

Schlußbericht

**Einfluß von Temperatur und Temperaturrate
auf den Verformungswiderstand
frisch verlegter Asphaltdeckschichten
während Abkühlung und Wiedererwärmung**

Antragsteller:	Deutsches Asphaltinstitut Schieffelingweg 6 53123 Bonn
Forschungsnehmer:	Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. W. Arand Institut für Straßenwesen Technische Universität Braunschweig Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig
Bearbeiter:	Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Wolfgang Arand Dipl.-Ing. Ulf Zander

Braunschweig, 15. April 1998



Deutsches Asphaltinstitut e. V.
Schieffelingweg 6
D-53123 Bonn
Tel.: (02 28) 9 79 65-0
Fax: (02 28) 9 79 65-11

Einfluß von Temperatur und Temperaturrate auf den Verformungswiderstand frisch verlegter Asphaltdeckschichten während Abkühlung und Wiedererwärmung

Inhalt

	Seite
0. Kurzfassung	
1. Einführung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Stand der Kenntnisse	2
1.3 Ziel des Forschungsvorhabens	6
1.4 Administratives	7
2. Untersuchungsmethodik	8
2.1 Ansprache der Viskosität von Bitumen	8
2.1.1 Physikalische Grundlagen	9
2.1.2 Bitumenarten und -sorten	16
2.1.3 Das HAAKE-Rheometer RheoStress RS 100	17
2.1.3.1 Beschreibung des Gerätes	17
2.1.3.2 Voruntersuchungen zur Festlegung der Versuchsbedingungen	20
2.1.4 Hauptversuche	23
2.2 Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten	25
2.2.1 Asphaltkomponenten	27
2.2.1.1 Mineralstoffe	27
2.2.1.2 Bitumen	28
2.2.2 Asphaltdeckschichtvarianten	28
2.2.2.1 Asphaltbeton 0/11 L mit Bitumen B 80 als Bindemittel	29
2.2.2.2 Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen B 65 als Bindemittel	29
2.2.2.3 Splittmastixasphalt 0/11 S mit Bitumen B 65 als Bindemittel	30
2.2.3 Modalitäten der Temperierung	31
2.2.3.1 Grundlagen nach Bossemeyer	32
2.2.3.2 Vorgaben für die Temperierung im Wärme-Kälte-Schrank	37
2.2.4 Der dynamische Stempeleindringversuch	46
2.2.4.1 Probekörperherstellung und Probenvorbehandlung	47
2.2.4.2 Erfassung der Prüfergebnisse	50
2.3 Mathematische Instrumentarien zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse	52
2.3.1 Einfache lineare Regressionsanalyse	52
2.3.2 Signifikanztest	54
2.3.3 Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation	55
2.3.4 Varianzanalyse der zweifachen Klassifikation	61

2.3.5	Einfacher Varianzvergleich	61
2.3.6	Einfacher Mittelwertvergleich	62
3.	Untersuchungsergebnisse	64
3.1	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache der Viskosität von Bitumen	64
3.1.1	Zeitspanne für den Übergang von der Expositionstemperatur zur Prüftemperatur	66
3.1.2	Komplexe Viskosität	69
3.1.3	Abhängigkeit der komplexen Viskosität von der Ansteuerung der Prüftemperatur	83
3.2	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten	100
3.2.1	Relative Stempeleindringtiefen in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit	100
3.2.2	Relative Stempeleindringtiefen in Abhängigkeit von der Expositionstemperatur	110
3.2.3	Relative Stempeleindringtiefen in Abhängigkeit von der Expositionsdauer	115
4.	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	126
4.1	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	126
4.1.1	Ansprache der Viskosität von Bitumen	126
4.1.2	Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten	128
4.1.3	Umsetzung der Ergebnisse für die Praxis	130
4.2	Offen gebliebene Probleme	132
5.	Literatur	134

0. Kurzfassung

Eine vorzeitige Freigabe frisch verlegter und noch in der Abkühlphase befindlicher Asphaltdeckschichten kann zur unmittelbaren Entstehung bleibender Verformungen in Form von Spurrinnen führen. An Asphaltdeckschichten, die hinreichend lange - beispielsweise über Nacht - auskühlen können, wird dieses Phänomen in aller Regel nicht beobachtet. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen geförderten Forschungsvorhabens konnten die Ursachen von Verformungsschäden bei vorzeitiger Verkehrsfreigabe frisch verlegter Asphaltdeckschichten untersucht werden. Dabei wurden zwei Hypothesen verfolgt, nämlich daß

- dem Bitumen im Asphalt nach dessen Einbau eine hinreichend lange Zeit gelassen werden muß, um auf der Umwandlung vom Solzustand zum Gelzustand beruhende Strukturen auszubilden, welche die Viskosität des Bitumens erhöhen, und
- Luft in äußerlich abgeschlossenen Hohlräumen von Walzasphalten bei Abkühlung unter einen Unterdruck und bei Wiedererwärmung unter einen Überdruck gerät, wobei durch den zuletzt genannten Vorgang der Verformungswiderstand des Asphalts verbessert wird.

Zur Überprüfung der ersten Hypothese wurde die Viskosität von Bitumen mittels eines Rheometers im Oszillationsversuch bei vier verschiedenen Prüftemperaturen - nämlich + 55 °C, + 40 °C, + 25 °C und + 10 °C - nach Ansteuerung der Prüftemperatur von einem höheren und einem niedrigeren Temperaturniveau aus prüftechnisch angesprochen. Es zeigte sich, daß die Viskosität der drei untersuchten Bitumen bei Ansteuerung der Prüftemperatur von einem um 40 K höheren Temperaturniveau aus um 11 bis 12 % (relativ) niedriger und bei Ansteuerung der Prüftemperatur von einem um 40 K niedrigeren Temperaturniveau aus um 11 bis 12 % (relativ) höher war, als wenn die Prüftemperatur vor der eigentlichen Messung für eine längere Zeit konstant gehalten wurde. Bitumen besitzt also bei gleicher Temperatur in der Wiedererwärmungsphase eine höhere Viskosität als in der Abkühlphase, was sich positiv auf den Verformungswiderstand von Asphalten auswirkt.

Zur Ansprache des Verformungswiderstandes dreier Asphaltdeckschichtvarianten in Abhängigkeit vom Temperaturregime wurde mittels dynamischer Stempeleindringversuche die relative Eindringtiefe erstens nach unterschiedlich schneller Abkühlung und zweitens nach Abkühlung und Wiedererwärmung nach unterschiedlich langer Ruhephase bei tieferen Temperaturen ermittelt. Es konnte nachgewiesen werden, daß einerseits eine schnelle Abkühlung die Entstehung von Verformungen begünstigt, aber andererseits dem Auftreten vorzeitiger Verformungen in 4 cm dicken Asphaltdeckschichten durch eine Ruhephase von 16 Stunden wirkungsvoll begegnet werden kann. Dabei beruht die Verbesserung des Verformungswiderstandes des Asphalts vorrangig auf der Erhöhung der Viskosität des thixotropen Bitumens infolge Strukturbildung und weit weniger auf Druckänderungen in äußerlich unzugänglichen Hohlräumen infolge von Volumen- und Temperaturänderungen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen im Grundsatz die Festlegungen des Bundesministeriums für Verkehr aus seinem Rundschreiben vom 29. September 1997, in dem ausgeführt wird, daß "zur Sicherstellung einer ausreichenden Abkühlung von Deckschichten im Asphaltoberbau ... zwischen Fertigstellung der Deckenbaumaßnahme und Freigabe der Straße (des Straßenabschnitts) für den Verkehr eine Frist von mindestens 24 Stunden vorzusehen" ist. Im Prinzip kann diese Frist bei 4 cm dicken Asphaltdeckschichten auf mindestens 16 Stunden verkürzt werden, sofern eine Nacht in diesen Zeitraum hineinfällt. Bei Asphaltschichten größerer Dicke sollte wegen deren höherer Wärmekapazität die Schonfrist stets zwei Nächte einschließen.

1. Einführung

1.1 Problemstellung

Walzasphalte für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen auf Straßen und Flugplätzen werden durch Leisten einer Verdichtungsarbeit mittels Walzen auf ein in Technischen Regelwerken definiertes Dichteniveau verdichtet. Der Einbau erfolgt in Abhängigkeit von der Art des Asphalts - Asphaltbeton, Splittmastixasphalt oder offenporiger Asphalt - üblicherweise bei Temperaturen zwischen rund 150 °C und rund 190 °C. Mit dem Walzen wird in Abhängigkeit von der Vorverdichtung durch den Fertiger begonnen, sobald ein Befahren der Schicht mit den Geräten möglich ist, ohne daß es zu Verschiebungen des Asphalts kommt. Während des Walzens kühlt die Asphaltschicht aus. Der Walzprozeß muß spätestens dann abgeschlossen sein, wenn die Viskosität des zur Herstellung des Asphaltmischguts verwendeten Bindemittels einen bestimmten Grenzwert erreicht hat. Danach muß die Asphaltschicht auf Umgebungstemperaturen abkühlen, ehe sie dem Verkehr übergeben werden kann.

In der Praxis des Asphaltstraßenbaus ist häufig beobachtet worden, daß eine vorzeitige Freigabe frisch verlegter und noch in der Abkühlphase befindlicher Asphaltdeckschichten zur unmittelbaren Entstehung von bleibenden Verformungen in Form von Spurrinnen geführt hat. Wenn Asphaltdeckschichten hinreichend lange - beispielsweise über Nacht - auskühlen konnten, wurden die erwähnten Verformungsschäden in aller Regel nicht registriert.

Bisher ist nicht bekannt, bei welchen - möglicherweise auch durch die Temperaturrate, also durch die Änderung der Temperatur mit der Zeit beeinflussten - Temperaturen frisch verlegte Asphaltdeckschichten erstmals befahren werden dürfen, um die Gefahr des Entstehens vorzeitiger Verformungen zuverlässig zu vermeiden. Dieses Problem ist deshalb für die Straßenbaupraxis von großer Bedeutung, weil einerseits der Auftraggeber naturgemäß ein großes Interesse daran hat, frisch hergestellte Verkehrsflächen ohne längere Sperrzeiten möglichst früh dem Verkehr zu übergeben, und andererseits dem Auftragnehmer daran gelegen ist, daß die Ver-

kehrsübergabe erst zu einem Zeitpunkt erfolgt, an dem die Gefahr des frühzeitigen Auftretens bleibender Verformungen nicht mehr besteht. Das durch die konkurrierenden Forderungen des Auftraggebers nach möglichst frühzeitiger Verkehrsfreigabe und des Auftragnehmers nach späterer Verkehrsfreigabe entstehende Dilemma läßt sich nur dann lösen, wenn nach Maß und Zahl zuverlässig angegeben werden kann, bei welchen Temperaturen - gegebenenfalls in Abhängigkeit von der Abkühlrate - die Gefahr des Entstehens bleibender Verformungen unmittelbar nach Verkehrsübergabe nicht mehr existiert.

1.2 Stand der Kenntnisse

Als Ursachen für die Entstehung von Verformungen frisch verlegter Asphaltdeckschichten während der Abkühlphase werden unter Fachleuten drei Phänomene diskutiert:

- im Asphalt vorhandene, fein verteilte Feuchte (Wasser),
- eine Strukturbildung im Bitumen und
- Luftunterdruck in äußerlich abgeschlossenen Hohlräumen von Walzasphalten.

Das Problem der **Kernfeuchte** in Mineralstoffen haben Potschka et al. [19] untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß "der Effekt der unvollständigen Entwässerung nicht allein als ursächlich" für das schnelle Auftreten bleibender Verformungen in frisch verlegten Asphaltdeckschichten "herangezogen werden kann". Ungeachtet dessen versuchte Huschek [15] den Umstand zu nutzen, daß bestimmte Mineralstoffarten bei bestimmten Temperaturen physikalisch gebundenes Wasser abgeben, um die Mischtemperaturen herabsetzen und bei der Verdichtung von Walzasphalten an Verdichtungsarbeit sparen zu können. Die Auswirkungen des im Dampfzustand das Bindemittelvolumen vergrößernden und gleichzeitig die Viskosität des Bitumens herabsetzenden Wassers auf die mechanischen Eigenschaften der Asphalte unmittelbar nach Verlegung und im Gebrauchszustand waren nicht Gegenstand der Untersuchungen. Ganz allgemein wurde das Problem des **slow**

setting unter Einschluß der Wirkung des Wassers in mehreren Gremien behandelt, ohne daß sich daraus für das in Rede stehende Forschungsvorhaben verwertbare Lösungsansätze ergaben. Das Problem der Feuchte wird daher hier nicht weiter verfolgt.

Eine zweite Hypothese sieht die Ursachen des Auftretens vorzeitiger Verformungen in frisch verlegten Asphaltdeckschichten in einer **Strukturbildung im Bitumen**. Die Viskosität von Bitumen bei einer bestimmten Temperatur hängt nach Auffassung zahlreicher Fachleute nicht nur von der Temperatur an sich, sondern auch von dem Umstand ab, ob die Annäherung an die Prüftemperatur von einem höheren oder niedrigeren Temperaturniveau aus erfolgt. Als Ursache für solche Erscheinungen können Strukturbildungseffekte verantwortlich gemacht werden, die auf einer langsamen und nur zögernd ablaufenden Einstellung innerer Assoziations-Dissoziations-Gleichgewichte im Bitumen ohne Beeinflussung der Massenbilanz beruhen und von Viskositätsänderungen begleitet sind. Effekte der beschriebenen Art konnten von Zenke [25] und auch im Rahmen einer Ringuntersuchung des Arbeitskreises "Bitumen" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [14, Halfmann] nachgewiesen werden. Es ist unmittelbar einleuchtend, daß derartige Vorgänge den Verformungswiderstand von Asphaltdeckschichten beeinflussen.

Die dritte Hypothese besagt, daß beim Verdichten frisch verlegter Asphaltdeckschichten in sich abgeschlossene, äußerlich unzugängliche Hohlräume entstehen, deren Größe anhand des Unterschiedes zwischen dem rechnerischen Hohlraumgehalt und der Wasseraufnahme in erster Näherung abgeschätzt werden kann. Die in den abgeschlossenen Hohlräumen eingeschlossene Luft gerät **bei Abkühlung** alleine wegen der Temperaturänderungen unter einen **Unterdruck**. Dieser Vorgang wird durch die thermisch bedingte Volumenkontraktion des Bindemittels beim Abkühlen und die dadurch verursachte Volumenvergrößerung der abgeschlossenen Hohlräume verstärkt. Beide Vorgänge folgen dem Boyle-Mariotteschen Gesetz und setzen den Asphalt unter eine auf Verringerung des Gesamtvolumens gerichtete **Vorspannung**. Werden dieser Vorspannung verkehrslastbedingte Druckspannungen überlagert, so kann dieses Verformungen zur Folge haben, die größer sind als die-

jenigen, die bei gleicher Temperatur auftreten, wenn - bei gleicher Verkehrsbeanspruchung - nach Erwärmung des Asphalts die Luft in den abgeschlossenen Hohlräumen unter einem Überdruck steht.

Will man sich dem Problem der Entstehung vorzeitiger Verformungen in frisch verlegten Asphaltdeckschichten wissenschaftlich nähern, so ist zunächst die Kenntnis der **Temperaturen in Asphaltdeckschichten** in Abhängigkeit von dem geometrischen Ort und der Zeit erforderlich. Erste Überlegungen zum Wärmeaustausch im Straßenkörper stellte Klein [16] an. Mit Hilfe theoretischer Betrachtungen gelang ihm die Auswertung von Laboratoriumsversuchen zum Wärmefluß in Asphalt-schichten. In Fortsetzung dieser Arbeiten schuf Bossemeyer [7, 8] die Voraussetzungen dafür, die Abkühlung von Asphalt-schichten in der Praxis durch zweckmäßige Algorithmen zu erfassen. Gegen Ende der siebziger und zu Beginn der achtziger Jahre begann man in Australien [9, Dickinson], der Bundesrepublik Deutschland [17, Krebs und Böllinger] sowie Großbritannien [21, Robinson] damit, den Wärmehaushalt in Asphaltbefestigungen durch meteorologische Einflüsse zu erklären. Dieser Gedanke wurde am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig konsequent weiter verfolgt. Inzwischen konnten die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, auf der Grundlage meteorologischer Standardmeßgrößen - nämlich der Globalstrahlung, der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchte - die Fahrbahnoberflächentemperaturen für beliebig lange Zeiträume mit sehr guter Annäherung an die Wirklichkeit zu simulieren und aus den Oberflächentemperaturen unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode Asphaltkörpertemperaturen für beliebige geometrische Orte und Zeiten zu berechnen [2, Arand, Dörschlag und Pohlmann; 18, Pohlmann]. Durch Anwendung der Modellvorstellungen zur Berechnung von Fahrbahntemperaturen auf elf hessische Straßen konnte widerspruchsfrei deren Zustandsentwicklung bis zum Eintreten eines ersten Risses beschrieben und somit das Modell validiert werden [4, Arand und Lorenz]. Damit sind die Vorbedingungen dafür erfüllt, in der Praxis auftretende Temperaturverteilungen bei Abkühlung und Wiedererwärmung mit einer ausreichenden Präzision nachzubilden, was notwendig ist, wenn im Laboratorium in der

Natur ablaufende Vorgänge nachempfunden werden sollen, da das mechanische Verhalten von Asphalten in hohem Maße durch die Temperatur geprägt wird.

