeit des Untergrundes und die Baumart oder -gattung eine Rolle

bei der Entstehung von Reaktionsholz spielen. Aufgrund der begrenzten Anzahl untersuchter Fallbeispiele sind jedoch keine konkreten Aussagen möglich.

Die Verformbarkeit beziehungsweise die Verdichtbarkeit des die Wurzel umgebenden Stoffes wirkt sich demnach auch auf die Höhe der Anhebung aus. Bei sehr festen Unterlagen wie stark verdichteten Tragschichten oder Mörtelbettungen oder bei dünnen Pflasterbettungen entstehen vergleichsweise hohe Anhebungen (Fallbeispiele 4, 5, 7), während sie in dickeren Schichten lockeren Sandes geringer ausfallen (Fallbeispiele 6, 8). Diese Beobachtung wird in der Fachliteratur durch Ausführungen von DAY unterstützt, der bei lockeren Böden geringere Schäden als bei festen konstatiert (DAY 1991, 203).

Die durch Wurzeln unter dem Belag beziehungsweise in der Deckschicht hervorgerufenen Schadbilder unterscheiden sich je nach Wegedeckenart. **Dicke Fein- und Schwachwurzelmatten** (Fallbeispiele 3, 4) sind eher unter Pflaster- und Plattenbelägen als unter Asphalt zu erwarten, im Einzelfall jedoch auch hier nicht auszuschließen (vgl. KOPINGA 1992, 10.4). Sie verursachen eine gleichmäßige Anhebung des Belags, ohne dass Gefahrenstellen entstehen, gehen allerdings in der Regel mit Schadbildern durch größere Wurzeln einher (Darstellung 106). Das Schadpotenzial ist daher ebenso wie das Gefahrenpotenzial als gering einzuschätzen. Der Regulierungsaufwand ist bei Entfernen der Wurzeln als hoch und bei Erhalt der Wurzeln als sehr hoch einzuschätzen, da eine fachgerechte und dauerhafte Befestigung nicht möglich ist.



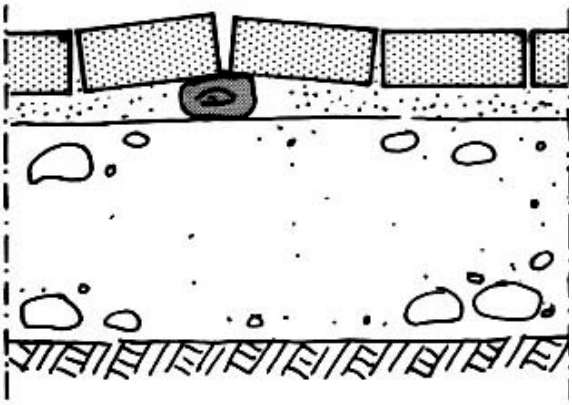
leichte Anhebung,
sonst relativ eben

Schnitt

Schadensform

Darstellung 106: Schadbild bei dicken Fein- und Schwachwurzelmatten unter Pflasterbelägen (Plattenbeläge analog)

Schäden durch größere Wurzeln treten hingegen bei allen Belagsarten auf. Bei **Pflaster** (Fallbeispiele 1, 3, 4, 5, 6, 8) äußern sie sich in zunächst nur leicht angehobenen oder aufgekanteten Steinen, die in der Fläche als leichte Wölbungen erscheinen (Darstellung 107). Pflastersteine können auch einzeln angehoben werden (Darstellung 108). Oftmals lässt sich der Wurzelverlauf unter dem Pflaster an der Oberfläche ablesen. Aufkantungen und Anhebungen einzelner Steine verstärken sich mit dem Dickenwachstum, Fugen werden aufgeweitet bis hin zur Auflösung des Pflasterverbandes.

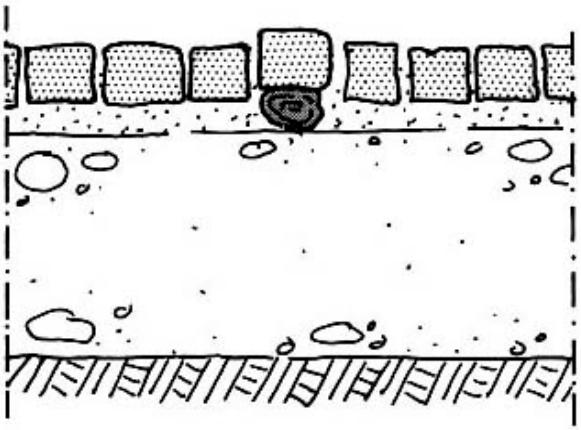


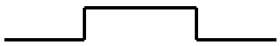
Aufkantung

Schnitt

Schadensform

Darstellung 107: Schadbild bei Wurzeln unter Pflasterbelägen - Aufkantung





Anhebung ganzer Steine

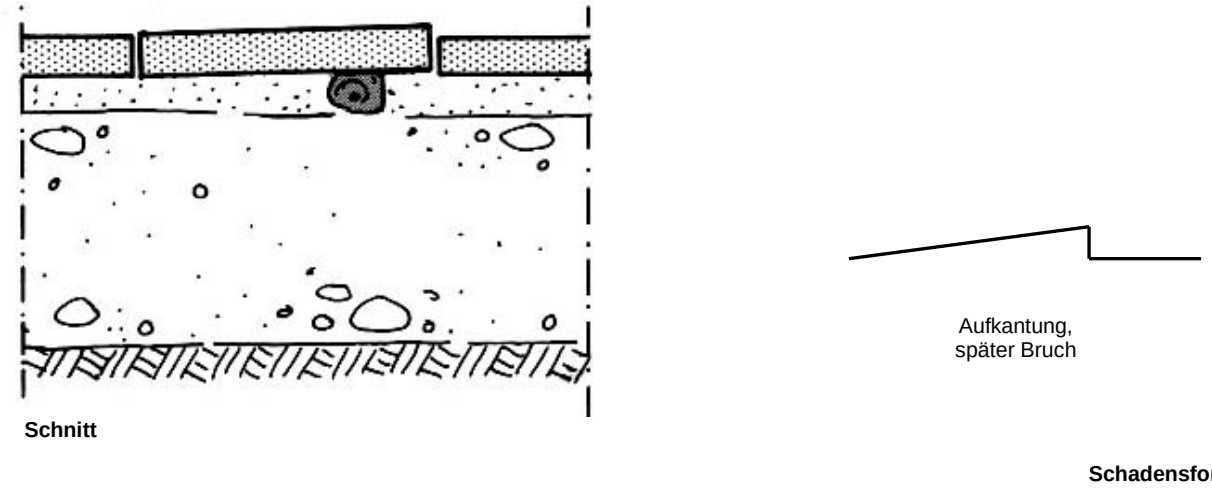
Schnitt

Schadensform

Darstellung 108: Schadbild bei Wurzeln unter Pflasterbelägen – Anhebung ganzer Steine

Das Schadpotenzial für den Belag ist hoch bis sehr hoch, da dickere Wurzeln unter Belägen fast immer zu Schäden führen. Während leichte Aufkantungen häufig tolerierbar sind, stellen größere Aufkantungen, einzeln angehobene Steine und aufgeworfenes Pflaster gefährliche Stolperkanten dar. Dies gilt insbesondere für sonst relativ ebene Beläge wie Klinker- und Betonpflaster, da hier die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer gering ist. Bei ungleichmäßig geformtem Natursteinpflaster, speziell bei Großpflaster, machen sich die Unebenheiten sowohl optisch als auch in der Benutzung weniger stark bemerkbar. Zudem ist das Gefahrenpotenzial durch die ohnehin erhöhte Aufmerksamkeit beim Gehen reduziert. Insgesamt betrachtet ist bei Pflasterbelägen jedoch von einem hohen Gefahrenpotenzial auszugehen. Der Regulierungsaufwand ist mäßig, sofern lediglich dünnere Wurzeln entnommen werden und der Belag wiederhergestellt werden kann, bis sehr hoch, wenn dickere Wurzeln erhalten werden müssen und die Fläche zu befestigen ist. Die Gefahr von Wurzelverletzungen oder -verlusten ist aufgrund der oftmals schwierigen Regulierung relativ hoch. Da sich in Pflasterbettungen oftmals auch dicke Wurzeln entwickeln, wird das Schadpotenzial für den Baum als hoch eingeschätzt.

Bei **Plattenbelägen** kommt es aufgrund der Größe der einzelnen Elemente schnell zu Aufkantungen, kippeligen und bei stärkeren Anhebungen zu gebrochenen Platten (Fallbeispiele 1, 2, 3, 4; Darstellung 109).



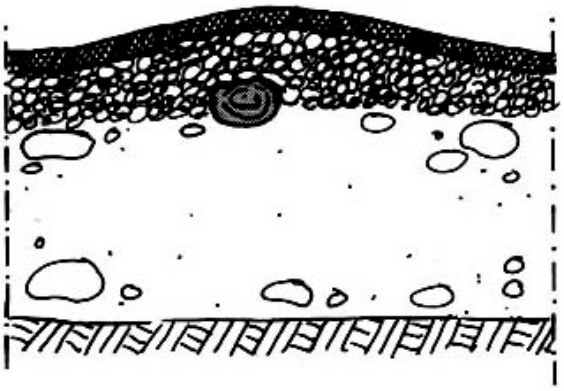
Schnitt

Schadensform

Darstellung 109: Schadbild bei Wurzeln unter Plattenbelägen

Das Schadpotenzial für den Belag ist daher als sehr hoch einzuschätzen. Das Gefahrenpotenzial ist hier hoch bis sehr hoch, da die Verkehrsteilnehmer auf einen sehr ebenen Belag eingestellt sind und Stolperkanten nicht erwarten. Weil aufgrund der Plattengröße eine sehr ebene Unterlage erforderlich und ein Anheben des Niveaus über zu erhaltenden Wurzeln nur auf größeren Flächen möglich ist, sind Regulierungsarbeiten mit hohem bis sehr hohem Aufwand verbunden oder oftmals nicht in der gleichen Belagsart möglich. Das Schadpotenzial für den Baum entspricht dem für Pflasterbeläge und wird hoch eingeschätzt.

Schäden an **Asphaltdecken** treten durch Wölbungen und Risse in Erscheinung, deren Ausprägung von der Schichtdicke und der Elastizität des verbauten Materials abhängig ist. Zunächst zeigt sich eine Wölbung, die mit zunehmender Höhe reißt. Bei Gussasphalt können aufgrund eines höheren Bitumengehaltes höhere Aufwölbungen ohne Risse entstehen (Fallbeispiel 9; Darstellung 110). Dünne Decken aus Walzasphalt reißen hingegen schnell (Fallbeispiel 7; Darstellung 111). Punktuelle Verdickungen und Deformationen an den Wurzeln treten auch hier auf. Da Asphaltbauweisen eine große Bandbreite aufweisen, können nur sehr allgemeine Aussagen getroffen werden. Durch die Verformbarkeit des Materials und die Größe der zusammenhängenden Fläche treten Schäden tendenziell später auf als bei anderen Belägen oder sind erst später sichtbar. Asphaltdecken können daher bei ausreichenden Schichtdicken eine geringere Reparaturhäufigkeit aufweisen.

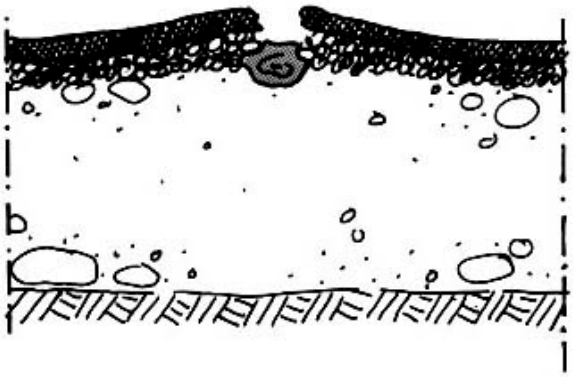


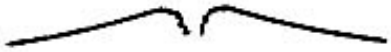
Wölbung,
später Riss

Schadensform

Schnitt

Darstellung 110: Schadbild bei Wurzeln unter Asphaltbelägen – dicke Deckschichten oder Gussasphalt





schwache Wölbung,
Riss

Schadensform

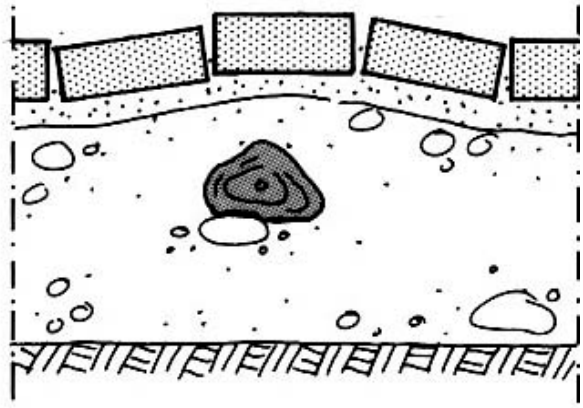
Schnitt

Darstellung 111: Schadbild bei Wurzeln unter Asphaltbelägen – dünne Deckschichten oder Walzasphalt

Das Schadpotenzial für den Belag ist somit bei stärker dimensionierten oder mehrschichtigen Bauweisen sowie bei Gussasphaltdecken mäßig hoch und bei dünnen Decken aus Walzasphalt hoch. In der Regel gehen die Anhebungen ohne Aufkantungen einher, so dass sie nicht unbedingt eine Gefährdung der Verkehrssicherheit bedeuten und eher toleriert werden können. Das Gefahrenpotenzial ist daher gering bis mäßig. Der Aufwand für Regulierungen ist mäßig hoch. Im Gegensatz zu Pflaster- und Plattenbelägen ist Maschineneinsatz zur Entfernung und zum Einbau des Belags erforderlich und neues Material muss termingerecht beschafft werden. Andererseits ist der Einbau über Wurzeln mit Niveauerhöhung und die Anpassung an das Ursprungsniveau durch die Formbarkeit des Materials gut möglich Regulierungsarbeiten sind wegen der materialspezifischen Eigenheiten einfacher als bei Pflaster- und Plattenbelägen. Allerdings ist die Gefahr von Wurzelverletzungen- und Verlusten aufgrund des erforderlichen Maschineneinsatzes bei der Belagsentfernung sehr hoch. Das Schadpotenzial für den Baum ist daher insgesamt hoch einzuschätzen.

5.1.3 Wurzeln in der obersten Tragschicht

Wurzeln, die in der obersten Tragschicht wachsen, haben häufig größere Durchmesser, während die Feinwurzelmenge zumeist geringer ist als direkt unter dem Belag (Fallbeispiele 1, 2, 3, 5, 9). Bei den Asphaltdecken werden im Sinne dieser Arbeit dünne bituminöse Tragschichten zu den Deckschichten gezählt. Durch die grobe Struktur des Tragschichtmaterials von Kies- oder Schottertragschichten können insbesondere bei gebrochenen Schüttstoffen Deformationen und abrupte Richtungswechsel der Wurzeln auftreten. Zur Anhebung kommt es erst bei Starkwurzeln (ab 50 mm Durchmesser). Schäden werden durch sehr dicke einzelne Starkwurzeln (Fallbeispiel 3, 9) oder durch mehrere weniger dicke Starkwurzeln auf engem Raum verursacht (Fallbeispiel 5). Sie werden durch sehr dünne Tragschichtdicken oder geringe Wuchstiefen begünstigt. Schäden äußern sich bei allen Belagsarten zunächst als Wölbung, wobei insbesondere Plattenbeläge Aufkantungen bilden können (Darstellung 112 bis 114). Bei Pflasterbelägen weiten die Fugen auf, so dass sich der Verband bei stärkeren Aufwölbungen auflösen kann.

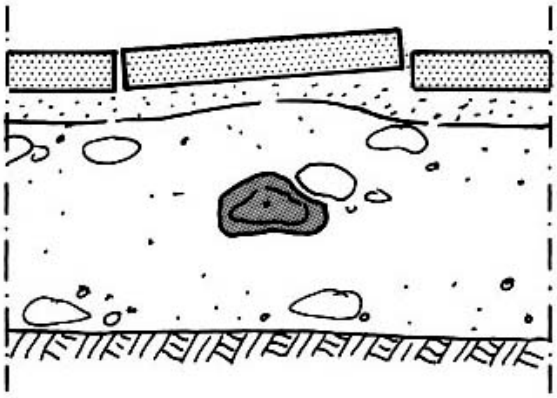


Schnitt

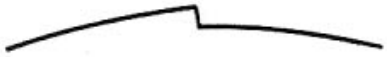
Wölbung,
später Aufkantung

Schadensform

Darstellung 112: Schadbild bei Wurzeln in der obersten Tragschicht unter Pflasterbelägen



Schnitt



Wölbung, Aufkantung

Schadensform

Darstellung 113: Schadbild bei Wurzeln in der obersten Tragschicht unter Plattenbelägen

Schnitt

Wölbung

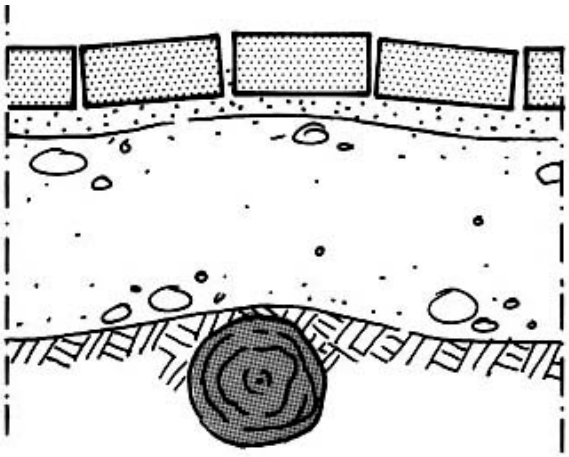
Schadensform

Darstellung 114: Schadbild bei Wurzeln in der obersten Tragschicht unter Asphaltbelägen

Das Schadpotenzial ist mäßig hoch einzuschätzen. Der Schadensverlauf ist bei Wurzeln in der Tragschicht langsamer als unmittelbar unter dem Belag. Das Gefahrenpotenzial ist tendenziell gering, da Gefahrenstellen erst bei höheren Aufwölbungen entstehen. Bei höheren Aufwölbungen gleichen die Schadbilder denen von Wurzeln unmittelbar unter der Wegedecke, so dass das Gefahrenpotential dann insbesondere bei Plattenbelägen hoch ist. Der Regulierungsaufwand ist mäßig hoch, wenn die Wurzel von Tragschichtmaterial überdeckt ist, das zum Niveauausgleich abgetragen werden kann. Andernfalls muss die Deckschicht höher gezogen oder die Baumscheibe erweitert werden, was einen hohen Aufwand bedeutet. Die Wurzeln können in der Regel nicht entfernt werden, da die Schäden erst dann entstehen, wenn sie einen größeren Durchmesser erreicht haben. Das Schadpotenzial für den Baum ist bei Regulierungsarbeiten gering, wenn ein Materialabtrag ausreicht. Andernfalls ist es hoch, da die Wurzeln in der Regel bereits einen größeren Durchmesser erreicht haben und Wurzelverluste ein größeres Ausmaß erreichen können.

5.1.4 Wurzeln unter der obersten Tragschicht

Wurzeln unter der obersten Tragschicht müssen erst einen noch größeren Durchmesser erreichen, bevor Anhebungen bemerkbar werden (Starkwurzeln ab 50 mm; Fallbeispiele 2, 4, 9). Durch den geringeren Verdichtungsgrad und die schwächere Druckbelastung weisen die Wurzeln in dieser Schichttiefe kaum Deformationen auf und haben einen annähernd runden Querschnitt. Das Material in der Umgebung kann beim Dickenwachstum zu einem höheren Grad komprimiert werden. Das Schadbild entspricht dem durch Wurzeln in der Tragschicht, wobei bei gleicher Wurzeldicke flachere Wölbungen zu erwarten sind (Darstellung 115). Das Schadpotenzial für Verkehrsflächen sowie das Gefahrenpotenzial ist daher gering. Der Aufwand für die Regulierung ist ebenfalls gering, da Tragschichtmaterial abgetragen, das Niveau angeglichen und der Belag wieder hergestellt werden kann. Die Gefahr von Wurzelverletzungen oder -verlusten ist gering, da die Regulierungsarbeiten in der Regel wurzelschonend vorgenommen werden können.



Schnitt

Wölbung

Schadensform

Darstellung 115: Schadbild bei Wurzeln unter der obersten Tragschicht unter Pflasterbelägen (Platten- und Asphaltbeläge analog)

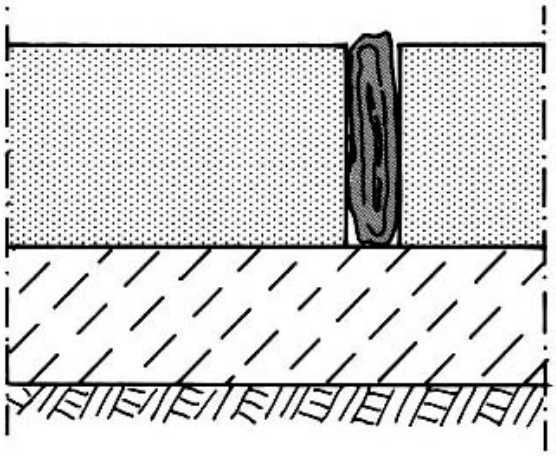
5.2 Randeinfassungen

Schäden an Randeinfassungen sind im Vergleich zu Wegedecken seltener, geringer im Ausmaß und treten erst bei dickeren Wurzeln und daher später auf. Zu dieser Beobachtung finden sich mehrere Hinweise in der Fachliteratur: Nach DAY werden leichte Konstruktionen generell eher geschädigt als schwere (DAY 1991, 203). Andere Autoren stellen eine zeitliche Verzögerung beziehungsweise eine geringere Schadensquote im Vergleich zu Schäden an Wegedecken fest (WAGAR u. BARKER 1983, 179; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 17, 32; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1996, 196). Hinsichtlich der Schadensquote bestehen nur geringfügige Unterschiede zwischen ebenen und erhöhten Varianten. Bei fehlender Randeinfassung treten häufiger und stärkere Schäden an Wegedecken auf (siehe Kapitel 3). Ausgleichs- und Tragschicht werden dann direkt und intensiv erschlossen (Fallbeispiele 3, 4, 5, 9). Randeinfassungen wirken somit als Barriere gegen das Eindringen der Wurzeln in den Wegeoberbau, wie auch aus anderen Untersuchungen hervorgeht (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 17, 32). Die Barrierewirkung ist jedoch zeitlich begrenzt, da die Wurzeln über mehrere Wege in den Oberbau gelangen und zugleich Schäden an der Randeinfassung selbst verursachen können. Diese treten als Anhebung, seitliche Verschiebung oder Fugenaufweitung in Erscheinung. Das in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 geschilderte Wachstum von Baumwurzeln durch Fugen in Randeinfassungen und unter deren Fundamenten wurde in ähnlicher Weise auch von URBAN bei Wurzelfreilegungen beobachtet (URBAN 1992, 1999).

5.2.1 Wurzeln in Stoßfugen

In den oberen Schichttiefen werden die Stoßfugen zwischen einzelnen Steinen durchwachsen (Fallbeispiele 4, 7, 8; Darstellung 116). Die Wurzeln sind hier durch die räumliche Enge deformiert und oftmals mehrfach so hoch wie breit. Vor und hinter der Fuge können Verdickungen entstehen. Die Wurzeldicken umfassen Derb- und Grobwurzeln (5 bis 50 mm), wobei auch Starkwurzeln (ab 50 mm) im Einzelfall nicht auszuschließen sind. Inwiefern Wurzeln in der Lage sind, die Fugen direkt aufzuweiten, oder ob Fugenaufweitungen als Folgeschäden bei Anhebungen entstehen, kann nicht geklärt

werden. Nach Verlassen der Fuge entwickelt sich ein Wurzelbild, wie es ohne Engpass zu erwarten wäre. Offenbar wird das Wachstum nicht beeinträchtigt. Die Wurzeln wachsen dann zumeist in den Wegeoberbau.



Schnitt

Fugen aufgeweitet

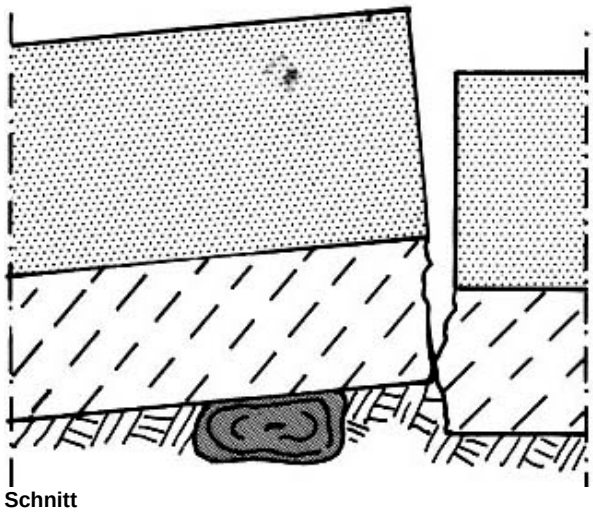
Schadensform

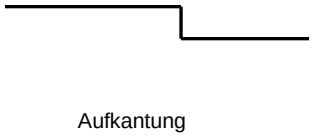
Darstellung 116: Schadbild bei Wurzeln in Stoßfugen von Randeinfassungen

Da die Schäden zwar relativ häufig auftreten, die Funktionalität und die Optik in der Regel aber erst bei sehr dicken Wurzeln beeinträchtigt werden, ist das Schadpotenzial für die Randeinfassung mäßig hoch und das Gefahrenpotenzial gering. Der Regulierungsaufwand hingegen ist als hoch bis sehr hoch einzuschätzen, da außer der massiven Randeinfassung auch ein Teilbereich des Wegebelages aufgenommen und neu versetzt werden muss. Reparaturen unterbleiben daher häufig. Bei Reparaturarbeiten besteht die Gefahr von Wurzelverletzungen, zumal die Wurzeln häufig durch Deformationen an den Stein angepasst sind und sich die Steine nur schwer entnehmen lassen. Sofern die Randeinfassung nicht gänzlich entfernt werden kann, ist eine wurzelschonende Regulierung schwierig. Das Schadpotenzial für den Baum ist daher hoch.

5.2.2 Wurzeln unter Fundamentierungen

In tieferen Schichten werden die Fundamente der Randeinfassungen oder anderer Bauteile wie z. B. Pflasterrinnen unterwachsen (Fallbeispiele 1, 2, 3, 4, 7). Die Wurzel wird zumeist an der Kontaktstelle zum Bauteil deformiert. Danach erfolgt ein tendenziell radiales Wachstum, das oftmals auch wieder nach oben verläuft (Fallbeispiele 1, 2, 7). Wurzeln wachsen außerdem häufig unter linearen Bauteilen entlang und werden von diesen geleitet (Fallbeispiel 4; weniger deutlich bei Fallbeispielen 1 u. 2). Schäden werden zumeist erst von Starkwurzeln (ab 50 mm) verursacht und treten somit erst spät auf, da zur Anhebung der schweren und massiven Bauteile größere Kräfte als bei den Wegedecken erforderlich sind. Sie äußern sich als Aufkantungen, als Anhebung ganzer Steine, als seitliche Verschiebung oder als Aufweitung von Fugen und gehen in der Regel mit einem Fundamentbruch einher (Darstellung 117). Defizite bei der Fundamentierung begünstigen die Entstehung von Schäden (Fallbeispiele 1, 2, 4, 7).





Darstellung 117: Schadbild bei Wurzeln unter der Fundamentierung von Randeinfassungen

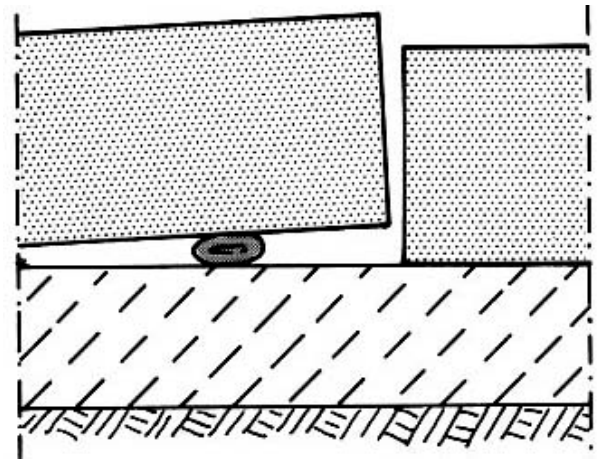
Das Schadpotenzial für die Randeinfassung wird insgesamt als mäßig bis hoch eingestuft. Im Gegensatz zu Aufkantungen und Anhebungen ganzer Steine mindern seitliche Verschiebungen oder erweiterte Fugen die Funktionalität der Randeinfassung im Allgemeinen nicht. Da sie sich häufig in Randbereichen von Verkehrsflächen befinden, werden hier höhere Anhebungen toleriert als bei Wegedecken. Erhöhte Randeinfassungen oder solche aus flachen Mauern heben sich deutlich von der Wegefläche ab, so dass Schäden keine Unfallgefahr für Verkehrsteilnehmer darstellen. Diese kann jedoch bei ebenerdigen Randeinfassungen gegeben sein. Das Gefahrenpotenzial wird daher als gering bis hoch eingeschätzt. Der Regulierungsaufwand ist hoch bis sehr hoch, da es sich einerseits häufig um massive Bauteile handelt, die nur unter Maschineneinsatz ausgebaut werden können, und andererseits die den Schaden verursachenden Wurzeln bereits einen sehr großen Durchmesser erreicht haben und nicht entfernt werden können, ohne gravierende Beeinträchtigungen der Vitalität und der Standsicherheit zu riskieren. Falls eine Minderung der Betonbettung oder ein Zuschneiden des Steines nicht ausreicht, muss eine Bordsteinbrücke eingebaut oder auf die Randeinfassung verzichtet werden. Regulierungsarbeiten unterbleiben daher häufig oder werden lange hinausgezögert. Das Schadpotenzial für den Baum ist aus den genannten Gründen ebenfalls hoch einzuschätzen.

Besonderes Augenmerk gilt den Fugen in Randeinfassungen, da sie den Eintritt von Wurzeln in die Pflasterbettung und die oberste Tragschicht ermöglichen. Sie unterschieden sich je nach Bauweise in Anzahl, Anordnung und Tiefe. Die Anzahl der Fugen hängt von der Größe der Bauelemente, die Tiefe von der Ausführung der Fundamentierung ab. Diese beiden Merkmale sind Einflussfaktoren auf die Schadensquote: Je mehr Fugen eine Randeinfassung aufweist, desto mehr potenzielle Durchlässe für Wurzeln existieren. Je größer die Tiefe der durchgängigen Fugen, desto größer ist die potenzielle Eintrittsfläche. Oftmals fehlt eine Rückenstütze aus Beton, so dass die Fugen auf ganzer Länge durchwurzelbar sind. Bei regelgerechter Bauweise endet sie bei ebenerdigen Bauweisen unter dem Niveau der Baumscheibe beziehungsweise des Pflanzsubstrates oder der Mulchabdeckung, so dass

Wurzeln aus der Pflanzgrube in die Pflasterbettung oder in die Grenzzone unter dem Belag wachsen können. Bei erhöhten Varianten wie Hochborden kann die Rückenstütze über dem Niveau des angrenzenden Wegebelages enden, so dass der direkte Zutritt unterbleibt. Allerdings kann es hier zum oberflächlichen Überwachsen der Randeinfassung im Bereich der Fuge und dann zum Einwurzeln in den Belag kommen. Dieses Wurzelverhalten kann besonders häufig bei Ahorn beobachtet werden. Hinsichtlich der Fugenanordnung lassen sich drei verschiedene Ecklösungen unterscheiden: Die Steine sind stumpf gestoßen (Klinkerbänder, Kantensteine, Bordsteine, Mauern/Trog), ein Stein ist am Ende L-förmig abgewinkelt (Kantensteine) oder es werden spezielle Ecksteine verwendet (eher selten, bei Bordsteinen). In vielen Fällen kann der Schadensverlauf anhand der Fugenanordnung in der Randeinfassung und dem Schaden an der Wegedecke nachvollzogen werden. Baumwurzeln verlassen die Pflanzgrube häufig über die Ecke. Eckelemente werden beim Unterwachsen als ganze angehoben, während bei Fugen in den Ecken diese durchwachsen und aufgeweitet oder die angrenzenden Steine angehoben werden. Der Zusammenhang zwischen der Fugenanordnung und der Schadenshäufigkeit und dem Schadensausmaß bei Randeinfassungen wurde nicht untersucht.

5.2.3 Wurzeln zwischen Fundamentierung und Stein

Durch die Anhebung des Fundamentes oder die Lageveränderung der Kanten- und Bordsteine entstehen Spalten und Risse zwischen Stein und Betonbettung, welche ebenfalls von Wurzeln erschlossen werden (Fallbeispiele 4, 8). Das Dickenwachstum der Wurzeln führt zu Folgeschäden, die denen durch Wurzeln unter der Fundamentierung gleichen. Durch ihre Lage zwischen zwei starren Baukörpern und aufgrund der bereits gelockerten Steine führen bereits Derbwurzeln (ab 20 mm) zu Schäden. Sehr leichte Konstruktionen können auch durch noch dünnere Wurzeln angehoben werden. Während sie in der Kontaktzone mit dem Bauteil deformiert sind, zeigen sich im weiteren Wachstum keine Auffälligkeiten. Außerdem werden die Stoßfugen aufgeweitet und bieten so Raum für neue Wurzeln (Fallbeispiel 4; Darstellung 118).



Schnitt

Aufkantung

Schadensform

Darstellung 118: Schadbild bei Wurzeln zwischen Fundamentierung und Stein bei Randeinfassungen

Da diese Schadensform häufig als Folgeschaden entsteht, wird das Schadpotenzial für die Randeinfassung bei regelgerechter Ausführung der Fundamentierung als mäßig eingestuft. Das Gefahrenpotenzial ist wie bei der zuvor besprochenen Schadensform gering bis hoch. Der Regulierungsaufwand ist hoch bis sehr hoch, da der Stein aufgehoben und die Wurzel entfernt oder eine Bordsteinbrücke eingebaut werden muss. Das Schadpotenzial für den Baum wird als hoch eingeschätzt. weil sowohl die Reparatur der Randeinfassung als auch deren vollständige Entfernung mit der Gefahr von Wurzelverletzungen oder -verlusten einhergehen.

5.3 Befestigte Baumscheiben

Baumscheiben stellen einen Randaspekt der untersuchten Fragestellung dar. Sie werden häufig befestigt, um eine Nutzung der Fläche zu ermöglichen. Bei den Befestigungen handelt es sich in der Regel um unterschiedliche Abdeckungen aus Pflaster, Beton- oder Stahlelementen. Werden sie angehoben, so ist, analog zu Wegeflächen, ihre Funktionalität beeinträchtigt und die Verkehrssicherheit der Nutzfläche unter Umständen nicht mehr gewährleistet. Sofern es sich nicht um einen Teil der Wegefläche handelt, ist das Gefahrenpotenzial jedoch gering. Die Abdeckungen werden auf das Pflanzsubstrat gelegt oder freitragend auf Fundamenten gelagert. Im Hinblick auf Anhebungen sind insbesondere die nicht freitragenden Abdeckungen problematisch. Stamm- und oberflächennahe Wurzeln mit beträchtlichen Ausmaßen sind das Ergebnis eines natürlichen Wuchsverhaltens von Bäumen (siehe Abschnitt 2.2) und führen zwangsläufig zur Anhebung der aufliegenden Abdeckungen. Da eine wurzelschonende Regulierung im Regelfall nicht möglich ist, müssen die Abdeckungselemente entfernt werden und sind daher nur eine temporäre Lösung.

Baumscheibenabdeckungen aus Stahlrosten bestehen oftmals nur aus wenigen großen Elementen. Deshalb führen schon geringfügige Anhebungen zu hohen Aufkantungen und somit zu Stolperfallen sowohl in Stammnähe als auch am Baumscheibenrand. Einwandfreie, voll funktionstüchtige Roste werden in der Regel nur bei kleineren beziehungsweise jüngeren Bäumen mit freitragenden, nicht auf dem Substrat aufliegenden Systemen vorgefunden, da sie bei größeren Bäumen entfernt werden müssen. Dasselbe gilt für größere Betonelemente, die zusätzlich brechen können. Bei kleineren Elementen und bei gepflasterten Baumscheiben entstehen Schadbilder, die sich analog zu den Wegedecken je nach Anhebungshöhe in Wölbungen, aufgekanteten oder aus dem Verband gelösten Steinen äußern können. Durch die kleinere Bauteilgröße und die bessere Anpassungsfähigkeit an punktuelle Anhebungen ist das Gefahrenpotenzial geringer als bei größeren, aufgelegten Abdeckungen.

