

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bauingenieurwesen

Institut für Straßenwesen

und Eisenbahnbau

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krass

„Ermittlung eines Bewertungs- hintergrundes für den horizontalen Verschiebungswiderstand von Pflasterdecken“ - Schlussbericht -

AiF-Forschungsprojekt-Nr. 12126 N/1

**Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungs-
vereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF)**

Bochum, im September 2002

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bauingenieurwesen

Institut für Straßenwesen

und Eisenbahnbau

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krass

A

AiF-Forschungsprojekt-Nr. 12126 N/1: Ermittlung eines Bewertungshintergrundes für den horizontalen Verschiebungswiderstand von Pflasterdecken - Schlußbericht -

Forschungsstelle: Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau
Ruhr-Universität Bochum (RUB)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. K. Krass

Bearbeiter: Dipl.-Ing. I. Jungfeld Dipl.-Ing. M. Rohleder

Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungs-
vereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF)

**Dieses AiF-Vorhaben ist aus den Mitteln des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Technologie gefördert worden.**

Bochum, im September 2002

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung und Problemstellung | 1 |
| 2 | Derzeitiger Kenntnisstand | 3 |
| 3 | Zielsetzung und Untersuchungsmethodik | 8 |
| 4 | Beschreibung der Untersuchungen | 11 |
| 4.1 | Erfassung des horizontalen Verschiebungswiderstandes mit dem Spreizversuch | 11 |
| 4.1.1 | Beschreibung des ursprüngliches Spreizgerätes | 11 |
| 4.1.2 | Modifiziertes Spreizgerät | 12 |
| 4.1.3 | Ergebnisse und Auswertung des Spreizversuches | 14 |
| 4.2 | Allgemeine Beurteilung der Pflasterflächen | 16 |
| 4.2.1 | Zustandserfassung mit dem Versuchsprotokoll | 16 |
| 4.2.2 | Ebenheitsprüfungen | 17 |
| 4.2.3 | Aufbau der Verkehrsflächen | 18 |
| 4.2.4 | Untersuchungen an den Schichten | 18 |
| 4.2.4.1 | Fugen-, Bettungs- und Tragschichtmaterial | 18 |
| 4.2.4.2 | Dichte der Tragschicht | 19 |
| 4.3 | Vorversuche mit dem Spreizgerät | 19 |
| 4.4 | Untersuchte Verkehrsflächen | 21 |
| 4.4.1 | Allgemeine Vorgaben bei der Auswahl der Verkehrsflächen | 21 |
| 4.4.2 | Untersuchte Verbände | 22 |
| 4.4.3 | Untersuchte Steinformen | 24 |
| 5 | Darstellung der Untersuchungsergebnisse | 25 |
| 5.1 | Allgemeines | 25 |
| 5.2 | Zustand der untersuchten Verkehrsflächen | 25 |
| 5.2.1 | Beschreibung der ausgewählten Flächen | 25 |
| 5.2.1.1 | Ausgewählte Verkehrsflächen mit Klinkerpflaster | 25 |
| 5.2.1.2 | Ausgewählte Verkehrsflächen mit Betonsteinpflaster | 28 |
| 5.2.1.3 | Ausgewählte Verkehrsflächen an der Ruhr-Universität Bochum | 30 |
| 5.2.2 | Darstellung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse | 34 |
| 5.2.2.1 | Zustandsbeschreibung und Bilddokumentation der untersuchten Klinkerpflasterflächen | 34 |
| 5.2.2.2 | Ebenheitsprüfungen | 39 |
| 5.3 | Ergebnisse der Spreizversuche auf den Verkehrsflächen | 43 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | Auswertung der Untersuchungsergebnisse | 47 |
| 6.1 | Vorbemerkung | 47 |
| 6.2 | Statistische Auswertung und Prüfung auf Normalverteilung | 47 |
| 6.3 | Auswertung der Einflussparameter | 52 |
| 6.3.1 | Methodik bei der weiterführenden Auswertung der Spreizversuche | 52 |
| 6.3.2 | Klinkerpflaster | 53 |
| 6.3.2.1 | Ergebnisse nach Lage der Verkehrsfläche geordnet | 53 |
| 6.3.2.2 | Ergebnisse nach Gesamtverschiebung, bleibender Verschiebung sowie nach Steigungswinkel geordnet..... | 55 |
| 6.3.2.3 | Ergebnisse nach Verkehrsbelastung geordnet | 56 |
| 6.3.2.4 | Ergebnisse nach Steinformat und Steindicke geordnet | 57 |
| 6.3.2.5 | Ergebnisse nach Fugenbreite geordnet..... | 58 |
| 6.3.2.6 | Ergebnisse nach Fugenfüllungsgrad geordnet | 60 |
| 6.3.2.7 | Ergebnisse nach Alter der Fläche zum Messzeitpunkt geordnet | 61 |
| 6.3.2.8 | Ergebnisse nach Verband geordnet | 62 |
| 6.3.2.9 | Ergebnisse nach Fugenmaterial geordnet | 64 |
| 6.3.2.10 | Ergebnisse nach Bettungsmaterial geordnet | 64 |
| 6.3.2.11 | Ergebnisse nach Tragschichtmaterial geordnet..... | 65 |
| 6.3.2.12 | Schlussfolgerungen zum horizontalen Verschiebungswiderstand bei Klinkerpflasterdecken | 66 |
| 6.3.3 | Betonsteinpflaster | 66 |
| 6.3.3.1 | Ergebnisse nach Verkehrsbelastung geordnet | 67 |
| 6.3.3.2 | Ergebnisse nach Steinform geordnet..... | 68 |
| 6.3.3.3 | Ergebnisse nach Steinformat geordnet..... | 70 |
| 6.3.3.4 | Ergebnisse nach Steindicke geordnet | 72 |
| 6.3.3.5 | Ergebnisse nach Fugenbreite geordnet..... | 73 |
| 6.3.3.6 | Ergebnisse nach Fugenfüllungsgrad geordnet | 75 |
| 6.3.3.7 | Ergebnisse nach Alter der Fläche zum Messzeitpunkt geordnet | 76 |
| 6.3.3.8 | Ergebnisse nach Verband geordnet | 78 |
| 6.3.3.9 | Ergebnisse nach Bettungsdicke geordnet | 80 |
| 6.3.3.10 | Ergebnisse nach Fugenmaterial geordnet | 82 |
| 6.3.3.11 | Ergebnisse nach Bettungsmaterial geordnet | 83 |
| 6.3.3.12 | Ergebnisse nach Tragschichtmaterial geordnet..... | 85 |
| 6.3.3.13 | Ergebnisse nach Spreizrichtung geordnet | 86 |
| 6.3.3.14 | Schlussfolgerungen zum horizontalen Verschiebungswiderstand bei Betonsteinpflasterdecken | 87 |
| 6.3.4 | Verbundsteinpflaster an der Ruhr-Universität Bochum..... | 88 |
| 6.3.4.1 | Ergebnisse nach Verkehrsbelastung geordnet | 88 |
| 6.3.4.2 | Ergebnisse nach Steindicke geordnet | 89 |

| | | |
|-----------|--|-------------|
| 6.3.4.3 | Ergebnisse nach Fugenbreite geordnet..... | 90 |
| 6.3.4.4 | Ergebnisse nach Fugenfüllungsgrad geordnet | 92 |
| 6.3.4.5 | Ergebnisse nach Verband geordnet | 93 |
| 6.3.4.6 | Ergebnisse nach Neigung der Fläche geordnet..... | 94 |
| 6.3.4.7 | Ergebnisse nach Witterungseinfluss geordnet..... | 95 |
| 6.3.4.8 | Schlussfolgerungen zum horizontalen Verschiebungswiderstand der Verbundsteinpflasterdecken an der Ruhr-Universität Bochum | 96 |
| 6.3.5 | Ergebnisse nach Steinmaterial geordnet..... | 97 |
| 6.3.6 | Bewertung der Ergebnisse der Spreizversuche..... | 98 |
| 7 | Schlussfolgerungen und Ausblick..... | 102 |
| 7.1 | Schlussfolgerungen und Ausblick zu den Spreizversuchen..... | 102 |
| 7.2 | Empfehlungen für einen Grenzwert | 105 |
| 8 | Zusammenfassung..... | 109 |
| 9 | Literaturverzeichnis..... | 111 |
| 10 | Anhang | 1114 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 1.1: | Aufbau von Pflasterbauweisen..... | 1 |
| Abbildung 2.1: | Darstellung der Straßenprüfmaschine der Ruhr-Universität Bochum - RUB-StraP | 4 |
| Abbildung 4.1: | Vereinfachte Darstellung des Spreizgerätes | 11 |
| Abbildung 4.2: | Schematische Darstellung des modifizierten Spreizgerätes | 13 |
| Abbildung 4.3: | Schnittzeichnung modifiziertes Spreizgerät (maßstäblich)..... | 13 |
| Abbildung 4.4: | Beispielhafte Darstellung der Verschiebungen infolge Lasteintrag mit dem Spreizgerät | 14 |
| Abbildung 4.5: | Last-Verschiebungsdiagramm mit starker Anfangsverschiebung und Regressionsgerade | 15 |
| Abbildung 4.6: | Anordnung von Ebenheitsprüfungen..... | 18 |
| Abbildung 4.7: | Einfluss vertikaler Belastung auf den horizontalen Verschiebungswiderstand (arithmetische Mittelwerte) | 20 |
| Abbildung 4.8: | Spreizrichtung bei Läuferverband längs..... | 22 |
| Abbildung 4.9: | Spreizrichtungen bei Läuferverband quer | 22 |
| Abbildung 4.10: | Spreizrichtungen bei Fischgrätverband und Ellbogenverband | 23 |
| Abbildung 5.1: | Standorte der untersuchten Verkehrsflächen mit Klinkerpflasterdecke | 26 |
| Abbildung 5.2: | Standorte der untersuchten Verkehrsflächen mit Betonsteinpflasterdecke | 29 |
| Abbildung 5.3: | Schichtenaufbau der Verkehrsflächen an der Ruhr-Universität Bochum | 32 |
| Abbildung 5.4: | Übersichtsplan der Ruhr-Universität Bochum und Lage der untersuchten Verkehrsflächen..... | 33 |
| Abbildung 6.1: | Histogramm der Gesamtverschiebung aller gemittelten Messwerte | 48 |
| Abbildung 6.2: | Histogramm der Verschiebung nach 3 Minuten Wartezeit aller gemittelten Messwerte | 48 |
| Abbildung 6.3: | Histogramm der bleibenden Verschiebung aller gemittelten Messwerte..... | 49 |
| Abbildung 6.4: | Histogramm der Steigungswinkel der Regressionsgeraden aller gemittelten Messwerte | 49 |
| Abbildung 6.5: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Verkehrsbe-lastung geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 56 |
| Abbildung 6.6: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Steinformat und Steindicke geordnet (arithmetische Mittelwerte) . | 58 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 6.7: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 59 |
| Abbildung 6.8: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 61 |
| Abbildung 6.9: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Alter geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 62 |
| Abbildung 6.10: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Verband geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 63 |
| Abbildung 6.11: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Bettungsmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 64 |
| Abbildung 6.15: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Tragschichtmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 65 |
| Abbildung 6.13: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Verkehrsbelastung geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 67 |
| Abbildung 6.14: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Verkehrsbelastung geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 68 |
| Abbildung 6.15: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Steinform geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 69 |
| Abbildung 6.16: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Steinformat geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 71 |
| Abbildung 6.17: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Steindicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 72 |
| Abbildung 6.18: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 73 |
| Abbildung 6.19: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 74 |
| Abbildung 6.20: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 75 |
| Abbildung 6.21: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 76 |
| Abbildung 6.22: | Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Alter geordnet (arithmetische Mittelwerte).. | 77 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 6.23: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Alter geordnet (arithmetische Mittelwerte) ... | 77 |
| Abbildung 6.24: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Verband geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 78 |
| Abbildung 6.25: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Bettungsdicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 80 |
| Abbildung 6.26: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Bettungsdicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 80 |
| Abbildung 6.27: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Fugenmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 82 |
| Abbildung 6.28: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Fugenmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 82 |
| Abbildung 6.29: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Bettungsmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 83 |
| Abbildung 6.30: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Bettungsmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 84 |
| Abbildung 6.31: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Tragschichtmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 85 |
| Abbildung 6.32: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Tragschichtmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 86 |
| Abbildung 6.33: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Spreizrichtung geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 87 |
| Abbildung 6.34: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Verkehrsbelastung geordnet (arithm. Mittelwerte) | 89 |
| Abbildung 6.35: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Steindicke geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 90 |
| Abbildung 6.36: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 91 |
| Abbildung 6.37: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithm. Mittelwerte)..... | 92 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 6.38: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Verband geordnet (arithm. Mittelwerte)..... | 93 |
| Abbildung 6.39: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Längsneigung der Fläche geordnet (arithmetische Mittelwerte)..... | 94 |
| Abbildung 6.40: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Witterungseinfluss geordnet (arithm. Mittelwerte)..... | 95 |
| Abbildung 6.41: Spreizversuche an Pflasterdecken, nach Steinmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte) | 97 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 3.1: | Qualitative Bewertung der untersuchten Einflüsse der Aufbauvarianten auf das Verhalten der Pflasterbefestigung | 8 |
| Tabelle 4.1: | Einfluss vertikaler Belastung auf die Steigungswinkel (arithmetische Mittelwerte)..... | 21 |
| Tabelle 4.2: | Untersuchte Steinformen | 24 |
| Tabelle 5.1: | Übersicht über die Anzahl der Versuche, nach Auswertungskriterien sortiert | 43 |
| Tabelle 6.1: | Maßzahlen zur Charakterisierung der Häufigkeitsverteilung aller gemittelten Messwerte | 50 |
| Tabelle 6.2: | Prüfung der Mittelwerte aller Versuchsreihen auf Normalverteilung..... | 51 |
| Tabelle 6.3: | Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horiz. Verschiebungswiderstand der untersuchten Klinkerpflasterdecken.... | 66 |
| Tabelle 6.4: | Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der untersuchten Betonsteinpflasterdecken | 88 |
| Tabelle 6.5: | Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der untersuchten Verbundsteinpflasterdecken an der Ruhr-Universität Bochum..... | 96 |
| Tabelle 6.6: | Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand und deren Beeinflussbarkeit..... | 99 |
| Tabelle 7.1: | Steigungswinkel der Regressionsgeraden bei 95-%- und 99-%-Summenhäufigkeit | 106 |
| Tabelle 7.2: | Gesamtverschiebung bei 95-%- und 99-%-Summenhäufigkeit... | 106 |
| Tabelle 7.3: | Empfohlene Höchstwerte für den Spreizversuch auf Pflasterflächen..... | 108 |

1 Einleitung und Problemstellung

Die Befestigung von Straßen, Wegen und Plätzen mit Pflaster ist eine in Deutschland seit Jahrhunderten verwendete Bauweise. Im Zuge der im neunzehnten Jahrhundert einsetzenden Industrialisierung wurde diese Bauweise aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Tragfähigkeit durch Verordnungen geregelt und somit regional vereinheitlicht. Die Verwendung von Pflaster im Straßenbau wurde dadurch deutlich gesteigert.

Der größte Anteil gepflasterter Flächen wird im kommunalen Bereich eingebaut. Da dieser Anteil rund 63 % der gesamten befestigten Verkehrsflächen des Bundesgebietes ausmacht [1] und etwa 50 % der kommunalen Flächen mit Pflaster befestigt sind [2], ist anzunehmen, dass rund 25 % aller Verkehrsflächen des Bundesgebietes mit Pflaster oder Platten befestigt sind. Dieser hohe Anteil wird aufgrund verschiedener gesellschaftlicher Vorgaben vermutlich noch weiter anwachsen. So wird Pflaster aufgrund seines ansprechenden Äußeren zunehmend für gestalterische Aspekte in größeren Zusammenhängen (z.B. Fußgängerzone, Innenstadtbereich) eingesetzt. Bauweisen mit Pflasterbefestigungen können im klassifizierten Straßenbau gemäß den RStO [3,4] für die Bauklassen III bis VI verwendet werden. Eine Darstellung des grundsätzlichen Aufbaus dieser Bauweisen findet sich in **Abbildung 1.1** [5].

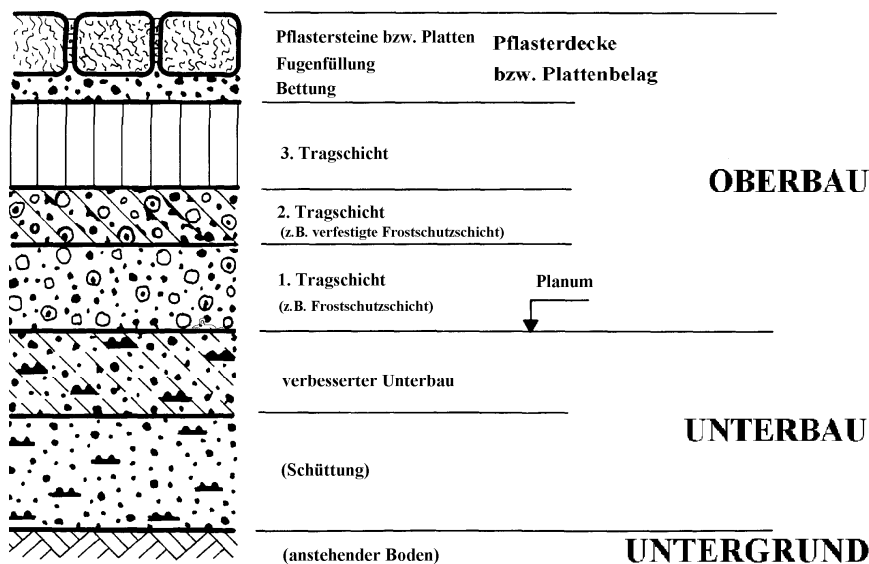


Abbildung 1.1: Aufbau von Pflasterbauweisen [5]

Der Oberbau wird durch eine oder mehrere Tragschichten gemäß ZTV T-StB [6] sowie durch die Pflasterdecke gebildet. Die Pflasterdecke besteht aus den Pflastersteinen mit der Fugenfüllung und der Bettung, auch Pflasterbett genannt.

Die große Vielzahl von Pflastersteinen hinsichtlich ihrer Art, ihrer Formen, der verwendeten Materialien und der möglichen Anwendungen erzeugt auch neue Anforde-

rungen an das anzuwendende Regelwerk und die Prüfung der Eigenschaften der verlegten Pflasterfläche. Eine Flächenbefestigung mit Pflaster muss, ebenso wie andere Fahrbahnbefestigungen, einer Reihe von Anforderungen genügen. Neben Sicherheitsanforderungen wie Griffigkeit und Ebenheit, die sich ausschließlich auf die Oberfläche des Pflasters beziehen, sind dies vor allem ausreichende Verformungsbeständigkeit und Tragfähigkeit. Das bedeutet, dass die Pflasterbefestigung ausreichend standfest gegenüber den durch den Verkehr erzeugten vertikalen und horizontalen Beanspruchungen ausgebildet sein muss. Dies gilt zunächst für die Pflasterdecke selbst.

Ihre Standfestigkeit und lastverteilende Wirkung erhält sie zum einen durch einen Verbund, der sich bei der Verdichtung und weiterhin unter Verkehr durch kleinste Verschiebungen der Steine untereinander zwischen den Steinen und der Fugenfüllung ausbildet. Dieser bewirkt quasi eine Versteifung der Pflasterdecke, durch die sie erst ihre eigentliche Tragwirkung erhält. Zum anderen werden die Steine gleichzeitig in die Bettung gedrückt, was eine mit der Bettung Verzahnung bewirkt. Beide Effekte zusammen ergeben einen Widerstand gegen vertikale Belastungen, aber vor allem einen Widerstand gegen horizontale Verschiebung.

Schäden an Pflasterdecken weisen häufig vertikale Deformationen an der Oberfläche, vor allem aber starke horizontale Verschiebungen der Pflastersteine auf. Letztere treten meist in vorwiegend horizontal beanspruchten Bereichen wie Steigungsstrecken, Verzögerungs- und Beschleunigungsstreifen sowie vor und in Kreuzungsbereichen oder Industrieflächen auf.

Die Haltbarkeit von Pflasterbefestigungen wird somit maßgeblich vom horizontalen Verschiebungswiderstand der Pflasterdecke beeinflusst. In bisherigen Forschungsarbeiten wurden jedoch überwiegend die Kräfte, Spannungen und Verformungen in vertikaler Richtung untersucht.

Ziel der vorliegenden Arbeit war daher, Messdaten mit dem Spreizgerät an praktischen Betriebsstrecken mit Befestigungen von Betonstein- und Klinkerpflaster zu ermitteln, um daraus einen Bewertungshintergrund für den horizontalen Verschiebungswiderstand von Pflasterflächen erarbeiten zu können. Dazu mussten die Einflüsse der bautechnischen, aber auch einiger orts- und liegedauerabhängiger Parameter einer Pflasterbefestigung auf den horizontalen Verschiebungswiderstand näher bestimmt werden.

Durch den Bewertungshintergrund und die Einarbeitung in entsprechende Regelwerke wäre eine qualifizierte Bewertung der Pflasterbauweise selbst möglich wie auch eine bessere Differenzierung verschiedener Pflasterbauweisen bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit.

2 Derzeitiger Kenntnisstand

Pflastersteine kommen auf den unterschiedlichsten Flächen zum Einsatz: Neben Straßen, Wegen und Plätzen zählen hierzu beispielsweise auch Verkehrsflächen in Umschlagbahnhöfen für den Kombinierten Ladungsverkehr [7], Verkehrs- und Lagerflächen im Hafbereich [8, 9, 10] oder auch Park- und Bewegungsflächen von Flugzeugen [11].

Dementsprechend unterschiedlich und vielfältig sind die im Zusammenhang mit Pflasterbefestigungen durchgeführten Forschungen. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der Arbeit wird auf die allgemeinen Forschungsaktivitäten im Pflasterbereich sowie auf Forschungsarbeiten, die sich mit dem vertikalen Verformungsverhalten von Pflasterflächen auseinandersetzen, nicht eingegangen. Der Bereich der Forschungen zum horizontalem Verschiebungswiderstand wird entsprechend ausführlich betrachtet und ausgewertet. Im einzelnen soll dabei vor allem geklärt werden, inwieweit die Einflüsse der einzelnen Parameter insbesondere auf den horizontalen Verschiebungswiderstand durch bisherige Forschungsarbeiten bewertet werden können.

Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterbefestigungen werden international seit mehr als 35 Jahren durchgeführt. Zur Einteilung dieser zahlreichen Untersuchungen bietet sich eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen Feld- und Laborversuchen unter Berücksichtigung einer zeitlichen, die Entwicklung aufzeigenden, Anordnung an. Außerdem wird im folgenden eine Unterteilung nach der Art der Versuche, insbesondere was die Beschaffenheit der aufgetragenen Belastung betrifft, vorgenommen. Daraus ergibt sich im Wesentlichen die im Folgenden dargestellte Einteilung der Untersuchungen nach halbtechnischen Prüfständen, Untersuchungen mit beschleunigter Verkehrsbelastung und unter Verkehr liegenden Versuchsflächen. Weiterhin werden die aus diesen vielfältigen Untersuchungen resultierenden Ergebnisse nach den einzelnen, das Tragverhalten der Pflasterbefestigung beeinflussenden Parametern wie Beispielsweise Steinform oder Bettungsmaterial unterteilt.

Bei einigen Untersuchungen zur Erfassung des horizontalen Verschiebungswiderstandes ist ein neu entwickeltes Versuchsgerät, das sogenannte Spreizgerät, verwendet worden. Mit diesem Spreizgerät wird eine kontrollierte Horizontallast in die Pflasterdecke eingeleitet, während die resultierenden Horizontalverschiebungen der Pflastersteine kontinuierlich gemessen werden. Das Gerät wird in Kapitel 4.1 näher erläutert.

Die ersten Versuche mit dem Spreizgerät, Spreizversuche genannt, wurden im Zuge eines Verbund-Forschungsvorhabens 1997 durchgeführt [12], an dem die Ruhr-Universität Bochum, die Universität Stuttgart und die TU Braunschweig sowie die TU

Dresden beteiligt waren. Diese Versuche wurden von Koch weitergeführt [13]. Die Spreizversuche wurden an unterschiedlich stark belasteten Parkplätzen und Fußgängerflächen sowie im Prüffeld der bereits beschriebenen Straßenprüfmaschine an der Ruhr-Universität Bochum (RUB-StraP) nach erfolgter Beanspruchung durch 15.000 Überrollungen durchgeführt. In der RUB-StraP kann ein Straßenaufbau in eine trogförmige Stahlkonstruktion im Maßstab 1:1 eingebaut und durch ein belastetes LKW-Rad richtungstreu überrollt werden. Die RUB-StraP ist in **Abbildung 2.1** dargestellt.

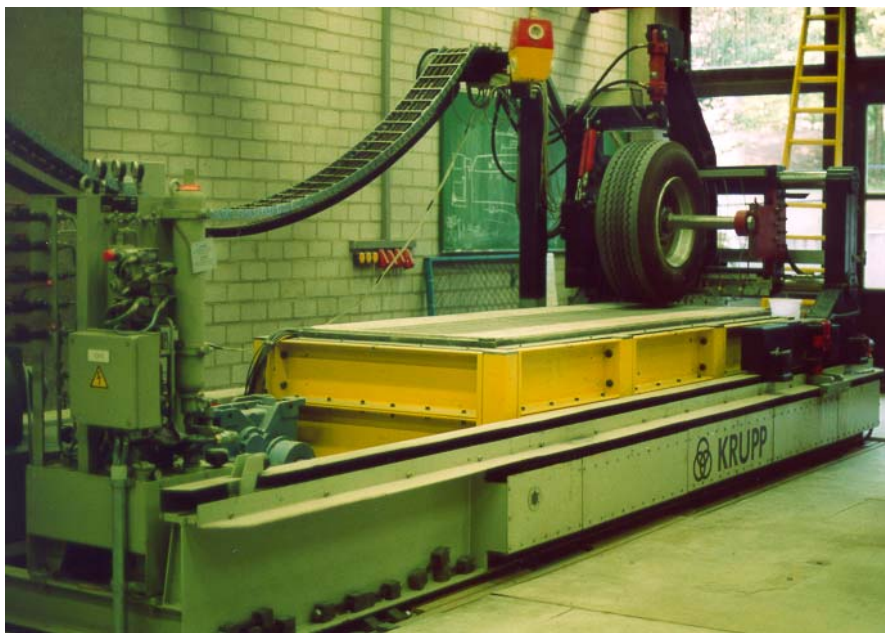


Abbildung 2.1: Darstellung der Straßenprüfmaschine der Ruhr-Universität Bochum - RUB-StraP

Weiterhin kam das Spreizgerät 1998 und 1999 in zwei Gutachten der TU Braunschweig [14] sowie der Ruhr-Universität Bochum [15] zu einem neu entwickelten Verbundpflasterstein im Vergleich zu einem Rechteckstein mit den gleichen Grundabmessungen zum Einsatz. Dabei wurden zur Prüfung der horizontalen Verbundeigenschaften des Steins Messungen an unbelasteten Versuchsfeldern und an einer zum Messzeitpunkt seit einem Jahr unter Verkehr liegenden Fläche sowie im Prüffeld der RUB-StraP nach 30.000 bzw. 40.000 Überrollungen durchgeführt. Hier fand zusätzlich eine Erfassung der horizontalen Verschiebungen infolge Verkehrsbelastung statt.

Von Koch wurden in [13] auch Ergebnisse von Messungen mit einer von ihm zur labortechnischen Erfassung des horizontalen Verschiebungswiderstandes entwickelten Versuchseinrichtung, dem Pflasterschergerät, dargestellt, mit dem eine Horizon-

talbeanspruchung in eine Pflasterdecke kontrolliert eingeleitet und die resultierenden Relativverschiebungen zwischen Pflaster und Bettung erfasst werden können.

Von Dutruel und Dardare wurden 1984 Untersuchungen mit horizontaler Belastung von Versuchsfeldern mit Rechtecksteinen und Verbundsteinen durchgeführt [16].

Bereits 1968 führte Leins im Rahmen eines Gutachtens [17] Versuche mit Doppel-T-Verbundsteinen in einem halbtechnischen Prüfstand durch, um das Verhalten von quer und schräg im Läuferverband verlegten Steinen gegen Schubbeanspruchung bei vertikaler Vorspannung grundsätzlich zu untersuchen.

Shackel führte im Rahmen von Untersuchungen mit beschleunigter Verkehrsbelastung auch einige einfache Versuche mit horizontaler Beanspruchung durch. So ließ er bei einer Versuchsfläche mit Verkehrsbelastung durch einen Autokran die Vorderräder im Stand drehen sowie die Lenkung bei einer Maximalgeschwindigkeit von 19 km/h einschlagen, wobei die Hinterräder ins Rutschen kamen [18]. Bei einer anderen Versuchsfläche wurde ein beladener Container auf vier und auf zwei Füßen über die Pflasterfläche gezogen [19].

Bei den aufgeführten Untersuchungen wurden bezüglich der horizontalen Verschiebungen die im folgenden dargestellten Ergebnisse ermittelt:

Zum Einfluss der Steinform auf den horizontalen Verschiebungswiderstand sind bisher die umfangreichsten Untersuchungen durchgeführt worden. Bei Versuchen mit dem Spreizgerät ergaben sich unterschiedliche Ergebnisse. So wurde bei Untersuchungen mit unterschiedlichen Steinen der höchste horizontale Verschiebungswiderstand bei Doppel-T-Verbundsteinen gefolgt von Rechtecksteinen ermittelt, während Pflastersteine mit „4-Seiten-Verbund“ einen geringeren Verschiebungswiderstand ergaben [12, 13]. Hier wird zudem betont, dass aus der Steinform einer der deutlichsten Einflüsse resultiert. Bei anderen Versuchen wurden bei Verbundsteinen geringere horizontale Verschiebungen als für Rechtecksteine mit den gleichen Grundabmessungen ermittelt [14, 15]. Dies ergaben auch Untersuchungen in [16], bei denen Rechtecksteine und Verbundsteine deutlich unterschiedliches Verhalten zeigten, vorausgesetzt, dass eine ausreichende Stützung am Rand vorgesehen war.

Auch zeigten bei Versuchen mit beschleunigter Verkehrsbelastung Verbundsteine mit einer L-Form gegenüber Verbundsteinen mit einer rechteckigen Grundform nur etwa halb so große horizontale Verschiebungen [19].

Der Einfluss des Steinmaterials wird für Betonsteine eher als positiv für den horizontalen Verschiebungswiderstand gesehen, während er bei Pflasterklinkern nur geringe Bedeutung hat [12, 13].

Zum Einfluss des Verbandes wurde an Versuchsfeldern mit Doppel-T-Verbundsteinen unter Schubbeanspruchung ermittelt, dass sich ein Läuferverband quer besser verhält, als schräg verlegt [17]. Ein Vergleich von Prüffeldern in der RUB-StraP, die mit Verbundsteinen und Rechtecksteinen gleicher Grundabmessungen hergestellt worden waren, erbrachte geringere horizontale Verschiebungen bei den diagonal verlegten Feldern, was auch durch Spreizversuche bestätigt wurde [15]. Diese Ergebnisse weisen wiederum auf den Einfluss der Steinform hin. Versuche mit beschleunigter Verkehrsbelastung, wie in [20, 21, 22] beschrieben, ergaben beim Vergleich von Fischgrätverband, Läuferverband längs und quer sowie Korbgeflechtverband die geringsten horizontalen Verschiebungen für den Fischgrätverband, während die größten Verformungen und Verschiebungen beim Läuferverband längs auftraten. Die Orientierung des Verbandes in Bezug auf die Fahrtrichtung, also ob Fischgrätverband oder Ellbogenverband, hatte dabei nur geringe Auswirkungen auf das Tragverhalten [23, 24]. Demgegenüber wurde bei Spreizversuchen ein höherer horizontaler Verschiebungswiderstand bei im Läuferverband quer zur Fahrtrichtung verlegten Versuchsfeldern gegenüber Feldern im Fischgrätverband ermittelt, während auch hier Felder, die im Läuferverband längs verlegt wurden, den geringsten Widerstand aufwiesen. Ferner wird die Bedeutung des Einflusses durch den Verband betont [12, 13].

Im Zusammenhang mit dem Fugenmaterial wurde festgestellt [12, 13], dass die Verwendung feinkörnigerer Gemische zu einer Verbesserung des horizontalen Verschiebungswiderstandes bei Pflaster mit schmalen Fugen und einer Verschlechterung bei breiten Fugen führt. Bezüglich der Fugenbreite hat sich herausgestellt [12, 13], dass die Einbettung der Pflastersteine und damit der Verschiebungswiderstand durch eine Fugenbreite größer als das Größtkorn der Bettung positiv beeinflusst wird. Dies gilt ebenso für eine dickere Bettung. Der Vorgang der Einbettung der Steine wurde auch bei anderen Untersuchungen beobachtet [19, 23, 24]. Da der Verschiebungswiderstand zudem auch von den Reibungseigenschaften zwischen den verwendeten Pflastersteinen und den Mineralstoffen bestimmt wird, wird empfohlen, als Bettungsmaterialien gebrochene Mineralstoffe zu verwenden, um den Scherwiderstand zu erhöhen [12, 13].

Ein Einfluss der Tragschichtmaterialien auf die horizontalen Verformungen ist bei den Untersuchungen entweder unklar geblieben [12, 13] oder wird als nicht vorhanden angesehen [19].

Weiterhin sind bei den aufgeführten Untersuchungen einige weitere allgemeine Beobachtungen zu horizontalen Verschiebungen gemacht worden:

Bei Versuchen mit dem Spreizgerät wurde die Bedeutung des Einflusses einer Randeinfassung auf die Höhe der horizontalen Verschiebungen herausgestellt [12]. Bei einer unter Verkehr liegenden Versuchsfläche wurden Horizontalverschiebungen der Steine über Schrumpfrissen in der gebundenen Tragschicht beobachtet, die dem Auspumpen des Bettungssandes zugesprochen werden [25]. Bei Versuchen im Road Simulator wurden horizontale Verschiebungen (als Kriechen bezeichnet) in Richtung der Feldmitte mit einer geringen Vorwärtsbewegung in Fahrtrichtung gemessen, die jedoch so gering waren (unter 0,5 mm), dass keine weiteren Untersuchungen der horizontalen Verschiebungen durchgeführt wurden [26, 27]. Dazu muss allerdings angemerkt werden, dass der Road Simulator auch nur in geringem Maße zur Aufbringung und Einleitung horizontaler Kräfte geeignet zu sein scheint. Versuche mit beschleunigter Verkehrsbelastung ergaben überwiegend in den Fahrspuren geringe horizontale Verschiebungen in Fahrtrichtung, die nur durch Messungen (Genauigkeit der Messung ± 2 mm), aber nicht augenscheinlich zu erkennen waren [19]. Die beschriebenen einfachen Versuche mit horizontaler Beanspruchung erbrachten keine (sichtbare) Beschädigung der Fläche [18, 19] bzw. einige Einsenkungen einzelner Steine, denen aber keine große Bedeutung zugesprochen wird [19].

3 Zielsetzung und Untersuchungsmethodik

In [12] wurde in den Schlussfolgerungen eine qualitative Bewertung verschiedener Einflüsse auf das Verhalten von Pflasterbefestigungen, und somit auch auf den horizontalen Verschiebungswiderstand, vorgenommen. Diese Bewertung ist in **Tabelle 3.1** wiedergegeben.

Tabelle 3.1: Qualitative Bewertung der untersuchten Einflüsse der Aufbauvarianten auf das Verhalten der Pflasterbefestigung (Andere Einflüsse, wie z.B. die Wasserdurchlässigkeit, bleiben dabei unberücksichtigt) (gemäß [12])

| Aufbauvarianten | | Einfluss auf den vertikalen Verformungswiderstand | Einfluss auf die Verringerung der Spannungen in der Tragschicht | Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand |
|--------------------------------------|-------------------------|---|---|---|
| Tragschichtmaterial | Kalkstein | + | o | - (?) |
| | HMV-Asche | o | + | + (?) |
| | Asphalt | ++ | ++ | + (?) |
| Bettungsmaterial | Brechsand-Splitt 0/8 mm | ++ | - | - |
| | Brechsand-Splitt 0/5 mm | o | + | + (?) |
| | Splitt 2/5 mm | + | o | + (?) |
| | Natursand-Kies 0/5 mm | ? | ++ | ? |
| Steinform | Rechteckstein (quer) | ++ | o | + |
| | Doppel-T-Verbundstein | + | o | ++ |
| | Uni-Verbundstein | o ^{*)} | + ^{*)} | o |
| Steinmaterial (Rechteckstein) | Beton | o | o | + |
| | Klinker | o | o | o |
| Verband | Fischgrätverband | ++ | o | + |
| | Läuferverband quer | + | o | ++ |
| | Läuferverband längs | - | + | - |

+ = Einfluss in positiver Richtung vorhanden

++ = Einfluss in positiver Richtung stärker vorhanden

- = Einfluss in negativer Richtung vorhanden

o = Einfluss von geringer Bedeutung

? = Einfluss unklar

Zur Erfassung des horizontalen Verschiebungswiderstandes war ein von der Universität Stuttgart entwickeltes Versuchsgerät, das sogenannte Spreizgerät, von der TU Braunschweig (TUB) und der Ruhr-Universität Bochum (RUB) erprobt worden. Mit diesem Spreizgerät wird eine kontrollierte Horizontallast in die Pflasterdecke eingeleitet. Die resultierenden Horizontalverschiebungen der Pflastersteine werden kontinuierlich gemessen.

In [12] wird in den Schlussfolgerungen zu dieser Thematik festgestellt:

„... Der horizontale Verschiebungswiderstand einer Pflasterdecke kann mit dem modifizierten Spreizgerät erfasst werden. ...“

und weiter:

„... Die Verbundwirkung von Pflastersteinen kann Messtechnisch erfasst und eingestuft werden. Die Größe der Verschiebungen wird maßgeblich von der Belastungsrichtung und der Art des Verbandes bestimmt. Eine durch die Geometrie der Steine erzielte Verzahnung verbesserte bei den Untersuchungen der TUB den Lastabtrag. Allerdings konnte bei den Untersuchungen der RUB nicht

in jedem Fall durch die Verwendung von Verbundsteinen eine positive Beeinflussung des horizontalen Verschiebungswiderstandes festgestellt werden. Der Einsatz von Rechtecksteinen aus Klinker führt gegenüber Betonsteinpflaster zu einer Verringerung des horizontalen Verschiebungswiderstandes. ...“

Damit wurde die Funktionstüchtigkeit des Spreizgerätes nachgewiesen. Es konnten plausible und differenzierbare Ergebnisse gewonnen werden. Daher kann festgestellt werden, dass dieses Gerät in der Praxis einsetzbar ist. Wie in **Tabelle 3.1** beschrieben, blieben jedoch die Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen wie z. B. des Bettungsmaterials auf den horizontalen Verschiebungswiderstand unklar oder ganz offen. Ein Bewertungshintergrund für dieses Messverfahren konnte daher noch nicht entwickelt werden.

Ziel des vorliegenden Vorhabens war die Entwicklung eines Bewertungshintergrundes für den horizontalen Verschiebungswiderstand von Pflasterdecken auf der Basis von Messungen mit dem Spreizgerät auf real belasteten Pflasterflächen. Die Charakterisierung unterschiedlicher sowohl bautechnischer als auch orts- und liegedauerabhängiger Einflussgrößen auf den Widerstand von Pflasterbefestigungen gegen horizontale Beanspruchung war dabei ein notwendiger Schritt.

Insgesamt sollte der Einfluss von 15 unterschiedlichen Einflussgrößen untersucht werden. Dies sind an bautechnischen Parametern bei den Steinen das Material, die Form, die Abmessungen, d.h. das Format und die Steindicke; im Bereich der Fuge sind es die Fugenbreite und der Fugenfüllungsgrad sowie das verwendete Material; bei der Bettung wurden die Dicke und ebenfalls das Material betrachtet; zudem wurde bei den Messungen die Beschaffenheit der Tragschicht sowie der ausgeführte Verband berücksichtigt. Hinzu kommen als äußere Einflussgrößen die Neigung der Fläche, das Alter zum Messzeitpunkt sowie die Verkehrsbelastung und der Einfluss der Witterung. Neben den aufgeführten bautechnischen sowie äußeren Parametern mit Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand musste als weitere versuchstechnische Einflussgröße die Spreizrichtung berücksichtigt werden.

Da Betriebsstrecken untersucht werden sollten, musste der erste Schritt die Ermittlung von für die Messungen geeigneten Strecken sein. Dazu mussten Kommunen, aber auch Industrie- und Gewerbebetriebe angesprochen werden. Ziel war es hier nicht nur, Standorte verschiedener, für die Fragestellung interessanter Varianten an Pflasteraufbauten zu ermitteln, sondern auch Daten über den Aufbau, die verwendeten Materialien, die Liegedauer und die Verkehrsbelastung zu bekommen. Außerdem war eine Erlaubnis zur Versuchsdurchführung notwendig.

Als zweiter Schritt folgten die Feldversuche an den ausgesuchten Strecken. Hierbei wurden begleitende Untersuchungen durchgeführt, wie die Prüfung der Ebenheit mit

der 4m - Latte, die Ermittlung der Fugenbreite und die augenscheinliche Kontrolle der Fugenfüllung. Außerdem wurde der Zustand von Fläche und Pflastersteinen, auch durch Photos, ebenso dokumentiert, wie die allgemeinen Versuchsbedingungen, wie Längsneigung der Fläche, das zum Zeitpunkt des Versuches bestehende Wetter, die Umgebung u. a..

Vor Beginn der Spreizversuche an den Betriebstrecken sollten außerdem Vorversuche durchgeführt werden, bei denen ermittelt werden sollte, inwieweit ein zusätzlicher, gleichzeitiger vertikaler Lasteintrag einen Einfluss auf die Größe des Verschiebungswiderstandes hat.

Es folgten die eigentlichen Spreizversuche, also die Messungen des horizontalen Verschiebungswiderstandes mit dem Spreizgerät. Diese sollten je Messstelle dreifach durchgeführt werden.

Nach der Durchführung der Spreizversuche wurden aus der untersuchten Fläche Proben des Fugen-, Bettungs- und Tragschichtmaterials entnommen. Auch hier wurde der Zustand der Schichten und Materialien, unterstützt durch Photos, dokumentiert und beurteilt.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die entnommenen Proben im Labor weitergehend untersucht, um daraus eine Aussage zur Qualität des untersuchten Pflasteraufbaus ableiten zu können.

Anschließend an den experimentellen Teil erfolgte die Aufbereitung und statistische Auswertung der Versuchsergebnisse. Neben Untersuchungen zur Verteilung der Ergebnisse wurde eine Reihung der Messergebnisse in Abhängigkeit von den Einflussgrößen vorgenommen.

Durch den Bewertungshintergrund soll eine qualifizierte Bewertung der Pflasterbauweise selbst, wie auch eine bessere Differenzierung verschiedener Pflasterbauweisen bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit ermöglicht werden.

4 Beschreibung der Untersuchungen

4.1 Erfassung des horizontalen Verschiebungswiderstandes mit dem Spreizversuch

4.1.1 Beschreibung des ursprüngliches Spreizgerätes

Zur Erfassung des horizontalen Verschiebungswiderstandes wurde ein von der Universität Stuttgart auf der Basis eines Plattendruckgerätes entwickeltes sowie von der TU Braunschweig und der Ruhr-Universität Bochum in [12] erprobtes Versuchsgerät, das sogenannte Spreizgerät, eingesetzt. Mit diesem Spreizgerät wird eine kontrollierte Horizontallast in die Pflasterdecke eingeleitet, wobei die resultierenden Horizontalverschiebungen der Pflastersteine kontinuierlich gemessen werden. Sowohl das Spreizgerät als auch der damit durchgeführte Versuch werden im folgenden erläutert. **Abbildung 4.1** zeigt eine schematische Darstellung des Spreizgerätes, das aus einer Lastplatte für den Plattendruckversuch entwickelt wurde.