Schließlich sind Asphalte für die Herstellung von Verkehrswegebefestigungen thermo-rheologische Stoffe. Das bedeutet, daß ihr mechanisches Verhalten von der Temperatur abhängt. Dieses ist auf die thermo-viskosen Eigenschaften des Bindemittels Bitumen zurückzuführen, dessen Viskosität sich mit der Temperatur ändert. Bei hohen Temperaturen kann Bitumen als rein-viskose Flüssigkeit im Newtonschen Sinne gelten; bei sehr tiefen Temperaturen verhält es sich dagegen auch elastisch. Dabei deuten bestimmte, in der Natur beobachtete Phänomene darauf hin, daß die Viskosität des Bitumens nicht nur von der Temperatur selbst, sondern auch davon abhängt, ob die gerade betrachtete **Temperatur** durch **Abkühlung von einem höheren Niveau** oder durch **Erwärmung von einem niedrigeren Niveau aus** erreicht worden ist. Nachgewiesen wurden solche Einflüsse im Rahmen der bereits erwähnten Ringanalyse, bei der Penetrationen von Bitumen nach unterschiedlicher thermischer Vorbehandlung gemessen wurden. Die Auswertung durch Halfmann [14] ergab, daß bei arithmetischen Mitteln von rund 80 mm/10 die im Erwärmungstrend gemessenen Penetrationen um durchschnittlich 8 mm/10 kleiner waren als die im Abkühlungstrend gemessenen. Die geschilderten thermisch-energetischen Effekte, die auf Umwandlungen vom Sol-Zustand zum Gel-Zustand und umgekehrt beruhen [25, Zenke], können durchaus die Ursache thermo-mechanischer Phänomene bei Asphalten sein.

Die prüftechnische Behandlung des erörterten Problems setzt das Vorhandensein eines Prüfverfahrens zur zuverlässigen **Ansprache des Verformungswiderstandes** von Asphalten im Bereich der Gebrauchstemperaturen voraus. Mit diesem Phänomen hat sich nach dem Hitzesommer 1976 eine internationale Kommission beschäftigt [1, Arand et al.], in welcher die Ursachen der Entstehung bleibender Verformungen und Verfahren zu ihrer prüftechnischen Ansprache diskutiert worden sind. Besondere Bedeutung wurde dem statischen und dem dynamischen Kriechtest, dem dynamischen Stempleindringversuch und dem Spurbildungsversuch beigemessen. In der Praxis zeigte sich jedoch, daß die genannten Versuchstypen

nicht uneingeschränkt auf unterschiedliche Asphaltarten anwendbar sind. Dieser Umstand war Veranlassung dazu, am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig einen triaxialen Druckschwellversuch zu entwickeln und mit drei anderen Verfahren zur prüftechnischen Ansprache des Verformungswiderstandes zu vergleichen [5, Arand, von der Decken], und zwar dem dynamischen Kriechtest, dem dynamischen Stempleindringversuch und dem Spurbildungstest. Die vergleichende Bewertung der vier Prüfverfahren stützte sich auf die Untersuchung von Proben aus Straßen mit bekannten Verformungen zum Zeitpunkt der Probenahme, deren Wetter- und Verkehrsgeschichte jeweils bekannt war. Als Resümée der Untersuchungen darf festgestellt werden, daß die Ergebnisse der dynamischen Triaxialversuche bei den untersuchten Walzasphalten am besten mit den in der Praxis beobachteten Verformungen korrelierten. Da der dynamische Triaxialversuch wegen der komplizierten Probevorbereitung nicht dafür geeignet ist, den Verformungswiderstand von Asphalten in der Abkühlphase zu untersuchen, wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auf den **dynamischen Stempleindringversuch** zurückgegriffen, dessen Eignung zur prüftechnischen Ansprache des Verformungswiderstandes von Walzasphalten durch das erwähnte Forschungsvorhaben ebenfalls als nachgewiesen gelten darf.

1.3 Ziel des Forschungsvorhabens

Im Rahmen des geplanten Forschungsvorhabens soll versucht werden, zuverlässige Erkenntnisse über den frühestmöglichen Zeitpunkt einer die oben geschilderten Nachteile vermeidenden Belastung frisch verlegter Asphaltdeckschichten durch den Verkehr zu ermitteln, um damit einen Beitrag zur Vermeidung von Fröhschäden in Form von bleibenden Verformungen zu leisten.

Zunächst sollen Viskositätsmessungen an den zum Einsatz kommenden Bitumen bei verschiedenen Temperaturen nach Ansteuerung der Prüftemperatur von oben beziehungsweise von unten her erfolgen.

Danach sollen an zylindrischen Asphaltprobekörpern aus Asphaltbetonen beziehungsweise Splittmastixasphalten auf einer Impulsprüfmaschine dynamische Stempel Eindringversuche zur Ansprache des Verformungswiderstandes durchgeführt werden. Zur Simulation der Bedingungen während unterschiedlich schneller Abkühlung werden die Asphaltproben nach Erreichen der Prüftemperatur bei verschiedenen und während des Versuches selbst konstant zu haltenden Temperaturen teilflächig durch Druckschwelllasten beansprucht. Zur Simulation der Bedingungen bei Wiedererwärmung erfolgt die Druckschwellbeanspruchung der Asphaltproben nach unterschiedlich langen Expositionsdauern bei denselben Temperaturstufen. Gegenstand systematischer Variation der Versuchsbedingungen sind die Abkühlrate, die Expositionsdauern vor Wiedererwärmung und die Prüftemperaturen selbst.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind unter Anwendung multivariater Verfahren der mathematischen Statistik auszuwerten und physikalisch zu interpretieren.

1.4 Administratives

Der im Detail ausgearbeitete Forschungsantrag zum Thema "Einfluß von Temperatur und Temperaturrate auf den Verformungswiderstand frisch verlegter Asphaltdeckschichten während Abkühlung und Wiedererwärmung" wurde vom Deutschen Asphaltinstitut e.V. (DAI) in Bonn zum Antragstermin 30. September 1993 über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) in Köln dem Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) zur Förderung im Rahmen der Gemeinschaftsforschung eingereicht. Als ausführende Forschungsstelle wurde das Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig mit dem Forschernehmer Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Arand vorgeschlagen. Nach Behandlung in den Gremien der AiF konnte der Vertrag über die Durchführung der Forschungsarbeit zwischen dem DAI und dem Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig am 22./25. August 1994 abgeschlossen werden.

2. Untersuchungsmethodik

In diesem Kapitel werden unter Ziffer 2.1 die Verfahren zur Ansprache der Viskosität von Bitumen einschließlich der Ergebnisse von Voruntersuchungen zur Festlegung der Versuchsbedingungen, ferner unter Ziffer 2.2 die Modalitäten zur Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten mittels des dynamischen Stempeleindringversuchs und schließlich unter Ziffer 2.3 die mathematischen Instrumentarien zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse vorgestellt.

2.1 Ansprache der Viskosität von Bitumen

Als Viskosität wird die Eigenschaft eines flüssigen oder gasförmigen Stoffes bezeichnet, unter der Einwirkung äußerer Kräfte mit der Zeit zunehmende Gestalt- und/oder Volumenänderungen zu erfahren, die nach Fortfall der Ursachen nicht zurückgebildet werden sondern vielmehr erhalten bleiben [13, FGSV]. Dabei wird zwischen der dynamischen Viskosität η und der kinematischen Viskosität ν unterschieden, die über die Dichte ρ des Stoffes miteinander verknüpft sind: $\nu = \eta/\rho$ [mm²/s]. Im Bereich der Technik interessiert insbesondere die dynamische Viskosität, die als Proportionalitätskonstante im Newtonschen Fließgesetz auftritt und in Pas (entsprechend N · s/m²) oder Vielfachen davon gemessen wird.

Das physikalische Verhalten einer Flüssigkeit unter der Einwirkung äußerer Kräfte hängt streng genommen von

- der physikalisch/chemischen Beschaffenheit der Substanz,
- ihrer Temperatur,
- der Zeit,
- dem Geschwindigkeitsgefälle beziehungsweise der Schergeschwindigkeit,
- dem Druck und
- bei speziellen Suspensionen auch dem elektrischen Feld

ab [23, Schramm]. Im Zusammenhang mit Bitumen interessieren nur vier der sechs genannten Einflußgrößen, nämlich die stoffliche Beschaffenheit, die Temperatur,

die Zeit und das Geschwindigkeitsgefälle. Zusätzlich gibt es ernstzunehmende Hinweise darauf, daß beim Bitumen die Viskosität nicht nur von der Temperatur des Prüfgutes selbst, sondern auch davon beeinflusst wird, ob diese Prüftemperatur von einem höheren oder einem niedrigeren Temperaturniveau aus angesteuert worden ist. Hauptsächlich der Überprüfung dieser These dienen die im Nachfolgenden beschriebenen Untersuchungen.

2.1.1 Physikalische Grundlagen

Im Jahre 1687 formulierte **Newton** ein Fließgesetz für rein-viskose Fluide. Es besagt, daß die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ proportional zur einwirkenden Schubspannung τ als Ursache ist und umgekehrt:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [\text{Pas}],$$

beziehungsweise: $\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta} \quad [\text{s}^{-1}].$

Wird die zuerst erwähnte Beziehung graphisch dargestellt, so ergibt sich die Fließkurve einer Newtonschen Flüssigkeit gemäß Abbildung 2.01.

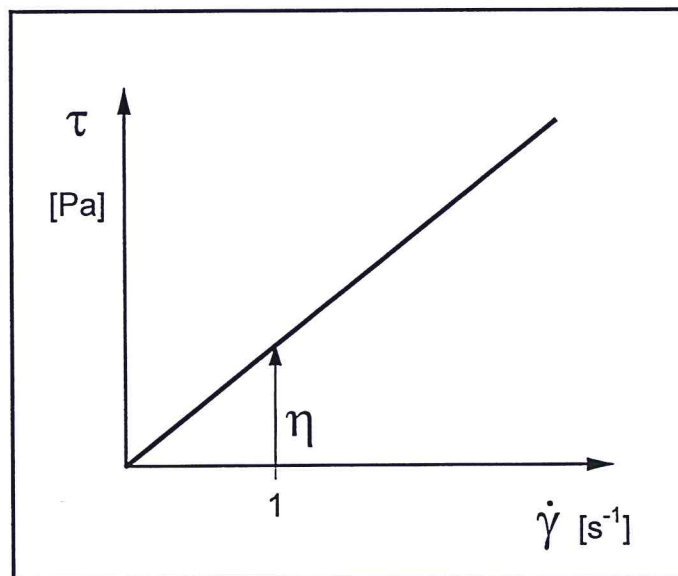


Abbildung 2.01: Fließkurve einer Newtonschen Flüssigkeit

Sie ist durch einen geradlinigen Anstieg der Schubspannung τ mit dem Geschwindigkeitsgefälle $\dot{\gamma}$ gekennzeichnet, was bedeutet, daß die Schubspannung τ direkt mit der Dehngeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ wächst und umgekehrt.

Aus der Fließkurve einer rein-viskosen Flüssigkeit läßt sich einfach die sogenannte Viskositätskurve ableiten, welche den Zusammenhang zwischen der dynamischen Viskosität η und einer Beanspruchungsgröße - entweder der Schubspannung τ oder der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ - charakterisiert. Im Falle einer Newtonschen Flüssigkeit verläuft die Viskositätskurve parallel zur Abszissenachse, wobei die Zähigkeit der Flüssigkeit durch den Abstand der Viskositätskurve von der Abszisse beschrieben wird (siehe Abbildung 2.02).

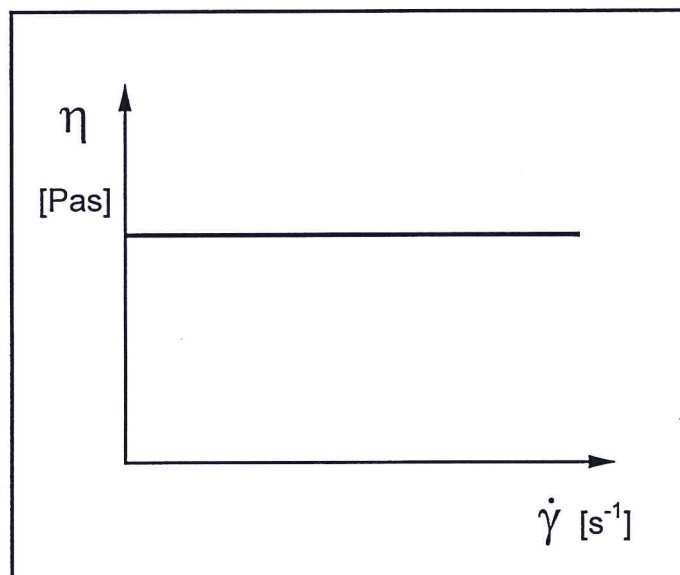


Abbildung 2.02: Viskositätskurve einer Newtonschen Flüssigkeit

Neben den rein-viskosen oder Newtonschen Flüssigkeiten existieren auch nicht-Newtonsche Fluide. Zu diesen zählen in erster Linie die strukturviskosen und die dilatanten Flüssigkeiten. Strukturviskose Flüssigkeiten sind dadurch gekennzeichnet, daß der zum Aufrechterhalten des Fließvorgangs erforderliche Zuwachs an

Schubspannung τ mit zunehmender Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ geringer wird (siehe Abbildung 2.03). Erklärt werden kann die Strukturviskosität durch die Orientierung

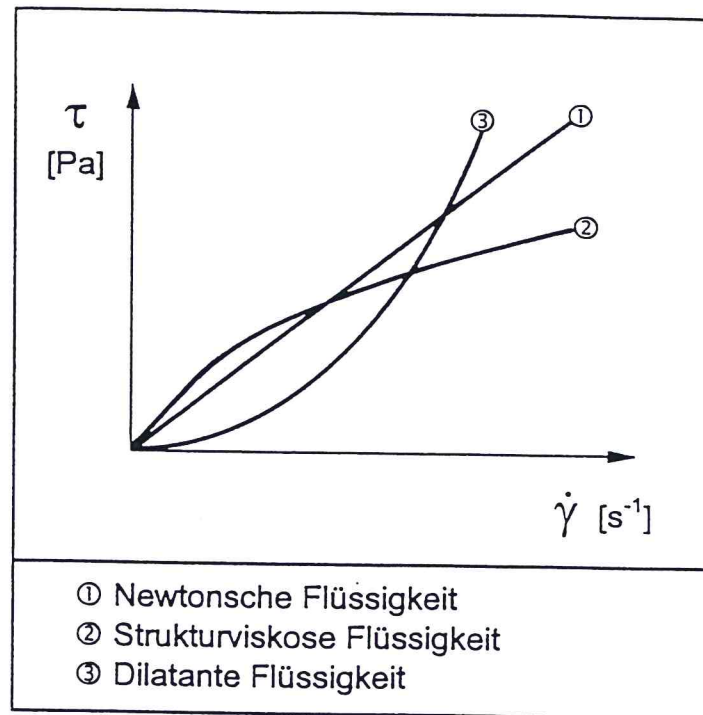


Abbildung 2.03: Fließkurven verschiedener Flüssigkeiten

stabförmiger Moleküle, die Streckung fadenförmiger Moleküle, die Deformation kugelförmiger Moleküle oder die Disaggregation koagulierter Partikel [23, Schramm]. Bei strukturviskosen Flüssigkeiten nimmt die Viskosität η in einem Bereich mittlerer Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ mit zunehmender Schergeschwindigkeit ab (siehe Abbildung 2.04), während sie im Bereich sehr geringer Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ bei noch nicht durch den Prüfvorgang gestörter Struktur einen vergleichsweise hohen konstanten Wert (erster Newtonscher Bereich) und im Bereich sehr großer Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ bei vollständig zerstörter Struktur wieder einen nicht mehr von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ abhängigen, diesmal aber relativ kleinen Wert (zweiter Newtonscher Bereich) besitzt. Die Viskosität η einer Substanz ist im ersten Newtonschen Bereich charakteristisch für den Gel-Zustand und im

zweiten Newtonschen Bereich kennzeichnend für den Sol-Zustand. Der Wechsel von einem Zustand in den anderen und umgekehrt wird auch als Thixotropie bezeichnet.

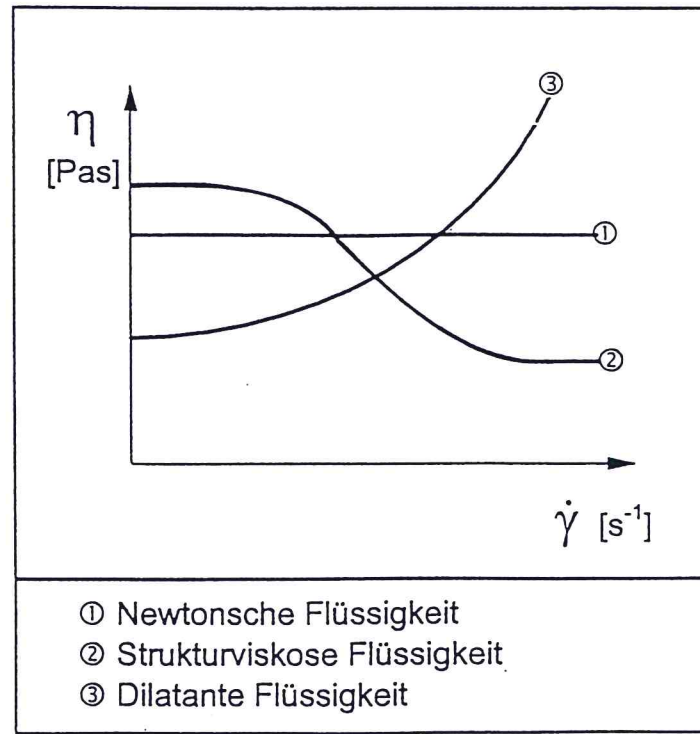


Abbildung 2.04: Viskositätskurven verschiedener Flüssigkeiten

Das Phänomen der Dilatanz ist auf Volumenänderung der Flüssigkeit bei höheren Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ zurückzuführen. Es äußert sich in einer Zunahme der Viskosität η mit zunehmender Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ (siehe Abbildungen 2.03 und 2.04).