5.4 Einflussfaktoren ohne eigenes Schadbild

Bevorzugte Stellen für das Entstehen der beschriebenen Schadbilder sind **Fugen sowie Rand- und Übergangsbereiche**. Diese üben eine Lenkungsfunktion auf Wurzeln aus. Rand- und Übergangsbereiche in Verkehrsflächen treten am Übergang zwischen Pflanzgrube beziehungsweise Baumscheibe und Randeinfassung, zwischen Randeinfassung und Wegebelag sowie bei Belagswechseln beispielsweise zwischen Geh- und Radweg auf. Hier sind häufig lineare, am Rand orientierte Schadens-

verläufe zu verzeichnen. Mögliche Einflussfaktoren sind auch hier Fugen und Barrieren sowie Unterschiede in der Lagerungsdichte des Materials. Es ist nicht auszuschließen, dass das Wegebaumaterial an den Randbereichen herstellungsbedingt etwas weniger stark verdichtet ist als in der Fläche, so dass das Wurzelwachstum hier begünstigt ist. Wurzeln wachsen außerdem bevorzugt entlang durchgehender Längsfugen (Fallbeispiele 2, 8).

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Lokalisierung der Schäden ist die **Entfernung zum Baumstamm**. Generell ist davon auszugehen, dass die Häufigkeit und das Ausmaß von Schäden in Stammnähe tendenziell höher sind, da hier größere Wurzeldicken ausgebildet werden. Diesen Zusammenhang stellen verschiedene Autoren fest (WAGAR u. BARKER 1983, 179; WONG, GOOD u. DENNE, 17, 32; FRANCIS et al. 1991, 193 ff.). Das Wurzelwachstum und somit die Entstehung von Schäden setzt sich tendenziell radial vom Stamm aus fort, so dass zunächst mit Schäden in unmittelbarer Nähe des Stammes beziehungsweise der Baumscheibe zu rechnen ist. KOPINGA hingegen konnte bei Untersuchungen von Pappeln entlang asphaltierter Wege keine Korrelation zwischen Baumabstand und Schaden feststellen (KOPINGA 1992, 10.7). Die Wurzeln konnten nach Unterqueren der Verkehrsfläche offenen Boden erreichen. Möglicherweise ist nahm das Dickenwachstum erst nach dem Erschließen der Nahrungsquelle stark zu, so dass der Schadensverlauf deshalb von diesem Modell abweicht. Auch ein gattungsspezifischer Einfluss ist nicht auszuschließen.

Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln können auch in einiger Entfernung vom Stamm auftreten, ohne dass die Wegedecke dazwischen durchgehend angehoben wird. Entweder wächst die Wurzel eine längere Strecke in größeren, nicht schadensträchtigen Tiefen, um dann nach oben zu wachsen (Fallbeispiele 2, 3). Oder sie wächst in gleichbleibender Tiefe dicht unter dem Belag, ohne Anhebungen zu bewirken, und bildet schließlich durch direkten Kontakt zum Belag und die daraus resultierende Druckbelastung punktuelle Verdickungen, die den Belag in diesem Bereich anheben (Fallbeispiele 1, 5, 7, 8).

In seltenen Fällen werden Verkehrsflächen vom Stammfuß überwachsen. Dies tritt jedoch nur bei sehr alten Bäumen auf, deren Stammfuß die offene Baumscheibe ausfüllt. Problematischer als die Schadwirkung für die Verkehrsfläche ist in solchen Fällen die Standsicherheit des Baumes. Für die vorliegende Fragestellung ist dieser Fall von untergeordneter Bedeutung.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Entstehung von Schäden ist der Komplex aus **Baumalter, Entwicklungsstadium, Standzeit, Baumgröße und Zuwachsrate**, der in der vorliegenden Untersuchung über den Stammdurchmesser erfasst wurde. Auf den auch in der Literatur übereinstimmend festgestellten Zusammenhang zwischen Stammdurchmesser beziehungsweise den oben genannten Parametern und der Schadensproblematik wurde bereits hingewiesen (siehe Kapitel 3). Verschiedene Autoren diskutieren Schwellenwerte für die Entstehung von Schäden an Verkehrsflächen in Anlehnung an den Stammdurchmesser (FRANCIS et al. 1991; WONG, GOOD u. DENNE 1988) oder den kritischen Zeitraum, bis erstmals Schäden sichtbar werden (HAMILTON 1984a). Die Aussagen bleiben auf einzelne Untersuchungen beschränkt und können aufgrund der wechselnden Rahmenbedingungen,

unterschiedlicher Schadensdefinitionen und der Gattungsabhängigkeit nicht generalisiert werden. Die im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Erkenntnisse legen nahe, dass als Anhaltswert bei den hierzulande üblichen Bauweisen bis zum ersten Sichtbarwerden von Schäden von einem Zeitraum von ca. 10 Jahren auszugehen ist, mit einer Schwankungsbreite von 7 bis 15 Jahren. Diese Einschätzung entspricht den Aussagen von HAMILTON, der in Untersuchungen Zeiträume von 14 und 15 Jahren ermittelte (mit Spannweiten von 7 bis 20 Jahren; HAMILTON 1984a, 37). KOPINGA fand, dass sich Pappelwurzeln unter Radwegen innerhalb weniger Jahre zu schadensträchtigen Dicken entwickelten, konnte jedoch keine Relation zwischen dem Alter der Pflanzung und der Schadensquote feststellen (KOPINGA 1992, 10.7). Aus Deutschland ist ein Fall bekannt, bei dem Pappelwurzeln ca. 4 Jahre nach der Pflanzung eine Kunststofflaufbahn unterwandert und angehoben hatten, so dass die Laufbahn saniert werden musste (ARMBRUSTER 2001). Der Zeitraum, in dem erneut Regulierungen erforderlich sind, kann in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen und der Regulierungsmethode mit etwa 5 Jahren angesetzt werden. Auch hier ist von großen Schwankungsbreiten auszugehen. Neue Schäden können schon im Folgejahr eintreten oder über einen längeren Zeitraum ausbleiben. Da oftmals nicht das gesamte Baumumfeld, sondern nur kleine Bereiche reguliert werden, können an Baumstandorten im Extremfall jährlich durchzuführende Reparaturmaßnahmen erforderlich sein. Die angeführten Zeitangaben sind Schätzwerte, die sich aus den Erkenntnissen der Untersuchungen und aus Praxiserfahrungen ergeben (mündl. Auskunft BEYER 1998, 2001; HEGER 1998; MEINDL 2001; SCHROER 2001; RICKERS 2001). Es ist zu erwarten, dass die Wurzelaktivität bei älteren Wurzelsystemen nachlässt. Es ist deshalb nicht auszuschließen, dass sich bei älteren Bäumen der Schadensverlauf verlangsamt (siehe auch HAMILTON 1984a).

5.5 Schadensrelevanz im Vergleich

Nicht alle Wurzeln im Ober- und Unterbau von Wegen führen zu Schäden, und nicht alle Schäden sind gleich gravierend. Tabelle 15 zeigt die Schadensrelevanz in der Übersicht. Das Schadpotenzial hängt ab von Tiefe und Dicke der Wurzel sowie der Bauweise der Verkehrsfläche und der Boden- oder Schüttstoffdichte. Je dichter Wurzeln unter dem Baukörper wachsen und je dicker sie sind, je starrer, je größer und je leichter die angrenzenden Bauteile sind, je fester oder dichter der unter der Wurzel eingebaute oder sie umgebende Stoff, desto größer ist das Schadpotenzial. Es ist daher für Wegedecken höher als für Randeinfassungen, für Pflaster- und Plattenbeläge sowie dünne Asphaltdecken höher als für dicke Asphaltdecken und für Plattenbeläge höher als für Pflasterflächen. Es ist bei dicht unter dem Belag oder unter der Randeinfassung wachsenden Wurzeln höher als bei solchen, die entweder innerhalb der Fugen, in oder unter der obersten Tragschicht wachsen. Das Schadpotenzial nimmt außerdem mit der Entfernung zum Stamm ab, da in Stammnähe naturgemäß dickere Wurzeln zu erwarten sind.

Das Gefahrenpotenzial ist bei kantigen Anhebungen höher als bei Wölbungen und bei Schäden innerhalb von Wegeflächen höher als im Randbereich. Es steigt mit der Ebenheit der Wegedecke und der Anhebungshöhe. Es ist somit bei Wegedecken höher als bei Randeinfassungen, bei Pflaster- und Plattenbelägen höher als bei Asphaltdecken und bei großformatigen Steinen höher als bei kleinforma-

tigen. Das Gefahrenpotenzial ist unabhängig von der Entfernung zum Baumstamm, da einerseits in Stammnähe die größeren Schäden auftreten, andererseits Verkehrsteilnehmer hier eher mit unebenen Wegebelägen rechnen.

Der Regulierungsaufwand ist von der Bauweise, der Wurzeldicke und -tiefe und von den Ansprüchen an die Ebenheit der Verkehrsfläche abhängig. Er ist bei großen Bauteilen mit starrer und tiefer Fundamentierung höher als bei kleinen Bauteilen und somit bei Randeinfassungen höher als bei Wegedecken. Der Regulierungsaufwand für Asphaltdecken ist wegen des erforderlichen Maschineneinsatzes und der Materialbeschaffung einerseits höher als bei Pflaster- und Plattenbelägen. Andererseits lässt sich das Material gut an die Form der auszubessernden Fläche und an Niveauunterschiede anpassen. Pflasterflächen sind einfacher zu regulieren als Plattenbeläge. Der Regulierungsaufwand ist außerdem bei dicken, flach wachsenden Wurzeln höher als bei dünnen, tief wachsenden, da diese einerseits nicht beschädigt werden dürfen und andererseits eine Niveauangleichung schwierig ist.

Das Schadpotenzial für den Baum hängt vor allem von der Wurzeldicke und der Entfernung zum Stamm ab. Je dicker die Wurzel und je näher am Stamm, desto größer ist das Risiko, durch Wurzelverluste die Standsicherheit zu gefährden und die Vitalität gravierend zu beeinträchtigen. Die Regulierung hoher und stammnaher Schäden geht daher mit einem größeren Schadpotenzial für Wurzeln einher. Außerdem ist das Schadpotenzial bei der Regulierung größerer Flächen höher als bei kleinen Flächen, da Wurzelverluste größeren Ausmaßes eintreten können. Grundsätzlich ist es für den Baum unerheblich, in welcher Bodentiefe die Wurzelverluste erfolgen. Die Gefahr, dass oberflächennahe Wurzeln bei Regulierungsarbeiten geschädigt werden, ist jedoch höher als bei tiefer wachsenden Wurzeln. Bei tieferen Wurzeln reicht unter Umständen ein Materialabtrag, um wieder eine ebene Verkehrsfläche herzustellen, während eine wurzelschonende Reparatur bei oberflächennahen Wurzeln schwierig ist (siehe Kapitel 6).

	Wurzeln				**Wegedecken**				**Randeinfassungen**	**Stammentfernung**	
	Dicke		**Tiefe**		**Pflaster**	**Platten**	**Asphalt**				
	dünn	**dick**	**hoch**	**tief**			**dünn**	**dick**		**nah**	**fern**
Schadpotenzial für die Verkehrsfläche	-	+	+	-	o	+	+	-	-	+	-
Gefahrenpotenzial	-	+	+	-	o	+	-	-	-	/	/
Regulierungsaufwand	-	+	+	-	o	+	o	o	+	-	+
Schadpotenzial für den Baum	-	+	+	-	+	+	+	+	o	+	-

Tabelle 15: Schadensrelevanz - = vergleichsweise gering + = vergleichsweise hoch o = mittelmäßig / = keine Aussage

6. Ansätze zur Schadensbehebung

Die Behebung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln gehört zum Tagesgeschäft von Straßenbau- und Grünflächenämtern. Das folgende Kapitel stellt Methoden zur Schadensbehebung vor und erörtert ihre Anwendbarkeit. Zunächst wird die gesichtete Fachliteratur ausgewertet (Abschnitt 6.1). Auf Grundlage bereits bestehender Methoden werden unter Berücksichtigung der aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse Lösungsansätze zur Schadensbehebung aufgezeigt. Dabei handelt es sich um wurzelschonende Verfahren (Abschnitt 6.3) und um Verfahren mit Wurzelentfernung (Abschnitt 6.4). Zur Veranschaulichung werden die wurzelerhaltenden Maßnahmen grafisch dargestellt (Darstellungen 47 bis 58). Die möglichen Anwendungsfälle und Maßnahmen sind in einem Maßnahmenkatalog aufgeführt (Tabelle 16, nach Abschnitt 6.5). Eine zusammenfassende Betrachtung erfolgt im Fazit (Abschnitt 6.5).

6.1 Schadensbehebung in der Fachliteratur

In der Fachliteratur wird der Aspekt der Schadensbehebung meist nur am Rande erörtert. Die Autoren äußern sich kritisch gegenüber der Wurzelkappung (HAMILTON 1984b; URBAN 1994; NICOLL u. ARMSTRONG 1998). Diese Maßnahme wird in Abhängigkeit vom Wurzeldurchmesser als Beeinträchtigung der Baumstatik und der Vitalität als wenig dauerhaft und möglicherweise als schadensverstärkend angesehen. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit bestätigen diese Einschätzung im wesentlichen (siehe Kapitel 4). Als weitere Maßnahmen werden die Baumscheibenerweiterung (HAMILTON 1984b; URBAN 1994), der Einbau von Wurzelbrücken (HAMILTON 1984b), das Überbauen der Wurzeln auf höherem Niveau (HAMILTON 1984b; PHILLIPS in LESSER u. AUGSDORFER 1994), die Verwendung von anpassungsfähigen Materialien wie Asphalt oder Schotter (HAMILTON 1984; LESSER u. AUGSDORFER 1994) sowie die Baumfällung in Extremfällen (NICOLLS u. ARMSTRONG 1998) genannt. Zusätzlich wird der Einbau spezieller vertikaler Wurzelbarrieren zwischen Baumscheibe und Verkehrsfläche erwogen (HAMILTON 1984b; URBAN 1994). Sie werden in Kapitel 7 diskutiert. Ihre Funktion ist mit den hierzulande üblichen Kanten- und Bordsteinen vergleichbar. Als eine weitere baumschonende Lösungsmöglichkeit wird angeregt, gegebenenfalls die ständigen Reparaturarbeiten zu tolerieren (URBAN 1994). Eine Differenzierung und Abwägung der Maßnahmen für den Einzelfall unterbleibt, so dass eine tiefer gehende Diskussion mit den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Lösungsansätzen nicht möglich ist. Über eine systematische Untersuchung der Maßnahmen ist nichts bekannt. Vielmehr wird Forschungsbedarf formuliert.

6.2 Grundsätze bei der Schadensbehebung

Die Behebung bestehender Schäden könnte prinzipiell unter alleiniger Berücksichtigung der bautechnischen Erfordernisse oder der Belange des Baumes erfolgen. Aus bautechnischer Sicht ist eine regelgerechte Wiederherstellung der Verkehrsfläche die beste und dauerhafteste Lösung. Hierzu ist ein Entfernen der Wurzeln notwendig, da sie einerseits eine stabile Lage von Wegedecken und Randeinfassungen erschweren und andererseits früher oder später zu neuen Schäden führen. Aus Baumsicht

hingegen ist eine Baumscheibenerweiterung die beste Maßnahme, weil sie wurzelschonend ist und den Lebensraum des Baumes erweitert. Wurzelverletzungen oder gar -verluste sind zu vermeiden. Die Zielsetzungen bei der Schadensbehebung sind also gegensätzlich. Im Regelfall muss jedoch beiden Seiten Rechnung getragen werden, so dass als Kompromisslösung wurzelschonende Verfahren zur Wiederherstellung verkehrssicherer Wegeflächen anzustreben sind.

Es sind keine Regelwerke über das Vorgehen bei der Behebung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln bekannt. Zum Umgang mit dem Wurzelbereich von Bäumen können die DIN 18920 „Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen“ (1990), die gleichnamige RAS-LP 4 (FGSV 1999) und die ZTV Baumpflege (FLL 2001) heran gezogen werden. Zwar thematisieren diese nicht explizit die untersuchte Problematik, letztlich handelt es sich jedoch auch bei Reparaturarbeiten an Verkehrsflächen um Baumaßnahmen. Die ZTV Baumpflege legt fest: „Im Wurzelbereich darf nur so gearbeitet werden, dass Verdichtungen des Bodens und Wurzelschäden vermieden werden“ (FLL 2001, 51). Die DIN 18920 definiert den Wurzelbereich als „die Bodenfläche unter der Krone von Bäumen (Kronentraufe) zuzüglich 1,5 m, bei Säulenformen zuzüglich 5 m nach allen Seiten“ (DIN 18920, 3.5). In der RAS-LP 4 wird betont, dass die Wurzelreichweite an Straßenstandorten von diesen Anhaltswerten erheblich abweichen kann. Sie legt außerdem fest: „Baumaßnahmen, die weitgehenden Schutz bzw. Erhalt der Wurzeln gewährleisten, sind stets vorzuziehen. Sind Arbeiten im Wurzelbereich unvermeidbar, so ist der Wurzelverlust so gering wie möglich zu halten. Der Abstand zum Stamm soll hierbei den vierfachen Umfang des Stammes betragen, mindestens jedoch 2,50 m“ (FGSV 1999, 6). Diese Forderung ist in Anwendung auf die vorliegende Fragestellung nicht umsetzbar, da die meisten Wegebeläge von vornherein näher an den Stamm heran reichen. Aus der DIN 18920 geht außerdem hervor, dass Wurzeln mit einem Durchmesser ab 3 cm nicht entfernt werden sollen und wie Wurzeln geringeren Durchmessers fachgerecht zu schneiden und nachzubehandeln sind. Diese Regelung gilt für den „Schutz des Wurzelbereiches beim Aushub von Gräben oder Baugruben“ (DIN 18920, 3.9.1). Mangels spezieller Regelungen wird sie jedoch auch für die vorliegende Fragestellung herangezogen, zumal es sich um einen vergleichbaren Eingriff handelt. Wurzelerhaltenden Maßnahmen wird in den Regelwerken eindeutig Vorrang eingeräumt. Wenn Wurzelverluste nicht gänzlich zu vermeiden sind, ist eine möglichst wurzelschonende Vorgehensweise anzuwenden. Hinweise zur fachgerechten Wurzelbehandlung sind außerdem in der ZTV Baumpflege enthalten (FLL 2001, 51f.). Für weitere Informationen zum Schutz und zur fachgerechten Behandlung von Wurzeln sei auf die Fachliteratur verwiesen (z. B. HÖSTER 1993, BALDER 1998).

Wurzelerhaltende Maßnahmen müssen also im Regelfall Vorrang haben vor Wurzelentfernungen. Eingriffe, die eine starke Beeinträchtigung der Baumvitalität oder der Baumstatik bedeuten, sind gänzlich zu unterlassen. In der Praxis müssen jedoch auch Kompromisslösungen in Betracht gezogen werden, bei denen der Eingriff möglichst wurzelschonend vorgenommen wird und die Wurzelverluste gering sind. Insbesondere bei dicht unter dem Belag wachsenden Wurzeln ist eine Schadensregulierung unter vollständigem Erhalt der Wurzeln nur mit hohem Aufwand und unter Hinnahme von bautechnischen Mängeln bei zudem geringer Dauerhaftigkeit möglich. Die Entscheidung für eine Wurzelentfernung muss im Einzelfall abgewogen werden und die Standortqualitäten und die Baumvitalität

berücksichtigen. Oftmals ist dies erst nach Aufnahme des Belags möglich. Doch auch dann ist eine Einschätzung schwer, da die Beschaffenheit der an die Pflanzgrube angrenzenden Bodenbereiche und die Bedeutung der zu entfernenden Wurzelpartie für die Versorgung des Baumes nicht mit Sicherheit zu bestimmen sind. Bei günstigen Bodenverhältnissen hat die betreffende Wurzelpartie möglicherweise einen geringen Anteil am gesamten Wurzelvolumen, so dass eine Wurzelentfernung gut verkraftet wird. Bei ungünstigen Bodenverhältnissen kann das Gegenteil der Fall sein. Im folgenden werden sowohl wurzelerhaltende Maßnahmen als auch solche mit Wurzelentfernung diskutiert. Im Maßnahmenkatalog werden die möglichen Anwendungsfälle und Maßnahmen zusammengefasst.

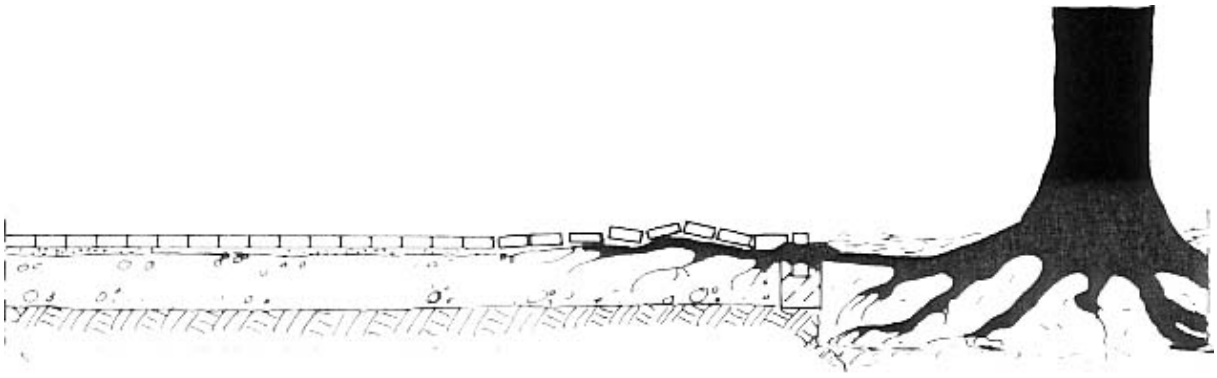
6.3 Wurzelerhaltende Verfahren

Bei wurzelerhaltenden Verfahren werden Wurzelverluste vermieden oder zumindest minimiert. Hierzu sind Anpassungen der Verkehrsfläche an das Wurzelsystem des Baumes erforderlich. Sie betreffen sowohl die Bautechnik als auch den Entwurf von Verkehrsflächen.

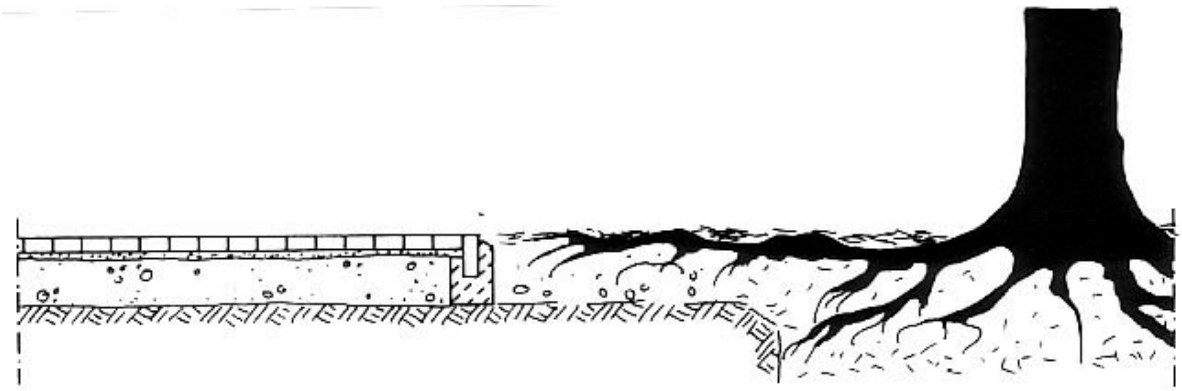
6.3.1 Baumscheibenerweiterung

Bei Baumscheibenerweiterungen werden die Randeinfassung, der Wegebelag, die Tragschicht und als Substrat ungeeignete Stoffe wurzelschonend entfernt, die Randeinfassungen in größerem Abstand zum Stamm neu gesetzt und der entstandene Raum mit Pflanzsubstrat aufgefüllt. Diese Maßnahme stellt eine Baumumfeldverbesserung nach ZTV Baumpflege dar (FLL 2001, 53ff.). Bei starker Verwachsung der Wurzeln mit der Randeinfassung oder bei über- oder eingewachsenen Fundamenten verbleiben diese oftmals im Boden. Die Arbeiten müssen größtenteils behutsam per Hand vorgenommen werden.

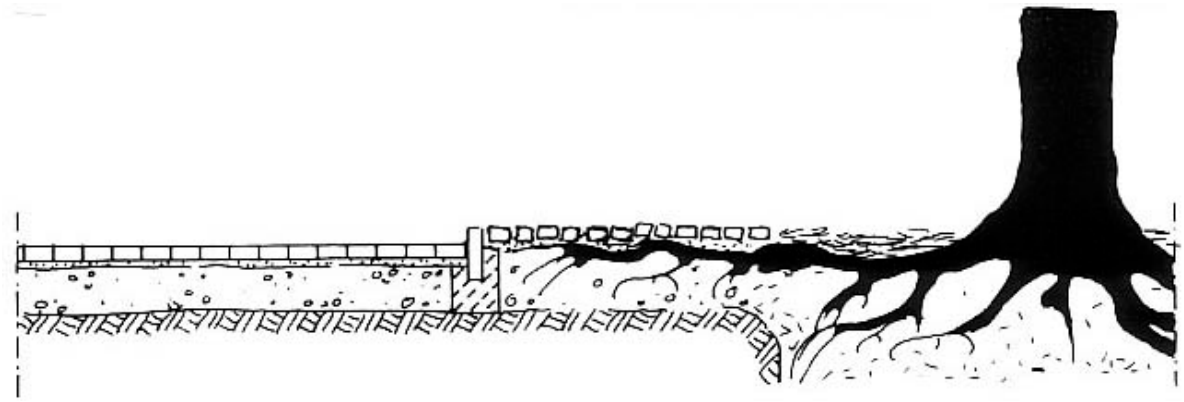
Grundsätzlich sollte bei allen wurzelbedingten Reparaturmaßnahmen an Verkehrsflächen zunächst überprüft werden, ob eine Baumscheibenerweiterung möglich und fachlich sinnvoll ist. Voraussetzung ist, dass ausreichend Platz vorhanden ist und die Fläche nicht zugunsten der Nutzbarkeit befestigt sein muss. Ferner sollten die Wurzeln vor Belastungen geschützt werden und die fachgerechte Pflege der Baumscheibe gesichert sein. Die Baumscheibe selbst kann offen bleiben oder bepflanzt werden (Darstellung 120) oder als Schutz vor gelegentlicher Trittbelastung mit wasser- und luftdurchlässigen Materialien wie Großpflaster befestigt werden (Darstellung 121).



Darstellung 119: Schadhafte Verkehrsfläche als Ausgangssituation für Maßnahmen zur Schadensbehebung



Darstellung 120: Schadensbehebung durch Baumscheibenerweiterung mit offener Baumscheibe

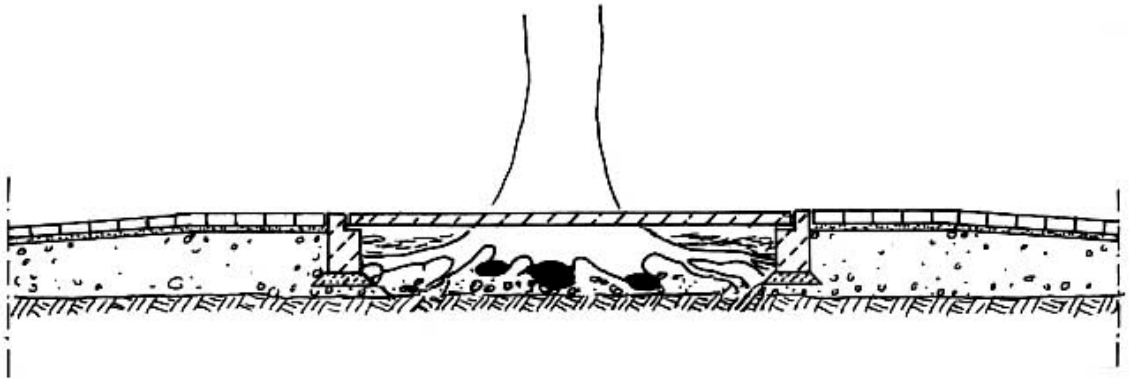


Darstellung 121: Schadensbehebung durch Baumscheibenerweiterung mit befestigter Baumscheibe

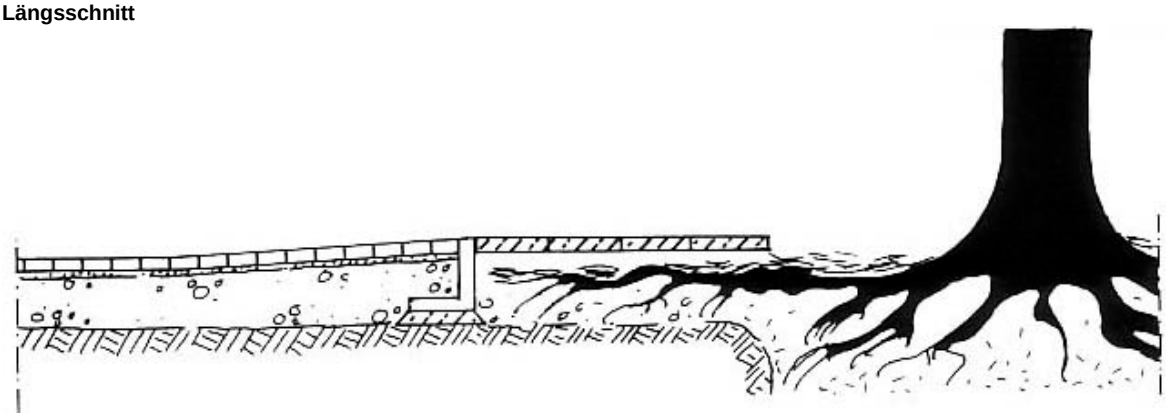
Baumscheibenerweiterungen sind insbesondere für kleine Baumscheiben oder bei oberflächennahen, dicken Wurzeln zu empfehlen. Gegebenenfalls sind auch kombinierte Lösungen denkbar, bei denen nur eine begrenzte Baumscheibenerweiterung vorgenommen wird. Die übrigen Wurzeln können entfernt oder durch eine Wurzelbrücke überbrückt werden (siehe Abschnitt 6.3.2). Alternativ kann auch die Fläche über den Wurzeln wurzelschonend befestigt und eine Bordsteinbrücke (Bordstein mit Durchlässen) eingebaut werden (siehe Abschnitte 6.3.3 bis 6.3.5, 6.3.7). Sehr wirksam ist die Verbindung benachbarter Baumscheiben, da auf dieser Weise viel Wurzelraum gewonnen wird. Baumscheibenerweiterungen sind dauerhafte Maßnahmen, da in diesem Bereich – im Gegensatz zur angrenzenden Verkehrsfläche – keine Anhebungen mehr auftreten können und dem Baum eine bessere Entwicklungsgrundlage geboten wird. Nachteilig sind der hohe Pflegeaufwand und der Schutzbedarf der Baumscheibe. Die Wurzelfreilegungen haben außerdem gezeigt, wie weitläufig sich Wurzelsysteme unter Wegebelägen entwickeln können. Baumscheibenerweiterungen umfassen unter Umständen nur einen Bruchteil der tatsächlich vorhandenen Wurzeln.

6.3.2 Wurzelbrücken

Wurzelbrücken ermöglichen die Befestigung und Nutzung von Wurzelbereichen ohne Druckbelastung auf die darunter liegenden Wurzeln. Hierzu wird die Baumscheibe wie zuvor beschrieben erweitert und mit freitragenden Stahlbetonelementen überbrückt (Darstellung 122). Diese lagern auf Punkt- oder Streifenfundamenten, so dass zwischen der Wurzel und der Unterkante der Brückenelemente ein freier Raum bleibt. Eine Anhebungen der Fläche durch Wurzeln ist daher nicht zu erwarten.



Längsschnitt

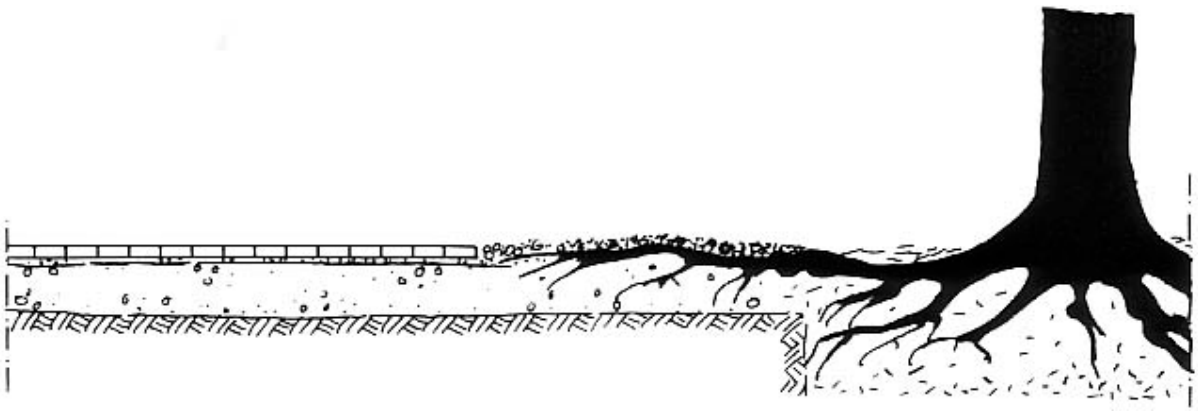


Querschnitt
Darstellung 122: Schadensbehebung durch Einbau einer Wurzelbrücke

Diese dauerhafte und wurzelschonende Lösung beinhaltet einige Nachteile: Die Fundamente dürfen die Wurzeln nicht beschädigen und müssen daher in Handarbeit und oftmals außerhalb des engeren Wurzelbereiches eingebaut werden. Da das Niveau deutlich über der Ursprungshöhe liegt, muss die umgebende Fläche unter mehr oder weniger großem Aufwand an die neue Höhe angepasst werden. Der Einbau von Wurzelbrücken ist mit hohen Kosten verbunden und kommt daher in der Regel nur als Ausnahmelösung für wertvolle und vitale Altbäume in Betracht, bei denen weder eine Baumscheibenerweiterung noch eine Belagsregulierung durchführbar ist.

6.3.3 Wassergebundene Wegedecken

Anpassungsfähige Wegebaustoffe wie Mineralgemische und wassergebundene Wegedecken können anstelle der ursprünglichen Wegedecke eingebaut werden, wenn eine Regulierung mit dem ursprünglichen Material nicht möglich ist und Baumscheibenerweiterungen oder Wurzelbrücken nicht in Frage kommen. Dies kann z. B. bei dicken Starkwurzeln der Fall sein. Der Vorteil liegt in der Anpassungsfähigkeit des Materials, das die Räume zwischen den Wurzeln auffüllt und so Höhenunterschiede in gewissem Rahmen angleicht. Bei weiterem Dickenwachstum der Wurzeln gibt das Material nach und bildet keine Stolperkanten. Auf diese Weise kann eine niveaugleiche und außerdem kostengünstige Regulierung des Wegebelags erfolgen (Darstellung 123). Durch den Belagswechsel und die Rauhigkeit kann zudem von einer erhöhten Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer ausgegangen werden.

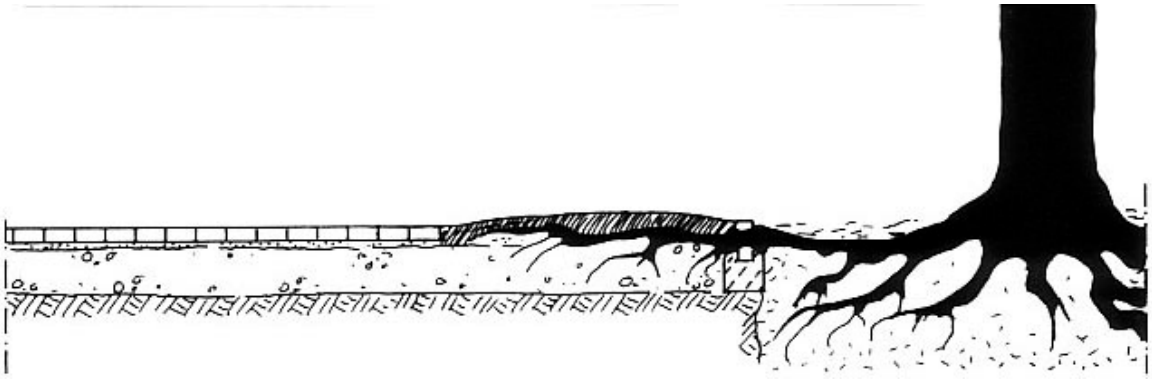


Darstellung 123: Schadensbehebung durch Einbau eines Mineralgemischs mit Ausbau der Randeinfassung

Nachteilig ist, dass das Material bei regelgerechter Bauweise verdichtet werden muss und nach einiger Zeit kaum mehr Wasser und Luft durchlässt, so dass unverholzte Feinwurzeln absterben können. Ein Schutz vor Druckbelastung besteht nicht. Die Lösung bietet sich daher nur für größere Starkwurzeln an, die weniger atmen und weniger druckempfindlich sind. Der Einbau sollte zumindest in sensiblen Bereichen in Handarbeit erfolgen. Weitere Nachteile liegen in der gestalterischen Qualität und der eingeschränkten Nutzbarkeit der Decke insbesondere bei Nässe, Frost-/Tauwechsel oder längerer Trockenheit. Das Material erodiert leicht und kann durch Trittbelastung im Laufe der Zeit abgetragen werden. Höhere Niveauangleichungen sind daher schwierig. Insgesamt ist die Lösung für gering frequentierte Verkehrsflächen mit untergeordnetem gestalterischen Anspruch geeignet.