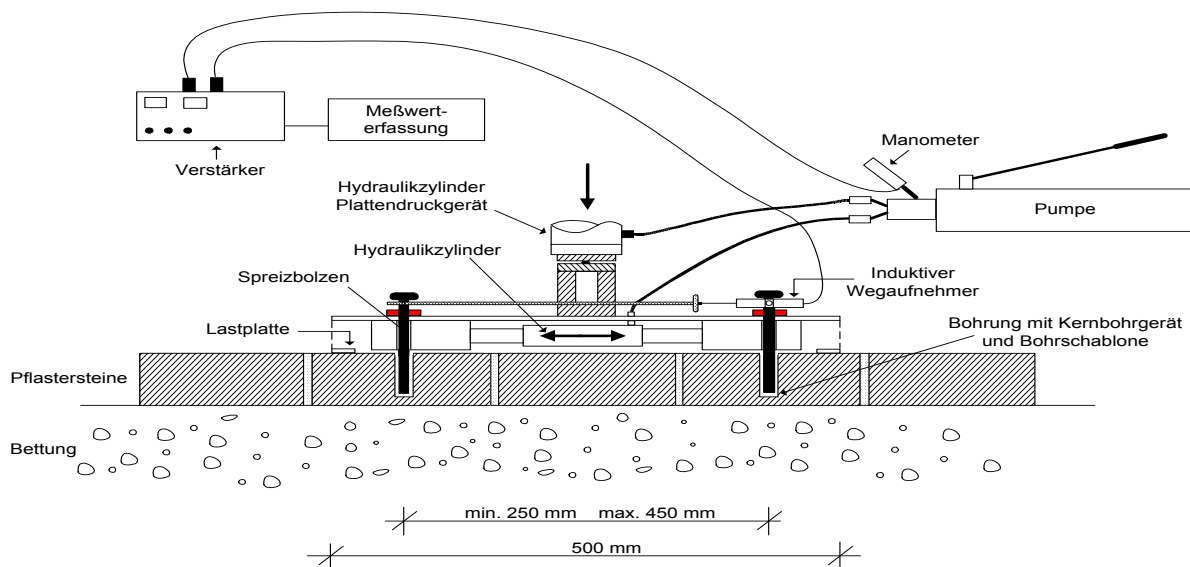


Abbildung 4.1: Vereinfachte Darstellung des Spreizgerätes

Die Versuchsdurchführung kann im wesentlichen wie folgt beschrieben werden: Auf einer Pflasterfläche werden zwei Steine ausgewählt, deren Schwerpunkte ca. 30 bis 45 cm voneinander entfernt liegen. In diese Steine wird mit Hilfe eines diamantbestückten Kernbohrgerätes mittig je ein Bohrloch mit einem Durchmesser von ca. 22 mm und einer Tiefe von ca. $\frac{3}{4}$ der Dicke des Steines erschütterungsarm gebohrt. Eine Bohrung über die volle Dicke des Steines wurde vermieden, um eine Beeinträchtigung des Bettungsmaterials beim Bohren und eine dann mögliche Plazierung der Bolzenspitze (s. u.) in der Bettung auszuschließen. Um die Bohrlöcher orthogonal zur Aufstandsfläche des Spreizgerätes und an exakten Positionen herzustellen,

wird eine Bohrschablone mit Stativ verwendet. In die Bohrlöcher werden vergütete Stahlbolzen eingebracht, auf die in jeweils entgegengesetzte Richtung mit Hilfe eines Hydraulikzylinders Horizontalkräfte aufgebracht werden. Durch diese Beanspruchung werden die Stahlbolzen und damit die Pflastersteine horizontal auseinander gedrückt. Während die Belastung mittels einer Hydraulikpumpe kontinuierlich erhöht wird, werden an dem Spreizgerät die Relativverschiebungen der Stahlbolzen gemessen. Die Messwertaufnahme des aufgebrauchten Druckes und der Verschiebungen erfolgt mit Hilfe einer elektronischen Messwerterfassung. Dabei werden Verschiebungen mittels eines induktiven Wegaufnehmers erfasst und einem Verstärker zugeleitet; der auf die Bolzen aufgebrauchte Druck wird mit Hilfe eines digitalen Kraftaufnehmers gemessen und dann ebenfalls verstärkt. Sowohl die Verschiebungen als auch die Drücke werden mit einem X-Y-Schreiber graphisch dargestellt.

Das ursprüngliche Spreizgerät ermöglicht zudem eine zusätzliche vertikale Belastung der Testfläche, vergleichbar der Belastung beim Plattendruckgerät [12], wobei das Spreizgerät allerdings, abweichend von den in DIN 18134 [28] angegebenen Plattendurchmessern, einen Durchmesser der Platte von 500 mm aufweist, um eine Lasteinleitung über den gesamten Bereich des Versuchsaufbaus von bis zu 45 cm zu ermöglichen. Der Aspekt der zusätzlichen vertikalen Belastung während des Spreizversuchs wurde in den Vorversuchen (s. Kapitel 4.3) betrachtet.

Bei der Auswahl der Messstelle ist darauf zu achten, dass keine Randeinfassungen oder Einbauten nahe der Stelle vorhanden sind, welche die horizontale Verschiebung beeinflussen könnten. Auch darf der Verband nicht wechseln. Insgesamt sollte die Messstelle ein möglichst homogenes Erscheinungsbild aufweisen.

4.1.2 Modifiziertes Spreizgerät

Das in Kapitel 4.1.1 beschriebene Spreizgerät ist im Rahmen der Voruntersuchungen zu den hier durchgeführten Versuchen modifiziert worden, um eine größere Bandbreite von Pflasterbauweisen prüfen zu können und um Aufnahme sowie Auswertung der Messwerte zu erleichtern und effizienter zu gestalten. **Abbildung 4.2** zeigt eine schematische Darstellung des modifizierten Gerätes.

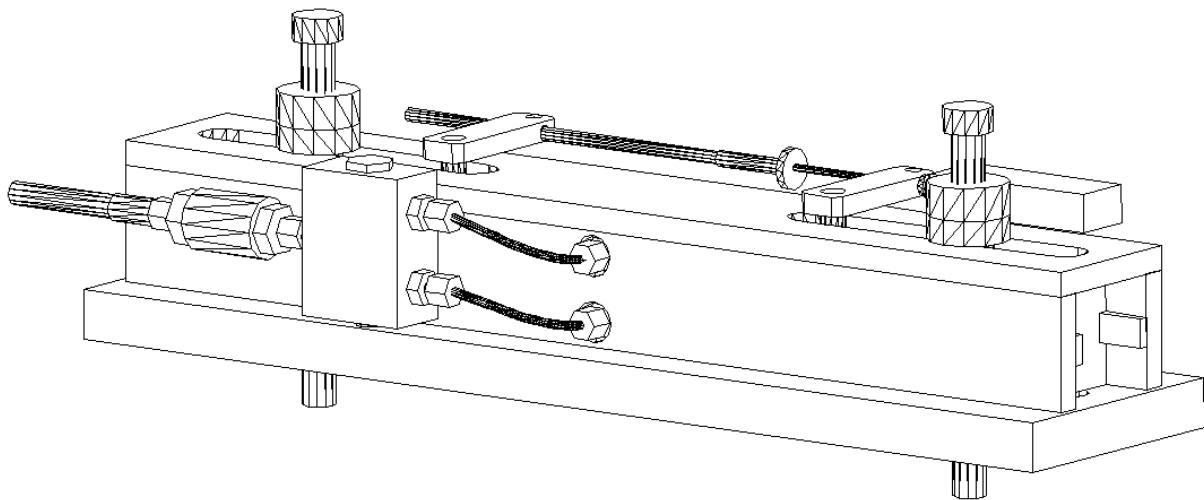


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des modifizierten Spreizgerätes

Im Folgenden werden die Modifizierungen erläutert:

Die Änderungen am Gerät selbst betrafen vor allem den Bau eines verlängerten Verschiebungskanals und damit die Vergrößerung der möglichen Abstände der Spreizbolzen auf bis zu 55 cm. Dadurch kann das Gerät auch zur Prüfung von Pflasterflächen mit Steinen größerer Abmessungen oder mit ungewöhnlichen Verbänden eingesetzt werden. Auch eine differenziertere Prüfung von z. B. im Fischgrätverband verlegten Flächen ist möglich, da Steine an sehr unterschiedlichen Stellen des Verbandes zum Spreizen verwendet werden können. Aus der Schnittzeichnung des Spreizgerätes in **Abbildung 4.3** ist die aus den Abmessungen des Verschiebungskanals und den verschiedenen Bohrungen in den Führungsblöcken resultierende Spannweite ersichtlich.

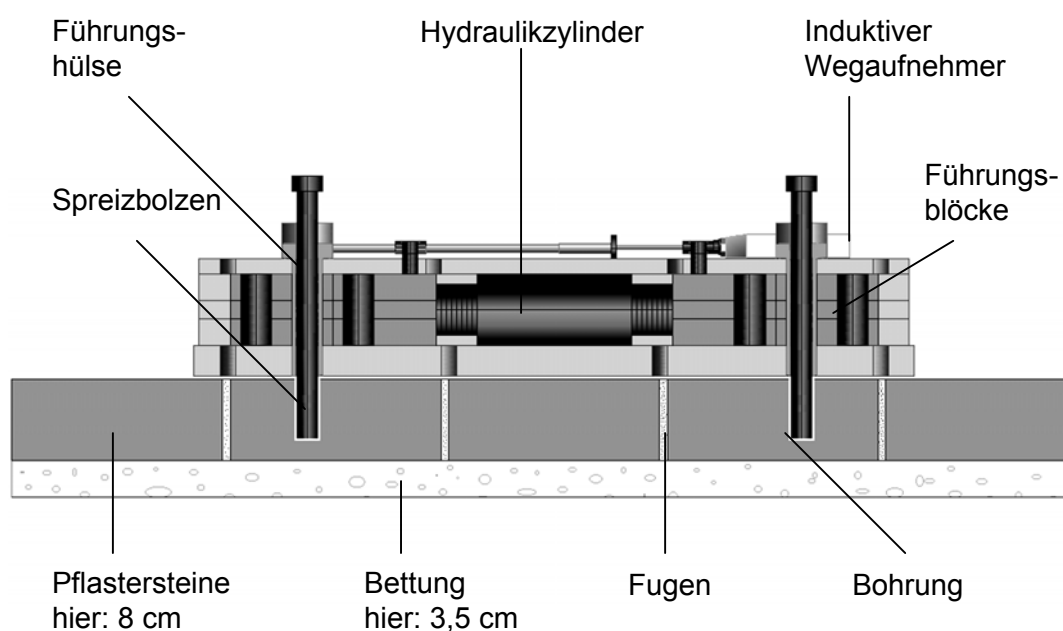


Abbildung 4.3: Schnittzeichnung modifiziertes Spreizgerät (maßstäblich)

Die Führungsblöcke dienen zur Führung der Spreizbolzen in den Führungshülsen. Die Änderung der Form der Grundplatte von kreisförmig auf rechteckig bedeutet zusätzlich eine Gewichtsersparnis, was Vorteile in der Handhabung bietet.

Die Möglichkeit der Einleitung einer zusätzlichen vertikalen Vorbelastung wurde bei diesem Gerät nach der Durchführung von diesbezüglichen Voruntersuchungen nicht mehr vorgesehen. Diese Voruntersuchungen sind in Kapitel 4.3 beschrieben.

Die Messwertregistrierung erfolgt statt mit einem X-Y-Schreiber in einem Diagramm durch einen Messwertcomputer, der mit dem Wegaufnehmer sowie mit der Kraftmessdose an der Pumpe verbunden wird. Hier werden, neben einigen allgemeinen Versuchsdaten, die aufgebrachte Belastung in [kN] sowie die dazugehörige Verschiebung in [mm] gespeichert. Die Speicherung erfolgt in 1 kN-Schritten. Diese Daten lassen sich, mit einem dafür entwickelten Programm in einen PC überspielt, mit einem beliebigen Editierprogramm weiterverarbeiten. Neben der Erhöhung der Genauigkeit, da bei der Übertragung der Daten in den Rechner keine Ablesefehler mehr auftreten können, wird damit auch eine Zeitersparnis erreicht.

Die eigentliche Versuchsdurchführung orientiert sich weiterhin an dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Vorgehen.

4.1.3 Ergebnisse und Auswertung des Spreizversuches

Die Darstellung der Messergebnisse aus dem Spreizversuch erfolgt in Form eines Last-Verschiebungsdiagramms. Eine beispielhafte Darstellung ist in **Abbildung 4.4** wiedergegeben.

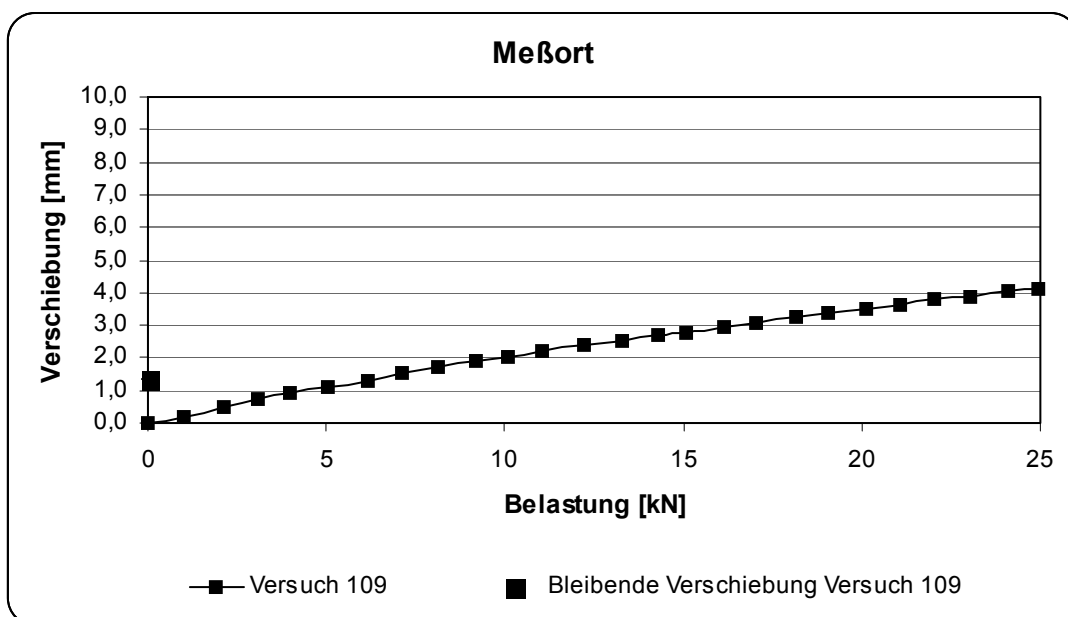


Abbildung 4.4: Beispielhafte Darstellung der Verschiebungen infolge Lasteintrag mit dem Spreizgerät

Abbildung 4.4 zeigt, dass mit zunehmender Belastung die Verschiebung nahezu linear bis zur Gesamtverschiebung bei einer maximalen Belastung von 25 kN zunimmt. Nach Erreichen dieser Last wird drei Minuten gewartet und die sich einstellende Verschiebung mit der korrespondierenden Kraft abgelesen und gespeichert. Hiernach wird die Fläche entlastet und nach weiteren drei Minuten Wartezeit die bleibende Verschiebung ermittelt. Die bleibende Verschiebung wurde bei den durchgeführten Untersuchungen erst ab Versuch Nr. 045 (laufende Nummer der Einzelversuche) gemessen. Neben der Gesamtverschiebung, der Verschiebung nach 3 Minuten Wartezeit und der bleibenden Verschiebung ist als wichtigstes Ergebnis aus den Spreizversuchen der Steigungswinkel anzusehen. Der Steigungswinkel ist der Winkel zwischen Abszisse und der aus den Messwerten resultierenden Regressionsgeraden. Dieser Winkel kann als Maß für die Geschwindigkeit des Verschiebungszuwachses [mm/kN] angesehen werden.

Bei 56 von insgesamt 437 durchgeführten Spreizversuchen wurde die Kurve zur Erstellung der Regressionsgeraden korrigiert. Der Grund für die Korrektur war jeweils eine im Vergleich zum restlichen Verlauf starke Anfangsverschiebung. Beispielhaft ist in **Abbildung 4.5** ein Last-Verschiebungsdiagramm mit einer starken Anfangsverschiebung dargestellt. „Korrektur der Kurve“ bedeutet, dass die ebenfalls dargestellte zugehörige Regressionsgerade in diesem Fall nicht durch den Nullpunkt geht.

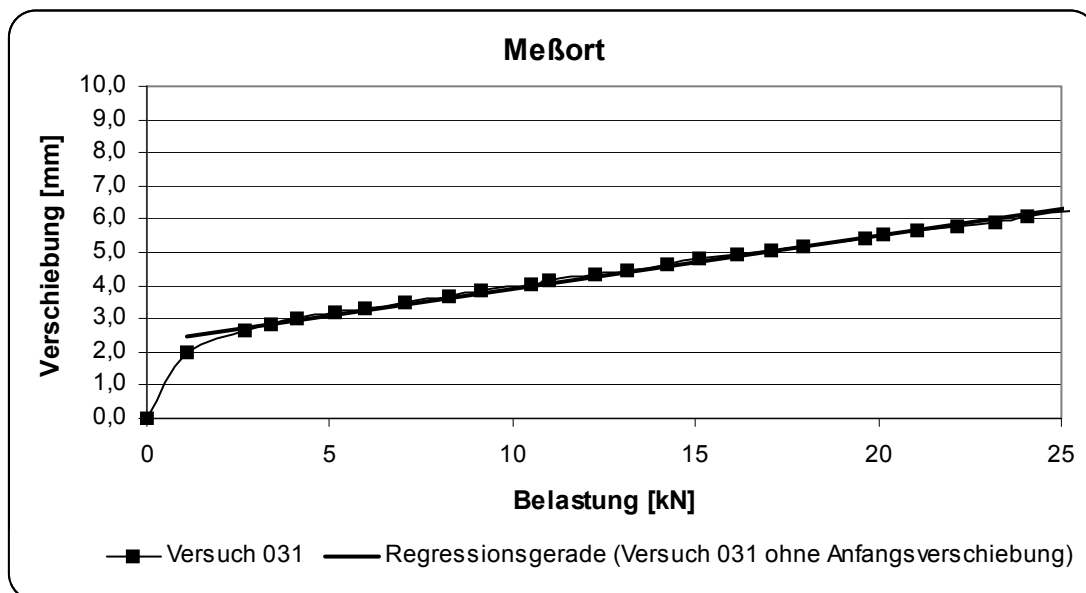


Abbildung 4.5: Last-Verschiebungsdiagramm mit starker Anfangsverschiebung und Regressionsgerade

Bei 63 Versuchen trat aufgrund eines Steinbruchs ein Sprung im Verlauf der Last-Verschiebungskurve auf, der überwiegend im Bereich von 0,2 mm bis 1,0 mm Ver-

schiebung liegt. Diese Sprünge im Verlauf der Kurven waren in der Regel in ihrer Position und Größe eindeutig ermittelbar.

In diesen Fällen fand eine gleichzeitige Betrachtung der ursprünglich gemessenen Kurve und des Verlaufs ohne den Einfluss durch einen Steinbruch statt. Für die wichtigste Größe des Spreizversuchs – den Steigungswinkel der Regressionsgeraden – ist eine Korrektur der Kurve nicht entscheidend, da ihr Verlauf vor und hinter dem Sprung parallel zueinander lag und sich der Steigungswinkel nicht ändert.

Die Differenzen sowohl aus den Anfangsverschiebungen als auch aus den Sprüngen liegen zwischen 0,1 mm und 6,9 mm Verschiebung, wobei letzteres eine einzelne Ausnahme bei starker Anfangsverschiebung darstellt. Zwei Drittel aller Differenzen liegen bei 0,1 mm bis 1,0 mm. Der Mittelwert beträgt 1,1 mm.

Aus diesen Zusammenhängen folgt, dass bei der Auswertung größerer Wert auf den Steigungswinkel gelegt wird. Bei der Auswertung der Gesamtverschiebungen wird gleichzeitig auf eventuelle Zusammenhänge mit der Höhe der Anfangsverschiebungen und dem Einfluss durch Steinbrüche geachtet.

Für jede Fläche wurden drei Spreizversuche in einer Richtung durchgeführt, deren Resultate für die Auswertung zu jeweils einem arithmetischen Mittelwert zusammengefasst wurden.

4.2 Allgemeine Beurteilung der Pflasterflächen

4.2.1 Zustandserfassung mit dem Versuchsprotokoll

Begleitend zu den Untersuchungen an den Verkehrsflächen wurden alle wichtigen Informationen über die jeweilige Fläche in ein Versuchsprotokoll eingetragen. Neben allgemeinen Informationen zur untersuchten Fläche wie Lage und Verkehrsbelastung sowie zu den äußeren Randbedingungen der Versuche gehörten hierzu vor allem Aussagen über die verwendeten Pflastersteine und den ausgeführten Verband sowie über die Bereiche Fugen und Bettung. Zur Vereinfachung des Ablaufes sind dabei, neben der Möglichkeit zu gesonderten Eintragungen, die häufigsten Varianten bereits zum Ankreuzen eingetragen. Auch die Spreizrichtung, die Fugenbreite und der Fugenfüllungsgrad sowie die Liegedauer und die Neigung der Fläche sind berücksichtigt. Zudem sind Felder für zusätzliche Informationen zum allgemeinen Zustand der Fläche sowie zu Besonderheiten vorgesehen. Außerdem dient das Formular zur Kontrolle der Vollständigkeit der durchgeführten Untersuchungen. Eine Skizze der

untersuchten Fläche inklusive der Positionen der Messstellen sowie der Aufgrabung wurde jeweils auf der Rückseite des Protokolls angefertigt. Das Formular ist im Anhang in **Abbildung A1** enthalten.

Um einen Gesamteindruck vom Zustand der untersuchten Verkehrsflächen zu erhalten, wurde dieser optisch und messtechnisch erfasst und dokumentiert. Neben der Aufnahme von eventuellen Schäden an einzelnen Pflastersteinen oder im Verband (Fugenbild, Setzungen) gehörten dazu auch die Ermittlung der Fugenbreiten und die augenscheinliche Kontrolle der Fugenfüllung. Außerdem wurde der Zustand der Verkehrsfläche durch Fotos dokumentiert. Diese Aufnahmen sind dem Bericht auf einer CD-ROM beigelegt. Zusätzlich erfolgte eine Aufnahme der allgemeinen Randbedingungen wie Neigung der Fläche, das Wetter zum Zeitpunkt des Versuches, die Umgebung u. a., um die Darstellung der Gesamtsituation zu unterstützen und um zusätzliche Daten zur Bewertung der Messergebnisse zu erhalten.

4.2.2 Ebenheitsprüfungen

Bei den Klinkerpflasterdecken wurden zur Ermittlung von Längs- und Querebenheit als Maßstab für den allgemeinen Zustand Profile in Längs- und in Querrichtung mittels eines Profilografen aufgenommen [29]. Zusätzlich wurden die Flächen in Längsrichtung auf Buckel oder Mulden sowie auf gekippte Steine untersucht. In Querrichtung stand die Ermittlung von eventuellen Spurrinnen nach Lage, Form und Tiefe im Vordergrund. Die Anzahl der durchgeführten Untersuchungen richtete sich nach der Größe der untersuchten Verkehrsfläche.

Bei den untersuchten Verkehrsflächen mit Decken aus Betonpflastersteinen wurden Ebenheitsprüfungen nach [29] mit einer 4 m-Latte durchgeführt. Die Anordnung der einzelnen Prüfungen erfolgte möglichst im Bereich der durchgeführten Spreizversuche. Eine prinzipielle Darstellung der Messanordnung ist in **Abbildung 4.6** wiedergegeben.

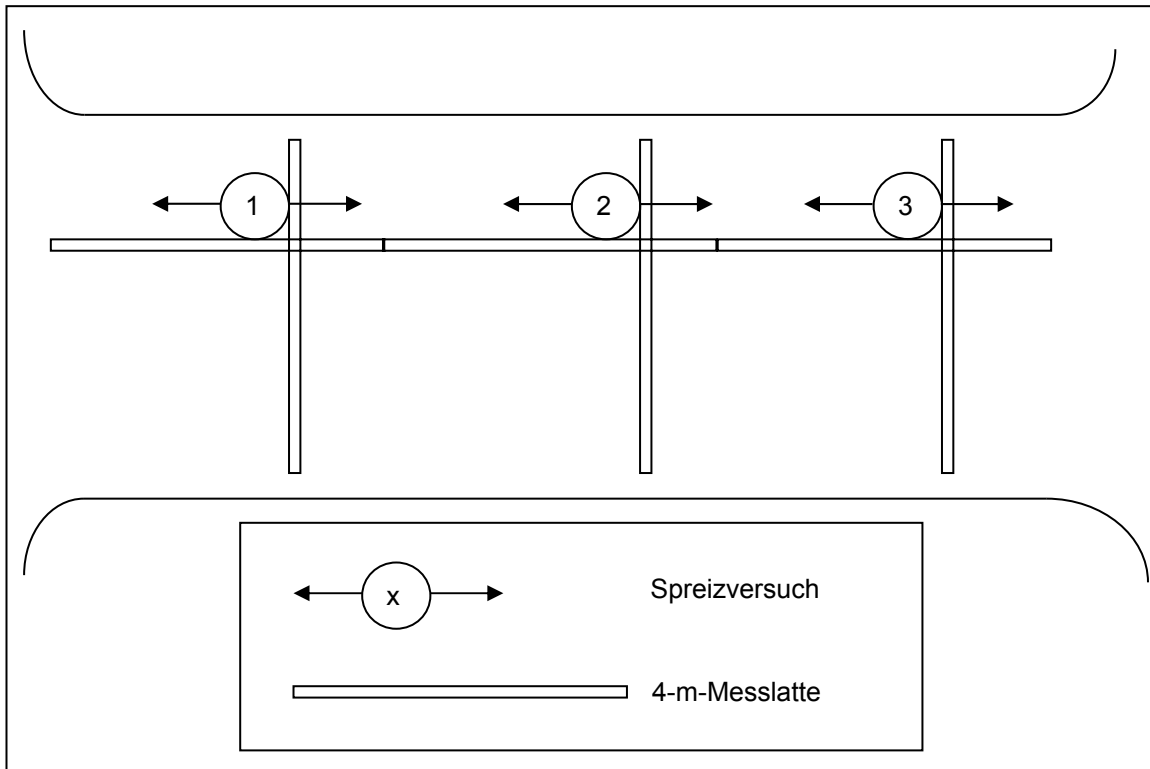


Abbildung 4.6: Anordnung von Ebenheitsprüfungen

4.2.3 Aufbau der Verkehrsflächen

Der Schichtenaufbau der einzelnen Flächen wurde nach Möglichkeit anhand der vorhandenen Unterlagen vom Bau der Fläche ermittelt. Außerdem wurde nach Durchführung der Spreizversuche eine Aufgrabung durchgeführt, anhand derer der vorliegende Aufbau an der Messstelle ermittelt wurde. Neben der Bestimmung der Art und Dicke der Schichten wurde auch eine erste Einschätzung der verwendeten Mineralstoffe sowie des Größtkorns vorgenommen.

4.2.4 Untersuchungen an den Schichten

4.2.4.1 Fugen-, Bettungs- und Tragschichtmaterial

Aus den Aufgrabungen wurden Proben von Fugen-, Bettungs- und Tragschichtmaterial entnommen. Dabei war besonders auf eine Trennung von Fugen- und Bettungsmaterial zu achten, was einen besonders vorsichtigen Ausbau voraussetzte. Auch hier wurde der Zustand der Schichten und Materialien, unterstützt durch Photos (s. CD-ROM), dokumentiert und beurteilt.

An den Proben wurden im Labor die Korngrößenverteilung, die Rohdichte sowie der Wassergehalt ermittelt. Zusammen mit den Ergebnissen der augenscheinlichen Prü-

fung konnten daraus die verwendeten Mineralstoffe sowie die Art der Schichten bestimmt werden. Diese Informationen werden hauptsächlich bei der Auswertung der Spreizversuche benötigt. Auch lassen die Ergebnisse eine Beurteilung der Filterstabilität zu, woraus sich wiederum eine Aussage zur Qualität des untersuchten Pflasteraufbaus ableiten lässt.

4.2.4.2 Dichte der Tragschicht

Die Dichte der Tragschicht wurde mit Hilfe des Ballon-Verfahrens [30] bestimmt. Sie dient als zusätzliche Information bei der Beurteilung der Tragschicht und des verwendeten Materials.

4.3 Vorversuche mit dem Spreizgerät

Vor Beginn der Spreizversuche an den zu untersuchenden Verkehrsflächen wurden Vorversuche durchgeführt, um zu ermitteln, inwieweit ein zusätzlicher gleichzeitiger vertikaler Lasteintrag einen Einfluss auf die Größe des horizontalen Verschiebungswiderstandes hat. Aus den Ergebnissen sollte sich dann das weitere Vorgehen bei den Hauptversuchen ergeben. Als Vorversuche wurden daher Spreizversuche durchgeführt, bei denen eine Vertikallast durch zentrisches Auflegen von Gewichten aufgebracht wurde. Die ursprünglich vorgesehene Variation der Masse in 10 kg - Schritten von 0 auf 100 kg erwies sich als zu gering, was die Gesamtmasse betraf, so dass statt dessen Messungen in drei Schritten mit Massen von 0, 100 und 200 kg, jeweils zweifach gemessen, durchgeführt wurden. **Abbildung 4.7** zeigt die für die jeweilige vertikale Belastung arithmetisch gemittelten Last-Verschiebungsdiagramme.

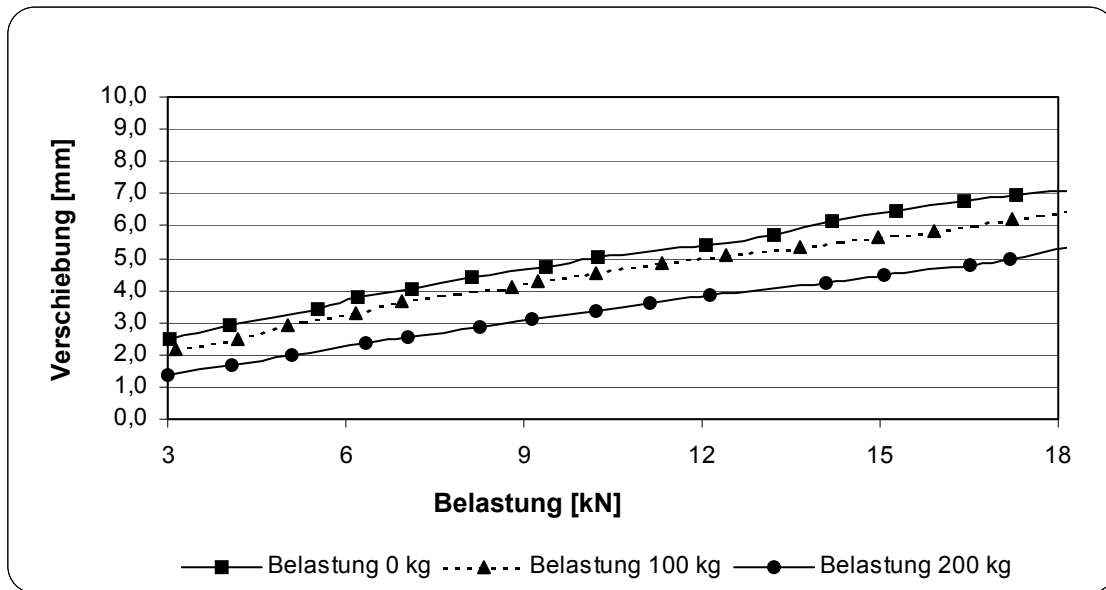


Abbildung 4.7: Einfluss vertikaler Belastung auf den horizontalen Verschiebungswiderstand (arithmetische Mittelwerte)

Der Bereich unterhalb von 3 kN wurde ausgespart, da sich bei den Versuchen aufgrund der verschiedenen großen Auflasten unterschiedlich starke Anfangsverformungen einstellen. Im Bereich größer 18 kN hingegen trat bei einem Versuch ein Fehler bei der Messwerterfassung auf und bei einem anderen brach ein Stein, woraufhin sich, nach einer kurzen Verfestigungsphase, im weiteren wieder der ursprüngliche Verlauf einstellte. Die übrigen Versuche weisen im Bereich größer 18 kN keine Änderung der Kurvenverläufe auf. Zur Ermittlung der Regressionsgeraden und zum weiteren Vergleich kam somit nur der dargestellte Bereich zwischen 3 kN und 18 kN zur Anwendung.

Aus der **Abbildung 4.7** wird deutlich, dass die absolute horizontale Verschiebung mit zunehmender vertikaler Last geringer wird. Auffällig ist hierbei jedoch, dass die Steigungen der Last-Verschiebungskurven nahezu identisch sind. Die Verringerung der Verschiebungen bei größer werdender Auflast kann mit der Erhöhung der Reibungskraft zwischen Spreizgerät und Pflastersteinen und/oder zwischen Pflastersteinen und Bettung erklärt werden. Da bei diesen Untersuchungen jedoch ein Vergleich der Verschiebungswiderstände und nicht der Gesamtverschiebungen durchgeführt werden soll, ist die Geschwindigkeit des Verschiebungszuwachses als maßgebender Parameter anzusehen. Als Maß hierfür kommen die Steigungen der Kurven bzw. die Steigungswinkel zwischen Abszisse und Regressionsgeraden zur Anwendung. Lineare Regressionsrechnungen ergeben Korrelationskoeffizienten der Regressionsgeraden zwischen 0,98 und 0,99, was den linearen Zusammenhang eindeutig zeigt. In **Tabelle 4.1** sind die ermittelten Steigungswinkel arithmetisch gemittelt für die unterschiedlichen vertikalen Belastungen wiedergegeben.

Tabelle 4.1: Einfluss vertikaler Belastung auf die Steigungswinkel (arithmetische Mittelwerte)

| Vertikale Belastung | Steigungswinkel |
|----------------------------|------------------------|
| [kg] | [°] |
| 0 | 15,0 |
| 100 | 14,7 |
| 200 | 14,6 |

Aus den Steigungen der Regressionsgeraden geht hervor, dass sich die Verschiebungswiderstände in einem sehr engen Bereich befinden. Die geringen Differenzen können eher auf bautechnische Parameter, wie beispielsweise geringe Unterschiede bei den Fugenbreiten an den verschiedenen Messstellen, zurückgeführt werden. Abschließend zeigen die Ergebnisse der Voruntersuchungen, dass der Einfluss der vertikalen Auflast auf den Verschiebungswiderstand sehr gering ist und demnach das Aufbringen einer Auflast nicht erforderlich ist.

4.4 Untersuchte Verkehrsflächen

4.4.1 Allgemeine Vorgaben bei der Auswahl der Verkehrsflächen

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Verkehrsflächen mussten verschiedene Kriterien beachtet werden. Dabei war der wichtigste Punkt, dass die Strecken schon einige Jahre unter Verkehr liegen sollten, um die Beurteilung einer Bewährung der Bauweise zu ermöglichen. Als Richtwert wurde eine Liegedauer von 10 ± 5 Jahren vorgegeben.

Außerdem sollten überwiegend Kommunalstraßen untersucht werden, um eine heterogene alltägliche Nutzung und damit eine gute Basis für Aussagen über die Bewährung unter normalen bis hohen Belastungen zu erreichen. Um auch Flächen unter besonders hohen Belastungen in die Untersuchungen einzubeziehen, sollten jedoch daneben Industriestraßen untersucht werden.

Ein weiterer Punkt war die Beschränkung auf ungebundene Bauweisen, da diese als Regelbauweisen anzusehen sind und auch nur diese in den ZTV P-StB [5] beschrieben werden. Bei der Suche nach geeigneten Flächen sollten somit Bauweisen mit vermörtelten Fugen und/oder gebundener Bettung ausgeschlossen werden.

4.4.2 Untersuchte Verbände

Es wurden Untersuchungen am Läuferverband, sowohl längs als auch quer zur Fahrtrichtung verlegt, sowie am Fischgrätverband und am Ellbogenverband durchgeführt. Da die Versuche überwiegend in Fahrtrichtung durchgeführt wurden, ergaben sich außer beim Läuferverband längs bei allen Verbänden mehrere Versuchsvarianten mit unterschiedlichen Spreizrichtungen.

Alle Spreizversuche an Flächen mit im Läuferverband längs verlegten Steinen wurden in der in **Abbildung 4.8** dargestellten Spreizrichtung durchgeführt.

Läuferverband längs

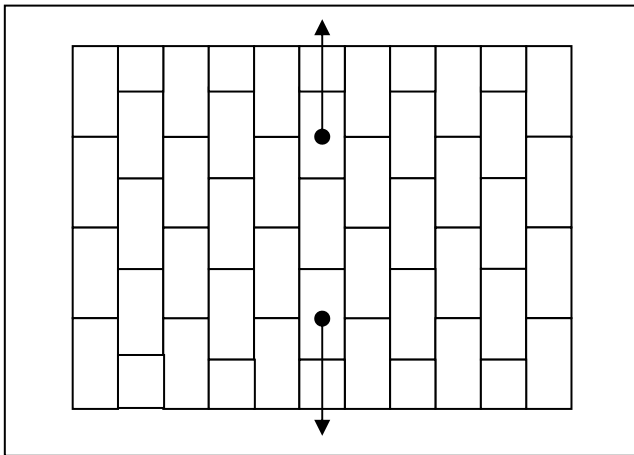


Abbildung 4.8: Spreizrichtung bei Läuferverband längs

Läuferverband quer

Bei Flächen mit im Läuferverband quer verlegten Steinen wurde neben den Messungen in Fahrtrichtung auch diagonal sowie quer zur Fahrtrichtung gemessen. In **Abbildung 4.9** sind die verschiedenen Spreizrichtungen dargestellt.

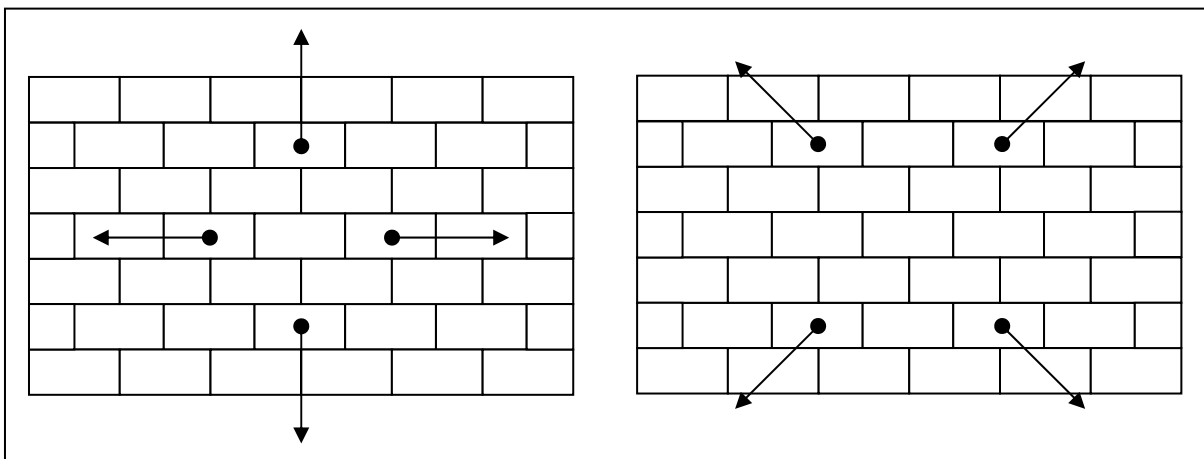


Abbildung 4.9: Spreizrichtungen bei Läuferverband quer

Fischgrätverband und Eillbogenverband

Beim Fischgrätverband sowie beim Eillbogenverband haben sich die in **Abbildung 4.10** dargestellten Spreizrichtungen als zweckmäßig herausgestellt. Neben der Durchführung von Messungen diagonal zur Fahrtrichtung spielten hierbei auch die Orientierung des Verbandes zur Fahrtrichtung sowie die Lage der Fahrspur eine Rolle.

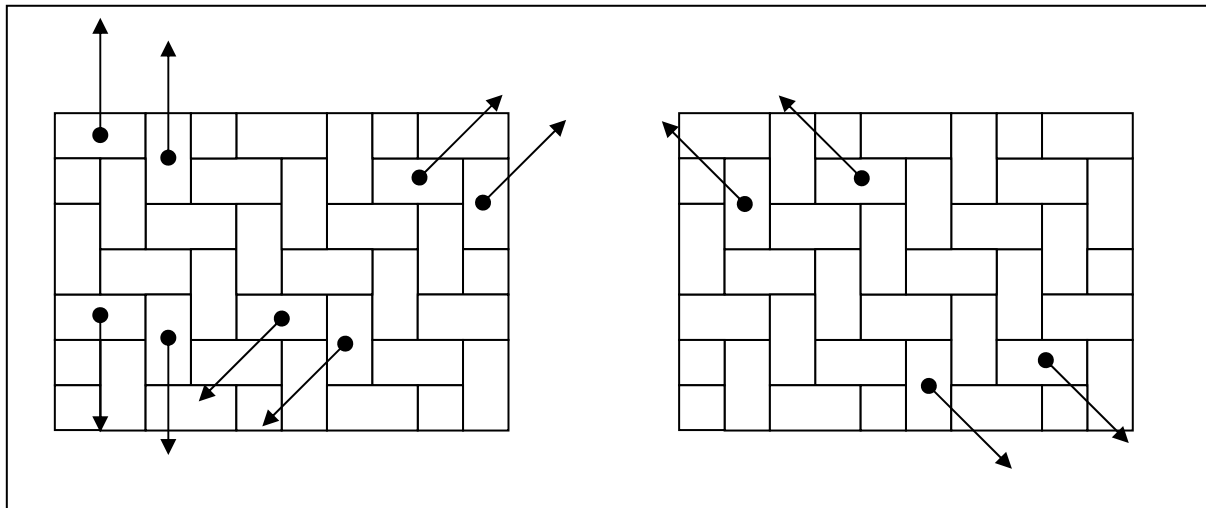


Abbildung 4.10: Spreizrichtungen bei Fischgrätverband und Eillbogenverband







Diagonalverband

Der Diagonalverband, wie er im Rahmen dieses Vorhabens untersucht wurde, ist ein in Bezug zur Fahrtrichtung schräg nach rechts bzw. links geneigter Läufer längs Verband. Der Diagonalverband bestand aus Rechtecksteinen und da er nur auf einer Verkehrsfläche untersucht werden konnte, wird hier auf eine Darstellung verzichtet. Die Messungen wurden an diesem Verband nur in Fahrtrichtung durchgeführt.

4.4.3 Untersuchte Steinformen

Die untersuchten Steinformen sind in **Tabelle 4.2** dargestellt.