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit soll vorrangig untersucht werden, ob die Viskosität von Bitumen durch die Ansteuerrichtung der Prüftemperatur - von oben oder von unten - beeinflusst wird. Um zuverlässige Ergebnisse erhalten zu können, ist es notwendig zu wissen, ob die Viskositäten der Bitumen in einem Bereich der Beanspruchungen durch eine Schubspannung τ oder eine Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ gemessen werden, in dem mit Newtonschem Fließverhalten gerechnet werden darf, wobei es zunächst unerheblich ist, ob im ersten oder im zweiten Newtonschen Be-

reich gemessen wird. Zur Überprüfung der Unabhängigkeit der Viskositäten η von der Beanspruchungsgröße ist letztere bei jedem einzelnen Versuch systematisch zu variieren (sogenannter amplitude sweep) [23, Schramm]. Hierauf wird später noch einmal zurückzukommen sein (siehe Abschnitt 2.1.3.2, Abbildung 2.09, und Abschnitt 3.1, Abbildungen 3.01 und 3.02).

Reale Flüssigkeiten besitzen neben der Eigenschaft Viskosität häufig auch die rheologische Grundeigenschaft **Elastizität**. Diese ist dann gegeben, wenn ein Stoff unter der Einwirkung äußerer Kräfte Gestalt- und/oder Volumenänderungen erfährt, die im Idealfall nach Fortfall der Ursachen spontan und ohne Rest zurückgebildet werden. Dieses Gesetz formulierte **Hooke** im Jahre 1678 mit den Worten: ut tensio sic vis [20, Reiner]. Das Zusammenwirken viskosen und elastischen Stoffverhaltens in einer Substanz bezeichnet man als Viskoelastizität. Als Adjektive werden das Wort "elastoviskos" für das Verhalten einer viskosen Flüssigkeit mit elastischen Eigenschaften (Maxwell-Flüssigkeit) und das Wort "viskoelastisch" für das Verhalten eines elastischen Festkörpers mit viskosen Eigenschaften - also verzögerter Elastizität (Kelvin-Körper) - verwendet [13, FGSV].

Das Verhalten eines elastoviskosen Stoffes unter der Einwirkung impulsartiger Beanspruchungen soll anhand der Reaktionen eines ideal-elastischen Stoffes und eines rein-viskosen Stoffes auf eine sinusförmige Beanspruchung durch eine Schubspannung τ erläutert werden. Bei einem ideal-elastischen Stoff hat eine sinusförmig an- und abschwellende Schubspannung τ als Ursache eine zeitgleich und proportional verlaufende Scherung γ als Wirkung zur Folge (siehe Abbildung 2.05). Ein rein-viskoser Stoff reagiert auf eine sinusförmige Beanspruchung durch eine Schubspannung τ mit einer ebenfalls sinusförmigen, aber um 90° (entsprechend $\pi/2$) zeitversetzten Scherung γ (siehe Abbildung 2.06). Dort, wo die Schubspannung τ am größten ist, erreicht die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ihren Maximalwert; das heißt: Dort ist die Dehnungskurve am steilsten. Zu dem Zeitpunkt, an dem die Schubspannung τ gleich Null ist, geht bei einem Extremwert der Scherung γ auch die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ auf Null zurück.

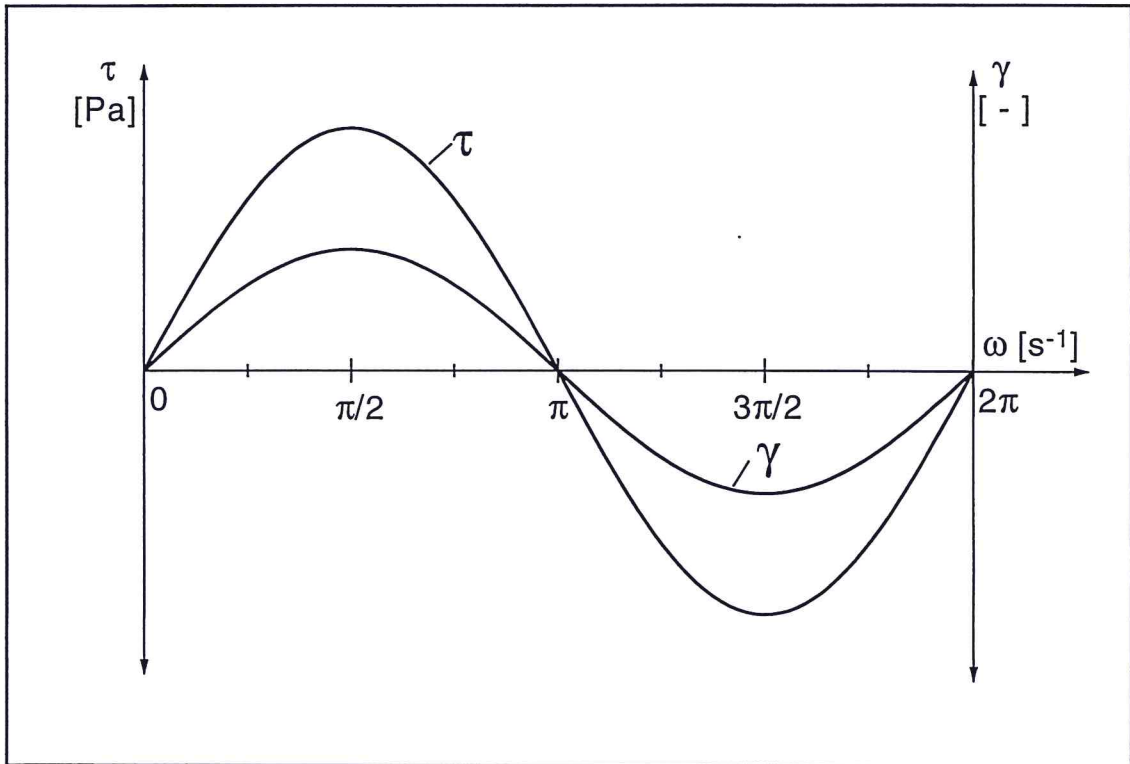


Abbildung 2.05: Schubspannung τ als Ursache einer Scherung γ bei einem ideal-elastischen Stoff

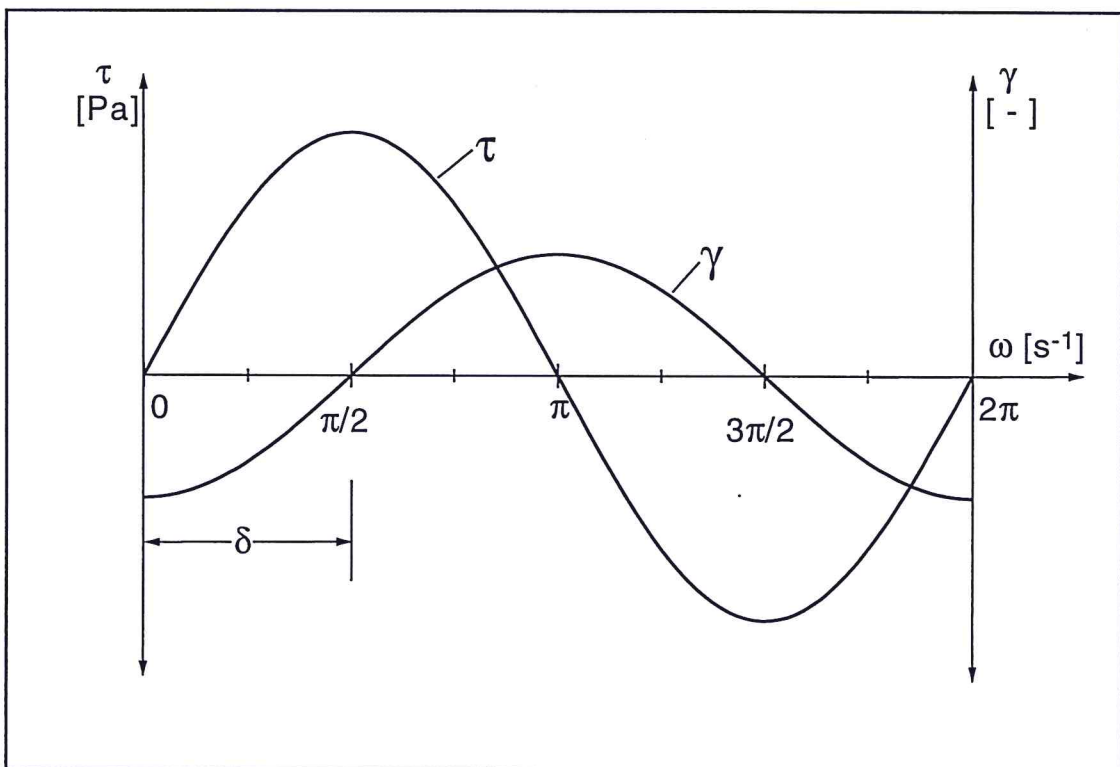


Abbildung 2.06: Schubspannung τ als Ursache einer Scherung γ bei einem rein-viskosen Stoff

Da es sich beim Sinus um eine Kreisfunktion handelt, kann die zeitliche Verschiebung der Scherung γ als Folge einer Schubspannung τ als Phasenwinkel δ gedeutet werden, um den die Wirkung (Scherung γ) der Ursache (Schubspannung τ) hinterherläuft. Dieser Phasenwinkel δ hat bei rein-viskosen Stoffen stets den Betrag 90° oder $\pi/2$.

Bei Stoffen, die auf äußere Beanspruchungen sowohl elastisch als auch viskos reagieren, kann der Phasenwinkel beliebige Werte zwischen $\delta = 0^\circ$ für ideal-elastisches Stoffverhalten und $\delta = 90^\circ$ für rein-viskoses Stoffverhalten annehmen. Anschaulich läßt sich dieser Sachverhalt in der Gaußschen Zahlenebene darstellen (siehe Abbildung 2.07).

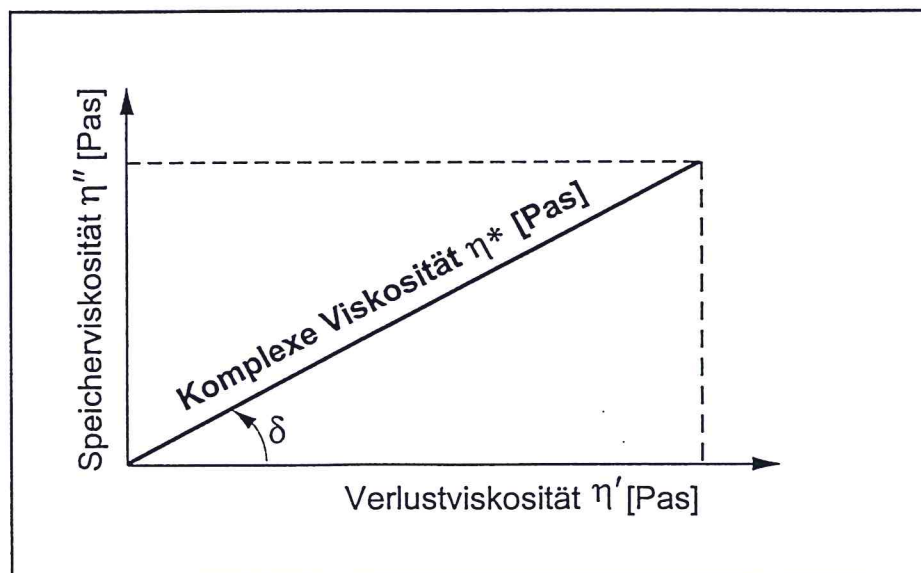


Abbildung 2.07: Speicherviskosität η'' und Verlustviskosität η' als Komponenten der komplexen Viskosität η^* in Abhängigkeit vom Phasenwinkel δ in der Gaußschen Zahlenebene:

$$\eta' = \left[\hat{\tau} / (\hat{\gamma} \cdot \omega) \right] \cdot \sin \delta \quad [\text{Pas}]$$

$$\eta'' = \left[\hat{\tau} / (\hat{\gamma} \cdot \omega) \right] \cdot \cos \delta \quad [\text{Pas}]$$

Danach ergänzen sich die Speicherviskosität η'' und die Verlustviskosität η' geometrisch zur komplexen Viskosität η^* , wobei über die Speicherviskosität η'' die

elastische Komponente des Stoffverhaltens und über die Verlustviskosität η' die viskose Komponente beschrieben wird [11, Eisenmann und Lempe; 23, Schramm]:

$$\eta^* = \sqrt{(\eta'')^2 + (i \cdot \eta')^2} \quad [\text{Pas}].$$

Das Formelzeichen i bedeutet dabei die Wurzel von minus Eins.

Im Rahmen des in Rede stehenden Forschungsvorhabens wird mit der komplexen Viskosität η^* gearbeitet. Auf die Feststellung des Phasenwinkels und damit die Ermittlung von Speicherviskosität η'' und Verlustviskosität η' wird verzichtet, da die Untersuchungsergebnisse nur Vergleichszwecken dienen.

2.1.2 Bitumenarten und -sorten

Zur Klärung der Frage, ob die Viskosität des Bindemittels durch die Aussteuerrichtung der Prüftemperatur - von oben oder von unten her - beeinflusst wird, werden

- ein Straßenbaubitumen **B 80** der Raffinerie Brunsbüttel der **elf bitumen deutschland GmbH**,
- ein Straßenbaubitumen **B 65** der Raffinerie Harburg der **Deutschen Shell AG** und
- ein polymermodifiziertes Bitumen PmB 45 der Raffinerie Brunsbüttel der **elf bitumen deutschland GmbH**

eingesetzt. Den genannten Unternehmen wird für die kostenlose Bereitstellung der benötigten Bitumenmuster aufrichtig gedankt. Im Anlieferungszustand besaßen die Bitumen die folgenden Eigenschaften (siehe Tabelle 2.01):

Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen				
Merkmal	Dimension	Bindemittelsorte		
		B 80	B 65	PmB 45
Nadelpenetration bei T = + 25 °C	1/10 mm	91	58	48
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	46,0	51,0	56,0
Penetrationsindex	-	- 0,763	- 0,600	+ 0,100
Brechpunkt nach Fraass	°C	- 17	- 12	- 13
Dichte bei T = + 25 °C	g/cm ³	1,022	1,023	1,020
Erläuterungen: Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß DIN 52011 Nadelpenetration bei einer Temperatur von T = + 25 °C gemäß DIN 52010 Brechpunkt nach Fraass gemäß DIN 52012 Dichte des Bindemittels gemäß DIN 52004				

Tabelle 2.01: Eigenschaften der für die Ansprache der Viskosität in Abhängigkeit von der Ansteuerrichtung der Prüftemperatur eingesetzten Bitumen

2.1.3 Das HAAKE-Rheometer RheoStress RS 100

2.1.3.1 Beschreibung des Gerätes

Für die Messung der Viskositäten der in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Bitumenarten und -sorten bei verschiedenen Temperaturen wird ein Rheometer der Firma HAAKE des Namens RheoStress RS 100 mit einer Platte-Platte-Meßeinrichtung PP20 eingesetzt (siehe Abbildung 2.08).

Das Gerät ist in der Lage, dynamische Viskositäten η bis zu etwa 1 000 kPas zu messen, womit der gesamte für das Forschungsvorhaben maßgebende Bereich der Prüftemperaturen von $T_{Pr} = + 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $T_{Pr} = + 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgedeckt werden kann.

Das Platte-Platte-Meßsystem PP20 besteht aus einer feststehenden, kreisförmigen Grundplatte von 20 mm Durchmesser, über der sich in einem Abstand zwischen 0,5 mm und 3 mm in coaxialer Anordnung eine gleich große Kreisplatte befindet, die an

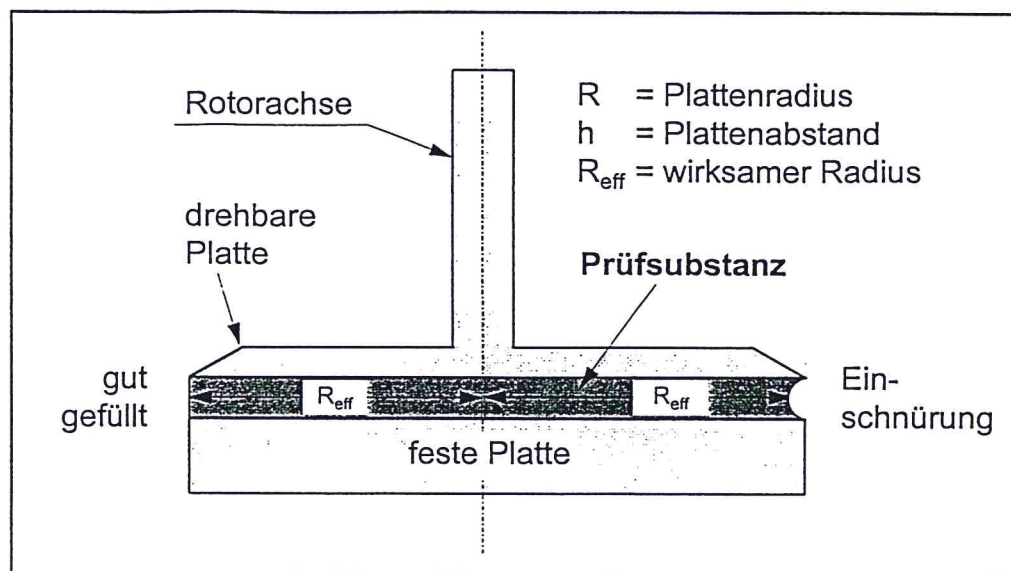


Abbildung 2.08: Platte-Platte-Meßeinrichtung des Rheometers RheoStress 100

einer Rotorachse befestigt ist. Die Rotorachse ist in einem fast reibungsfrei arbeitenden Luftlager positioniert und kann mit Hilfe eines trägheitsarmen Spezialmotors in eine einsinnig rotierende oder aber oszillierende Drehbewegung versetzt werden. Es handelt sich also um ein sogenanntes Searle-Meßsystem, bei dem Antrieb und Messung der Reaktion über dieselbe Rotorachse erfolgen. Die durch die erzwungene Drehbewegung verursachte Scherung der Probe wird mit einem Inkremental-Sensor in einer Million Signal-Impulsen für eine volle Umdrehung des Rotors erfaßt und registriert. Diese hohe Auflösung ermöglicht sehr präzise Messungen bei Versuchen mit erzwungener Oszillation [23, Schramm], bei denen Schubspannungen τ mit sinusförmiger Zeitfunktion als Beanspruchungsgrößen vorgegeben und die

daraus resultierenden Scherungen γ beziehungsweise Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ als Wirkungen in Abhängigkeit von der Zeit erfaßt und registriert werden.