6.3.4 Asphaltdecken

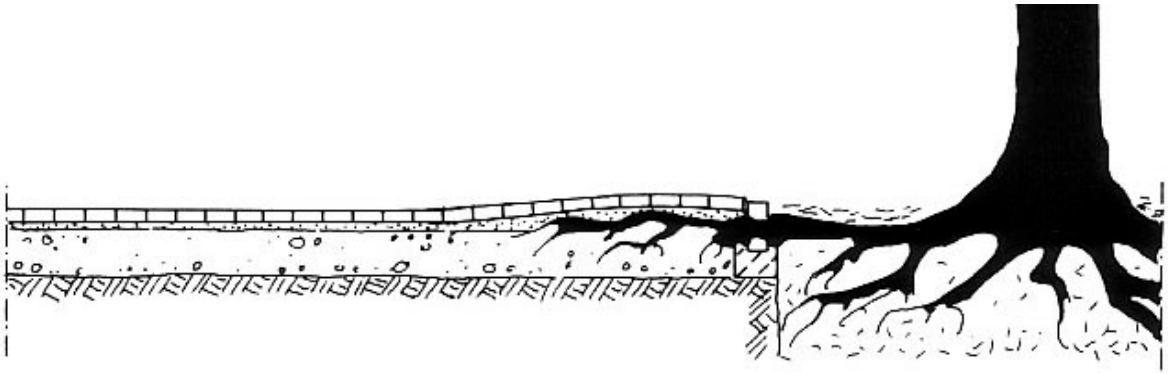
Asphaltdecken sind durch die Plastizität des noch nicht abgebundenen Materials und der daraus resultierenden Anpassungsfähigkeit in Form und Höhe ähnlich einsetzbar wie die zuvor besprochenen Mineralgemische und wassergebundenen Wegedecken (Darstellung 124). Der Einbau ist auch mit geringen Schichtdicken möglich, so dass auch kleine Flächen wie z. B. einzelne Gehwegplatten mit Asphalt befestigt werden können. Da das Material abbindet, können auch größere Höhenunterschiede auf vergleichsweise kleinem Raum überwunden werden. Beim Dickenwachstum der Wurzel gibt die Decke nach, so dass sich zunächst eine Wölbung bildet, die jedoch nicht unbedingt eine Gefahrenstelle darstellt. Bei größerem Wachstum entstehen Risse, die möglicherweise mit gleichem Material oder mit Bitumen verfüllt werden können. Bei einem Belagswechsel kann von einer erhöhten Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer ausgegangen werden. Die Flächen sind gut nutzbar, haben aber bei einem Belagswechsel gestalterische Nachteile. Über die Auswirkung der hohen Einbautemperaturen auf die Wurzeln ist nichts bekannt. Es kann jedoch beobachtet werden, dass bei regulierten Flächen erneut Schäden durch Wurzeln auftreten und demnach zumindest verholzte, dickere Wurzeln kaum beeinträchtigt werden. Unverholzte Feinwurzeln hingegen dürften absterben. Möglicherweise ist es sinnvoll, als Schutzlage auf den Wurzeln eine Sandschicht oder ein dickes Vlies aufzubringen. Gussasphalt hat gegenüber Walzasphalt den Vorteil, dass er nicht verdichtet werden muss, was insbesondere bei kleinen Flächen bautechnisch vorteilhaft ist und die Wurzeln schont. Das Material ist durch den höheren Bitumengehalt elastischer und rissfester, so dass eine geringere Reparaturhäufigkeit zu erwarten ist.



Darstellung 124: Schadensbehebung durch Einbau von Asphalt unter Beibehaltung der Randeinfassung

6.3.5 Wiederherstellung der Wegedecke in erhöhtem Niveau durch Materialauftrag

Wenn Wurzeln in oder unter der Deckschicht bei einer Belagsregulierung unter Beibehalt der Belagsart erhalten werden sollen, so ist dies nur durch einen Materialauftrag und eine damit verbundene Niveauerhöhung möglich. Bei Asphaltflächen ist dies relativ einfach und unter Umständen auch ohne Entfernen der schadhaften Decke möglich (siehe oben). Bei Pflaster- und Plattenbelägen muss die Deckschicht aufgenommen, das Niveau durch Auffüllen von Sand oder Kiessand geebnet, das Pflasterbett aufgebracht und der Belag neu versetzt werden (Darstellung 125). Gegebenenfalls ist auch die Randeinfassung im Niveau anzuheben.



Darstellung 125: Schadensbehebung durch Wiederherstellung der Wegedecke in erhöhtem Niveau durch Materialauftrag

Bautechnisch bestehen bei dieser Variante zahlreiche Schwierigkeiten: Da der Anschluss zum Ursprungsniveau hergestellt werden muss, ergibt sich eine Wölbung des Niveaus. Diese ist mit Pflaster relativ gut formbar. Plattenbeläge hingegen erfordern großflächige, fast ebene Unterlagen mit geringen Steigungswechseln, da sie andernfalls aufkanten oder kippeln. Häufig werden daher Platten großflächig durch Pflaster oder kleinflächig durch Asphalt ersetzt. Gegebenenfalls werden auch diagonal oder quer geschnittene Platten verwendet. Bei regelgerechter Bauweise muss die Deckschicht verdichtet werden. Dies ist zum einen im Hinblick auf die Wurzeln problematisch und zum anderen durch das Federn des Belags auf den darunter liegenden Wurzeln oftmals nicht möglich. Die Schichtdicken über den Wurzeln müssen daher entsprechend groß sein. Dies kommt eigentlich einem Bodenauftrag gleich, der den Regelwerken zufolge zu vermeiden ist (DIN 18920, RAS-LP 4). Andererseits sind die Wurzeln durch ihren Wuchsort an die Überdeckung adaptiert, so dass die zu erwartende Beeinträchtigung geringer ist als bei einem Bodenauftrag auf zuvor offene Wurzelbereiche, auf die sich die Re-

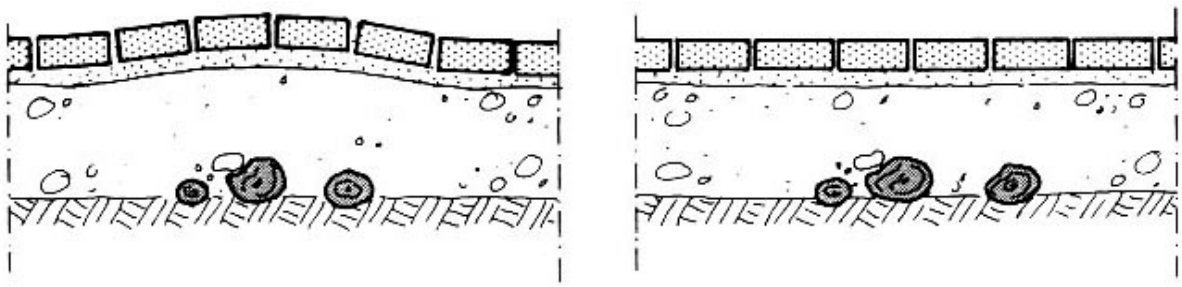
gelwerke beziehen. Er kann daher in gewissen Grenzen als Kompromiss hingenommen werden. Als Material sollte im Bereich von Feinwurzeln Sand oder Kiessand mit enger Stufung eingesetzt werden, um eine gute Luftdurchlässigkeit zu gewährleisten. Zur Schonung der Wurzeln sollte in sensiblen Bereichen manuell verdichtet werden. Da regelgerechte Bauweisen nicht möglich sind und das Dickenwachstum unter dem Belag fortgesetzt wird, ist dieser in der Praxis häufig angewendete Lösungsansatz allerdings nicht sehr dauerhaft. Insbesondere bei jüngeren und sehr wuchskräftigen Bäumen treten nach kurzer Zeit erneut Anhebungen auf.

Eine Variante dieser Lösung ist das Überpflastern des Wurzelbereiches mit großformatigem Natursteinpflaster. Dies hat zum einen Vorteile für das Wurzelwachstum und ist bautechnisch durch die kleineren, unregelmäßig geformten Steine besser ausführbar. Zum anderen wird die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer durch den Belagswechsel und die Unebenheit der Oberfläche erhöht. Bei erneuten Anhebungen entstehen Gefahrenstellen langsamer. Die Reparaturintervalle sind daher grösser als bei ebenen Decken wie beispielsweise Plattenbelägen. Diese Variante ist der Baumscheibenerweiterung mit befestigter Baumscheibe ähnlich (siehe Abschnitt 6.3.1).

Die Wiederherstellung der Wegedecken auf erhöhtem Niveau ermöglicht den Beibehalt der Wegedeckenart ist somit gestalterisch vorteilhaft. Bau- und vegetationstechnisch ist sie jedoch mit zahlreichen Problemen behaftet. Sie ist daher in solchen Fällen angebracht, wo eine Wurzelentnahme nicht sinnvoll und eine Baumscheibenerweiterung nicht möglich ist, und zugleich hohe Anforderungen an die Gestaltung bestehen.

6.3.6 Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau durch Materialabtrag

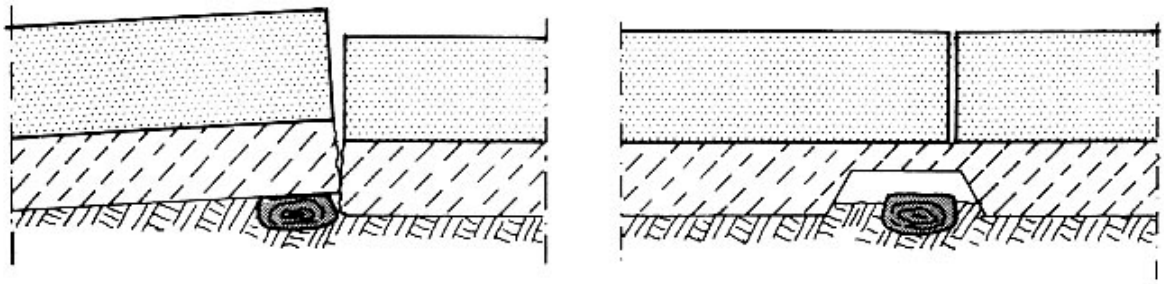
Schäden, die durch in oder unter der obersten Tragschicht wachsende Starkwurzeln verursacht werden, können durch Materialabtrag in der Tragschicht reguliert werden. Die Deckschicht kann dann auf dem ursprünglichen Niveau eingebaut werden (Darstellung 126). Schäden dieser Art sind daher vergleichsweise einfach zu beheben, sofern nicht zugleich Wurzeln in darüber liegenden Bodenbereichen wachsen, was allerdings oftmals der Fall sein dürfte. Bei tiefen und bereits sehr dicken Wurzeln sowie bei Pflaster- oder Asphaltdecken ist diese Lösung relativ dauerhaft, bei Plattenbelägen kommt es etwas früher zu Aufkantungen.



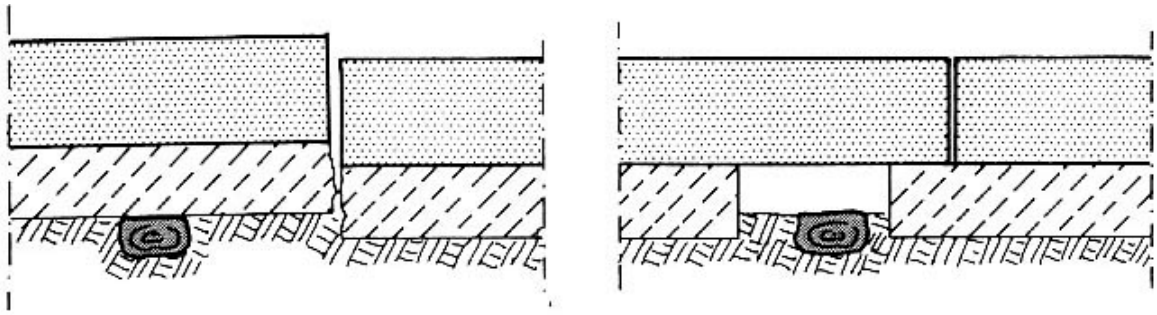
Darstellung 126: Schadensbehebung durch Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau durch Materialabtrag

6.3.7 Wiederherstellung der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Materialabtrag oder Bordsteinbrücke

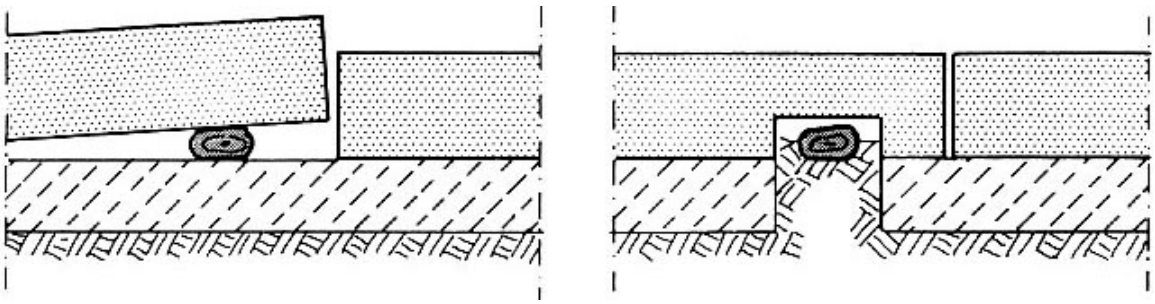
Schäden an Randeinfassungen und anderen Baukörpern wie Pflasterrinnen treten in der Regel erst bei dickeren Starkwurzeln auf. Eine Wurzelentfernung scheidet daher zumeist aus. Eine Behebung ist deswegen und aufgrund der Größe der Bauteile und der Tiefe der Fundamentierung mit hohem Arbeitsaufwand verbunden. Da sich Randeinfassungen häufig in Randbereichen von Verkehrsflächen befinden, sind Schäden aus Sicht der Verkehrssicherheit meist lange hinnehmbar. Bei Handlungsbedarf ist zunächst eine Baumscheibenerweiterung zu prüfen (siehe oben). Bei der Behebung von Schäden durch Wurzeln unter der Fundamentierung ist die Randeinfassung nebst Fundament zu entfernen. Die Arbeiten müssen sehr behutsam erfolgen, um eine Wurzelbeschädigung zu vermeiden. Beim Einbau wird die Betonbettung über der Wurzel dünner ausgeführt (Darstellung 127) oder der Stein in der Höhe reduziert. Da bei aufliegenden Randeinfassungen bald mit neuen Schäden zu rechnen ist, empfiehlt sich über Punktfundamente der Einbau von Bordsteinbrücken mit konventionellem Bordstein (Darstellung 128) oder als Bordstein mit Aussparungen für Wurzeln (Darstellung 129).



Darstellung 127: Schadensbehebung durch Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Materialabtrag



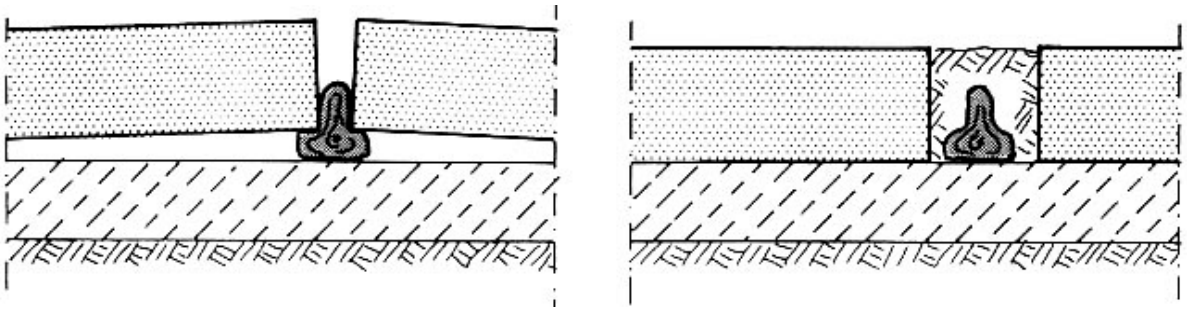
Darstellung 128: Schadensbehebung durch Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Bordsteinbrücke ohne Aussparung



Darstellung 129: Schadensbehebung durch Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Bordsteinbrücke mit Aussparung

6.3.8 Verzicht auf Randeinfassung in Teilstück

Bei Schäden durch Wurzeln in den Fugen der Randeinfassung oder zwischen Stein und Fundamentierung ist eine Regulierung unter Bewahrung der Wurzel kaum möglich. Wenn eine Baumscheibenerweiterung aus Platzgründen ausscheidet und eine Bordsteinbrücke nicht in Frage kommt, weil die Wurzel zu dick ist oder zu dicht unter der Oberfläche wächst, kann die Randeinfassung auf diesem Teilstück entfernt werden (Darstellung 130). Die Lücke wird dann früher oder später durch die Wurzel ausgefüllt. Diese Lösung ist dann sinnvoll, wenn die Wurzel aufgrund ihrer Dicke nicht entfernt werden darf und der angrenzende Wegebelag nicht geschädigt ist, weil die Wurzel in die Tiefe weiter wächst. In Extremfällen ist zugunsten des Baumes ein völliger Verzicht auf die ursprüngliche Randeinfassung angebracht und stattdessen die Wegedecke mit einer Rückenstütze aus Beton oder mit einer umlaufenden Bandstahleinfassung gegen die Pflanzgrube zu sichern. Neue Schäden an der Wegedecke müssen in diesem Falle hingenommen werden.



Darstellung 130: Schadensbehebung durch Verzicht auf Randeinfassung in Teilstück

6.4 Verfahren mit Wurzelentfernung

Aufgrund der skizzierten Schwierigkeiten werden in der Praxis Wurzeln unter Wegedecken häufig entfernt, um den Belag niveaugleich wiederherzustellen. Den Regelwerken folgend sollte diese Maßnahme nur bei Wurzeln mit einem Durchmesser von unter 3 cm angewendet werden. Unter Umständen kann auch eine Entnahme größerer Wurzeln sinnvoll sein, wenn dies bautechnisch erforderlich und aus baumpflegerischer Sicht unter Berücksichtigung der Baumvitalität und des Standortes zu vertreten ist. Ungeachtet dessen kann auch die Entnahme großer Mengen feinerer Wurzeln eine Beeinträchtigung des Baumes darstellen. Auch hier ist eine Abwägung im Einzelfall gefordert. Die Entfernung von Wurzeln muss der DIN 18920 (1990) und der ZTV Baumpflege (FLL 2001, 52) gemäß fachgerecht vorgenommen werden. Der Vorteil dieser Methode liegt in der bautechnisch korrekten und relativ dauerhaften Wiederherstellung der Verkehrsfläche.

6.4.1 Wiederherstellung der Wegedecke nach Wurzelentfernung

Die Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau nach Wurzelentfernung ist dann zu empfehlen, wenn nur einzelne Wurzelstränge zu Anhebungen führen und deren Entnahme einen längeren Zeitraum ohne Reparaturen verspricht. Aus Rücksicht auf den Baum werden häufig nur die dickeren, schadensträchtigen Wurzeln entnommen, während die feineren verbleiben. Dauerhaft ist diese Lösung nicht: Früher oder später bilden sich dicke Wurzeln aus den verbliebenen feinen heraus. Oftmals befindet sich die Schnittstelle unter der Wegedecke. Hier ist mit dem Austrieb mehrerer neuer Wurzeln

zu rechnen, so dass sich das Problem unter Umständen verstärkt. Sind Beläge vollständig durchwurzelt, was bei fehlender Randeinfassung die Regel sein dürfte, so ist die Entfernung einzelner dicker, schadensträchtiger Wurzeln zwar schonender als die sämtlicher Wurzeln, führt aber zu ständigen Regulierungen und Eingriffen. Wurzeln wachsen bisweilen auch in den Fugen von Pflaster- und Plattenbelägen. Sie beeinträchtigen die Verkehrssicherheit erst, wenn sie den Belag anheben oder nach entsprechendem Dickenwachstum selbst zu Stolperfallen werden. Die Schadensbehebung ist nur durch Entfernen der Wurzeln möglich, was im Regelfall aufgrund der noch geringen Wurzeldicke möglich sein sollte. Andernfalls ist zu überprüfen, ob eine Baumscheibenerweiterung möglich und sinnvoll ist. Diese Schadensform geht häufig mit Wurzeln in der Pflasterbettung einher.

6.4.2 Wiedereinbau der Randeinfassung nach Wurzelentfernung

Schäden an Randeinfassungen können bei Wurzeln < 3 cm regelgerecht und relativ dauerhaft behoben werden. Bei oberflächennahen Wurzeln in den Stoßfugen von Randeinfassungen können diese unter Umständen ohne Aufnahme des Steins gekappt werden. Bei Wurzeln, die in tieferen Bodenschichten in Stoßfugen, zwischen Randeinfassung und Fundamentierung oder unter der Fundamentierung wachsen, ist der Ausbau von Stein und Fundamentierung erforderlich. Die Wurzeln werden dann fachgerecht entfernt und die Randeinfassung neu gesetzt. Dies ist mit einem hohen Aufwand verbunden, zumal ein ausreichender Arbeitsraum geschaffen werden muss. Insbesondere bei kleineren Wurzeln in den Fugen von Randeinfassungen sind Aufwand und Nutzen abzuwägen. Gefahrenstellen treten in der Regel erst bei dickeren Wurzeln auf. Reparaturmaßnahmen werden deshalb häufig erst dann durchgeführt, wenn eine Wurzelentfernung nicht sinnvoll ist (siehe Abschnitt 6.3.7).

6.4.3 Wiederherstellung der Verkehrsfläche nach Baumentfernung

Nicht immer können wurzelerhaltende oder wurzelschonende Lösungen angewendet werden. In Extremfällen muss auch eine Entfernung des Baumes in Betracht gezogen werden, wenn Schäden an der Verkehrsfläche nicht hinnehmbar und mit den vorangehenden Ansätzen nicht regulierbar sind. Dies ist z. B. der Fall, wenn der Baum aufgrund falscher Planung zu groß geworden ist und die Belange der Verkehrssicherheit vorrangig zu berücksichtigen sind. Oftmals ist dies mit Raumproblemen im oberirdischen Bereich verbunden. Fällungen sind auch dann angebracht, wenn ein Baum einen schlechten Gesundheitszustand aufweist und dennoch in hohem Maße Beläge hebt, was z. B. bei Verletzungen im Kronenbereich der Fall sein kann.

die Lage und Dicke der schadensträchtigen Wurzeln erkennbar sind. Zugunsten des Baumes müssen im Regelfall wurzelschonende Maßnahmen Vorrang haben vor solchen mit Wurzelentfernung.

Tabelle 16: Maßnahmenkatalog zur Schadensbehebung bei befestigten Flächen

Grundsätze:

- Falls die betroffene Fläche nicht befestigt sein muss, sollte eine Baumscheibenerweiterung erfolgen.
- Entscheidungen sind im Einzelfall zu treffen.
- Insbesondere bei angestrebter Wurzelentfernung ist eine Begutachtung durch baumpflegerisch geschultes Personal vorzunehmen.

Wegedecken

(A) Wurzeln in Fugen

Schadbild: aufgeweitete Fugen, Wurzeln an der Oberfläche

<table>
<tr><th>Wurzeldicke</th><th>1. Kriterium</th><th>2. Kriterium</th><th>3. Kriterium</th><th>Maßnahme</th></tr>
<tr><td>Wurzeln < 3 cm</td><td colspan="3"></td><td>Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau nach Wurzelentfernung (6.4.1)</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Wurzeln ≥ 3 cm</td><td rowspan="4">Niveauanhebung möglich</td><td rowspan="2">geringe gestalterische Anforderungen</td><td>geringe Frequentierung</td><td>Wassergebundene Wegedecke (6.3.3)</td></tr>
<tr><td>hohe Frequentierung</td><td>Asphalt (6.3.4)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">hohe gestalterische Anforderungen</td><td>geringe bis mäßige Frequentierung</td><td>Wiederherstellung der Wegedecke in erhöhtem Niveau durch Materialauftrag (6.3.5)</td></tr>
<tr><td>hohe Frequentierung</td><td>Wurzelbrücke (6.3.2)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Niveauanhebung nicht möglich</td><td colspan="2">Schäden außerhalb 2,5 m ab Stammfuß</td><td>Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau nach Wurzelentfernung (6.4.1)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Schäden innerhalb 2,5 m ab Stammfuß</td><td>Baumentfernung (6.4.3)</td></tr>
</table>

Wegedecken

(B) Wurzeln in der Pflasterbettung bzw. unter dem Belag

Schadbild: Anhebungen, Aufkantungen, in Pflaster- und Plattenbelägen, Wölbungen und Risse in Asphalt

Wurzeldicke	1. Kriterium	2. Kriterium	weitere Kriterien		Maßnahme
Wurzeln < 3 cm	geringe Wurzelmenge				Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau nach Wurzelentfernung (6.4.1)
	große Wurzelmenge	Niveauanhebung möglich			Wiederherstellung der Wegedecke in erhöhtem Niveau durch Materialauftrag (6.3.5)
		Niveauanhebung nicht möglich			Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau nach Wurzelentfernung (6.4.1)
Wurzeln ≥ 3 cm	geringe gestalterische Anforderungen	geringe Frequentierung			Wassergebundene Wegedecke (6.3.3)
		hohe Frequentierung			Asphalt (6.3.4)
	hohe gestalterische Anforderungen	Niveauanhebung möglich	geringe bis mäßige Frequentierung		Wiederherstellung der Wegedecke in erhöhtem Niveau durch Materialauftrag (6.3.5)
			hohe Frequentierung		Wurzelbrücke (6.3.2)
		Niveauanhebung nicht möglich	Einzelwurzel ohne statische Bedeutung		Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau nach Wurzelentfernung (6.4.1)
			Einzelwurzel mit statischer Bedeutung oder mehrere Wurzeln ohne statische Bedeutung	Schaden außerhalb 2,5 m ab Stammfuß, Baum vital	Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau nach Wurzelentfernung (6.4.1)
				Schaden außerhalb 2,5 m ab Stammfuß, Baum nicht vital	Baumentfernung (6.4.3)
				Schaden innerhalb 2,5 m ab Stammfuß	Baumentfernung (6.4.3)

(C) Wurzeln in oder unter der obersten Tragschicht

Schadbild: Wölbung, Aufkantung

Wurzeldicke	Kriterium	Maßnahme
Wurzeln ≥ 3 cm	Materialabtrag möglich	Wiederherstellung der Wegedecke in gleichem Niveau durch Materialabtrag (6.3.6)
	Materialabtrag nicht möglich	siehe (B) - Wurzeln in der Pflasterbettung bzw. unter dem Belag

(A) Wurzeln unter Fundamentierungen

Schadbild: Aufkantung, Anhebung, Bruch, seitliche Verschiebung

Wurzeldicke	**Kriterium**	**Maßnahme**
Wurzeln < 3 cm	(kein weiteres)	Wiedereinbau der Randeinfassung nach Wurzelentfernung (6.4.2)
Wurzeln ≥ 3 cm	Niveauausgleich durch Minderdicken in Bettung oder Zuschnitt möglich	Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Materialabtrag oder Bordsteinbrücke (6.3.7)
	Niveauausgleich nicht möglich, Wurzel zu dick oder zu hoch	Verzicht auf Randeinfassung in Teilstück (6.3.8)

(B) Wurzeln in Stoßfugen

Schadbild: aufgeweitete Fugen

Wurzeldicke	**Kriterium**	**Maßnahme**
Wurzeln < 3 cm	(kein weiteres)	Wiedereinbau der Randeinfassung nach Wurzelentfernung (6.4.2)
Wurzeln ≥ 3 cm	(kein weiteres)	Verzicht auf Randeinfassung in Teilstück (6.3.8)

(C) Wurzeln zwischen Fundamentierung und Stein

Schadbild: Aufkantung, Anhebung, Bruch, seitliche Verschiebung

Wurzeldicke	**Kriterium**	**Maßnahme**
Wurzeln < 3 cm		Wiedereinbau der Randeinfassung nach Wurzelentfernung (6.4.2)
Wurzeln ≥ 3 cm	tiefe Lage	Wiedereinbau der Randeinfassung in gleichem Niveau durch Materialabtrag oder Bordsteinbrücke (6.3.7)
	oberflächennahe Lage	Verzicht auf Randeinfassung in Teilstück (6.3.8)

7. Ansätze zur Schadensvermeidung

Wurzeln in oberflächennahen Oberbauschichten von Verkehrsflächen führen fast zwangsläufig zu Schäden. Deren Reparatur gestaltet sich sowohl bautechnisch als auch im Hinblick auf den Baumschutz schwierig und führt in der Regel zu nur kurzlebigen Lösungen. Der Schadensprävention ist daher ein hoher Stellenwert einzuräumen. Das folgende Kapitel diskutiert Maßnahmen, die beim Neubau von Baumstandorten in Verkehrsflächen und bei der Neupflanzung vorgenommen werden können, um Schäden zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren. Hierzu werden die in der gesichteten Fachliteratur beschriebenen Lösungsansätze inklusive spezieller Wurzelbarrieren erörtert (Abschnitt 7.1). Es werden dann die wesentlichen Einflussfaktoren herausgestellt und daraus planerische Maßnahmen abgeleitet (Abschnitt 7.2). Als Schwerpunkt dieses Kapitels wird ein Konzept zur Schadensvermeidung vorgestellt (Abschnitt 7.3). Im Fazit werden die Ergebnisse zusammengefasst und offene Fragen formuliert (Abschnitt 7.4).

7.1 Schadensvermeidung in der Fachliteratur

Die in der gesichteten Literatur vorgefundenen Lösungsansätze beziehen sich auf die Baumauswahl, auf die Vegetations- und Pflanztechnik, auf die Bautechnik und auf Wurzelbarrieren.

7.1.1 Auswahl der Baumart

Seitens des Baumes sehen verschiedene Autoren die Möglichkeit, über die **Artenauswahl** Probleme zu reduzieren. Zumeist wird dabei Bezug auf die Baumgröße oder die Starkwüchsigkeit als maßgebliche Einflussfaktoren genommen (WAGAR u. BARKER 1983, 181; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32f.; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1996, 197; URBAN 1994, 30; HAMILTON 1984b, 226f.; NICOLL u. ARMSTRONG 1998, 268). Generell wird die Abstimmung der Baumart im Sinne der Baumgröße auf die zur Verfügung stehenden Platzverhältnisse gefordert. Aufgrund der im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse kann dies nur bestätigt werden (siehe Abschnitte 7.2 u. 7.3). Andere Autoren gehen auf die konkrete Artenauswahl ein, in die außer der Baumgröße das artspezifische Schadenspotenzial einfließt (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32f.; STOLK u. HOFFMAN 2000, 50f.; KIERMEYER in V. EHREN 1997, IV-60ff.; HAMILTON 1984b, 228). Offenbar gibt es ein artspezifisches Wurzelverhalten. Das zeigt auch die vorliegende Untersuchung. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass daraus Unterschiede hinsichtlich der Schadensproblematik erwachsen. Die Erkenntnisse sind bislang jedoch so spärlich und zudem teilweise widersprüchlich, dass von Empfehlungen für die Praxis derzeit abzusehen ist. Beispielsweise empfehlen WONG, GOOD und DENNE die Gattungen Eiche (*Quercus*) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus, A. platanoides*) als großkronige Bäume für beengte Platzverhältnisse (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32). In der vorliegenden Untersuchung erwies sich Ahorn hingegen als überdurchschnittlich schadensträchtig. Außerdem wird die Möglichkeit diskutiert, über eine entsprechende **Selektion** Bäume mit weniger schadensträchtigen Wurzelsystemen zu züchten (WAGAR u. BARKER 1983, 181; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32). Bislang ist jedoch nur unzureichend durchleuchtet, welche Rolle das artspezifische Wurzelverhalten spielt. Eine langwierige züchterische Arbeit mit vagen Erfolgsaussichten ist daher kritisch zu sehen und dürfte in absehbarer

Zeit keinen Lösungsansatz bieten. Konsens besteht darüber, dass die Auswahl einer für die Platzverhältnisse geeigneten Baumart zur Reduzierung von Belagschäden beiträgt. Allerdings reicht dies allein nicht zur Vermeidung von Schäden aus. Über wissenschaftliche Untersuchungen über die Senkung der Schadensquote durch die Baumauswahl ist nichts bekannt.

7.1.2 Vegetations- und Pflanztechnik

Hinsichtlich der Vegetations- und Pflanztechnik fordern mehrere Autoren größere **Abstände zwischen Baum und Verkehrsfläche** beziehungsweise größere Baumscheiben und Pflanzgruben (WAGAR u. BARKER 1983, 181; WONG, GOOD u. DENNE 1988, 31f.; FRANCIS, PARRESOL u. DE PATIÑO 1996, 197; URBAN 1994, 30; URBAN 1998, 84.; NICOLL u. ARMSTRONG 1998, 267). Große Abstände zwischen Stammfuß und Verkehrsfläche haben sich klar als vorteilhaft erwiesen. Diese Forderung wird durch die vorliegende Untersuchung untermauert. Konkrete Maßvorgaben sind in der Literatur selten angegeben, was die diesbezügliche Unsicherheit deutlich macht. Die recherchierten Maßangaben (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 31f.: min. 2 x 2 m Baumscheibe, 1 m Pflanzstreifen; HODGE in NICOLL u. ARMSTRONG 1998, 267: Pflanzgrube min. 2,25 x 2,25 x 1 m) werden in Deutschland in der Praxis bereits größtenteils eingehalten. Zur Schadensprävention reichen sie dennoch nicht aus. Die Frage nach der angemessenen Größe von Baumscheiben und Wurzelraum ist daher noch nicht hinreichend geklärt (siehe Abschnitt 2.3, Abschnitt 7.3.2).

Als weiteres Mittel zur Reduzierung von Schäden wird die **Vergrößerung des Wurzelraumes** unter Verkehrsflächen durch den Einbau von unterbaufähigen Substraten (BASSUK in LESSER U. AUGSDORFER 1994, 17; URBAN 1994, 30; NICOLL u. ARMSTRONG 1998, 267f.) oder durch Wurzelbrücken (HAMILTON 1984b, 228; URBAN 1994, 30) angeführt. Des Weiteren wird die Verwendung von Substraten angeregt, die einen zur Aufnahme des Wurzelvolumens ausreichend großen Hohlraum enthalten (LINDSEY 1997; DAY 1991, 206; NICOLL u. ARMSTRONG 1998, 268). Außerdem wird vorgeschlagen, die Wurzeln neben entsprechenden Substraten durch Belüftungsmaßnahmen (URBAN 1994, 30; URBAN, 84), durch Regulierung der Bewässerung und des Wasserhaushaltes (HAMILTON 1984b, 223, 227) oder durch Absenken der Pflanzgrubenoberfläche unter das Niveau der Verkehrsfläche (HAMILTON 1984b, 228) zum Tiefenwachstum zu veranlassen. Über den langfristigen Erfolg der bei der Pflanz- und Vegetationstechnik ansetzenden Maßnahmen sind keine Ergebnisse systematischer Untersuchungen bekannt. Außerdem werden diese Ansätze häufig nur sehr oberflächlich behandelt, so dass eine tief gehende Diskussion kaum möglich ist. Die vorliegende Untersuchung bestätigt, dass die Problematik nicht ohne hinreichend großen Wurzelraum gelöst werden kann, und dass es sinnvoll ist, Wurzeln in tiefere Bodenschichten zu leiten, da hier das Schadpotenzial geringer ist (siehe Abschnitte 7.2, 7.3).