Tabelle 4.2: Untersuchte Steinformen

| Pflasterstein | Steinform | Breite [cm] | Länge [cm] | Dicke [cm] |
|---|---|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Rechteck bzw. Quadrat ^{*)} (Klinker und Beton) |  | 10,0 | 20,0 | 6,2; 7,1; 8,0 |
| | | 11,5 | 17,5 | 8,0 |
| | | 11,8 | 24,0 | 6,2 |
| | | 15,0 ^{*)} | 15,0 ^{*)} | 14,0 ^{*)} |
| | | 15,0 | 22,0 | 10,0; 14,0 |
| | | 15,0 20,0 ^{*)} | 30,0 20,0 ^{*)} | 7,5; 8,0 12,0 ^{*)} |
| SINPRO |  | 11,0 | 22,0 | 8,0; 10,0 |
| Doppel-T |  | 16,5 | 20,0 | 8,0 |
| Sechseck |  | 18,0 | 18,0 | 8,0 |
| | | 22,0 | 22,0 | |
| Wardenburger |  | 24,0 | 19,0 | 8,0; 10,0 |
| SF-Vollverbund |  | 10,0 | 19,0 | 8,0; 10,0 |

^{*)} Die gekennzeichneten Maße gehören zu den Quadrat-Pflastersteinen aus Beton.

Aus der **Tabelle 4.2** gehen auch die Abmessungen der Steine sowie die Steindicken hervor. Bei den Rechtecksteinen handelt es sich sowohl um Pflasterklinker als auch um Betonsteine. Bei allen übrigen Steinformen wurden nur Flächen mit Betonpflastersteinen untersucht.

5 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

5.1 Allgemeines

Grundvoraussetzung für eine Aussage über das Verhalten einer Pflasterfläche unter horizontaler Belastung ist ein mindestens befriedigender Zustand der Verkehrsflächen. Aussagen gewonnen auf Flächen mit gestörtem Gefüge liefern kein realistisches Bild. Dementsprechend war eine Beurteilung der untersuchten Fläche notwendig. Das Kapitel 5.2 zeigt die Ergebnisse dieser Beurteilungen, während in Kapitel 5.3 die Ergebnisse der Spreizversuche dargestellt sind.

5.2 Zustand der untersuchten Verkehrsflächen

5.2.1 Beschreibung der ausgewählten Flächen

5.2.1.1 Ausgewählte Verkehrsflächen mit Klinkerpflaster

Zusätzlich zu den allgemeinen Vorgaben wurde bei der Auswahl der Klinkerpflasterflächen bezüglich der Pflastersteine der Schwerpunkt auf die am häufigsten verwendeten Steinformate 240 x 118 x 62 mm und 200 x 100 x 62 mm gelegt, wobei letztere auch mit einer Dicke von 71 mm untersucht wurden.

Ausgewählt wurden (in alphabetischer Reihenfolge) Verkehrsflächen in Bramsche, Düsseldorf, Dortmund, Gelsenkirchen, Gelsenkirchen-Buer, Gronau, Haltern, Haren und Herzlake.

Abbildung 5.1 gibt die geographische Lage dieser Flächen wieder. Nachfolgend werden die untersuchten Strecken näher erläutert.



Abbildung 5.1: Standorte der untersuchten Verkehrsflächen mit Klinkerpflasterdecke

Bramsche

Bei der in Bramsche untersuchten Fläche handelt es sich um die Werkzufahrt zum Werk der Penter Klinker Klostermeyer KG. Diese ist 1985 gebaut worden und war somit zum Untersuchungszeitpunkt 15 Jahre alt. In dieser Zeit ist sie fast ausschließlich durch Schwerlastverkehr belastet worden, der im Maximum bei 120 LKW/d und im Durchschnitt bei ca. 60 LKW/d lag.

Als Steine waren Klinker mit den Abmessungen 240 x 118 x 62 mm eingebaut worden. Die Verlegung war im Fischgrätverband erfolgt, wobei am Rand jedoch statt der Bischofsmützen geschnittene Steine verwendet worden waren. Die Sandbettung war, wie sich erst bei der Aufgrabung nach Abschluss der meisten Untersuchungen herausgestellt hat, durch eingeharkten Zement im oberen Bereich verfestigt. Obwohl diese Bauweise somit nicht der vorgesehenen Regelbauweise entsprach, wurde die Fläche dennoch mit in die Bewertung aufgenommen.

Gelsenkirchen

In der Gelsenkirchener Innenstadt wurden drei, unterschiedlich belastete, jeweils ca. 10 Jahre alte Flächen untersucht. Die ersten beiden lagen im Bereich einer Bushaltestelle an der Einfahrt zur Fußgängerzone, die somit neben der Belastung durch die Busse zweier Linien auch Verkehrsbelastung durch Anlieferverkehr zur Fußgän-

gerzone sowie durch PKW erfahren. Demgegenüber liegt die dritte Fläche direkt in der Fußgängerzone und ist damit ebenfalls durch Anlieferverkehr belastet. Bei allen drei Flächen waren Pflasterklinker mit den Abmessungen 200 x 100 x 71 mm zum Einsatz gekommen. Während bei der Bushaltestelle jedoch ein Fischgrätverband ohne Bischofsmützen, bei einer Fläche als Ellbogenverband ausgeführt, gewählt worden war, waren bei der dritten Fläche die Klinker im Läuferverband quer zur Fahrtrichtung verlegt.

Gelsenkirchen-Buer

Ebenfalls in der Fußgängerzone und damit durch Anlieferverkehr belastet lag die in Gelsenkirchen-Buer untersuchte ca. 6 Jahre alte Fläche. Hier waren Klinker mit den Abmessungen 200 x 100 x 71 mm in zwei unterschiedlichen Verbänden, Läuferverband quer zur Fahrtrichtung und Fischgrätverband (Ellbogenverband), eingebaut worden.

Gronau

In der Innenstadt von Gronau wurden wiederum zwei unterschiedlich belastete Flächen untersucht, die beide 1988 gebaut worden und damit zum Messzeitpunkt 12 Jahre alt waren. Bei der ersten handelt es sich wiederum um eine Bushaltestelle, die durch den Verkehr von ca. 40 Bussen/d belastet ist. Die zweite Fläche liegt in der durch Anlieferverkehr belasteten Fußgängerzone. An beiden Messstellen sind Klinker mit den Abmessungen 240 x 118 x 62 mm verwendet worden, die an der Bushaltestelle im Läuferverband quer zur Fahrtrichtung liegen, während in der Fußgängerzone ein Läuferverband längs zur Fahrtrichtung (!) ausgeführt worden war.

Haltern

Auch die in Haltern untersuchten Flächen lagen in der Fußgängerzone. Sie waren zum Messzeitpunkt 14 Jahre alt (1986 gebaut) und sind einheitlich durch Anlieferverkehr belastet. Für alle drei Flächen sind Klinker mit den Abmessungen 200 x 100 x 71 mm verwendet worden, die allerdings in drei unterschiedlichen Verbänden, Fischgrätverband mit Bischofsmützen, Fischgrätverband (Ellbogenverband) und Läuferverband quer zur Fahrtrichtung, verlegt worden waren.

Haren

In Haren wurden zwei unterschiedliche jeweils ca. 5 Jahre alte Flächen in der Innenstadt untersucht. Dabei handelte es sich zum einen um eine Straße, die durch schweren Anlieferverkehr belastet war, und zum anderen um eine Zufahrt zur Fußgängerzone, die eine dementsprechende Verkehrsbelastung, also überwiegend Anlieferverkehr, aufwies. Beide Flächen waren mit Klinkern in den Abmessungen

200 x 100 x 62 mm im Fischgrätverband (Ellbogenverband) hergestellt worden. Bei der Straße stellte sich, wie in Bramsche, bei der Aufgrabung heraus, dass die Betung mit einem hydraulischen Bindemittel verfestigt worden war. Auch diese Fläche wurde, obwohl die Bauweise nicht der vorgesehenen Regelbauweise entsprach, mit in die Bewertung aufgenommen.

Herzlake

In Herzlake wurde eine 10 Jahre alte Fläche untersucht, die zur Durchgangsstraße des Ortes gehört und somit durch LKW und PKW, aber auch durch Busse mehrerer Linien (ca. 14 Busse/d und Richtung) belastet war. Hier waren Klinker mit den Abmessungen 240 x 118 x 62 mm, im Läuferverband quer zur Fahrtrichtung verlegt, verwendet worden.

5.2.1.2 Ausgewählte Verkehrsflächen mit Betonsteinpflaster

Bei der Auswahl der Verkehrsflächen mit Betonsteinpflaster wurden sowohl Rechtecksteine als auch Verbundsteine bzw. Steine mit anderen Formaten berücksichtigt. Die untersuchten Steinformen sind bereits in **Tabelle 4.2** dargestellt worden.

Ausgewählt wurden (in alphabetischer Reihenfolge) Verkehrsflächen in Bochum, Düsseldorf, Essen, Hattingen, Herne, Köln und Mönchengladbach. In **Abbildung 5.2** ist die geographische Lage der Flächen mit Betonsteinpflaster dargestellt.



Abbildung 5.2: Standorte der untersuchten Verkehrsflächen mit Betonsteinpflasterdecke

Bei der folgenden kurzen Darstellung der untersuchten Flächen wird die Beanspruchung aus Verkehr in gleicher Art bezeichnet, wie dies auch bei der Auswertung der Spreizversuche geschieht, d. h. mit zusammenfassenden Begriffen wie beispielsweise „Gehweg“ oder „PKW-Parkplatz“. Die untersuchten Straßen wurden in Straßen geringer Verkehrsbeanspruchung und Straßen mittlerer Verkehrsbeanspruchung eingeteilt. Dabei entspricht die Verkehrsbelastung einer Straße mittlerer Verkehrsbeanspruchung der Verkehrsbelastung einer Bauklasse IV bis Bauklasse III. Konkrete Verkehrsbelastungszahlen lagen für die meisten der untersuchten Verkehrsflächen, wie auch bei den Klinkerpflasterflächen, nicht vor.

Die angegebene Anzahl der untersuchten Flächen entspricht nicht den bei der Auswertung der Spreizversuche genannten Zahlen, da an einer Verkehrsfläche auch mehrere Untersuchungen beispielsweise durch wechselnde Verbände durchgeführt wurden.

Bochum

In Bochum konnten insgesamt acht Verkehrsflächen untersucht werden. Dabei handelte es sich um PKW-Parkplätze und deren Fahrgassen und Zufahrten sowie um Straßen geringer und mittlerer Verkehrsbeanspruchung. Das Alter der Flächen variierte von neu bis hin zu Flächen, die deutlich älter als fünf Jahre waren.

Düsseldorf

In Düsseldorf wurden ebenfalls acht unterschiedliche Verkehrsflächen untersucht. Neben Gehwegen und PKW-Parkplätzen waren dies eine Zufahrt zur Fußgängerzone, eine Bushaltestelle sowie verschiedene Straßen geringer Verkehrsbeanspruchung. Die Flächen waren neu, um die fünf Jahre alt sowie 14 Jahre alt.

Essen

Die drei in Essen untersuchten Verkehrsflächen waren drei Straßen mittlerer Verkehrsbeanspruchung. Das Alter der Flächen lag zwischen fünf und 10 Jahren.

Hattingen

Bei den vier in Hattingen untersuchten Flächen handelte es sich um zwei Parkplätze, eine Zufahrt zur Fußgängerzone sowie eine Straße geringer Verkehrsbeanspruchung. Das Alter der Flächen reicht von neu bis zu älter als fünf Jahre.

Herne

In Herne wurden sieben Verkehrsflächen untersucht. Dies waren eine Zufahrt zur Fußgängerzone, mehrere Straßen geringer Verkehrsbeanspruchung sowie eine Werkzufahrt. Das Alter der Flächen variiert zwischen einem Jahr und 15 Jahren.

Köln

Bei den vier in Köln untersuchten Flächen handelte es sich um einen auch als Zufahrt genutzten Gehweg, einen PKW-Parkplatz, eine Fläche in der Fußgängerzone sowie eine Straße geringer Verkehrsbeanspruchung. Das Alter der Verkehrsflächen lag in einem Bereich von zwei bis über 20 Jahren.

Mönchengladbach

Die in Mönchengladbach untersuchten sechs Pflasterflächen reichten von einem Marktplatz mit eher geringerer Verkehrsbelastung, zwei PKW-Parkplätzen gleicher Bauart mit unterschiedlicher Verkehrsbelastung über zwei durch Busverkehr belastete Flächen bis zu eine Straße mittlerer Verkehrsbeanspruchung. Die Altersspanne dieser Flächen reichte von drei bis über 20 Jahre.

5.2.1.3 Ausgewählte Verkehrsflächen an der Ruhr-Universität Bochum

Die Spreizversuche an Verkehrsflächen der Ruhr-Universität Bochum wurden in erster Linie durchgeführt, um den Einfluss der Parameter Neigung der Fläche und Witterung auf den horizontalen Verschiebungswiderstand beurteilen zu können.

Die Flächen an der Ruhr-Universität Bochum bieten zur Untersuchung dieser Einflussgrößen einige einmalige Vorteile. Alle hier untersuchten Flächen entstanden kurz nach dem Bau der zugehörigen Gebäude der Universität. Sie weisen somit ein Alter von ca. 30 Jahren auf. Auch wurde seinerzeit ein einheitlicher Aufbau gewählt, was sowohl die verwendeten ungebundenen Materialien als auch die ausschließlich im Läuferverband quer und längs verlegten Verbundsteine betrifft. Damit bot sich hier die Möglichkeit einer eingehenden Untersuchung des Einflusses der äußeren Einflussgrößen bei ansonsten unveränderten oder zumindest sehr ähnlichen bautechnischen Randbedingungen. Im Wesentlichen konnte aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsflächen der Parameter Verkehrsbelastung und aufgrund der Überdachung einiger Flächen, vor allem der Rampen im zentral gelegenen Verkehrsbauwerk (siehe **Abbildung 5.4**), der Einfluss der Witterung näher untersucht werden. Zudem weisen einige der Straßen mittlere bis starke Längsneigungen bei gleichzeitiger einheitlicher Verkehrsbelastung auf, so dass auch diese Einflussgröße einbezogen werden konnte. Die Variationsbreite bei den bautechnischen Einflussgrößen war bedingt durch die weitgehend einheitliche Bauweise nur begrenzt vorhanden.

Im Folgenden wird zunächst der Aufbau der Verkehrsflächen dargestellt, bevor im Weiteren auf die Lage der einzelnen Flächen eingegangen wird.

Aufbau der Flächen

Der Schichtenaufbau der untersuchten Verkehrsflächen ist in **Abbildung 5.3** dargestellt [31].

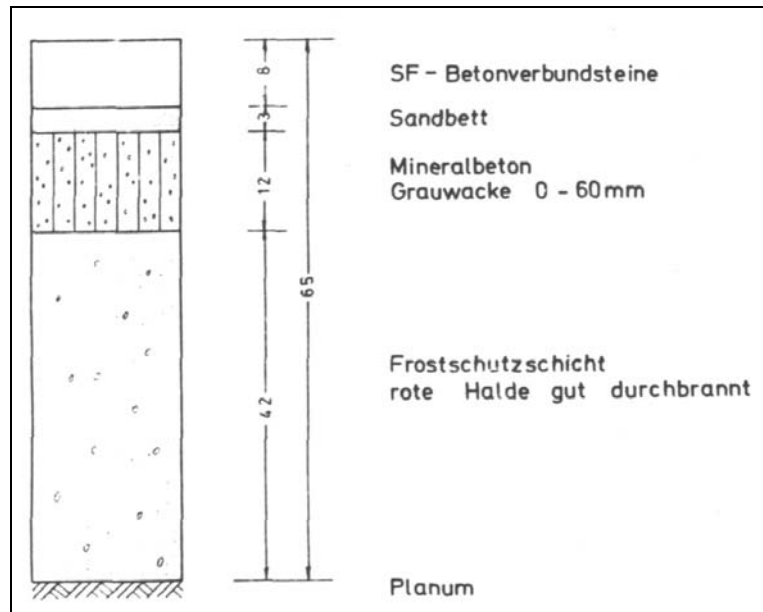


Abbildung 5.3: Schichtenaufbau der Verkehrsflächen an der Ruhr-Universität Bochum [31]

Als Material für die Frostschutzschicht kam die damals im Ruhrgebiet weit verbreitete „rote Halde“ zur Anwendung. Die so genannte „rote Halde“ war ein Nebenprodukt des Steinkohlebergbaus und somit recht preisgünstig. Als Tragschicht folgte eine 12 cm dicke Schicht aus Grauwacke 0/60 worauf eine 3 cm dicke Bettung bestehend aus Sand 0/5 eingebaut wurde. Als Pflastersteine wurden SF-Vollverbundsteine mit einer Dicke von 8 cm oder 10 cm verwendet [31].

Ausgewählte Flächen

Abbildung 5.4 zeigt einen Übersichtsplan der Ruhr-Universität Bochum, in dem die Lage der untersuchten Flächen durch Punkte gekennzeichnet ist. Die darin enthaltene Nummerierung bezieht sich auf die Reihenfolge der Untersuchungen. Das bereits angesprochene Verkehrsbauwerk befindet sich unterhalb des zentralen Bereiches, so dass die Flächen 10 bis 14, 19 und 20 überdacht waren. Bei den untersuchten Verkehrsflächen handelt es sich um unterschiedlich belastete Straßen, verschiedene Parkflächen, Gehwegbereiche sowie Flächen am zentralen Busbahnhof der Universität.

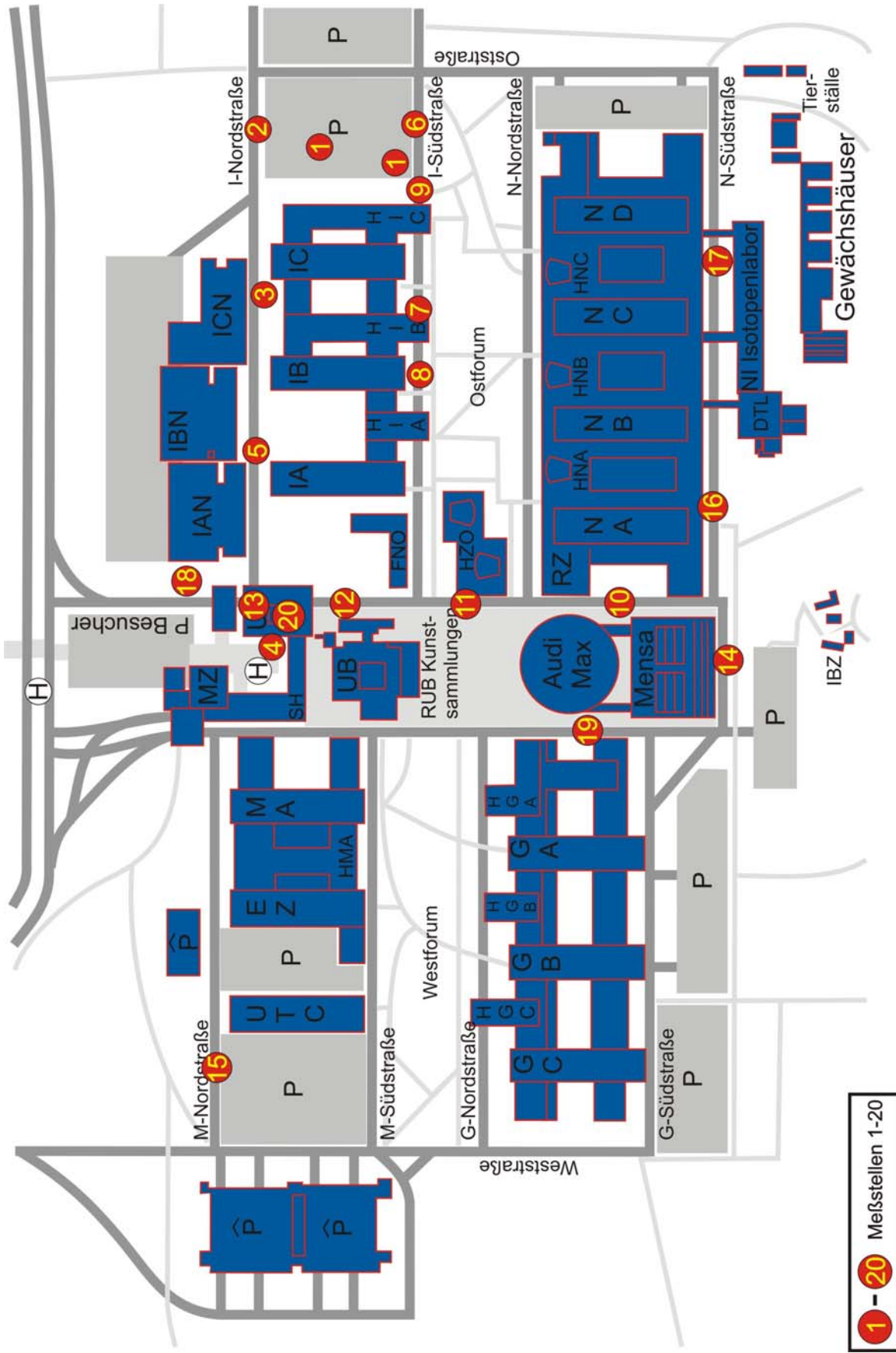


Abbildung 5.4: Übersichtsplan der Ruhr-Universität Bochum und Lage der untersuchten Verkehrsflächen

5.2.2 Darstellung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse

5.2.2.1 Zustandsbeschreibung und Bilddokumentation der untersuchten Klinkerpflasterflächen

Bramsche

Die in Bramsche untersuchte Fläche ist in der Bildmitte von **Bild 5.1** zu sehen. Wie in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben, handelt es sich um die Zufahrt zum Werk der Penter Klinker Klostermeyer KG. Die Fläche wird durch den gesamten ein- und ausfahrenden Werkverkehr belastet. Bei der Begutachtung der Fläche konnten vereinzelte oberflächliche Eckabbrüche und Kratzer ohne feste Rich-



Bild 5.1: Bramsche - Gesamtansicht

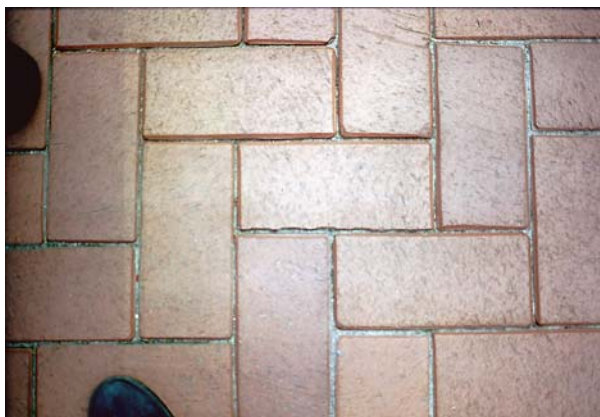


Bild 5.2: Bramsche – Detail Pflaster

tung, jedoch keine Risse festgestellt werden. Das Fugenbild ist regelmäßig. **Bild 5.2** zeigt eine Detailaufnahme des Pflasters, die den insgesamt guten, teilweise und insbesondere unter Berücksichtigung des Alters der Fläche sehr guten Gesamtzustand deutlich macht. Unterschiede zwischen dem Fahrbereich und dem Teil der Fläche, auf dem für den Halt beim Pfortner regelmäßig gebremst wird, konnten optisch nicht festgestellt werden.

Gelsenkirchen

In der Gelsenkirchener Innenstadt wurden drei unterschiedlich belastete Flächen untersucht (s. a. Kapitel 5.2.1.2). Bei der ersten, in **Bild 5.3** dargestellten Versuchsfläche handelt es sich um eine Aufpflasterung im Zufahrtsbereich zu einer Bushaltestelle, die neben der Belastung durch die Busse zweier Linien auch



Bild 5.3: Gelsenkirchen – Gesamtansicht Aufpflasterung

durch Anlieferverkehr zur Fußgängerzone belastet wird.



Bild 5.4: Gelsenkirchen – Gesamtansicht Bushaltestelle

des Haltestellenschildes zu sehen. Auch hier waren Eck- und Kantenabplatzungen zu finden, die sich aber auf einzelne Bereiche beschränkten. Insgesamt und unter Einbezug des Alters und des übrigen Erscheinungsbildes können die Flächen mit befriedigend und in Teilen mit gut bezeichnet werden.

Die dritte Versuchsfläche ist in **Bild 5.5** abgebildet. Sie liegt unweit der ersten beiden Flächen direkt in der Fußgängerzone und ist damit ebenfalls durch Anlieferverkehr belastet.



Bild 5.6: Gelsenkirchen – Pflaster Fußgängerzone

Hier waren in Teilbereichen starke Eck- und Kantenabplatzungen zu bemerken, die hauptsächlich auf die sehr geringen Fugenbreiten bzw. direkt knirsch aneinander gelegte Steine zurückzuführen sind. Der untersuchte Bereich wies jedoch nur geringe Schäden auf.

Im weiteren Verlauf der Strecke lag die in **Bild 5.4** in Teilen wiedergegebene zweite untersuchte Fläche direkt an der Bushaltestelle. Am linken Bildrand ist ein Stück



Bild 5.5: Gelsenkirchen – Gesamtansicht Fußgängerzone

Neben den, allerdings nur in kleinen Teilbereichen, auch hier auftretenden Eck- und Kantenabplatzungen (siehe **Bild 5.6**) wies die Fläche noch einzelne wellenförmige vertikale Verformungen auf, die hauptsächlich im Bereich der Einläufe auftraten.

Unter weiterer Berücksichtigung des Alters und des Gesamteindrucks, wie beispielsweise des gleichmäßigen Fugenbildes, ist die Fläche insgesamt mit befriedigend bis gut zu bezeichnen.

Gelsenkirchen-Buer

Die in der Fußgängerzone von Gelsenkirchen-Buer liegende Fläche ist in

Bild 5.7 dargestellt. Die Strecke bildet eine Zufahrt zum inneren Bereich der Fußgängerzone, der im hinteren Teil des Bildes zu sehen ist. Sie ist damit durch stärkeren Anlieferverkehr belastet.

Wie in **Bild 5.8** für einen Teil der Versuchsfläche zu sehen, sind so gut wie



Bild 5.7: Gelsenkirchen-Buer - Gesamtansicht



Bild 5.8: Gelsenkirchen-Buer – Pflaster

keine Eck- und Kantenabbrüche oder Unebenheiten vorhanden. Auch weist die Fläche ein sehr gleichmäßiges Fugenbild auf.

Insgesamt kann der Zustand der Verkehrsfläche damit als gut bis sehr gut bezeichnet werden.

Gronau

In der Innenstadt von Gronau wurden wiederum zwei unterschiedlich belastete Verkehrsflächen untersucht, wobei eine Fläche, wie in **Bild 5.9** dargestellt, eine durch den Verkehr von ca. 40 Bussen/d belastete Bushaltestelle war, während die andere Fläche in der durch Anlieferverkehr belasteten Fußgängerzone liegt.

Wie aus der Detailaufnahme des Pflasters in **Bild 5.10** (nächste Seite) ersichtlich, sind an der Bushaltestelle einzelne Klinker in Verlängerung der Fugen der benachbarten Steine gebrochen. Ebenso wie die im Bild sichtbaren Eck- und Kantenabbrüche sind dies jedoch bei



Bild 5.9: Gronau – Gesamtansicht Bushaltestelle



Bild 5.10: Gronau - Detail Pflaster

dieser Fläche seltene Schäden. Das Fugenbild ist in Teilbereichen uneinheitlich. Insgesamt und auch unter Berücksichtigung des Alters ist die Fläche eher als gut, denn als befriedigend zu bezeichnen. Der Zustand der Fläche in der Fußgängerzone ist ähnlich, wobei hier keine gebrochenen Steine vorhanden waren. Diese Fläche kann insgesamt als gut bezeichnet werden.

Haltern

In **Bild 5.11** wird ein Gesamteindruck zu den in der Fußgängerzone von Haltern untersuchten Flächen wiedergegeben. In diesem Fall wurde eine temporär vorhandene Baustellenabspernung zur Abgrenzung der Strecke genutzt. Die Versuchsflächen liegen jedoch auch außerhalb des damit gekennzeichneten Bereiches.

Die Flächen nehmen einen wesentlichen Teil des Anlieferverkehrs zum in Blickrichtung liegenden inneren Teil der Fußgängerzone, vom in Gegenrichtung liegenden Marktplatz kommend, auf.

Abgesehen von vereinzelt Eckabbrüchen und Kantenausbrüchen sind keine Mängel aufzuführen. Die Fugen weisen geringen oberflächlichen Bewuchs auf. Der Gesamteindruck wird durch die Detailaufnahme in **Bild 5.12**

wiedergegeben und ist als gut bis sehr gut zu bezeichnen, auch hier insbesondere unter Berücksichtigung des Alters der Fläche.



Bild 5.12: Haltern - Gesamtansicht



Bild 5.11: Haltern – Detail Pflaster

Haren

Eine der beiden in



der Innenstadt von Haren untersuchten Verkehrsflächen ist eine Straße mittlerer Verkehrsbeanspruchung, die hauptsächlich durch schweren Anlieferverkehr belastet ist. Diese Verkehrsfläche ist in **Bild 5.13** zu sehen.



Bild 5.14: Haren – Detail Pflaster Straße

anzusehen.

Die andere in Haren untersuchte Verkehrsfläche ist eine Zufahrt zur Fußgängerzone, dargestellt in **Bild 5.15**, die entsprechend überwiegend durch Anlieferverkehr belastet ist.

Bis auf sehr vereinzelte Eckabbrüche waren bei dieser Fläche keine Schäden zu bemerken. Der Zustand ist somit als gut bis sehr gut zu bezeichnen.



Bild 5.15: Haren – Gesamtansicht Zufahrt Fußgängerzone

Herzlake

Die in Herzlake untersuchte Verkehrsfläche, **Bild 5.16** vermittelt einen Gesamteindruck, gehört zur Durchgangsstraße



Bild 5.16: Herzlake – Gesamtansicht Straße

des Ortes und ist somit durch LKW und PKW, aber auch durch Busse mehrerer Linien (ca. 14 Busse/d u. Richtung) belastet. Die mit Klinker befestigten Felder sind durch Bänder aus Natursteinen unterbrochen. Einzelne Felder sind beträchtlich geschädigt.



Bild 5.17: Herzlake - Pflaster

Das Pflaster der in diesem Zusammenhang untersuchten Verkehrsfläche weist jedoch lediglich einige Eck- und Kantenabbrüche (siehe **Bild 5.17**) sowie leichte Verschiebungen bei den Querfugen auf. Auch einzelne gebrochene Klinker waren zu erkennen.

Insgesamt ist für den untersuchten Bereich der Zustand der Fläche mit befriedigend bis gut zu bezeichnen.

5.2.2.2 Ebenheitsprüfungen

Die Ergebnisse aller aufgenommenen Profile an Klinkerpflasterflächen sind im Anhang in der **Tabelle A2** für die Längsprofile und in der **Tabelle A3** für die Querprofile in Tabellenform wiedergegeben. Neben den ermittelten Längs- und Querneigungen handelt es sich bei den Ergebnissen vor allem um die Angabe der maximalen Unebenheiten sowie eine Kurzbeschreibung der mittleren Unebenheiten, deren Abstufung in diesem Kapitel näher erläutert werden. Außerdem sind die Gesamtlängen der Profile jeweils mit aufgeführt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Ebenheitsprüfungen mit der 4-m-Messlatte an den Verkehrsflächen mit Betonsteinpflaster sind in ähnlicher Art in den **Tabellen A4 bis A10** im Anhang dargestellt. Neben den maximalen Unebenheiten werden wiederum die mittleren Unebenheiten in Form einer Kurzbeschreibung angegeben, wobei die Abstufungen bei der Beurteilung beibehalten wurden.

Da die Versuchsflächen sehr unterschiedliche Abmessungen aufwiesen, ist auch die Anzahl der durchgeführten Ebenheitsprüfungen unterschiedlich. Die in den Tabellen aufgeführte Nummerierung bezieht sich auf die Untersuchungsprotokolle und wurde hier im Sinne einer leichteren Zuordnung mit aufgenommen.

Für die Kurzbeschreibung der mittleren Unebenheiten werden insgesamt vier Abstufungen zur Beurteilung der Ebenheitsprüfungen herangezogen:

Stufe 1: „sehr geringe Abweichungen bzw. Unebenheiten“:

- Abweichungen zwischen 0 und +/- 5 mm ($\ll 0,5$ cm, $< 0,5$ cm)

Stufe 2: „geringe Abweichungen bzw. Unebenheiten“

- Unebenheiten zwischen +/- 5 mm und +/- 1 cm ($< 1,0$ cm)

Stufe 3: „mittlere Abweichungen bzw. Unebenheiten“

- Abweichungen von ungefähr +/- 1 cm (~ 1 cm)

Stufe 4: „große Abweichungen bzw. Unebenheiten“

- Unebenheiten von mehr als +/- 1 cm ($> 1,0$ cm)

Die Abstufungen orientieren sich an den Anforderungen des Regelwerks [5, 32] an die Ebenheit der Oberfläche innerhalb einer 4 m langen Messstrecke, die gemäß DIN 18318 [32] bei Pflaster aus künstlichen Steinen bei der Abnahme nicht größer als 1 cm sein darf.

Längsprofile an Klinkerpflasterflächen

Die in **Tabelle A11** im Anhang angegebenen Längsneigungen zeigen, dass es sich bei den Versuchsflächen überwiegend um nicht bzw. kaum geneigte Flächen handelt. Die etwas höheren Werte in Gelsenkirchen und Haren hängen mit den dort erfassten Aufpflasterungen zusammen. Insgesamt wurden hier keine ungewöhnlichen Werte ermittelt.

Zu den festgestellten maximalen Unebenheiten ist zu sagen, dass diese überwiegend in die zwei Bereiche „sehr gering“ und „mittel“ eingeteilt werden können. Damit befinden sich die Unebenheiten noch im Bereich des Abnahmewertes, der allerdings bei dem Alter der untersuchten Flächen nicht mehr relevant ist.

Im Zusammenhang mit den drei Flächen mit einzelnen stärkeren maximalen Unebenheiten von etwas über 2 cm muss berücksichtigt werden, dass sie zum einen zu den ältesten untersuchten Flächen gehören und zum anderen auch große Abschnitte mit sehr geringen Unebenheiten aufweisen.

Bei den mittleren Unebenheiten sind alle Bereiche von sehr gering bis groß vertreten, wobei allerdings die Bereiche mit sehr geringen bis geringen Unebenheiten überwiegen. Gleichzeitig handelt es sich bei den Bereichen mit großen Unebenheiten häufig um Teilbereiche, wie beispielsweise an den in Bramsche durchgeführten Messungen deutlich wird.

Insgesamt sind somit bei den Längsprofilen die Unebenheiten eher als gering zu bewerten, insbesondere, wenn das Alter der untersuchten Flächen berücksichtigt wird. Dies deckt sich auch mit der visuellen Beurteilung der Flächen.

Querprofile an Klinkerpflasterflächen

Aus den Ergebnissen der Querprofilmessungen in der **Tabelle A3** im Anhang lassen sich auch die vorhandenen Querneigungen ableiten. Diese liegen überwiegend im Bereich des vorgeschriebenen Wertes von 2,5 %. Abweichungen davon nach unten sind vor allem in der mittleren Zone etwas größerer Flächen zu finden. Nach oben finden sich Abweichungen überwiegend im Bereich von Rinnen. Insgesamt wurden auch hier keine ungewöhnlichen Werte ermittelt.

Die maximalen Unebenheiten in Querrichtung sind überwiegend sehr gering. Bei drei Flächen wurden Werte etwas über 1 cm ermittelt, so dass sich auch diese Unebenheiten noch im Bereich des Abnahmewertes befinden. Dabei muss wiederum das Alter der untersuchten Flächen berücksichtigt werden. Lediglich bei zwei Flächen wurden Werte von 2 cm und damit größere Unebenheiten ermittelt.

Bei den mittleren Unebenheiten bietet sich ein ganz ähnliches Bild. Bei den genannten Flächen mit höheren maximalen Werten sind auch die mittleren Unebenheiten größer, was besonders für die beiden zuletzt angesprochenen Flächen gilt. Die überwiegende Anzahl der Flächen weist jedoch sehr geringe durchschnittliche Unebenheiten auf.

Somit sind bei den Querprofilen noch geringere Unebenheiten als bei den Längsprofilen ermittelt worden. Insgesamt sind die Unebenheiten als sehr gering bis gering anzusehen, insbesondere bei Berücksichtigung des Alters der untersuchten Flächen, d. h., Spurrinnen waren nicht feststellbar. Auch dies wird durch die visuelle Beurteilung der Flächen unterstützt.

Ebenheitsprüfungen an Betonsteinpflasterflächen

Aus den **Abbildungen A4 bis A10** im Anhang ist zu ersehen, dass der Bereich der gemessenen maximalen Unebenheiten von 0,2 mm bis 22,0 mm reicht.

Bei den insgesamt 251 durchgeführten Ebenheitsprüfungen wurden 102mal sehr geringe, 97mal geringe, 30mal mittlere sowie 22mal große mittlere Unebenheiten ermittelt. Damit liegen mehr als drei Viertel aller mittleren Unebenheiten im Bereich sehr gering bis gering.

Die größten maximalen Unebenheiten treten in Querrichtung auf Parkplätzen, auf zwei Straßen mittlerer Verkehrsbeanspruchung und bei einer Aufpflasterung sowie in Längsrichtung bei zwei der ältesten Flächen auf. Dabei sind die größeren Unebenheiten überwiegend bei den älteren Flächen zu finden.

Die Ergebnisse der Ebenheitsprüfungen zeigen somit, dass die mittleren Unebenheiten vorwiegend in einem eher geringen Bereich zu finden sind, während bei den maximalen Unebenheiten teilweise erhebliche Werte ermittelt wurden. Insgesamt ist jedoch von einem guten Zustand bezüglich der Unebenheiten zu sprechen, was insbesondere unter Berücksichtigung des Alters der untersuchten Verkehrsflächen gilt.

5.2.3 Bewertung der untersuchten Verkehrsflächen

Die im Rahmen der Untersuchungen an Verkehrsflächen mit **Klinkerpflaster** durchgeführte Zustandserfassung ergibt einen insgesamt befriedigenden bis sehr guten Zustand der einzelnen Flächen. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung des Alters der Versuchsflächen.

Sowohl bei den Längsprofilen als auch bei den Querprofilen sind insgesamt sehr geringe bis eher geringe Unebenheiten ermittelt worden, wobei die Querprofile die etwas niedrigeren Unebenheiten aufweisen.

Vergleichbare Ergebnisse erbrachten auch die Ebenheitsprüfungen an Verkehrsflächen mit **Betonsteinpflaster**.

Die Flächen sind somit, was die Ebenheiten betrifft, generell, aber auch insbesondere unter Berücksichtigung des Alters und der damit verbundenen Verkehrsbelastungen und Witterungseinflüsse, in einem guten Zustand.

5.3 Ergebnisse der Spreizversuche auf den Verkehrsflächen

Die **Tabelle 5.1** gibt einen Überblick über die Anzahl der Einzelversuche, der Versuchsreihen und der Flächen sowie über die Anzahl der beteiligten Städte in diesem Forschungsprojekt. Diese sind – in Anlehnung an die spätere Auswertung - nach den untersuchten Pflastersteinmaterialien Klinker und Beton sowie nach Verbundsteinpflaster der Ruhr-Universität Bochum (RUB) unterteilt.

Für jede Fläche wurden drei Spreizversuche in einer Richtung durchgeführt, deren Resultate für die Auswertung zu jeweils einem arithmetischen Mittelwert (Versuchsreihe) zusammengefasst wurden.

Tabelle 5.1: Übersicht über die Anzahl der Versuche, nach Auswertungskriterien sortiert

| | Spreizversuche | Versuchsreihen | Flächen | Städte |
|---|----------------|----------------|---------|--------|
| Betonsteinpflaster | 186 (203) | 64 | 38 | 7 |
| davon Rechtecksteine | 102 | 35 | -- | -- |
| davon Verbundsteine | 84 | 29 | -- | -- |
| Klinkerpflaster | 74 (75) | 25 | 13 | 6 |
| Verbundsteinpflaster an der RUB | 162 (163) | 55 | 20 | 1 |
| Gesamt | 422 (433) | 144 | 71 | 14 |

Die angegebenen Werte stehen für die jeweils verwendbaren Ergebnisdatensätze aus den Versuchen; die in Klammern angegebenen Werte geben die Anzahl der durchgeführten Versuche wieder. Bedingung für die Verwendbarkeit der Ergebnisse einer Versuchsreihe waren mindestens zwei vollständige Einzelversuche mit einer annehmbaren Spannweite. Der Kurvenverlauf sowie die weiteren Ergebnisse müssen gemäß den Beobachtungen vor Ort nachvollziehbar und schlüssig sein.

Dementsprechend mussten äußere Einflüsse und Fehler bei der Messwertaufnahme beachtet und in den Ergebnissen kenntlich gemacht werden und führten ggf. zum Ausschluss von der weitergehenden Auswertung.

Die von Merkmal zu Merkmal teilweise leicht differierende Anzahl der zur Verfügung stehenden Werte ist neben den o.g. Aspekten zudem darin begründet, dass nicht für alle Verkehrsflächen die gesamten Informationen gewonnen werden konnten. So konnten z.B. aus verkehrstechnischen Gründen an einigen Versuchsflächen keine Aufgrabungen durchgeführt werden, und es standen auch keine Informationen über

den Aufbau der Fläche zur Verfügung. Die Daten einer solchen Versuchsreihe fließen dann nur teilweise in die Auswertung ein.

Die Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Spreizversuche wie Gesamtverschiebung, Verschiebung nach drei Minuten Wartezeit, bleibende Verschiebung und Steigungswinkel erfolgt in Balkendiagrammen. Diese werden, für jede Messstelle zusammengefasst, in einem Formular dargestellt, das auch die weiteren zur Aus- und Bewertung benötigten Informationen zu Art und Bauweise der Verkehrsfläche enthält. Außerdem gehören die Last-Verschiebungsdiagramme mit der zugehörigen Regressionsgerade zu einer vollständigen Ergebnisdarstellung.

Damit wird ein guter Überblick über die jeweilige Verkehrsfläche und die zugehörigen Versuchsergebnisse erreicht. Einige Beispiele sind im Anhang in den **Abbildungen A11 bis A19** dargestellt. Die gesamten Ergebnisformulare sowie die zugehörigen Kurvenverläufe der einzelnen Versuche sind aufgrund der großen Datenmenge dem Bericht auf einer CD-ROM beigelegt.

Insgesamt wurden 422 auswertbare Spreizversuche in 144 Versuchsreihen an 71 Verkehrsflächen in 14 Städten durchgeführt. Die ermittelten Gesamtverschiebungen reichen dabei von 2,0 bis 15,8 mm mit einem arithmetischen Mittelwert von 4,8 mm. Die bleibenden Verschiebungen lagen zwischen 0,1 und 5,2 mm mit einem arithmetischen Mittelwert, der bei 1,5 mm liegt. Zwischen $4,6^\circ$ und $30,5^\circ$ wurden die Steigungswinkel aller Regressionsgeraden ermittelt, deren arithmetischer Mittelwert zu $9,6^\circ$ berechnet wurde.

An den 13 Verkehrsflächen mit **Klinkerpflaster** wurden 74 auswertbare Spreizversuche in 25 Versuchsreihen durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsreihen auf den Klinkerpflasterflächen sind in der **Tabelle A20** im Anhang zusammengefasst dargestellt. In dieser Abbildung sind neben der Lage der Verkehrsfläche als Kennzeichnung sämtliche relevanten Versuchsparameter der einzelnen Flächen wiedergegeben. Als relevante Versuchsparameter wurden die Art der Versuchsfläche bzw. die Verkehrsbelastung, die Abmessungen der Steine, also Steinformat und Steindicke, die Fugenbreite, der Fugenfüllungsgrad, das Alter zum Messzeitpunkt, der ausgeführte Verband sowie die verwendeten Materialien für Fuge, Bettung und Tragschicht aufgenommen. Eine Änderung der Spreizrichtung ist gesondert gekennzeichnet.