Die Platte-Platte-Meßeinrichtung ist von einer Flüssigkeits-Temperiereinrichtung umgeben, welche mit Schläuchen an einen Flüssigkeitsthermostaten angeschlossen ist; die gewünschte Prüftemperatur kann mit einer Abweichung von höchstens 0,05 K angefahren und mit einer Streuung von weniger als 0,05 K sehr präzise eingehalten werden. Als Temperierflüssigkeit wird im Temperaturbereich zwischen $T_{Pr} = -50\text{ °C}$ und $T_{Pr} = +30\text{ °C}$ Alkohol oder Wasser mit Frostschutzmittel und im Temperaturbereich von $T_{Pr} = +5\text{ °C}$ bis $T_{Pr} = +90\text{ °C}$ destilliertes Wasser verwendet.

Über die Rotorachse des Rheometers kann bei einer Auflösung von $2 \cdot 10^{-8}\text{ Nm}$ ein Drehmoment zwischen 10^{-6} Nm und 10^{-2} Nm erzeugt werden, was nach Angaben des Herstellers einer Schubspannung von $\tau = 6,4\text{ kPa}$ entspricht. Die Drehzahl ist bei einer Auflösung von $0,001\text{ min}^{-1}$ zwischen einer Umdrehung in 100 Minuten und 500 Umdrehungen in einer Minute frei wählbar. Bei Versuchen mit erzwungener Oszillation kann mit Frequenzen zwischen einer vollen Schwingung in 1 000 Sekunden - entsprechend $0,001\text{ Hz}$ - und 20 Schwingungen in einer Sekunde - entsprechend 20 Hz - gearbeitet werden. Der Vorteil des dynamischen Tests (Oszillationsversuch) ist in der Tatsache zu sehen, daß die Substanz nicht so stark mechanisch beansprucht wird, daß ihre molekulare Netzstruktur bleibend zerstört wird [23, Schramm].

Grundsätzlich kann das RheoStress RS 100 sowohl im Controlled-Rate-Modus (CR-Modus) als auch im Controlled-Stress-Modus (CS-Modus) betrieben werden. Während der erstgenannte Versuchstyp als weggeregelt gelten darf, wird bei den Versuchen im CS-Modus ein Drehmoment vorgegeben und die aus der Wirkung einer Schubspannung τ resultierende Scherung γ beziehungsweise Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ - auch Geschwindigkeitsgefälle genannt - gemessen. Dabei ist die Schubspannung τ proportional dem Drehmoment und die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ proportional zur Winkelgeschwindigkeit ω .

Bei den hier zu referierenden Versuchen wird ausschließlich nach dem CS-Prinzip gearbeitet und die Viskosität η als Quotient aus Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ermittelt.

2.1.3.2 Voruntersuchungen zur Festlegung der Versuchsbedingungen

Ehe der Frage nachgegangen werden kann, ob und gegebenenfalls, in welchem Maße, die Viskosität η von Bitumen im Gebrauchstemperaturbereich zwischen $T = + 10\text{ °C}$ und $T = + 55\text{ °C}$ davon abhängt, ob die Prüftemperatur von einem höheren oder einem niedrigeren Temperaturniveau aus angesteuert wird, ist in Vorversuchen zu klären, ob die Viskosität η spannungsabhängig ist (siehe Abschnitt 2.1.1, Abbildung 2.04) und ob sie durch die Art der Vorbehandlung der Proben vor den eigentlichen Viskositätsmessungen beeinflusst werden kann.

Als Proben werden münzenförmige Flachzylinder aus Bitumen mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Dicke von möglichst genau 1,5 mm verwendet. Die Probenherstellung erfolgt unter Verwendung von Ringen aus der Ring- und Kugel-Apparatur, die auf nichthaftender Unterlage horizontal aufgelagert und mit einer dichteabhängig definierten Menge an Bitumen gefüllt werden. Nach dem Befüllen der Ringe werden diese bei einer Temperatur zwischen 80 °C und 100 °C für die Dauer von 10 Minuten in einen Wärmeschrank gestellt, damit die Proben sich setzen können und blasenfrei sind. Nach der Behandlung im Wärmeschrank haben die Proben eine Dicke von 1,5 mm mit Abweichungen von höchstens einigen Tausendstel Millimeter, die vom Rheometer mit einer Präzision von einem Mikrometer automatisch erfaßt und registriert wird. Die Probendicke von 1,5 mm entspricht den Empfehlungen des amerikanischen Strategic Highway Research Programm (SHRP).

Diese Proben werden zur Ansprache der Viskosität im Rheometer bei einer Prüftemperatur von $T = + 25\text{ °C}$ mit einer - in Anlehnung an SHRP gewählten - Fre-

quenz von $f = 1,592$ Hz mit Schubspannungen zwischen $\tau = 0,1$ kPa und $\tau = 10$ kPa oszillierend beansprucht. Vor der eigentlichen Viskositätsmessung bei der Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 25$ °C werden die Proben für Expositionsdauern von 0 h beziehungsweise 24 h auf Expositionstemperaturen von $T_{Ex} = - 15$ °C beziehungsweise $T_{Ex} = + 65$ °C gehalten, damit die eigentliche Prüftemperatur einmal von oben her und zum anderen von unten her angesteuert werden kann.

Der Übergang von der Expositionstemperatur zur Prüftemperatur nimmt einschließlich der Zeit für das Heranfahren der oberen drehbaren Kreisplatte des Rheometers an die Bitumenprobe zwischen rund 20 Minuten und etwas mehr als 30 Minuten Zeit in Anspruch, wobei das Heranfahren an die Prüftemperatur von der höheren Expositionstemperatur aus etwas länger dauert. Nach dem Erreichen der Prüftemperatur werden die Bitumenproben im Rheometer bei Temperaturkonstanz vor dem eigentlichen Meßvorgang für die Dauer von 0, 15 beziehungsweise 60 Minuten auf der Prüftemperatur gehalten, ehe mit der eigentlichen Messung der komplexen Viskosität η^* begonnen wird.

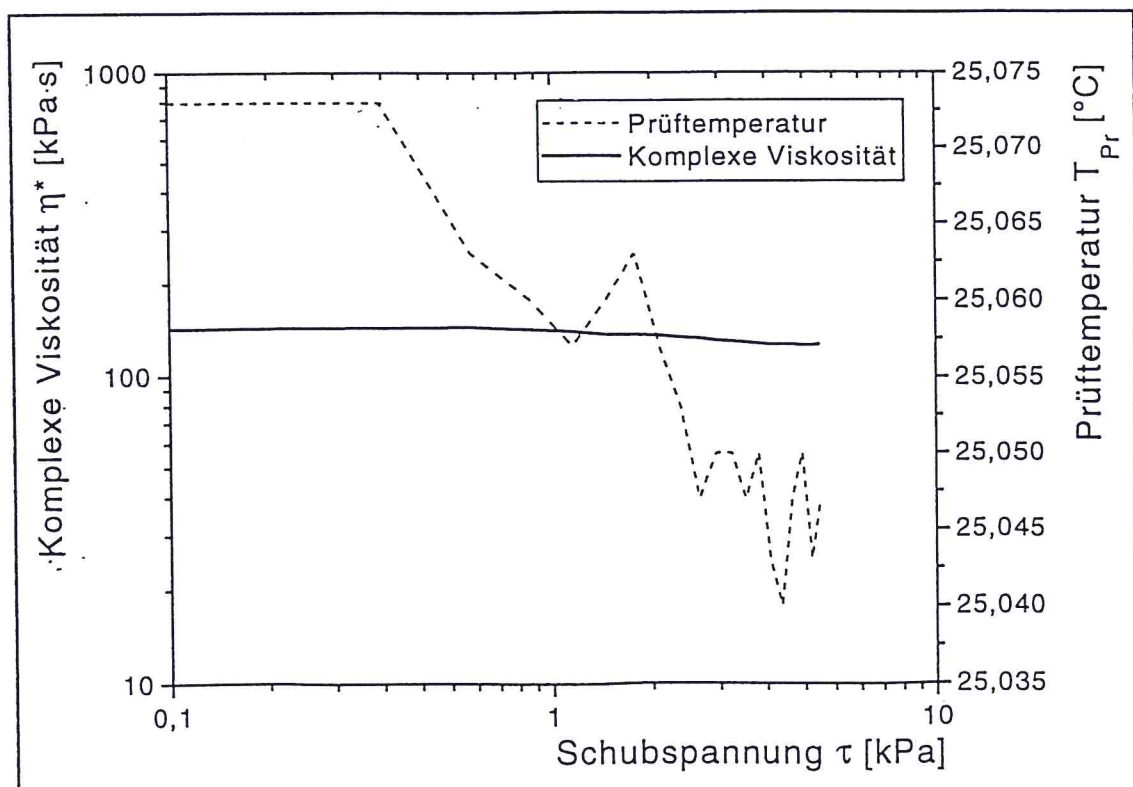


Abbildung 2.09: Komplexe Viskosität η^* einer beliebigen Bitumenprobe in Abhängigkeit von der Schubspannung τ bei gegebener Prüftemperatur T_{Pr}

Das Ergebnis einer solchen Messung zeigt exemplarisch die Abbildung 2.09, in welcher die komplexe Viskosität η^* für das Bitumen B 80 bei einer Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 25 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einer Frequenz von $f = 1,592 \text{ Hz}$ bei Schubspannungen zwischen 0,1 kPa und 5 kPa als durchgezogene Linie graphisch dargestellt ist. Gleichzeitig kann das Ergebnis parallel laufender Temperaturmessungen der punktiert dargestellten Linie entnommen werden, wobei sich zeigt, daß die Prüftemperatur innerhalb der sehr engen Spanne zwischen $T_{Pr} = + 25,04 \text{ }^\circ\text{C}$ und $T_{Pr} = + 25,08 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr präzise eingehalten werden kann. Die durchgezogene Linie zeigt, daß die komplexe Viskosität η^* praktisch nicht durch die applizierte Schubspannung τ beeinflusst wird, so daß die Viskosität als arithmetisches Mittel aus allen registrierten Einzelwerten - in aller Regel zwischen sechs und zwanzig - angegeben werden kann.

Die Ergebnisse der Vorversuche sind in Tabelle 2.02 zahlenmäßig dargestellt

Expositions-dauer t_{Ex} bei Expositions- temperatur T_{Ex}	Zeit t vom Erreichen der Prüftemperatur T_{Pr} bis zum Beginn der Messung in min	0	15	60	η^*
h	Expositionstemperatur $T_{Ex} \text{ [}^\circ\text{C]}$	kPas	kPas	kPas	kPas
0	- 15	97,5	91,9	94,8	94,8
	+ 65	85,6	91,6	89,8	89,0
24	- 15	128,3	124,0	130,9	127,8
	+ 65	119,6	120,8	113,4	118,0

Tabelle 2.02: Komplexe Viskosität η^* in Abhängigkeit von der Expositions-dauer t_{Ex} , der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Zeit t vom Erreichen der Prüftemperatur T_{Pr} bis zum Beginn der Messung

Wie leicht zu erkennen ist, wird die komplexe Viskosität η^* verhältnismäßig stark durch die Expositionsdauer t_{Ex} beeinflusst wird, was auf Strukturbildungseffekte hinweist. Daneben ist auch ein deutlicher Einfluß der Ansteuerrichtung der Prüftemperatur zu beobachten. Praktisch keinen systematischen Einfluß besitzt die Zeit t vom Erreichen der Prüftemperatur T_{Pr} bis zum Beginn der Messung.

Aufgrund der Voruntersuchungen wird festgelegt,

- die Expositionsdauer t_{Ex} bei der Expositionstemperatur T_{Ex} aus arbeitsökonomischen Gründen auf 1 h zu begrenzen und
- mit den Versuchen 15 Minuten nach Erreichen der Prüftemperatur T_{Pr} zu beginnen.

2.1.4 Hauptversuche

Als Hauptversuche zur Ansprache der komplexen Viskosität η^* verschiedener Bitumen werden dynamische Tests in Form sogenannter Oszillationsversuche durchgeführt. Dabei werden kraftgeregelte Versuche im CS-Modus angewendet, bei denen ein und dieselbe Probe mit stufenweise ansteigenden Schubspannungen τ (stress sweep) beansprucht und die daraus resultierende Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ gemessen wird. Die als Beanspruchungsgrößen gewählten Schubspannungen τ bewegen sich im Bereich zwischen 0,1 kPa und 10 kPa; die Frequenz beträgt $f = 1,562$ Hz.

Als Ergebnis ermittelt der für die Prozeßsteuerung eingesetzte Rechner fortlaufend die komplexe Viskosität η^* als Quotient aus der Schubspannung τ und der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$. Gegenstand der Untersuchungen sind die in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Bitumenarten und -sorten.

Diese werden bei vier verschiedenen Prüftemperaturen, nämlich

- $T_{Pr} = + 10$ °C, $T_{Pr} = + 25$ °C, $T_{Pr} = + 40$ °C und $T_{Pr} = + 55$ °C

bei systematischer Variation der Ansteuerrichtung der Prüftemperaturen von höheren und niedrigeren Temperaturniveaus aus - den sogenannten Expositionstemperaturen T_{Ex} - untersucht. Dabei sind die Expositionstemperaturen T_{Ex} entweder um

- $\Delta T = + 40 \text{ K}$, $\Delta T = + 25 \text{ K}$ beziehungsweise $\Delta T = + 10 \text{ K}$ höher als die Prüftemperatur T_{Pr} oder um
- $\Delta T = - 40 \text{ K}$, $\Delta T = - 25 \text{ K}$ beziehungsweise $\Delta T = - 10 \text{ K}$ niedriger als die Prüftemperatur T_{Pr} .

Die Expositionstemperatur T_{Ex} wird grundsätzlich für eine Expositionsdauer von $t_{Ex} = 60 \text{ min}$ gehalten. Diese vergleichsweise kurze Expositionsdauer wird gewählt, um mehrere Versuche an einem Tage durchführen und damit die insgesamt erforderlichen 216 Versuche innerhalb einer angemessenen Zeit abschließen zu können.

Nach Ablauf der Expositionsdauer t_{Ex} werden die flach-zylindrischen Bitumenproben in das Rheometer eingesetzt und dort auf die Prüftemperatur T_{Pr} gebracht. Nach Erreichen der Prüftemperatur T_{Pr} wird die obere bewegliche Kreisplatte des Rheometers vorsichtig an die Probe soweit herangefahren, daß eine kraftschlüssige Verbindung entsteht. Die Zeitspanne Δt für den Übergang von der Expositionstemperatur T_{Ex} zur Prüftemperatur T_{Pr} kann einschließlich des Heranfahrens der oberen beweglichen Kreisplatte an die Bitumenprobe bis zu etwa 60 min dauern.

Nach Herstellen der kraftschlüssigen Verbindung zwischen der oberen beweglichen Kreisplatte des Prüfgerätes und der Bitumenprobe verbleibt letztere für die Dauer von 15 min auf der Prüftemperatur T_{Pr} , ehe mit der eigentlichen Messung begonnen wird.

Das Ergebnis eines Meßvorganges ist die komplexe Viskosität η^* als arithmetisches Mittel aller Einzelwerte in einem Meßbereich, in dem die gesuchte Größe Viskosität sich trotz stetig ansteigender Schubspannung τ nicht systematisch verändert sondern allenfalls zufällig streut. In ein solches Ergebnis fließen regelmäßig zwischen sechs und zwanzig bei verschiedenen Schubspannungen τ gemessene und miteinander verträgliche Einzelwerte ein, die protokolliert und zum Gegenstand weiterer Auswertungen unter Anwendung statistischer Methoden gemacht werden.

2.2 Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten

Zur Bestimmung des - im Interesse einer Vermeidung des Auftretens spontaner bleibender Verformungen - frühestmöglichen Zeitpunktes für die Verkehrsfreigabe frisch verlegter Asphaltdeckschichten soll im zweiten Teil der Forschungsarbeit der Frage nachgegangen werden, inwiefern der Verformungswiderstand von Asphalten durch unterschiedlich schnelle Abkühlung auf bestimmte Zieltemperaturen beziehungsweise durch unterschiedlich lange Expositionsdauern bei tieferen Temperaturen und Wiedererwärmung auf dieselben Zieltemperaturen beeinflusst wird. Zur Lösung dieses Problems sollen dynamische Stempeleindringversuche an zylindrischen Probekörpern aus drei Asphaltmischgutvarianten auf einer Impulsprüfmaschine durchgeführt werden. Dabei werden Stempeleindringversuche

- zur Simulation der Bedingungen nach unterschiedlich schneller Abkühlung bei verschiedenen, während des Versuchs selbst konstant zu haltenden Prüftemperaturen und
- zur Simulation der Bedingungen im Anschluß an die Wiedererwärmung nach unterschiedlich langen Expositionsdauern bei denselben Prüftemperaturen durchgeführt.

Gegenstand der systematischen Variation sind die Asphaltmischgutart /-sorte, die Abkühlrate, die Expositionstemperaturen und die Expositionsdauern vor Wiedererwärmung sowie die Prüftemperaturen selbst.

Das bei den experimentellen Untersuchungen anfallende Datenmaterial wird unter Anwendung mathematisch-statistischer Methoden ausgewertet.