7.1.3 Bautechnik

Im Gegensatz zu den bisher erörterten Maßnahen liegen für die nun folgenden bautechnischen Ansätze größtenteils Berichte über wissenschaftliche Untersuchungen vor. Generell können Methoden mit und ohne Barrierewirkung unterschieden werden. Letztere werden gesondert im Abschnitt 7.1.4 „Wurzelbarrieren“ behandelt.

KOPINGA stellte die Kondensationsfeuchtigkeit unter Asphaltbelägen als eine Hauptursache dafür heraus, dass Wurzeln unmittelbar unter dem Belag wachsen und Schäden verursachen. Durch Einziehen einer undurchlässigen **Folie** wurde versucht, den Taupunkt und somit den Wurzelhorizont in die Tiefe zu verlagern. Der Ansatz hat sich jedoch als wenig wirksam erwiesen, da sich Wurzeln sowohl unter der Folie als auch unter dem Asphalt bildeten. Dies wird auf eine seitliche Wasserdampfbewegung zurückgeführt, die trotz Folie Feuchtigkeit unter dem Belag kondensieren ließ (MEYBOOM u. KOPINGA 1995, 35).

Ein Versuch mit einer unter dem Asphaltbelag angebrachten Bitumenbahn mit **herbizider Wirkung** hat ebenfalls nicht zur Vermeidung von Wurzeln unter der Wegedecke geführt. Nach fünfjähriger Versuchsdauer wies die Maßnahme keinen Unterschied zur unbehandelten Kontrollvariante auf (KOPINGA 1994, 10.19-20).

Vielversprechend verliefen hingegen Versuche mit einer speziellen **Tragschichtbauweise**: Bei Asphaltbelägen mit 30 cm dicker, hohlraumreicher Tragschicht aus reinem, groben Schotter der Körnung 50/70 mm zeigten sich nach zehnjähriger Versuchsdauer im Gegensatz zur Kontrollvariante keine Schäden. Wurzeln traten nur vereinzelt dort auf, wo Sand und Feinanteile in die Schicht gelangt waren (KOPINGA 1992, 10.18f.; MEYBOOM u. KOPINGA 1995, 35f.). In einem anderen Forschungsvorhaben hingegen wurde Schotter eingesetzt, um Wurzeln unter Verkehrsflächen zu leiten. Bei der Verwendung von feinerem Schotter (16/32 mm) wurde eine intensive Wurzelentwicklung festgestellt (LÖSKEN, HEIDGER u. LIESECKE, 2001, 11). Der Ansatz ist demnach hinsichtlich der Körnung und hinsichtlich der Anwendung unter Pflaster- und Plattenbelägen mit Sandbettungen zu überprüfen.

Der verbreiteten Meinung, Wurzeln würden in den oberen Wegebauschichten wachsen, weil sie am Straßenstandort nur dort Wasser und Luft finden, folgt die Annahme, durch wasser- und luftdurchlässige Trag- und Deckschichten die Wurzeln zum Tiefenwachstum veranlassen zu können. Ein Blick auf Bäume in Parkanlagen genügt, um deutlich zu machen, dass Baumwurzeln auch unter günstigen Bedingungen in den oberen Bodenschichten kräftige Wurzeln ausbilden (siehe Abschnitt 2.2). Eine verbesserte Luft- und Wasserzufuhr alleine dürfte das Problem also nicht lösen.

7.1.4 Wurzelbarrieren

Verschiedene Ansätze versuchen, durch chemische oder mechanische Barrieren wie Wurzelschutzvlies, beschichtete Geotextilien, Folien, Gitter oder Barrieren mit biozider Beschichtung das Einwurzeln in Schichttiefen dicht unter dem Belag zu verhindern oder den Wurzeldurchmesser zu begrenzen.

Horizontal unter dem Wegeaufbau eingebautes und an den Rändern vertikal hochgezogenes **Wurzelschutzvlies** aus Non-Woven Geotextil wird durchwurzelt (KOPINGA 1992, 10.20 ff.). Auch, wenn der Wurzeldurchmesser und die Wurzelmasse geringer bleibt als bei der Kontrollvariante, ist die Wirksamkeit daher gering. Undurchlässige Folien hingegen werden zwar nicht durchwurzelt, können jedoch nicht horizontal unter Wegebelägen eingebaut werden, da diese eine einwandfreie Entwässerung des Oberbaus erfordern (siehe KOPINGA 1992, 10.21).

Die Erprobung verschiedener linear und vertikal eingebauter, durchlässiger und undurchlässiger **Wurzelschutzvliese und -folien** ergab, dass die Ränder über- und unterwachsen werden und die Schutzwirkung auf diese Weise verloren geht (KOPINGA 1992 10.21 ff.).

Einige Autoren berichten von Ansätzen, bei denen der Durchmesser der eindringenden Wurzeln durch **Gitter aus Kunststoff oder Kupfer** begrenzt werden soll (LESSER u. AUGSDORFER 1994, 19; URBAN 1994, 30; Untersuchungen durch WAGAR und BARKER). Die Untersuchungsergebnisse sind nicht bekannt. Grundsätzlich ist auch hier zu erwarten, dass die Ränder über- oder unterwachsen werden, sich dickere Wurzeln entwickeln und die Maßnahme dadurch wenig effektiv ist.

Auch **chemisch behandelte Barrieren** mit herbizider Wirkung werden unterwachsen und sind somit nahezu funktionslos (GILMAN 1996). Zusätzlich werden hier Fragen der Umweltverträglichkeit aufgeworfen (URBAN 1994, 24).

Spezielle Wurzelbarrieren aus flexiblen Kunststoffelementen oder -schirmen werden bei einer Tiefe von ca. 30 bis 60 cm kreisförmig um den Ballen gelegt oder entlang von Wegekanten eingebaut. Sie sind in den USA und in den Niederlanden in Versuchspflanzungen wissenschaftlich untersucht (PEPER u. BARKER 1994; BARKER 1994; BARKER u. PEPER 1995; COSTELLO, ELMORE u. STEINMAUS 1997; PEPER u. MORI 1999; OMEGAM 1999) oder in der Fachpresse kommentiert worden (HAMILTON 1984b; URBAN 1994; LESSER u. AUGSDORFER 1994). Demnach bieten diese Barrieren keinen wirksamen Schutz der Verkehrsflächen. Die nach unten geleiteten Wurzeln wachsen nach Unterqueren der Barriere so weiter, wie sie es gemäß der vorherrschenden Bodenbedingungen ohne Barriere getan hätten. Häufig wachsen die Wurzeln wieder nach oben und machen somit die Schutzwirkung zunichte. Hinzu kommen praktische Probleme: Die Oberkante der Elemente muss beim Einbau einige Zentimeter über der Bodenoberfläche bleiben, um ein Überwachsen zu verhindern, was bei gemulchten, offenen Baumscheiben kaum möglich sein dürfte. Auch ist die Auswirkung von eng um den Ballen gelegten Barrieren auf die Baumvitalität nicht gänzlich geklärt. Bei dreijährigen Versuchspflanzungen zeigte sich eine geringe Beeinträchtigung des Wachstums im Vergleich zur Kontrollvariante (OMEGAM 1999, 13). Im Hinblick auf langfristige Auswirkungen wird die Kritik geäußert, dass Bäume in kreisförmigen Wurzelbarrieren eine geringe Standfestigkeit und ein nicht angemessen entwickeltes Wurzelsystem aufweisen (URBAN 1994, 29; LESSER u. AUGSDORFER 1994, 17f.).

Insgesamt scheint der Einbau spezieller mechanischer oder chemisch-mechanischer Wurzelbarrieren nach derzeitigem Stand der Kenntnis nicht sinnvoll zu sein. Wenn überhaupt, so ist nur unter bestimmten Voraussetzungen die gewünschte Wirksamkeit zu erwarten. URBAN bemerkt hierzu: „In summary, root barriers appear to work least when they are needed most“ (Insgesamt scheinen Wurzelbarrieren dann am wenigsten zu funktionieren, wenn sie am meisten gebraucht werden; URBAN 1994, 30f.). In Deutschland sind zusätzliche mechanische Barrieren ohnehin nicht erforderlich, da bei regelgerechter Bauweise eine ausreichend dimensionierte **Randeinfassung** zwischen Verkehrsfläche und Baumscheibe vorzusehen ist, die eine vergleichbare Wirkung hat. In der gesichteten Literatur findet sich nur ein Denkansatz, der in konventionellen Randeinfassungen wie Bordsteinen eine Barrie-

refunktion vermutet, diese aber nicht näher untersucht (WONG, GOOD u. DENNE 1988, 32). Dies mag damit zusammenhängen, dass Randeinfassungen zwischen Baumscheibe und Wegebelag außerhalb Deutschlands nicht überall üblich sind. Die in dieser Arbeit durchgeführte Kartierung zeigt, dass Baumstandorte mit Randeinfassungen eine geringere Schadenshäufigkeit und ein geringeres Schadensausmaß aufweisen als solche ohne (Kapitel 3). Hier dürfte es sich um eine zeitliche Verzögerung der Schadensentstehung handeln. Die Aufgrabungen haben deutlich gemacht, wie die Wurzeln durch die Fugen hindurchwachsen oder die Randeinfassung unterqueren und wieder nach oben wachsen (Fallbeispiele 1, 2, 7, 8). Sie sind somit nicht geeignet, Schäden zu vermeiden, wohl aber zu reduzieren. Welche Schadensreduzierung oder -verzögerung von Bord- und Kantensteinen ausgeht, ist nicht bekannt. Sie dürfte nur so lange dauern, wie der Umweg der Wurzel beträgt und somit auf einige Jahre begrenzt sein.

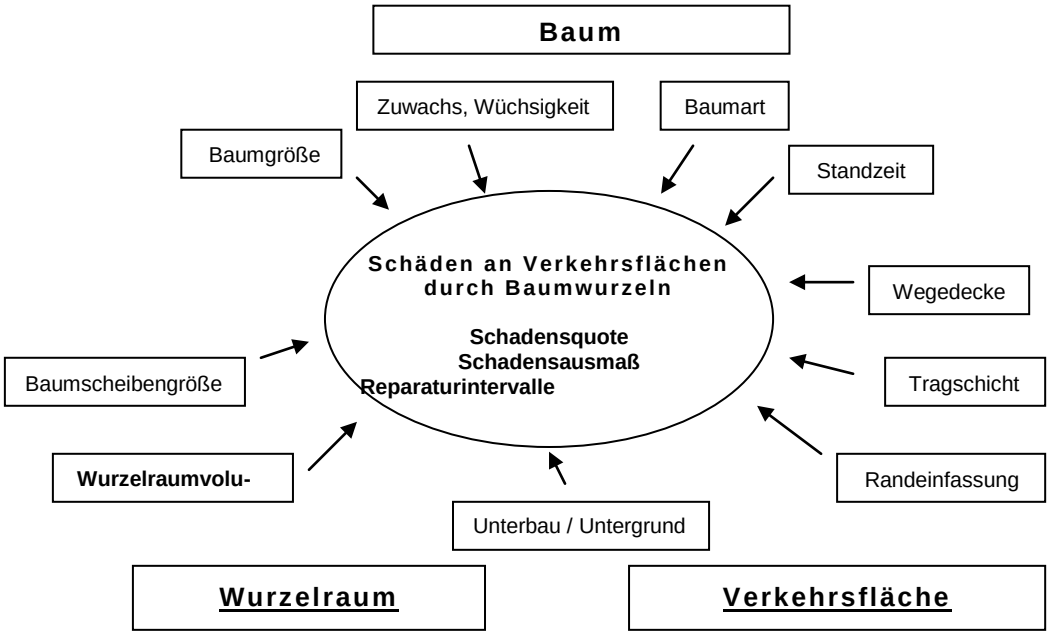
Letztlich können Wurzelbarrieren also eine zeitliche Schadensverzögerung von unbekannter Dauer bewirken. Ob der Zeitgewinn einen zusätzlichen Aufwand gerechtfertigt, ist fraglich. KOPINGA stellt fest, „dass mit Wurzelschirmen aus Kunststoffschirmen oder derartigen Materialien nur dann ein genügender Wirkungsgrad erzielt wird, wenn sie ständig über und unter den durchwurzelbaren Bereich des Bodens hinwegreichen“ (KOPINGA 1992, 10.23). Ein Beispiel aus der Stadt Manchester (GB) mag illustrieren, unter welchen Bedingungen vertikale Barrieren das Einwurzeln verhindern können: In einer Fußgängerzone in der Innenstadt wurden Bäume in Schachtringe aus Beton gepflanzt, um Belagschäden zu unterbinden. Das Ziel wurde erreicht. Allerdings haben die Bäume nur einige Jahre überlebt, da der Untergrund stark verdichtet war und sie quasi in großen Blumentöpfen standen (mündl. Auskunft GEENAWAY, Street Tree Section, Stadt Manchester). Die Frage seitlicher Begrenzungen muss also stets mit der nach ausreichendem Wurzelraum verknüpft werden.

7.1.5 Zusammenfassung

Es kann als allgemein anerkannt gelten, dass die Abstimmung von Baumgröße und Platzverhältnissen des Standortes eine effektive Maßnahme zur Schadensreduzierung ist. Auf der Baumseite wird durch die Auswahl der Baumart die Baumgröße bestimmt. Über die Auswirkung artspezifischen Wurzelverhaltens ist noch zu wenig bekannt, so dass Aussagen zu einzelnen Baumarten (-gattungen, -sorten) in der Regel mit Vorsicht zu betrachten sind. Seitens der Vegetationstechnik wird eine angemessene Größe für den Wurzelraum und die Baumscheibe beziehungsweise den Abstand zwischen Wurzelhals und Verkehrsfläche gefordert. Bautechnische Ansätze und spezielle Barrieren versuchen, das Problem zu lösen, indem Wurzeln aus den sensiblen Schichten unmittelbar unter dem Belag fern gehalten werden sollen. Untersuchungen zufolge vermögen chemische oder mechanische Barrieren dies bisher nicht oder nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen zu leisten. Es gibt Hinweise auf eine zeitliche Verzögerung durch Barrieren, die im Hinblick auf eine Schadensreduzierung vorteilhaft sein kann. In Deutschland wird diese Funktion weitgehend von Randeinfassungen erfüllt. Zumindest bei Asphaltbelägen gibt es mit dem Einbau von sehr hohlraumreichen Tragschichten möglicherweise einen dauerhaften Lösungsansatz. Insgesamt zeichnet sich bisher keine Lösung ab, die allein Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln verhindern könnte. Auch ist die langfristige Wirksamkeit verschiedener Ansätze nicht nachgewiesen. Vielmehr konstatieren viele Autoren Forschungsbedarf.

7.2 Einflussfaktoren und planerische Maßnahmen

Der Problematik von Schäden an Verkehrsflächen liegt ein komplexes Gefüge von Ursachen und Einflussfaktoren zugrunde. Die Reduzierung der Einflussfaktoren auf planerisch definierbare Parameter ermöglicht die Ableitung von vorbeugenden Maßnahmen. Im folgenden Abschnitt werden die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Schadenshäufigkeit bzw. die Entstehung von Schäden, das Schadensausmaß und die Reparaturintervalle, d.h. die Geschwindigkeit, mit der Schäden entstehen, besprochen. Die Einflussfaktoren erwachsen aus Merkmalen des Baumes selbst, der Bauweise der Verkehrsfläche und des Wurzelraumes (Darstellung 131).



Darstellung 131: Einflussfaktoren auf Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln

7.2.1 Schadenshäufigkeit

Ob überhaupt Schäden an Verkehrsflächen entstehen, hängt von der **räumlichen Verteilung** der Baumwurzeln ab. Wurzeln im Unterbau oder im Untergrund sind relativ unproblematisch. In der Deckschicht und in der obersten Tragschicht hingegen führen sie ab einer gewissen Wurzeldicke fast immer zu Schäden (siehe Kapitel 5). Ziel muss es daher sein, die oberste Tragschicht und die Deckschicht möglichst nicht durchwurzelbar auszubilden. Ob und wo Wurzeln im Schichtaufbau von Verkehrsflächen wachsen, hängt von der Bauweise und den Eigenschaften der Wegebaustoffe ab. Nur Stoffe mit geringem Eindringwiderstand können überhaupt erschlossen werden. Hoch verdichtbare Mineralstoffe könnten das Eindringen von Wurzeln in die Tragschicht verhindern. Problematisch ist die Durchwurzelung der Deckschicht und der Grenzzone zwischen Trag- und Deckschicht, da diese nicht wurzelfest ausgebildet werden können. Als Schutzmaßnahme sind nicht durchwurzelbare Randeinfassungen ohne Fugen oder mit abgedichteten Fugen zu entwickeln.

Wenn Wurzeln aus Bereichen, in denen sie zu Schäden führen, fern gehalten werden sollen, sind lenkende und ausgleichende Maßnahmen in Form von ausreichend großen, definierten Wurzelräu-

men erforderlich. Der Begriff des definierten, also geplanten Wurzelraumes wurde gewählt, um ihn von den Bereichen, in die Wurzeln je nach zufällig vorherrschenden Bedingungen eindringen können, abzugrenzen. Er besteht bei konventionellen Pflanzungen aus der Pflanzgrube mit der Baumscheibe als oberen Abschluss. Beim Einbau von unterbaufähigen Substraten kann er sich jedoch auch unter die Verkehrsfläche erstrecken. Streng genommen ist der definierte Wurzelraum dann Teil des Schichtaufbaus der Verkehrsfläche. Er soll im folgenden jedoch gesondert behandelt werden. Im Stammbereich ist eine ausreichend große Baumscheibe auszubilden, so dass Anhebungen durch dicke, stammnahe Horizontalwurzeln unterbleiben. Die angemessene Größe richtet sich nach der Größe des Baumes. Außerdem kann der Wurzelraum durch Maßnahmen zur Tiefenbelüftung auch unterhalb der eigentlichen Pflanzgrube erweitert werden (LIESECKE u. HEIDGER 1994; LÖSKEN, HEIDGER u. LIESECKE, 2001).

Planerische Ansatzpunkte zur Schadensvermeidung sind:

- Fernhalten von Wurzeln aus der obersten Tragschicht und der Deckschicht
  – *Einbau von nicht durchwurzelbaren Tragschichten*
  – *Einbau von nicht durchwurzelbaren Randeinfassungen als Schutz der Deckschicht*
- Ausbildung von angemessen großem Wurzelraum
  – *große Baumscheiben*
  – *große Pflanzgruben*
  – *Wurzelraum unter Pflanzgruben*
  – *definierter Wurzelraum unter Verkehrsflächen*

7.2.2 Schadensausmaß

Das Ausmaß der Schäden wird vor allem durch die Wurzelmasse, genauer gesagt durch das **Wurzelvolumen** bestimmt. Dies bezieht sich sowohl auf die Dicke der Wurzeln als auch auf ihre Verteilung und Reichweite in der Fläche. Die Wurzelmasse ist hauptsächlich durch die Baumgröße bedingt, hängt aber auch von der Wurzel-Spross-Relation ab (siehe unten). Große Bäume haben mehr und dickere Wurzeln als kleine und können daher auch größere Schäden verursachen. Die **Baumgröße** wird durch die Baumgattung, -art und -sorte, das Baumalter beziehungsweise das Entwicklungsstadium und durch die Baumvitalität bestimmt. Planerische Einflussmöglichkeiten sind vor allem bei der Wahl der Baumart gegeben. Die gewünschte Baumgröße muss mit den Platzverhältnissen abgestimmt werden. Über die Standzeit ist das Baumalter und somit die tatsächliche Größe regulierbar. Grundsätzlich ist es möglich, Bäume zu fällen, bevor sie eine Größe und ein Wurzelvolumen erreicht haben, das die gegebenen Platzverhältnisse übersteigt. Allerdings dürfte diese Maßnahme auf wenig Akzeptanz stoßen. Auch die Vitalität, also der allgemeine Gesundheitszustand von Bäumen, beeinflusst die Baumgröße. In der Praxis ist es jedoch unsinnig, die Baumgröße über die Vitalität zu steuern.

Die **Wurzel-Spross-Relation** als zweiter großer Einflussfaktor auf das Wurzelvolumen bezeichnet das Verhältnis zwischen den oberirdischen Pflanzenteilen und dem Wurzelwerk (siehe Abschnitt 2.2). Hier übt das Substrat einen entscheidenden Einfluss aus. Bei mageren Böden verschiebt sich das Wurzel-

Sprossverhältnis zugunsten der Wurzelmasse (siehe Abschnitt 2.3). Ein angemessen großer definierter Wurzelraum mit geeignetem Substrat könnte daher dazu beitragen, dass sich das Wurzel-Spross-Verhältnis im Vergleich zu den sonst sehr ungünstigen Bodenverhältnissen unter Verkehrsflächen zugunsten der oberirdischen Masse verschiebt.

Planerische Einflussmöglichkeiten auf das Ausmaß von Schäden:

- Wahl der Baumart (bzw. Sorte)
  – *Abstimmung von Baumart und Standor*t
- Regulierung der Standzeit
  – *Entfernen von zu großen Bäumen*
- Schaffung guter unterirdischer Standortbedingungen
  – *angemessenes Wurzelraumvolumen und geeignetes Substrat*

7.2.3 Reparaturintervalle

Die Geschwindigkeit der Schadensentstehung, also die Dauer bis zum erstmaligen Schaden und die Zeitspanne zwischen Reparatur und erneutem Schaden, ist abhängig von der Wuchsgeschwindigkeit der Wurzeln. Diese ist vor allem durch die Baumart, das Baumalter und die Vitalität des Baumes bedingt. Die **Baumart** (Gattung, Sorte) bestimmt nicht nur die genetisch veranlagte Endgröße, sondern auch die Wuchsgeschwindigkeit von Spross und Wurzel. Starkwüchsige große Bäume verursachen nach der vorliegenden Untersuchung mehr und stärkere Schäden als kleinere (siehe Kapitel 3). Langsam wachsende und verhältnismäßig klein bleibende Bäume sind bei beschränkten Platzverhältnissen von Vorteil. Das Wurzelwachstum ist von der Entwicklungsphase abhängig und verlangsamt sich in zunehmendem **Alter**. Bei reifen Bäumen mit nur geringem Wurzelzuwachs ist daher mit längeren Phasen ohne erneute Reparatur zu rechnen. Allerdings ist nicht bekannt, ab wann eine Verlangsamung eintritt. Nach eigener Einschätzung dürfte der Zeitraum bei großen Bäumen ca. 50 Jahre betragen. Angesichts der vergleichsweise geringen Lebenserwartung von Straßenbäumen wird ein deutlicher Rückgang der Zuwachsraten möglicherweise gar nicht erreicht. Die meisten Bäume weisen im Alter auch eine stattliche Größe und ein entsprechendes Wurzelvolumen auf, so dass mögliche Vorteile ausgeglichen werden. Auch die **Vitalität** eines Baumes beeinflusst dessen Zuwachsraten, wie schon im Bezug auf die Baumgröße dargelegt wurde. Auch hier ist es unsinnig, die Zuwachsraten über die Vitalität zu steuern. Haupteinflussmöglichkeit ist daher die Wahl der Baumart. Im Schadensfalle wirken sich verformbare oder nachgebende Beläge wie wassergebundene Wegedecken, Asphalt oder kleinteilige Pflasterdecken mit rauer Oberfläche positiv auf die Reparaturhäufigkeit aus.

Planerische Maßnahmen zur Reduzierung der Reparaturhäufigkeit:

- Auswahl der Baumart
  – *Verzicht auf sehr schnellwüchsige Baumarten*
- Einbau von Deckschichten mit geringer Schadensanfälligkeit
  – *anpassungsfähige, verformbare oder kleinteilige Beläge mit hoher Rauigkeit*

7.2.4 Zusammenfassung planerischer Ansatzpunkte

Insgesamt ergeben sich folgende Ansatzpunkte:

- Wahl der Baumart (bzw. Sorte)
  – *Abstimmung von Baumart und Standort hinsichtlich Größe und Zuwachsraten bzw. Schnellwüchsigkeit*
- Bestimmung der vorgesehenen Standzeit
  – *ggf. Entfernen von zu großen Bäumen*

} Baum

- Ausbildung von angemessen großem und qualitativ geeignetem Wurzelraum
  – *große Baumscheiben*
  – *großer Wurzelraum in und unter Pflanzgruben sowie unter Verkehrsflächen*
  – *gute Substratqualität*

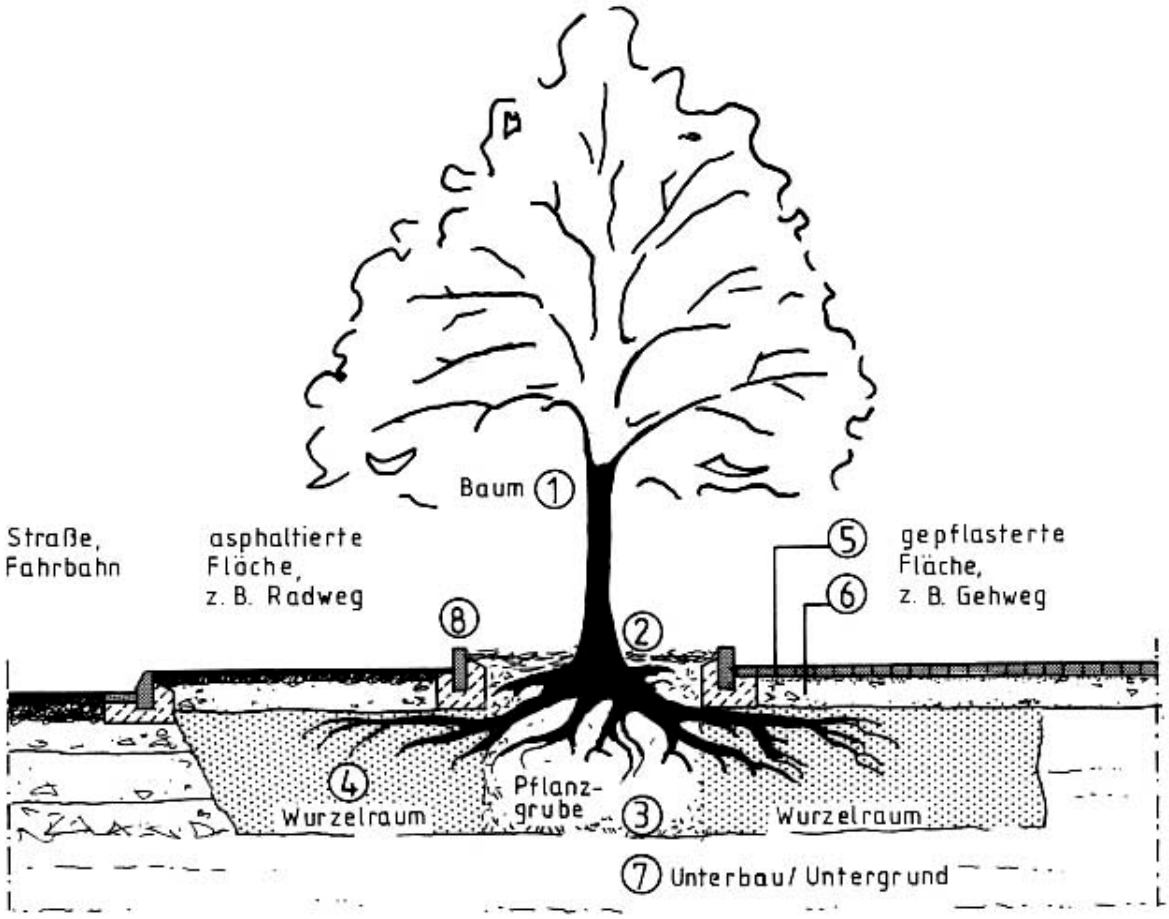
} Vegetations-technik

- Fernhalten von Wurzeln aus der obersten Tragschicht und der Deckschicht
  – *Einbau von nicht durchwurzelbaren Tragschichten*
  – *Einbau von nicht durchwurzelbaren Randeinfassungen*
- Einbau von Deckschichten mit geringer Schadensanfälligkeit
  – *anpassungsfähige, verformbare oder kleinteilige Beläge mit hoher Rauigkeit*

} Bautechnik

7.3. Lösungsansatz: Vertikale funktionsräumliche Trennung von Wurzelraum und Verkehrsfläche

Einfache erprobte Methoden zur Schadensvermeidung existieren derzeit nicht. Lösungsansätze müssen den unterschiedlichen Einflussfaktoren aus Baum, Wurzelraum und Verkehrsfläche Rechnung tragen und verschiedene Maßnahmen integrieren. Es muss außerdem davon ausgegangen werden, dass eine gänzliche und dauerhafte Schadensvermeidung in der Praxis nicht möglich ist. Vielmehr ist eine deutliche Reduzierung der Häufigkeit und des Ausmaßes von Schäden sowie der Reparaturhäufigkeit anzustreben. Dies würde sowohl Kosten sparen als auch baumschädliche Eingriffe in das Wurzelsystem vermindern. Als Lösungsansatz wird eine vertikale funktionsräumliche Trennung von Verkehrsfläche und Wurzelraum vorgeschlagen (Abbildung 132). Während die Deckschicht und die obere Tragschicht von Wurzeln frei bleiben, wird der definierte Wurzelraum so groß angelegt, dass das Wurzelvolumen darin Platz und der Baum hinreichend gute Standortbedingungen findet. Baumwurzeln werden so in Tiefen gelenkt, wo sie weniger schadensträchtig sind. Dies erfordert zugleich die Abstimmung zwischen Baumgröße, Zuwachsgeschwindigkeit, Standzeit und den Platzverhältnissen am Standort.



Baum

Abstimmung von Baumgröße und Platzverhältnissen

1 Wahl der Baumart und Bestimmung der Standzeit

Vegetations-technik

Schaffung von Wurzelraum unter der obersten Tragschicht

2 Baumscheibe der Baumgröße angemessen

3 normgerechte Pflanzgrube

4 Wurzelraum unter Verkehrsfläche durch unterbaufähige Substrate
– je nach Standortgegebenheiten unterschiedliche Varianten in der Flächenausdehnung
– Wurzelraumverbindung benachbarter Bäume günstig

Bautechnik

Durchwurzelungssichere Ausbildung von Deckschicht und oberster Tragschicht

5 für Deckschicht kleinteilige oder verformbare Wegebeläge vorteilhaft, unter Umständen Wurzelbrücken

6 oberste Tragschicht nicht durchwurzelbar durch starke Verdichtung und geringen Gehalt an Grobporen

7 Unterbau nach Möglichkeit hohlraumreich / Untergrund in der Regel ohne besondere Anforderungen

8 Randeinfassung nicht durchwurzelbar durch dichte oder nicht vorhandene Fugen, Barrierewirkung

Darstellung 132: Prinzip der vertikalen funktionsräumlichen Trennung von Verkehrsfläche und Wurzelraum als Maßnahme zur Schadensvermeidung

7.3.1 Baum: Baumgröße und Standzeit

Die Möglichkeit, durch die Auswahl der Baumart und die Bestimmung der voraussichtlichen Standzeit Einfluss auf die Schadensquote und die Reparaturhäufigkeit zu nehmen, wurde bereits in den vorhergehenden Abschnitten besprochen. Ausschlaggebend ist dabei die **Baumgröße**. Von großen, starkwüchsigen Bäumen ist abzusehen, wenn eine angemessene Baumscheibengröße und ein ausreichendes Wurzelvolumen nicht gewährleistet werden können. Sollen aus gestalterischen Gründen dennoch starkwüchsige Bäume verwendet werden, so ist deren Größe über eine **Begrenzung der Standzeit** zu limitieren. Bäume zu fällen, wenn sie für den Standort zu groß geworden sind, dürfte allerdings auf Widerstände in Fachkreisen und in der Bevölkerung stoßen. Die Maßnahme sollte daher auf Extremfälle beschränkt sein. Zu geeigneten Straßenbäumen und deren Größe sei auf die Straßenbaumliste der GALK hingewiesen (GALK 1995). Konkrete Empfehlungen zur Auswahl von Baumarten im Hinblick auf das Schadpotenzial durch ihr Wurzelverhalten können hier nicht gegeben werden, da keine hinreichend gesicherten Erkenntnisse vorliegen.

7.3.2 Vegetationstechnik: Baumscheibe und Wurzelraum

Die Größe von Baumscheibe und definiertem Wurzelraum muss auf die Baumgröße abgestimmt werden. Limitierender Faktor am Straßenstandort sind sowohl die Platzverhältnisse an als auch unter der Oberfläche. Mit Hilfe vegetationstechnischer Maßnahmen sollten angemessen große und qualitativ gute Wurzelräume geschaffen werden.

Möglichst große **Baumscheiben** sind im Hinblick auf die Schadensproblematik vorteilhaft, innerhalb von Verkehrsflächen jedoch kaum zu realisieren. Sowohl die häufig angewendete Standardgröße von 2 x 2 = 4 m² als auch das in der DIN 18916 verankerte Mindestmaß von 6 m² reicht für große Straßenbäume wie Ahorn oder Platane nicht aus (vgl. LÖSKEN, HEIDGER u. LIESECKE 2001, 10). Je größer der Baum wird, desto größer ist die erforderliche offene Baumscheibe, um Belagsanhebungen im stammnahen Bereich zu vermeiden. Geht man davon aus, dass in einem Umkreis von 1,50 m (kleine Bäume) bis 2,50 m (große Bäume) ab Stamm Raum für die starken Horizontalwurzeln verbleiben muss, so ergeben sich für ausgewachsene Bäume angemessene Baumscheibengrößen von ca. 3 x 3 m (kleiner Baum mit einem Stammdurchmesser von max. ca. 30 cm) bis ca. 6 x 6 m (großer Baum mit einem Stammdurchmesser von 100 cm). Diese Maße dürften in Verkehrsflächen kaum zu realisieren sein. Als Kompromiss könnten Baumscheibengrößen von 2 x 2 m für kleine, 3 x 3 m für mittelgroße und 4 x 4 m für große Bäume ein Betracht gezogen werden. Bei neu gepflanzten Bäumen ist eine große offene Baumscheibe zunächst nicht erforderlich. Es ist daher sinnvoll, die Baumscheibe erst zu befestigen und später nach den Erfordernissen schrittweise zu erweitern. Auf diese Weise werden in stark frequentierten Bereichen zugleich die Baumscheibe und der Wurzelraum geschützt. Wo auf Park- und Nutzfläche verzichtet werden kann, empfiehlt sich die Anlage von durchgängigen Pflanzstreifen anstelle isolierter Baumscheiben. Dies stellt nicht nur einen Gewinn an durchlässiger Fläche dar, sondern ist zugleich eine Reduzierung der potenziell zu schädigenden Fläche.

Die in der Fachwelt diskutierten Volumina für **Wurzelräume** weisen große Spannweiten auf und wurden bereits in Abschnitt 2.3 erörtert. Die Notwendigkeit ausreichender Wurzelräume ist unstrittig. Eine

fundierte Maßangabe an dieser Stelle zu nennen, ist ebenso problematisch wie bei der Baumscheibengröße. Im Folgenden werden Maßnahmen zur Schaffung großer Wurzelräume diskutiert.

Große Wurzelräume können zum einen erzielt werden, indem die Baumscheiben ausreichend groß und auf ganzer Fläche tiefgründig durchwurzelbar ausgebildet, also **große Pflanzgruben** angelegt werden. Um die Fläche dennoch zu nutzen, kann die Baumscheibe befestigt werden. Bei starken Druckbelastungen empfehlen sich freitragende Baumscheibenabdeckungen mit einer Oberfläche aus Stahl, Pflaster oder Beton. Diese lagern auf eigenen Fundamenten und Unterkonstruktionen aus Stahl oder Beton. Eine vergleichbare Lösung ist der Einbau von Wurzelbrücken, was sich insbesondere bei linearen Wegeverläufen anbietet. Derartige Befestigungen werden nur selten angehoben, da ein freier Zwischenraum zum Substrat verbleibt. Als Pflegemaßnahme muss der Zwischenraum frei von Laub, Dreck und Aufwuchs gehalten werden. Nachteil dieser Lösung sind hohe Anschaffungskosten. Preisgünstigere, aufgelegte Baumscheibenabdeckungen werden früher oder später durch Wurzeln angehoben und müssen dann entfernt werden. Sie bieten sich als Zwischenlösung für wenig genutzte Baumscheiben an.

Da der Wurzelraum auch großer Pflanzgruben in der Regel für mittelgroße und große Bäume nicht ausreicht, kann **Wurzelraum unter Verkehrsflächen** durch den Einbau von verdichtbaren, tragfähigen und durchwurzelbaren Substraten und Schüttstoffen, im Folgenden als unterbaufähige Substrate bezeichnet, geschaffen werden. Sie werden flächig unter der obersten Tragschicht oder in begrenzten Bereichen wie z. B. in Wurzelgräben oder -kanälen eingebaut. Letzteres bietet sich insbesondere dann an, wenn Leitungstrassen eine großflächige Lösung behindern. Die eingebauten Materialien müssen den Anforderungen des Straßenbaus genügen (siehe Abschnitt 2.1).