Bei den drei in Haltern gemessenen Flächen fehlen die Werte für die bleibende Verschiebung, da diese erst bei späteren Untersuchungen mit erfasst worden sind.

Als wichtigste Ergebnisse aus den Spreizversuchen sind die Gesamtverschiebung und die bleibende Verschiebung sowie der Steigungswinkel anzusehen. Für die Gesamtverschiebung und bleibende Verschiebung ist zusätzlich der sich aus einem Steinbruch ergebende Wert in Klammern gesetzt angegeben.

Grundsätzlich ist anhand **Tabelle A20** zunächst festzuhalten, dass die Werte der Gesamtverschiebung in einem Bereich zwischen 2,0 und 15,8 mm bei einem arithmetischen Mittelwert von 5,1 mm liegen. Eine Gesamtverschiebung von 15,8 konnte in dieser Größe allerdings nur auf einer Fläche festgestellt werden. Die übrigen Flächen weisen Gesamtverschiebungen von 2,0 bis 8,2 mm bei einem arithmetischen Mittelwert von 4,2 mm auf. Für die bleibende Verschiebung wurden Werte zwischen 0,1 und 4,6 mm (arithmetischer Mittelwert: 1,3 mm) liegen. Die Steigungswinkel wurden zu 4,6° bis 15,5° ermittelt, wobei der arithmetische Mittelwert 8,5° beträgt.

Bei den Flächen mit **Betonsteinpflaster** wurde zur Auswertung der Spreizversuche eine grundsätzliche Unterteilung nach der Steinform vorgenommen, so dass nach Rechtecksteinen sowie nach Steinen mit anderen Steinformen unterschieden wird. Bei den Steinen mit anderen Steinformen handelt es sich überwiegend um Verbundsteine, so dass im Weiteren für diese Steinformen der Begriff Verbundstein verwendet wird. Bei der Auswertung werden die Steinformen jedoch noch weiter differenziert. Insgesamt wurden 102 auswertbare Spreizversuche in 35 Versuchsreihen an Verkehrsflächen mit Rechtecksteinen und 84 Versuche in 29 Versuchsreihen an Verkehrsflächen mit Verbundsteinen untersucht. Die zusammengefasst 64 Versuchsreihen bestehen aus 186 Spreizversuchen, die an Verkehrsflächen mit Betonsteinpflaster durchgeführt werden konnten.

Die Ergebnisse der Spreizversuche an den Flächen mit Betonsteinpflaster sind in der **Tabelle A21** im Anhang dargestellt. Die bei diesen Versuchen ausgewerteten Parameter mit Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand sind ebenfalls aufgeführt.

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurden Gesamtverschiebungen in einem Bereich von 2,3 mm bis 10,0 mm und bleibende Verschiebungen von 0,2 mm bis 5,2 mm ermittelt, wobei die arithmetischen Mittelwerte 5,0 mm und 1,7 mm betragen. Die Steigungswinkel liegen in einem Bereich zwischen 4,8° und 21,5° bei einem arithmetischen Mittelwert über alle Ergebnisse von 9,9°.

An der **Ruhr-Universität Bochum (RUB)** wurden insgesamt 162 auswertbare Spreizversuche in 55 Versuchsreihen auf 20 Flächen durchgeführt. Wie in Kapitel 5.2.1.3 angesprochen, stand bei diesen Versuchen weniger die Variation der ebenfalls untersuchten bautechnischen Parameter im Vordergrund, als vielmehr die Untersuchung der Einflussgrößen Neigung der Fläche und Witterungseinflüsse.

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Spreizversuche sind im Anhang in der **Tabelle A22** zusammengefasst dargestellt, wobei die ausgewerteten Parameter mit Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand mit aufgeführt werden.

Die Werte der Gesamtverschiebungen aller hier durchgeführten Versuche liegen in einem Bereich zwischen 2,9 mm und 10,4 mm, bei einem arithmetischen Mittelwert von 4,5 mm, und die der bleibenden Verschiebung zwischen 0,4 mm und 5,0 mm bei einem arithmetischen Mittelwert von 1,5 mm. Bei den Steigungswinkeln wurden Ergebnisse zwischen $6,1^\circ$ und $20,6^\circ$ ermittelt, wobei der arithmetische Mittelwert $9,2^\circ$ beträgt.

6 Auswertung der Untersuchungsergebnisse

6.1 Vorbemerkung

Ursprünglich war in diesem Projekt die Untersuchung von ca. 50 verschiedenen Versuchsfeldvarianten mit Betonsteinpflaster und weiteren ca. 14 verschiedenen Versuchsfeldvarianten mit Klinkerpflaster geplant. Diese unterschieden sich in den potentiellen Einflussgrößen Pflastersteinform, -größe, -dicke, -verband, Fugen-, Bettungs- und Tragschichtmaterial sowie der Liegedauer. Zudem sollten das Steinmaterial und die Spreizrichtung beachtet werden. Die ursprünglich für die Untersuchungen angestrebten Kombinationen der Einflussgrößen sind in der **Tabelle A23** im Anhang dargestellt.

Im Laufe der Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass die angesetzten Einflussgrößen nicht ausreichen und in ihrer geplanten Kombination nicht ermittelt werden konnten. Eine Angleichung der Kombinationen an die vor Ort angetroffenen Verhältnisse war demnach in Absprache mit dem Betreuungsausschuss notwendig. Die Anzahl der Einflussgrößen vergrößerte sich mit der Verkehrsbelastung, dem Witterungseinfluss, der Neigung der Fläche, der Fugenbreite, dem Fugenfüllungsgrad und der Dicke der Bettung auf insgesamt 16 potenzielle Einflussgrößen. Diese sind sowohl quantitativer als auch qualitativer Art und konnten in bis zu zehn verschiedenen Ausprägungen beobachtet werden.

Dementsprechend ist es nachvollziehbar, dass es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, für jede gewünschte Kombination von Einflussgrößenausprägungen Messwerte zu ermitteln.

6.2 Statistische Auswertung und Prüfung auf Normalverteilung

Aufgrund des großen Stichprobenumfangs war für eine statistische Auswertung eine Einteilung in Klassen erforderlich. Die Klassenzahl m wurde nach der Formel $m \leq 5 \cdot \lg n$ unter der Bedingung $6 \leq m \leq 20$ gewählt, wobei n der Umfang der Stichprobe ist [33].

Von Interesse sind Informationen über die Verteilung der Grundgesamtheit, aus der die Messergebnisse stammen. Die Häufigkeitsfunktion $h(x_j, dx)$ ist ein Schätzwert für die Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ dieser Grundgesamtheit. Die graphische Darstellung einer solchen Häufigkeitsfunktion ist das Histogramm [34].

Die Histogramme mit zugehöriger Normalverteilungskurve der Versuchsreihenweise gemittelten Messwerte für die gesamten Spreizversuche sind in den **Abbildungen 6.1 bis 6.4** dargestellt. Auf der Abszisse sind die Klassenmitten x_j aufgetragen. An der Ordinate können dann die klassenspezifischen absoluten Häufigkeiten abgelesen werden.

Die **Abbildungen A24 bis A30** im Anhang enthalten die Histogramme für die gesamten Einzelmesswerte sowie für die Messwerte unterteilt nach Klinkerpflaster-, Betonpflaster- und Verbundpflasterflächen.

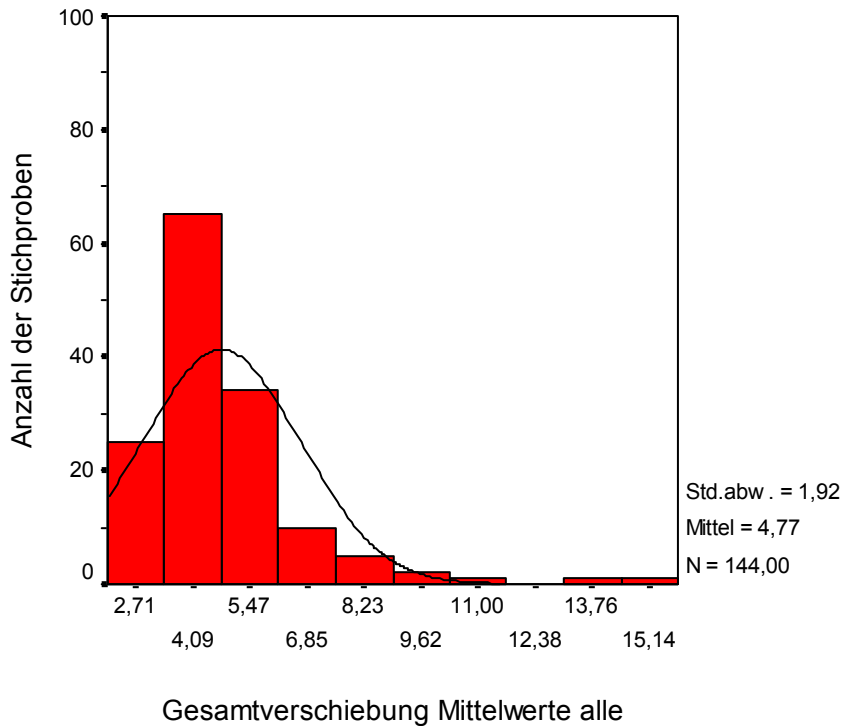


Abbildung 6.1: Histogramm der Gesamtverschiebung aller gemittelten Messwerte

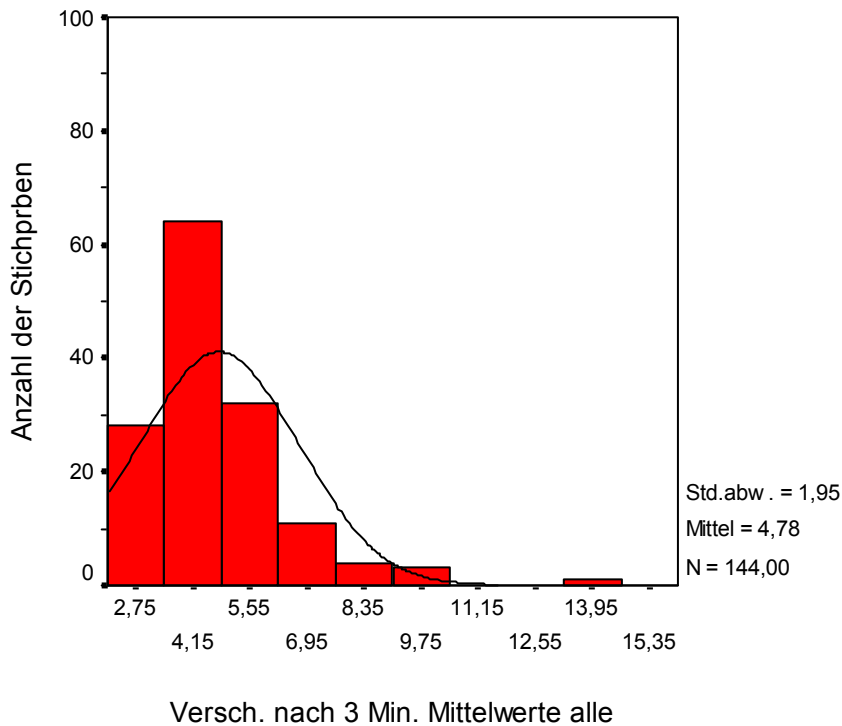


Abbildung 6.2: Histogramm der Verschiebung nach 3 Minuten Wartezeit aller gemittelten Messwerte

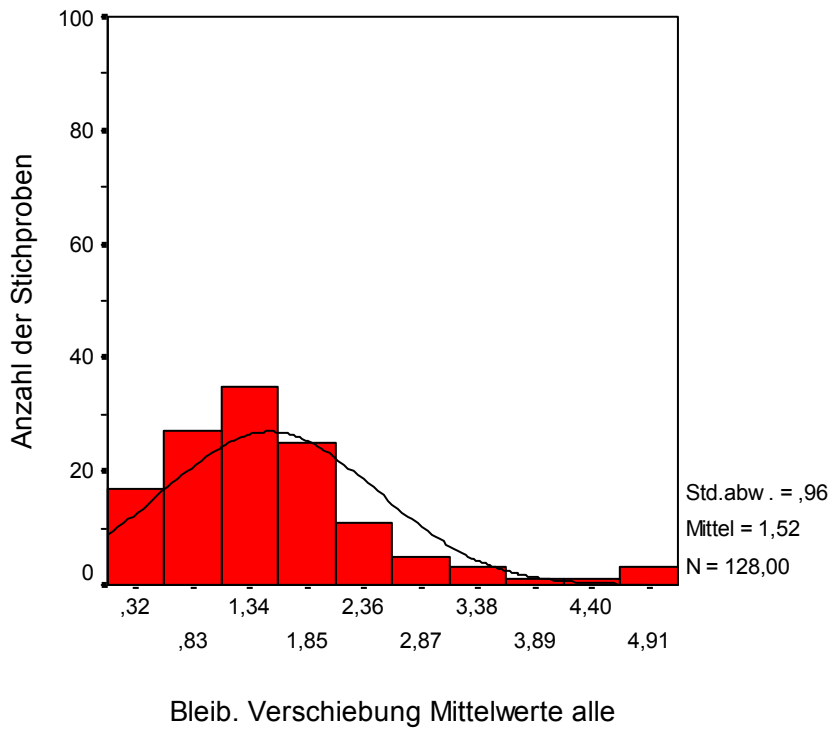


Abbildung 6.3: Histogramm der bleibenden Verschiebung aller gemittelten Messwerte

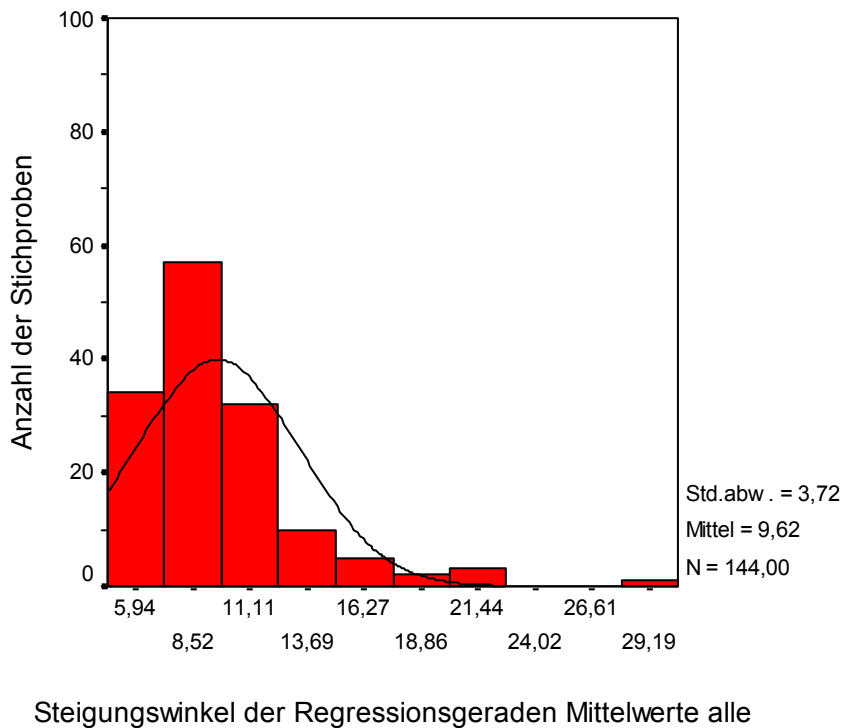


Abbildung 6.4: Histogramm der Steigungswinkel der Regressionsgeraden aller gemittelten Messwerte

Die **Abbildungen 6.1 bis 6.4** zeigen, wie die **Abbildungen A24 bis A30** im Anhang, das Bild einer links-schiefen eingipfligen Verteilung.

Zur Charakterisierung der Verteilung werden die zugehörigen statistischen Maßzahlen in der **Tabelle 6.1** wiedergegeben. Die statistischen Maßzahlen für die Einzelwerte sowie für die Unterteilungen nach Klinkerpflaster-, Betonpflaster- und Verbundpflasterflächen sind im Anhang in den **Tabellen A31 bis A34** dargestellt.

Tabelle 6.1: Maßzahlen zur Charakterisierung der Häufigkeitsverteilung aller gemittelten Messwerte

| Merkmal | Gesamtverschiebung | Verschiebung nach 3 Minuten | Bleibende Verschiebung | Steigungswinkel |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------|
| | [mm] | [mm] | [mm] | [°] |
| Stichprobenumfang | 144 | 144 | 128 | 144 |
| Arithm. Mittelwert x | 4,8 | 4,8 | 1,5 | 9,6 |
| Standardabweichung | 1,92 | 1,95 | 0,96 | 3,72 |
| Median x | 4,4 | 4,4 | 1,3 | 8,9 |
| Dichtemittel D | 4,2 | 4,2 | 1,3 | 8,5 |
| Minimum | 2,0 | 2,0 | 0,1 | 4,6 |
| Maximum | 15,8 | 16,1 | 5,2 | 30,5 |
| Spannweite | 13,8 | 14,1 | 5,1 | 25,9 |

Aufgrund der Häufigkeitsverteilungen werden in **Tabelle 6.1** zusätzlich zum arithmetischen Mittelwert der Median x und das Dichtemittel D angegeben.

Der Median (oder Zentralwert) x gibt für eine (schiefe) eingipflige Verteilung einen zutreffenden empirischen Mittelwert an. Er ist der Wert, der in einer der Größe nach geordneten Reihe die Reihe halbiert. Neben dem Median wird als Mittelwert auch das Dichtemittel (oder der Modalwert) D angegeben. Er ist der Wert einer Zufallsvariablen, der in einer Stichprobe am häufigsten vorkommt. Die (schiefe) eingipflige Verteilung besitzt demnach an dieser Stelle ihr Maximum.

Liegt eine symmetrische, eingipflige Verteilung vor, dann fallen das arithmetische Mittel x , der Median x und das Dichtemittel D zusammen [33].

Eine Vielzahl von statistischen Tests gibt Hinweise auf die Verteilung einer zu einer Stichprobe gehörigen Grundgesamtheit. Kann mit Hilfe dieser Tests gezeigt werden, dass die Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammt, liefert das einerseits Informationen über die Eigenschaften der Stichprobe und andererseits ist es ggf. möglich, bei der Festlegung eines Grenzwertes von einer Normalverteilung der Werte auszugehen.

Die Prüfung auf Normalverteilung kann z.B. mit einem Chi²-Anpassungstest oder der Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff-Anpassungstests, der im Folgenden K-S-Test genannt wird, erfolgen. In diesem Fall wurden beide Tests angewendet, da mit dem Chi²-Test Verteilungirregularitäten und mit K-S-Test Abweichungen in der Verteilungsform besser festzustellen sind. In der Prüfung mit dem Chi²-Test werden für die einzelnen Klassen die Quadrate der Abweichungen zwischen den beobachteten und den erwarteten Werten gebildet und anschließend aufsummiert. Eine Aussage über die Irrtumswahrscheinlichkeit bzw. das Signifikanzniveau α kann durch Vergleichen dieser Summen mit einem Chi²-Wert, der von dem Freiheitsgrad und damit von der Klassenanzahl abhängig ist, getroffen werden. Diese Irrtumswahrscheinlichkeit besagt, dass die Annahme einer Normalverteilung in α % der Fälle falsch ist. Üblicherweise werden beide Tests auf dem $\alpha = 10$ -%-Niveau durchgeführt.

Der K-S-Test beruht auf dem maximalen senkrechten Abstand zwischen der Summenlinie der erwarteten Werte und der Summenlinie der beobachteten Werte. Es werden also im Gegensatz zum Chi²-Test nicht die Abweichungen über den gesamten Verteilungsverlauf berücksichtigt, sondern allein die größte Abweichung ist maßgebend.[34]

Getestet wurden die Werte der Gesamtverschiebung, der Verschiebung nach 3 Minuten Wartezeit, der bleibenden Verschiebung und des Steigungswinkels der Regressionsgerade der einzelnen Spreizversuche und der Versuchsreihen für alle Verkehrsflächen insgesamt und unterteilt nach den Flächen mit Klinkerpflastersteinen, Betonpflastersteinen und Verbundpflastersteinen an der Ruhr-Universität Bochum.

Die **Tabelle 6.2** zeigt die Testergebnisse für den Chi²-Anpassungstest und den K-S-Anpassungstest an eine Normalverteilung. Die weiteren Ergebnisse der Tests an den übrigen Stichprobenverteilungen sind in den **Tabellen A35 bis A38** im Anhang dargestellt.

Tabelle 6.2: Prüfung der Mittelwerte aller Versuchsreihen auf Normalverteilung

| Merkmal | n | Chi ² -Test | | K-S-Test | |
|--|-----|------------------------|--------------|-----------|-------------|
| | | Prüfgröße | $X^2_{0,10}$ | Prüfgröße | $D_{n;0,1}$ |
| Gesamtverschiebung | 144 | 31,87 | 4,61 | 0,196 | 0,068 |
| Verschiebung nach 3 Minuten Wartezeit | 144 | 30,61 | 4,61 | 0,198 | 0,068 |
| Bleibende Verschiebung | 128 | 18,89 | 7,78 | 0,148 | 0,072 |
| Steigungswinkel | 144 | 29,06 | 4,61 | 0,199 | 0,068 |

Alle Tests in **Tabelle 6.2** zeigen dasselbe Ergebnis: Die Prüfgröße ist größer als der entsprechende Grenzwert. Deshalb ist die Nullhypothese $H_0: F(x) = F_0(x)$ mit einer

Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,10$ abzulehnen, d.h. die Stichproben entstammen keiner normalverteilten Grundgesamtheit.

Eine Betrachtung der Testergebnisse in den **Tabellen A35 bis A38** im Anhang zeigt, dass keine Stichprobenverteilung einen der Tests auf dem vorgegebenen 10%-Niveau besteht.

Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass diese Anpassungstests aufgrund der Einflüsse einer großen Anzahl verschiedener Einflussgrößen auf die Messwerte Gesamtverschiebung, Verschiebung nach 3 Minuten Wartezeit, bleibende Verschiebung und Steigungswinkel der Regressionsgeraden unter Umständen nur eine schwache Aussagekraft haben. Eine endgültige Beurteilung der Verteilung kann erst erfolgen, wenn der Einfluss der einzelnen Größen auf den horizontalen Verschiebungswiderstand, bzw. auf die stellvertretend gemessenen Werte bekannt ist. Zudem ist es für eine Beurteilung der Testergebnisse notwendig, mögliche Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Einflussgrößen, wie z.B. zwischen der Verkehrsbelastung und dem Alter der Fläche, zu kennen.

Eine multiple Regressionsanalyse ist die geeignete statistische Methode, um entsprechende Erkenntnisse über die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Einflussgrößen sowohl untereinander als auch in Bezug auf den horizontalen Verschiebungswiderstand zu erhalten. Allerdings ist - angesichts der großen Anzahl von 16 Einflussgrößen mit bis zu 10 Ausprägungen bei maximal 422 Ergebnissen - die Aussagekraft einer Regressionsbetrachtung im Vergleich zu dem notwendigen Aufwand einer solchen Auswertung eher als schwach zu erwarten.

Um im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine Aussage über den Einfluss der Größen auf den horizontalen Verschiebungswiderstand unter Beachtung aller gleichzeitig wirkenden Parameter treffen zu können, wurde ein anderes Verfahren gewählt, das im folgenden Kapitel 6.3.1 vorgestellt wird.

6.3 Auswertung der Einflussparameter

6.3.1 Methodik bei der weiterführenden Auswertung der Spreizversuche

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse werden die Daten geordnet nach den unterschiedlichen Parametern zusammengefasst und dargestellt, wobei gleichzeitig eine Reihung vorgenommen wird. So wurden beispielsweise aus den Ergebnissen aller Klinkerpflasterflächen mit den untersuchten Steinabmessungen von 200 x 100 x 62 mm, 240 x 118 x 62 mm sowie 200 x 100 x 71 mm jeweils die Mittelwerte gebildet und untereinander in Relation gesetzt. Außerdem wurde ein Vergleich mit den bei den jeweils anderen Parametern gebildeten Mittelwerten durchgeführt,

der hauptsächlich auf einem Vergleich der Differenzen der Mittelwerte untereinander beruht. Daraus sollte eine Reihung der Größe des Einflusses und damit der Bedeutung des entsprechenden Parameters abgeleitet werden.

6.3.2 Klinkerpflaster

6.3.2.1 Ergebnisse nach Lage der Verkehrsfläche geordnet

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Spreizversuche geordnet nach der Lage der Verkehrsfläche aufgeführt und ausgewertet, um einen generellen Überblick über die Versuchsergebnisse zu ermöglichen.

Bramsche

Auf der Versuchsfläche in Bramsche wurden drei Versuchsreihen, also insgesamt neun Spreizversuche, durchgeführt, die sich untereinander durch die Messrichtung unterscheiden. Die in Fahrtrichtung durchgeführten Versuche ergaben fast identische Gesamtverschiebungen von 4,5 mm und 4,4 mm und bleibende Verschiebungen von 0,6 mm und 0,7 mm. Die zugehörigen Steigungswinkel betragen $9,9^\circ$ und $9,1^\circ$. Die Ergebnisse der schräg nach links zur Fahrtrichtung durchgeführten dritten Versuchsreihe liegen mit 4,2 mm, 0,5 mm und $8,9^\circ$ knapp darunter. Die Werte der Gesamtverschiebung und des Steigungswinkels befinden sich damit im mittleren Bereich aller Versuche, während die der bleibenden Verschiebung unter dem Mittelwert liegen. Der Unterschied in den Ergebnissen ist auf die veränderte Spreizrichtung zurückzuführen.

Gelsenkirchen

Die Untersuchungen auf den drei Flächen der Gelsenkirchener Innenstadt ergaben eine Gesamtverschiebung von 3,8 mm, eine bleibende Verschiebung von 1,3 mm sowie einen Steigungswinkel von $7,9^\circ$ für die Versuchsfläche auf der Aufpflasterung zur Bushaltestelle, was unter dem Mittel aller Versuche liegt. Die Werte für die Fläche an der Bushaltestelle liegen mit 4,9 mm und 2,4 mm über und einem Steigungswinkel von $6,8^\circ$ deutlich unter diesen Zahlen, was sich am ehesten aus der Verkehrsbelastung und zu einem geringeren Anteil auch aus der Spreizrichtung erklären lässt. Die an der dritten Fläche, in der Fußgängerzone, ermittelten Werte schließlich liegen mit 4,1 mm, 1,3 mm sowie $7,1^\circ$ ebenfalls unter dem Mittel aller Messungen.

Gelsenkirchen-Buer

Da die in Gelsenkirchen-Buer untersuchte Fläche in zwei unterschiedlichen Verbänden ausgeführt worden war, wurden entsprechend zwei Versuchsreihen durchge-

führt. Der Bereich mit Läuferverband quer zur Fahrtrichtung ergab dabei eine Gesamtverschiebung von 5,5 mm, eine bleibende Verschiebung von 2,0 mm sowie einen Steigungswinkel von 12,8°. Die entsprechenden Ergebnisse für den im Ellbogenverband ausgeführten Bereich sind 7,5 mm, 2,8 mm und 16,6°. Die Ergebnisse beider Bereiche liegen damit im oberen Bereich aller ermittelten Werte.

Gronau

In Gronau wurden auf den zwei Versuchsflächen insgesamt drei Versuchsreihen durchgeführt, wobei zwei Reihen auf die Fläche an der Bushaltestelle und eine auf die Fußgängerzone entfallen. Die erste Versuchsreihe an der Bushaltestelle, in Fahrtrichtung gemessen, ergab eine Gesamtverschiebung von 3,3 mm, eine bleibende Verschiebung von 0,6 mm sowie einen Steigungswinkel von 6,6°. Für die schräg nach rechts zur Fahrtrichtung gemessene Reihe betragen diese Werte 3,8 mm, 0,7 mm sowie 8,3°. Die schräg gemessenen Werte sind etwas höher als die in Fahrtrichtung. Die Werte liegen insgesamt unter dem arithmetischen Mittel aller Werte. Die in der Fußgängerzone ermittelten Ergebnisse hingegen liegen mit 4,5 mm, 2,3 mm sowie 7,1° ungefähr im Bereich dieser Mittelwerte.

Haltern

Beim Bau der untersuchten Fläche in der Fußgängerzone von Haltern waren drei unterschiedliche Verbände verwendet worden, so dass hier entsprechend drei Versuchsreihen durchgeführt wurden. Wie in Kapitel 4.1.3 bereits erwähnt, wurden hier die Werte für die bleibende Verschiebung noch nicht erfasst. Die Ergebnisse für die im Fischgrätverband und im Läuferverband quer zur Fahrtrichtung verlegten Flächen sind mit 5,3 mm bzw. 5,5 mm für die Gesamtverschiebung und 11,0° bzw. 10,3° für den Steigungswinkel recht ähnlich. Sie liegen damit bei beiden Flächen deutlich über dem arithmetischen Mittel aller Werte. Die entsprechenden Werte für die im Ellbogenverband ausgeführte Fläche hingegen sind mit 2,8 mm sowie 6,0° deutlich niedriger und außerdem im untersten Bereich des gesamten Spektrums. Dies ist ein Hinweis auf einen etwas höheren horizontalen Verschiebungswiderstand des Fischgrätverbandes gegenüber dem Läuferverband quer zur Fahrtrichtung, der sich bei den weiteren Untersuchungen, wenn nicht in dieser Größenordnung, aber doch zumindest von der Tendenz her bestätigt.

Haren

Auf den zwei in Haren untersuchten Verkehrsflächen wurden insgesamt vier Versuchsreihen durchgeführt, von denen drei auf eine Straße mittlerer Verkehrsbeanspruchung entfielen, die, wie sich während der Aufgrabung herausstellte, eine verfestigte Bettung aufwies. Aus diesem Grund fand hier keine Probenahme aus der

Tragschicht statt. Bei den Spreizversuchen wurde sowohl in Fahrtrichtung als auch schräg nach links und rechts zur Fahrtrichtung gemessen. Ermittelt wurden für die Gesamtverschiebung 3,1 mm, 2,8 mm und 2,1 mm, für die bleibende Verschiebung 1,0 mm, 0,3 mm und 0,1 mm sowie für den Steigungswinkel $6,0^\circ$, $6,0^\circ$ und $4,8^\circ$. Diese Werte gehören zu den niedrigsten ermittelten Ergebnissen. Neben einer Fugenbreite nahe dem vorgesehenen Bereich [32] ist dies wohl auch auf die Einwirkung der verfestigten Bettung zurückzuführen.

Bei der anderen untersuchten Fläche wurden Werte von 3,8 mm, 1,4 mm sowie $6,9^\circ$ ermittelt, was unterhalb des arithmetischen Mittelwertes aller Messungen liegt.

Herzlake

Die drei auf der Versuchsfläche in Herzlake durchgeführten Versuchsreihen unterscheiden sich wiederum durch die Richtung der Spreizbelastung: in Fahrtrichtung sowie schräg nach links und rechts zur Fahrtrichtung. Diese Versuche ergaben Gesamtverschiebungen von 3,4 mm, 4,2 mm und 3,7 mm, bleibende Verschiebungen von 0,5 mm, 0,8 mm und 0,2 mm sowie Steigungswinkel von $6,7^\circ$, $9,3^\circ$ und $7,6^\circ$. Die Werte liegen deutlich unterhalb des arithmetischen Mittelwertes aller Messwerte. Bei diesen Messungen bestätigt sich zudem der Trend, dass bei im Läuferverband quer verlegten Flächen die schräg zur Fahrtrichtung und damit zur Verlegerichtung durchgeführten Versuche höhere Werte als die in Fahrtrichtung gemessenen ergeben.

6.3.2.2 Ergebnisse nach Gesamtverschiebung, bleibender Verschiebung sowie nach Steigungswinkel geordnet

In den **Tabelle A20(a)** bis **A20(d)** im Anhang ist eine Auswertung der Spreizversuche sowie eine Reihung der Ergebnisse nach der Höhe der Gesamtverschiebung bei der Laststufe 25 kN, nach der gemessenen bleibenden Verschiebung nach Entlastung sowie nach dem berechneten Steigungswinkel vorgenommen worden. Dabei wird allerdings offensichtlich, dass durch dieses Vorgehen keine eindeutigen Aussagen erzielt werden können. Dies war jedoch auch nicht zu erwarten, da sich die einzelnen Parameter in ihrem Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand überlagern und somit nur durch eine Einzelauswertung hinsichtlich dieser Einflussgrößen die Höhe der Einflüsse deutlich werden kann. Diese Einzelauswertungen werden in den folgenden Kapiteln durchgeführt.

Dennoch können durch eine grundsätzliche Beurteilung der ermittelten Verschiebungen und Steigungswinkel einige Aussagen gemacht werden. So ist der Zusammenhang zwischen Gesamtverschiebung und bleibender Verschiebung zwar vorhanden, aber nicht eindeutig charakterisierbar. Dies erklärt sich aus den zahlreichen unterschiedlichen Parametern, die das Verhalten der Pflasterbefestigung bei der Entlas-

tung beeinflussen, wie z. B. die Bettung und ihre Oberflächenbeschaffenheit oder auch der ausgeführte Verband. Demgegenüber ist zwischen der Gesamtverschiebung und dem Steigungswinkel ein eindeutiger Zusammenhang erkennbar, der sich, mit wenigen Ausnahmen, ungefähr auf die einfache Formel „Steigungswinkel [°] = 2 x Gesamtverschiebung [mm]“ bringen lässt. Die Begründung hierfür ist in der praktisch linearen Zunahme der Verschiebungen bei steigender Belastung und den daraus resultierenden sehr hohen Korrelationskoeffizienten größer 0,96 zu suchen. Abweichungen von der oben dargestellten Formel sind meist durch hohe Anfangsverschiebungen beispielsweise bei unzureichenden Fugenfüllungen zu erklären.

6.3.2.3 Ergebnisse nach Verkehrsbelastung geordnet

Zu der im folgenden dargestellten Einteilung ist vorweg anzumerken, dass bei den meisten Flächen eine zahlenmäßige Einordnung nach unterschiedlichen Verkehrsbeanspruchungen nicht möglich war, da keine konkreten Verkehrsbelastungszahlen gegeben waren. Allerdings wird in der Auswertung deutlich, dass eine höhere Genauigkeit als die der gewählten Einteilung nicht erforderlich ist.

In **Abbildung 6.5** sind die nach der Verkehrsbelastung geordneten Ergebnisse der Gesamtverschiebung und der bleibenden Verschiebung sowie der Steigungswinkel in einem Säulendiagramm dargestellt. Um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu erhöhen, wurden die Werte zu arithmetischen Mittelwerten gleicher bzw. gleichartiger Verkehrsbelastungen zusammengefasst.

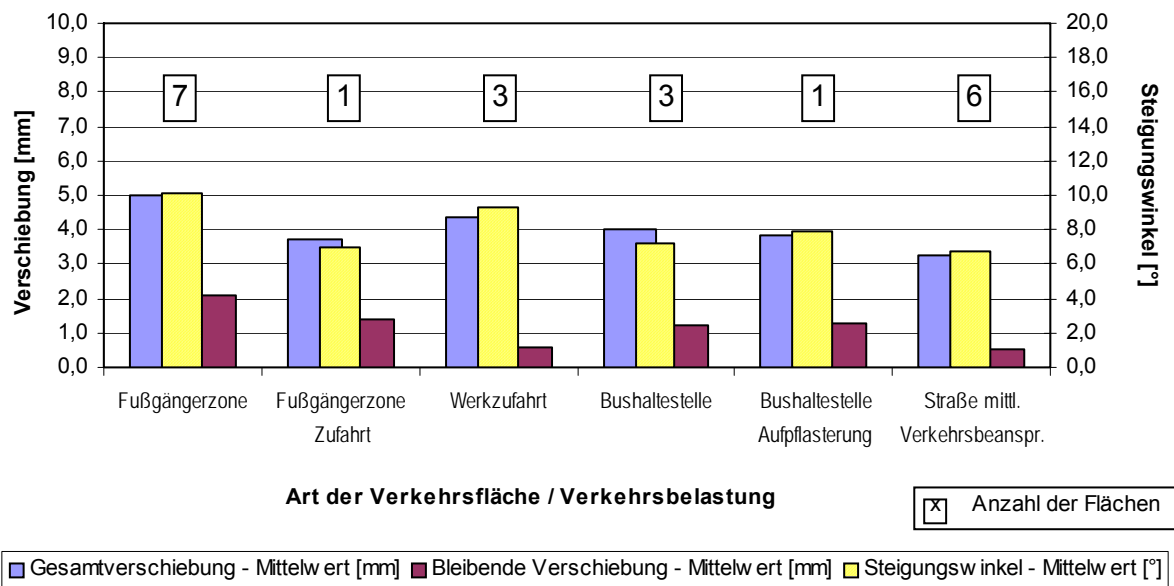


Abbildung 6.5: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Verkehrsbelastung geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Dieses Vorgehen wurde auch bei allen anderen Parametern beibehalten. Besonderheiten bei den zusammengefassten Werten sind jeweils im Text aufgeführt.

In den Werten der Kategorie „Straße mittlerer Verkehrsbeanspruchung“ sind auch drei Versuchsflächen mit verfestigter Bettung enthalten, die zu geringfügig niedrigeren arithmetischen Mittelwerten führen. Auch bei Beachtung dieses Umstandes bleibt der grundsätzliche Zusammenhang eindeutig: Bei steigender Verkehrsbelastung nehmen die horizontalen Verschiebungen ab, was gleichzeitig einen steigenden horizontalen Verschiebungswiderstand bedeutet. Abweichungen davon sind unter anderem durch nicht ganz eindeutige Abgrenzungen bei der Verkehrsbelastung zu erklären. Auch die Überlagerung durch die Einflüsse der anderen Parameter ist zu berücksichtigen. Insgesamt muss jedoch festgehalten werden, dass es sich bei der Verkehrsbelastung um einen Parameter mit sehr großem Einfluss handelt, was sowohl an der Eindeutigkeit des Zusammenhangs, als auch an der absoluten Differenz zwischen den Werten der einzelnen Kategorien der Verkehrsbelastung abgelesen werden kann.

6.3.2.4 Ergebnisse nach Steinformat und Steindicke geordnet

Bezüglich des Steinformates und der Steindicke waren bei der Auswertung drei Abmessungsvarianten zu unterscheiden: Von den 21 untersuchten Flächen mit Klinkerpflaster waren vier Flächen mit Steinen der Abmessungen 200 x 100 x 62 mm, neun Flächen mit 240 x 118 x 62 mm großen Steinen und acht Flächen mit Steinen der Abmessungen 200 x 100 x 71 mm hergestellt worden. Die Verteilung der Flächen auf die unterschiedlichen Steinformate und Steindicken ist damit recht gleichmäßig, so dass kein Steinformat und keine Steindicke die Ergebnisse dominieren kann.

Die ermittelten Ergebnisse sind nach den Steinabmessungen geordnet und zu arithmetischen Mittelwerten zusammengefasst in **Abbildung 6.6** dargestellt.

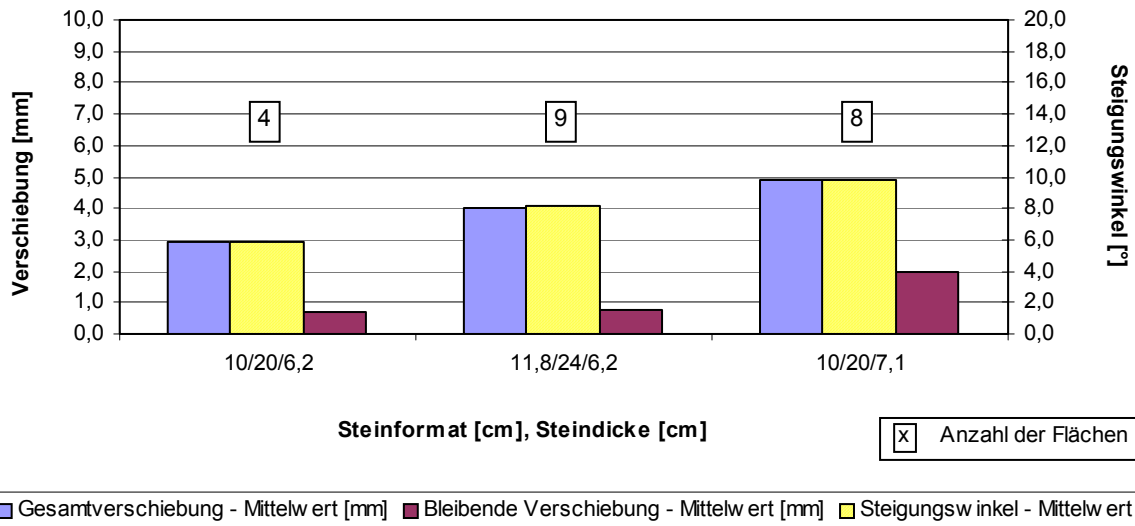


Abbildung 6.6: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Steinformat und Steindicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Bei der Auswertung der Mittelwerte ist kein nachvollziehbarer Zusammenhang zu erkennen. Zum einen steigt bei einer größeren Steindicke auch die Verschiebung an, zum anderen erreichen die Steine mit dem kleineren Format bessere Werte als die größeren Steine der gleichen Dicke, obwohl bei den größeren Steinen auch die mit tragende Fläche größer sein müsste, was für einen höheren horizontalen Verschiebungswiderstand spricht. Insgesamt wird somit deutlich, dass der Einfluss des Steinformates und der Steindicke von anderen Einflussgrößen überlagert wird. Es handelt sich damit um zwei Parameter mit eher untergeordnetem Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand.

6.3.2.5 Ergebnisse nach Fugenbreite geordnet

Die Darstellung der Messergebnisse nach den Fugenbreiten geordnet ist, zusammengefasst zu arithmetischen Mittelwerten, in **Abbildung 6.7** wiedergegeben.

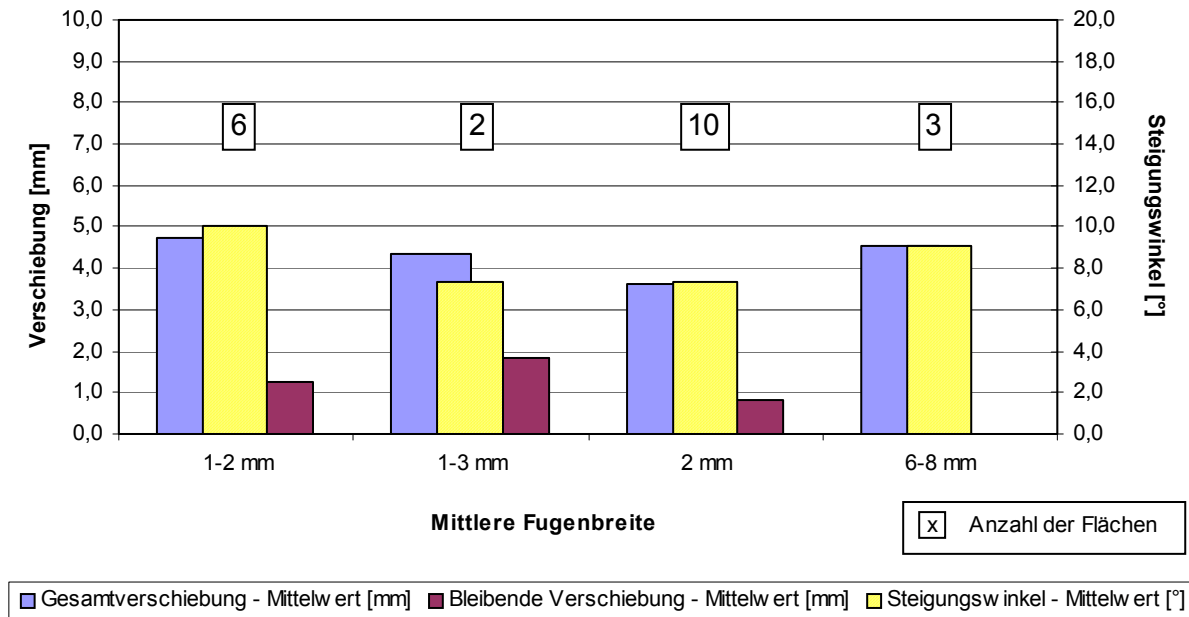


Abbildung 6.7: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Die bereits angesprochenen Flächen mit verfestigter Bettung sind hier in der Kategorie „Mittlere Fugenbreite 2 mm“ enthalten, wobei es sich in diesem Fall um alle sechs Versuchsflächen dieser Art handelt. Gegenüber dem dargestellten Mittelwert von 3,6 mm aus insgesamt zehn Flächen haben die restlichen vier jedoch immer noch einen Mittelwert von 3,8 mm, was den prinzipiellen Verlauf nicht verändert. Aus diesem Zusammenhang kann vorab gefolgert werden, dass der Einfluss der Fugenbreite im Vergleich zum Einfluss einer verfestigten Bettung überwiegt.