Im Zuge der Bearbeitung des vom Bundesminister für Wirtschaft geförderten und von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen betreuten Forschungsauftrages mit dem Titel „Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes“ (AiF Nr. Q 27) aus dem Jahre 1996 [5, Arand, von der Decken] wurden am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig verschiedene Verfahren – im einzelnen der dynamische Druck-Schwellver-

such, der dynamische Stempeleindringversuch, der Spurbildungstest sowie ein neu entwickelter Triaxialversuch mit periodengleichem, aber phasenverschoben schwel-
lendem Stützdruck – zur Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalt in
einem umfangreichen Versuchsprogramm daraufhin untersucht, inwieweit deren
Versuchsergebnisse auf Straßen beobachtete und meßtechnisch erfaßte Verfor-
mungen unter Berücksichtigung von Wetter und Verkehr während der Nutzungs-
dauer größenordnungsmäßig zutreffend beschreiben. Dabei stellte sich heraus, daß
der dynamische Druck-Schwellversuch, der dynamische Stempeleindringversuch
und insbesondere der dynamische Triaxialversuch das Verformungsverhalten von
Deckschichten aus Asphaltbeton und Splittmastixasphalt mit guter Annäherung an
auf Straßen in Querprofilaufnahmen ermittelte Spurrinntiefen zu bestimmen in
der Lage sind (siehe Tabelle 2.03).

Asphalt- variante	Anzahl der Wertepaare	Dynamischer Druck-Schwell- versuch	Dynamischer Stempelein- dringversuch	Spurbildungs- test	Dynamischer Triaxial- versuch
Splittmastix- asphalt	5	0,8601	0,8027	0,5550	0,9185
Asphaltbeton	4 (3)	0,9233	0,9592	0,9272	0,9966

Tabelle 2.03: Korrelationskoeffizienten der linearen Regressionen zur Über-
prüfung des Zusammenhangs zwischen den Ergebnissen der vier
verschiedenen Versuchstypen und den fiktiven Dehnungen der
Strecken mit jeweils gleicher Asphaltdeckschichtvariante (bei
dynamischen Triaxialversuchen an Asphaltbetonen: $n = 3$)

In der zu bearbeitenden Forschungsarbeit müssen die Asphaltprobekörper direkt
nach ihrer Herstellung in einem programmierbaren Temperierschrank einer geregel-
ten Abkühlung auf eine bestimmte Zieltemperatur unterworfen werden. Anschlie-
ßend sind die Probekörper in die bereits auf die Prüftemperatur eingeregelter Ver-
suchsanlage zur Ansprache des Verformungswiderstandes einzubauen. Da die
Probekörper zur Vermeidung nicht praxisadäquater Ergebnisse unmittelbar nach
dem Erreichen der Zieltemperatur der dynamischen Belastung unterworfen werden
müssen, ist es von ausschlaggebender Bedeutung, daß der Einbau des Probekör-
pers in die Versuchsanlage innerhalb weniger Minuten vollzogen werden kann. Aus

den Erfahrungen, die während der Bearbeitung des oben genannten AiF-Forschungsauftrages Nr. Q 27 gemacht worden sind, ist bekannt, daß bei der Durchführung von dynamischen Druck-Schwellversuchen und dynamischen Triaxialversuchen der Einbau der Probekörper in die Prüfanlage nicht weniger als 20 Minuten benötigt, beim dynamischen Stempeleindringversuch dagegen innerhalb sehr kurzer Zeit - weniger als etwa zwei Minuten - zu bewerkstelligen ist.

Aufgrund dessen ist es unabdingbar erforderlich, für die Durchführung der Versuche zur Ansprache des Verformungswiderstandes den dynamischen Stempeleindringversuch einzusetzen. In diesem Versuch wird ein in einer zylindrischen Form fest eingespannter Probekörper bei einer bestimmten Prüftemperatur durch einen ebenen, kreisförmigen Stempel geringeren Durchmessers mittels Druck dynamisch belastet. Während des Versuchs werden ständig die oberen und unteren Scheitelwerte der Druckspannung sowie die axiale Verformung aufgezeichnet.

In den folgenden Abschnitten werden die Zusammensetzung der zu untersuchenden Asphaltgemische (siehe Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2) sowie die verschiedenen Wetterbedingungen nachempfundene Temperierung (siehe Abschnitt 2.2.3) erläutert. Der Abschnitt 2.2.4 beschreibt den dynamischen Stempeleindringversuch im Detail. In ihm werden die Randbedingungen des Versuches festgelegt und die Probekörperherstellung sowie die Meßdatenerfassung erörtert.

2.2.1 Asphaltkomponenten

2.2.1.1 Mineralstoffe

Für die drei zu untersuchenden Asphaltdeckschichtvarianten - nämlich Asphaltbetone 0/11 L und 0/11 S sowie Splittmastixasphalt 0/11 S - kommen im Korngrößenbereich größer 2 mm ausschließlich Gabbro-Edelsplitte aus Bad Harzburg zur Anwendung. Im Sandbereich werden ein Natursand aus Bortfeld bei Braunschweig sowie für den Brechsandanteil wiederum der Gabbro verwendet. Als Füller wird ein Kalksteinmehl der Firma Fels-Werke GmbH aus Seesen im Harz gewählt.

2.2.1.2 Bitumen

Bei der Herstellung der Asphaltprobekörper werden für den Asphaltbeton 0/11 L ein Bitumen B 80 der Raffinerie Brunsbüttel der Elf Bitumen Deutschland GmbH beziehungsweise für den Asphaltbeton 0/11 S und für den Splittmastixasphalt 0/11 S ein Bitumen B 65 der Raffinerie Harburg der Deutschen Shell AG verwendet. Die Kenndaten der beiden Bindemittel finden sich in Tabelle 2.04.

Bindemittelkenndaten			
Merkmal	Dimension	B 80	B 65
Nadelpenetration bei T = +25 °C	1/10 mm	91	58
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	46,0	51,0
Brechpunkt nach Fraaß	°C	-17	-12
Dichte bei T = +25 °C	g/cm ³	1,022	1,023
Erläuterungen: Nadelpenetration bei einer Temperatur von T = +25 °C gemäß DIN 52010 Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß DIN 52011 Brechpunkt nach Fraaß gemäß DIN 52012 Dichte des Bindemittels gemäß DIN 52004			

Tabelle 2.04: Kenndaten der Originalbitumen B 80 der Raffinerie Brunsbüttel (Elf) und B 65 der Raffinerie Harburg (Shell)

2.2.2 Asphaltdeckschichtvarianten

Die Untersuchungen zur Ansprache des Verformungswiderstandes werden an drei unterschiedlichen Asphaltdeckschichtvarianten – zwei Asphaltbetonen und einem Splittmastixasphalt, jeweils mit einem Größtkorn von 11,2 mm – durchgeführt. Die Zusammensetzung dieser Asphaltgemische wird in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt.

2.2.2.1 Asphaltbeton 0/11 L mit Bitumen B 80 als Bindemittel

Für den leicht verdichtbaren Asphaltbeton 0/11 wird ein Mischgut mit 8 M-T Füller und mit einem Brechsand-Natursand-Verhältnis von 2:1 hergestellt. Der Splittgehalt beträgt 56 M-T. Das Bindemittel Bitumen B 80 der Deutschen Elf GmbH wird für die Eignungsprüfung in den Gehalten 5,6 M-%, 5,9 M-% und 6,2 M-% zugegeben.

Tabelle 2.05 zeigt die gewählte Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches.

Kornklasse	Soll-Anteil	Soll-Anteil
mm	M-T	M-T
< 0,09	8,0	8,0
0,09 - 0,25	8,1	36,0
0,25 - 0,71	14,9	
0,71 - 2,0	13,0	
2,0 - 5,0	20,0	56,0
5,0 - 8,0	18,0	
8,0 - 11,2	18,0	

Tabelle 2.05: Korngrößenverteilung des Asphaltbetons 0/11 L (Brechsand : Natursand = 2:1)

Für die Untersuchungen zur Ansprache des Verformungsverhaltens kommt der Asphaltbeton 0/11 L mit einem Bindemittelgehalt von 5,9 M-% zur Anwendung. Für die Probekörper wird eine Raumdichte von $2,520 \text{ g/cm}^3$ - bei einer Rohdichte von $2,566 \text{ g/cm}^3$ entsprechend einem Hohlraumgehalt von 1,78 V-% - angestrebt.

2.2.2.2 Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen B 65 als Bindemittel

Der für diesen Forschungsauftrag rezeptierte Asphaltbeton 0/11 S unterscheidet sich vom leicht verdichtbaren Asphaltbeton durch einen mit 5,7 M-% etwas niedrigeren Bindemittelgehalt, einen geringeren Füllergehalt von 7 M-T und mit 60 M-T einen angehobenen Gehalt an Splitt. Außerdem wird ausschließlich Brechsand sowie ein

härteres Bitumen B 65 verwendet. Die Zusammensetzung des Mineralstoffgemischs gibt Tabelle 2.06 wieder:

Kornklasse	Soll-Anteil	Soll-Anteil
mm	M-T	M-T
< 0,09	7,0	7,0
0,09 - 0,25	6,2	33,0
0,25 - 0,71	9,3	
0,71 - 2,0	17,5	
2,0 - 5,0	26,0	60,0
5,0 - 8,0	14,0	
8,0 - 11,2	20,0	

Tabelle 2.06: Korngrößenverteilung des Asphaltbetons 0/11 S (Brechsand : Natursand = 1:0)

Entsprechend einem vorgegebenen Verdichtungsgrad von > 99 % wurde eine Raumdichte von mindestens $2,49 \text{ g/cm}^3$ angestrebt.

2.2.2.3 Splittmastixasphalt 0/11 S mit Bitumen B 65 als Bindemittel

Die Mischgutzusammensetzung des gewählten Splittmastixasphalts 0/11 S zeichnet sich durch einen Bindemittelgehalt von 6,8 M-% und einen hohen Splittgehalt von 78 M-T aus. Mit der Rezeptierung nach Tabelle 2.07 und einem Bitumen B 65 als Bindemittel ergibt sich im Marshall-Probekörper ein Hohlraumgehalt von 3,3 V-%. Als Zusatzstoff mit bindemittelablaufhemmender Wirkung wurde die organische Faser Arbocell mit 0,3 M-T eingesetzt.

Die Raumdichte der für die Ansprache des Verformungswiderstandes herzustellenden Probekörper wird zu $2,49 \text{ g/cm}^3$ vorgegeben.

Kornklasse	Soll-Anteil	Soll-Anteil
mm	M-T	M-T
org. Faserstoffe	0,3	0,3
< 0,09	10,0	10,0
0,09 - 0,25	2,3	11,7
0,25 - 0,71	3,3	
0,71 - 2,0	6,1	
2,0 - 5,0	12,0	78,0
5,0 - 8,0	22,0	
8,0 - 11,2	44,0	

Tabelle 2.07: Korngrößenverteilung des Splittmastixasphalts 0/11 S (Brechsand : Natursand = 1:0)

2.2.3 Modalitäten der Temperierung

Wegen des thermo-viskosen Charakters des Bindemittels Bitumen hängen die mechanischen Eigenschaften von Asphalten in hohem Maße sowohl von der Temperatur als wahrscheinlich auch von der Temperaturrate ab. Um letztere Vermutung zu verifizieren oder gegebenenfalls auch zu falsifizieren, ist es notwendig, den Verformungswiderstand von Asphalten

- nach schneller beziehungsweise langsamer Abkühlung sowie
- nach Wiedererwärmung von einem niedrigeren für unterschiedlich lange Expositionsdauern gehaltenen Temperaturniveau aus experimentell zu untersuchen.

Zur Schaffung praxisadäquater Temperierungsprogramme für die Probekörpervorbereitung zur Ermittlung des temperaturregimeabhängigen Verformungswiderstandes von Asphalten wird auf die Arbeiten [7 und 8] von Bossemeyer zurückgegriffen, um die Asphaltprobekörper zur Ansprache des Verformungswiderstandes mit hoher beziehungsweise niedriger Temperaturrate unterschiedlichen Wetterbedingungen

angepaßt abkühlen oder auch nach unterschiedlich langen Expositionsdauern bei tieferen Temperaturen wiedererwärmen zu können.

Die wärmetechnischen Grundlagen nach Bossemeyer werden im Abschnitt 2.2.3.1 und die Vorgaben zur Steuerung der Wärme-Kälte-Schränke im Abschnitt 2.2.3.2 vorgestellt.

2.2.3.1 Grundlagen nach Bossemeyer

Nach Bossemeyer [7 und 8] ist die mittlere relative Schichttemperatur ϑ einer Asphaltsschicht während der Abkühlung nach dem Einbau wie folgt definiert:

$$\vartheta = 100 \cdot \frac{T_m - T_L}{T_A - T_L} \quad [\%] .$$

Darin bedeuten:

ϑ = mittlere relative Schichttemperatur [%],

T_m = mittlere Schichttemperatur [°C], die der aktuellen Wärmekapazität der gesamten Schicht entspricht,

T_L = Mittel aus Lufttemperatur und Oberflächentemperatur der Unterlage [°C],

T_A = Temperatur des Asphalts [°C] beim Aufbringen auf die Unterlage.

Nach Einführung einer relativen Schichtdicke δ mit

$$\delta = \frac{\lambda}{a \cdot d} \quad [-]$$

und einer ideellen Zeit τ mit

$$\tau = \frac{2 \cdot a}{d^2} \cdot t \quad [-]$$

läßt sich die mittlere relative Schichttemperatur ϑ als Funktion der Zeit mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnen:

$$\vartheta = 100 \cdot \frac{e^{-\frac{0,38 \cdot \tau}{\delta}}}{1 + 0,76 \cdot \tau^{0,75}} \quad [\%]. \quad [\text{Gl. 1}]$$

In den drei obigen Gleichungen bedeuten:

- δ = relative Schichtdicke [-],
- d = Schichtdicke [m],
- λ = Wärmeleitfähigkeit [J/m·h·K],
- α = Wärmeübergangszahl [J/m²·h·K],
- τ = idelle Zeit [-],
- t = Zeit [h],
- a = Temperaturleitfähigkeit [m²/h].

Die Temperaturleitfähigkeit a mit
$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_A}$$

gibt an, mit welcher Geschwindigkeit sich eine Temperaturänderung von einer Stelle eines Körpers aus in diesem ausbreitet.

Dabei bedeuten zusätzlich zu den oben bereits erläuterten Formelzeichen:

- c = spezifische Wärmekapazität [J/kg·K],
- ρ_A = Raumdichte des Asphalts [kg/m³].

Aus Gleichung 1 folgt:

$$\vartheta = 100 \cdot \frac{T_m - T_L}{T_A - T_L} = 100 \cdot \frac{e^{-\frac{0,38 \cdot \tau}{\delta}}}{1 + 0,76 \cdot \tau^{0,75}} \quad [\%]$$

$$T_m = [T_A - T_L] \cdot \frac{e^{-\frac{0,38 \cdot \tau}{\delta}}}{1 + 0,76 \cdot \tau^{0,75}} + T_L \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_m = [T_A - T_L] \cdot \frac{e^{-\frac{0,38 \cdot 2 \cdot a \cdot \alpha \cdot d}{d^2 \cdot \lambda}}}{1 + 0,76 \cdot \left(\frac{2 \cdot a}{d^2} \cdot t\right)^{0,75}} + T_L \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_m = [T_A - T_L] \cdot \frac{e^{-\frac{0,76 \cdot \alpha}{d \cdot c \cdot \rho_A} \cdot t}}{1 + 0,76 \cdot \left(\frac{2 \cdot \lambda}{d^2 \cdot c \cdot \rho_A} \cdot t\right)^{0,75}} + T_L \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad \text{Gl. 2}$$

Es ist also möglich, mit Hilfe der Gleichung 2 die mittlere Schichttemperatur T_m , die der Wärmekapazität einer Asphaltschicht mit über die Dicke ungleichmäßig verteilter Temperatur entspricht, in Abhängigkeit von der Zeit zu berechnen, sofern die wärmetechnischen Kenngrößen, die Raumdichte und die Schichtdicke bekannt sind.

Es läßt sich zeigen, daß Streuungen der Einflußgrößen Raumdichte ρ_A , spezifische Wärmekapazität c und Wärmeleitzahl λ des Asphalts im Rahmen praxisnaher Variationsbereiche das Ergebnis der Berechnung der mittleren Schichttemperatur T_m nur wenig beeinflussen; daher wird einheitlich mit folgenden Schätzwerten gerechnet:

- Raumdichte $\rho_A = 2.500 \text{ kg/m}^3$,
- spezifische Wärmekapazität $c = 980 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$,
- Wärmeleitzahl $\lambda = 5.000 \text{ J/m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}$.

Da die Schichtdicke d - es geht ausschließlich um Asphaltdeckschichten - mit $d = 0,04 \text{ m}$ ebenfalls als konstant angenommen werden kann, vereinfacht sich die Gleichung 2 zur Berechnung der mittleren Schichttemperatur wie folgt:

$$T_m = [T_A - T_L] \cdot \frac{e^{-7,755 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot t}}{1 + 1,5341 \cdot t^{0,75}} + T_L \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad \text{Gl. 3}$$

Die Wärmeübergangszahl α setzt sich aus den Anteilen der effektiven Wärmeübergangszahlen der Strahlung α_R und der Konvektion α_K zusammen:

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_K \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}].$$

Die Wärmeübergangszahl der Strahlung α_R gehorcht der folgenden Beziehung:

$$\alpha_R = 4.186,8 \cdot \frac{4,5 \cdot \left(\frac{T_O + 273}{100}\right)^4 - 3,92 \cdot (1 - 0,22 \cdot 10^{-0,055 \cdot e_0}) \cdot \left(\frac{T_L + 273}{100}\right)^4}{T_O - T_L} \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}].$$

Sie lässt sich also bei Kenntnis der Oberflächentemperatur des Asphalts T_O , der Temperatur der Luft T_L sowie des Dampfdrucks e_0 berechnen. Letzterer wird einheitlich zu 5 mm Quecksilbersäule angenommen. Daraus folgt:

$$\alpha_R = 4.186,8 \cdot \frac{4,5 \cdot \left(\frac{T_O + 273}{100}\right)^4 - 3,46 \cdot \left(\frac{T_L + 273}{100}\right)^4}{T_O - T_L} \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}]. \quad \text{Gl. 4}$$

Für eine Anzahl ausgewählter Kombinationen der Oberflächentemperatur des Asphalts T_O sowie der Temperatur der Luft T_L sind die Wärmeübergangszahlen der Strahlung α_R in Tabelle 2.08 zahlenmäßig angegeben.