Der Ansatz, Wurzeln durch unterbaufähige Substrate gezielt unter Verkehrsflächen zu lenken, wird zwar bereits seit Jahren erprobt und weiterentwickelt, stößt aber bisweilen auf Widerstände bei Vertretern des Straßenbaus. Argumentiert wird damit, dass Wurzeln aus dem Oberbau fern zu halten sind und dass die verwendeten Substrate die Anforderungen nicht erfüllen. Hauptproblem bisheriger Bauweisen ist jedoch das Gegenteil. Straßenbäume können oft nur überleben, indem sie in den Wegeoberbau wachsen. Sinnvoller ist es daher, sie in Bereiche zu leiten, die weniger empfindlich gegen Wurzeln sind, also in tiefere Schichten. Zum zweiten Einwand lässt sich feststellen, dass gegenwärtig Substrate im Hinblick auf die Anforderungen des Tiefbaus entwickelt und optimiert werden. Erfahrungen aus Osnabrück zeigen, dass Verkehrsflächen bei entsprechend abgestimmten Substraten auch 10 Jahre nach der Pflanzung noch voll funktionsfähig sind (mündl. Aussage SCHRÖDER 2001). Hier wurden verschiedene Maßnahmen zur Erweiterung des Wurzelraumes unter Verkehrsflächen erprobt, darunter Varianten mit unterbaufähigem Substrat, mit Wurzelbrücken und mit Wurzelkanälen. Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln sind bisher nicht aufgetreten, allerdings ist aufgrund des relativ kurzen Zeitraums noch keine sichere Aussage möglich (genaue Beschreibung der Maßnahmen in STADT OSNABRÜCK 1997). Nähere Informationen zu unterbaufähigen Wegebaustoffen und Substraten finden sich in der Literatur (COUENBERG 1994; GRABOSKY u. BASSUK 1996; KRISTOFFERSEN 1999;

LINDSEY 1997; STADT OSNABRÜCK 1997; LIESECKE u. HEIDGER 1994; LÖSKEN, HEIDGER u. LIESECKE 2001).

7.3.3 Bautechnik: Wegeoberbau und Randeinfassung

Es wird häufig angenommen, Wurzeln würden nicht unter Wegebelägen wachsen, wenn sie nicht durch mangelnden Wurzelraum dazu gezwungen werden. Große Wurzelräume allein halten jedoch nach Erkenntnis dieser Arbeit Baumwurzeln nicht davon ab, in durchwurzelbare Schichten unter dem Belag und in der Tragschicht zu wachsen. Deck- und Tragschichten müssen daher so ausgebildet oder geschützt werden, dass Wurzeln nicht in diese eindringen. Für diese Zielsetzung existieren bisher nur wenige überzeugende Ansätze. Die folgenden Überlegungen sollen die Problemstellung eingrenzen und Lösungswege aufzeigen.

Deckschicht

Bei den untersuchten Deckschichten werden die Sandbettung und Fugenfüllung von Pflaster- und Plattenbelägen sowie die Grenzzone zwischen Tragschicht und Belag von Wurzeln erschlossen. Lösungsmöglichkeiten könnten einerseits in der Veränderung der Bauweisen von Deckschichten und andererseits in der Verhinderung der Wurzelentwicklung unter Belägen ansetzen. Die Veränderung der gängigen Bauweisen für Deckschichten im Hinblick auf eine geringere Schadensanfälligkeit ist nur bedingt möglich: Die Sandbettung bei Pflaster- und Plattenbelägen ist bautechnisch unverzichtbar. Ein Ersatz durch nicht durchwurzelbaren Mörtel führt zu bautechnischen Schwierigkeiten (siehe Abschnitt 2.1) und löst das Problem nicht unbedingt (siehe Fallbeispiel 5). Würden Deckschichten sehr großformatig und schwer ausgebildet, wie z. B. Betondecken von Fahrbahnen, so wären auch bei Wurzeln unter dem Belag kaum Schäden zu erwarten. Derart massive Bauweisen kommen jedoch für gering belastete Verkehrsflächen nicht in Betracht. Eine Schadensreduzierung könnte durch den Einbau relativ flexibler Decken wie Kleinpflaster, Mineralgemisch oder Gussasphalt erzielt werden. Diese lösen das Problem jedoch letztlich nicht. Eine Lösungsmöglichkeit könnte der Einbau von Wurzelbrücken im Bereich von Bäumen anstelle konventioneller Deckschichten sein (siehe Abschnitt 6.3.2). Als Standardlösung ist dies aufgrund der hohen Kosten jedoch nicht geeignet. Insgesamt bietet der Ansatz an der Deckschicht selbst zwar Möglichkeiten zur Schadensreduzierung, jedoch wenige zur Schadensverhütung. Eine Lösung müsste also in externen Schutzmaßnahmen bestehen.

Die Wurzeln erhalten von der Seite oder von unten Zugang in und unter die empfindliche Deckschicht. Das Einwurzeln von unten könnte durch den Einbau von nicht durchwurzelbaren Tragschichten unterbunden werden. Es ist naheliegend, den seitlichen Zugang durch Barrieren zu versperren. Wie bereits dargelegt wurde, ist dies bisher jedoch nicht gelungen. Problematisch ist das Unter- und Überwachsen von Barrieren sowie das Durchdringen von Fugen. Spezielle Wurzelbarrieren dürften nach jetzigem Erkenntnisstand gegenüber den ohnehin vorhandenen Randeinfassungen aus Bord- oder Kantensteinen keine Vorteile bieten, die einen zusätzlichen Einbau rechtfertigen. Daher soll das Hauptaugenmerk auf der Ausbildung konventioneller Randeinfassungen wie Bord- und Kantensteine als Wurzelbarrieren liegen.

Oberste Tragschicht

Die oberste Tragschicht sollte so ausgebildet werden, dass sich darin keine Wurzeln entwickeln können. In der in Abschnitt 7.1 genannten Untersuchung von KOPINGA (1992, 1995) hat sich der Einbau einer sehr hohlraumreichen Tragschicht bewährt. Nach Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit hingegen werden vor allem solche Bereiche nicht durchwurzelt, die sehr dicht lagern. Dies zeigt sich auch am sogenannten Blumentopfeffekt, bei dem Straßenbäume nicht aus der eigentlichen Pflanzgrube auswurzeln. Hier soll daher der entgegengesetzte Ansatz verfolgt werden. Nicht durchwurzelbare Tragschichtstoffe könnten einen relativ hohen, durch die ZTVT-StB gerade noch tolerierten Feinanteil beinhalten und stark verdichtet werden. Welche Kornzusammensetzungen bei Mineralstoffen sich dafür eignen und wie hoch sie verdichtet werden müssen, um Wurzelwachstum wirksam zu unterdrücken, könnte in Versuchen festgestellt werden.

Es ist davon auszugehen, dass nicht durchwurzelbare Tragschichten in naher Zukunft entwickelt beziehungsweise definiert werden können. Problematischer sind die Rand- und Übergangsbereiche der Tragschicht. Auch bei sorgfältigem Verdichten sind diese Zonen in der Regel etwas weniger stark verdichtet als die Fläche. Doch auch bei starker Verdichtung entsteht durch ungleiche Ausdehnungskoeffizienten und unterschiedliches Setzungsverhalten zwischen Bauteil und Tragschicht möglicherweise eine Grenzzone mit geringem Eindringwiderstand, analog zu der Grenzzone unter Wegebelägen. Es ist damit zu rechnen, dass Wurzeln an dieser Stelle nach oben und unter den Belag wachsen. Möglichweise ist dieser Schwachstelle durch den Einbau von räumlich eng begrenzten Schutzmaßnahmen wie Betonwinkeln, Formblechen oder Folien entgegenzuwirken (siehe unten).

Der skizzierte Ansatz widerspricht der verbreiteten Idee, den Wurzeln durch eine hohlraumreiche Ausbildung der Pflasterbettungen und der oberste Tragschichten das Einwurzeln zu erleichtern und somit ihren Lebensraum zu erweitern. Die Restriktion des Wurzelraumes innerhalb der schadensanfälligen obersten Tragschicht wird jedoch durch die Erweiterung des Wurzelraumes darunter mehr als kompensiert. Eine Beeinträchtigung der Wasser- und Luftzufuhr ist kaum zu erwarten. Vielmehr dürfte sich der Wasser- und Lufthaushalt im Vergleich zu konventionellen Bauweisen auch ohne Zusatzeinrichtungen verbessern. Dieser dürfte durch den Einbau unterbaufähiger Substrate über die seitliche Zufuhr von Sauerstoff und durch günstigere Wachstumsbedingungen für die zur Wasser- und Nährstoffaufnahme befähigten Feinwurzeln besser als bisher gewährleistet sein. Versuchspflanzungen könnten hierüber Aufschluss geben. Langzeituntersuchungen an anderer Stelle haben gezeigt, dass Wurzelwachstum durch den Einbau geeigneter Baustoffe in Verbindung mit Belüftungseinrichtungen auch in sehr tiefen Bodenschichten unter Verkehrsflächen möglich ist (LIESECKE 1991; LIESECKE u. HEIDGER 1994; LÖSKEN, HEIDGER u. LIESECKE 2001).

Weitere Trag- und Frostschutzschichten, Unterbau/Untergrund

Gemäß RStO 01 sind unter Umständen weitere Trag- oder Frostschutzschichten vorzusehen (siehe Abschnitt 2.2). Die vorgeschlagenen Lösungsansätze beziehen sich jedoch ausschließlich auf Verkehrsflächen mit geringer Verkehrsbelastung (Geh- und Radwege, Verkehrsflächen der Bauklassen V und VI), so dass weitere Tragschichten in der Regel nicht notwendig sind. Werden unterbaufähige

Substrate eingesetzt, so fungieren sie als Unterbau. Bei frostempfindlichen Böden kann eine Frostschutzschicht erforderlich sein. Inwieweit unterbaufähige Substrate diese Funktion wahrnehmen können, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt. Bei zusätzlichen Frostschutzschichten ist zu prüfen, ob diese unter dem unterbaufähigen Substrat eingebaut werden sollten, oder ob es sinnvoller ist, den definierten Wurzelraum unter die Frostschutzschicht zu verlagern.

Unter dem unterbaufähigen Substrat eingebaute mineralische Schüttstoffe von Unterbau oder Frostschutzschichten sollten nach der Verdichtung so hohlraumreich sein, dass eine gute Luftführung gewährleistet und ein Einwurzeln möglich ist. Auf diese Weise wird der gesamte Wurzelraum über den definierten Wurzelraum hinaus vergrößert. Durch das tiefe Wachstum sind bei diesen Wurzeln keine Schäden an Verkehrsflächen zu erwarten. An die Böden des Untergrundes müssen keine besonderen Anforderungen gestellt werden.

Randeinfassung

Randeinfassungen dienen in diesem Ansatz als Barrieren gegen das seitliche Eindringen von Wurzeln in beziehungsweise unter die Deckschicht. Zugleich leiten sie die Wurzeln an den Baumscheibenrändern in die Tiefe, wo durchwurzelbares Substrat zur Verfügung steht. Da die obere Tragschicht in diesem Ansatz stark verdichtet und nicht durchwurzelbar sein soll, werden die Wurzeln in tieferen Schichten gehalten, falls das skizzierte Problem des Unter- und Durchwachsens gelöst werden kann.

Die Bauweise von Randeinfassungen richtet sich im Hinblick auf die Schadensproblematik einerseits nach der gewünschten Barrierewirkung und andererseits nach der Schadensanfälligkeit und dem Reparaturaufwand für die Randeinfassung selbst. Die Barrierewirkung wird durch Bauweisen begünstigt, die verhindern, dass die Fugen durchwachsen und die Wurzeln nach Unterwachsen der Fundamentierung wieder emporwachsen. Das Überwachsen wird zum einen aufgrund der Bauteilbreite und der Randlage für weniger problematisch erachtet als bei den speziellen Wurzelbarrieren. Zum anderen wurden Randeinfassungen stets im Bereich von Fugen überwachsen. Diese sind ohnehin zu vermeiden oder bautechnisch zu überarbeiten, um ein Durchwachsen zu unterbinden. (siehe unten). In der Regel kommen als Randeinfassung ebenerdige oder erhöhte Kanten- und Bordsteine in Frage. Gemäß einer regelgerechten Bauweise sollten sie mindestens bis zur unteren Schichtgrenze der obersten Tragschicht reichen und auf 20 cm Beton gesetzt werden. Auf diese Weise wird der direkte seitliche Zugang der Wurzeln in die oberste Tragschicht und in die Deckschicht verwehrt. Zugleich wird eine Schicht- bzw. Bodentiefe von ca. 40 bis 50 cm erreicht. Das Einhalten dieser Tiefe ist erforderlich, um die Wurzeln in die Tiefe zu leiten und zugleich das Anheben der Randeinfassung durch ein höheres Gewicht zu erschweren.

Die Fugenproblematik könnte durch umlaufende Bauteile wie Schachtringe, Beton- oder Stahlkästen gelöst werden, die keinerlei Fugen aufweisen. Innenliegende, senkrechte Riefen oder Rippen könnten die Wurzeln in die Tiefe leiten. Bei konventionellen Randeinfassungen ist auf eine geringe Fugenzahl und eine geringe Durchdringbarkeit der Fugen zu achten. Das Vergießen der Fugen mit Bitumen oder die Verwendung von profilierten Anschlüssen mit Falz oder Nut und Feder unterbinden das Durch-

wachsen nicht gänzlich, könnten jedoch zu einer Schadensreduzierung beitragen. Als durchwurzelungssichere Lösung könnten Steine mit Dichtungen aus Gummilippen oder die rückseitige Abdichtung konventioneller Randeinfassungen mit Wurzelschutzbahnen entwickelt und erprobt werden.

Das Problem des Unter- und Emporwachsens wird zum Teil durch den Einbau von nicht durchwurzelbaren Tragschichten gelöst. Problematisch bleiben jedoch die Randbereiche, die aus bautechnischen Gründen häufig weniger stark verdichtet sind und außerdem Grenzzonen mit geringem Eindringwiderstand aufweisen. Hier sind Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Wurzeln könnten durch L-förmige Ausformungen am unteren Rand in ausreichend verdichtete Bereiche geleitetet werden, wo die Gefahr des Emporwachsens nicht mehr besteht. Denkbar sind auch umlaufende L-förmige Einfassungen aus Stahl oder Stahlbeton. Bei konventionellen Randeinfassungen könnte ein Folienstreifen waagerecht in die Fundamentierung eingelassen und mit einer senkrechten Schlaufe in den unteren Bereich der Tragschicht eingearbeitet werden. Alternativ sind T-förmige Kunststoffprofile in Betracht zu ziehen, die, vergleichbar mit außenliegenden Fugenbändern für Betonbauwerke, im Übergangsbereich zwischen Randeinfassung und hoch verdichteter Tragschicht eingebaut werden. Wurzeln sollen so aus den weniger stark verdichteten Bereichen fern gehalten werden.

Ein weiterer Schwachpunkt ist die Anhebung von Randeinfassungen durch das Dickenwachstum der darunter her wachsenden Wurzeln. Um dies zu vermeiden, könnten die Kontaktstellen so ausgestaltet werden, dass das Volumen der Wurzeln genug Raum findet. Denkbar sind Puffer aus plastischen Materialien (z. B. verformbarer Kunststoff), Luftschichten unmittelbar unter der Randeinfassung (Lagerung auf Punktfundamenten), Schichten aus rolligem Kies oder ähnlichem verdrängbaren Material sowie verrottbare Stoffe, die Hohlräume für Wurzeln hinterlassen. Die Materialien würden dem Druck der dicker werdenden Wurzeln nachgeben und den Volumenzuwachs ausgleichen. Durch Riefen oder Rippen könnte versucht werden, die Wurzeln an bestimmten Stellen in die Tiefe zu leiten (siehe oben), so dass Puffer lokal begrenzt eingebaut werden können.

Sollten dennoch Wurzeln durch die Fugen unter den Belag gelangen und diesen anheben, so ist eine Schadensregulierung im Vergleich zu bisherigen Bauweisen weniger problematisch. Bei rechtzeitigem Eingreifen kann sich die Reparatur auf das Entfernen des schadensträchtigen Wurzelstrangs beschränken. Dieser kann sich durch die hohe Dichte der Tragschicht nur darauf, nicht aber darin befinden und ist somit gut abgrenzbar. Die Hauptmasse der Wurzeln ist im definierten Wurzelraum zu erwarten, so dass der Eingriff nur einen kleinen Teil der gesamten Wurzelmasse betrifft. Die besseren Standortbedingungen begünstigen außerdem eine gute Baumvitalität, so dass Wurzelverluste leichter als bisher verkraftet werden dürften. Bei der Reparatur angehobener Randeinfassungen wirken sich große massive Bauteile mit wenigen Fugen nachteilig aus. Andererseits ist anzunehmen, dass sie aufgrund des höheren Gewichtes seltener oder später angehoben werden als kleinere Bauteile.

7.4 Fazit

Eine praktikable und erprobte Methode zur sicheren Vermeidung von Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln existiert nach derzeitigem Erkenntnisstand nicht. Weder spezielle Wurzelbarrieren noch andere bisher erprobte bau- oder vegetationstechnische Maßnahmen können Schäden zuverlässig vorbeugen.

Anhand der Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit wurde aufgezeigt, welche Wirkungsgefüge den Belagsanhebungen zugrunde liegen und wie darauf in der Planung eingegangen werden kann. Eine Vielzahl einzelner Maßnahmen, die zur Schadensvermeidung oder zur Schadensreduzierung beitragen können, wurde zu einer integrierten Lösung zusammengefügt. Grundvoraussetzung ist die Abstimmung zwischen angestrebter Baumgröße und der Größe von Wurzelraum und Baumscheibe. Ziel der funktionsräumlichen Trennung von Verkehrsfläche und Wurzelraum ist es, die Wurzeln aus den oberen empfindlichen Bereichen der Verkehrsfläche fern zu halten und ihnen stattdessen Raum in tieferen Schichten zu bieten, wo sie voraussichtlich keine Schäden verursachen. Tragende Elemente dieses Konzeptes sind eine nicht durchwurzelbare oberste Tragschicht, darunter ein Wurzelraum aus tragfähigem Substrat und zu den Seiten Randeinfassungen, die als Barrieren den Zutritt der Wurzeln unter die Deckschicht verhindern. Die Spezifizierung nicht durchwurzelbarer Tragschichten ist technisch lösbar. Unterbaufähige Substrate wurden bereits entwickelt und erprobt. Zu prüfen ist noch, ob die skizzierten Lösungsansätze zur durchwurzelungssicheren Ausbildung von Randeinfassungen und Randbereichen geeignet sind, um Wurzeln aus sensiblen Wegebauschichten fern zu halten.

Bis aufwändige integrative Konzepte erprobt und in der Praxis umgesetzt werden, können kleinere Maßnahmen bereits heute zur Schadensreduzierung beitragen. Eine sinnvolle und leicht handhabbare Methode ist, die Baumgröße über die Auswahl der Baumart und -sorte und die Bestimmung der Standzeit auf die gegebenen Platzverhältnisse abzustimmen. Große Baumscheiben mit entsprechendem Wurzelraum versprechen ebenfalls weniger Schäden an der angrenzenden Verkehrsfläche.

Möglicherweise liegt eine „Lösung“ zunächst darin, die Schadensproblematik und die ständigen Reparaturarbeiten zu tolerieren und zugleich

– die Schadensquote durch die Abstimmung von Baum- und Baumscheibengröße zu reduzieren,
– die Eingriffe für die Bäume möglichst wurzelschonend vorzunehmen und
– an Pflanzstandards zu arbeiten, die dem weitläufigen und großvolumigen Wurzelwerk von mittelgroßen und großen Straßenbäumen besser Rechnung tragen als bisher.

Forschungsbedarf besteht darin, Wurzeln zum Beispiel durch entsprechende Randeinfassungen aus den Deckschichten fern zu halten, Tragschichten im Hinblick auf die Wurzelproblematik zu optimieren und durch unterbaufähige Substrate Lebensraum für Wurzeln in tieferen Schichten unter Verkehrsflächen zu schaffen. Außerdem sind mehr Daten über den derzeitigen Kostenaufwand für Reparaturen und die Reparaturhäufigkeiten sowie über die zu erwartende Verbesserung der Situation wünschenswert, um Kosten und Nutzen sicher abwägen zu können.

8. Schlussbetrachtung

Baumwurzeln unter Verkehrsflächen können durch ihr Dickenwachstum Schäden an Wegedecken und Randeinfassungen verursachen. Hiervon sind insbesondere Flächen betroffen, die für eine geringe Verkehrsbelastung ausgelegt sind, wie Geh- und Radwege, Fußgängerzonen, Stadt- oder Parkplätze. Zur Instandhaltung und zur Wahrung der Verkehrssicherheit werden kostenträchtige und wenig dauerhafte Reparaturen durchgeführt, die oftmals mit Wurzelverlusten einher gehen. Obwohl Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln häufig auftreten, ist die Problematik in Deutschland bisher nicht thematisiert oder systematisch untersucht worden. Forschungsergebnisse aus dem Ausland sind nicht immer auf deutsche Verhältnisse anwendbar und haben bisher keine dauerhaft wirksamen Methoden zur Problemlösung hervorgebracht.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Problematik systematisch aufzuarbeiten, um so Grundlagen für die Entwicklung anwendungsreifer Lösungen zu schaffen. Hierzu gehören die Aufarbeitung des derzeitigen Kenntnisstandes, die Erfassung der Größenordnung des Problems, die Analyse von Ursachen, Entstehung und Wirkungszusammenhängen sowie die Typisierung von Schadbildern. Daraus werden Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung abgeleitet. Als Basis dienen neben der Literaturrecherche die Durchführung einer statistisch auswertbaren Kartierung zur Erfassung von Schäden an Verkehrsflächen und die exemplarische Aufgrabung von Wurzelbereichen.

Die **Kartierung** von 2881 Baumstandorten in Verkehrsflächen im Stadtgebiet von Hannover ergibt, dass rund die Hälfte der Standorte die untersuchten Schadensmerkmale aufweisen und diese somit in einer beachtlichen Größenordnung auftreten. Die Baumgröße in Verbindung mit der Starkwüchsigkeit erweist sich dabei als wichtigster Einflussfaktor. Häufigkeit und Ausmaß der Schäden steigen mit zunehmender Baumgröße. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei nahezu jedem Baum in Verkehrsflächen früher oder später Schäden auftreten. Zweiter wichtiger Einflussfaktor ist das Vorhandensein und die Bauweise einer Randeinfassung. Standorte ohne Randeinfassung weisen eine überdurchschnittlich hohe Schadensquote und ein höheres Schadensausmaß auf, wobei erhöhte Bauweisen wie Hochborde mit geringeren Schadensquoten einher gehen. Weiterer Einflussfaktor ist die Baumscheibengröße, da im Umfeld kleiner Baumscheiben mehr und stärkere Schäden vorzufinden sind als bei größeren. Hinsichtlich der Wegedecken weisen Asphaltbeläge eine niedrigere Schadensquote auf als Pflaster- und Plattenbeläge. Hierbei dürfte es sich in erster Linie um eine materialbedingte zeitliche Verzögerung der Sichtbarkeit von Anhebungen handeln. Der Vergleich verschiedener Baumgattungen im Hinblick auf das Schadpotenzial lässt zwar Unterschiede erkennen, doch sind diese nur zum Teil auf artspezifische Wurzeleigenschaften zurückzuführen. Vielmehr scheinen die Wuchskraft und die Baumgröße die entscheidenden Faktoren zu sein. Gattungen mit besonders hoher oder niedriger Schadensquote wurden in dieser Untersuchung nicht gefunden. Die Art der Baumscheibe übt keinen Einfluss auf die Schadensquote aus. Es ist jedoch festzustellen, dass Baumscheibenbefestigungen in ähnlichem Umfang angehoben werden wie Wegedecken.

Wurzeluntersuchungen in Form von **Aufgrabungen** haben bei neun Fallbeispielen gezeigt, wie Wurzeln jede sich bietende Gelegenheit nutzen, um neue Bereiche zu erschließen. Dies sind am Straßenstandort oftmals Bereiche mit dürftigen, aber offenbar ausreichend guten Bodeneigenschaften. Hierzu gehören sämtliche Wegebaustoffe sowie Fugen und Spalten in festen Baukörpern. Die Unterschiede in den untersuchten physikalischen Bodeneigenschaften spielen für die Erschließung jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Offenbar sind die Bodendichte und das damit verbundene Porenvolumen und der Eindringwiderstand die ausschlaggebenden Faktoren für die Durchwurzelung. Typische Orte, an denen Wurzelwachstum fast zwangsläufig zu Schäden an Wegedecken führt, sind Pflaster- und Plattenbettungen, Fugenfüllungen aus Sand sowie Grenzzonen zwischen Wegebelag und Tragschicht. Durch ihr Dickenwachstum heben Wurzeln die Beläge an. Häufig wird dieser Vorgang durch Verdickungen an den Auflagestellen des Belags verstärkt, die sich als Reaktion auf den Druck bilden. Randeinfassungen wie Bord- und Kantensteine werden auch bei tief reichender Fundamentierung unterwachsen und je nach Gewicht und Wurzeldicke angehoben. In den Grenzbereichen zu Randeinfassungen befinden sich bautechnisch bedingt häufig Bodenzonen mit weniger starker Verdichtung, in denen die Wurzeln oftmals wieder emporwachsen. Auch Fugen zwischen den einzelnen Bord- oder Kantensteinen dienen als Einlasspforten in Bereiche unter dem Belag. Wo Wurzeln nicht in der Lage sind, Bauteile auseinander zu drücken oder anzuheben, passen sie sich in der Form den beengten Platzverhältnissen an und zeigen auffällige Deformationen. Nach Durch- oder Unterwachsen von Hindernissen setzen sie ihr Wachstum so fort, wie es ohne Barriere zu erwarten wäre. Das Wurzelwachstum verläuft tendenziell in einer Ebene radial vom Stamm weg. Die Wuchsrichtung der einzelnen Wurzeln ist jedoch ungerichtet und wird durch die jeweiligen Bodenbedingungen bestimmt. Lassen diese es zu, so erstreckt sich das Wurzelsystem weit über die Kronentraufe hinaus, teilweise auch mit Wurzeln großer Dicke. Die Aufgrabungen haben deutlich gemacht, dass konventionelle Pflanzgruben und Baumscheiben nicht ausreichen, um einem Straßenbaum auch nur mittelfristig eine Entwicklungsperspektive zu bieten. Wenn Bäume in den Wegeoberbau einwurzeln und Schäden herbeiführen, so ist dies ein zum Überleben erforderliches und keineswegs „aggressives“ Wurzelverhalten.

Schadbilder an Wegedecken und Randeinfassungen zeigen sich je nach Bauteilgröße und Elastizität in Anhebungen, Aufkantungen, Aufwölbungen, Rissen und Aufbrüchen. Nachteilig sind großformatige, leichte Platten mit sehr ebener Oberfläche, da sie leicht angehoben und dadurch zu Stolperfallen werden. Kleinteilige, anpassungsfähige Beläge dagegen wirken sich hinsichtlich der Schadensanfälligkeit und des Gefahrenpotenzials günstig aus. Problematisch sind insbesondere Wurzeln unter dem Belag und in der obersten Tragschicht. Je tiefer Wurzeln wachsen, desto geringer ist ihr Schadpotenzial.

Zur **Schadensbehebung** müssen Kompromisse zwischen den Anforderungen der Verkehrssicherheit, bautechnischen Erfordernissen und Belangen des Baumschutzes gefunden werden. Hier ist eine Abwägung im Einzelfall erforderlich. Baumfreundliche, wurzelerhaltende Lösungen sind oftmals nicht dauerhaft. Versäumnisse bei der Planung und beim Bau von Baumstandorten sind später kaum nachzuholen. Sind Schäden durch zu kleine Wurzelräume, zu kleine Baumscheiben oder zu schadensanfällige Bauweisen vorprogrammiert, so sollten zugunsten des Baumes wurzelschonende Verfahren angewendet und häufig wiederkehrende Reparaturen toleriert werden.

Der **Schadensvermeidung** ist angesichts der Schwierigkeiten bei der Behebung ein umso größerer Stellenwert einzuräumen. Hierzu existiert bisher keine zuverlässige Methode. Eigens entwickelte, spezielle Wurzelbarrieren haben sich bei Untersuchungen an anderer Stelle als wenig wirksam erwiesen. Sie dürften außerdem bei den in Deutschland üblichen Bauweisen nicht erforderlich sein. Die konventionellen, bautechnisch regelgerechten Kanten- und Bordsteine zwischen Pflanzgrube und Verkehrsfläche üben bereits eine ähnliche Funktion aus. Angesichts der großen Anpassungsfähigkeit von Baumwurzeln ist es fraglich, ob eine gänzliche Schadensvermeidung in der Praxis überhaupt möglich ist, oder das Ziel vielmehr die Reduzierung von Schäden sein sollte. Ein erhöhter Aufwand zur Schadensreduzierung ist insbesondere an stark frequentierten Orten mit hohen Anforderungen an die Sicherheit und die Ebenheit von Belägen sowie an die gestalterischen Qualitäten gerechtfertigt, wie z. B. in innerstädtischen Fußgängerzonen, in Geschäftsstraßen oder auf Stadtplätzen.

Der hier vorgeschlagene Ansatz zur Schadensvermeidung bzw. Schadensreduzierung basiert auf einer **vertikalen funktionsräumlichen Trennung von Verkehrsfläche und Wurzelraum**. Das Konzept umfasst drei Bausteine:

- Abstimmung von Baumgröße und Platzverhältnissen,
- Schaffung von Wurzelraum unter der obersten Tragschicht,
- Durchwurzelungssichere Ausbildung von Deckschicht und oberster Tragschicht.

Die vertikale funktionsräumliche Trennung von Verkehrsfläche und Wurzelraum ist nur bei Beachtung aller drei Anforderungen Erfolg versprechend. Die Baumgröße kann durch die Wahl der Baumart bzw. der Sorte auf den verfügbaren Wurzelraum abgestimmt werden. Dieser kann durch so genannte unterbaufähige Substrate in ausreichender Größe unter der obersten Tragschicht realisiert werden. Um Baumwurzeln aus den empfindlichen Wegebauschichten fernzuhalten, sollte die oberste Tragschicht möglichst stark verdichtet und hohlraumarm gebaut werden. Zum seitlichen Schutz der Deckschicht sollten nicht durchwurzelbare Randeinfassungen ohne oder mit dichten Fugen entwickelt und erprobt werden. Bei der Fortentwicklung des Konzeptes zu anwendungsreifen Lösungen sind die Praktikabilität und der Kostenaspekt zu berücksichtigen.

Auch, wenn neue Pflanzmethoden zur Schadensvermeidung führen sollten, wird die Problematik noch über Jahrzehnte bestehen. Die Optimierung der wurzelschonenden Behebung ist daher ebenfalls von großer Wichtigkeit. Vor allem sollten Vorurteile sowohl gegen Bäume als auch gegen Verkehrsflächen bald der Vergangenheit angehören: Baumwurzeln sind die Ursache von Belagsanhebungen, nicht aber die „Schuldigen“. Das Problem besteht vielmehr darin, dass der Raumbedarf und das Wuchsverhalten von Bäumen falsch eingeschätzt werden. Sie erschließen Lebensraum auch unter widrigsten Umständen, um durch die Expansion ihres Wurzelwerks das Überleben des Baumes zu sichern. Andererseits dringen Baumwurzeln auch dann in den Wegeoberbau ein, wenn sie andernorts bessere Bodenbedingungen finden. Wegebaustoffe wie Pflasterbettungen und Tragschichtmaterial sind oftmals gut durchwurzelbar. Sensible Wegebauschichten müssen daher gegen Durchwurzelung geschützt werden. Vitale Straßenbäume in intakten Verkehrsflächen erfordern ein Umdenken in der Planung und bei der Bauausführung von Straßenbaumstandorten sowie eine effektive Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen.

Quellenverzeichnis

Literatur

ARMBRUSTER, Georg (Hrsg; 2001): Regelgerechte Bauausführung im Garten-, Land- und Sportplatzbau. Augsburg.

BAKKER, J. W. (1983): Groeiplaats en watervorrziening van stratbomen. Groen 39 (6). 205-207. Zitiert in: FLL (1999): Empfehlungen für das Pflanzen von Bäumen. Bonn.

BALDER, Hartmut (1998): Die Wurzeln der Stadtbäume. Ein Handbuch zum vorbeugenden und nachsorgenden Wurzelschutz. Berlin und Wien.

BARKER, Philip A. (1994): Root Barriers for Controlling Damage to Sidewalk. In: WATSON, Gary W. (Hrsg.; 1994): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois. 179-185.

BARKER, Philip A. und Paula J. PEPER (1995): Strategies to prevent damage to Sidewalks by Tree Roots. Arboricultural Journal 1995, Vol. 19. S. 295-309.

BRAUN, Helmut J. (1988): Bau und Leben der Bäume. 2. erneuerte Auflage. Freiburg.

BORGWARDT, Sönke (1995): Die Versickerung auf Pflasterflächen als Methode der Entwässerung von minderbelasteten Verkehrsflächen. Beiträge zur räumlichen Planung Band 41. Hannover.

BURGER (1930): Holzarten auf verschiedenen Bodenarten. Mitt. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 16,1: 49-128. Zitiert in: POLOMSKI, Janina und Nino KUHN (1998): Wurzelsysteme. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.). Bern, Stuttgart, Berlin.

COILE, T. S. (1937): Distribution of forest tree roots in North Carolina Piedmont soil. J. of For. (36). 247-257. Zitiert in: PERRY, Thomas O. (1982): The Ecology of Tree Roots and the Practical Significance thereof. Journal of Arboriculture Vol. 8, No. 8 August 1982, 197-211.

COUENBERG, Els A. M. (1994): Amsterdam tree soil. In: WATSON, Gary W. (Hrsg.; 1994): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois. 25-33.

COUTTS, M. P. u. B. C. Nicoll (1991): Orientation of the lateral roots of trees. Upward growth of surface roots and deflection near the surface. New Phytology, 1991, 227-234. Zitiert in: NICOLL, Bruce C. und Alan ARMSTRONG (1998): Development of Prunus root Systems in a city street: Pavement damage and root architecture. In: Arboricultural Journal Vol. 22, 259-270.

CRAUL, Phillip J. (1992): Urban Soil in Landscape Design. New York.

DAY, Robert W. (1991): Damage of Structures due to Tree Roots. Journal of Performance of Constructed Facilities. ASCE. Vol. 5, No. 3, August.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. Berlin: Normen.

DIN 483	Bordsteine aus Beton (1981).
DIN 485	Gehwegplatten aus Beton (1987).
DIN 1998	Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen; Richtlinien für die Planung (1978).
DIN 18127	Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch (1997).
DIN 18134	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch (2001)
DIN 18158	Bodenklinkerplatten (1986).
DIN 18196	Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke (1988).
DIN 18501	Pflastersteine aus Beton (1982).
DIN 18503	Pflasterklinker – Anforderungen, Prüfung, Überwachung (1981).
DIN 18915	Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten (1990).
DIN 18916	Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Pflanzen und Pflanzarbeiten (1990).
DIN 18920	Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen (1990).
DIN EN 1341 –	Platten aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren (2000). Berlin.
DIN EN 1342 –	Pflastersteine aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren (2000). Berlin.
DIN EN 1343 –	Bordsteine aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren (2000). Berlin.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2000): VOB (Teil C): Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV). Berlin.
ATV DIN 18315 Verkehrswegebauarbeiten – Oberbauschichten ohne Bindemittel (2000).

ATV DIN 18316 Verkehrswegebauarbeiten – Oberbauschichten mit hydraulischen Bindemitteln (2000).
ATV DIN 18317 Verkehrswegebauarbeiten – Oberbauschichten aus Asphalt (2000).
ATV DIN 18318 Verkehrswegebauarbeiten – Pflasterdecken, Plattenbeläge, Einfassungen (2000).
ATV DIN 18320 Verkehrswegebauarbeiten – Landschaftsbauarbeiten (2000).

FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN e. V. Köln.
EAE 85/95 Empfehlungen für die Anlage von Erschließungsstraßen. (Ausgabe 1985, ergänzte Fassung 1995).
Empfehlungen zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten (1991).
Merkblatt über Baumstandorte und unterirdische Ver- und Entsorgungsanlagen. (Ausgabe 1989, Nachdruck 1997).
Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen für Verkehrsflächen (1998). Köln.
RAS-LP 4 Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Landschaftspflege, Abschnitt 4: Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen (1999).
RStO 01 Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus (2001).
ZTVE-StB 94 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten (Ausgabe 1994, Fassung 1997).
ZTVT-StB 95 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten (Ausgabe 1995, Fassung 1998).
ZTVP-StB 2000 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken und Plattenbelägen (2000).
ZTV Asphalt-StB 01 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Oberbauschichten aus Asphalt (2001).
ZTV Beton-StB 01 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahnen aus Beton (2001).

FLL – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU (2001): Zusätzliche Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflege (ZTV Baumpflege). Bonn.

FLL – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU (1999): Empfehlungen für das Pflanzen von Bäumen. Bonn.

FRANCIS, John K. et al. (1996): Probability of Damage to Sidewalks and Curbs by Street Trees in the Tropics. Journal of Arboriculture. 1996. Vol. 22, No. 4 July, 193-197.

GALK (1995): Straßenbaumliste der Gartenamtsleiter. Ständige Konferenz der Gartenamtsleiter beim Deutschen Städtetag – Arbeitsgruppe Stadtbäume (Hrsg.). Stadt und Grün 11(1995). 775-800.

GILMAN, Edward F. (1996): Root Barriers Affect Root Distribution. Journal of Arboriculture. 1996. Vol. 22, No. 3 May, 151-154.

GRABOSKY, Jason und Nina BASSUK (1996): Testing of structural urban tree soil materials for use under pavement to increase street tree volumes. Journal of Arboriculture 22 (6) November. 255–262.

GREACAN, E. L., K. P. BARLEY u. D. A. FARRELL (1969) in: The mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution. In: W. J. WITHINGTON, ed: Root growth, 25–269. New York. Zitiert in: CRAUL, Phillip J. (1992): Urban Soil in Landscape Design. New York.

HALVERSON, Howard G. und Gordon M HEILSER (1981): Soil Temperatures under urban trees and asphalt. United States Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper NE-481.

HAMILTON, W. Douglas (1984a): Sidewalk/Curb-breaking tree roots. 1. Why tree roots cause pavement problems. Arboricultural Journal Vol. 8 1984. 37-44.

HAMILTON, W. Douglas (1984b): Sidewalk/Curb-breaking tree roots. 2. Management to minimise existing Pavement Problems by Tree Roots. Arboricultural Journal Vol. 8 1984. 223-234.

HARRIS, Richard W. (1992): Arboriculture. Integrated Management of Landscape Trees, Shrubs and Vines. New Jersey.

HELLIWELL, D. R. (1986): The extend of tree roots. Arboricultural Journal Vol. 10 1986, 341-347.

HORST-BRUGGEMANN, G. (1987): Wegdek en beplanting. In: Verkeerskunde 38 (1987) Nr. 2. 98-99.

HÖSTER, Rolf (1993): Baumpflege und Baumschutz. Grundlagen, Diagnosen, Methoden. Stuttgart.

HOFFMANN, G. (1966): Verlauf der Tiefendurchwurzlung und Feinwurzelbildung bei einigen Baumarten. Arch. f. Forstw. Zitiert in: CRAUL, Phillip J. (1992): Urban Soil in Landscape Design. New York.

JENIK, J. (1957): Das Wurzelsystem der Stieleiche und Traubeneiche. Rozpravy Ceslovskovenske Akademie Ved. Zitiert in: KÖSTLER, Josef Nikolaus und E. BRÜCKNER, H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg, Berlin.

JOACHIM, H. F. (1953): Untersuchungen über die Wurzelausbildung der Pappelsorten. Wiss. Abhandl. Dtsch. Akad. Landw.-Wiss. Berlin. Zitiert in: KÖSTLER, Josef Nikolaus und E. BRÜCKNER, H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg, Berlin.

KIERMEIER, Peter (1996): Planungshilfen. In: Sortimentskatalog Baumschule Lorenz von Ehren, 6. Auflage 1996. Hamburg.

KÖSTLER, Josef Nikolaus und E. BRÜCKNER, H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg, Berlin.

KOPINGA, Jitze (1991): The effect of restricted volumes of soil on the growth and development of street trees. Journal of Arboriculture. 1991. 17: 3. 57-63.

KOPINGA, Jitze (1992): Die Entwicklung von Baumwurzeln unter Straßenbelägen. In: 10. Osnabrücker Baumpflegetage: 22. bis 24. September 1992. Osnabrück. 10.1 - 10.22.

KOPINGA, Jitze u. J. W. BAKKER (1992): Zeer open asfaltebeton als alternatief voor tegelverharding op de doorwortelde bodemzone bij (staat)bomen. Dorschkamprapport nr. 689, IBN Wageningen. Zitiert in: KOPINGA, Jitze (1997): Grundlage für die Bemessung und Anlage von Wurzelräumen – Wurzelraumgrößen, Nährstoffversorgung, bodenmechanische Aspekte. Tagungsband 15. Osnabrücker Baumpflegetage. Osnabrück.

KOPINGA, Jitze (1994): Aspects of the Damage to Asphalt Road Paving Caused by Tree Roots. In: WATSON, Gary W. (Hrsg.; 1994): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois. 165-178.

KOPINGA, Jitze (1997): Grundlage für die Bemessung und Anlage von Wurzelräumen – Wurzelraumgrößen, Nährstoffversorgung, bodenmechanische Aspekte. Tagungsband 15. Osnabrücker Baumpflegetage. Osnabrück.

KRAMER, P. J. (1969): Plant and Soil Water Relationships: A Modern Synthesis. New York. Zitiert in: HARRIS, Richard W. (1992): Arboriculture. Integrated Management of Landscape Trees, Shrubs and Vines. New Jersey.

KRIETER, Manfred und A. BILL, A. MALKUS, G. WÜRDIG (1989): Standortoptimierung von Straßenbäumen – Teil 1. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL). Bonn.

KRIETER, Manfred und A. MALKUS (1996): Untersuchungen zur Standortoptimierung von Straßenbäumen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL). Bonn.

KRISTOFFERSON, Palle (1999): Growing trees in road foundation materials. In: Arboricultural Journal Vol. 23, 57-76.

LADEFOGED, K. (1939): Untersuchung über die Periodizität im Ausbruch und Längenwachstum der Wurzeln bei einigen unserer gewöhnlichsten Waldbäume. Kopenhagen. Zit. in: KÖSTLER, Josef Nikolaus und E. BRÜCKNER, H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume.

LAITAKARI, E. (1935): (The Root system of Birch) (finnisch) Act. For. Fenn. Zit. in: KÖSTLER, Josef Nikolaus und E. BRÜCKNER, H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg, Berlin.

LESSER, Lawrence und Barbara AUGSDORFER (1994): Surface Rooting Barriers. In: Landscape Design 07/1994. 16-19.

LIESECKE, Hans-Joachim (1970): Untersuchungen über das Auftreten mechanischer Unterbodenverdichtung in Grünflächen. Beiheft 4 zu Landschaft + Stadt. Stuttgart.

LIESECKE, Hans-Joachim (1991): Verbesserung des Wurzel- und Standraumes von Bäumen in Stadtstraßen. Ansatz und Durchführung eines Forschungsvorhabens des BMV. Das Gartenamt 40 (1991) 649-650 u. 655-660.

LIESECKE, Hans-Joachim (1994): Substrate für innerstädtische Straßenbaum-Pflanzungen. Stadt und Grün 43 (1994). 761-769.

LIESECKE, Hans-Joachim und Clemens HEIDGER (1994): Bäume in Stadtstraßen. Untersuchung zur Entwicklung und Erprobung von vegetationstechnischen und bautechnischen Maßnahmen zur Optimierung des Wurzel- und Standraumes von Bäumen in Stadtstraßen. Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.). Bonn-Bad Godesberg.

LIESECKE, Hans-Joachim und Clemens HEIDGER (2000): Substrate für Bäume in Stadtstraßen. Teil 1: Darstellung und Beurteilung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben des BMV „Bäume in Stadtstraßen“. Teil 2: Diskussion der Ergebnisse und Ableitung eines Anforderungsprofils. Stadt und Grün 49 (2000) 463-470 u. 620-624.

LINDSEY, P. and N. BASSUK (1991): Specifying soil volumes to meet the water needs of mature street trees and trees in containers. Urban Horticulture Institute, Cornell University, Ithaca, New York 14853, USA. Journal of Arboriculture. 1991. 17: 6. 141-149.

LINDSEY, Patricia (1997): Die Beschaffenheit von strukturierten Substratmischungen für Bäume in urbanen Gebieten. Tagungsband 15. Osnabrücker Baumpflegetage 1997, V-15. Osnabrück.

LINDSEY, P. and N. BASSUK (1992): Redesigning the urban forest from the Ground below: an new approach to specifying adequate soil volumes for street tree. Urban Horticulture Institute, Cornell University, Ithaca, New York 14853, USA. Arboricultural Journal. 1992. 16: 4, 25-39.

LÖSKEN, Gilbert, Clemens HEIDGER und Hans-Joachim LIESECKE (2001): Bäume in Stadtstraßen Teil II. Entwicklung und Erprobung von vegetationstechnischen und bautechnischen Maßnahmen zur Optimierung des Wurzel- und Standraumes von Bäumen in Stadtstraßen. Forschungsbericht FE-Nr. 70524/97. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.). Bonn Bad Godesberg.

LÖSKEN, Gilbert (2001): Darstellung aus der Vorlesung „Technische Grundlagen“. Universität Hannover, Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur. Hannover. Unveröffentlicht.

LYR, Horst und H.-J. FIEDLER, W. TRANQUILLINI (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Stuttgart.

LYR, H. u. G. HOFFMANN (1967): Growth rates and growth periodicity or tree roots. Int. Rev. Forest. Res. (2), 181–236. Zitiert in: CRAUL, Phillip J. (1992): Urban Soil in Landscape Design. New York.

LYFORD, W. H. (1975): Rhizography of nonwoody roots of trees in the forest floor. In: J. G. TORREY and D. T. CLARKSON, eds.: The development and function of Roots. 197-196. New York. Zitiert in: CRAUL, Phillip J. (1992): Urban Soil in Landscape Design. New York.

MEYBOOM, P. u. J. KOPINGA (1995): Dwarsscheuren in asfaltverharding door boomwortels. Groen 10, 34-36.

MEYER, F. H. (Hrsg.;1982): Bäume in der Stadt. 2. Aufl. Stuttgart.

MOLTSCHANOW, A. A. (1957):Die hydrologische Rolle des Kiefernwaldes auf Sandböden. Berlin. Zitiert in: KÖSTLER, Josef Nikolaus und E. BRÜCKNER, H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg, Berlin.

NICOLL, Bruce C. u. M. P. COUTTS (1997): Direct damage by urban tree roots: Paving the way for less damaging street trees. Arboriculture Practice – Present an Future. Research for amenity trees No. 6: 77-84. Department of the Environment, Transport and the Regions, London. Zitiert in: NICOLL, Bruce C. und Alan ARMSTRONG (1998): Development of Prunus root Systems in a city street: Pavement damage and root architecture. In: Arboricultural Journal Vol. 22, 259-270.

NICOLL, Bruce C. und Alan ARMSTRONG (1998): Development of Prunus root Systems in a city street: Pavement damage and root architecture. In: Arboricultural Journal Vol. 22, 259-270.

NULTSCH, Wilhelm (1996): Allgemeine Botanik. Stuttgart, New York.

OMEGAM (1999): Koninginneweg – onderzoek DeepRoot. Amsterdam.

OVINGTON, J. D. (1957): Dry matter production by Pinus sylvestris L. Ann. Bot. N. Zitiert in: KÖSTLER, Josef Nikolaus und E. BRÜCKNER, H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg, Berlin.

PATTERSON, James C. (1976): Soil compaction and its effects upon urban vegetation. Better trees for metropolitan landscapes symposium proceedings. USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep. NE-22. 91-101.

PEPER, Paula J. und Philip A. BARKER (1983): A Buyer’s Technical Guide to Root Barriers. In: WATSON, Gary W. (Hrsg.; 1994): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois. 186-193.

PEPER, Paula J. und Sylvia MORI (1999): Root Barrier an Extension Casing Effects on Chinese Hackberry. Journal of Arboriculture. 1999. Vol. 25, No. 1 January, 1-8.

PERRY, Thomas O. (1982): The Ecology of Tree Roots and the Practical Significance thereof. In: Journal of Arboriculture Vol. 8, No. 8 August 1982, 197-211.

PERRY, Thomas O. (1994): Size, Design and Management of Tree Planting Sides. In: WATSON, Gary W. (Hrsg.; 1994): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois. 3-15.

POLOMSKI, Janina und Nino KUHN (1998): Wurzelsysteme. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.). Bern, Stuttgart, Berlin.

ROTERMUND, Carsten (1999): Die Haftung der Kommunen für die Verletzung der Verkehrssicherungspflicht. Berlin.

SCHEFFER, Fritz, P. SCHACHTSCHABEL et al.(1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart.

SCHROEDER, Diedrich (1994): Bodenkunde in Stichworten. Würzburg.

SIEWNIAK, Marek und Dietrich KUSCHE (1994): Baumpflege heute. Berlin, Hannover.

SIKES, D. A. u. A. D. PETTIT (1980): Soil temperature, oxygen and water level effects on sand shiners oak. Soil Sci. 130. 344–349. Zitiert in: LYR, Horst und H.-J. FIEDLER, W. TRANQUILLINI (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Stuttgart.

STADT HANNOVER (2000): Umweltbericht 2001. Hannover.

STADT KÖLN (1997): Untersuchung der Kölner Alleen – Pflege- und Sanierungskonzept. Amt für Landschaftspflege und Grünflächen. Köln.

STADT OSNABRÜCK (Hrsg.; 1997): Wurzelraumoptimierung – Beispiele aus Osnabrück. Osnabrück.

STOLK, Ton und Marco HOFFMAN (2000): Straatboomkeuze bepaalt kans op wegdekschade. Tuin & Landschap 19 (2000) 50-51.

SYDNOR, T. Davis et al. (2000): Trees are not the Root of Sidewalk Problems. Journal of Arboriculture. 2000. Vol. 26, No. 1 January.

TAUCHNITZ, Hartmut (1988): Sachstandsbericht Stadtbäume. Das Gartenamt 37(1988) Dezember. 757 -764.

TAUCHNITZ, Hartmut (1994): Promenade Münster und Sonderprogramme zur Vermehrung und Sicherung des Baumbestandes. Das Gartenamt 43 September: 586–593.

TAUCHNITZ, Hartmut (1997): Warum Bäume an Straßen gepflanzt werden. Stadt und Grün 37 (1997) Juli. 469-477.

URBAN, James (1992): Tree Excavation. Unveröffentlichtes Manuskript.

URBAN, James (1994): Root Barriers: An Evaluation. Landscape Architecture. 6/1999. 28-31.

URBAN, James, Ralph SIEVERT und James PATTERSON (1988): A blueprint of tomorrow. American Forests (July/August). 58-63.

URBAN, James (1998): Tree planting in urban areas. In: RAMSEY u. SLEEPER (1998): Architectural graphic standards, 9th ed., New York. 83-85.

URBAN, James (1999): Tyron Street Mall – Existing Tree Root Evaluation. Unveröffentlichtes Manuskript.

VEIHMEYER, F. J. u. A. H. HENDRICKSON (1948):Soil density and root penetration. Soil Sci. 65: 487-493. Zitiert in: LIESECKE, Hans-Joachim (1970): Untersuchungen über das Auftreten mechanischer Unterbodenverdichtung in Grünflächen. Beiheft 4 zu Landschaft + Stadt. Stuttgart.

VOLZ, Heinrich (1959): Untersuchung über das Auftreten von mechanischen Bodenverdichtungen in Obstplantagen und ihre Auswirkung auf das Wurzelwachstum von Apfelniederstämmen. Dissertation. Bonn.

WAGAR, J. A. and Philip A. BARKER (1983): Tree Root damage to sidewalks and curbs. Journal of Arboriculture. 1983 (9) 7: 177-181.

WATSON, Gary W. (Hrsg.; 1994): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois.

WENDRICH, Klaus (1994): Niedersächsisches Straßengesetz – Kommentar. Hannover.

WILSON, B. F. (1984): The Growing Tree. rev. ed. Amherst: University of Massachusetts Press. Zitiert in: HARRIS, Richard W. (1992): Arboriculture. Integrated Management of Landscape Trees, Shrubs and Vines. New Jersey.

WILSON (1964): Structure and growth of woody roots of *Acer rubrum*. L. Harvard Forest Paper No. 11, Petersham, MA. zitiert in: CRAUL, Phillip J. (1992): Urban Soil in Landscape Design. New York.

WONG, T. W. und J. E. G. GOOD, M. P. DENNE (1988): Tree Root Damage to Pavements and Kerbs in the City of Manchester. Arboricultural Journal Vol. 12 1988, 17-34.

YODA, K. (1967): Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. III: Community respiration. Nature Life Southeast Asia, 5. 83–148. Zitiert in: LYR, Horst und H.-J. FIEDLER, W. TRANQUILLINI (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Stuttgart.

ZIMMERMANN, M. H. u. C. L. BROWN (1971): Trees: Structure and Function. New York. Zitiert in: HARRIS, Richard W. (1992): Arboriculture. Integrated Management of Landscape Trees, Shrubs and Vines. New Jersey.

Gesetze

BGB - Bürgerliches Gesetzbuch der Bundesrepublik Deutschland

GG - Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland

NStrG - Niedersächsisches Straßengesetz (Fassung 1980, zuletzt geändert 1989)

Urteile

OLG Saarland, Urteil vom 21.07.1998, Az. 4 U 886/97-235-

OLG Düsseldorf, Urteil vom 23.12.1996, Az. 8 U 139/96

OLG Köln, Urteil vom 09.01.1985, Az 6 U 87/84

OLG Nürnberg, Urteil vom 23.06.93, Az U 635/93

OLG Nürnberg, Urteil vom 02.12.98, Az U 2988/98

OLG Nürnberg, Urteil vom 28.03.01, Az U 283/01

Mündliche Auskünfte

BEGEROW (2001), Justitiar der Stadt Wunstorf

BEYER, Thomas (2001), Abteilung Grünflächen, Stadt Wunstorf

GREENAWAY, Ben (1998), Street Tree Section Stadtverwaltung Manchester (GB)

HEGER, Carsten (1999), Tiefbauamt, Stadt Hannover

KOPINGA, Jitze (2001), Alterra – Research institut voor de groene ruimte (NL)

KOOLWAY, Rudolf (2002), Amt für Grünflächen und Umweltschutz, Stadt Münster

KUNZE, Dieter (2001), Rechtsamt der Stadt Hannover

LAMBERT, Andreas (2002), Amt für Grünflächen und Umweltschutz, Stadt Münster

MAAG, Thomas (2001), Fachbereich Grün und Umwelt, Stadt Osnabrück

MEINDL, Jörg (2001), Amt für Landschaftspflege und Grünflächen, Stadt Köln

RICKERS, Carsten (2001), Amt für Straßen- und Verkehrstechnik, Stadt Köln

SCHRÖDER, Klaus (2001), Fachbereich Grün und Umwelt, Stadt Osnabrück

SCHROER (2001), Amt für Landschaftspflege und Grünflächen, Stadt Köln

URBAN, James (1998), Landschaftsarchitekt, Maryland (USA)

Kartengrundlage

DGK 1:5000, Hannover (Übersicht). Hrsg.: Katasteramt Hannover, 1995.

Anhang

Kartierbogen (exemplarisch)

Kartierbogen 1. Abschnitt

Kartierbogen 2. Abschnitt

Ergebnistabellen der Kartierung

Tabelle 1: Kartierungsergebnisse gesamt und Abkürzungen

Tabelle 2: Gattung (3 Seiten)

Tabelle 3: Gattung – *Acer* nach Stammdurchmesser

Tabelle 4: Gattung – *Crataegus* nach Stammdurchmesser

Tabelle 5: Gattung – *Platanus* nach Stammdurchmesser

Tabelle 6: Gattung – *Robinia* nach Stammdurchmesser

Tabelle 7: Gattung – *Tilia* nach Stammdurchmesser

Tabelle 8: Stammdurchmesser in 130 cm Höhe

Tabelle 9: Baumscheibengröße

Tabelle 10: Art der Baumscheibe

Tabelle 11: Art der Wegedecke

Tabelle 12: Art der Randeinfassung

Tabelle 13: Zustand der Baumscheibe

Tabelle 14: Zustand der Wegedecke

Tabelle 15: Zustand der Randeinfassung

Tabelle 16: Lokalisierung

Körnungslinien der Bodenproben

Bodenprobe A: Fallbeispiele 1 und 2, *Quercus robur*, Hannover, Pflasterbettung/Tragschicht

Bodenprobe B: Fallbeispiele 1 und 2, *Quercus robur*, Hannover, Unterbau

Bodenprobe C: Fallbeispiel 3, *Acer saccharinum*, Hannover, Pflasterbettung/Tragschicht

Bodenprobe 1: Fallbeispiel 4, *Acer platanoides*, Hannover, Pflasterbettung (Platten)

Bodenprobe 2: Fallbeispiel 4, *Acer platanoides*, Hannover, Pflasterbettung (Pflaster)

Bodenprobe 3: Fallbeispiel 4, *Acer platanoides*, Hannover, Tragschicht

Bodenprobe 4: Fallbeispiel 5, *Sophora japonica*, Wunstorf, Pflasterbettung

Bodenprobe 5: Fallbeispiel 5, *Sophora japonica*, Wunstorf, Tragschicht

Bodenprobe 6: Fallbeispiel 6, *Platanus x acerifolia*, Wunstorf, Pflasterbettung

Bodenprobe 7: Fallbeispiel 6, *Platanus x acerifolia*, Wunstorf, Tragschicht

Bodenprobe 9: Fallbeispiel 7, *Robinia pseudoacacia* I, Köln, Tragschicht 1. Probe

Bodenprobe 10: Fallbeispiel 7, *Robinia pseudoacacia* I, Köln, Tragschicht 2. Probe

Bodenprobe 11: Fallbeispiel 8, *Robinia pseudoacacia* II, Köln, Pflasterbettung

Bodenprobe 12: Fallbeispiel 9, *Tilia x intermedia*, Köln, Unterbau 1. Probe

Bodenprobe 13: Fallbeispiel 9, *Tilia x intermedia*, Köln, Tragschicht

Bodenprobe 14: Fallbeispiel 9, *Tilia x intermedia*, Köln, Unterbau 2. Probe

Erhebungsbogen zur Erfassung von Veränderungen an Wegebelägen durch Baumwurzeln

Nr.: LINN 9 — 14.6.99 Re: (Datum/Name)

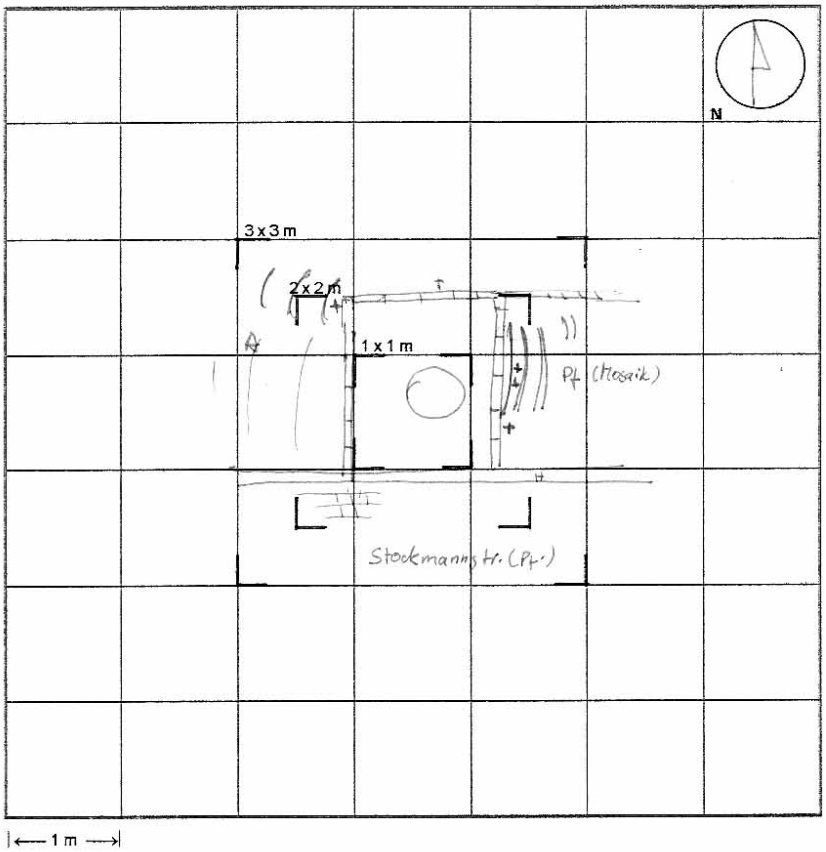
Stockmannstr. (Ecke Röttgerstr.)	Limmer	Linden Nord	
Straße	Stadtkarte 1:5000	Pol.-Bezirk	Pflegebezirk
Acer campestre 'Elsrijk'	NA	/	
Baumgattung	StU (130cm Höhe)	Baumkataster-Nr.	Pflanzjahr

Zutreffendes ankreuzen

1	2	3	4	5	6	7	8	9
D 130	Baumscheibe Größe	Baumscheibe Art überwiegend	Baumscheibe Zustand	Wegedecke Art überwiegend	Wegedecke Zustand	Randeinfassung Art	Randeinfassung Zustand	Lokalisierung der Veränderungen an Belägen
1 ☐ ≤ 20 cm 2 ☒ ≤ 35 cm 3 ☐ ≤ 50 cm 4 ☐ > 50 cm	1 ☐ ≤ 1 m² 2 ☒ ≤ 4 m² 3 ☐ ≤ 9 m²	1 ☒ offen 2 ☐ Rost 3 ☐ Steine 4 ☐ bepflanzt	1 ☐ keine Auffällig-keiten 2 ☐ Abdeckung verändert 3 ☒ Wurzeln sichtbar	1 ☒ Asphalt 2 ☐ Platten 3 ☐ Pflaster 4 ☐ Beton	1 ☐ keine 2 ☐ ein 3 ☒ 2-5 4 ☐ > 5 Wurzel-stränge erkennbar	1 ☐ keine 2 ☒ eben 3 ☐ erhöht 4 ☐ Mauer, Trog	1 ☐ keine 2 ☐ 1 Stelle 3 ☒ 2-5 St. 4 ☐ > 5 St. verändert	1 ☐ keine 2 ☐ über Seite 3 ☐ über Ecke 4 ☐ Wurzelanlauf 5 ☒ Seiten+Ecken 6 ☐ Seiten+Anlauf 7 ☐ Ecken+Anlauf 8 ☐ Seiten+Ecken + Anlauf

Bemerkung: nun Photo machen; Baumscheibe stark mit OF-nahen Wurzeln durchsetzt

Skizze



Wegebefestigung
A = Asphalt
Pl = Platten
Pf = Pflaster
B = Beton

Randeinfassung
H = erhöht
T = tief
M = Mauer
S= sonstiges:.....

Baumscheibe
o = offen M = Mulch
Sch = Schüttstoff (Lava, Kies etc.)
b = bepflanzt
R = Rost
B = Befestigung mit Baumscheibenelementen aus Beton, Pflaster etc.

Legende

Farbe: Rot = Veränderungen (Beläge, Randeinfassungen)

Aufwölbung

Riß

Platte angehoben

Pflaster angehoben

Kantenstein angehoben

Farbe: Blau = Standort im Grundriß

Farbe: Grün = sichtbare Wurzel

Erhebungsbogen zur Erfassung von Veränderungen an Wegebelägen durch Baumwurzeln

Stadtteil: **Oststadt** **Blatt-Nr.:** 26

Straße: Rambergstraße **Stadtkarten:** ☐ Hannover ☐ List **Datum/Name:** 10.04.00 Reichwein

				1			2				3			4			5				6				7				8								9	10
B.-Nr.	Hs-Nr.	Art	StU 130	BS Größe			BS Art				BS Zust.			WD Art			WD Zustand				RE Art				RE Zust.				Lokalisierung								Photo	Bem.
Ost			[cm]	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	x	Nr.
376	E	Robinia	55		X					X	X					X	X							X		X					X							
377	E	"	85		X					X	X					X	X							X	X				X									
378	41	"	59		X		X				X					X	X							X	X				X									
379	E	"	73		X					X	X					X	X							X	X				X									
380	7 E	"	109		X		X				X			X			X							X	X				X									
381	9	"	87		X					X	X			X			X							X	X				X									
382	36	"	105		X					X	X					X		X						X		X					X							
383	E	"	116		X		X				X					X			X					X			X				X							
384	13 E	"	70		X					X	X					X	X							X	X				X									
385	E	"	61		X					X	X					X	X							X			X				X							
386	32 E	"	90		X		X				X			X			X							X			X				X							
387	30	"	23		X		X				X			X			X							X	X				X									
388	Spielpl.	"	109		X		X				X					X		X						X			X				X							
389	"	"	73		X		X				X					X			X					X	X							X							
390	"	"	101		X		X				X					X			X					X	X						X							
391	"	"	90		X		X				X					X			X					X	X							X							
392	4 E	"	87		X		X						X		X				X					X			X					X							
393	E	"	90		X		X				X				X			X						X		X					X							
gesamt		18	Bäume																																			

E = Ecke

Erhebungsbogen 2000.xls reichwein/9.3.00

Gesamtergebnis			1			2				3				4			5					6				7					8								
	gesamt	D	BS Größe			BS Art				BS Zustand				WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zust.					Lokalisierung								
		[cm]	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
		durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
#	2881	24	32	1873	979	2383	91	268	139	2451	171	259	430	390	751	1740	1504	405	862	110	1377	515	1895	323	158	2052	369	414	16	799	1393	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100		1	65	34	83	3	9	5	85	6	9	15	14	26	60	52	14	30	4	48	18	65	11	5	72	13	14	1	28	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.																		29	63	8	100						46	52	2	100		36	14	0	51	0	0	0	100

Abkürzungen

#	Anzahl
%	prozentualer Anteil an der Gesamtanzahl
% Sch.	prozentualer Anteil an der Anzahl Schäden
D	Durchmesser
BS	Baumscheibe
WD	Wegedecke
RE	Randeinfassung

Hinweis zu Bezeichnungen:
Beim Zustand von Baumscheiben wird der Begriff "Veränderungen" anstelle von "Schäden" verwendet

Tabelle 1: Kartierungsergebnisse gesamt

Gattungen			1			2				3					4			5					6				7						8								
		D	BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand						Lokalisierung								
		[cm]	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
			durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
Acer																																									
#	377	23	5	300	72	341	0	16	20	357	260	9	88	97	81	90	206	147	58	142	30	230	30	270	51	26	347	186	56	102	3	161	137	72	26	0	141	0	0	1	240
%	13		1	80	19	90	0	4	5		73	3	25	27	21	24	55	39	15	38	8	61	8	72	14	7		54	16	29	1	46	36	19	7	0	37	0	0	0	64
% Sch.																			25	62	13	100							35	63	2	100		30	11	0	59	0	0	0	100
Aesculus																																									
#	63	30	0	25	38	53	2	4	4	59	43	5	11	16	17	22	24	25	11	25	2	38	14	35	12	2	49	24	8	16	1	25	24	12	4	0	23	0	0	0	39
%	2		0	40	60	84	3	6	6		73	8	19	27	27	35	38	40	17	40	3	60	22	56	19	3		49	16	33	2	51	38	19	6	0	37	0	0	0	62
% Sch.																			29	66	5	100							32	64	4	100		31	10	0	59	0	0	0	100
Corylus																																									
#	97	26	3	26	68	85	0	8	4	93	82	6	5	11	5	17	75	62	22	13	0	35	8	87	2	0	89	70	13	6	0	19	56	34	3	0	4	0	0	0	41
%	3		3	27	70	88	0	8	4		88	6	5	12	5	18	77	64	23	13	0	36	8	90	2	0		79	15	7	0	21	58	35	3	0	4	0	0	0	42
% Sch.																			63	37	0	100							68	32	0	100		83	7	0	10	0	0	0	100
Crataegus																																									
#	302	16	2	222	78	226	18	30	28	274	252	18	4	22	9	152	141	204	47	50	1	98	207	67	28	0	95	80	10	5	0	15	195	63	15	0	29	0	0	0	107
%	10		1	74	26	75	6	10	9		92	7	1	8	3	50	47	68	16	17	0	32	69	22	9	0		84	11	5	0	16	65	21	5	0	10	0	0	0	35
% Sch.																			48	51	1	100							67	33	0	100		59	14	0	27	0	0	0	100
Platanus																																									
#	388	30	1	239	148	303	26	59	0	388	325	28	35	63	16	161	211	140	41	164	43	248	96	261	31	0	292	160	72	54	6	132	134	71	23	0	159	1	0	0	254
%	13		0	62	38	78	7	15	0		84	7	9	16	4	41	54	36	11	42	11	64	25	67	8	0		55	25	18	2	45	35	18	6	0	41	0	0	0	65
% Sch.																			17	66	17	100							55	41	5	100		28	9	0	63	0	0	0	100
Quercus																																									
#	195	24	3	144	48	170	1	23	1	194	175	13	6	19	4	31	160	112	28	50	5	83	34	127	19	15	161	109	18	34	0	52	104	34	10	0	47	0	0	0	91
%	7		2	74	25	87	1	12	1		90	7	3	10	2	16	82	57	14	26	3	43	17	65	10	8		68	11	21	0	32	53	17	5	0	24	0	0	0	47
																			34	60	6	100							35	65	0	100		37	11	0	52	0	0	0	100

Tabelle 2: Gattungen

Gattungen			1			2				3					4			5					6				7					8								
		D	BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand					Lokalisierung								
		[cm]	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
			durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Slete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	insgesamt
Robinia																																									
#	466	30	1	327	138	368	4	55	19	447	334	43	70	113	135	102	229	179	77	197	13	287	30	352	60	24	436	230	99	105	2	206	150	102	44	1	167	1	0	1	316
%	16		0	70	30	83	1	12	4		75	10	16	25	29	22	49	38	17	42	3	62	6	76	13	5		53	23	24	0	47	32	22	9	0	36	0	0	0	68
% Sch.																			27	69	5	100							48	51	1	100		32	14	0	53	0	0	0	100
Sorbus																																									
#	177	19	2	152	23	160	5	2	10	167	154	3	10	13	52	19	106	137	19	21	0	40	9	122	20	26	168	135	13	20	0	33	125	14	17	0	21	0	0	0	52
%	6		1	86	13	90	3	1	6		92	2	6	8	29	11	60	77	11	12	0	23	5	69	11	15		80	8	12	0	20	71	8	10	0	12	0	0	0	29
% Sch.																			48	53	0	100							39	61	0	100		27	33	0	40	0	0	0	100
Tilia																																									
#	656	21	14	366	276	519	29	68	40	616	557	43	16	59	62	125	469	413	85	148	10	243	52	491	76	37	604	478	70	54	2	126	385	93	53	0	125	0	0	0	271
%	23		2	56	42	79	4	10	6		90	7	3	10	9	19	71	63	13	23	2	37	8	75	12	6		79	12	9	0	21	59	14	8	0	19	0	0	0	41
% Sch.																			35	61	4	100							56	43	2	100		34	20	0	46	0	0	0	100
sonstige																																									
#	160	26	1	69	90	138	6	3	13	147	130	3	14	17	9	32	119	85	17	52	6	75	35	73	24	28	125	95	10	18	2	30	83	24	6	5	41	0	0	1	77
%	6		1	43	56	86	4	2	8		88	2	10	12	6	20	74	53	11	33	4	47	22	46	15	18		76	8	14	2	24	52	15	4	3	26	0	0	1	48
% Sch.																			23	69	8	100							33	60	7	100		31	8	6	53	0	0	1	100
gesamt																																									
#	2881	24	32	1870	979	2383	91	268	139	2742	2312	171	259	430	390	751	1740	1904	405	862	110	1377	515	1655	323	158	2308	1567	369	414	16	799	1303	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100		1	65	34	83	3	9	5		84	6	9	16	14	26	60	52	14	30	4	48	18	65	11	5		66	16	17	1	34	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.																			29	63	8	100							46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100