In der **Abbildung 6.7** fällt auf, dass die Verschiebungen bei kleinen Fugenbreiten am höchsten sind. Im Gegensatz zu einer Vergrößerung der Verschiebungen bei größeren Fugenbreiten ist dies nicht unmittelbar einleuchtend. Eine Erklärung hierfür ist, dass eine ausreichende Fugenbreite auch für eine gute Verzahnung mit der Bettung wichtig ist, wodurch der horizontale Verschiebungswiderstand erhöht werden kann. Außerdem überträgt eine gut verdichtete Fuge gleichmäßig die aufgebrachte Belastung in horizontaler Richtung. Damit wird eine vollflächige Kraftübertragung erreicht und somit eine maximale mit tragende Wirkung durch die benachbarten Steine realisiert. Hinzu kommt ein Zusammenwirken mit dem Einfluss durch die Verkehrsbelastung: Die Steine werden in die Bettung „hineingedrückt“, was sicherlich die Verzahnung mit der Bettung verbessert.

Insgesamt ist der dargestellte Zusammenhang eindeutig, wenn auch mittlere, im Regelwerk vorgesehene Fugenbreiten von 3 bis 5 mm nicht vorgefunden wurden, so dass hierzu keine Messergebnisse für die Verschiebungen vorliegen: Sowohl bei einer deutlich zu geringen Fugenbreite von 1 bis 2 mm, als auch bei einer Fugenbreite,

die deutlich zu groß ist (hier: 6 bis 8 mm), vergrößert sich die horizontale Verschiebung, was gleichzeitig eine Verringerung des horizontalen Verschiebungswiderstandes bedeutet. In Ermangelung von Fugenbreiten zwischen 2 und 6 mm nehmen in diesem Vergleich die Verschiebungen zu der Kategorie „Mittlere Fugenbreite 2 mm“, wo die geringsten horizontalen Verschiebungen ermittelt worden sind, beständig ab. Bei den vorgesehenen Fugenbreiten von 3 bis 5 mm wären somit die geringsten horizontalen Verschiebungen verbunden mit dem höchsten horizontalen Verschiebungswiderstand zu erwarten. Insgesamt hat die Fugenbreite einen starken Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand.

6.3.2.6 Ergebnisse nach Fugenfüllungsgrad geordnet

Die Darstellung der Messergebnisse nach dem Fugenfüllungsgrad geordnet erfolgt in ähnlicher Art wie bei den anderen Parametern in der **Abbildung 6.8**.

Bei den dargestellten arithmetischen Mittelwerten wird die Kategorie „Fugenfüllungsgrad 95 %“ mit sechs von sieben Werten aus Flächen mit verfestigter Bettung gebildet. Bei einer Nicht-Berücksichtigung dieser Ergebnisse bei der Mittelwertbildung wäre entsprechend der 95 %-Wert mit 3,7 mm zu 3,5 mm bei der maximalen Verschiebung geringfügig höher und zudem nur noch aus einer Versuchsfläche gebildet. Da alle hier betrachteten Flächen mit einem Fugenfüllungsgrad von 95 % sowohl eine etwas günstigere Fugenbreite von 2 mm als auch etwas stärkere Verkehrsbelastungen (Zufahrt Fußgängerzone, Werkzufahrt, Straße mittlerer Verkehrsbeanspruchung) aufweisen, wird durch diese nur geringe Erhöhung auch hier der stärkere Einfluss vor allem der Fugenbreite, aber auch der Verkehrsbelastung auf den horizontalen Verschiebungswiderstand deutlich.

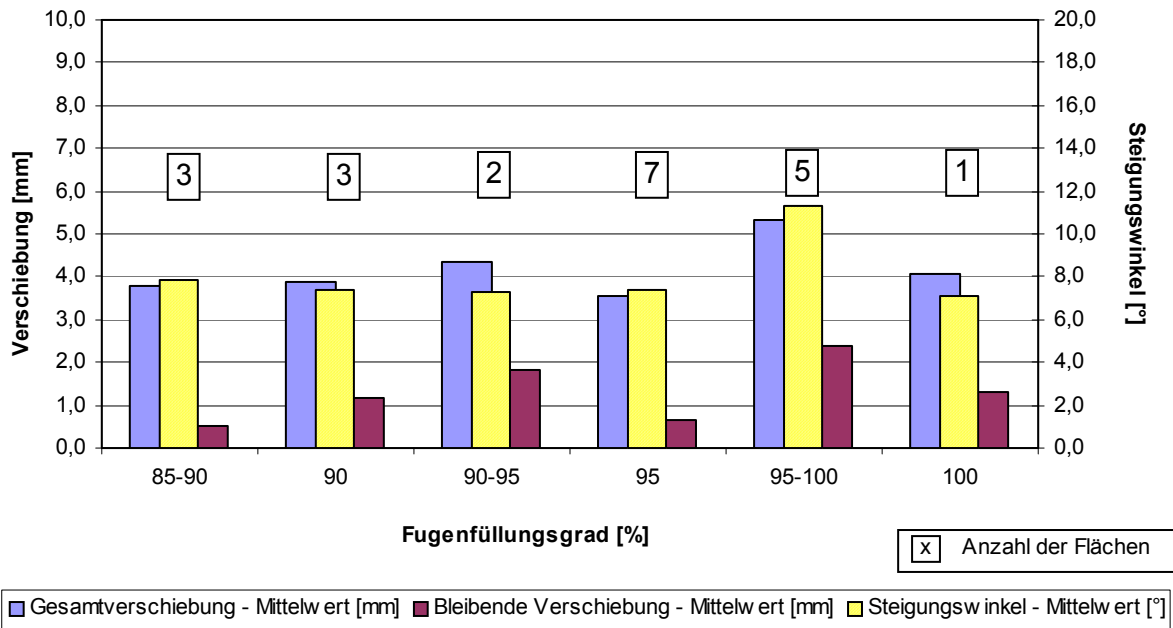


Abbildung 6.8: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Insgesamt kann kein eindeutiger Einfluss des Fugenfüllungsgrades beobachtet werden. Dies ist jedoch weniger auf den grundsätzlichen Einfluss des Fugenfüllungsgrades als vielmehr auf den betrachteten Bereich der untersuchten Verkehrsflächen zurückzuführen. Wie sowohl andere Spreizversuche als auch Praxiserfahrungen zeigen, ist festzustellen, dass die horizontalen Verschiebungen bei einer Verringerung der Fugenfüllung größer werden. Da bei den hier zugrunde liegenden Untersuchungen jedoch nur Fugenfüllungsgrade im gut verfüllten Bereich (85 bis 100 %) vorlagen, konnte dieses Verhalten nicht beobachtet werden. Zu erwarten ist ein deutlicherer Einfluss des Fugenfüllungsgrades in einem Bereich ab ca. 70 bis 60 %.

6.3.2.7 Ergebnisse nach Alter der Fläche zum Messzeitpunkt geordnet

Die Darstellung der Messergebnisse nach dem Alter der Fläche zum Messzeitpunkt geordnet erfolgt in der **Abbildung 6.9**.

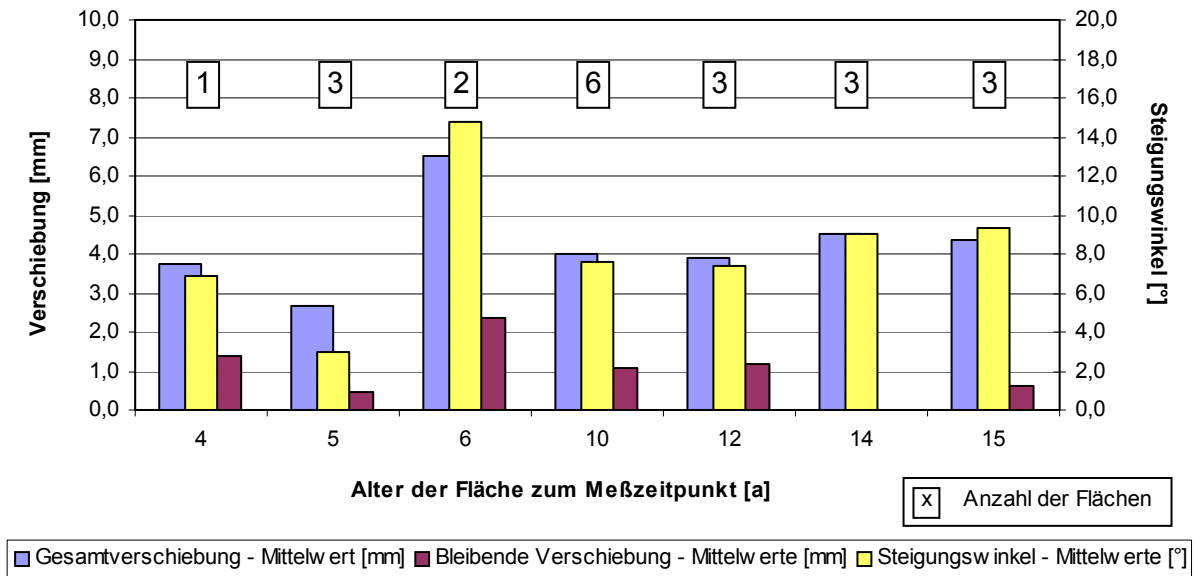


Abbildung 6.9: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Alter geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Beim Alter ist zu berücksichtigen, dass nicht von einem direkten Einfluss auszugehen ist. Das Alter hat vielmehr eine indirekte Bedeutung über den Zusammenhang mit der Fugenfüllung und vor allem der Verkehrsbelastung.

Die Darstellung zeigt, dass die Flächen mit einem Alter von vier bis fünf Jahren geringe Verschiebungen zeigen und die mit sechs Jahren sehr hohe Werte, während noch ältere Flächen wiederum niedrigere Ergebnisse aufweisen. Für den Einfluss des Alters war jedoch eher eine gewisse Verfestigung der Pflasterdecke mit der Zeit verbunden mit geringeren Verschiebungen zu erwarten. Da keine neuen bzw. sehr jungen Flächen gemessen wurden, ist davon auszugehen, dass alle hier untersuchten Flächen bereits in diesem Sinne „verfestigt“ sind.

Insgesamt ist der Einfluss des Alters dann eher als geringer anzusehen, wenn die Flächen etwa mindestens vier Jahre unter Verkehr liegen.

6.3.2.8 Ergebnisse nach Verband geordnet

Die nach dem Verband geordneten und zu arithmetischen Mittelwerten zusammengefassten Messergebnisse sind in der **Abbildung 6.10** dargestellt.

Untersucht wurden Flächen im Läuferverband längs sowie quer zur Fahrtrichtung verlegt, im Fischgrätverband mit Bischofsmützen oder geschnittenen Steinen ausgeführt sowie Flächen mit im Ellbogenverband verlegten Steinen.

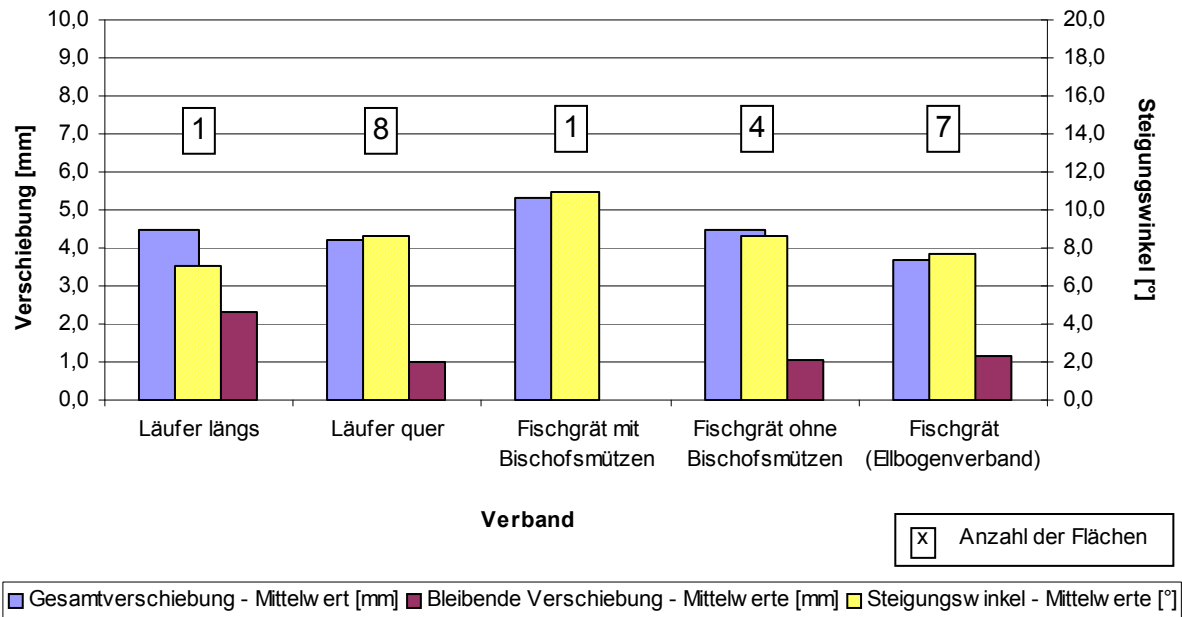


Abbildung 6.10: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Verband geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Von den in der Kategorie „Fischgrät ohne Bischofsmützen“ aufgeführten vier Flächen besitzen drei eine verfestigte Bettung. Die vierte liegt mit einer maximalen Verschiebung von 4,9 mm etwas über dem arithmetischen Mittelwert.

In der Kategorie „Ellbogenverband“ sind von den aufgeführten sieben Flächen drei mit verfestigter Bettung. Der Mittelwert der übrigen vier Versuchsflächen ergäbe mit einer Gesamtverschiebung von 4,5 mm einen höheren Wert als der von den verfestigten Flächen.

Aus den Darstellungen ist zunächst ersichtlich, dass der Verband einen eindeutigen Einfluss hat. Die Zahlen für den Läuferverband längs zur Fahrtrichtung verlegt sind nicht repräsentativ, denn einerseits handelt es sich nur um eine einzelne Fläche, und andererseits ist aus anderen Spreizversuchen bekannt, dass sich bei diesem Verband teilweise erhebliche Verschiebungen bis in die Größenordnung von mehreren Zentimetern einstellen können.

Insgesamt zeigen sich recht deutliche Unterschiede zwischen den Verbänden. Flächen mit Läuferverband quer zur Fahrtrichtung haben einen guten horizontalen Verschiebungswiderstand, solche mit Fischgrätverband mit Bischofsmützen einen etwas schlechteren und ohne Bischofsmützen wieder einen etwas besseren. Dies ist jedoch weniger auf den Einfluss des Verbandes und sicherlich nicht auf den der Bischofsmützen zurückzuführen, sondern vielmehr auf andere Einflussgrößen. So stammen die Werte für die Kategorie „Fischgrät mit Bischofsmützen“ nur von einer einzelnen Fläche, die auch noch große Fugenbreiten (6 bis 8 mm) und eine eher geringere

Verkehrsbelastung (Fußgängerzone) aufweist. Die im Ellbogenverband ausgeführten Flächen zeigen die geringsten horizontalen Verschiebungen.

Somit wird deutlich, dass sich sowohl mit Bauweisen in Läuferverband quer als auch mit Fischgrät- bzw. Ellbogenverband Flächen mit hohem horizontalem Verschiebungswiderstand herstellen lassen.

6.3.2.9 Ergebnisse nach Fugenmaterial geordnet

Der Einfluss des Fugenmaterials ist anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht zu beurteilen, da bei allen Versuchen einheitlich als Fugenmaterial Natursande der Körnung 0/2 gefunden wurde und somit kein Vergleich durchgeführt werden konnte. Zu erwarten wäre jedoch tendenziell eine Verringerung der Verschiebungen bei einem größeren Größtkorn.

6.3.2.10 Ergebnisse nach Bettungsmaterial geordnet

Die nach dem Bettungsmaterial geordneten Messergebnisse sind in der **Abbildung 6.11** wiedergegeben.

Abbil-

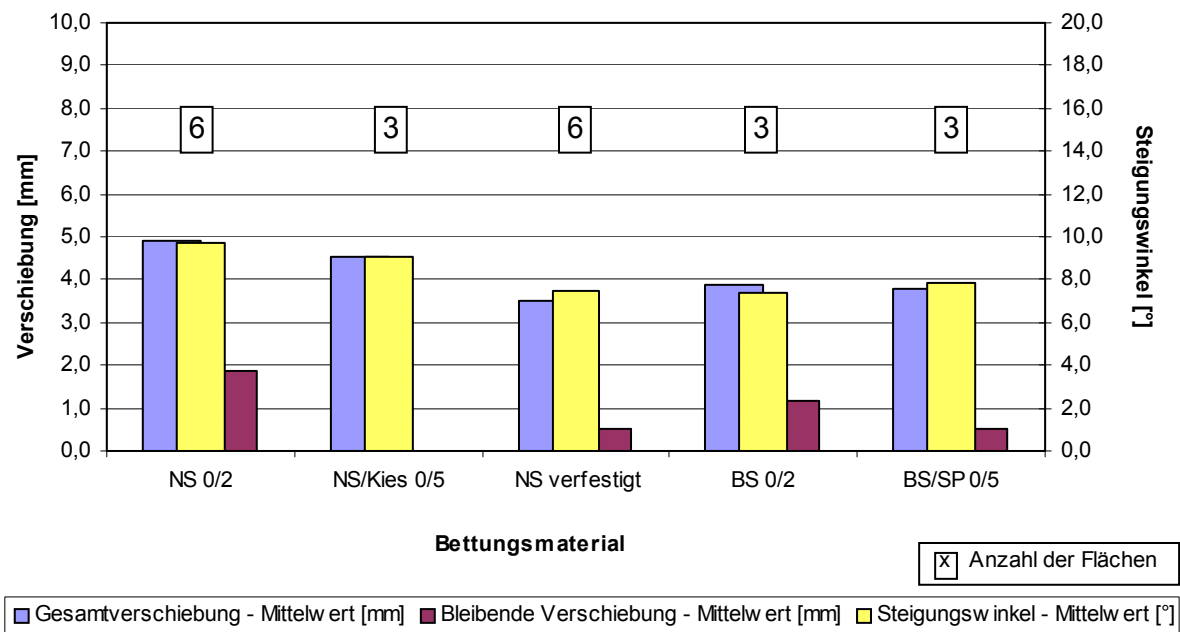


Abbildung 6.11: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Bettungsmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Bei den untersuchten Flächen waren als Bettungsmaterialien im wesentlichen Natursande und Brechsande, teilweise zusammen mit Kiesen und Splitten, in den Körnungen 0/2 und 0/5 zum Einsatz gekommen. Außerdem sind sechs Flächen mit verfestigter Bettung untersucht worden.

Die Darstellung zeigt eindeutig, dass die Flächen mit einer Bettung aus Brechsand gegenüber den Flächen mit Natursand geringere Verschiebungen und damit höhere horizontale Verschiebungswiderstände aufweisen. Eine Erklärung dafür ist eine stärkere Verzahnung durch die bruchflächigen Körner beim Brechsand im Vergleich zu den runden beim Natursand.

Die Flächen mit einer Bettung aus verfestigtem Natursand weisen noch etwas geringere Werte als die mit Brechsand hergestellten auf. Dies ist jedoch weniger auf die verwendeten Mineralstoffe als auf die Verfestigung zurückzuführen.

Eine Aussage über das Größtkorn zu treffen, ist schwierig, da die Spreizung gering ist. Tendenziell haben jedoch die Flächen mit den Bettungen mit einem Größtkorn von 5 mm geringere Verschiebungen als die mit einem Größtkorn von 2 mm.

Insgesamt ist der Einfluss der Bettung bzw. des Bettungsmaterials deutlich und nachvollziehbar.

6.3.2.11 Ergebnisse nach Tragschichtmaterial geordnet

Die nach dem Tragschichtmaterial geordneten Messergebnisse sind in der **Abbildung 6.12** dargestellt.

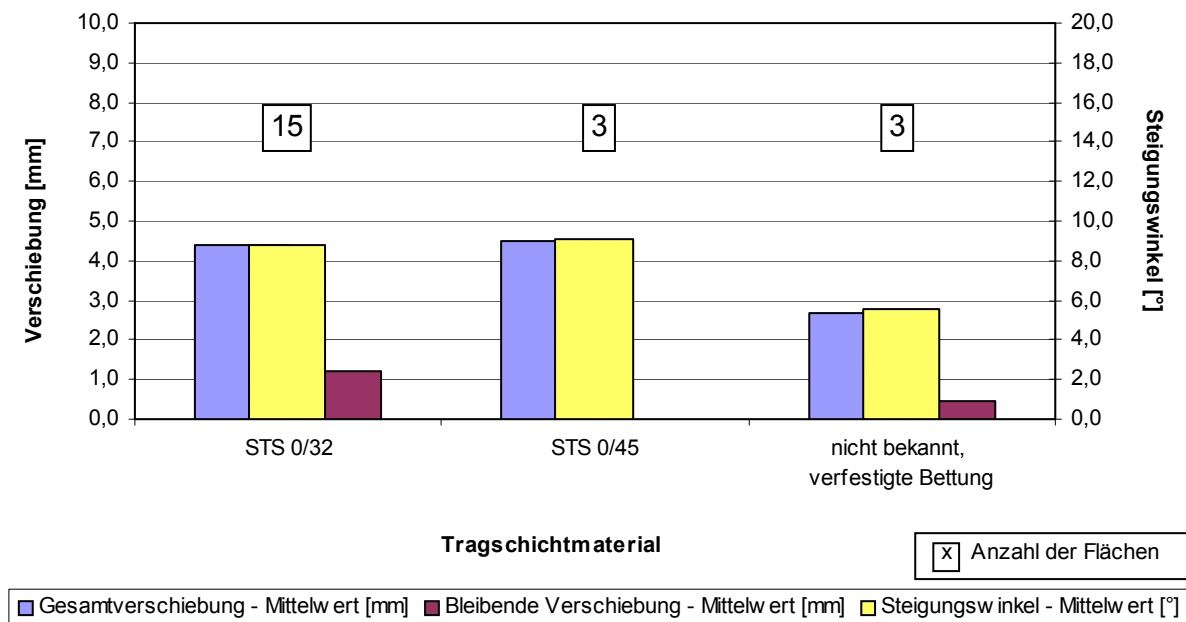


Abbildung 6.15: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster, nach Tragschichtmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Die Varianten bezüglich der Tragschichtart waren gering. Im Wesentlichen sind Schottertragschichten (STS) der Körnung 0/32 zum Einsatz gekommen. Ein Unterschied zu den drei Flächen mit einer STS 0/45 ist nicht zu erkennen. Die dritte Kate-

gorie bezeichnet eine Tragschicht unter einer verfestigten Bettung, von der die Zusammensetzung nicht bekannt ist. Die Zahlen sind somit nicht aussagekräftig und nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Dennoch wird deutlich, dass die Tragschicht auf den horizontalen Verschiebungswiderstand praktisch keinen Einfluss hat, sofern es sich um eine Schottertragschicht nach den ZTV T-StB [28] handelt.

6.3.2.12 Schlussfolgerungen zum horizontalen Verschiebungswiderstand bei Klinkerpflasterdecken

Die Bedeutung des Einflusses der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der untersuchten Klinkerpflasterdecken ist in **Tabelle 6.3** qualitativ wiedergegeben. Dabei wird in fünf Abstufungen von starkem bis sehr schwachem Einfluss unterschieden. Die Parameter Steinformat und Steindicke werden zur Erhöhung der Übersichtlichkeit getrennt dargestellt.

Tabelle 6.3: Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der untersuchten Klinkerpflasterdecken

| Parameter | Einfluss |
|-------------------|----------|
| Fugenbreite | ++ |
| Verkehrsbelastung | ++ |
| Bettungsmaterial | + |
| Verband | + |
| Steinformat | O |
| Steindicke | O |
| Fugenfüllung | - |
| Alter | - |
| Fugenmaterial* | - |
| Tragschicht | -- |

++ = stark + = weniger stark O = mittel - = schwach -- = sehr schwach

*Einfluss Fugenmaterial eher geringer, insgesamt jedoch unbestimmt

6.3.3 Betonsteinpflaster

Auf eine Wiedergabe der Ergebnisse der Spreizversuche nach der Lage der Verkehrsfläche, der Gesamtverschiebung, der bleibenden Verschiebung sowie dem Steigungswinkel geordnet wird verzichtet, da die Auswertung ähnliche Ergebnisse wie bei den Klinkerpflasterflächen ergab.

6.3.3.1 Ergebnisse nach Verkehrsbelastung geordnet

Die nach der Verkehrsbelastung geordneten Ergebnisse der Spreizversuche sind, zu arithmetischen Mittelwerten gleicher bzw. gleichartiger Verkehrsbelastungen zusammengefasst, in **Abbildung 6.13** für die untersuchten Rechtecksteine und in **Abbildung 6.14** für die Verbundsteine dargestellt.

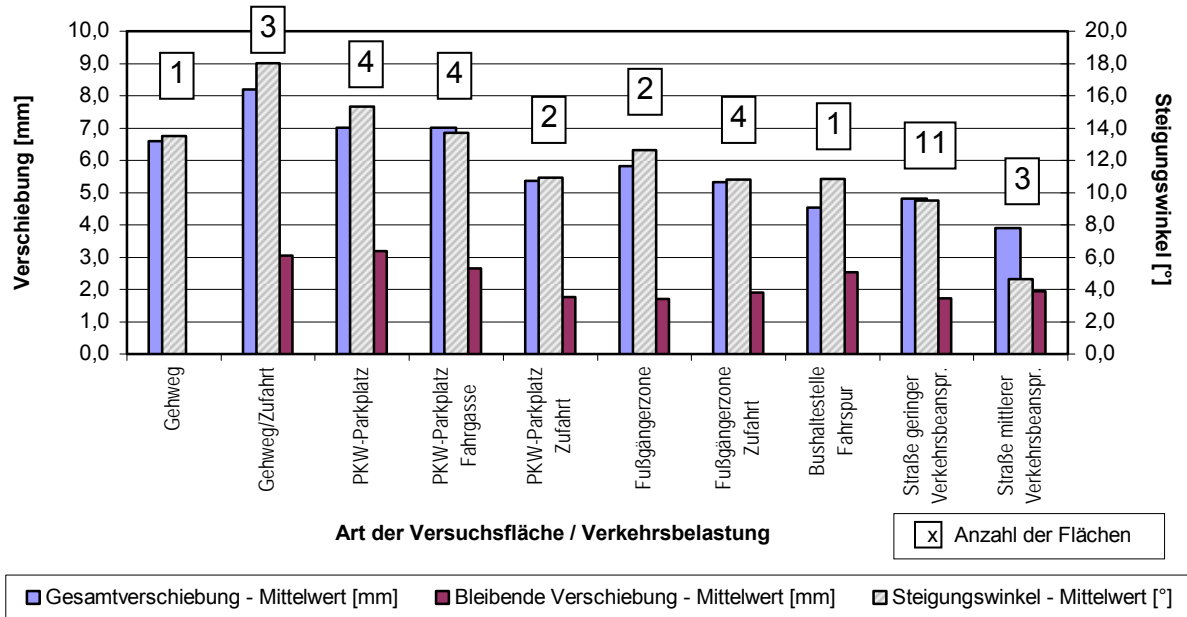


Abbildung 6.13: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Verkehrsbelastung geordnet (arithmetische Mittelwerte)

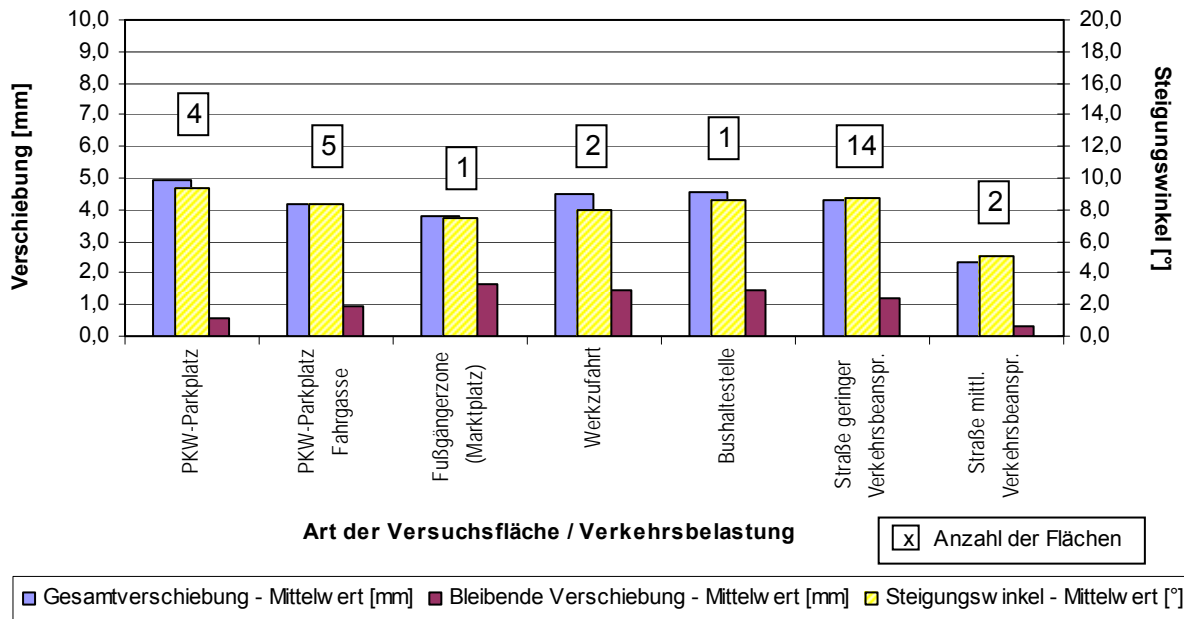


Abbildung 6.14: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Verkehrsbelastung geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Sowohl bei den Flächen mit Rechtecksteinen als auch bei den Verbundsteinpflasterflächen ist insgesamt ein vergleichbares Verhalten zu erkennen: Bei höherer Verkehrsbelastung wurden geringere horizontale Verschiebungen und Steigungswinkel ermittelt. Hiervon abweichende Werte bei der Kategorie Gehweg bei den Rechtecksteinen und bei der Kategorie Bushaltestelle und Fußgängerzone (Marktplatz) bei den Verbundsteinen beziehen sich jeweils nur auf eine einzelne Fläche und sind damit nicht repräsentativ. Weitere, eher geringe Abweichungen sind auf den Einfluss der anderen Parameter zurückzuführen. Der grundsätzliche Zusammenhang ist jedoch eindeutig und bestätigt die Untersuchungsergebnisse der Klinkerpflasterflächen, dass bei steigender Verkehrsbelastung auch der horizontale Verschiebungswiderstand anwächst. Dabei zählt die Verkehrsbelastung zu den wichtigeren Parametern.

6.2.3.2 Ergebnisse nach Steinform geordnet

In **Abbildung 6.15** sind die nach der Steinform geordneten Ergebnisse dargestellt.

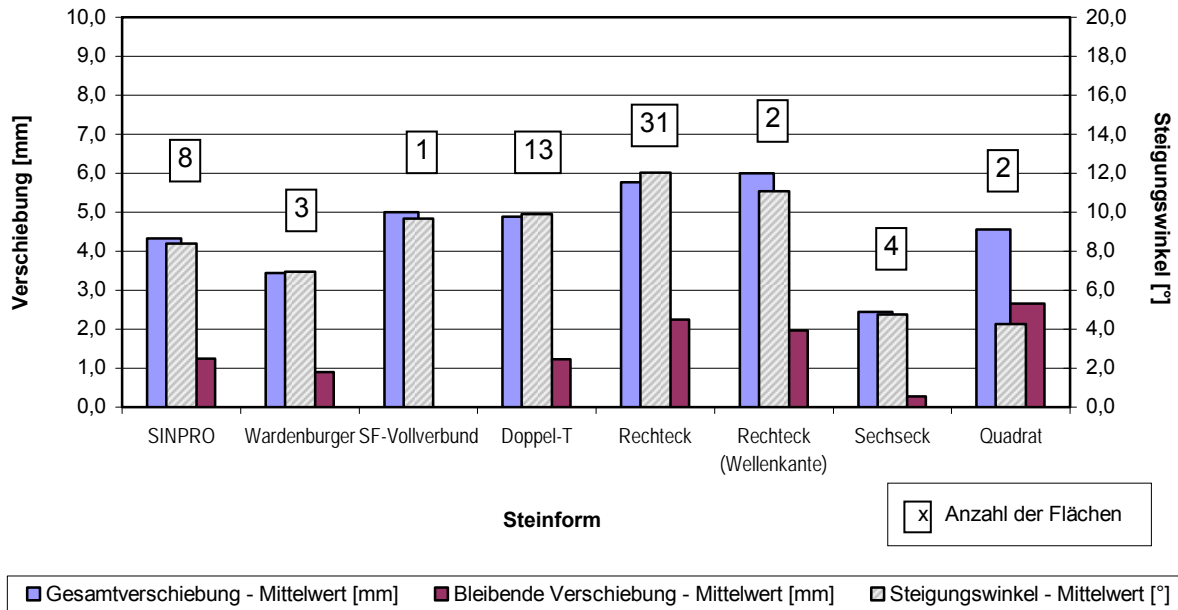


Abbildung 6.15: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Steinform geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Bei den sehr niedrigen Werten zu den Steinformen Wardenburger und Sechseck ist zu beachten, dass sich diese jeweils nur auf zwei bzw. drei untersuchte Flächen beziehen und somit nicht überbewertet werden sollten. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für die Steinformen Rechteck (Wellenkante) und SF-Vollverbund, die sich ebenfalls nur auf zwei Flächen bzw. eine Fläche beziehen. Ebenso ist dies bei der Betrachtung der Ergebnisse für die Steinform Quadrat zu beachten. Der Unterschied im Verhältnis zwischen der Gesamtverschiebung und dem Steigungswinkel entsteht durch eine große Anfangsverschiebung, die in der Berechnung der Regressionsgeraden nicht berücksichtigt wird (s. Kapitel 4.1.3) und so zu kleineren Steigungswinkel führt. Die große Anfangsverschiebung konnte bei fast allen Einzelversuchen auf den Flächen mit quadratischen Pflastersteinen festgestellt werden.

Der prinzipielle Zusammenhang scheint jedoch ohne und mit diesen Werten eindeutig: Bei den Flächen mit Rechtecksteinen sind die höchsten horizontalen Verschiebungen und Steigungswinkel zu finden, während die Flächen mit Verbundsteinen geringere Werte aufweisen. Zu beachten ist allerdings auch, dass einzelne Flächen mit besonders hohen Verschiebungen, die aus unterschiedlichen anderen Einflüssen resultieren, in dieser Zusammenstellung beinahe ausschließlich in der Kategorie „Rechtecksteine“ zu finden sind, die sich insgesamt auf 31 Flächen bezieht. Bei Nicht-Berücksichtigung einer Fläche, die im Läuferverband längs verlegt wurde, einer neu verlegten Fläche sowie einer weiteren, bei der der Fugenfüllungsgrad nur 50 % betrug, ergeben sich arithmetische Mittelwerte für die Gesamtverschiebung von 5,5 mm und für den Steigungswinkel von 11,5°, die dann etwas näher an den für

Doppel-T-Steine ermittelten Ergebnissen liegen. Die Quadratsteine weisen sogar einen mittleren Gesamtverschiebungswert auf, der mit 4,6 mm noch darunter liegt und zeigen mit $4,3^\circ$ den kleinsten Steigungswinkel aller Steinformen.

Noch interessanter ist jedoch ein Quervergleich mit den Ergebnissen der Klinkerpflasterflächen, da es sich dabei ausschließlich um Rechtecksteine handelt. Mit einem arithmetischen Mittelwert von 4,2 mm für die Gesamtverschiebung sowie von $8,4^\circ$ für den Steigungswinkel reihen sich die Werte für die Klinkerpflasterflächen zwischen den Ergebnissen der Verbundsteine ein.

Unter den Verbundsteinen selbst schneiden, nach den Flächen mit den Sechsecksteinen sowie mit den Wardenburger-Steinen, die SINPRO-Steine am besten ab, gefolgt von den SF-Vollverbundsteinen sowie den Doppel-T-Steinen. Von den Flächen mit den Sechsecksteinen abgesehen lassen sich die Ergebnisse in die drei Kategorien von Shackel [35] einteilen, nach denen Verbundsteine bessere Ergebnisse als Rechtecksteine und unter den Verbundsteinen die mit Vier-Seiten-Verbund bessere Ergebnisse als die mit Zwei-Seiten-Verbund liefern. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Einteilung von Shackel eher auf vertikale Verformungen denn auf horizontale Verschiebungen bezieht. Andererseits wurden jedoch auch bei Untersuchungen zu horizontalen Verschiebungen geringere Werte bei unterschiedlich geformten Verbundsteinen gegenüber Rechtecksteinen ermittelt. Festzustellen bleibt insgesamt, dass die Steinform ein bedeutender Parameter für die Höhe des horizontalen Verschiebungswiderstandes ist, gleichzeitig jedoch der Unterschied zwischen Rechtecksteinen und Verbundsteinen geringer ausfällt und weniger eindeutig ist als erwartet.

6.3.3.3 Ergebnisse nach Steinformat geordnet

In **Abbildung 6.16** sind die Ergebnisse geordnet nach dem Steinformat, also den Steinabmessungen, dargestellt, wobei auch die jeweilige Steinform mit aufgeführt wurde. In der linken Hälfte des Diagramms werden dabei die Flächen mit Rechtecksteinen, in der rechten die mit Verbundsteinen dargestellt.

Zu beachten ist, dass sich die Kategorien Rechteck 11,5/17,5, Rechteck 15/22, Rechteck (Wellenkante) 15/22, Quadrat 15/15 und Quadrat 19/19 sowie SF-Vollverbund 10/19, Sechseck 18/18 und Sechseck 22/22 jeweils nur auf eine Fläche bzw. auf zwei Flächen beziehen, wodurch die Ergebnisse wiederum weniger repräsentativ sind.

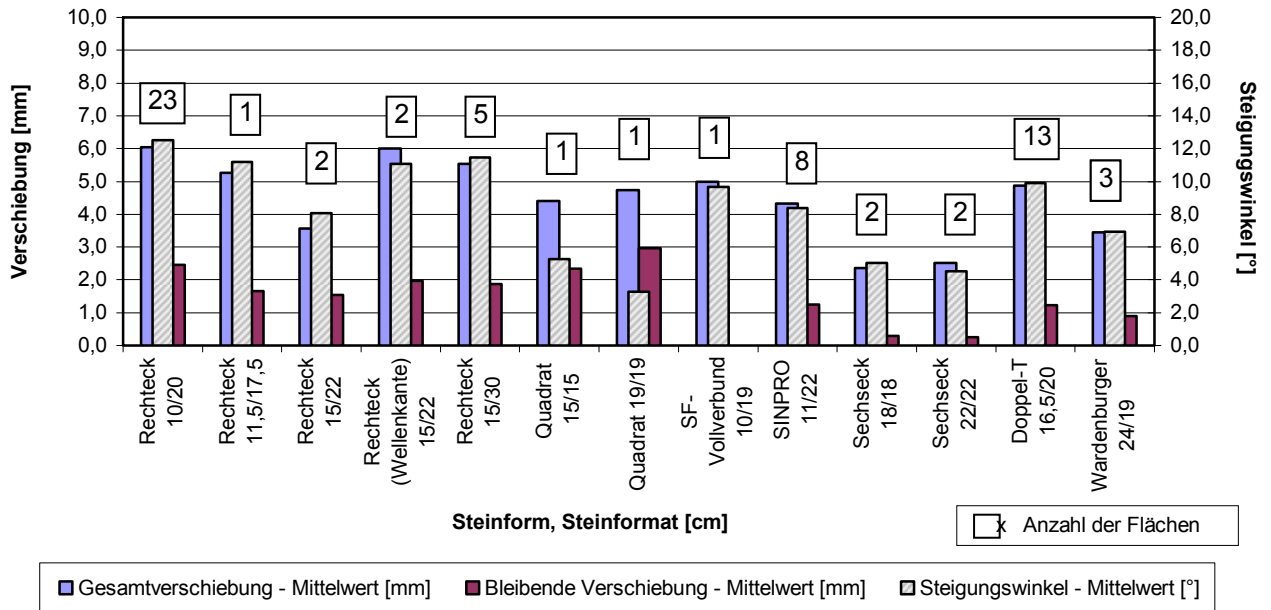


Abbildung 6.16: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Steinformat geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Ein eindeutiger Einfluss des Steinformates kann hier, speziell bei den Verbundsteinen, nicht abgelesen werden. Vielmehr wird dieser Einfluss offenbar von der Steinform sowie auch von anderen Einflüssen überlagert. Tendenziell neigen größere Steine jedoch zu geringeren Verschiebungen, wie der Vergleich der unterschiedlich großen Rechtecksteine der Kategorien 10/20 und 15/30 zeigt. Für den Steigungswinkel zeigt sich eine ähnliche Tendenz, wie ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Formaten der Quadratsteine und der Sechsecksteine zeigt. Die Gesamtverschiebung der Quadratsteine ist durch eine hohe Anfangsverschiebung bedingt. Zu beachten ist hierbei jedoch die geringe Datenmenge, auf denen die Ergebnisse in diesen beiden Kategorien basieren.

Die Unterschiede sind insgesamt gering und nicht eindeutig, was durch einen zusätzlichen Quervergleich mit den Ergebnissen der Klinkerpflastersteine deutlich wird. Hier weist die Kategorie Rechteck 11,8/24 (siehe **Abbildung 6.6**) mit einer Gesamtverschiebung von 4,0 mm sowie einem Steigungswinkel von 8,2° geringere Werte auf, als die Kategorie der größeren Rechtecksteine 15/30 in **Abbildung 6.16**. Alles in allem ist der Einfluss des Steinformates bzw. der Steingröße somit als gering anzusehen. Dies deckt sich auch mit Erkenntnissen aus der Literatur [36].

6.3.3.4 Ergebnisse nach Steindicke geordnet

In **Abbildung 6.17** sind die nach der Steindicke geordneten Ergebnisse der Spreizversuche an Flächen mit Rechtecksteinen sowie mit Verbundsteinen aus Betonsteinpflaster dargestellt.