T_O [°C]	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
T_L [°C]										
30	34.656	34.171	34.088	34.669	36.522	41.484	58.727	∞	-	-
25	33.394	32.752	32.419	32.564	33.551	36.332	44.393	89.128	-	-
20	32.241	31.481	30.963	30.803	31.227	32.769	37.033	52.040	∞	-
15	31.180	30.329	29.674	29.294	29.335	30.117	32.468	39.429	78.389	-
10	30.197	29.276	28.518	27.977	27.750	28.038	29.304	32.943	45.937	∞
5	29.281	28.307	27.470	26.808	26.390	26.344	26.945	28.912	34.888	68.538
0	28.423	27.407	26.510	25.759	25.201	24.921	25.091	26.113	29.195	40.383

Tabelle 2.08: Wärmeübergangszahlen der Strahlung α_R [J/m²·h·K] in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des Asphalts T_O und der Temperatur der Luft T_L

Die Wärmeübergangszahlen der Konvektion α_{k_0} hängen bei freier Strömung (kein Wind) von der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur des Asphalts T_O und der Temperatur der Luft T_L ab. Sie werden der Abbildung 2 von Bossemeyer in [8] entnommen beziehungsweise inter- oder extrapoliert und sind in Tabelle 2.09 aufgelistet.

$T_O - T_L$	K	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
α_{k_0}	J/m ² ·h·K	38.130	36.250	34.370	32.491	30.419	28.348	25.895	23.442	20.989	18.400

Tabelle 2.09: Wärmeübergangszahlen der Konvektion α_{k_0} für die Windgeschwindigkeit $w = 0$ m/s in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur des Asphalts T_O und der Temperatur der Luft T_L

Bei erzwungener Strömung (Wind) sind die Wärmeübergangszahlen der Konvektion α_k eine Funktion der Windgeschwindigkeit w [m/s] und des arithmetischen Mittels aus der Oberflächentemperatur des Asphalts T_O und der Temperatur der Luft T_L . Auch diese Werte werden der Abbildung 2 von Bossemeyer in [8] entnommen beziehungsweise geschätzt.

$\frac{T_O + T_L}{2}$ [°C]	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20
w [m/s]										
5	52.335	52.989	53.643	54.297	54.952	55.606	56.260	56.920	57.590	58.270
10	86.762	87.770	88.778	89.786	90.795	91.804	92.815	93.830	94.850	95.880
15	118.326	119.716	121.106	122.496	123.887	125.277	126.670	128.070	129.480	130.900
20	147.329	148.937	150.545	152.153	153.762	155.370	156.980	158.600	160.230	161.870

Tabelle 2.10: Wärmeübergangszahlen der Konvektion α_k in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit w sowie der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur des Asphalts T_O und der Temperatur der Luft T_L

Mit Hilfe der in den Tabellen 2.08 bis 2.10 angegebenen Wärmeübergangszahlen der Strahlung α_R und der Konvektion α_K können bei Rückgriff auf Gleichung 3 die mittleren Temperaturen der Asphaltsschicht T_m in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit w und der Zeit t berechnet werden. Als Ergebnis derartiger Berechnungen ergeben sich praxisnahe Temperaturreaten für beliebige - also auch schnelle und langsame - Abkühlgeschwindigkeiten. Die Vorgehensweise wird im Abschnitt 2.2.3.2 erläutert.

2.2.3.2 Vorgaben für die Temperierung im Wärme-Kälte-Schrank

Ziel der Temperierung im Wärme-Kälte-Schrank ist es, Asphaltprobekörper praxisadäquaten Temperaturganglinien zu unterwerfen, um anhand der anschließenden Prüfung im dynamischen Stempelleindringversuch

- bei Erreichen der Prüftemperaturen von $T = + 55\text{ °C}$, $+ 40\text{ °C}$ und $+ 25\text{ °C}$ nach schneller beziehungsweise langsamer Abkühlung und alternativ
- nach einer Expositionsdauer von $t_{\text{Ex}} = 2\text{ h}$, 16 h oder 40 h bei einer Expositionstemperatur von $T_{\text{Ex}} = + 10\text{ °C}$ oder $+ 25\text{ °C}$ und einer Wiedererwärmung auf die Prüftemperaturen von $T_{\text{Pr}} = + 25\text{ °C}$, $+ 40\text{ °C}$ und $+ 55\text{ °C}$

den Einfluß der unterschiedlichen Expositionsbedingungen auf den Verformungswiderstand der Asphalte exemplarisch untersuchen zu können. Dazu sind für die Versuche mit unterschiedlichen Abkühlraten zwei Temperaturganglinien und für die Versuche mit Wiedererwärmung eine Temperaturganglinie auf der Basis der Gleichungen von Bossemeyer zu ermitteln.

Für die unterschiedlich schnellen Abkühlmodalitäten werden unter der Annahme, daß die mittlere Temperatur T_m der Asphaltsschicht nach der Verdichtung mit 105 °C um 5 K höher liegt als die Oberflächentemperatur T_O , für sieben verschiedene Lufttemperaturen - nämlich $T_L = + 30\text{ °C}$, $+ 25\text{ °C}$, $+ 20\text{ °C}$, $+ 15\text{ °C}$, $+ 10\text{ °C}$, $+ 5\text{ °C}$ und 0 °C - sowie fünf unterschiedliche Windgeschwindigkeiten - und zwar $w = 0\text{ m/s}$, 5 m/s , 10 m/s , 15 m/s und 20 m/s - die Wärmeübergangszahlen der

Strahlung α_R und der Konvektion α_K den Tabellen 2.08 bis 2.10 entnommen, wobei Zwischenwerte linear interpoliert werden. Mit diesen in Tabelle 2.11 wiedergegebenen Wärmeübergangszahlen und der Gleichung 3 werden für jede der angenommenen Lufttemperaturen T_L und Windgeschwindigkeiten w die mittleren Schichttemperaturen T_m berechnet. Für jeden Abkühlvorgang wird vereinfachend mit konstanten Werten für die Wärmeübergangszahlen gerechnet, wodurch sich nur sehr geringe Abweichungen von den tatsächlichen Schichttemperaturen ergeben.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 2.12 zahlenmäßig dokumentiert und exemplarisch für die Lufttemperaturen $T_L = + 30\text{ °C}$, $+ 20\text{ °C}$, $+ 10\text{ °C}$ und 0 °C in den Abbildungen 2.10 und 2.11 graphisch dargestellt.

Um festzustellen, welche maximale Abkühlgeschwindigkeit mit dem sehr leistungsstarken Wärme-Kälte-Schrank auf die inneren Bereiche des Asphaltmaterials übertragbar ist, ist ein Asphaltprobekörper horizontal angebohrt und mit einem Temperaturfühler versehen worden, der die Temperaturen im Innern des Probekörpers während der gesamten Temperierungsphase gemessen und an den zur Ansteuerung des Wärme-Kälte-Schranks benutzten Computer weitergeleitet hat, wo sie in zeitlichen Abständen von 2 Sekunden zusammen mit der Lufttemperatur in der Temperierkammer aufgezeichnet wurden. Als Ergebnis dieses Versuchs konnte festgehalten werden, daß die schnellstmögliche Abkühlung sich entsprechend einer Temperaturganglinie nach Bossemeyer für eine Lufttemperatur von $T_L = 0\text{ °C}$ bei einer Windgeschwindigkeit von $w = 0\text{ m/s}$ beziehungsweise einer Lufttemperatur von $T_L = + 10\text{ °C}$ bei einer Windgeschwindigkeit w von knapp 10 m/s einstellt, was einer Abkühlung von $T_m = + 105\text{ °C}$ auf $T_m = + 55\text{ °C}$ innerhalb eines Zeitraums von rund 18 Minuten - entsprechend 0,3 Stunden - gleichkommt. Die theoretisch mögliche Abkühlung um 50 K innerhalb einer Zeitspanne von 12 Minuten ist also unter den gegebenen apparativen Voraussetzungen praktisch nicht zu verwirklichen. Dieses Resultat darf nicht verwundern, da die Auskühlprozesse in Asphaltschichten in entscheidendem Maße von der Windgeschwindigkeit w abhängen, die Windverhältnisse jedoch im Wärme-Kälte-Schrank nicht simuliert werden können.

Lufttemperatur T_L	Wärmeübergangszahl α	Windgeschwindigkeit w [m/s]				
		0	5	10	15	20
30	α_R	34.656	34.656	34.656	34.656	34.656
	α_K	32.491	52.335	86.762	118.326	147.329
	α	67.147	86.991	121.418	152.982	181.985
25	α_R	33.394	33.394	33.394	33.394	33.394
	α_K	33.430	52.662	87.266	119.021	148.133
	α	66.824	86.056	120.660	152.415	181.527
20	α_R	32.241	32.241	32.241	32.241	32.241
	α_K	34.370	52.989	87.770	119.716	148.937
	α	66.611	85.230	120.011	151.957	181.178
15	α_R	31.180	31.180	31.180	31.180	31.180
	α_K	35.310	53.316	88.274	120.411	149.741
	α	66.490	84.496	119.454	151.591	180.921
10	α_R	30.197	30.197	30.197	30.197	30.197
	α_K	36.250	53.643	88.778	121.106	150.545
	α	66.447	83.840	118.975	151.303	180.742
5	α_R	29.281	29.281	29.281	29.281	29.281
	α_K	37.190	53.970	89.282	121.801	151.349
	α	66.471	83.251	118.563	151.082	180.630
0	α_R	28.423	28.423	28.423	28.423	28.423
	α_K	38.130	54.297	89.786	122.496	152.153
	α	66.553	82.720	118.209	150.919	180.576

Tabelle 2.11: Wärmeübergangszahlen der Strahlung α_R und Konvektion α_K sowie deren Summe α in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_L und der Windgeschwindigkeit w

Mittlere Schichttemperatur T_m [°C]											
T_L [°C]	$\begin{matrix} t \text{ [h]} \\ w \text{ [m/s]} \end{matrix}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	2,0
+ 30	0	105	85,9	76,3	69,6	60,2	52,7	47,6	43,9	41,2	37,4
	5	105	85,1	74,9	67,8	58,0	50,2	45,1	41,5	38,9	35,4
	10	105	83,6	72,6	64,9	54,5	46,6	41,5	38,2	35,9	33,2
	15	105	82,3	70,6	62,4	51,7	43,8	39,0	36,1	34,1	32,0
	20	105	81,2	68,8	60,3	49,4	41,6	37,2	34,6	32,9	31,2
+ 25	0	105	84,7	74,4	67,2	57,3	49,3	43,8	39,9	36,9	32,9
	5	105	83,8	73,0	65,4	55,0	46,7	41,2	37,3	34,5	30,9
	10	105	82,2	70,5	62,3	51,2	42,7	37,4	33,8	31,4	28,4
	15	105	80,8	68,3	59,6	48,2	39,7	34,7	31,5	29,4	27,1
	20	105	79,6	66,4	57,3	45,7	37,4	32,7	29,9	28,1	26,3
+ 20	0	105	83,4	72,5	64,9	54,3	45,8	40,0	35,8	32,7	28,4
	5	105	82,5	71,1	63,0	51,9	43,2	37,3	33,2	30,2	26,3
	10	105	80,8	68,4	59,6	57,9	38,9	33,2	29,4	26,8	23,7
	15	105	79,4	66,0	56,8	44,7	35,7	30,3	26,9	24,7	22,2
	20	105	78,0	64,0	54,4	42,0	33,3	28,2	25,2	23,4	21,4
+ 15	0	105	82,2	70,6	62,5	51,4	42,3	36,2	31,8	28,5	24,0
	5	105	81,2	69,1	60,6	48,9	39,6	33,4	29,1	25,9	21,8
	10	105	79,5	66,3	57,0	44,6	35,1	29,1	25,0	22,3	18,9
	15	105	77,9	63,8	54,0	41,1	31,7	26,0	22,4	20,0	17,4
	20	105	76,5	61,6	51,4	38,3	29,1	23,7	20,5	18,6	16,5
+ 10	0	105	80,9	68,7	60,2	48,4	38,9	32,4	27,7	24,2	19,5
	5	105	79,9	67,2	58,2	45,9	36,1	29,6	25,0	21,6	17,2
	10	105	78,1	64,1	54,4	41,3	31,3	24,9	20,7	17,7	14,2
	15	105	76,4	61,5	51,2	37,6	27,6	21,6	17,8	15,3	12,5
	20	105	74,9	59,2	48,5	34,7	24,8	19,2	15,9	13,8	11,6
+ 5	0	105	79,6	66,8	57,8	45,4	35,4	28,6	23,7	20,0	15,0
	5	105	78,7	65,2	55,8	42,9	32,6	25,7	20,9	17,3	12,7
	10	105	76,7	62,0	51,8	38,0	27,4	20,7	16,3	13,2	9,4
	15	105	74,9	59,3	48,4	34,1	23,6	17,2	13,2	10,6	7,7
	20	105	73,3	56,8	45,5	31,0	20,7	14,8	11,2	9,0	6,7
+ 0	0	105	78,3	64,9	55,4	42,4	31,9	24,7	19,6	15,7	10,4
	5	105	77,4	63,3	53,4	39,8	29,0	21,8	16,7	13,0	8,1
	10	105	75,3	59,9	49,2	34,7	23,6	16,6	11,9	8,6	4,7
	15	105	73,4	57,0	45,6	30,6	19,5	12,9	8,6	5,9	2,8
	20	105	71,7	54,4	42,5	27,3	16,4	10,2	6,5	4,2	1,8

Tabelle 2.12: Mittlere Schichttemperaturen T_m im Asphalt nach Bossemeyer für Lufttemperaturen $T_L = + 30$ °C, $+ 25$ °C, $+ 20$ °C, $+ 15$ °C, $+ 10$ °C, $+ 5$ °C und 0 °C in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit w sowie der Zeit t

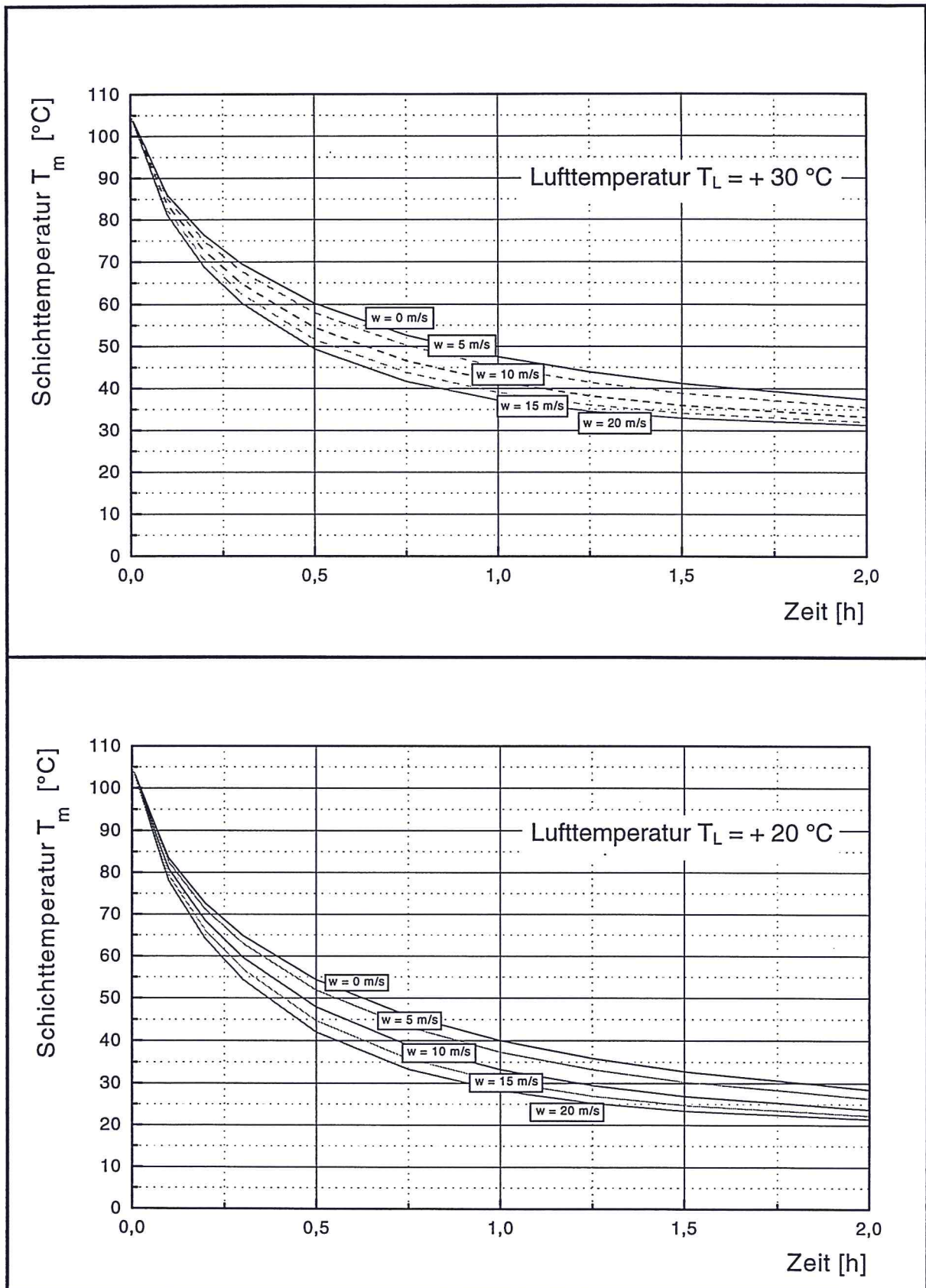


Abbildung 2.10: Graphische Darstellung der mittleren Schichttemperaturen T_m im Asphalt nach Bossemeyer für Lufttemperaturen $T_L = +30\text{ °C}$ und $+20\text{ °C}$ in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit w sowie der Zeit t