Tabelle 2: Gattungen

Gattungen		1			2				3					4			5					6				7					8								
	D	BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand					Lokalisierung								
	[cm]	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8
		durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	insgesamt
sonstige																																							
Fraxinus																																							
	#	46	20	0	26	20	44	0	0	2	44	36	0	8	8	5	9	32	24	4	16	2	22	13	13	19	1	33	26	1	3	1	5	24	4	3	0	14	0	0	1	22
	%	2		0	57	43	96	0	0	4		82	0	18	18	11	20	70	52	9	35	4	48	28	28	41	2		85	3	9	3	15	52	9	7	0	30	0	0	2	48
	% Sch.																			18	73	9	100							20	60	20	100		18	14	0	64	0	0	5	100
Populus																																							
	#	17	50	0	8	9	14	0	2	1	16	13	1	2	3	2	1	14	5	0	10	2	12	4	8	3	2	13	6	3	4	0	7	3	2	1	0	11	0	0	0	14
	%	1		0	47	53	82	0	12	6		81	6	13	19	12	6	82	29	0	59	12	71	24	47	18	12		46	23	31	0	54	18	12	6	0	65	0	0	0	82
	% Sch.																			0	83	17	100							43	57	0	100		14	7	0	79	0	0	0	100
Sophora																																							
	#	31	30	0	6	25	19	5	0	7	24	23	1	0	1	0	1	30	13	9	9	0	18	1	7	0	23	30	20	4	5	1	10	12	12	1	0	6	0	0	0	19
	%	1		0	19	81	61	16	0	23		96	4	0	4	0	3	97	42	29	29	0	58	3	23	0	74		67	13	17	3	33	39	39	3	0	19	0	0	0	61
	% Sch.																			50	50	0	100							40	50	10	100		63	5	0	32	0	0	0	100

Tabelle 2: Gattungen

Acer nach Stammdurchmesser

			1			2				3					4			5				6				7					8							
	D		BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand				RE Art				RE Zustand					Lokalisierung							
	[cm]		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
		durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
StD <=10 cm																																									
#	34	25	0	22	12	33	0	1	0	34	33	0	1	1	15	8	11	33	0	1	0	1	1	33	0	0	33	33	0	0	0	0	33	1	0	0	0	0	0	0	1
%	9		0	65	35	97	0	3	0		97	0	3	3	44	24	32	97	0	3	0	3	3	97	0	0		100	0	0	0	0	97	3	0	0	0	0	0	0	3
% Sch.																			0	100	0	100							0	0	0	0		100	0	0	0	0	0	0	100
StD = 11 - 20 cm																																									
#	116	50	0	98	18	93	0	7	16	100	83	2	15	17	23	32	61	56	19	35	6	60	1	74	27	14	115	72	16	27	0	43	53	19	9	0	35	0	0	0	63
%	31		0	84	16	80	0	6	14		83	2	15	17	20	28	53	48	16	30	5	52	1	64	23	12		63	14	23	0	37	46	16	8	0	30	0	0	0	54
% Sch.																			32	58	10	100							37	63	0	100		30	14	0	56	0	0	0	100
StD = 21 - 35 cm																																									
#	200	84	4	161	35	189	0	7	4	196	132	6	58	64	40	41	119	56	34	91	19	144	17	148	23	12	183	79	38	65	1	104	49	44	15	0	92	0	0	0	151
%	53		2	81	18	95	0	4	2		67	3	30	33	20	21	60	28	17	46	10	72	9	74	12	6		43	21	36	1	57	25	22	8	0	46	0	0	0	76
% Sch.																			24	63	13	100							37	63	1	100		29	10	0	61	0	0	0	100
StD = 36 - 50 cm																																									
#	22	125	1	16	5	22	0	0	0	22	11	0	11	11	2	7	13	2	4	14	2	20	8	13	1	0	14	2	1	10	1	12	2	6	2	0	12	0	0	0	20
%	6		5	73	23	100	0	0	0		50	0	50	50	9	32	59	9	18	64	9	91	36	59	5	0		14	7	71	7	86	9	27	9	0	55	0	0	0	91
% Sch.																			20	70	10	100							8	83	8	100		30	10	0	60	0	0	0	100
StD >= 51 cm																																									
#	5	205	0	3	2	4	0	1	0	5	1	1	3	4	1	2	2	0	1	1	3	5	3	2	0	0	2	0	1	0	1	2	0	2	0	0	2	0	0	1	5
%	1		0	60	40	80	0	20	0		20	20	60	80	20	40	40	0	20	20	60	100	60	40	0	0		0	50	0	50	100	0	40	0	0	40	0	0	20	100
% Sch.																			20	20	60	100							50	0	50	100		40	0	0	40	0	0	20	100
Acer gesamt																																									
#	377	95	5	300	72	341	0	16	20	357	260	9	88	97	81	90	206	147	58	142	30	230	30	270	51	26	347	186	56	102	3	161	137	72	26	0	141	0	0	1	240
%	100		1	80	19	90	0	4	5		73	3	25	27	21	24	55	39	15	38	8	61	8	72	14	7		54	16	29	1	46	36	19	7	0	37	0	0	0	64
% Sch.																			25	62	13	100							35	63	2	100		30	11	0	59	0	0	0	100

Tabelle 3: Gattung - Acer nach Stammdurchmesserklassen

Crataegus nach Stammdurchmesser

			1			2				3					4			5					6				7						8								
	D		BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand						Lokalisierung								
	[cm]		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
		durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
StD <=10 cm																																									
#	86	28	0	72	14	47	8	3	28	58	58	0	0	0	1	75	10	83	3	0	0	3	43	15	28	0	43	43	0	0	0	0	82	4	0	0	0	0	0	0	4
%	28		0	84	16	55	9	3	33		100	0	0	0	1	87	12	97	3	0	0	3	50	17	33	0		100	0	0	0	0	95	5	0	0	0	0	0	0	5
% Sch.																			100	0	0	100							0	0	0	0		100	0	0	0	0	0	0	100
StD = 11 - 20 cm																																									
#	138	46	2	106	30	101	10	27	0	138	120	18	0	18	7	75	56	93	24	21	0	45	108	30	0	0	30	27	3	0	0	3	90	28	8	0	12	0	0	0	48
%	46		1	77	22	73	7	20	0		87	13	0	13	5	54	41	67	17	15	0	33	78	22	0	0		90	10	0	0	10	65	20	6	0	9	0	0	0	35
% Sch.																			53	47	0	100							100	0	0	100		58	17	0	25	0	0	0	100
StD = 21 - 35 cm																																									
#	68	80	0	38	30	68	0	0	0	68	66	0	2	2	1	2	65	26	16	25	1	42	49	19	0	0	19	10	6	3	0	9	22	26	5	0	15	0	0	0	46
%	23		0	56	44	100	0	0	0		97	0	3	3	1	3	96	38	24	37	1	62	72	28	0	0		53	32	16	0	47	32	38	7	0	22	0	0	0	68
% Sch.																			38	60	2	100							67	33	0	100		57	11	0	33	0	0	0	100
StD = 36 - 50 cm																																									
#	10	125	0	6	4	10	0	0	0	10	8	0	2	2	0	0	10	2	4	4	0	8	7	3	0	0	3	0	1	2	0	3	1	5	2	0	2	0	0	0	9
%	3		0	60	40	100	0	0	0		80	0	20	20	0	0	100	20	40	40	0	80	70	30	0	0		0	33	67	0	100	10	50	20	0	20	0	0	0	90
% Sch.																			50	50	0	100							33	67	0	100		56	22	0	22	0	0	0	100
Crataegus gesamt																																									
#	302		2	222	78	226	18	30	28	274	252	18	4	22	9	152	141	204	47	50	1	98	207	67	28	0	95	80	10	5	0	15	195	63	15	0	29	0	0	0	107
%	100		1	74	26	75	6	10	9		92	7	1	8	3	50	47	68	16	17	0	32	69	22	9	0		84	11	5	0	16	65	21	5	0	10	0	0	0	35
% Sch.																			48	51	1	100							67	33	0	100		59	14	0	27	0	0	0	100

Tabelle 4: Gattung - Crataegus nach Stammdurchmesserklassen

Platanus nach Stammdurchm.

		1			2				3					4			5					6				7						8							
D		BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand						Lokalisierung							
[cm]		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8
	durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
StD <=10 cm																																							
#	14	31	0	9	5	11	2	1	0	14	14	0	0	0	0	0	14	14	0	0	0	0	0	12	2	0	14	14	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0
%	4		0	64	36	79	14	7	0		100	0	0	0	0	0	100	100	0	0	0	0	0	86	14	0		100	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
% Sch.																		0	0	0	0							0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
StD = 11 - 20 cm																																							
#	121	46	0	50	71	66	12	43	0	121	117	3	1	4	1	34	86	85	10	25	1	36	14	87	20	0	107	96	9	2	0	11	85	10	6	0	20	0	0	0	36
%	31		0	41	59	55	10	36	0		97	2	1	3	1	28	71	70	8	21	1	30	12	72	17	0		90	8	2	0	10	70	8	5	0	17	0	0	0	30
% Sch.																		28	69	3	100							82	18	0	100		28	17	0	56	0	0	0	100
StD = 21 - 35 cm																																							
#	106	87	0	94	12	94	11	1	0	106	86	12	8	20	4	37	65	18	14	67	7	88	18	85	3	0	88	31	33	24	0	57	17	24	6	0	59	0	0	0	89
%	27		0	89	11	89	10	1	0		81	11	8	19	4	35	61	17	13	63	7	83	17	80	3	0		35	38	27	0	65	16	23	6	0	56	0	0	0	84
% Sch.																		16	76	8	100							58	42	0	100		27	7	0	66	0	0	0	100
StD = 36 - 50 cm																																							
#	107	133	0	70	37	93	1	13	0	107	82	12	13	25	7	64	36	17	14	53	23	90	45	57	5	0	62	12	24	23	3	50	12	31	10	0	54	1	0	0	95
%	28		0	65	35	87	1	12	0		77	11	12	23	7	60	34	16	13	50	21	84	42	53	5	0		19	39	37	5	81	11	29	9	0	50	1	0	0	89
% Sch.																		16	59	26	100							48	46	6	100		33	11	0	57	1	0	0	101
StD >= 51 cm																																							
#	40	187	1	16	23	39	0	1	0	40	26	1	13	14	4	26	10	6	3	19	12	34	19	20	1	0	21	7	6	5	3	14	6	6	1	0	26	0	0	0	34
%	10		3	40	58	98	0	3	0		65	3	33	35	10	65	25	15	8	48	30	85	48	50	3	0		33	29	24	14	67	15	15	3	0	65	0	0	0	85
% Sch.																		9	56	35	100							43	36	21	100		18	3	0	76	0	0	0	97
Platanus gesamt																																							
#	388	95	1	239	148	303	26	59	0	388	325	28	35	63	16	161	211	140	41	164	43	248	96	261	31	0	292	160	72	54	6	132	134	71	23	0	159	1	0	0	254
%	100		0	62	38	78	7	15	0		84	7	9	16	4	41	54	36	11	42	11	64	25	67	8	0		55	25	18	2	45	35	18	6	0	41	0	0	0	65
% Sch.																			17	66	17	100							55	41	5	100		28	9	0	63	0	0	0	100

Tabelle 5: Gattung - Platanus nach Stammdurchmesserklassen

Robinia nach Stammdurchm.

		1			2				3					4			5					6				7					8							
D		BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand					Lokalisierung							
[cm]		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8
	durchschnitt. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siele + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
StD <=10 cm																																								
#	6	26	0	4	2	4	0	0	2	4	4	0	0	0	2	0	4	5	0	1	0	1	0	3	2	1	6	5	1	0	0	1	5	1	0	0	0	0	0	0	1
%	1		0	67	33	67	0	0	33		100	0	0	0	33	0	67	83	0	17	0	17	0	50	33	17		83	17	0	0	17	83	17	0	0	0	0	0	0	17
% Sch.																			0	100	0	100							100	0	0	100		100	0	0	0	0	0	0	100
StD = 11 - 20 cm																																								
#	53	54	0	23	30	35	0	14	4	49	42	6	1	7	10	12	31	31	4	16	2	22	2	36	10	5	51	38	6	7	0	13	29	4	3	0	17	0	0	0	24
%	11		0	43	57	66	0	26	8		86	12	2	14	19	23	58	58	8	30	4	42	4	68	19	9		75	12	14	0	25	55	8	6	0	32	0	0	0	45
% Sch.																			18	73	9	100							46	54	0	100		17	13	0	71	0	0	0	100
StD = 21 - 35 cm																																								
#	311	89	1	227	83	260	4	39	8	303	227	33	43	76	99	54	158	119	52	131	9	192	15	246	35	15	296	157	72	65	2	139	96	67	33	1	114	0	0	0	215
%	67		0	73	27	84	1	13	3		75	11	14	25	32	17	51	38	17	42	3	62	5	79	11	5		53	24	22	1	47	31	22	11	0	37	0	0	0	69
% Sch.																			27	68	5	100							52	47	1	100		31	15	0	53	0	0	0	100
StD = 36 - 50 cm																																								
#	78	125	0	63	15	72	0	1	5	73	50	4	19	23	21	26	31	21	15	40	2	57	11	54	10	3	67	28	12	27	0	39	18	25	6	0	29	0	0	0	60
%	17		0	81	19	92	0	1	6		68	5	26	32	27	33	40	27	19	51	3	73	14	69	13	4		42	18	40	0	58	23	32	8	0	37	0	0	0	77
% Sch.																			26	70	4	100							31	69	0	100		42	10	0	48	0	0	0	100
StD >= 51 cm																																								
#	18	208	0	10	8	17	0	1	0	18	11	0	7	7	3	10	5	3	6	9	0	15	2	13	3	0	16	2	8	6	0	14	2	5	2	0	7	1	0	1	16
%	4		0	56	44	94	0	6	0		61	0	39	39	17	56	28	17	33	50	0	83	11	72	17	0		13	50	38	0	88	11	28	11	0	39	6	0	6	89
% Sch.																			40	60	0	100							57	43	0	100		31	13	0	44	6	0	6	100
Robinia gesamt																																								
#	466	95	1	327	138	388	4	55	19	447	334	43	70	113	135	102	229	179	77	197	13	287	30	352	60	24	436	230	99	105	2	206	150	102	44	1	167	1	0	1	316
%	100		0	70	30	83	1	12	4		75	10	16	25	29	22	49	38	17	42	3	62	6	76	13	5		53	23	24	0	47	32	22	9	0	36	0	0	0	68
% Sch.																			27	69	5	100							48	51	1	100		32	14	0	53	0	0	0	100

Tabelle 6: Gattung - Robinia nach Stammdurchmesserklassen

Tilia nach Stammdurchm.

		1			2				3					4			5					6				7					8							
D		BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand					Lokalisierung							
[cm]		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8
	durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siele + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
StD <=10 cm																																							
#	53	25	0	5	48	49	1	2	1	52	50	2	0	2	2	4	47	51	0	2	0	2	5	43	4	1	48	48	0	0	0	0	51	1	1	0	0	0	0	0	2
%	8		0	9	91	92	2	4	2		96	4	0	4	4	8	89	96	0	4	0	4	9	81	8	2		100	0	0	0	0	96	2	2	0	0	0	0	0	4
% Sch.																			0	100	0	100							0	0	0	0		50	50	0	0	0	0	0	100
StD = 11 - 20 cm																																							
#	318	49	3	187	128	226	25	39	28	290	268	22	0	22	19	57	242	225	38	53	2	93	17	243	43	15	301	268	22	11	0	33	217	36	26	0	39	0	0	0	101
%	48		1	59	40	71	8	12	9		92	8	0	8	6	18	76	71	12	17	1	29	5	76	14	5		89	7	4	0	11	68	11	8	0	12	0	0	0	32
% Sch.																			41	57	2	100							67	33	0	100		36	26	0	39	0	0	0	100
StD = 21 - 35 cm																																							
#	237	84	5	163	69	200	3	24	10	227	201	16	10	26	34	56	147	111	40	79	7	126	22	167	27	21	215	138	37	38	2	77	95	43	23	0	76	0	0	0	142
%	36		2	69	29	84	1	10	4		89	7	4	11	14	24	62	47	17	33	3	53	9	70	11	9		64	17	18	1	36	40	18	10	0	32	0	0	0	60
% Sch.																			32	63	6	100							48	49	3	100		30	16	0	54	0	0	0	100
StD = 36 - 50 cm																																							
#	43	124	6	10	27	40	0	2	1	42	35	2	5	7	6	4	33	24	6	12	1	19	5	36	2	0	38	23	11	4	0	15	19	12	3	0	9	0	0	0	24
%	7		14	23	63	93	0	5	2		83	5	12	17	14	9	77	56	14	28	2	44	12	84	5	0		61	29	11	0	39	44	28	7	0	21	0	0	0	56
% Sch.																			32	63	5	100							73	27	0	100		50	13	0	38	0	0	0	100
StD >= 51 cm																																							
#	5	191	0	1	4	4	0	1	0	5	3	1	1	2	1	4	0	2	1	2	0	3	3	2	0	0	2	1	0	1	0	1	3	1	0	0	1	0	0	0	2
%	1		0	20	80	80	0	20	0		60	20	20	40	20	80	0	40	20	40	0	60	60	40	0	0		50	0	50	0	50	60	20	0	0	20	0	0	0	40
% Sch.																			33	67	0	100							0	100	0	100		50	0	0	50	0	0	0	100
Tilia gesamt																																							
#	656	95	14	366	276	519	29	68	40	616	557	43	16	59	62	125	469	413	85	148	10	243	52	491	76	37	604	478	70	54	2	126	385	93	53	0	125	0	0	0	271
%	100		2	56	42	79	4	10	6		90	7	3	10	9	19	71	63	13	23	2	37	8	75	12	6		79	12	9	0	21	59	14	8	0	19	0	0	0	41
% Sch.																			35	61	4	100							56	43	2	100		34	20	0	46	0	0	0	100

Tabelle 7: Gattung - Tilia nach Stammdurchmesserklassen

Stammdurchmesser		1 BS Größe			2 BS Art				3 BS Zustand					4 WD Art			5 WD Zustand					6 RE Art				7 RE Zustand					8 Lokalisierung								
		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
		bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
<= 10 cm																																							
#	299	2	152	145	243	11	8	37	262	259	2	1	3	36	113	150	291	3	5	0	8	56	177	57	9	243	241	1	1	0	2	290	7	1	0	1	0	0	0	9
%	10	1	51	48	81	4	3	12		99	1	0	1	12	38	50	97	1	2	0	3	19	59	19	3		99	0	0	0	1	97	2	0	0	0	0	0	0	3
% Sch.																		38	63	0	100							50	50	0	100		78	11	0	11	0	0	0	100
11 - 20 cm																																							
#	943	6	576	361	699	51	134	59	884	806	55	23	78	101	234	608	648	114	170	11	295	155	609	127	52	788	654	70	63	1	134	621	116	65	0	141	0	0	0	322
%	33	1	61	38	74	5	14	6		91	6	3	9	11	25	64	69	12	18	1	31	16	65	13	6		83	9	8	0	17	66	12	7	0	15	0	0	0	34
% Sch.																		39	58	4	100							52	47	1	100		36	20	0	44	0	0	0	100
21 - 35 cm																																							
#	1197	15	874	308	1047	24	92	34	1163	941	84	138	222	204	238	755	460	220	469	48	737	163	836	113	85	1034	565	223	240	6	469	399	274	105	2	417	0	0	0	798
%	42	1	73	26	87	2	8	3		81	7	12	19	17	20	63	38	18	39	4	62	14	70	9	7		55	22	23	1	45	33	23	9	0	35	0	0	0	67
% Sch.																		30	64	7	100							48	51	1	100		34	13	0	52	0	0	0	100
36 - 50 cm																																							
#	355	8	227	120	314	5	27	9	346	256	24	66	90	38	119	198	91	56	174	34	264	107	217	20	11	248	93	59	92	4	155	69	105	26	3	152	1	0	0	286
%	12	2	64	34	88	1	8	3		74	7	19	26	11	34	56	26	16	49	10	74	30	61	6	3		38	24	37	2	63	19	30	7	1	43	0	0	0	81
% Sch.																		21	66	13	100							38	59	3	100		37	9	1	53	0	0	0	100
>= 51 cm																																							
#	87	1	41	45	80	0	7	0	87	50	6	31	37	11	47	29	14	12	44	17	73	34	46	6	1	53	14	16	18	5	39	14	17	4	1	46	1	0	3	73
%	3	1	47	52	92	0	8	0		57	7	36	43	13	54	33	16	14	51	20	84	39	53	7	1		26	30	34	9	74	16	20	5	1	53	1	0	3	84
% Sch.																		16	60	23	100							41	46	13	100		23	5	1	63	1	0	4	99
gesamt																																							
#	2881	32	1870	979	2363	91	268	139	2742	2312	171	259	430	390	751	1740	1604	405	862	110	1377	515	1885	323	158	2356	1567	369	414	16	799	1363	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100	1	65	34	83	3	9	5		84	6	9	16	14	26	60	52	14	30	4	48	18	65	11	5		66	16	17	1	34	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.																		29	63	8	100							46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100

Tabelle 8: Stammdurchmesser in 130 cm Stammhöhe

Baumscheibengröße

		2				3					4			5				6				7					8							
D		BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand				RE Art				RE Zustand					Lokalisierung							
[cm]		1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8
	durchschnittl. Stammdurchmesser	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
bis 1 m²																																				
#	32	28	30	0	2	0	32	27	1	4	5	2	5	25	14	1	14	3	18	12	17	3	0	20	9	4	7	0	11	8	13	0	0	11	0	0	0	24
%	1		94	0	6	0		84	3	13	16	6	16	78	44	3	44	9	56	38	53	9	0		45	20	35	0	55	25	41	0	0	34	0	0	0	75
% Sch.																6	78	17	100							36	64	0	100		54	0	0	46	0	0	0	100
über 1 bis 4 m²																																				
#	1870	25	1570	66	143	91	1779	1488	114	180	294	291	523	1056	824	291	676	79	1046	344	1268	190	128	1526	865	290	360	11	661	739	371	156	5	596	1	0	2	1131
%	65		84	4	8	5		83	6	10	17	16	28	56	44	16	36	4	56	18	65	10	7		57	19	24	1	43	40	20	8	0	32	0	0	0	60
% Sch.																28	65	8	100							44	54	2	100		33	14	0	53	0	0	0	100
über 4 bis 9 m²																																				
#	979	23	783	25	123	48	931	800	56	75	131	97	223	659	666	113	172	28	313	159	660	130	30	820	693	75	47	5	127	646	135	45	1	150	1	0	1	333
%	34		80	3	13	5		86	6	8	14	10	23	67	68	12	18	3	32	16	67	13	3		85	9	6	1	15	66	14	5	0	15	0	0	0	34
% Sch.																36	55	9	100							59	37	4	100		41	14	0	45	0	0	0	100
gesamt																																				
#	2881	24	2383	91	268	139	2742	2312	171	259	430	390	751	1740	1504	405	862	110	1377	515	1855	323	158	2388	1587	369	414	16	799	1393	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100		83	3	9	5		84	6	9	16	14	26	60	52	14	30	4	48	18	65	11	5		66	16	17	1	34	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.																29	63	8	100							46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100

Tabelle 9: Baumscheibengröße

Art der Baumscheibe		1			3			4			5					6				7						8								
	D	BS Größe			BS Zustand			WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand						Lokalisierung								
	[cm	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
	durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
offen																																		
#	2383	25	30	1570	783	2129	5	249	352	572	1459	1204	330	748	101	1179	443	1572	263	105	1940	1238	327	362	13	702	1114	444	165	6	649	2	0	3	1289
%	83		1	66	33	89	0	10	15	24	61	51	14	31	4	49	19	66	11	4		64	17	19	1	36	47	19	7	0	27	0	0	0	53
% Sch.													28	63	9	100							47	52	2	100		35	13	0	51	0	0	0	100
Rost																																		
#	91	19	0	66	25	53	38	0	1	30	60	65	7	17	2	26	16	75	0	0	75	69	1	4	1	6	65	8	1	0	17	0	0	0	26
%	3		0	73	27	58	42	0	1	33	66	71	8	19	2	29	18	82	0	0		92	1	5	1	8	71	9	1	0	19	0	0	0	29
% Sch.													27	65	8	100							17	67	17	100		31	4	0	65	0	0	0	100
Steine																																		
#	268	22	2	143	123	134	125	9	5	110	153	131	48	83	6	137	53	194	19	2	215	153	31	29	2	62	122	55	14	0	77	0	0	0	146
%	9		1	53	46	50	47	3	2	41	57	49	18	31	2	51	20	72	7	1		71	14	13	1	29	46	21	5	0	29	0	0	0	54
% Sch.													35	61	4	100							50	47	3	100		38	10	0	53	0	0	0	100
bepflanzt																																		
#	139	18	0	91	48	135	3	1	32	39	68	104	20	14	1	35	3	44	41	51	136	107	10	19	0	29	92	12	21	0	14	0	0	0	47
%	5		0	65	35	97	2	1	23	28	49	75	14	10	1	25	2	32	29	37		79	7	14	0	21	66	9	15	0	10	0	0	0	34
% Sch.													57	40	3	100							34	66	0	100		26	45	0	30	0	0	0	100
gesamt																																		
#	2881	24	32	1870	979	2451	171	259	390	751	1740	1504	405	862	110	1377	515	1865	323	158	2366	1567	369	414	16	799	1383	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100		1	65	34	85	6	9	14	26	60	52	14	30	4	48	18	65	11	5		66	16	17	1	34	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.													29	63	8	100							46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100

Tabelle 10: Art der Baumscheibe

Art der Wegedecke			1			2				3					5					6				7					8								
	D		BS Größe			BS Art				BS Zust.					WD Zustand					RE Art				RE Zustand					Lokalisierung								
	[cm		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
		durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
Asphalt																																					
#	390	25	2	291	97	352	1	5	32	358	305	4	49	53	241	71	70	8	149	26	215	69	80	364	237	69	56	2	127	205	80	43	1	60	1	0	0	185
%	14		1	75	25	90	0	1	8		85	1	14	15	62	18	18	2	38	7	55	18	21		65	19	15	1	35	53	21	11	0	15	0	0	0	47
% Sch.																48	47	5	100							54	44	2	100		43	23	1	32	1	0	0	100
Platten																																					
#	751	25	5	523	223	572	30	110	39	712	567	81	64	145	370	112	239	30	381	263	405	74	9	488	322	98	65	3	166	351	150	43	1	204	1	0	1	400
%	26		1	70	30	76	4	15	5		80	11	9	20	49	15	32	4	51	35	54	10	1		66	20	13	1	34	47	20	6	0	27	0	0	0	53
% Sch.																29	63	8	100							59	39	2	100		38	11	0	51	0	0	0	100
Pflaster																																					
#	1740	24	25	1056	659	1458	60	153	68	1672	1440	86	146	232	893	222	553	72	847	226	1205	180	69	1514	1008	202	293	11	506	837	289	115	4	493	0	0	2	903
%	60		1	61	38	84	3	9	4		86	5	9	14	51	13	32	4	49	13	73	10	4		67	13	19	1	33	48	17	7	0	28	0	0	0	52
% Sch.																26	65	9	100							40	58	2	100		32	13	0	55	0	0	0	100
gesamt																																					
#	2881	24	32	1870	979	2383	91	268	139	2742	2312	171	259	430	1504	405	862	110	1377	515	1885	323	158	2366	1567	369	414	16	799	1393	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100		1	65	34	83	3	9	5		84	6	9	16	52	14	30	4	48	18	65	11	5		66	16	17	1	34	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.																29	63	8	100							46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100

Tabelle 11: Art der Wegedecke

Art der Randeinfassung			1			2				3					4			5					7					8								
			BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Zustand					Lokalisierung								
	D		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
	[cm]	durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	v
Keine RE																																				
#	515	27	12	344	159	443	16	53	3	512	425	44	43	87	26	263	226	192	83	204	36	323	515	0	0	0	0	192	139	27	0	155	0	0	2	323
%	18		2	67	31	86	3	10	1		83	9	8	17	5	51	44	37	16	40	7	63	100	0	0	0	0	37	27	5	0	30	0	0	0	63
% Sch.																			26	63	11	100		0	0	0	0		43	8	0	48	0	0	1	100
eben																																				
#	1885	24	17	1206	660	1572	75	194	44	1841	1542	121	178	299	215	405	1266	1005	247	566	67	880	1222	309	339	15	663	926	326	101	6	524	2	0	0	959
%	65		1	64	35	83	4	10	2		84	7	10	16	11	21	67	53	13	30	4	47	65	16	18	1	35	49	17	5	0	28	0	0	0	51
% Sch.																			28	64	8	100		47	51	2	100		34	11	1	55	0	0	0	100
erhöht																																				
#	323	20	3	190	130	263	0	19	41	282	247	5	30	35	69	74	180	209	44	66	4	114	235	39	48	1	88	198	37	32	0	55	0	0	1	125
%	11		1	59	40	81	0	6	13		88	2	11	12	21	23	56	65	14	20	1	35	73	12	15	0	27	61	11	10	0	17	0	0	0	39
% Sch.																			39	58	4	100		44	55	1	100		30	26	0	44	0	0	1	100
Mauer, Trog																																				
#	158	23	0	128	30	105	0	2	51	107	98	1	8	9	80	9	69	98	31	26	3	60	110	21	27	0	48	77	17	41	0	23	0	0	0	81
%	5		0	81	19	66	0	1	32		92	1	7	8	51	6	44	62	20	16	2	38	70	13	17	0	30	49	11	26	0	15	0	0	0	51
% Sch.																			52	43	5	100		44	56	0	100		21	51	0	28	0	0	0	100
gesamt																																				
#	2881	24	32	1870	979	2383	91	268	139	2742	2312	171	259	430	390	751	1740	1504	405	862	110	1377	2082	369	414	16	799	1393	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100		1	65	34	83	3	9	5		84	6	9	16	14	26	60	52	14	30	4	48	72	13	14	1	28	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.																			29	63	8	100		46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100
RE vorhanden gesamt																																				
#	2366		20	1526	820	1940	75	215	136	2230	1687	127	216	343	364	488	1514	1312	322	658	74	1054	1567	369	414	16	799	1201	380	174	6	602	2	0	1	1165
%	82		1	64	35	82	3	9	6		85	6	10	15	15	21	64	55	14	28	3	45	66	16	17	1	34	51	16	7	0	25	0	0	0	49
% Sch.																			31	62	7	100		46	52	2	100		33	15	1	52	0	0	0	100

Tabelle 12: Art der Randeinfassung

Zustand der Baumscheibe

		1			2				4			5					6				7						8								
	D	BS Größe			BS Art				WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand						Lokalisierung								
	[cm]	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
	durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	v
keine Auffälligkeiten																																			
#	2451	23	27	1576	848	2129	53	134	135	337	606	1508	1408	325	638	82	1045	428	1566	288	149	2023	1426	286	301	10	597	1312	405	169	5	559	0	0	1	1139
%	65		1	64	35	87	2	5	6	14	25	62	57	13	26	3	43	17	65	12	6		70	14	15	0	30	54	17	7	0	23	0	0	0	46
% Sch.														31	61	8	100							48	50	2	100		36	15	0	49	0	0	0	100
Abdeckung verändert																																			
#	171	26	1	114	56	5	38	125	3	4	81	86	49	38	76	8	122	44	121	5	1	127	77	23	25	2	50	45	45	9	0	72	0	0	0	126
%	6		1	67	33	3	22	73	2	2	47	50	29	22	44	5	71	26	71	3	1		61	18	20	2	39	26	26	5	0	42	0	0	0	74
% Abd.	45	% Sch.												31	62	7	100							46	50	4	100		36	7	0	57	0	0	0	100
Wurzeln sichtbar																																			
#	259	35	4	180	75	249	0	9	1	49	64	146	49	42	148	20	210	43	178	30	8	216	64	60	88	4	152	36	69	23	1	126	2	0	2	223
%	9		2	69	29	96	0	3	0	19	25	56	19	16	57	8	81	17	69	12	3		30	28	41	2	70	14	27	9	0	49	1	0	1	86
% off.	11	% Sch.												20	70	10	100							39	58	3	100		31	10	0	57	1	0	1	100
gesamt																																			
#	2881	24	32	1870	979	2383	91	268	139	390	751	1740	1504	405	862	110	1377	515	1885	323	158	2386	1567	369	414	16	799	1393	519	201	6	757	2	0	3	1488
%	100		1	65	34	83	3	9	5	14	26	60	52	14	30	4	48	18	65	11	5		66	16	17	1	34	48	18	7	0	26	0	0	0	52
% Sch.														29	63	8	100							46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100

Tabelle 13: Zustand der Baumscheibe

Zustand der Wegedecke

		1			2				3					4			6				7						8								
	D	BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			RE Art				RE Zustand						Lokalisierung								
	[cm]	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	7	8	
		durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
kein Schaden																																				
	#	1504	19	14	824	666	1204	65	131	104	1400	1302	49	49	98	241	370	893	192	1005	209	98	1312	1201	67	43	1	111	1390	61	38	0	15	1	0	0	114
	%	52		1	55	44	80	4	9	7		93	4	4	7	16	25	59	13	67	14	7		92	5	3	0	8	92	4	3	0	1	0	0	0	8
	% Sch.																								60	39	1	100		54	33	0	13	1	0	0	101
ein Wurzelstrang																																				
	#	405	27	1	291	113	330	7	48	20	385	305	38	42	80	71	112	222	83	247	44	31	322	151	121	49	1	171	2	245	109	1	47	1	0	0	403
	%	14		0	72	28	81	2	12	5		79	10	11	21	18	28	55	20	61	11	8		47	38	15	0	53	0	60	27	0	12	0	0	0	100
	% Sch.																								71	29	1	100		61	27	0	12	0	0	0	100
zwei bis fünf Wurzelstränge																																				
	#	862	30	14	676	172	748	17	83	14	848	624	76	148	224	70	239	553	204	566	66	26	658	205	165	283	5	453	1	208	53	4	593	0	0	2	861
	%	30		2	78	20	87	2	10	2		74	9	17	26	8	28	64	24	66	8	3		31	25	43	1	69	0	24	6	0	69	0	0	0	100
	% Sch.																								36	62	1	100		24	6	0	69	0	0	0	100
über fünf Wurzelstränge																																				
	#	110	37	3	79	28	101	2	6	1	109	81	8	20	28	8	30	72	36	67	4	3	74	10	16	39	9	64	0	5	1	1	102	0	0	1	110
	%	4		3	72	25	92	2	5	1		74	7	18	26	7	27	65	33	61	4	3		14	22	53	12	86	0	5	1	1	93	0	0	1	100
	% Sch.																								25	61	14	100		5	1	1	93	0	0	1	100
gesamt																																				
	#	2881	24	32	1870	979	2383	91	268	139	2742	2312	171	259	430	390	751	1740	515	1885	323	158	2366	1567	369	414	16	799	1393	519	201	6	757	2	0	3	1488
	%	100		1	65	34	83	3	9	5		84	6	9	16	14	26	60	18	65	11	5		66	16	17	1	34	48	18	7	0	26	0	0	0	52
	% Sch.																								46	52	2	100		35	14	0	51	0	0	0	100

Tabelle 14: Zustand der Wegedecke

Zustand der Randeinfassung

		1			2				3					4			5					6				8								
	D	BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				Lokalisierung								
	[cm	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	
	durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	kein Schaden	über Seite	über Ecke	über Anlauf	Siete + Ecke	Seite + Anlauf	Ecke + Anlauf	Seite + Ecke + Anlauf	Schäden insgesamt
kein Schaden*																																		
#	1567	20	9	865	693	1236	69	153	107	1460	1319	77	64	141	237	322	1008	1201	151	201	10	366	0	1222	235	110	1193	154	72	2	146	0	0	0	374
%	66		1	55	44	79	4	10	7		90	5	4	10	15	21	64	77	10	13	1	23	0	78	15	7	76	10	5	0	9	0	0	0	24
% Sch.																			41	56	3	100						41	19	1	39	0	0	0	100
ein Wurzelstrang*																																		
#	369	29	4	290	75	327	1	31	10	359	276	23	60	83	69	98	202	67	121	165	16	302	0	309	39	21	0	154	62	2	149	2	0	0	369
%	16		1	79	20	89	0	8	3		77	6	17	23	19	27	55	18	33	45	4	82	0	84	11	6	0	42	17	1	40	1	0	0	100
% Sch.																			40	55	5	100						42	17	1	40	1	0	0	100
zwei bis fünf Wurzelstränge*																																		
#	414	31	7	360	47	362	4	29	19	395	282	25	88	113	56	65	293	43	49	283	39	371	0	339	48	27	0	73	43	2	295	0	0	1	414
%	17		2	87	11	87	1	7	5		71	6	22	29	14	16	71	10	12	68	9	90	0	82	12	7	0	18	10	0	71	0	0	0	100
% Sch.																			13	76	11	100						18	10	0	71	0	0	0	100
über fünf Wurzelstränge*																																		
#	16	42	0	11	5	13	1	2	0	16	10	2	4	6	2	3	11	1	1	5	9	15	0	15	1	0	0	2	0	0	14	0	0	0	16
%	1		0	69	31	81	6	13	0		63	13	25	38	13	19	69	6	6	31	56	94	0	94	6	0	0	13	0	0	88	0	0	0	100
% Sch.																			7	33	60	100						13	0	0	88	0	0	0	100
gesamt*																																		
#	2366	24	20	1526	820	1940	75	215	136	2230	1887	127	216	343	364	488	1514	1312	322	654	74	1054	0	1885	323	158	1193	383	177	6	604	2	0	1	1173
%	82		1	64	35	82	3	9	6		80	5	9	14	15	21	64	55	14	28	3	44	0	80	14	7	50	16	7	0	26	0	0	0	50
% Sch.																			31	62	7	100						33	15	1	51	0	0	0	100