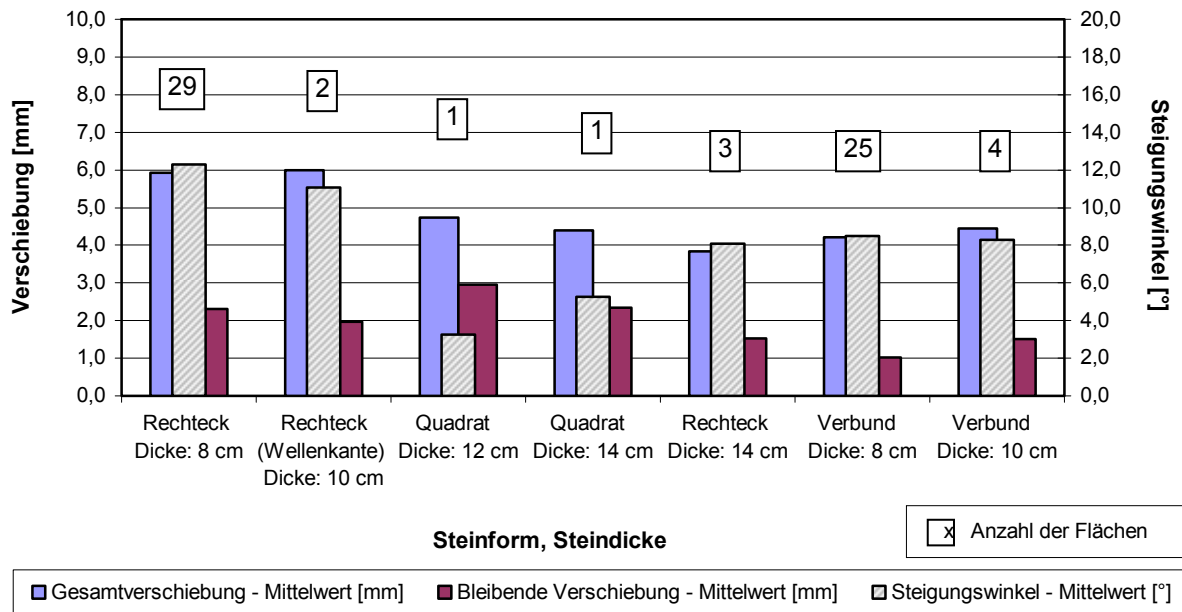


Abbildung 6.17: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Steindicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Der Zusammenhang macht auf den ersten Blick einen eindeutigen Eindruck: Bei einer Vergrößerung der Steindicke erhöht sich auch der horizontale Verschiebungswiderstand, wenn sich auch die Kategorien der 10 cm dicken Steine nur auf zwei (Rechtecksteine) bzw. drei (Verbundsteine) Flächen beziehen. Die Gesamtverschiebungen der Quadratsteine bestätigen diese Tendenz, die zugehörigen Steigungswinkel allerdings nicht. Neben der geringen Datenmenge sind Einwirkungen anderer Einflussfaktoren, vor allem das Steinformat und der Verband, hier als Ursache zu sehen.

Werden jedoch auch hier die Ergebnisse der Klinkerpflasterflächen einbezogen, so ergeben sich für eine Steindicke von 6,2 cm (Rechtecksteine, 13 Flächen) Werte, die mit 3,7 mm für die Gesamtverschiebung und mit 7,5° für den Steigungswinkel noch unterhalb des Bereiches der Verbundsteine liegen.

Festzuhalten bleibt somit, dass, zumindest im Vergleich mit Steindicken von 10 cm, tendenziell geringere Verschiebungen bei größerer Steindicke zu erwarten sind. Auf der anderen Seite wurden mit den Werten der Kategorie Verbundsteine 10 cm vergleichbar geringe Verschiebungen und Steigungswinkel und damit die höchsten horizontalen Verschiebungswiderstände wie bei der kleinsten gemessenen Steindicke

von 6,2 cm ermittelt. Somit ist insgesamt festzustellen, dass ein Einfluss der Steindicke in der Art, dass eine größere Dicke geringere Verschiebungen bewirkt, tendenziell zu erwarten ist, die Steindicke an sich jedoch zu den weniger wichtigen Parametern zu zählen ist.

6.3.3.5 Ergebnisse nach Fugenbreite geordnet

Die nach den Fugenbreiten geordneten Ergebnisse sind für die Rechtecksteine in **Abbildung 6.18** und für die Verbundsteine in **Abbildung 6.19** dargestellt.

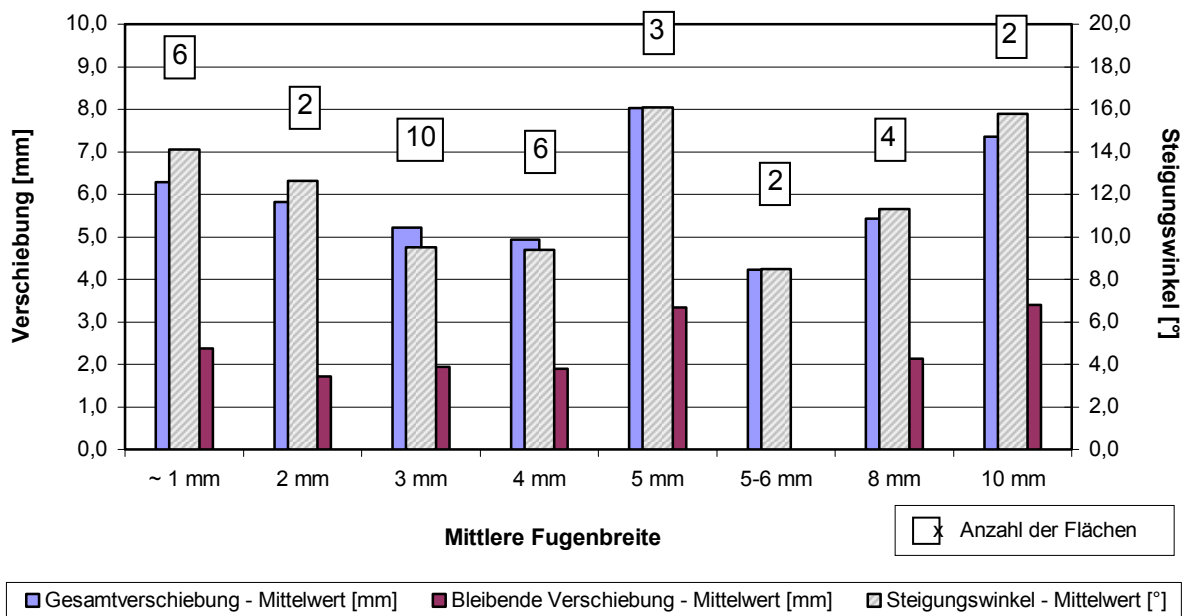


Abbildung 6.18: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte)

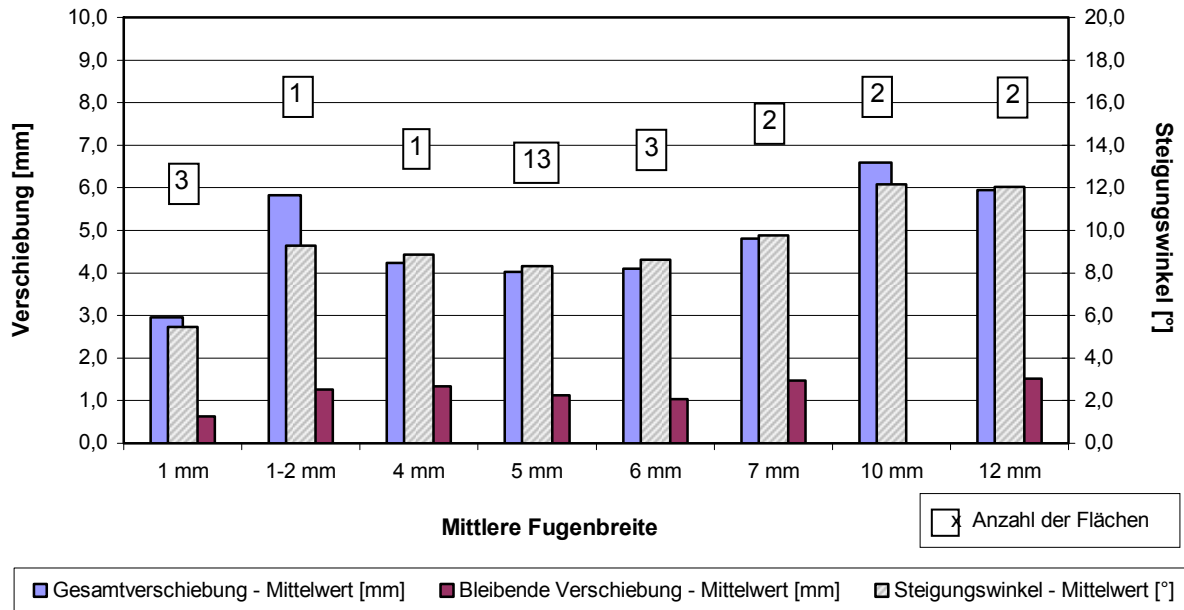


Abbildung 6.19: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Eindeutig und auch einleuchtend ist bei den Ergebnissen zunächst die, bei Rechtecksteinen und Verbundsteinen gleichartige, Zunahme der Horizontalverschiebungen und Steigungswinkel bei größerer Fugenbreite, beginnend bei ca. 6 mm. Bei den Rechtecksteinen (**Abbildung 6.18**) ebenfalls eindeutig und in den Ursachen bereits in Kapitel 6.3.2.5 für die Klinkerpflasterflächen erläutert, ist die Zunahme der horizontalen Verschiebungen bei zu geringen Fugenbreiten beginnend unterhalb von ca. 2 mm. Auch hier zeigen die Verbundsteine (**Abbildung 6.19**) ähnliches Verhalten, wobei die Kategorie Fugenbreite 1 mm hiervon abweicht. Eine Erklärung hierfür ist, dass sich diese Kategorie nur auf drei Versuchsreihen bezieht, die an derselben sehr alten, gut verfestigten und verspannten Verkehrsfläche mit mittlerer Verkehrsbelastung durchgeführt wurden. Der mittlere, im Regelwerk vorgesehene Bereich von 3 bis 5 mm Fugenbreite weist bei den Verbundsteinen die geringsten Verschiebungen und Steigungswinkel auf, wenn auch die Kategorie Fugenbreite 3 mm fehlt und die Kategorie Fugenbreite 4 mm nur aus einer Fläche gebildet wird. Auch bei den Rechtecksteinen (**Abbildung 6.18**) sind in diesem Bereich mit die geringsten Verschiebungen und Steigungswinkel ermittelt worden. Die hohen Werte der Kategorie Fugenbreite 5 mm erklären sich daraus, dass sich diese Kategorie auf die Ergebnisse von drei neuen Verkehrsflächen bezieht, von denen eine einen Fugenfüllungsgrad von lediglich 50 % aufweist.

Somit wird der grundsätzliche Verlauf mit einem Minimum im Bereich der mittleren Fugenbreiten von ca. 3 bis 6 mm und steigenden Verschiebungen und Steigungswinkeln bei Werten unter- und oberhalb dieses Bereiches deutlich. Damit werden die Ergebnisse der Klinkerpflasterflächen (siehe Kapitel 6.3.2.5) bestätigt. Insgesamt

zählt die Fugenbreite - gerade auch was die Höhe des Einflusses betrifft - zu den wichtigsten Einflussgrößen.

6.3.3.6 Ergebnisse nach Fugenfüllungsgrad geordnet

Die Darstellung der nach dem Fugenfüllungsgrad geordneten Ergebnisse der Spreizversuche erfolgt für die Rechtecksteine in **Abbildung 6.20** und für die Verbundsteine in **Abbildung 6.21**.

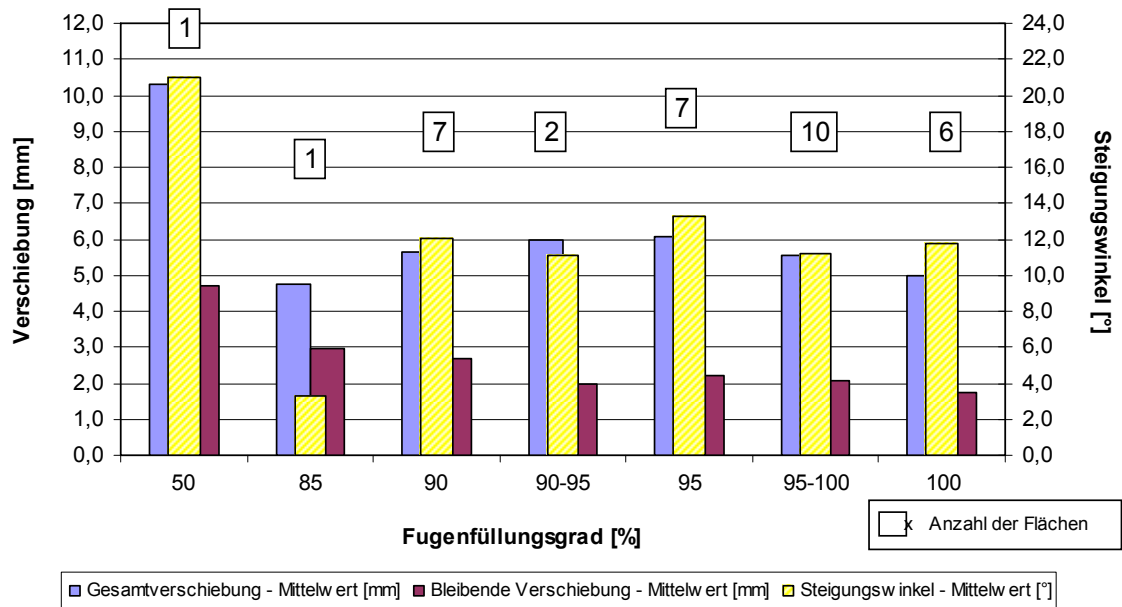


Abbildung 6.20: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithmetische Mittelwerte)

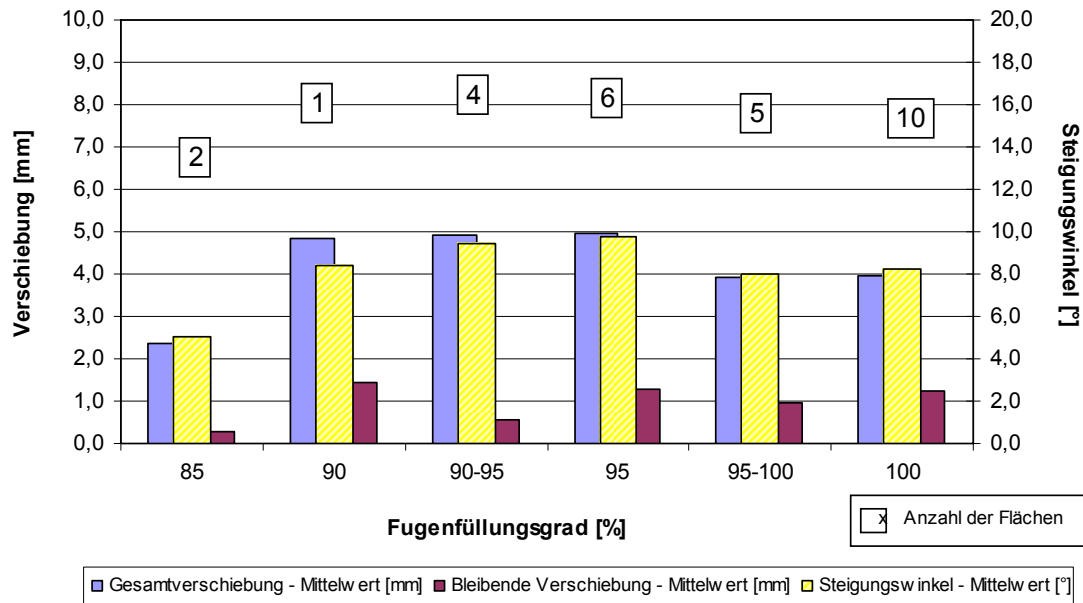


Abbildung 6.21: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Die durchgeführten Spreizversuche bestätigen die Ergebnisse aus den Untersuchungen an den Klinkerpflasterflächen (Kapitel 6.3.2.6): Der Fugenfüllungsgrad hat in dem hier vorliegenden Bereich von 85 bis 100 % weder bei Rechtecksteinen noch bei Verbundsteinen einen Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand. Die Kategorie Fugenfüllungsgrad 50 % mit ihren hohen Werten von 10,3 mm Gesamtverschiebung und 21,0° Steigungswinkel bezieht sich zwar lediglich auf eine Fläche, kann aber dennoch als Hinweis auf einen Einfluss des Fugenfüllungsgrades in diesem Bereich verstanden werden. Insgesamt hat der Fugenfüllungsgrad somit nach den vorliegenden Messungen, eine Mindestfüllung von ca. 85 % vorausgesetzt, einen untergeordneten Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand. Im übrigen wird auf die Aussagen bei den Klinkerpflasterflächen verwiesen, die auch hier zutreffen.

6.3.3.7 Ergebnisse nach Alter der Fläche zum Messzeitpunkt geordnet

Abbildung 6.22 zeigt die Ergebnisse der Spreizversuche an den Flächen mit Rechtecksteinen nach dem Alter der Fläche zum Messzeitpunkt geordnet. Für die Flächen mit Verbundsteinen sind die entsprechenden Ergebnisse in **Abbildung 6.23** dargestellt.

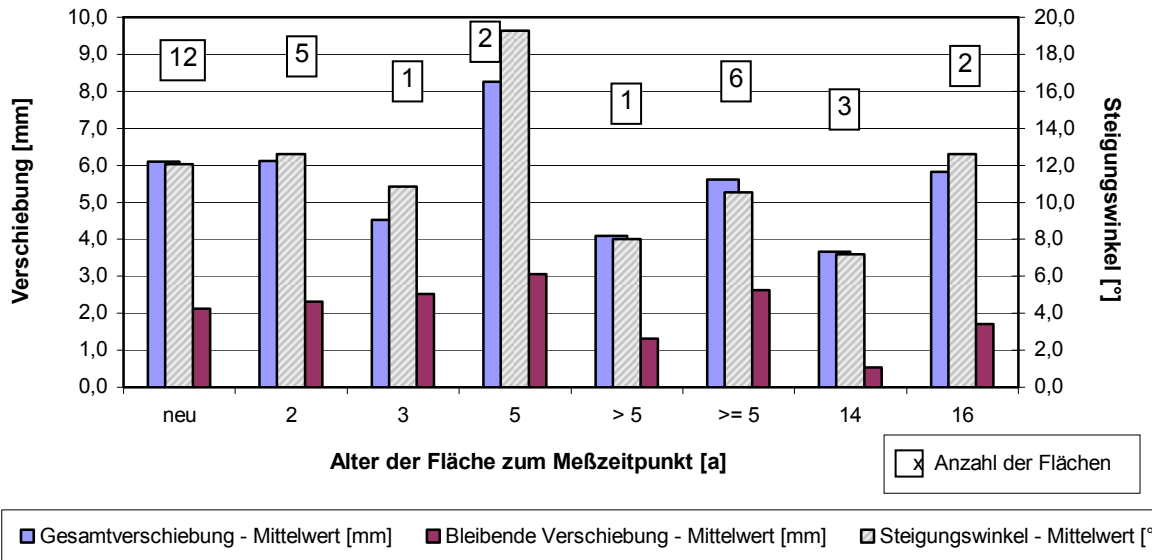


Abbildung 6.22: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Alter geordnet (arithmetische Mittelwerte)

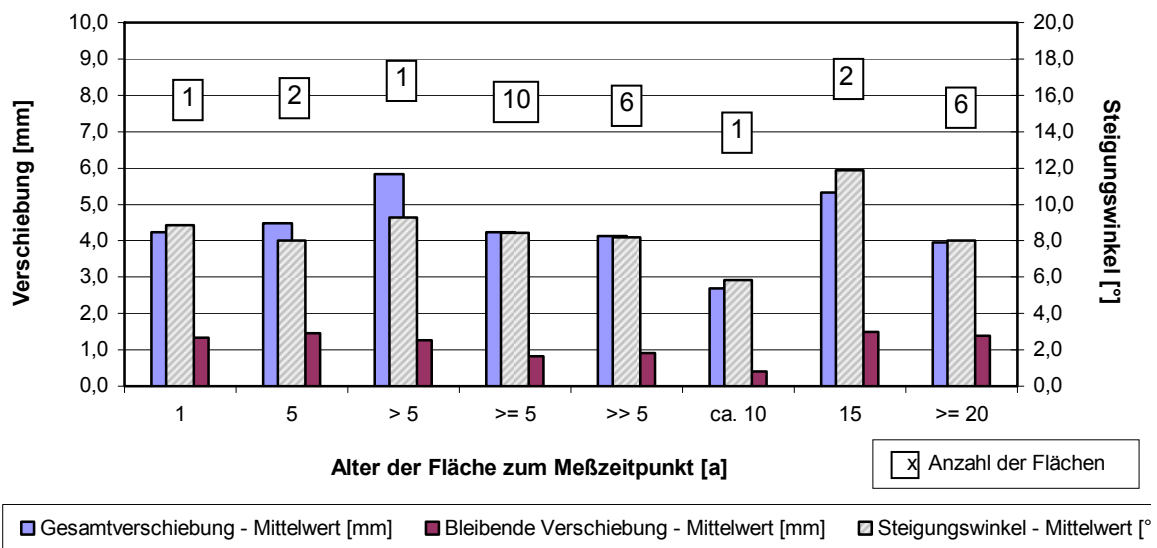


Abbildung 6.23: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Alter geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Auch bei der Auswertung des Einflusses durch das Alter der Verkehrsflächen werden grundsätzlich die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Klinkerpflasterflächen (Kapitel 6.3.2.7) bestätigt. Ein direkter Zusammenhang zwischen Alter und horizontalem Verschiebungswiderstand ist nicht zu erkennen. Die zu erwartende Verfestigung der Flächen mit zunehmendem Alter kann aus den Ergebnissen ebenso wenig sicher gefolgert werden, wie ein geringerer horizontaler Verschiebungswiderstand bei neuen und sehr jungen Flächen. Insgesamt wird der Einfluss des Alters von anderen Einflüssen überlagert, was beispielsweise bei der Kategorie Alter 5 Jahre bei den

Rechtecksteinen (**Abbildung 6.22**) deutlich wird. Diese Kategorie wird durch zwei Flächen gebildet, die neben sehr engen Fugen auch eine sehr niedrige Verkehrsbelastung aufweisen, womit die im Vergleich wesentlich höheren Werte erklärt werden können. Die Abhängigkeit zwischen Alter und Verkehrsbelastung zeigt sich an dieser Stelle ebenso deutlich.

Dennoch kann, auch vor dem Hintergrund praktischer Erfahrungen, von einem geringeren horizontalen Verschiebungswiderstand neuer und sehr junger Flächen ausgegangen werden. Insgesamt ist der Einfluss des Alters eher als geringer anzusehen, wenn die Flächen etwa mindestens ein bis zwei Jahre unter Verkehr liegen.

6.3.3.8 Ergebnisse nach Verband geordnet

In **Abbildung 6.24** sind die Ergebnisse der Spreizversuche an den Betonsteinpflasterdecken nach dem ausgeführten Verband geordnet dargestellt. Dabei beziehen sich die von links gesehen ersten vier Kategorien auf Flächen mit Rechtecksteinen in unterschiedlichen Verbänden, die darauf folgende Kategorie allgemein auf Verbundsteine, die im Läuferverband quer verlegt wurden, und schließlich die letzten beiden Kategorien nur auf SINPRO-Verbundsteine, da diese im Läuferverband und im Fischgrätverband verlegt wurden. Eine Fläche mit Quadratsteinen wurden der Kategorie Rechteck Läufer längs, die andere der Kategorie Rechteck Läufer quer zugeordnet.

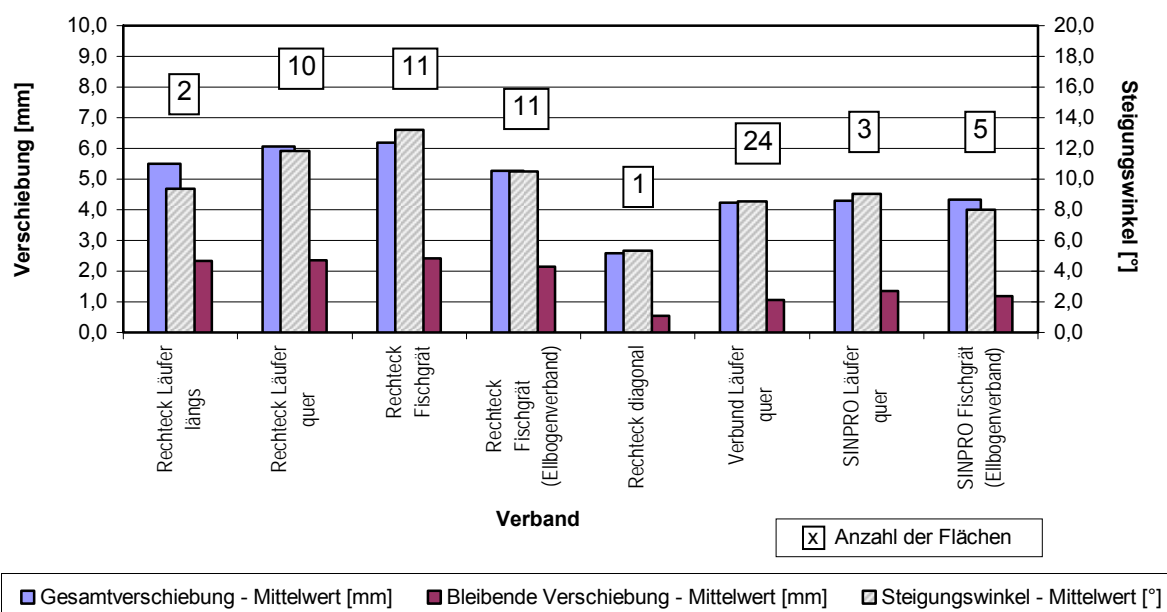


Abbildung 6.24: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Verband geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Die Unterscheidung in Flächen im Fischgrätverband ohne und mit Bischofsmützen, die für die Klinkerpflasterflächen noch aufgeführt ist, wird hier nicht mehr getroffen. Somit sind bei den Rechtecksteinen fünf unterschiedliche Verbände untersucht worden: Läuferverband längs und quer zur Fahrtrichtung verlegt sowie Fischgrätverband, Ellbogenverband und Diagonalverband. Der zuletzt genannte ist nur durch eine Fläche vertreten, was bei der Beurteilung des Ergebnisses beachtet werden muss.

Von den genannten Verbänden weisen der Diagonalverband und der Läuferverband längs zur Fahrtrichtung die größten horizontalen Verschiebungswiderstände auf, wobei die Zahlen selbst nicht repräsentativ sind, da es sich nur um eine einzelne Fläche handelt. Zudem ist aus anderen Spreizversuchen bekannt, dass sich beim Läuferverband längs teilweise erhebliche Verschiebungen bis in die Größenordnung von mehreren Zentimetern einstellen können.

Beim Fischgrätverband sind etwas höhere Verschiebungen und Steigungswinkel als beim Ellbogenverband ermittelt worden. Die Ergebnisse des Läuferverbandes quer zur Fahrtrichtung liegen dazwischen. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen den Verbänden eindeutig. Darüber hinaus werden die Ergebnisse auch durch die Literatur weitgehend bestätigt.

Die überwiegende Anzahl der untersuchten Flächen mit Verbundsteinpflaster wurde im Läuferverband quer zur Fahrtrichtung verlegt. Daneben wurden jedoch auch fünf Flächen mit SINPRO-Steinen untersucht, die im Ellbogenverband verlegt worden waren. Um einen zusätzlichen Vergleich zu ermöglichen, wurden drei in der Kategorie Verbundsteine Läufer quer enthaltene, ebenfalls mit SINPRO-Steinen gebaute Flächen zu einer zusätzlichen Kategorie zusammengefasst. Das Ergebnis ist vergleichbar mit den Flächen mit Rechtecksteinen: Auch bei den Verbundsteinen zeigen die im Läuferverband quer verlegten Flächen einen etwas niedrigeren horizontalen Verschiebungswiderstand als die Flächen im Ellbogenverband. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Kategorien sind jedoch, bei gleichzeitig niedrigeren Absolutwerten, geringer.

Insgesamt wird, übereinstimmend mit den Aussagen für die Klinkerpflasterflächen, deutlich, dass sich sowohl mit Bauweisen in Läuferverband quer als auch mit Fischgrät- bzw. Ellbogenverband Flächen mit hohem horizontalem Verschiebungswiderstand herstellen lassen, wobei der Ellbogenverband hier die größten horizontalen Verschiebungswiderstände ergibt. Der Verband gehört zu den wichtigeren Einflussgrößen.

6.3.3.9 Ergebnisse nach Bettungsdicke geordnet

Die Darstellung der nach der Bettungsdicke geordneten Ergebnisse der Spreizversuche erfolgt für die Rechtecksteine in **Abbildung 6.25** und für die Verbundsteine in **Abbildung 6.26**.

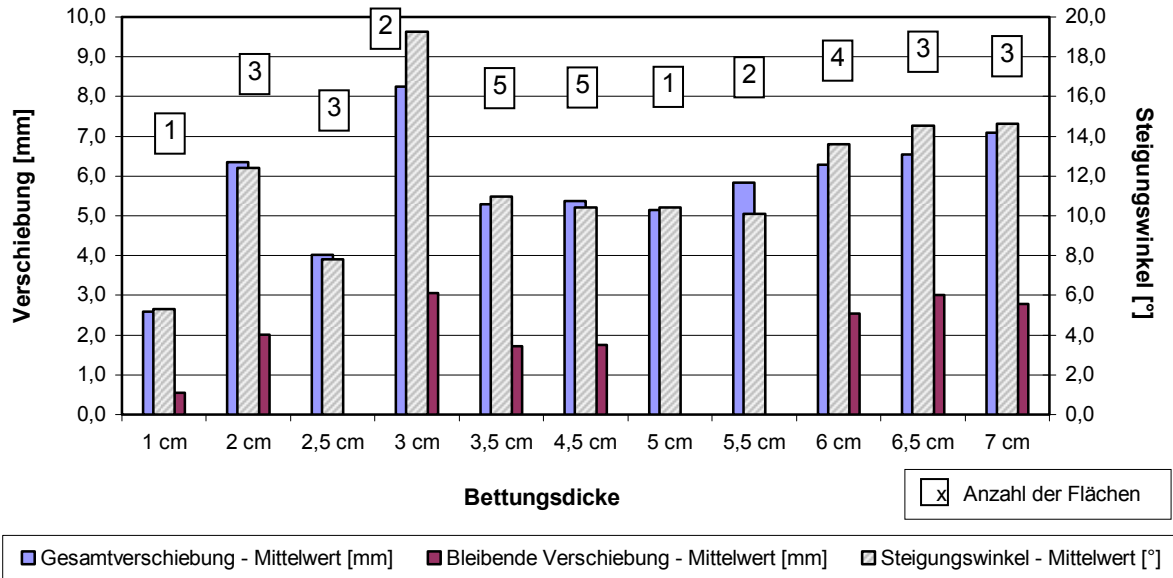


Abbildung 6.25: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Bettungsdicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)

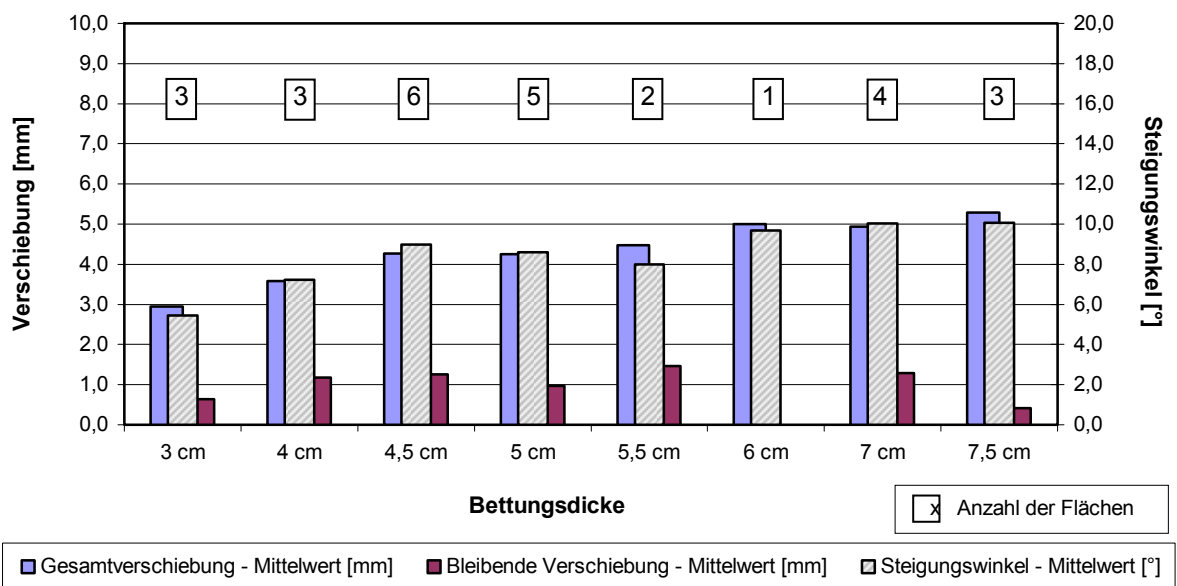


Abbildung 6.26: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Bettungsdicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Der Einfluss der Bettungsdicke auf den horizontalen Verschiebungswiderstand ist deutlich zu erkennen: Sowohl bei den Rechtecksteinen als auch bei den Verbundsteinen ist ab einer Bettungsdicke von ca. 6 cm eine Vergrößerung der Verschiebungswiderstande zu beobachten.

gen und Steigungswinkel und damit eine Verringerung des horizontalen Verschiebungswiderstandes zu beobachten.

Gleichzeitig werden bei den Rechtecksteinen (**Abbildung 6.25**) im Bereich von 3,5 cm bis 5,5 cm und bei den Verbundsteinen (**Abbildung 6.26**) von 3 cm bis 5,5 cm höhere Verschiebungswiderstände erreicht, wobei die Werte innerhalb dieser Bereiche auf vergleichbarem Niveau liegen. Eine Erklärung für die noch höheren Widerstände der Kategorie Bettungsdicke 3 cm bei den Verbundsteinen sowie der Kategorie Bettungsdicke 2,5 cm bei den Rechtecksteinen ist, dass sich beide Kategorien auf drei Versuchsreihen beziehen, die jeweils an derselben sehr alten, gut verfestigten und verspannten und unter mittlerer Verkehrsbelastung liegenden Verkehrsfläche durchgeführt wurden. Die Kategorie Bettungsdicke 3 cm bei den Rechtecksteinen bezieht sich auf zwei Flächen, die sehr enge Fugen sowie eine sehr niedrige Verkehrsbelastung aufweisen, womit die im Vergleich wesentlich höheren Werte erklärt werden können. Die Kategorie Bettungsdicke 1 cm bei den Rechtecksteinen zeigt den größten horizontalen Verschiebungswiderstand aller Kategorien. Allerdings stimmt die bei der Aufgrabung festgestellte Bettungsdicke nicht mit dem Wert von 4 cm Bettungsdicke überein, der bei dieser Fläche vorhanden sein sollte. Da die Aufgrabungsstelle hier nicht in unmittelbarer Nähe der Spreizversuchstellen auf dieser Fläche vorgenommen werden konnte, ist angesichts der Ergebnisse von einer größeren Bettungsdicke an den Versuchstellen auszugehen.

Die Kategorie Bettungsdicke 2 cm bei den Rechtecksteinen mit ihren etwas höheren Werten kann als Hinweis auf einen abnehmenden horizontalen Verschiebungswiderstand bei zu geringer Bettungsdicke verstanden werden. Dabei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass sich unter den drei Verkehrsflächen dieser Kategorie auch eine neue Fläche mit sehr geringer Verkehrsbelastung befindet. Ohne diese Fläche lägen die Verschiebungen sowie der Steigungswinkel im Bereich der Ergebnisse bei Bettungsdicken von 3,5 cm bis 5,5 cm.

Insgesamt wird deutlich, dass eine Bettungsdicke in dem vom Regelwerk vorgesehenen Bereich von 3 bis 5 cm bzw. auch etwas oberhalb davon zu einer guten Einbettung der Pflasterdecke und damit zu einer Verbesserung des horizontalen Verschiebungswiderstandes führt. Wie die Ergebnisse zeigen, haben höhere Bettungsdicken somit nicht nur, wie in Kapitel 2 erläutert, erhöhte vertikale Verformungen, sondern auch größere horizontale Verschiebungen zur Folge. Der Vorgang der Einbettung der Steine und der positive Einfluss auf den Verschiebungswiderstand deckt sich mit den Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen, die in Kapitel 2 beschrieben worden sind. Die Bettungsdicke kann insgesamt zu den wichtigeren Parametern gezählt werden.

6.3.3.10 Ergebnisse nach Fugenmaterial geordnet

Die nach dem Fugenmaterial geordneten Ergebnisse sind für die Rechtecksteine in **Abbildung 6.27** und für die Verbundsteine in **Abbildung 6.28** dargestellt.

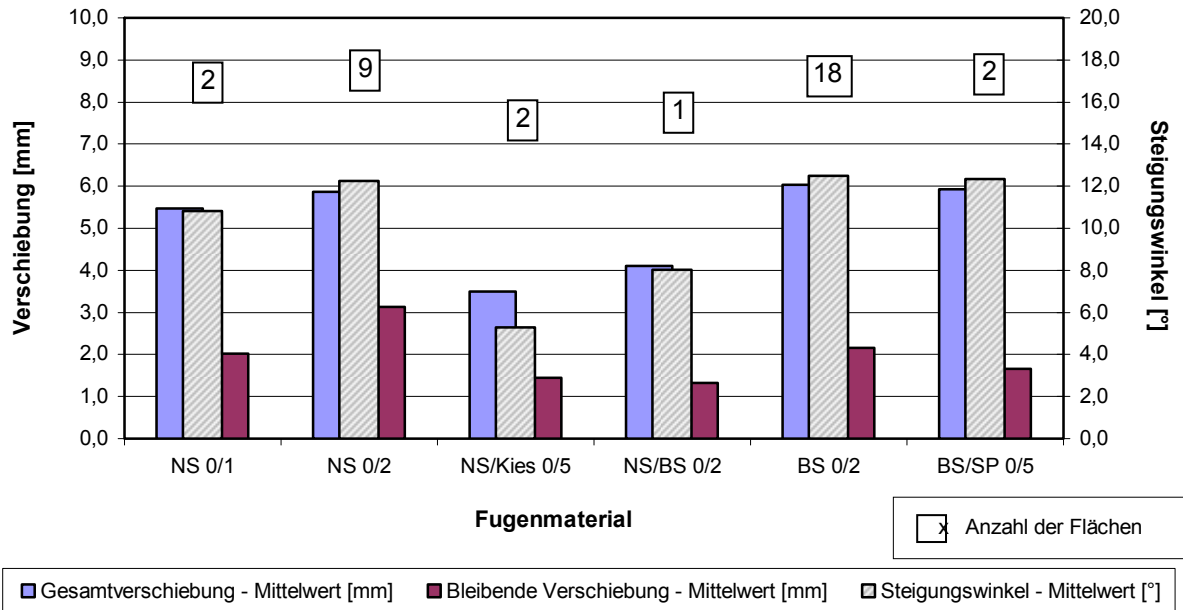


Abbildung 6.27: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Fugenmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

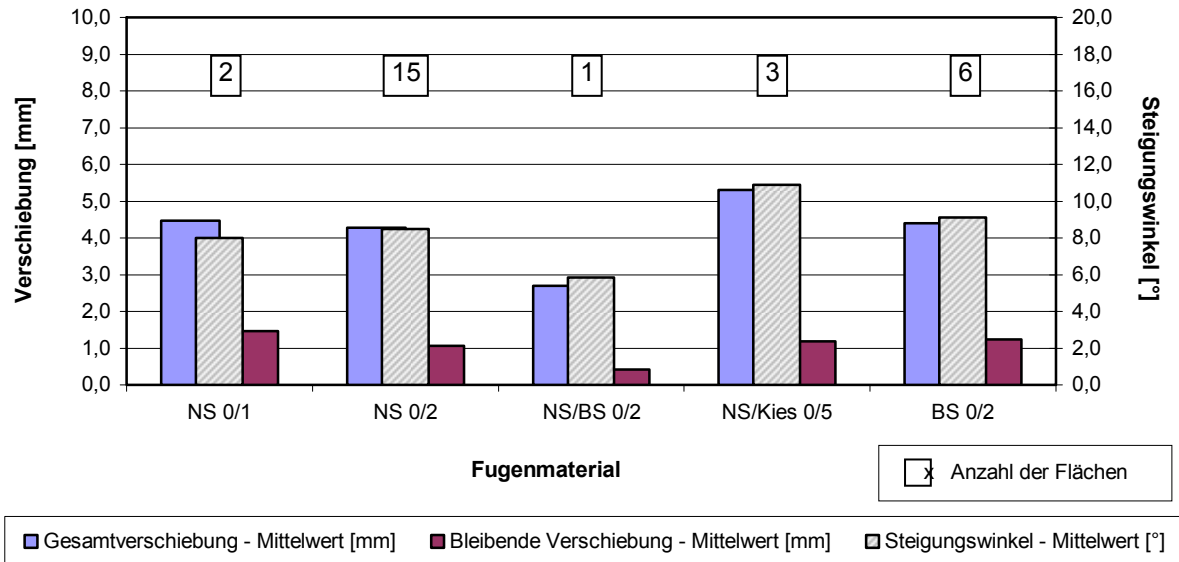


Abbildung 6.28: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Fugenmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Bei der Auswertung ist zunächst zu beachten, dass sich die Kategorie Natur-sand/Brechsand 0/2 sowohl bei den Rechtecksteinen als auch bei den Verbundsteinen nur auf eine Fläche bezieht, wodurch die Ergebnisse nicht repräsentativ sind. Ähnliches gilt, ebenfalls bei beiden Steinformen, auch für die Kategorie Natur-

sand 0/1 sowie, bei den Rechtecksteinen (**Abbildung 6.27**), für die Kategorien Brechsand/Splitt 0/5 und Natursand/Kies 0/5, die sich jeweils nur auf zwei Flächen beziehen. Bei den übrigen Kategorien weisen die Flächen mit Fugenmaterialien Natursand 0/2 und Brechsand 0/2 Verschiebungen und Steigungswinkel in vergleichbarer Höhe auf. Bei den Verbundsteinen sind bei drei Flächen mit einem Natursand/Kies 0/5 als Fugenmaterial höhere Werte ermittelt worden.

Insgesamt kann, auch unter Berücksichtigung eines Zusammenhanges mit der Fugenbreite, hier kein Einfluss von Größtkorn oder Mineralstoffart festgestellt werden. Der Einfluss des Fugenmaterials auf den horizontalen Verschiebungswiderstand ist damit gering und wird von den Einflüssen durch andere Parameter überlagert.

6.3.3.11 Ergebnisse nach Bettungsmaterial geordnet

In **Abbildung 6.29** sind die nach dem Bettungsmaterial geordneten Ergebnisse der Spreizversuche an den Verkehrsflächen mit Rechtecksteinen dargestellt. Die entsprechenden Werte für die Flächen mit Verbundsteinen zeigt **Abbildung 6.30**.