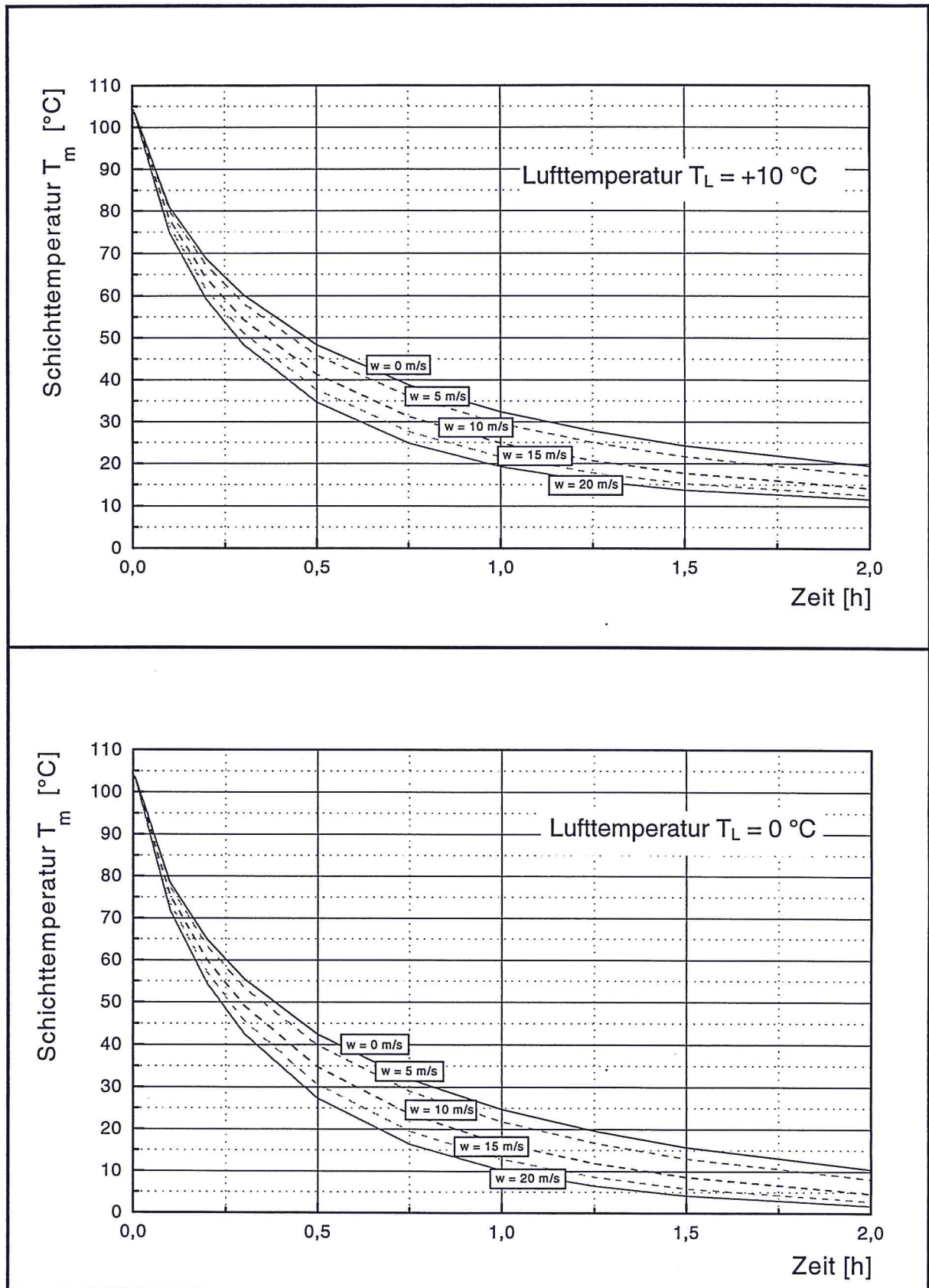


Abbildung 2.11: Graphische Darstellung der mittleren Schichttemperaturen T_m im Asphalt nach Bossemeyer für Lufttemperaturen $T_L = +10$ °C und 0 °C in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit w sowie der Zeit t

Bei der Festlegung der geringsten Abkühlrate wurde für die Prüftemperaturen von $T_{Pr} = + 55\text{ °C}$ und $+ 40\text{ °C}$ von einer Lufttemperatur $T_L = + 30\text{ °C}$ und für die Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 25\text{ °C}$ von einer Lufttemperatur $T_L = + 20\text{ °C}$ ausgegangen. In allen Fällen wurde die Windgeschwindigkeit mit $w = 0\text{ m/s}$ angenommen.

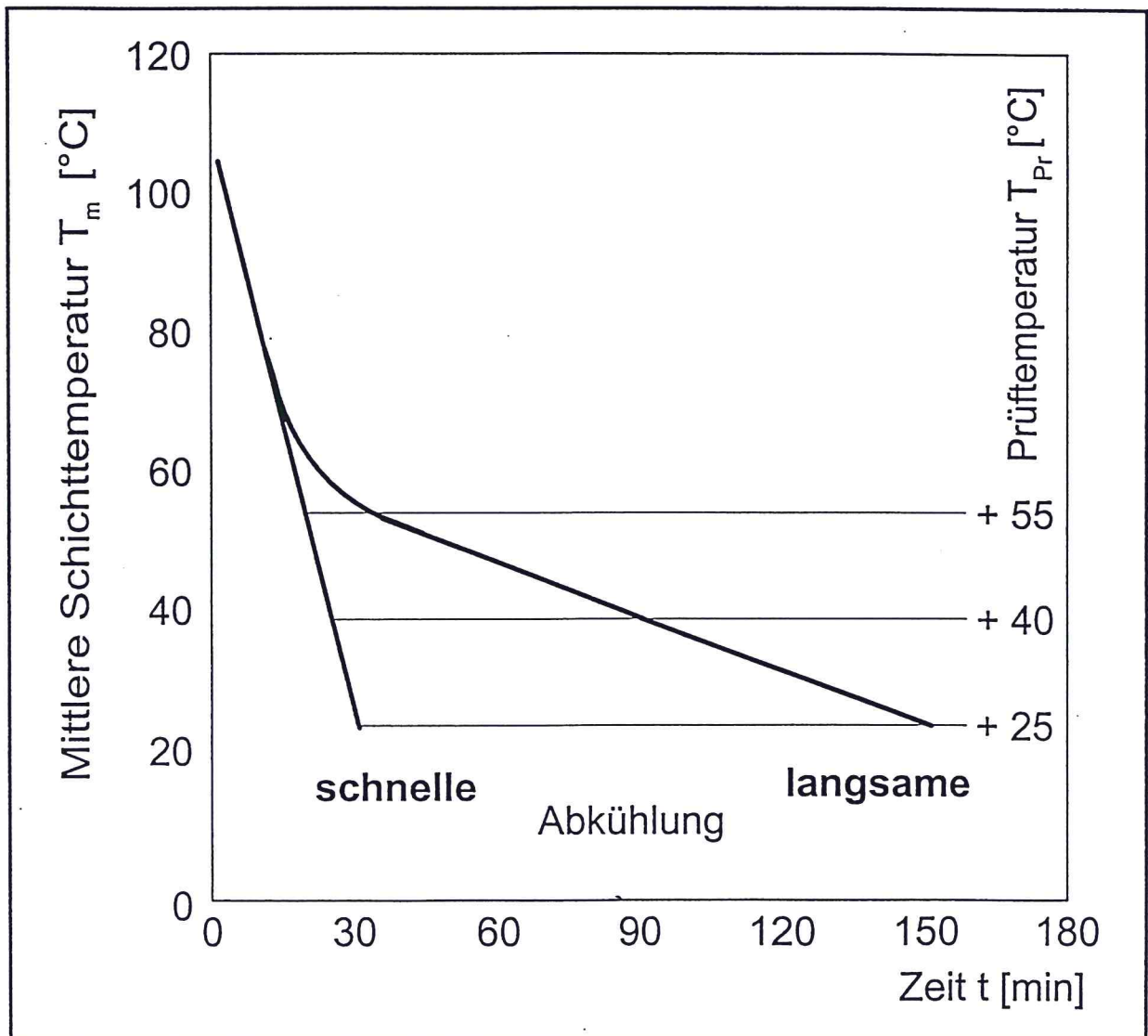


Abbildung 2.12: Prinzipskizze für den Verlauf der Probekörpertemperaturen bei schneller beziehungsweise langsamer Abkühlung auf die Prüftemperaturen von $T_{Pr} = + 55\text{ °C}$, $+ 40\text{ °C}$ beziehungsweise $+ 25\text{ °C}$

Tabelle 2.13 zeigt die gewählten Temperierzeiten für unterschiedlich schnelle Abkühlungen bis zum Erreichen der Prüftemperaturen im einzelnen. Graphisch werden die Zusammenhänge durch die Prinzipskizze in Abbildung 2.12 verdeutlicht.

Zu erreichende Prüftemperatur	Abkühldauer bei Abkühlgeschwindigkeit	
	schnell	langsam
°C	min	min
+ 55	20	35
+ 40	24	90
+ 25	30	150

Tabelle 2.13: Dauer der Temperierphase bis zum Erreichen der Prüftemperatur T_{Pr} in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit

Die Versuche zur Ermittlung des Verformungswiderstandes nach unterschiedlich langen Expositionsdauern erfolgen grundsätzlich nach schneller Abkühlung auf die Expositionstemperaturen von $T_{Ex} = + 25 \text{ °C}$ beziehungsweise $+ 10 \text{ °C}$. Die Expositionsdauern werden zu $t_{Ex} = 2 \text{ h}$, 16 h beziehungsweise 40 h gewählt. Die Wiedererwärmung auf die jeweils gerade einzustellende Prüftemperatur von alternativ $T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$, $+ 40 \text{ °C}$ oder $+ 25 \text{ °C}$ wird ebenfalls in möglichst geringer Zeit vollzogen, ohne jedoch dabei das Risiko einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung von der Asphaltoberfläche her zum Innern des Probekörpers einzugehen. Die Temperierzeiten dieser Versuche können der Tabelle 2.14 entnommen werden.

Zu erreichende Expositions- bzw.	Abkühl- bzw. Erwärmungsdauer bei		
	schneller Abkühlung	schneller Wiedererwärmung von $+ 10 \text{ °C}$	von $+ 25 \text{ °C}$
°C	min	min	min
+ 55	–	24	18
+ 40	–	18	12
+ 25	30	12	–
+ 10	40	–	–

Tabelle 2.14: Dauer der Abkühlphase bis zum Erreichen der Expositionstemperatur sowie der Wiedererwärmungsphase bis zum Erreichen der Prüftemperatur

Aus den Temperierzeiten gemäß Tabelle 2.14 ergeben sich unter Berücksichtigung der unterschiedlich langen Expositionsdauern von $t = 2$ h, 16 h beziehungsweise 40 h die in Abbildung 2.13 als Prinzipsskizze dargestellten Temperaturverläufe für die Versuche mit Wiedererwärmung der Probekörper nach vorausgegangener Abkühlung auf die Expositionstemperaturen von $T_{\text{Ex}} = +10$ °C beziehungsweise $+25$ °C.

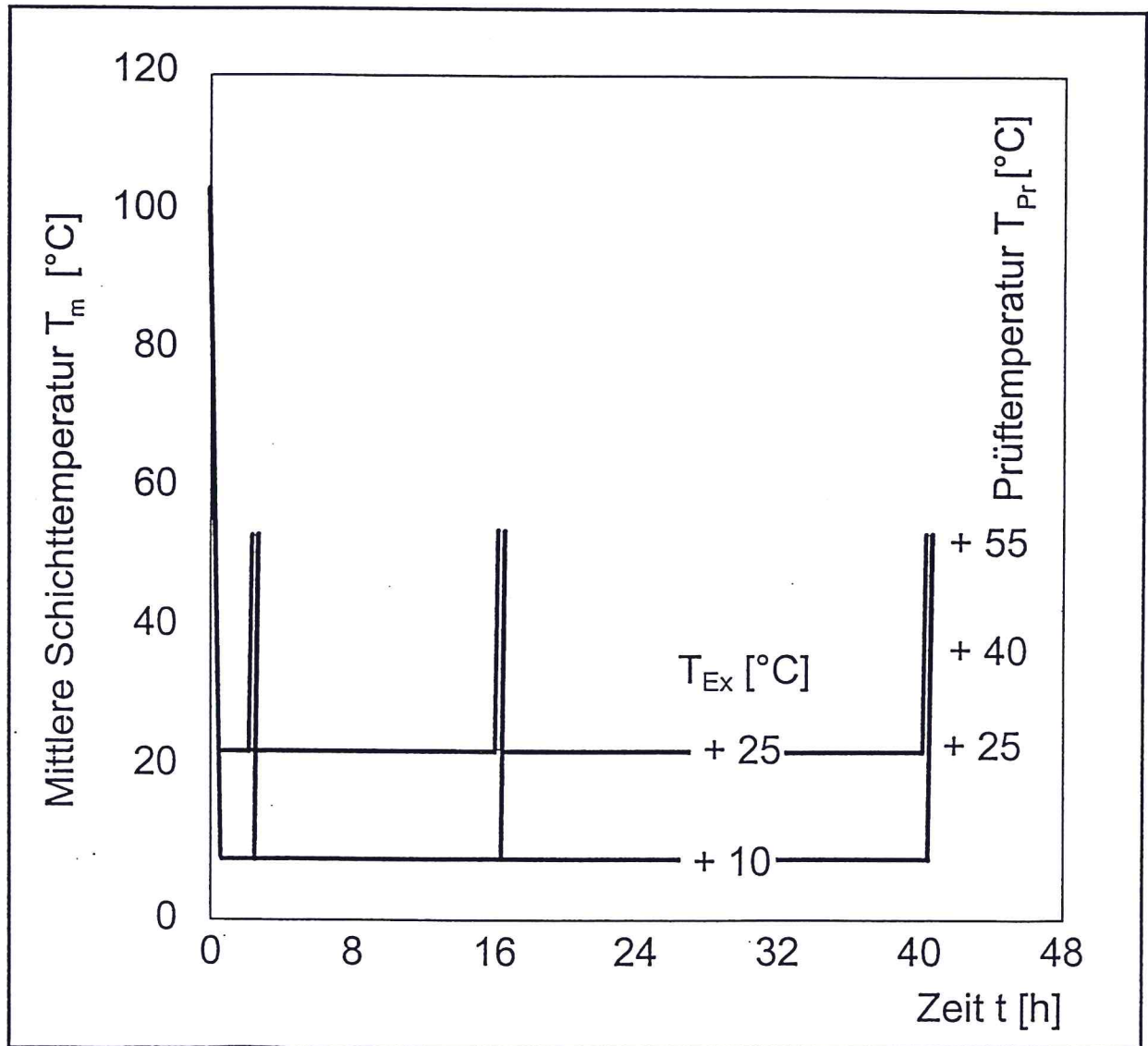


Abbildung 2.13: Prinzipsskizze für den Verlauf der Probekörpertemperaturen bei schneller Abkühlung auf die Expositionstemperaturen von $T_{\text{Ex}} = +10$ °C beziehungsweise $+25$ °C und Wiedererwärmung auf die Prüftemperaturen von $T_{\text{Pr}} = +25$ °C, $+40$ °C beziehungsweise $+55$ °C nach unterschiedlich langen Expositionsdauern von $t_{\text{Ex}} = 2$ h, 16 h oder 40 h

Mit der Expositionsdauer von $T_{\text{Ex}} = 2 \text{ h}$ wird der Fall der sofortigen Verkehrsübergabe nach Fertigstellung der Deckschicht simuliert; mit den Expositionsdauern von $t_{\text{Ex}} = 16 \text{ h}$ beziehungsweise 40 h werden Ruhephasen der Asphaltdeckschicht von einer Nacht beziehungsweise zwei Nächten nachgeahmt.

2.2.4 Der dynamische Stempeleindringversuch

Beim dynamischen Stempeleindringversuch wird eine zylindrische Asphaltprobe mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von rund 45 mm mittels eines kreisrunden Stempels von 80 mm Durchmesser mittig mit bis zu 19.200 Lastwechseln impulsartig belastet. Über die gesamte Dauer der dynamischen Belastung wird die nach jedem Lastimpuls verbleibende Eindringtiefe des Laststempels in die Probe durch induktive Wegaufnehmer gemessen und in einem angeschlossenen Personal Computer gespeichert [5, Arand, von der Decken].

Der Asphaltprobekörper liegt während der Prüfung auf einer starren Unterlage und wird von einem 80 mm hohen Metallring umschlossen, der jegliche Seitendehnung verhindert. Um eine momentenfreie vertikale Lasteintragung zu gewährleisten, ist der Laststempel mit einem Gelenk versehen. Seine kreisrunde Grundfläche wird vor dem Versuch mit einem Glycerin-Dextrin-Gemisch als Trennmittel bestrichen, das sowohl die Reibung in der Lasteinleitungsebene reduziert als auch ein Verkleben des Stempels mit der Probekörperoberfläche unterbindet.