Tabelle 15: Zustand der Randeinfassung

* Prozentzahlen bezogen auf Standorte mit Randeinfassungen

Lokalisierung			1			2				3					4			5					6				7					
		D	BS Größe			BS Art				BS Zustand					WD Art			WD Zustand					RE Art				RE Zustand					
		[cm]	1	2	3	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
		durchschnittl. Stammdurchmesser	bis 1 m²	1 bis 4 m²	über 4 bis 9 m²	offen	Rost	Steine	bepflanzt	nicht bepflanzt, davon	keine Veränderung	Abdeckung verändert	Wurzeln sichtbar	Veränderungen insgesamt	Asphalt	Platten	Steine	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt	Keine Randeinfassung	eben	erhöht	Mauer, Trog	RE vorhanden, davon	kein Schaden	1 Wurzelstrang	2 bis 5 Wurzelstränge	über 5 Wurzelstränge	Schäden insgesamt
kein Schaden																																
#	1393	19	8	739	646	1114	65	122	92	1301	1220	45	36	81	205	351	837	1390	2	1	0	3	192	926	198	77	1201	1193	8	0	0	8
%	48		1	53	46	80	5	9	7		94	3	3	6	15	25	60	100	0	0	0	0	14	66	14	6		99	1	0	0	1
																			67	33	0	100							100	0	0	100
über Seite																																
#	519	29	13	371	135	444	8	55	12	507	393	45	69	114	80	150	289	61	245	208	5	458	139	326	37	17	360	154	151	73	2	226
%	18		3	71	26	86	2	11	2		78	9	14	22	15	29	56	12	47	40	1	88	27	63	7	3		41	40	19	1	59
% Sch.																			53	45	1	100							67	32	1	100
über Ecke																																
#	201	26	0	156	45	165	1	14	21	180	148	9	23	32	43	43	115	38	109	53	1	163	27	101	32	41	174	72	59	43	0	102
%	7		0	78	22	82	0	7	10		82	5	13	18	21	21	57	19	54	26	0	81	13	50	16	20		41	34	25	0	59
% Sch.																			67	33	1	100							58	42	0	100
über Seite + Ecke																																
#	757	31	11	596	150	649	17	77	14	743	545	72	126	198	60	204	493	15	47	593	102	742	155	524	55	23	602	146	147	295	14	456
%	26		1	79	20	86	2	10	2		73	10	17	27	8	27	65	2	6	78	13	98	20	69	7	3		24	24	49	2	76
% Sch.																			6	80	14	100							32	65	3	100
sonstige																																
#	11		0	8	3	11	0	0	0	11	0	0	11	11	2	3	6	0	2	7	2	11	2	8	1	0	9	2	4	3	0	7
%	0		0	73	27	100	0	0	0		0	0	100	100	18	27	55	0	18	64	18	100	18	73	9	0		22	36	27	0	64
% Sch.																			18	64	18	100							57	43	0	100
gesamt																																
#	2881	24	32	1870	979	2363	91	268	139	2742	2306	171	265	436	390	751	1740	1504	405	862	110	1377	515	1885	323	158	2366	1567	369	414	16	799
%	100		1	65	34	83	3	9	5		84	6	10	16	14	26	60	52	14	30	4	48	18	65	11	5		66	16	17	1	34
% Sch.																			29	63	8	100							46	52	2	100

Tabelle 16: Lokalisierung

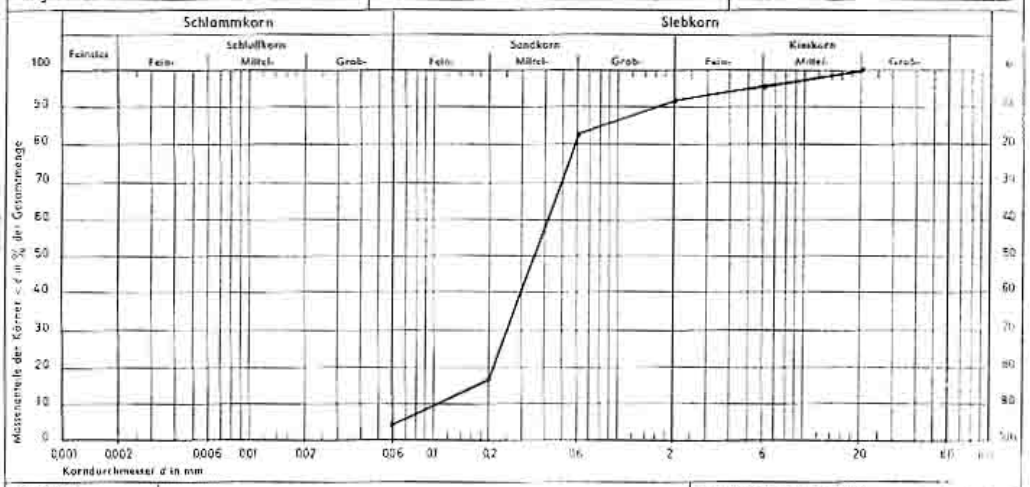
HPH 1/2 Quercus robur
AS / TS

Ausgef. durch: Hi Datum:

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Hannover Herrenhäuserstr. Parkplatz Uni

Prüfgs.-Nr.: A
Probe entn. am: 16.03.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand
Tiefe:	ab UK Platten/Pflaster 5 bis 20-30 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	3,91 gleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Platten-(bzw. Pflaster-) belag HPH 1, max. m ab BS

Bemerkungen (z. B. Kornform): rund

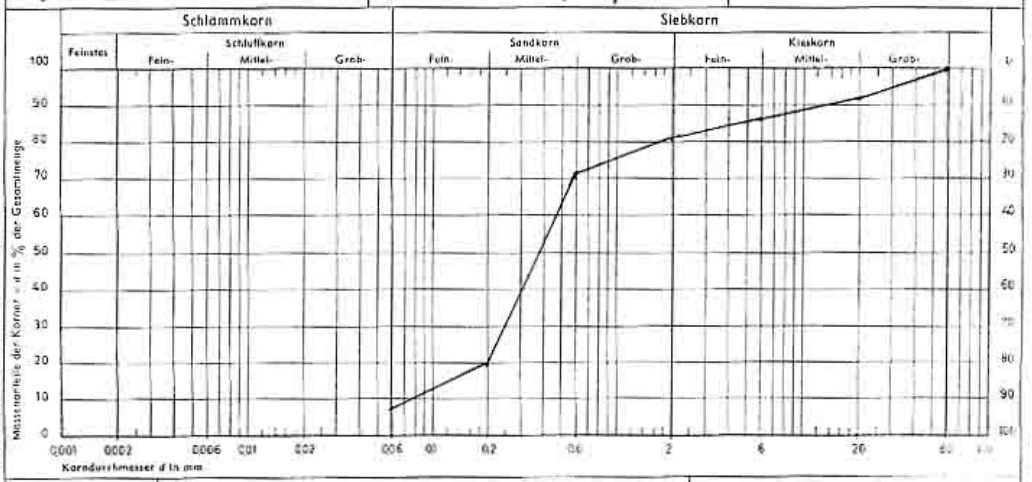
HPH 1/2 Q. robur
Material unter AS/TS (anstehender Bod.)

Ausgef. durch: Hi Datum:

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Hannover Herrenhäuserstr. Parkplatz Uni

Prüfgs.-Nr.: B
Probe entn. am: 16.3.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand / Kies
Tiefe:	ab UK TS 20-30 bis 60 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	6.23 ungleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter TS Platten-/Pflasterbelag HPH1, max 23 m ab BS

Bemerkungen (z. B. Kornform): rund, z.T. gebrochen

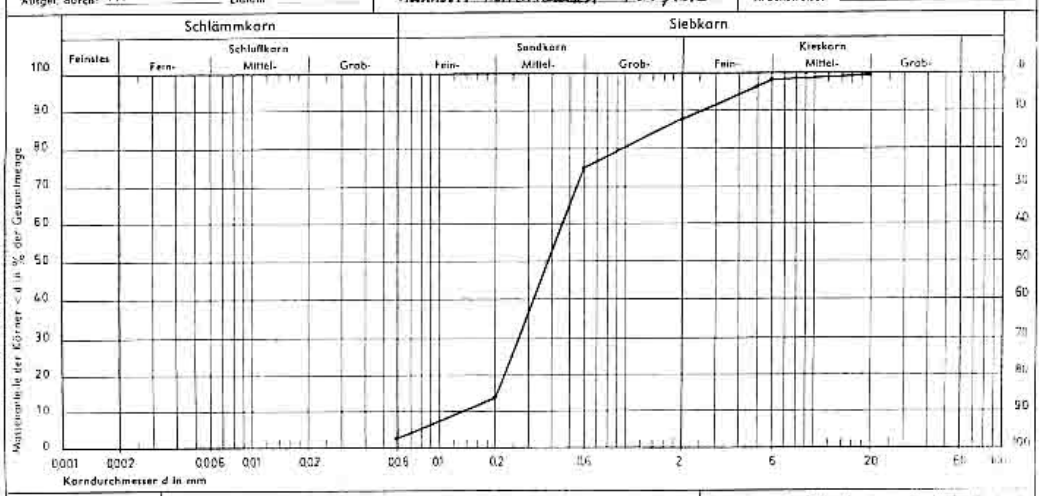
HPH3 A. saccharinum
AS

Ausgef. durch: Hi Datum

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Hannover Herrenhausen Parkplatz

Prüfgs.-Nr.: C
Probe entn. am: 01.04.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand
Tiefe:	5-20 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	4,02 gleichförmig
Entnahmestelle(Ort):	unter Platten / Pflaster

Bemerkungen (z. B. Kornform)
rund

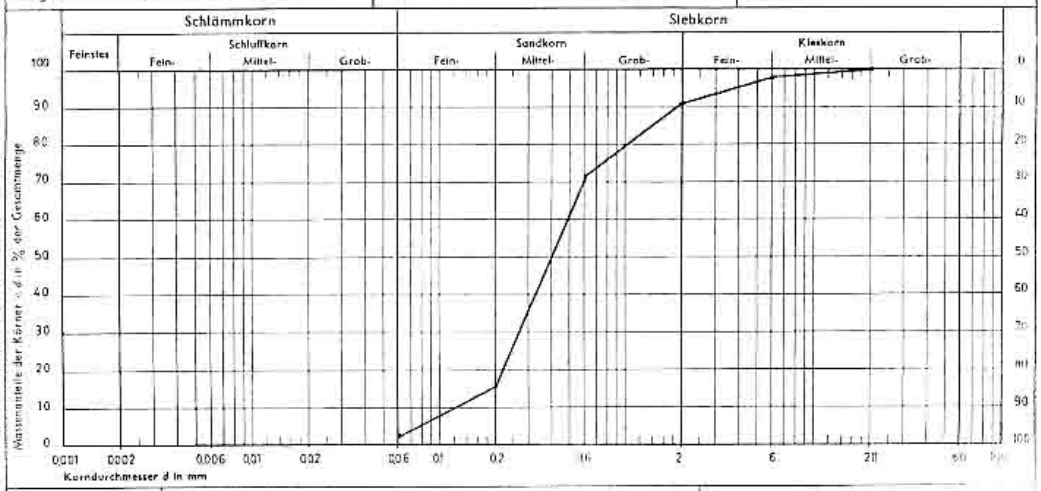
HRÜ A. platanoides
AS
unter Platten

Ausgef. durch: Rei / Hi Datum 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Hannover Rühlmannstr.

Prüfgs.-Nr.: A
Probe entn. am: 17.8.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand
Tiefe:	5-10 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	4,36 gleichförmig

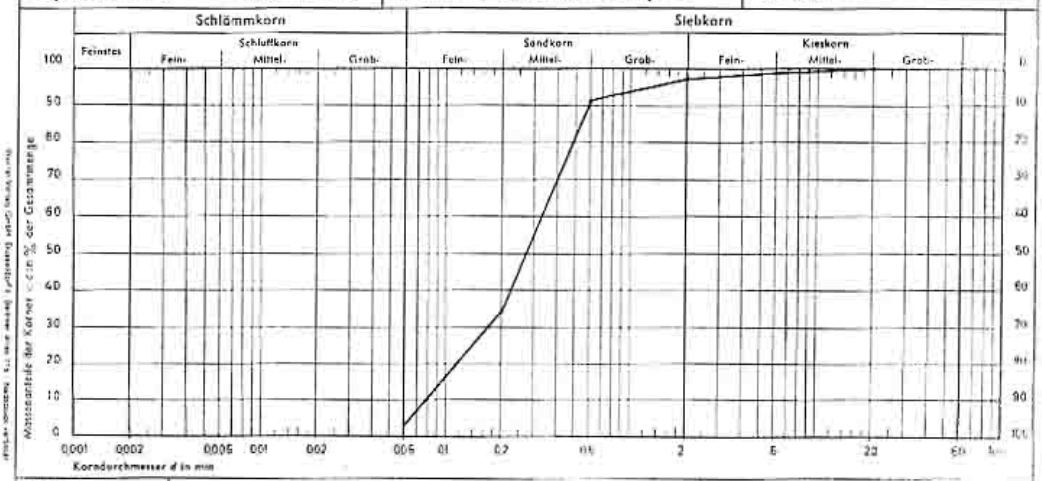
Bemerkungen (z. B. Kornform)
rund

HRü Acer platanoides
AS unter Pflaster
Ausgef. durch: Rei/Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Hannover Rühlmannstraße

Prüfgs.-Nr.: 2
Probe entn. am: 17.8.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand
Tiefe:	8-13 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	4.13 gleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Pflaster

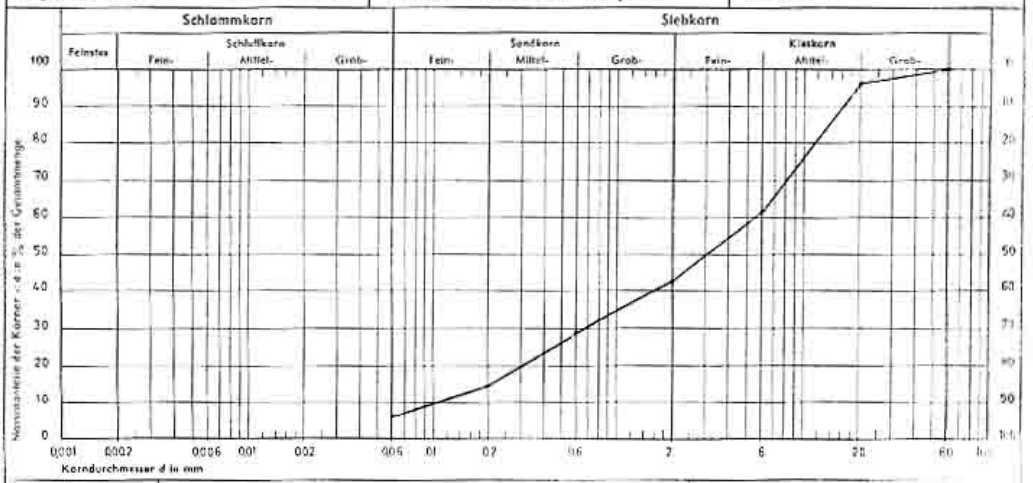
Bemerkungen (z. B. Kornform): rund

HRü A. platanoides
TS unter Pflaster
Ausgef. durch: Rei/Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Hannover Rühlmannstraße

Prüfgs.-Nr.: 3
Probe entn. am: 17.8.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Schotter
Tiefe:	10-35 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	49.56 sehr ungleichförmig

Bemerkungen (z. B. Kornform): gebrochen

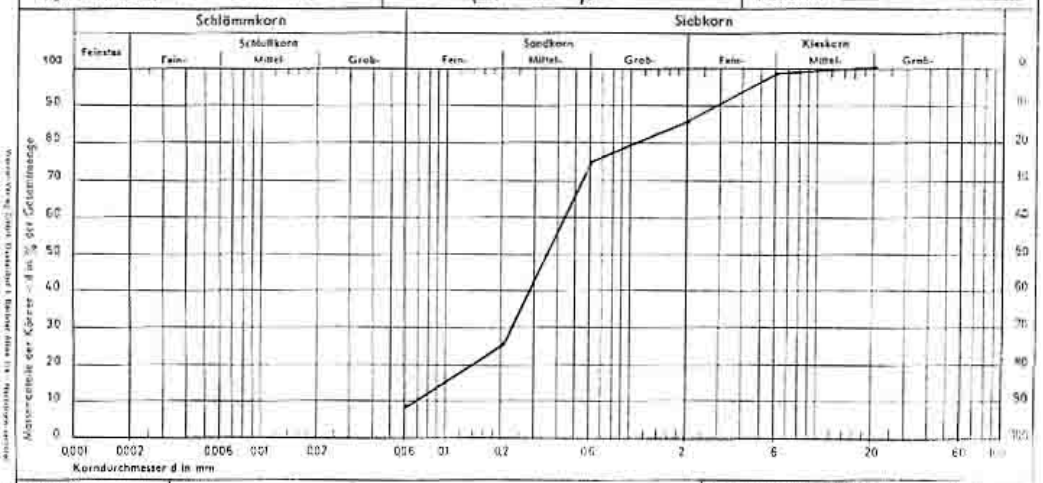
Wu No Sophora japonica
AS

Ausgef. durch: Rei / Hi Datum 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Wunstorf, Nordstraße

Prüfgs.-Nr.: 4
Probe entn. am: 24.8.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand
Tiefe:	6,10 – 15 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	6,32 ungleichförmig (Mörtelanteile!)
Entnahmestelle/Ort:	unter Pflaster

Bemerkungen (z. B. Kornform):
rund
Mörtelanteile

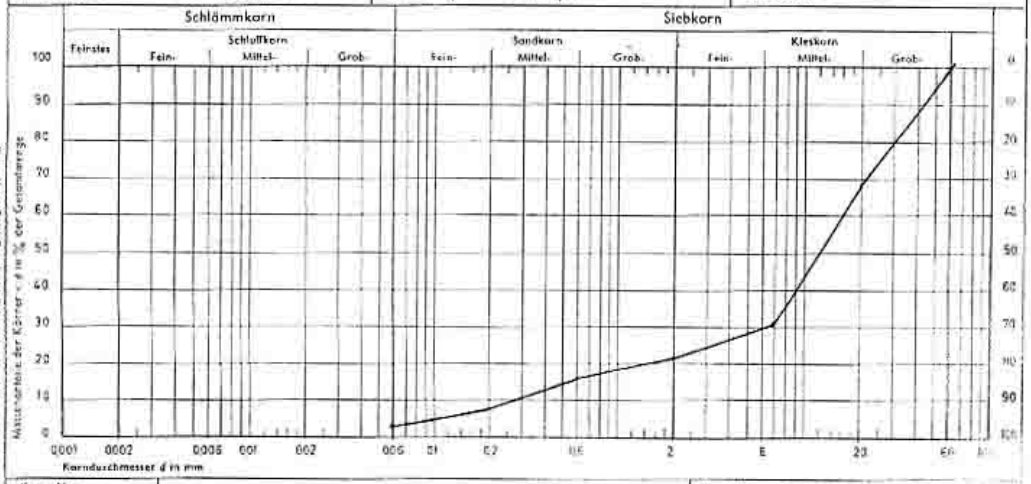
Wu No Sophora japonica
TS

Ausgef. durch: Rei / Hi Datum 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Wunstorf Nordstraße

Prüfgs.-Nr.: 5
Probe entn. am: 24.8.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Schotter
Tiefe:	15 – 35 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	58,157 sehr ungleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Pflasterbettung

Bemerkungen (z. B. Kornform):
gebrochen
(Lieferschein vorh.)

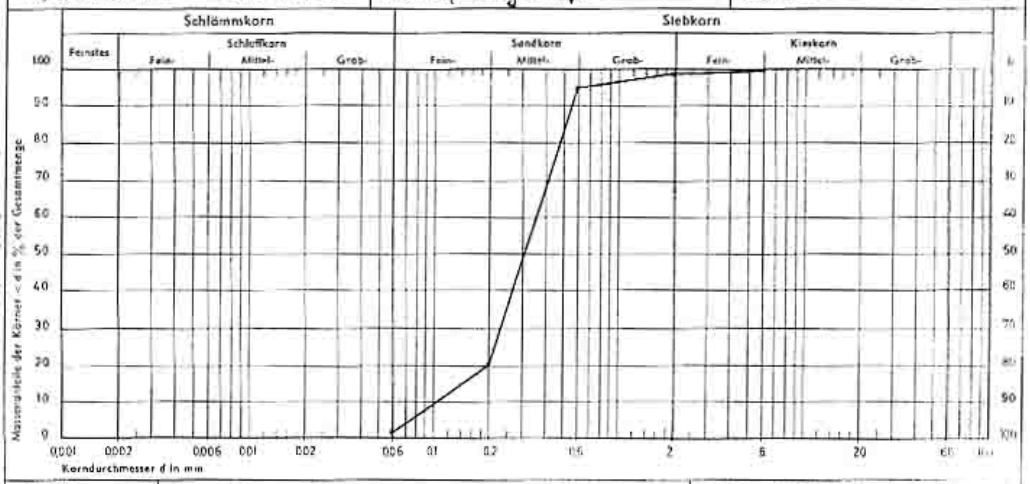
Wu La Platanus x acerifolia
AS

Ausgef. durch: Rei/Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Wunstorf Lange Straße

Prüfgs.-Nr.: 6
Probe entn. am: 25.8.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand
Tiefe:	8-16 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	3,23 gleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Pflaster

Bemerkungen (z. B. Kornform): rund

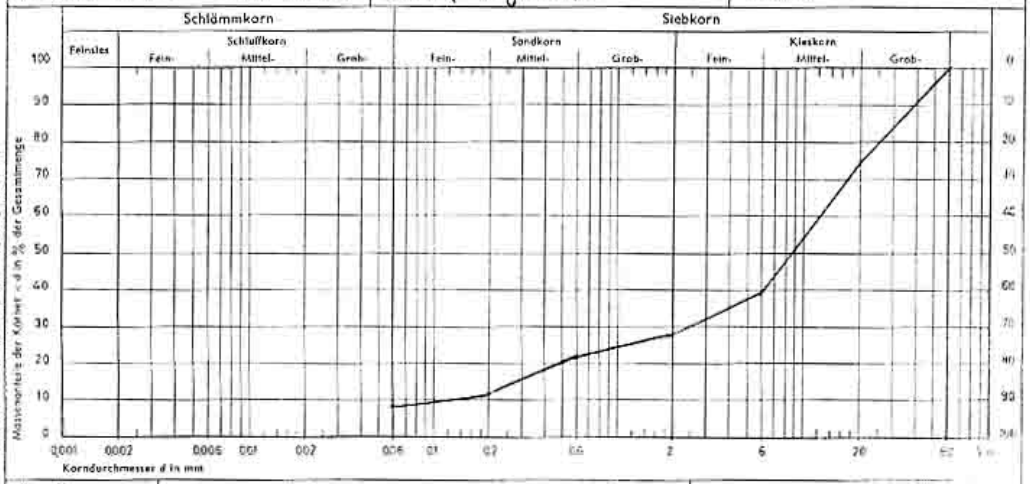
Wu La Platanus x acerifolia
TS

Ausgef. durch: Rei/Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Wunstorf Lange Straße

Prüfgs.-Nr.: 7
Probe entn. am: 25.8.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.	
Bodenart:	Kiessand
Tiefe:	16-30cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	88,28 sehr ungleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Pflasterbettung

Bemerkungen (z. B. Kornform): rund

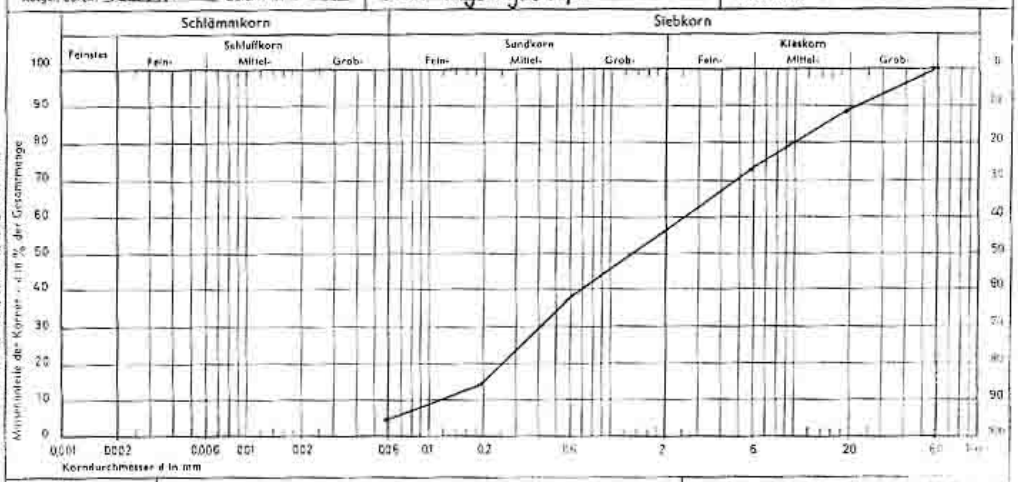
KVo RoI Robinia pseudoacacia
TS Kiessand

Ausgef. durch: Rei/Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Köln Vorgebirgsstraße

Prüfgs.-Nr.: 9
Probe entn. am: 31.08.99
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Kiessand ~~= Bauschutt~~
Tiefe:	8 - 45 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	22,73 sehr ungleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Asphaltbelag

Bemerkungen (z. B. Korndichte): rund

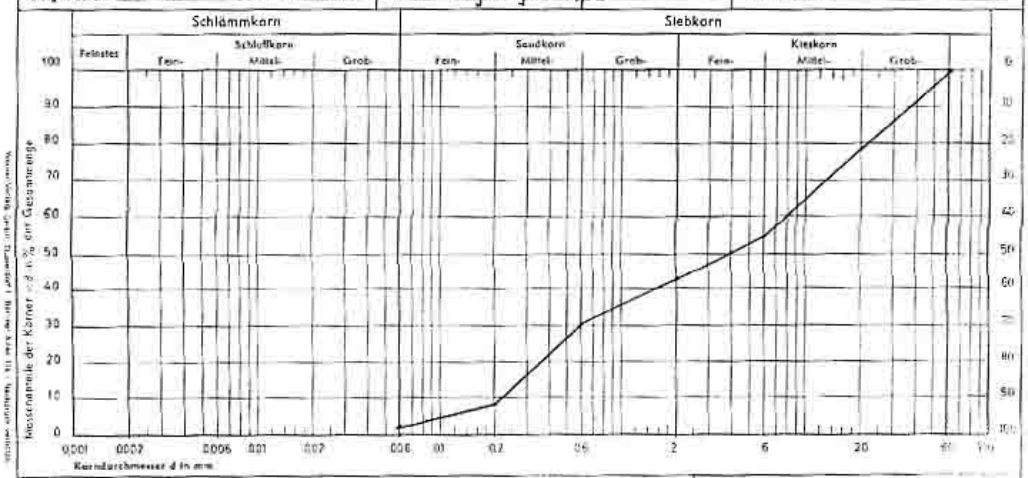
KVo RoI Robinia pseudoacacia
Tragschicht

Ausgef. durch: Rei/Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Köln Vorgebirgsstraße

Prüfgs.-Nr.: 10
Probe entn. am: 31.08.99
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Kiessand
Tiefe:	8 - 70 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	28 sehr ungleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	an Bordstein und unter 1. Tragschicht

Bemerkungen (z. B. Korndichte): rund

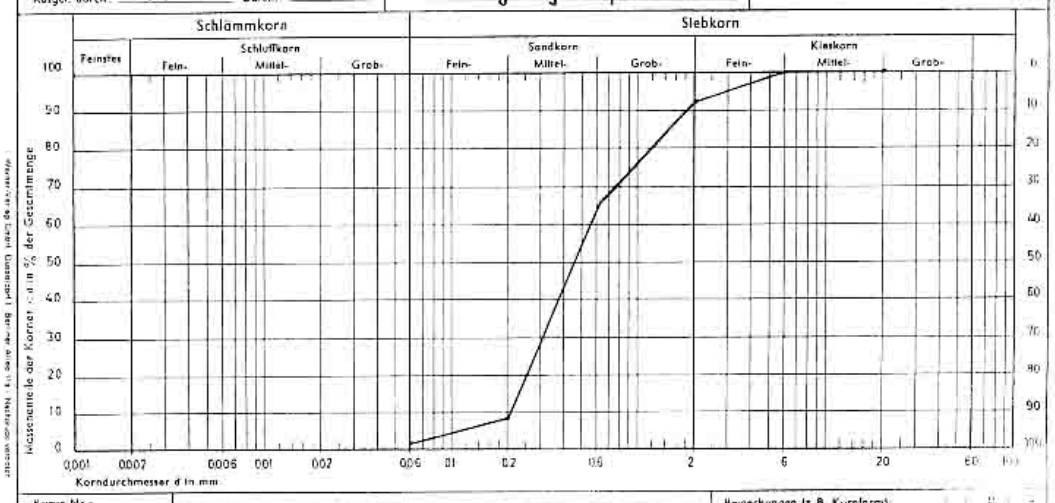
KVoRoll Robinia pseudoacacia
AS

Ausgef. durch: Rei / Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Köln Vorgebirgsstraße

Prüfgs.-Nr.: 11
Probe entn. am: 02.9.99
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Sand
Tiefe:	14 - 20 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	2,75 cm gleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Pflaster

Bemerkungen (z. B. Kornform): rund

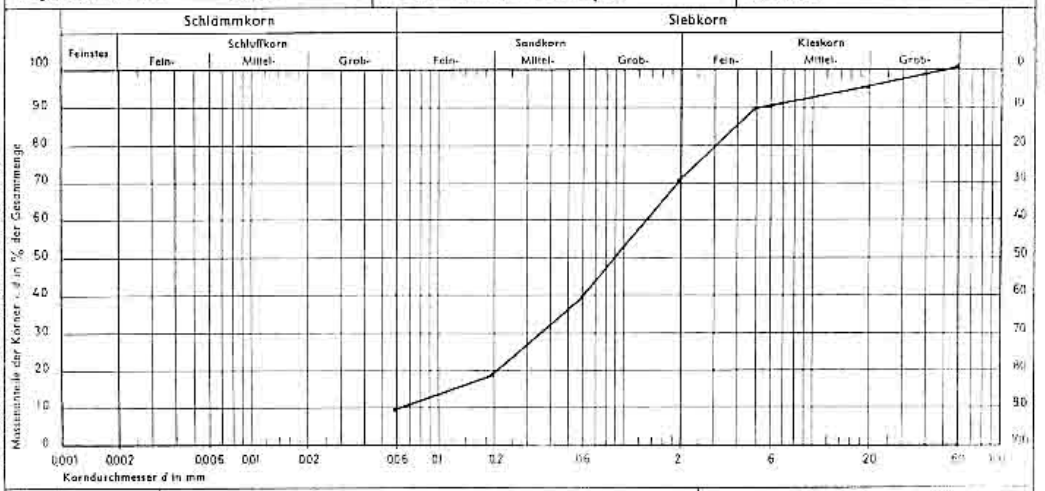
KMomTi Tilia
Material unter Beton / Asphalt

Ausgef. durch: Rei / Hi Datum: 2.12.2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Köln Mommsenstraße

Prüfgs.-Nr.: 12
Probe entn. am: 06.09.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	sandiger Füllboden
Tiefe:	
$U = d_{60}/d_{10}$:	20,59 sehr ungleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	an BS angrenzend, unter Asphalt / Beton

Bemerkungen (z. B. Kornform): rund

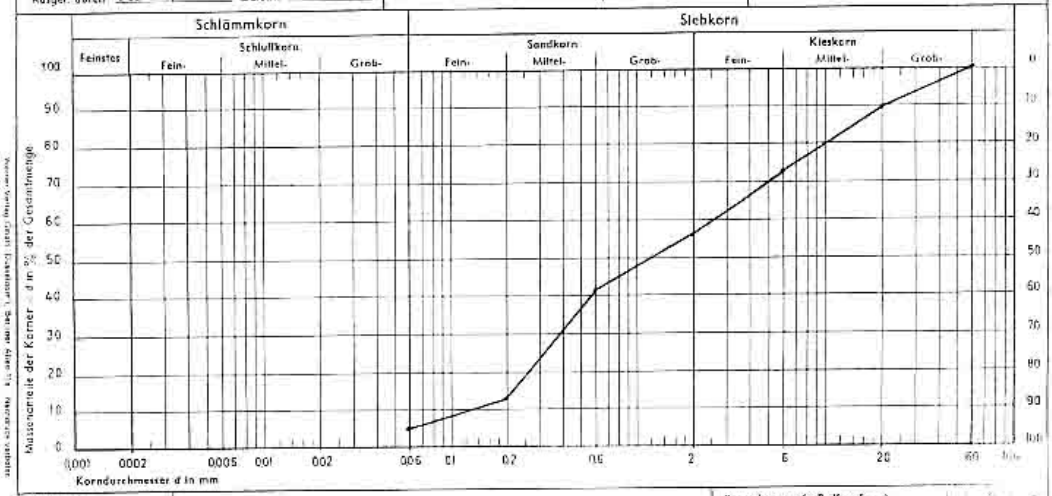
K Mom Ti Tilia
TS

Ausgef. durch: Rei / Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Köln Mommsenstraße

Prüfgs.-Nr.: 13
Probe entn. am: 06.09.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	Mineralgemisch
Tiefe:	12,5 – 18 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	< 1,95 sehr ungleichförmig
Entnahmestelle/Ort:	unter Beton/Asphalt „hinter" Pr. 12

Bemerkungen (z. B. Kornform): mehr gebrochen

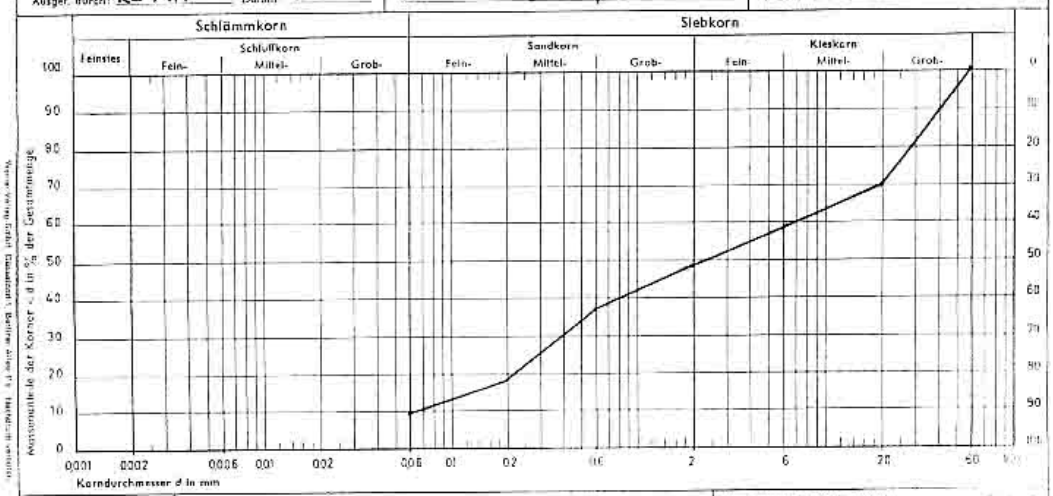
K Mom Ti Tilia
TS unter Beton

Ausgef. durch: Rei / Hi Datum: 11/2000

Körnungslinie

Bauvorhaben: Wurzelfreilegung Reichwein
Köln Mommsenstraße

Prüfgs.-Nr.: 14
Probe entn. am: 06.09.1999
Art der Entn.: Mischprobe
Arbeitsweise:



Kurve Nr.:	
Bodenart:	sandiges Füllboden
Tiefe:	18 – 50 cm
$U = d_{60}/d_{10}$:	116,7
Entnahmestelle/Ort:	unter TS

Bemerkungen (z. B. Kornform): v.a. rund