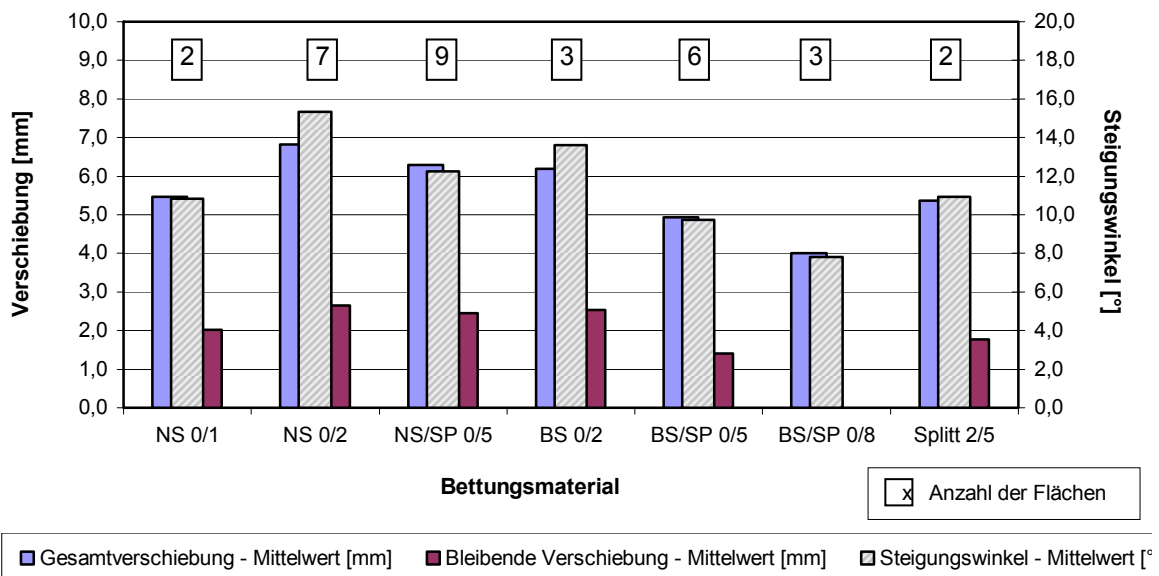


Abbildung 6.29: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Bettungsmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

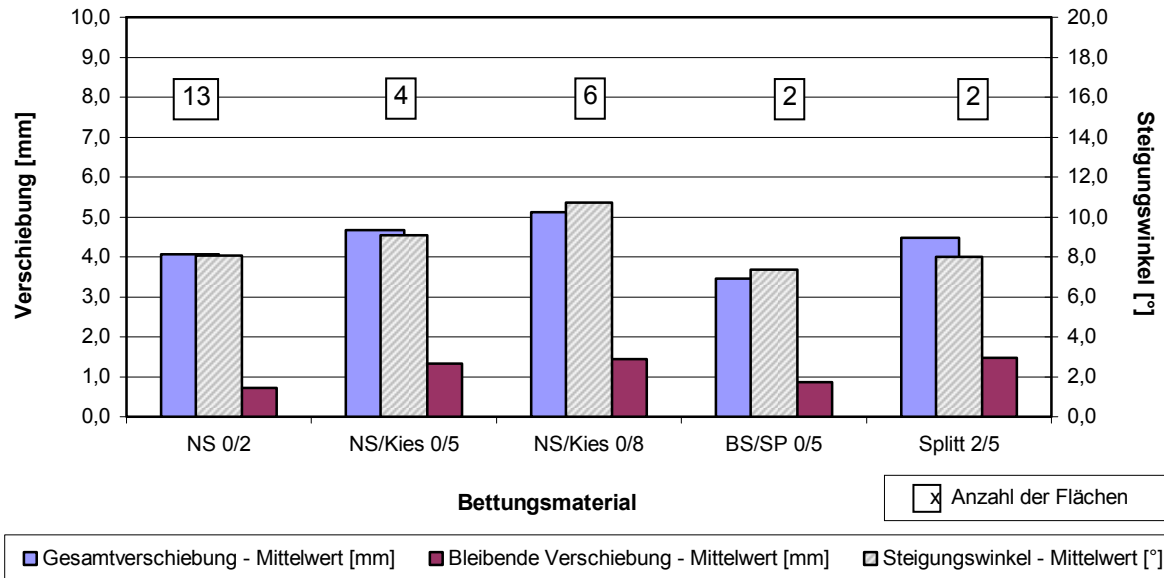


Abbildung 6.30: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Bettungsmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Aus **Abbildung 6.29** ist für die Rechtecksteine abzulesen, dass bei steigendem Größtkorn die ermittelten Verschiebungen und Steigungswinkel geringer werden. Auch weisen die Verkehrsflächen mit einer Bettung aus Brechsand gegenüber den Flächen mit Natursand höhere Verschiebungswiderstände auf. Die Ergebnisse der zwei Kategorien Natursand 0/1 sowie Splitt 2/5 liegen im mittleren Bereich, beziehen sich jedoch jeweils nur auf zwei Flächen, was ihre Aussagekraft verringert.

Die Flächen mit Verbundsteinen (**Abbildung 6.30**) zeigen demgegenüber auf den ersten Blick ein gegensätzliches Verhalten: Mit steigendem Größtkorn steigen, zumindest bei den Flächen mit Natursand und Kies als Bettungsmaterialien, auch die Verschiebungen und Steigungswinkel. Hier muss jedoch die Abhängigkeit der Darstellung von der Steinform beachtet werden. Die Flächen mit Bettungsmaterialien Natursand/Kies 0/5, Brechsand/Splitt 0/5 sowie mit Splitt 2/5 sind ausnahmslos mit SINPRO-Steinen gebaut worden. Demgegenüber bestehen die Decken mit Natursand/Kies 0/8 als Bettungsmaterial aus Doppel-T-Verbundsteinen. Auf den Einfluss der Steinform wurde bereits in Kapitel 6.2.3.2 näher eingegangen. In der Kategorie Natursand 0/2 schließlich finden sich unter anderem die Flächen, in denen Sechseck-Steine sowie Wardenburger zur Anwendung kamen und die sehr niedrige Verschiebungen und Steigungswinkel aufweisen. Somit kann der Einfluss des Bettungsmaterials aus den Flächen mit Verbundsteinen hier nur sehr eingeschränkt beurteilt werden, da die Variation der Bettungsmaterialien bei unterschiedlichen Steinformen gering ist. Ein Vergleich ausschließlich der mit SINPRO-Steinen hergestellten Flächen bestätigt jedoch die für die Rechtecksteine ermittelten Ergebnisse: Die Flächen mit Brechsand/Splitt 0/5 weisen geringere Verschiebungen und Steigungswin-

kel als die Flächen mit Natursand/Kies 0/5 auf. Die Ergebnisse der mit Splitt 2/5 als Bettungsmaterial hergestellten Flächen liegen dazwischen.

Wie schon bei der Auswertung der untersuchten Klinkerpflasterflächen in Kapitel 6.3.2.10 festgestellt, zeigen somit auch hier die Ergebnisse, dass die Verkehrsflächen mit einer Bettung aus Brechsand gegenüber den Flächen mit Natursand höhere Verschiebungswiderstände aufweisen. Daneben ist eine Verringerung der Verschiebungen und Steigungswinkel bei größerem Größtkorn zu beobachten. Flächen mit Splitt 2/5 als Bettungsmaterial zeigen gegenüber den Flächen mit abgestuften Brechsand/Splitt-Gemischen der Körnung 0/5 eher etwas höhere Verschiebungen und Steigungswinkel. Diese Ergebnisse werden auch durch andere Untersuchungen bestätigt.

Insgesamt ist der Einfluss der Bettung bzw. des Bettungsmaterials deutlich und nachvollziehbar. Das Bettungsmaterial ist damit ein Parameter stärkeren Einflusses.

6.3.3.12 Ergebnisse nach Tragschichtmaterial geordnet

Die nach dem Tragschichtmaterial geordneten Ergebnisse der Spreizversuche werden für die Rechtecksteine in **Abbildung 6.31** und für die Verbundsteine in **Abbildung 6.32** dargestellt.

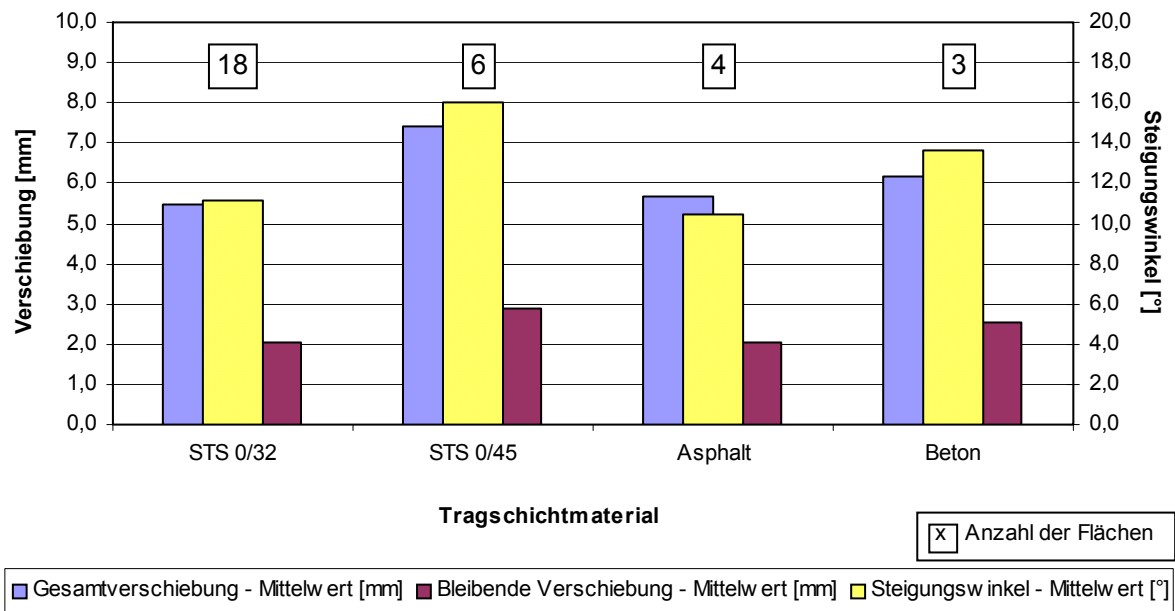


Abbildung 6.31: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Rechtecksteine, nach Tragschichtmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

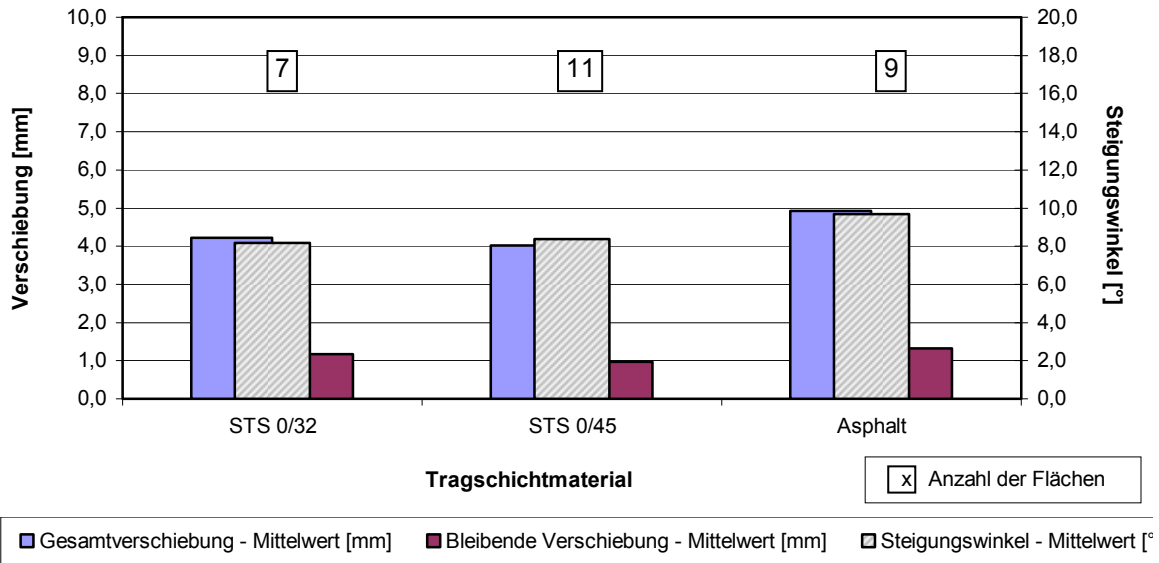


Abbildung 6.32: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster - Verbundsteine, nach Tragschichtmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Bei der Auswertung der Ergebnisse der mit Rechtecksteinen hergestellten Flächen (**Abbildung 6.31**) ist für die Kategorie Schottertragschicht 0/45 zu beachten, dass hier eine neu gebaute Fläche mit einem Fugenfüllungsgrad von nur 50 % enthalten ist. Ohne diese Fläche lägen die Ergebnisse nur wenig über denen der Kategorie Schottertragschicht 0/32.

Insgesamt ist weder bei den Flächen mit Rechtecksteinen noch bei denen mit Verbundsteinen ein Einfluss der Tragschicht auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der Pflasterdecke durch Größtkorn und/oder Material festzustellen. Damit werden auch die Ergebnisse der Flächen mit Klinkerpflasterdecken bestätigt. Darüber hinaus deckt sich dies auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen.

6.3.3.13 Ergebnisse nach Spreizrichtung geordnet

In **Abbildung 6.33** sind die nach der Spreizrichtung geordneten Ergebnisse der Spreizversuche an den Betonsteinpflasterdecken dargestellt, wobei sich die drei Kategorien in der linken Hälfte des Diagramms auf Rechtecksteine beziehen, während die übrigen drei in der rechten Hälfte den Flächen mit Verbundsteinen zugeordnet sind.

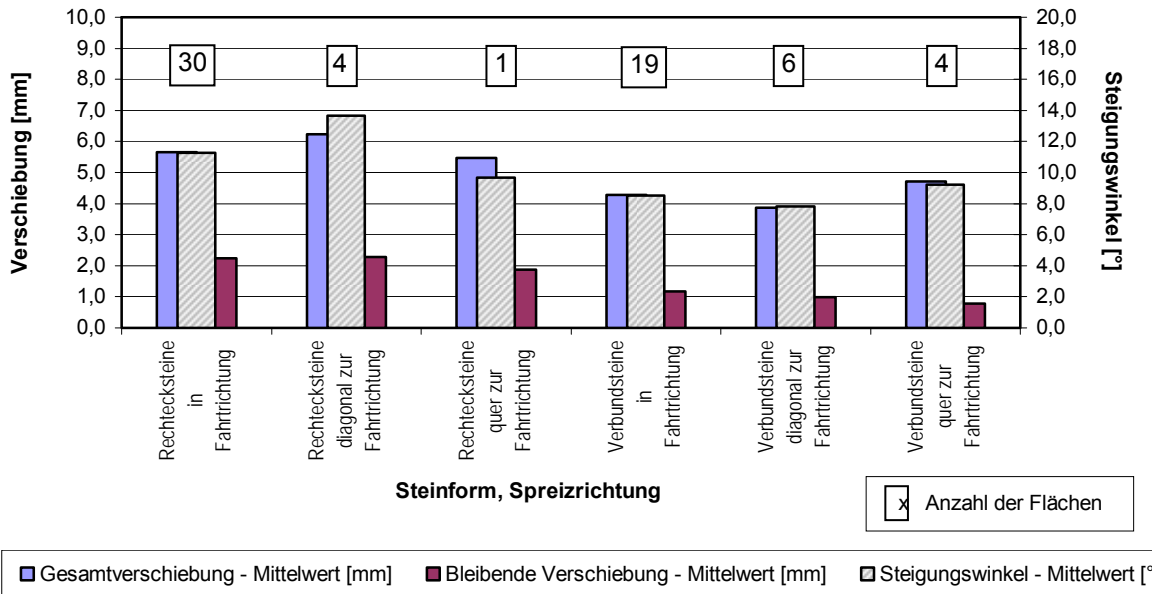


Abbildung 6.33: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Betonsteinpflaster, nach Spreizrichtung geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Bei den Verkehrsflächen mit Rechtecksteinen wurde nur an einer Fläche quer zur Fahrtrichtung (in Längsrichtung des Verbandes) gemessen, wodurch die Werte dieser Kategorie nicht als repräsentativ angesehen werden können. Diagonal zur Fahrtrichtung wurde auf vier Flächen gemessen, wobei eine davon sehr enge Fugen und eine geringe Verkehrsbelastung mit entsprechend hohen Ergebnissen aufweist. Ohne diese Fläche lägen die Werte unterhalb der Ergebnisse der in Fahrtrichtung gemessenen Versuche. Insgesamt ist ein Einfluss der Spreizrichtung somit hier nicht erkennbar.

Bei den Ergebnissen der Verbundsteinflächen sind die größten Verschiebungen und Steigungswinkel bei den quer zur Fahrtrichtung gemessenen Flächen ermittelt worden, gefolgt von den in Fahrtrichtung gemessenen und schließlich von den diagonal zur Fahrtrichtung gemessenen Flächen.

Die Spreizrichtung und ihr Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand hängen mit den Widerstandsfähigkeiten des Verbandes in der jeweiligen Richtung zusammen, der wiederum normalerweise nach der Fahrtrichtung ausgewählt wird. Der direkte Einfluss der Spreizrichtung ist damit gering.

6.3.3.14 Schlussfolgerungen zum horizontalen Verschiebungswiderstand bei Betonsteinpflasterdecken

In **Tabelle 6.4** ist, wie für die Klinkerpflasterdecken, qualitativ die Bedeutung des Einflusses der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der untersuchten Betonsteinpflasterdecken wiedergegeben. Auch die fünf Abstufungen von starkem bis sehr schwachem Einfluss wurden beibehalten.

Tabelle 6.4: Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der untersuchten Betonsteinpflasterdecken

| Parameter | Einfluss |
|-------------------|----------|
| Verkehrsbelastung | ++ |
| Fugenbreite | ++ |
| Bettungsdicke | ++ |
| Bettungsmaterial | ++ |
| Verband | + |
| Steinform | O |
| Steinformat | O |
| Steindicke | O |
| Fugenfüllung | - |
| Fugenmaterial | - |
| Alter | - |
| Steinmaterial | - |
| Tragschicht | -- |

++ = stark + = weniger stark O = mittel - = schwach -- = sehr schwach

6.3.4 Verbundsteinpflaster an der Ruhr-Universität Bochum

Wenn auch die zusätzlichen Spreizversuche hauptsächlich zur Untersuchung des Einflusses der Parameter Neigung der Fläche und Witterungseinflüsse dienen sollen, so können doch auch hier einige bautechnische Einflussgrößen beurteilt werden. Auf die nicht ausgewerteten Parameter wird im Folgenden kurz eingegangen: So waren bei allen hier untersuchten Flächen Betonverbundsteine mit einer S-Form von einheitlichem Format eingesetzt worden. Daher kam eine Beurteilung eines aus dem Steinmaterial, der Steinform oder dem Steinformat resultierenden Einflusses auf den horizontalen Verschiebungswiderstand nicht in Frage. Aufgrund des nahezu einheitlichen Alters der Verkehrsflächen von ca. 30 Jahren wurde auch ein Einfluss dieses Parameters nicht beurteilt. Gleiches gilt für die Einflussgrößen Bettungsdicke sowie Fugen-, Bettungs- und Tragschichtmaterial. Auf eine Variation der Spreizrichtung wurde hier aufgrund der Ergebnisse der anderen Spreizversuche verzichtet.

6.3.4.1 Ergebnisse nach Verkehrsbelastung geordnet

In **Abbildung 6.34** sind die arithmetischen Mittelwerte der Verschiebungen und Steigungswinkel nach der Verkehrsbelastung geordnet dargestellt.

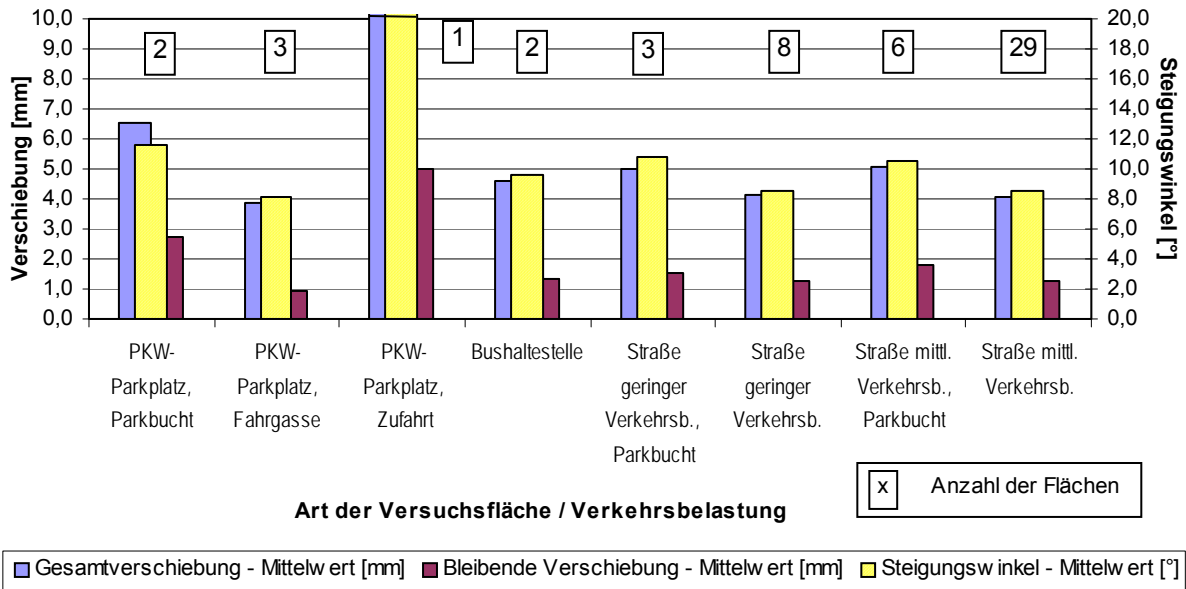


Abbildung 6.34: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Verkehrsbelastung geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Grundsätzlich bestätigt sich auch hier der bei den bisher durchgeführten Spreizversuchen gefundene Zusammenhang, dass mit steigender Verkehrsbelastung der horizontale Verschiebungswiderstand steigt. Besonders deutlich wird dies beim Vergleich der Parkbuchten und der Fahrspuren, die jeweils zu denselben Straßen bzw. zu demselben Parkplatz gehören. Die absoluten Unterschiede sind jedoch geringer als bei den bisher untersuchten Flächen. Eine Erklärung hierfür kann die bereits angesprochene Verfestigung der Pflasterdecken über die Liegedauer von 30 Jahren sein, die die anderen Einflüsse überlagert. Die ungewöhnlich hohen Werte bei der Kategorie „PKW-Parkplatz, Zufahrt“, die Gesamtverschiebung beträgt 10,4 mm und der Steigungswinkel 20,6°, haben mehrere Ursachen: Neben der geringeren Verkehrsbelastung sind insbesondere die engen Fugen zu nennen. Vor allem jedoch handelt es sich hier nur um eine einzelne Fläche, so dass die Ergebnisse nicht als repräsentativ angesehen werden können.

Insgesamt bestätigt sich somit zumindest tendenziell der grundsätzliche Zusammenhang eines größeren horizontalen Verschiebungswiderstandes bei höherer Verkehrsbelastung.

6.3.4.2 Ergebnisse nach Steindicke geordnet

Die arithmetischen Mittelwerte der nach der Steindicke geordneten Versuchsergebnisse sind in **Abbildung 6.35** dargestellt.

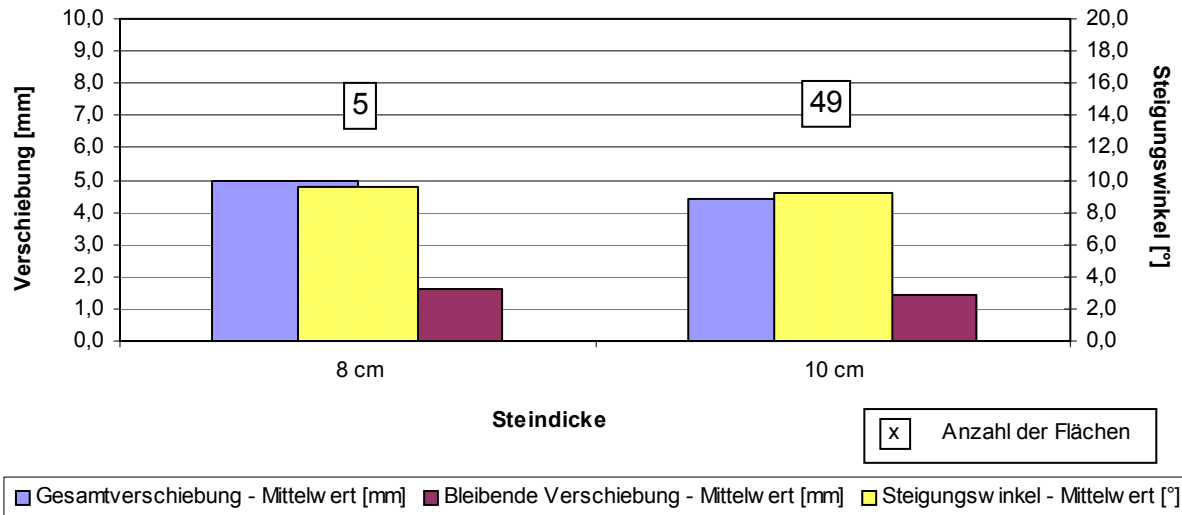


Abbildung 6.35: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Steindicke geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Der Zusammenhang den Einfluss der Steindicke betreffend macht auf den ersten Blick, wie schon bei den anderen Flächen, einen eindeutigen Eindruck: Bei einer größeren Dicke der Steine ergeben sich geringere Verschiebungen und Steigungswinkel. Dabei bezieht sich die Kategorie Steindicke 8 cm auf 5 Flächen gegenüber 49 Flächen bei der Kategorie Steindicke 10 cm. Unter den 5 Flächen ist eine, die im Läuferverband längs verlegt worden war und hohe Werte aufwies. Ohne diese Fläche läge die Gesamtverschiebung bei 4,1 mm und der Steigungswinkel bei 8,2° und damit sogar unterhalb der Ergebnisse bei Steindicke 10 cm. Allerdings sind auch bei dieser Kategorie entsprechende Flächen mit hohen Werten enthalten, die sich jedoch aufgrund der wesentlich höheren Anzahl der untersuchten Flächen nicht so stark bemerkbar machen. Insgesamt kann somit festgehalten werden, dass, übereinstimmend mit den Ergebnissen der anderen Spreizversuche, tendenziell bei einer größeren Steindicke etwas geringere Verschiebungen und Steigungswinkel zu erwarten sind. Die Steindicke ist somit ein Parameter von untergeordneter Bedeutung.

6.3.4.3 Ergebnisse nach Fugenbreite geordnet

In **Abbildung 6.36** sind die ermittelten Verschiebungen und Steigungswinkel nach der Fugenbreite geordnet und zu arithmetischen Mittelwerten zusammengefasst worden.

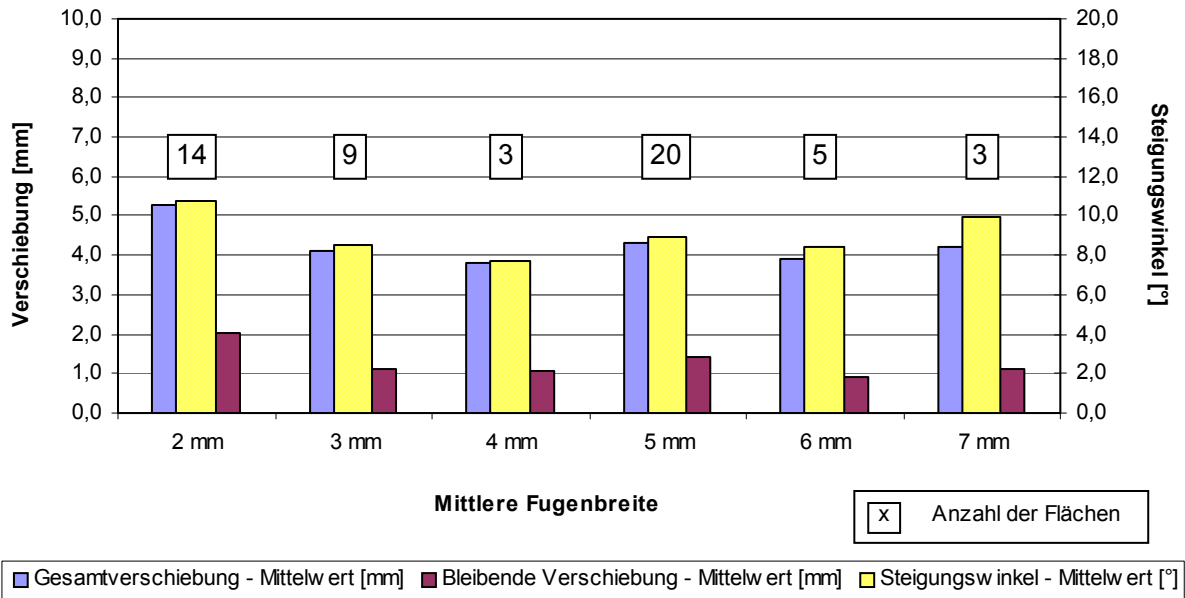


Abbildung 6.36: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Fugenbreite geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Bezüglich des Einflusses der Fugenbreite werden die Ergebnisse der anderen Spreizversuche bestätigt: Im mittleren Bereich von ca. 3 bis 6 mm Fugenbreite wurden niedrigere Verschiebungen und Steigungswinkel ermittelt, unter- sowie oberhalb dieses Bereiches dagegen höhere. Die Ursachen hierfür wurden bereits in Kapitel 6.3.2.5 für die Klinkerpflasterflächen erläutert. Insgesamt sind die Unterschiede hier nicht so stark ausgeprägt, was zum einen an dem weniger weiten Bereich der vertretenen Fugenbreiten liegt, im weiteren aber auch mit der bereits mehrfach angesprochenen Verfestigung der Pflasterdecken über die Liegedauer von 30 Jahren in Zusammenhang stehen kann. Der grundsätzliche Zusammenhang ist jedoch eindeutig. Die Fugenbreite ist auch bei diesen Spreizversuchen als eine der wichtigsten Einflussgrößen anzusehen.

6.3.4.4 Ergebnisse nach Fugenfüllungsgrad geordnet

Die nach dem Fugenfüllungsgrad geordneten und zu arithmetischen Mittelwerten zusammengefassten Versuchsergebnisse sind in **Abbildung 6.37** dargestellt.

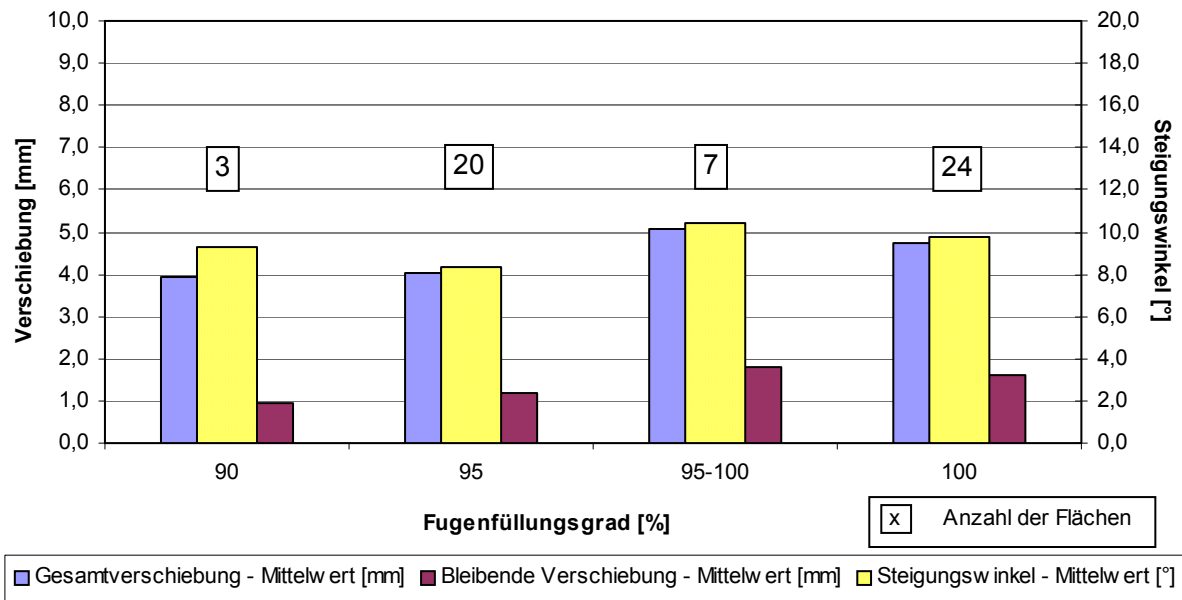


Abbildung 6.37: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Fugenfüllungsgrad geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Die Ergebnisse der Spreizversuche zeigen keinen nachvollziehbaren Zusammenhang des Fugenfüllungsgrades mit den ermittelten Verschiebungen und Steigungswinkeln. Die etwas höheren arithmetischen Mittelwerte der Kategorie Fugenfüllungsgrad 95 bis 100 % beinhalten bei sieben berücksichtigten Verkehrsflächen auch eine im Läuferverband längs verlegte Fläche. Ohne die Ergebnisse dieser Fläche lägen die Werte im Bereich der Kategorie Fugenfüllungsgrad 95 % und damit bei den niedrigsten in diesem Vergleich. Insgesamt werden somit die Ergebnisse der anderen Spreizversuche bestätigt, dass der Fugenfüllungsgrad in dem hier untersuchten Bereich der Fugenfüllung keinen Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand hat.

6.3.4.5 Ergebnisse nach Verband geordnet

Bei den untersuchten Verkehrsflächen an der Ruhr-Universität Bochum kam ausschließlich der Läuferverband, längs und quer zur Fahrtrichtung verlegt, zur Ausführung. **Abbildung 6.38** zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Verschiebungen und Steigungswinkel nach dem Verband geordnet.

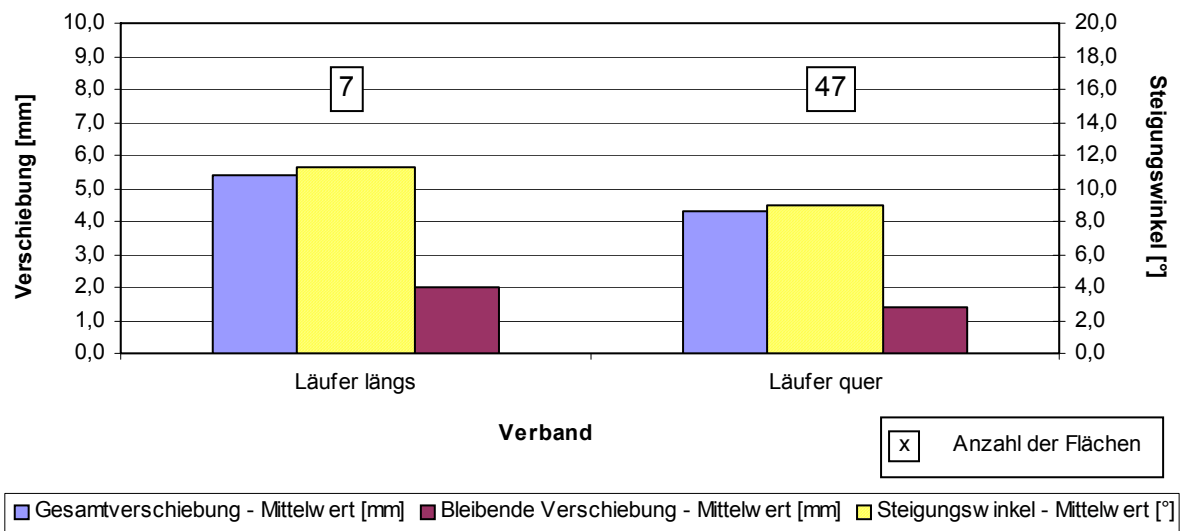


Abbildung 6.38: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Verband geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Sieben von den 54 untersuchten Flächen waren im Läuferverband längs gebaut worden, die restlichen 47 im Läuferverband quer. Der Zusammenhang ist eindeutig und wird auch durch die Ergebnisse der anderen Spreizversuche bestätigt: Der Läuferverband quer weist einen höheren horizontalen Verschiebungswiderstand als der Läuferverband längs auf. Der Verband gehört auch bei diesen Untersuchungen zu den wichtigen Parametern.

6.3.4.6 Ergebnisse nach Neigung der Fläche geordnet

Abbildung 6.39 zeigt die Ergebnisse der Spreizversuche zu arithmetischen Mittelwerten zusammengefasst und nach der Längsneigung geordnet.

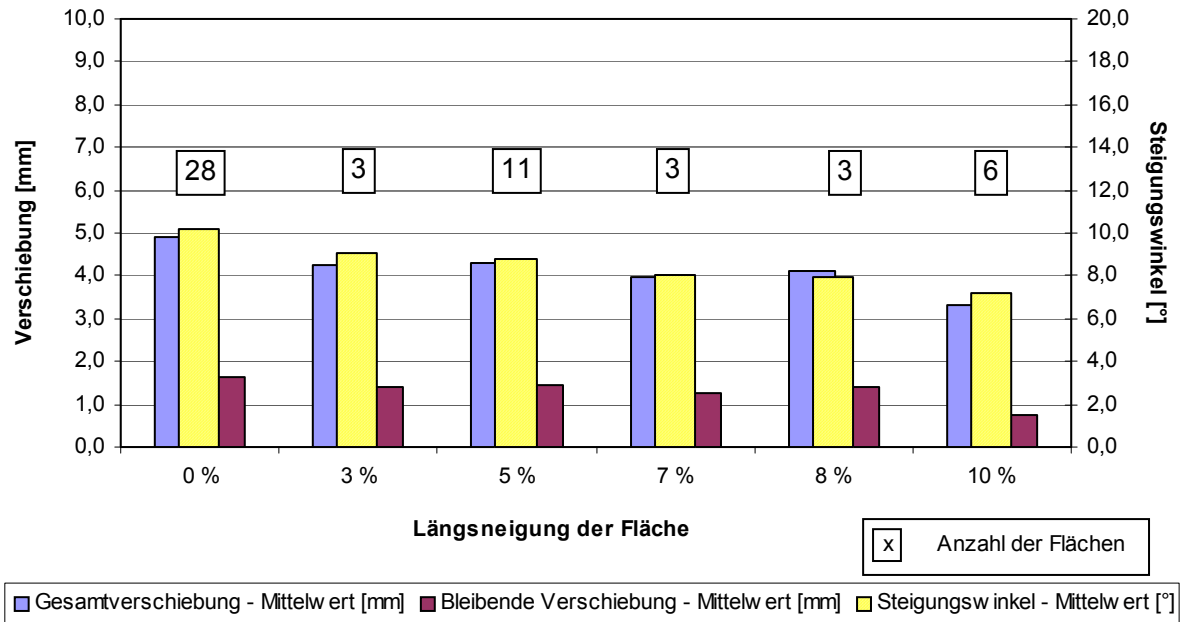


Abbildung 6.39: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Längsneigung der Fläche geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Der ermittelte Zusammenhang ist eindeutig: Je größer die Längsneigung um so größer ist auch der horizontale Verschiebungswiderstand. Erklärt werden kann dies durch die Einwirkungen aus der Verkehrsbelastung, deren horizontaler Anteil bei zunehmender Neigung der Fläche anwächst und damit zu einer Verfestigung der Pflasterdecke bzw. zu einer Erhöhung des horizontalen Verschiebungswiderstandes beiträgt. Insgesamt ist die Neigung der Fläche von der Größenordnung ihres Einflusses her zu den wichtigeren Parametern zu zählen.

6.3.4.7 Ergebnisse nach Witterungseinfluss geordnet

Um die Einflüsse der Witterung auf den horizontalen Verschiebungswiderstand zu bestimmen, wurden die ermittelten Verschiebungen und Steigungswinkel danach geordnet, ob die zugehörigen Flächen einer direkten Bewitterung ausgesetzt waren oder nicht. In **Abbildung 6.40** sind die arithmetischen Mittelwerte von 24 überdachten Flächen und 30 Flächen unter freiem Himmel, zusätzlich eingeteilt in ebene Flächen und Flächen mit Längsneigung, dargestellt.

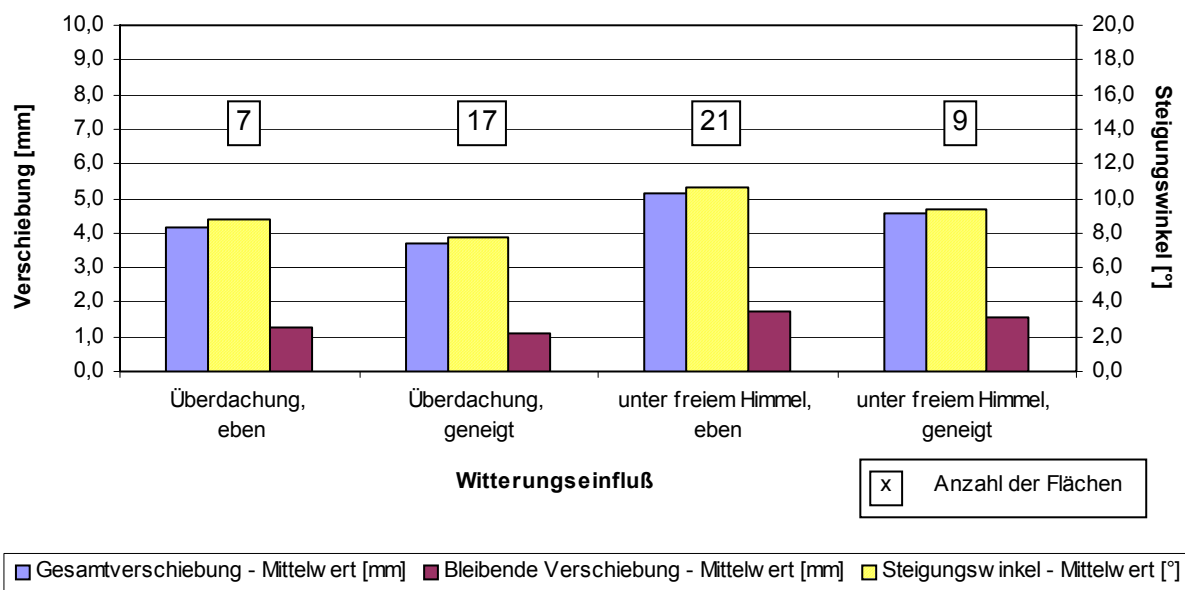


Abbildung 6.40: Spreizversuche an Pflasterdecken aus Verbundsteinpflaster an der RUB, nach Witterungseinfluss geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Der Vergleich zeigt insgesamt geringere Verschiebungen und Steigungswinkel bei den überdachten Flächen.

Bei den geneigten Flächen sind dabei die bereits beschriebenen deutlichen Einflüsse von Längsneigung und Verkehrsbelastung zu berücksichtigen, wobei die überdachten Flächen hier stärkere Längsneigungen aufweisen, als die Flächen unter freiem Himmel, was eine Auswertung erschwert.

Um einen Einfluss der Witterung zu ermitteln, bietet sich daher ein Vergleich der ebenen Flächen an. Hier weisen die Flächen unter freiem Himmel ebenfalls deutlich höhere Verschiebungen und Steigungswinkel als die überdachten Flächen auf. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Flächen mit höheren Werten aufgrund anderer Einflüsse fast ausschließlich in der Kategorie „unter freiem Himmel“ vertreten sind. Bei Nicht-Berücksichtigung von drei Flächen, die im Läuferverband längs gebaut wurden, einer Fläche mit engen Fugen sowie einer gering belasteten Fläche, also von fünf Flächen von den insgesamt 21 der Kategorie „unter freiem Himmel,

eben“, ergeben sich arithmetische Mittelwerte für die Gesamtverschiebung von 4,4 mm sowie für den Steigungswinkel von $9,1^\circ$, die nur noch geringfügig oberhalb der Werte der Kategorie „Überdachung, eben“ liegen.

Insgesamt ist der Einfluss durch die Witterung damit als gering anzusehen, da er stark von anderen Einflüssen überlagert wird. Ein direkter Einfluss bleibt, von der Höhe abgesehen, unklar.

6.3.4.8 Schlussfolgerungen zum horizontalen Verschiebungswiderstand der Verbundsteinpflasterdecken an der Ruhr-Universität Bochum

Für die untersuchten Verbundsteinpflasterdecken an der Ruhr-Universität Bochum ist in **Tabelle 6.5** qualitativ die Bedeutung der unterschiedlichen Einflussgrößen auf den horizontalen Verschiebungswiderstand wiedergegeben.

Die Abstufungen von starkem bis sehr schwachem Einfluss wurden in gleicher Form wie bei den Flächen mit Klinker- bzw. Betonsteinpflaster gewählt.

Tabelle 6.5: Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der untersuchten Verbundsteinpflasterdecken an der Ruhr-Universität Bochum

| Parameter | Einfluss |
|--------------------|----------|
| Fugenbreite | ++ |
| Verkehrsbelastung | ++ |
| Neigung der Fläche | ++ |
| Verband | + |
| Steindicke | O |
| Fugenfüllung | - |
| Witterung | - |

++ = stark + = weniger stark O = mittel - = schwach -- = sehr schwach

6.3.5 Ergebnisse nach Steinmaterial geordnet

Die ermittelten Ergebnisse der Spreizversuche an Pflasterdecken aus Klinkerpflaster und aus Betonsteinpflaster ermöglichen auch einen generellen Vergleich der beiden Steinmaterialien. In **Abbildung 6.41** sind die Ergebnisse der Versuche nach dem Steinmaterial geordnet dargestellt.

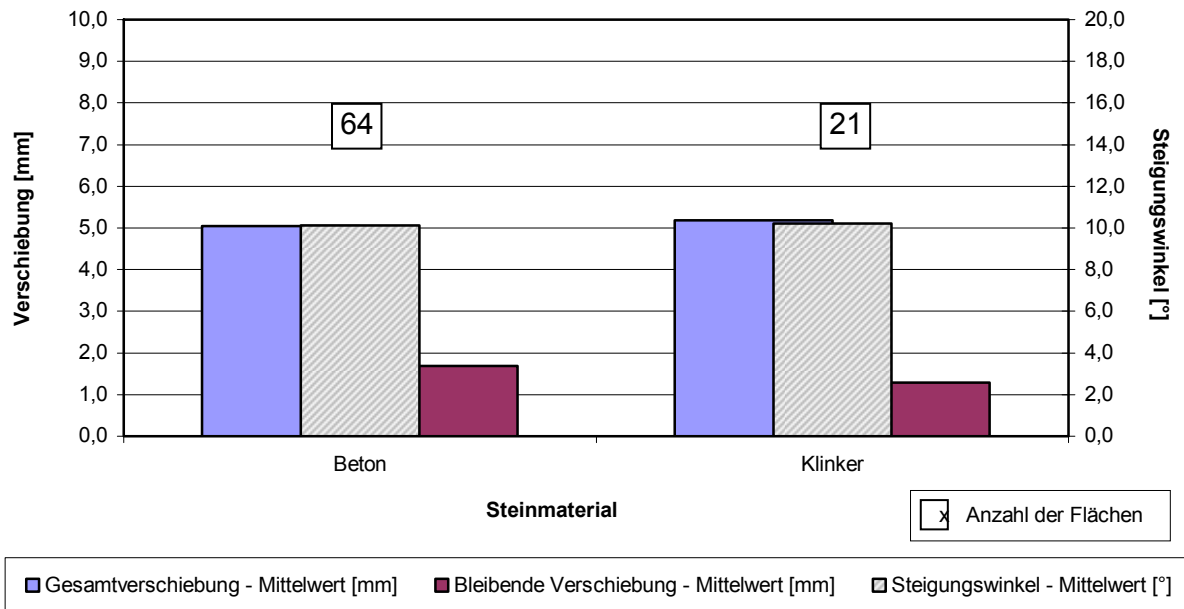


Abbildung 6.41: Spreizversuche an Pflasterdecken, nach Steinmaterial geordnet (arithmetische Mittelwerte)

Die durchgeführten Spreizversuche ergeben bezüglich des Steinmaterials nahezu identische Mittelwerte bei den Verschiebungen und Steigungswinkeln für Flächen mit Klinkerpflaster und Flächen mit Betonsteinpflaster. Die aus der Literatur (siehe Kapitel 2 [12, 13] bekannten Unterschiede können hier somit nicht bestätigt werden. Das Ergebnis zeigt darüber hinaus, dass die Einflüsse von anderen Parametern den des Steinmaterials überdecken und es sich somit um einen weniger wichtigen Parameter handelt.

6.3.6 Bewertung der Ergebnisse der Spreizversuche

Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, wurden für jede Fläche drei Spreizversuche in einer Richtung durchgeführt, deren Resultate für die Auswertung zu jeweils einem arithmetischen Mittelwert zusammengefasst wurden. Darüber hinaus fand an einzelnen Verkehrsflächen eine Variation der Spreizrichtung statt, wodurch an diesen Flächen bis zu neun Spreizversuche durchgeführt wurden. Aufgrund der dadurch gegebenen größeren Grundgesamtheiten wurden an letzteren Messwerten zunächst die vorhandenen Spannweiten sowie die kritischen Spannweiten bei einer statistischen Sicherheit von 95 % bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass die gemessenen Einzelwerte miteinander verträglich sind und die Bildung des arithmetischen Mittels somit zulässig ist.

Um eine Aussage über die Genauigkeit des Spreizversuches zu erhalten, wurden an diesen Verkehrsflächen im Weiteren die Standardabweichungen der Einzelwerte um den jeweiligen arithmetischen Mittelwert für die Gesamtverschiebung sowie für den Steigungswinkel bestimmt. Diese liegen für die Gesamtverschiebung zwischen 0,3 mm und 1,3 mm und für den Steigungswinkel zwischen $0,5^\circ$ und $3,3^\circ$. Die zugehörigen arithmetischen Mittelwerte für die Standardabweichungen betragen 0,7 mm sowie $1,4^\circ$.

Weiterhin wurden die Standardabweichungen der Einzelwerte um den jeweiligen Mittelwert je Versuchsfläche für alle Flächen betrachtet. Diese liegen zwischen 0,1 mm und 2,7 mm für die Gesamtverschiebung sowie zwischen $0,1^\circ$ und $4,7^\circ$ für den Steigungswinkel bei arithmetischen Mittelwerten für die Standardabweichungen von 0,8 mm bzw. $1,4^\circ$.

Es wird deutlich, dass die zunächst an den größeren Grundgesamtheiten bestimmten Standardabweichungen im mittleren Bereich der an allen Flächen ermittelten Standardabweichungen liegen. Gleichzeitig sind die arithmetischen Mittelwerte der Standardabweichungen bei beiden Gruppen nahezu gleich.

Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass mit dem Spreizgerät auch bei Durchführung von nur drei Spreizversuchen ein ausreichend sicheres Ergebnis erreicht werden kann.

Auf der Grundlage der Auswertung der Spreizversuche an den Klinkerpflasterflächen, den Betonsteinpflasterflächen sowie den Flächen aus Verbundsteinpflaster an der Ruhr-Universität Bochum kann eine Reihung der unterschiedlichen Parameter mit Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der Bedeutung nach qualitativ für alle untersuchten Verkehrsflächen vorgenommen werden. Diese Reihung ist in **Tabelle 6.6** wiedergegeben. In einer weiteren Spalte ist angegeben, wie hoch der Aufwand zur Beeinflussung dieses Parameters beim Bau der Pflasterfläche einzu-

schätzen ist bzw. wie leicht oder schwer dieser Parameter überhaupt zu beeinflussen ist.

Tabelle 6.6: Qualitativer Einfluss der einzelnen Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand und deren Beeinflussbarkeit

| Parameter | Einfluss | Aufwand zur Beeinflussung |
|--------------------|----------|---------------------------|
| Fugenbreite | ++ | mittel |
| Verkehrsbelastung | ++ | --- |
| Bettungsdicke | ++ | mittel |
| Neigung der Fläche | ++ | --- |
| Bettungsmaterial | ++ | leicht |
| Verband | + | leicht |
| Steinform | O | mittel |
| Steindicke | O | mittel |
| Steinformat | O | mittel |
| Fugenfüllung | - | mittel |
| Fugenmaterial | - | leicht |
| Alter | - | --- |
| Steinmaterial | - | leicht |
| Witterung | - | --- |
| Tragschicht | -- | --- |

++ = stark + = weniger stark O = mittel - = schwach -- = sehr schwach

In der Reihung der Parameter nach der Höhe ihres Einflusses kommt der **Fugenbreite** ein starker Einfluss zu. Sie ist zudem bei der Herstellung der Pflasterdecke mit begrenztem Aufwand beeinflussbar.

Die **Verkehrsbelastung** hat, beinahe gleichauf mit der Fugenbreite, ebenso einen starken Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand. Im Gegensatz zur Fugenbreite ist sie in der Regel nicht beeinflussbar, da sie für einen Streckenabschnitt festliegt.

Nach Fugenbreite und Verkehrsbelastung ist der Einfluss der **Bettungsdicke** an dritter Stelle zu nennen. Wie bei der Fugenbreite ist auch hier ein gewisser Aufwand bei der Ausführung zur Beeinflussung erforderlich.

Der nach der Bedeutung des Einflusses folgende Parameter ist die **Neigung der Fläche**. Diese ist durch die äußeren Umstände vorgegeben und könnte nur durch bauliche Veränderungen beeinflusst werden.

Das **Bettungsmaterial** ist unter den Parametern mit starkem Einfluss die letzte Einflussgröße. Bei den Klinkerpflasterflächen noch als Parameter mit „weniger starkem“ Einfluss aufgeführt, ist die Bedeutung des Bettungsmaterials bei der Auswertung der

Betonsteinflächen deutlicher geworden. Das Bettungsmaterial gehört zu den leicht zu beeinflussenden Parametern.

Nach dem Bettungsmaterial folgt dem Einfluss nach mit „weniger stark“ der **Verband**. Er ist leicht zu beeinflussen, da er in der Ausschreibung vorgegeben werden kann.

In der Bedeutung des Einflusses auf den horizontalen Verschiebungswiderstand folgt nach dem Verband die **Steinform**, die unter den Parametern mit mittlerem Einfluss die größte Bedeutung hat. Einerseits ist die Steinform an sich durch eine entsprechende Ausschreibung leicht zu beeinflussen. Andererseits muss jedoch berücksichtigt werden, dass, je nach Steinform, für die Steine selbst, aber auch für die unterschiedlich schwierige Verlegung beispielsweise durch einen möglichen bzw. nicht möglichen Maschineneinsatz deutlich unterschiedliche Kosten anfallen. Somit muss hier insgesamt von einem mittleren Aufwand zur Beeinflussung ausgegangen werden.

Die **Steindicke** und das **Steinformat** haben in dieser Zusammenstellung einen untergeordneten Einfluss und liegen demnach erst im mittleren Bereich. Unabhängig davon gehören beide zu den mit mittlerem Aufwand beeinflussbaren Parametern, da dickere und größere Steine auch einen höheren Preis bedeuten.

Der Einfluss der **Fugenfüllung** erreicht nur dann eine gewisse Bedeutung, wenn die Fugen deutlich zu gering verfüllt sind. In diesem Fall ist der Einfluss allerdings durchaus erheblich. Sind die Fugen jedoch gut verfüllt, was in diesem Zusammenhang einen Fugenfüllungsgrad von 85 % und mehr bedeutet, ist der Einfluss nur „schwach“. Eine Beeinflussung ist verhältnismäßig einfach, wenn auch mit einem gewissen Aufwand, beispielsweise im Rahmen der Unterhaltung, verbunden.

Der Einfluss des **Fugenmaterials** auf den horizontalen Verschiebungswiderstand ist bei diesen Untersuchungen eher als „schwach“ zu bewerten, wobei berücksichtigt werden muss, dass er auch von den Einflüssen durch andere Parameter überlagert wird. Das Fugenmaterial ist ein leicht beeinflussbarer Parameter.

Das **Alter** hat nur im neuen Zustand der Pflasterfläche einen stärkeren Einfluss, der allerdings nicht unmittelbar ist, sondern mit anderen Parametern wie z. B. der Fugenfüllung und der Verkehrsbelastung zusammenhängt. Das Alter ist kein beeinflussbarer Parameter.

Ein Einfluss des **Steinmaterials** wurde im Vergleich der untersuchten Flächen mit Klinkerpflaster sowie mit Betonsteinpflaster nicht ermittelt, wobei auch eine Überlagerung durch die Einflüsse anderer Parameter berücksichtigt werden muss. Das Steinmaterial ist somit ein Parameter mit schwachem Einfluss, der gleichzeitig zu den leicht zu beeinflussenden Parametern gezählt werden kann.

Die Einflüsse durch **Witterung** sind als gering anzusehen, wobei ein direkter Einfluss infolge der Überlagerung durch andere Einflüsse unklar bleibt. Dieser Parameter kann in der Regel nicht beeinflusst werden.

Ein Einfluss der **Tragschicht** war in diesem Zusammenhang nicht nachzuweisen. Unabhängig davon wäre die Tragschicht eine leicht zu beeinflussende Einflussgröße.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Schlussfolgerungen und Ausblick zu den Spreizversuchen

Aus den Ergebnissen der 422 auswertbaren **Spreizversuche** an 138 unterschiedlichen Pflasterflächen können bezüglich des Einflusses der 16 untersuchten Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand, geordnet nach der Bedeutung des Einflusses, folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Einen deutlich positiven Einfluss hat eine **Fugenbreite** im Bereich von 3 bis 6 mm, was nahezu den im Regelwerk vorgesehenen Fugenbreiten von 3 bis 5 mm entspricht. Fugenbreiten unter- sowie oberhalb dieses Bereiches setzen den horizontalen Verschiebungswiderstand erheblich herab. Die Einhaltung der Fugenbreite ist die wichtigste Voraussetzung, um eine Pflasterfläche mit hohem horizontalem Verschiebungswiderstand herzustellen.
- Bei steigender **Verkehrsbelastung** wird eine bessere Einbettung der Steine und damit eine stärkere Verzahnung der Steine mit der Bettung erzielt, was zu einem deutlichen Anwachsen des horizontalen Verschiebungswiderstandes führt.
- In Zusammenhang mit der Verkehrsbelastung steht der starke Einfluss der **Bettungsdicke**, die maßgeblich die Einbettung der Steine beeinflusst. Mit einer Bettungsdicke in der vom Regelwerk vorgesehenen Höhe (3 bis 5 cm) sowie auch etwas darüber (bis ca. 5,5 cm) wird eine Verbesserung des horizontalen Verschiebungswiderstandes erreicht. Eine noch dickere Bettung hingegen begünstigt nicht nur höhere horizontale Verschiebungen, sondern bewirkt darüber hinaus auch größere vertikale Verformungen [13, 19, 23, 24 u. a.].
- Die **Neigung der Fläche** ist neben der Verkehrsbelastung der zweite nicht durch den Aufbau der Pflasterfläche bestimmte Parameter mit hohem Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand. Bei zunehmender Neigung der Fläche wächst der horizontale Anteil der Verkehrsbelastung an und trägt damit zu einer Verfestigung der Pflasterdecke bzw. zu einer Erhöhung des horizontalen Verschiebungswiderstandes bei.
- Beim Vorgang der Einbettung der Steine kommt neben der Bettungsdicke auch dem **Bettungsmaterial** hohe Bedeutung zu. Dabei ist zusätzlich eine Abstimmung des Größtkorns mit der Fugenbreite wichtig, um eine Verzahnung der Steine mit der Bettung zu ermöglichen. Hierbei ist eine Verringerung der Verschiebungen und Steigungswinkel bei größerem Größtkorn zu beobachten. Neben dem Größtkorn beeinflusst auch die Art des Bettungsmaterials diese Verzahnung. Die Verwendung von Brechsand oder Brechsand-Splitt-Gemisch ergibt dabei durch die bruchflächigen Körner eine stärkere Verzahnung und damit höhere ho-

horizontale Verschiebungswiderstände als das bei Natursand und Natursand-Kies der Fall ist.

- Obwohl der **Verband** einen etwas weniger starken Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand aufweist als die bisher aufgeführten Parameter, ist er dennoch eine wichtige Einflussgröße. Den höchsten Widerstand bieten Flächen, die im Ellbogenverband verlegt worden sind, gefolgt vom Läuferverband quer zur Fahrtrichtung sowie vom Fischgrätverband. Während die Unterschiede zwischen diesen drei Verbänden eher geringer ausfallen und somit mit jedem dieser Verbände Flächen mit hohem horizontalem Verschiebungswiderstand hergestellt werden können, ist der Abstand zum Läuferverband längs zur Fahrtrichtung, der den geringsten Widerstand aufweist, größer.
- Bezüglich des Einflusses der **Steinform** kann allgemein festgestellt werden, dass Flächen mit Verbundsteinen einen höheren horizontalen Verschiebungswiderstand aufweisen, als Flächen mit Rechtecksteinen, wobei die Unterschiede jedoch nicht in jedem Fall eindeutig sind. So lässt sich ein großer Teil der untersuchten Verkehrsflächen in die drei Kategorien von Shackel [35] einteilen. Nach diesen Kategorien liefern Verbundsteine bessere Ergebnisse als Steine ohne Verbund, also auch als Rechtecksteine. Unter den Verbundsteinen ergeben dabei die Steine mit Vier-Seiten-Verbund bessere Ergebnisse als die mit Zwei-Seiten-Verbund. Andererseits wurden vor allem bei einer ganzen Reihe von Flächen mit Rechteck- bzw. Quadratsteinen Ergebnisse in Höhe der Werte der Verbundsteine ermittelt. Somit bleibt insgesamt festzustellen, dass die Steinform ein bedeutender Parameter für die Höhe des horizontalen Verschiebungswiderstandes ist, gleichzeitig jedoch der Unterschied zwischen Rechteck- bzw. Quadratsteinen und Verbundsteinen geringer ausfällt als erwartet.
- Die **Steindicke** weist lediglich einen mittleren Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand auf. Tendenziell ist ein Einfluss der Steindicke in der Art, dass eine größere Dicke einen höheren Widerstand bewirkt, zu erwarten.
- Das **Steinformat** hat eine untergeordnete Bedeutung für den horizontalen Verschiebungswiderstand. Zwar neigen tendenziell größere Steine zu geringeren Verschiebungen, jedoch sind die gefundenen Unterschiede gering und nicht eindeutig, so dass insgesamt der Einfluss des Steinformates bzw. der Steingröße als begrenzt bezeichnet werden kann.
- Die **Fugenfüllung** gehört hier zu den Parametern mit schwachem Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand. Zwar gilt prinzipiell, dass die horizontalen Verschiebungen bei einer Verringerung der Fugenfüllung größer werden, jedoch lagen bei den hier zugrunde liegenden Untersuchungen nur Fugenfüllungsgrade im gut verfüllten Bereich (85 bis 100 %) vor, so dass dieses Verhalten nicht

beobachtet werden konnte. Zu erwarten ist ein deutlicherer Einfluss des Fugenfüllungsgrades in einem Bereich ab ca. 70 bis 60 %. Insgesamt hat der Fugenfüllungsgrad somit ab einem Mindestwert von ca. 85 % einen untergeordneten Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand.

- Der Einfluss des **Fugenmaterials** auf den horizontalen Verschiebungswiderstand ist als eher schwach anzusehen. Entscheidend dabei ist vermutlich eher, wie gut das Fugenmaterial in die Fugen eingebracht werden kann. Zusätzlich wird der Einfluss von den Einflüssen durch andere Parameter überlagert, was eine weitergehende Bewertung erschwert.
- Das **Alter** selbst hat keinen unmittelbaren Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand. Vielmehr hängt sein Einfluss mit anderen Parametern wie z. B. der Fugenfüllung und der Verkehrsbelastung zusammen. Wenn auch die Untersuchungen keine eindeutigen Rückschlüsse zulassen, so kann dennoch, auch vor dem Hintergrund praktischer Erfahrungen, bei neuen und sehr jungen Flächen bis zu einem Alter von etwa ein bis zwei Jahren unter Verkehr von einem geringeren horizontalen Verschiebungswiderstand ausgegangen werden.
- Der Einfluss des **Steinmaterials** auf den horizontalen Verschiebungswiderstand kann als schwach angesehen werden. Hier wurden Verkehrsflächen mit Klinkerpflaster sowie mit Betonsteinpflaster verglichen, so dass diese Aussage auch nur diese beiden Pflasterarten betrifft.
- Die Einflüsse der **Witterung** auf den horizontalen Verschiebungswiderstand sind als gering anzusehen.
- Ein Einfluss der **Tragschicht** auf den horizontalen Verschiebungswiderstand war nicht nachzuweisen, obwohl sowohl Schottertragschichten als auch Asphalt- sowie Betontragschichten als Unterlage der Pflasterdecken vorgefunden wurden.
- Die **Spreizrichtung** und ihr Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand müssen im Zusammenhang mit dem vorliegenden Verband gesehen werden, der wiederum normalerweise nach der Fahrtrichtung ausgewählt wird. Der direkte Einfluss der Spreizrichtung ist insgesamt als schwach zu bewerten. Aus Gründen der Versuchsdurchführung sowie der Einheitlichkeit sollten Spreizversuche generell in Fahrtrichtung durchgeführt werden.

Durch die übereinstimmenden Ergebnisse gleicher Parameter bei den unterschiedlichen untersuchten Flächen wird deutlich, dass die Übertragbarkeit der festgestellten Zusammenhänge sowohl auf alle untersuchten Flächen als auch darüber hinaus auf andere Pflasterflächen gewährleistet ist.

7.2 Empfehlungen für einen Grenzwert

Die Untersuchungsergebnisse haben keinen direkten Einfluss des Alters der Pflasterfläche auf den horizontalen Verschiebungswiderstand aufgezeigt. In allen Fällen wurde dieser durch die Einflüsse der anderen Parameter überlagert. Der Einfluss des Alters wirkt sich vielmehr indirekt z.B. über den Fugenfüllungsgrad oder die Verkehrsbelastung aus.

Wenn auch die Untersuchungen keine eindeutigen Rückschlüsse zulassen, so kann vor dem Hintergrund praktischer Erfahrungen bei neuen und sehr jungen Flächen bis zu einem Alter von etwa ein bis zwei Jahren unter Verkehr von einem geringeren horizontalen Verschiebungswiderstand ausgegangen werden. Da keine neuen bzw. sehr jungen Flächen gemessen werden konnten, ist anzunehmen, dass alle hier untersuchten Flächen bereits in diesem Sinne „verfestigt“ waren.

Demnach konnten die notwendigen Erkenntnisse für eine Festlegung eines **Abnahmewertes** nach dem Bau einer Pflasterfläche im Rahmen dieser Untersuchungen nicht gewonnen werden. Es wäre sinnvoll, entsprechend konzipierte Untersuchungen an neuen Pflasterflächen durchzuführen. Spreizuntersuchungen an neuen Pflasterflächen über einen Zeitraum von ca. 1-2 Jahren nach der Fertigstellung würden Erkenntnisse über die Entwicklung des horizontalen Verschiebungswiderstandes in den ersten Lebensjahren einer Pflasterfläche liefern.

Die im Folgenden aufgeführten Werte sind dementsprechend als Richtwerte für eine Diskussion um einen Grenzwert zu verstehen, der z.B. bei gutachterlichen Untersuchungen an Pflasterflächen zum Einsatz kommen könnte, die ein Alter > 5 Jahren aufweisen. Darüber hinaus haben Erfahrungen bei den Untersuchungen gezeigt, dass eine Beurteilung aufgrund dieser Werte nur für Pflasterflächen sinnvoll ist, die unter einer entsprechend hohe Verkehrsbelastung liegen. Pflasterflächen, wie z.B. Gehwege oder niedrig frequentierte PKW-Parkplätze, können auch trotz wesentlich höherer Gesamtverschiebungen und Steigungswinkel einwandfrei funktionsfähig sein.

Die **Tabellen 7.1** und **7.2** zeigen Werte für den Steigungswinkel der Regressionsgeraden und die Gesamtverschiebung bei einer 95%- und einer 99% - Summenhäufigkeit. Darin sind Werte für die Spreizversuche insgesamt und unterteilt nach Versuchen an Klinkerpflasterflächen, Betonsteinpflasterflächen und Verbundsteinpflasterflächen an der RUB, jeweils für die Einzelversuche und die Versuchsreihen (Mittelwerte) angegeben.

Tabelle 7.1: Steigungswinkel der Regressionsgeraden bei 95%- und 99%-Summenhäufigkeit

| Steigungswinkel der Regressionsgeraden | | n | 95 % | | | 99 % | | |
|---|----------------------------|-----|-------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|
| | | | Steigungs- winkel α | => $\Delta s/kN$ | => Verschiebung bei 25 kN | Steigungs- winkel α | => $\Delta s/kN$ | => Verschiebung bei 25 kN |
| | | | [°] | [mm/kN] | [mm] | [°] | [mm/kN] | [mm] |
| Einzel- versuche | Gesamt | 422 | 17,5 | 0,32 | 7,9 | 23,1 | 0,43 | 10,7 |
| | Klinkerpflaster | 69 | 14,7 | 0,26 | 6,6 | 20,0 | 0,36 | 9,1 |
| | Betonsteinpflaster | 186 | 19,4 | 0,35 | 8,8 | 22,5 | 0,41 | 10,4 |
| | Verbundpflaster RUB | 162 | 15,9 | 0,28 | 7,1 | 18,8 | 0,34 | 8,5 |
| Versuchs- reihen (Mittelwerte) | Gesamt | 142 | 15,4 | 0,28 | 6,9 | 20,9 | 0,38 | 9,5 |
| | Klinkerpflaster | 23 | 14,6 | 0,26 | 6,5 | 15,3 | 0,27 | 6,8 |
| | Betonsteinpflaster | 64 | 16,3 | 0,29 | 7,3 | 21,2 | 0,39 | 9,7 |
| | - <i>Rechtecksteine</i> | 35 | 19,7 | 0,36 | 9,0 | 21,2 | 0,39 | 9,7 |
| | - <i>Verbundsteine</i> | 29 | 13,0 | 0,23 | 5,8 | 13,8 | 0,25 | 6,2 |
| | Verbundpflaster RUB | 55 | 14,7 | 0,26 | 6,5 | 19,5 | 0,35 | 8,8 |

Tabelle 7.2: Gesamtverschiebung bei 95%- und 99%-Summenhäufigkeit

| Gesamtverschiebung bei 25 kN | | n | 95 % | | | 99 % | | |
|---|----------------------------|-----|---------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------|----------------------------------|
| | | | Verschiebung bei 25 kN | => $\Delta s/kN$ | => Steigungs- winkel α | Verschiebung bei 25 kN | => $\Delta s/kN$ | => Steigungs- winkel α |
| | | | [mm] | [mm/kN] | [°] | [mm] | [mm/kN] | [°] |
| Einzel- versuche | Gesamt | 432 | 8,0 | 0,32 | 17,8 | 12,3 | 0,49 | 26,1 |
| | Klinkerpflaster | 67 | 7,1 | 0,28 | 15,9 | 9,7 | 0,39 | 21,3 |
| | Betonsteinpflaster | 186 | 8,3 | 0,33 | 18,3 | 9,9 | 0,40 | 21,7 |
| | Verbundpflaster RUB | 159 | 7,4 | 0,30 | 16,5 | 10,8 | 0,43 | 23,3 |
| Versuchs- reihen (Mittelwerte) | Gesamt | 144 | 7,9 | 0,31 | 17,2 | 9,6 | 0,39 | 21,3 |
| | Klinkerpflaster | 23 | 7,0 | 0,28 | 15,7 | 7,9 | 0,32 | 17,6 |
| | Betonsteinpflaster | 64 | 8,0 | 0,32 | 17,7 | 9,7 | 0,39 | 21,3 |
| | - <i>Rechtecksteine</i> | 35 | 8,6 | 0,34 | 18,9 | 9,6 | 0,38 | 21,0 |
| | - <i>Verbundsteine</i> | 29 | 6,6 | 0,26 | 14,8 | 6,6 | 0,26 | 14,8 |
| | Verbundpflaster RUB | 55 | 7,7 | 0,31 | 17,1 | 9,9 | 0,39 | 21,5 |

Zudem enthalten die **Tabellen 7.1** und **7.2** mit n die Anzahl der Versuche bzw. Versuchsreihen, deren Ergebnisse in die angegebenen Werte eingeflossen sind. Die jeweils zusätzlichen Spalten „=> $\Delta s/kN$ “ (mittlere Zunahme der Verschiebung pro kN) und „=> Verschiebung bei 25 kN “ bzw. „=> Steigungswinkel α “ geben Werte an, die sich aus der gemessenen Gesamtverschiebung bzw. dem gemessenen Steigungswinkel theoretisch ergeben würden. Sie dienen dem Vergleich der Werte zwischen den Tabellen und sollen mögliche Einflüsse z.B. aus großen Anfangsverschiebungen aufzeigen. Die zugehörigen Summenhäufigkeitspolygone sind in den **Abbildungen A39** bis **A42** im Anhang dargestellt.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Gesamtverschiebungen für die Einzelversuche und für die Versuchsreihen recht nah beieinander liegen. Bei den Ergebnissen der Steigungswinkel zeigt sich, dass die Steigungswinkel der Einzelversuche und der Versuchsreihen in der gleichen Größenordnung auftreten, die Steigungswinkel der Einzelversuche in der Regel aber etwas größer sind.

Insgesamt ist es ausreichend, sich auf die Werte der Versuchsreihen (Mittelwerte) zu konzentrieren, da die Abweichung zwischen den Ergebnissen der Einzelwerte und der Mittelwerte recht gering ausfallen. Außerdem wird an dieser Stelle aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse empfohlen, die Bewertung einer Pflasterfläche mit den Ergebnissen von mindestens drei Spreizversuchen durchzuführen.

Die Mittelwerte der 95 % - Summenhäufigkeiten zeigen für den Steigungswinkel den größten Wert bei den Pflasterflächen aus Betonsteinpflaster mit $16,3^\circ$. Die Flächen mit Verbundpflaster an der RUB und mit Klinkerpflaster zeigen mit $14,7^\circ$ und $14,6^\circ$ fast identische Steigungswinkel. Der Wert für die 95 %-Summenhäufigkeit aller Werte liegt mit $15,4^\circ$ zwischen diesen Steigungswinkeln. Die Werte der 99 %-Summenhäufigkeit zeigen in der Reihenfolge das gleiche Bild mit entsprechend höheren Steigungswinkeln.

Betrachtet man die Werte der Versuchsreihen (Mittelwerte) für die Gesamtverschiebung bei 25 kN , so ist für die 95 %-Summenhäufigkeit wiederum der größte Wert mit 8,0 mm bei den Flächen mit Betonsteinpflaster festgestellt worden. Die Flächen mit Verbundpflaster an der RUB und Klinkerpflaster folgen mit 7,7 mm bzw. 7,0 mm in geringem Abstand. Der Gesamtverschiebungswert für alle untersuchten Flächen liegt bei 7,9 mm. Die Gesamtverschiebungen bei 25 kN für eine 99 %-Summenhäufigkeit liegen erwartungsgemäß etwas höher. Der Maximalwert von 9,9 mm wurde hier durch die Untersuchungen an den Verbundsteinpflasterflächen an der RUB festgestellt. Die Werte für die Betonpflasterflächen und für die gesamten untersuchten Flächen liegen mit 9,7 mm und 9,6 mm knapp darunter. Die Klinkerpflasterflächen zeigen mit 7,9 mm die geringste Gesamtverschiebung bei 25 kN für eine Summenhäufigkeit von 99 %

Allerdings muss dabei beachtet werden, dass die Klinkerpflasterflächen den geringsten Anteil aller Spreizuntersuchungen stellen und dass die Ergebnisse von zwei untersuchten Flächen nicht einbezogen wurden, da die Beurteilung des Allgemeinzustandes einen Grenzfall darstellte. Mit Berücksichtigung dieser Werte würden die Ergebnisse für die Klinkerpflasterflächen wesentlich höher ausfallen. Der Einfluss auf die Werte für die gesamten Pflasterflächen ist aufgrund der im Vergleich zu Gesamtanzahl der untersuchten Flächen geringen Anzahl an untersuchten Klinkerpflasterflächen vernachlässigbar klein.

Auf eine Unterteilung der Pflasterflächen nach Flächen mit Klinkerpflaster und Betonsteinpflaster oder nach Flächen mit Rechtecksteinen und Verbundsteinen wird bei den zur Diskussion gestellten Grenzwerten verzichtet, da die entsprechenden Verteilungsparameter wie das arithmetische Mittel, der Median und das Dichtemittel sich nur wenig unterscheiden, wie in den **Tabellen A31 bis A34** im Anhang zu sehen ist.

Wie schon zu Beginn des Berichts erwähnt, gehören zu einer kompletten Erfassung des horizontalen Verschiebungswiderstandes mit dem Spreizgerät die Betrachtung des Steigungswinkels der Regressionsgeraden **und** der Gesamtverschiebung. Deshalb werden an dieser Stelle für diese Ergebnisse Werte vorgeschlagen, die als Grenzwerte unter Berücksichtigung der entsprechenden Summenhäufigkeit für Pflasterflächen mit einem Alter > 5 Jahren und entsprechender Verkehrsbelastung (s.o.) angesetzt werden können. Die gemessenen Werte sollten kleiner sein als die in **Tabelle 7.3** angegeben.

Tabelle 7.3: Empfohlene Höchstwerte für den Spreizversuch auf Pflasterflächen

| Prüfniveau | 0,05 | | 0,01 | |
|----------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|
| Prüfgröße | Gesamtverschiebung bei 25 kN | Steigungswinkel der Regressionsgeraden | Gesamtverschiebung bei 25 kN | Steigungswinkel der Regressionsgeraden |
| | [mm] | [°] | [mm] | [°] |
| Vorgeschlagener Grenzwert | 8,0 | 15,5 | 9,5 | 21,0 |

8 Zusammenfassung

Pflaster mit seiner langen und wechselvollen Geschichte als Verkehrsflächenbefestigung weist insbesondere in den letzten zehn Jahren eine starke Zunahme bei Produktion und Verlegung auf, wobei der größte Anteil gepflasterter Flächen nach wie vor im kommunalen Bereich eingebaut wird. Bei in jüngerer Zeit vermehrt auftretenden Schadensfällen an Pflasterbefestigungen wird deutlich, dass die Haltbarkeit von Pflasterbefestigungen maßgeblich vom horizontalen Verschiebungswiderstand der Pflasterdecke beeinflusst wird, ein Bereich der noch viele offene Fragen aufweist.

Daher wurde in der vorliegenden Arbeit dem Einfluss verschiedener Parameter einer Pflasterbefestigung auf den horizontalen Verschiebungswiderstand nachgegangen.

Zur Ermittlung des Einflusses der 16 untersuchten Parameter auf den horizontalen Verschiebungswiderstand wurden an insgesamt 138 Verkehrsflächen 422 Versuche mit einem Spreizgerät, begleitet durch ergänzende Untersuchungen zur Charakterisierung des allgemeinen Zustands der Pflasterbefestigungen sowie durch Materialuntersuchungen, durchgeführt. Zur Auswertung der Spreizversuche wurden die Verkehrsflächen nach Klinkerpflasterflächen, Flächen mit Betonsteinpflaster sowie Flächen mit dem Betonverbundstein „SF-Vollverbund“ aufgeteilt.

Die ergänzenden Untersuchungen ergaben insgesamt einen befriedigenden bis sehr guten Zustand der untersuchten Verkehrsflächen.

Durch statistische Betrachtungen wurden Aussagen zur Verteilung der Ergebnisse gewonnen. Auf der Grundlage der Auswertung der Spreizversuche an den Verkehrsflächen konnte eine Reihung der unterschiedlichen Parameter mit Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand der Bedeutung nach qualitativ vorgenommen werden. Die wichtigsten Einflussparameter sind demnach die Fugenbreite und die Verkehrsbelastung, gefolgt von der Bettungsdicke, der Neigung der Fläche sowie dem verwendeten Bettungsmaterial. Etwas weniger starken Einfluss hat der ausgeführte Verband. Steinform, Steindicke und Steinformat sind Parameter mit mittlerem Einfluss auf den horizontalen Verschiebungswiderstand. Der Einfluss der Fugenfüllung erreicht nur dann eine gewisse Bedeutung, wenn die Fugen deutlich zu gering verfüllt sind, während das Fugenmaterial selbst lediglich einen schwachen Einfluss aufweist. Der Einfluss des Alters ist gering, wenn die Flächen etwa mindestens ein bis zwei Jahre unter Verkehr liegen. Einflüsse durch Steinmaterial sowie Witterungseinflüsse sind ebenfalls als gering anzusehen. Ein Einfluss der Tragschicht war in diesem Zusammenhang nicht nachzuweisen, allerdings konnten hier keine sehr unterschiedlichen Tragschichtmaterialien untersucht werden.

Der direkte Einfluss der an einzelnen Verkehrsflächen ebenfalls variierten Spreizrichtung ist insgesamt als schwach zu bewerten.

Durch die übereinstimmenden Ergebnisse gleicher Parameter bei den unterschiedlichen untersuchten Flächen wird deutlich, dass die Übertragbarkeit der festgestellten Zusammenhänge sowohl auf alle untersuchten Flächen als auch darüber hinaus auf andere Pflasterflächen gewährleistet ist.

Da keine Flächen mit einem Alter < 1 Jahr untersucht werden konnten, konnte kein Abnahmewert vorgeschlagen werden. Allerdings reichte die Datengrundlage aus, um Höchstwerte für Prüfungen mit dem Spreizgerät an Pflasterflächen mit einem Alter > 5 Jahren zur Diskussion zu stellen. Diese Werte sind allerdings nur für Pflasterflächen erforderlich, die eine entsprechend große Verkehrsbelastung aufweisen, nicht jedoch für Verkehrsflächen mit reinem Fußgänger- oder Radverkehr.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Der Elsner, Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1998; Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg, 1998
- [2] Vortrag von Ltd. St. BauDir. Kurth, Leiter Amt für Straßen- und Verkehrstechnik, Stadt Köln am 25.09.1998 auf dem Deutschen Straßen- und Verkehrskongreß in Leipzig
- [3] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen - RStO 86, Ausgabe 1986, Ergänzte Fassung 1989, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [4] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen – RStO 2001, Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [5] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken und Plattenbelägen - ZTV P-StB 2000, Ausgabe 2000, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [6] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau ZTV T-StB 95, Ausgabe 1995 / Fassung 1998, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1998
- [7] Jacobs, K.; Herrmann, P.: Fahrbahnbefestigungen für den Kombinierten Ladungsverkehr, Eisenbahningenieur 38 (1987)
- [8] Kraemer, C.; del Val, M. A.; Camarero, A.; Llorca, J.: A practical method of concrete pavement design for ports, 8th International Symposium on Concrete Roads, Lissabon 1998
- [9] Dunker, F.-J.: Hochbelastbare Verkehrs- und Lagerflächen im Hafenbereich, Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 3/97
- [10] Gerrard, J. S.: Review of block paving in UK ports, Proc. First Int. Conf. On Concrete Block Paving, Newcastle 1980
- [11] Emery, J.A.: Concrete Pavers for Aircraft Pavement Surfaces, Journal of Transportation Engineering, Vol. 112, No. 6, November 1986
- [12] Untersuchung über die Verteilung von auftretenden Schub- und Torsionskräften in Pflasterbelägen; FE-Nr.: 06.058 G92A, Bundesministerium für Verkehr, 1997. Federführende Forschungsstelle: Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau, Ruhr-Universität Bochum (RUB)
- [13] Koch, C.: Zum Tragverhalten von Pflasterbefestigungen, Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 13, 1999

- [14] Leutner, R.: Vergleichende Ermittlung der Horizontalverschiebbarkeit der Betonpflastersteine Tegula und Tegula-Tec, Gutachten, Technische Universität Braunschweig, 1998 (unveröffentlicht)
- [15] Krass, K.; Rohleder, M.: Verhalten von Pflasterdecken aus Tegula-Tec – Steinen in der Straßenprüfmaschine, Bericht - Nr. D/05/99, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau, Ruhr-Universität Bochum (RUB), 1999 (unveröffentlicht)
- [16] Dutruel, F.; Dardare, J.: Étude du comportement structurel des chaussées revêtues par des pavés en béton; CERIB publication technique 91, 1987
- [17] Leins, W.: Versuche mit Doppelverbund-Pflastersteinen (BEHATON) am Einzelstein und im Verband, Gutachten, Institut für Straßenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Mai 1968 (unveröffentlicht)
- [18] Shackel, B.: Loading and accelerated trafficking tests on three prototype heavy-duty industrial block pavements, National Institute for Transport and Road Research, Technical Report RP/12/80, Pretoria, South Africa, 1980
- [19] Shackel, B.: Loading and accelerated trafficking evaluations of heavy duty interlocking block pavements in Fremantle, Australian Road Research Board Proceedings, Volume 11, Part 2 1982
- [20] Shackel, B.: A study of the performance of blockpaving under traffic using a heavy vehicle simulator, ARRB Proceedings Volume 10, Part 2 1980
- [21] Shackel, B.: Accelerated trafficking tests of interlocking concrete block pavements, South Africa, Municipal Engineer – May/June 1980
- [22] Shackel, B.: The performance of interlocking block pavements under accelerated trafficking, First Int. Conf. On Concrete Block Paving, Newcastle 1980
- [23] Shackel, B.; Soller, R.; Schmincke, P.: Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß von Bettung und Fugen auf das Verhalten von Decken aus Betonpflastersteinen, Betonwerk + Fertigteil-Technik Heft 1/1984
- [24] Shackel, B.: An experimental investigation of the roles of the bedding and jointing sands in the performance of interlocking concrete block pavements subjected to traffic, South Africa, Concrete Beton No. 19 1980
- [25] Lekso, S.: The use of concrete block pavements for highways, First Int. Conf. On Concrete Block Paving, Newcastle 1980
- [26] Shackel B.; Arora, M. G.: The evaluation of interlocking block pavements, An interim report, Concrete Masonry Association of Australia, Annual Conference, 1978
- [27] Shackel, B.: An experimental investigation of the response of interlocking concrete block pavements to simulated traffic loading, Seminar on Interlocking Concrete Block Pavements, Australian Road Research Board, 1978

- [28] DIN 18134: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch, Entwurf August 1995
- [29] Merkblatt für Ebenheitsprüfungen, Ausgabe 1976, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- [30] DIN 18125-2: Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldversuche, Ausgabe Mai 1986
- [31] Staatliches Bauamt Nordrhein Westfalen, Pläne, Baudokumentationen, 1960
- [32] DIN 18318: Verkehrswegebauarbeiten; Pflasterdecken, Plattenbeläge, Einfassungen - Ausgabe Juni 1996
- [33] Witte, B.; Schmidt, H.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen; Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1991
- [34] Sachs, L.: Angewandte Statistik; Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1997
- [35] Shackel, B.: Handbuch Betonsteinpflaster, Beton-Verlag, Düsseldorf 1996
- [36] Shackel, B.: Beton-Verbundsteinpflaster, Betonwerk + Fertigteil-Technik Heft 8/1987