Die dynamische Druckbelastung wird in Form sinusförmiger Lastimpulse mit einer Dauer des Impulses von 100 ms und mit einem oberen beziehungsweise unteren Scheitelwert der Flächenpressung von $0,8 \text{ N/mm}^2$ beziehungsweise $0,02 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht. Der maximale Belastungswert entspricht somit in etwa der Lasteintragung, die durch einen Lkw-Reifen mit 8 bar Innendruck verursacht wird. Eine - an sich erstrebenswerte - Druckspannung von $0,0 \text{ N/mm}^2$ als unterer Scheitelwert der Lastimpulse ist nicht realisierbar, da es dann zu einem Abheben des Laststempels und bei der folgenden Belastung zu einem stoßartigen Wiederaufsetzen des Stempels auf den Probekörper kommen kann.

Die Temperierung der Asphaltproben erfolgt entsprechend den Ausführungen im Abschnitt 2.2.3.2 in einem Wärme-Kälte-Schrank. Nach dem Einbau in die Prüfanlage wird die Probe für 10 Minuten im Luftbad der zur Prüfmaschine gehörenden Temperierkammer auf der vorgesehenen Prüftemperatur belassen, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Probekörper zu gewährleisten. Die Temperierkammer ist in der Lage, die Temperatur der Luft in den Bereichen von -35 °C bis $+60\text{ °C}$ mit einer Regelgenauigkeit von $\pm 0,3\text{ K}$ konstant zu halten. Für eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Kammer sorgt ein Ventilator. Die Prüftemperaturen betragen $T_{Pr} = +55\text{ °C}$, $+40\text{ °C}$ beziehungsweise $+25\text{ °C}$.

Durch die unter dem Stempel wirkende Druckspannung wird das Asphaltmaterial teilweise zur Seite hin verdrängt; es kann dann neben dem Stempel wieder aufsteigen. Dieser Effekt einer sogenannten Aufwölbung tritt aber nur in der unmittelbaren Nachbarschaft des Stempels auf und ist am äußeren Rand des Probekörpers nicht mehr festzustellen. Als Eindringtiefe wird der beim unteren Scheitelwert der Druckspannung gemessene Weg des Stempels unter Last definiert; die seitlichen Aufwölbungen werden bei der Meßdatenerfassung nicht berücksichtigt. Die Stempeleindringtiefe wird auf $0,001\text{ mm}$ genau gemessen und in der Einheit Millimeter auf drei Stellen hinter dem Komma angegeben. Sie wird für die spätere Auswertung unter Zugrundelegung der individuellen Probekörperdicke in eine Dehnung umgerechnet.

2.2.4.1 Probekörperherstellung und Probenvorbehandlung

Da im Rahmen dieser Forschungsarbeit die Auswirkungen unterschiedlicher Temperierungen der Asphaltprobekörper auf den Verformungswiderstand untersucht werden, kommt der zeitgenauen Probekörperherstellung und der exakten Temperatureinhaltung in allen Arbeitsschritten eine herausragende Bedeutung zu. Für die dynamischen Stempeleindringversuche werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von rund 45 mm benötigt. Die Randbedingungen dieses Forschungsvorhabens erfordern es darüber hinaus, daß die Pro-

Probekörper unmittelbar nach der Herstellung eine Temperatur von 105 °C besitzen und sich bereits in einem Metallring befinden, der jegliche Seitendehnung vor und während der Belastung verhindert. Aufgrund dieser Vorgaben wurden umfangreiche Voruntersuchungen unternommen, die zum Ergebnis führten, daß die Herstellung der Probekörper einzig und allein mit dem Gyrator praktikabel ist.

Als Bezugsraumdicke der drei zu untersuchenden Asphaltarten/-sorten wurde die Raumdicke des Marshall-Probekörpers entsprechend DIN 1996 Teil 4 herangezogen. Als Zielwert für die Verdichtung der Asphaltprobekörper für die Durchführung der dynamischen Stempel Eindringversuche wurde ein Verdichtungsgrad von mindestens 99 % angestrebt.

Nach der ausreichenden Bevorratung mit Mineralstoffen und Bitumen wurden die Mineralstoffe entsprechend den Ausführungen der DIN 1996 Teil 20 gewaschen und präparativ naß gesiebt. Anschließend wurden sie im Wärmeschrank getrocknet und sodann nochmals trocken gesiebt, um letzte Über- und Unterkornanteile zu entfernen.

Mit der kleinsten Kornklasse beginnend wurden die Mineralstoffe in einen Blech-eimer eingewogen und über Nacht bei einer Temperatur von $T \leq 170$ °C beheizt. Die benötigte Bindemittelmenge wurde am darauffolgenden Morgen in eine Kasse-rolle abgefüllt, innerhalb weniger Minuten auf eine Temperatur von 150 °C erwärmt und unmittelbar vor dem Mischprozeß den Mineralstoffen zugegeben. Nach zwei-einhalbminütigem Mischen in einem Labormischer vom Typ Rego 2 SM wurde eine Probeteilung des Mischguts vorgenommen. Die für jeden Probekörper benötigten Mengen wurden in kleine, verschließbare Behälter gefüllt und bei einer Temperatur von 135 °C im Wärmeschrank bis zur weiteren Verarbeitung gelagert.

Für die Verdichtung des Mischguts kam ein Gyrator vom Typ Servopac der Firma ELE International zur Anwendung. Dieses Gerät zeichnet sich durch eine pneuma-tische Einstellung des Gyratorwinkels Φ aus und ist in der Lage, die Probekörper-

dicken kontinuierlich mittels induktiver Wegaufnehmer zu erfassen und auf einen mit dem Gerät verbundenen Personal Computer zu übertragen.

Anhand von Vorversuchen wurde für jede der drei Asphaltmischgutarten/-sorten die erforderliche Anzahl der Umdrehungen zum Erreichen des Soll-Verdichtungsgrads von 99 % ermittelt. Da die Probekörper jedoch nach der Herstellung eine Temperatur von 105 °C aufweisen müssen, war es notwendig, die Verdichtungsdauer zu begrenzen. Es wurde deshalb zunächst die Vertikalbelastung erhöht und mit dieser Last die erforderliche Umdrehungszahl ermittelt. Tabelle 2.15 zeigt für die drei Asphaltmischgutarten/-sorten jeweils erforderliche Raumdichte sowie die Vorgaben an den Gyrator.

Unmittelbar nach der Verdichtung der Probekörper werden diese pneumatisch aus der Verdichtungsform in den seitendehnungsverhindernden Prüfring gepreßt und in den auf die Temperatur von 105 °C vortemperierten Wärme-Kälte-Schrank gelegt. Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Probekörper sicherzustellen, werden sie dort für fünf Minuten bei der Temperatur von 105 °C gelagert, ehe die computergesteuerte Temperierung zur gezielten Abkühlung beginnt.

		Mischgutart/-sorte		
		AB 0/11 L	AB 0/11 S	SMA 0/11 S
Gyratorwinkel Φ	°	1	1	1
Rotationsgeschwindigkeit ω	min ⁻¹	30	30	30
Anzahl der Umdrehungen	—	50	100	175
Vertikalbelastung	N	10.550	15.900	15.900
Raumdichte	g/cm ³	2,510	2,470	2,410

Tabelle 2.15: Kenngrößen für die gyratorische Verdichtung zur Herstellung der Asphaltprobekörper unter Angabe der angestrebten Raumdichten

2.2.4.2 Erfassung der Prüfergebnisse

Im dynamischen Stempleindringversuch werden die zylindrischen Asphaltprobe-körper einer sinusförmigen Druckbelastung ausgesetzt, die durch einen mittig auf-setzenden Laststempel geringeren Durchmessers der Probe aufgeprägt wird. Wäh-rend der Belastungsdauer erfaßt ein angeschlossener Personal Computer für jede Meßgröße eines aufgezeichneten Zyklus zehn äquidistante Meßwerte. Mittels eines Householderalgorithmus [6, Böhm et al.] lassen sich diese Meßwerte über die Me-thode der kleinsten Abstandsquadrate durch eine Fourierreihenentwicklung

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(2\pi nft) + b_n \cdot \sin(2\pi nft)),$$

bei der das Summenglied aus nur einem Summanden besteht ($n = 1$), anpassen.

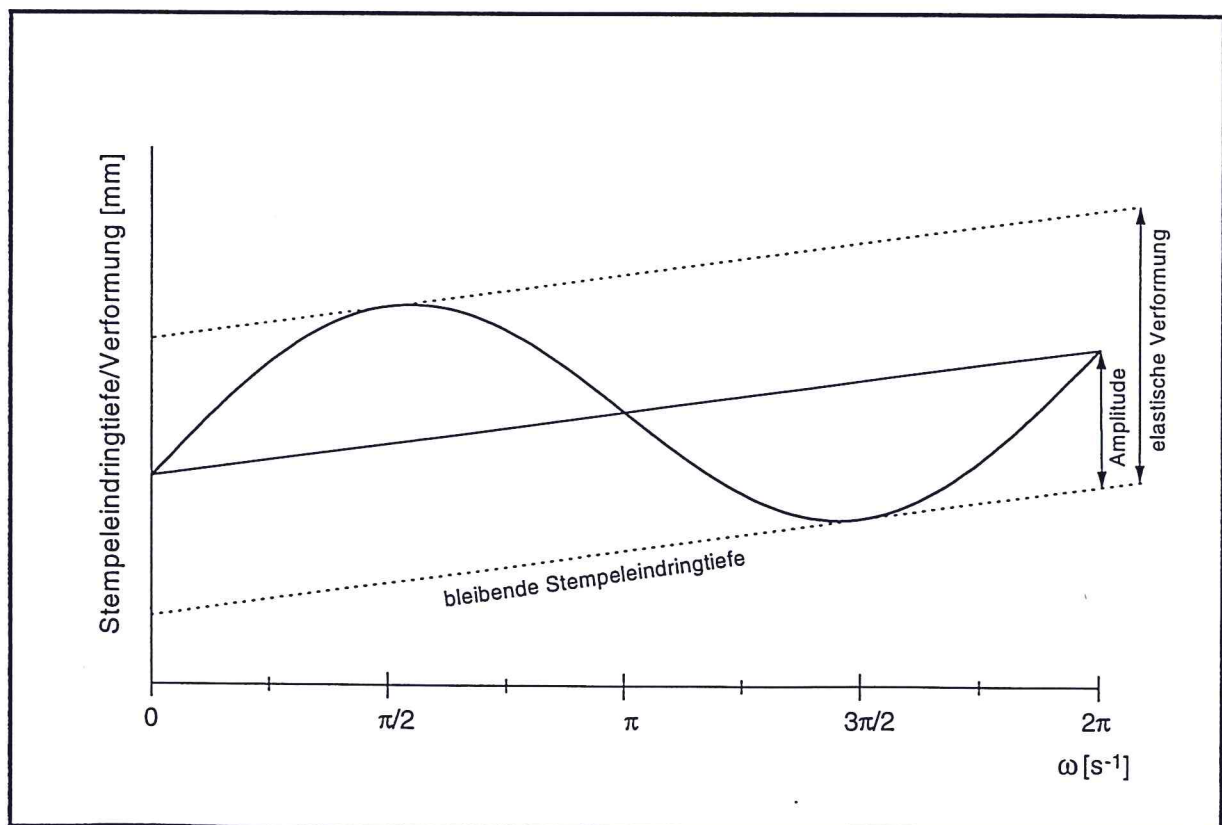


Abbildung 2.14: Prinzipskizze zur Erläuterung der bleibenden und elastischen Verformungsanteile während eines beliebigen Lastimpulses

Die so gefundene Funktion beschreibt mit den Koeffizienten a_0 , a_1 und b_1 eine ideale Sinuskurve. Informationen über eventuelle Abweichungen der originalen Meßwerte von einer Sinuskurve gehen hierbei verloren. Eine detaillierte Herleitung des Verfahrens kann in [3, Arand et al.] nachvollzogen werden. Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge dient Abbildung 2.14.

Die Amplitude der eingerechneten Sinuskurve schwingt um einen infolge der zunehmenden Eindringung des Stempels in den Asphaltprobekörper stetig ansteigenden Graphen. Die Differenz zwischen oberem und unterem Scheitelwert einer jeden Schwingung stellt die elastische Verformung des Probekörpers während eines Lastwechsels dar. Für die Ermittlung des Verformungswiderstandes wird für jede Sinusschwingung als maßgebliche Verformung die bleibende Eindringtiefe des Stempels in den Asphaltprobekörper beim unteren Scheitelwert der Schwingungsamplitude bestimmt.

Im Anfangsbereich der Dehnungskurven kann es zu unplausiblen Meßwerten infolge von Einschwingvorgängen der Hydrauliksysteme kommen (siehe Abbildung 2:15). Dieser Einfluß kann durch eine Korrekturrechnung verringert werden.

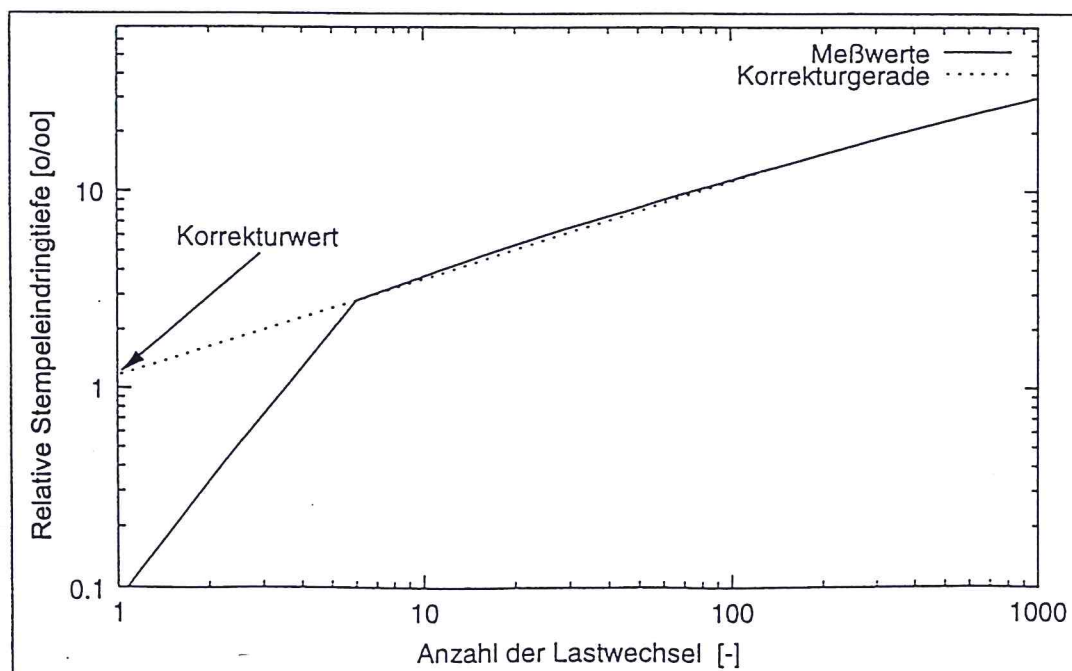


Abbildung 2.15: Ermittlung eines Korrekturwertes zur Kurvenanpassung

Zur Ermittlung eines Korrekturwertes wird bei logarithmischer Darstellung der Anzahl der Lastwechsel auf der Abszisse und logarithmischer Darstellung der relativen Stempeleindringtiefen auf der Ordinate eine Sekante zwischen die Meßpunkte des sechsten und des 21sten Lastwechsels eingerechnet. Durch eine Verlängerung der Sekante zum ersten Lastwechsel wird eine theoretische relative Stempeleindringtiefe während des ersten Lastwechsels ermittelt. Diese theoretische relative Stempeleindringtiefe ist der Korrekturwert, um den alle Ergebnisse der Eindringtiefmessungen verringert werden. Abbildung 2.15 zeigt exemplarisch das Korrekturverfahren graphisch. Für die Auswertung des Datenmaterials werden die Korrekturen jedoch rechnerisch durchgeführt.

2.3 Mathematische Instrumentarien zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Für die in dieser Forschungsarbeit experimentell ermittelten Meßwerte liegen Rohdatensätze mit drei Einzelwerten je Teilkollektiv vor. Die Einzelwerte der Teilkollektive können folglich nicht mittels Testverteilungen auf das Vorhandensein von Ausreißern (abweichenden Meßwerten) geprüft werden. Die Eliminierung ausreißerverdächtiger Einzelwerte erfolgt - gegebenenfalls - anhand von Plausibilitätserwägungen; eliminierte Einzelwerte werden durch das arithmetische Mittel der verbliebenen Einzelwerte ersetzt, um bei weiteren statistischen Analysen mit vollständigen Datensätzen arbeiten zu können.

2.3.1 Einfache lineare Regressionsanalyse

Ziel einer Regressionsanalyse ist es, anhand einer empirischen Funktion $\hat{y}(x)$ eine funktionale Beziehung zwischen einer abhängigen und einer unabhängigen, normalverteilten Variablen zu finden, die es gestattet, aus vorgegebenen beziehungsweise beliebigen Werten der unabhängigen Einflußgröße x die jeweils abhängige Einflußgröße y zu schätzen [22, Sachs].

Liegen Datenpaare (x_i, y_i) der Anzahl n vor, so ist diese Beziehung im einfachsten Fall die Gleichung einer Geraden mit

$$\hat{y}(x) = a_0 + a_1 \cdot x.$$

Diese Gerade ist so in das zweidimensionale Feld der Beobachtungspunkte zu legen, daß die Summe der Quadrate aller vertikalen Abstände der experimentell ermittelten Werte von der Geraden ein Minimum wird. Die Koeffizienten a_0 und a_1 werden dabei nach dem Gaußschen Prinzip der kleinsten Quadrate so bestimmt, daß die Fehlerquadratsumme

$$\begin{aligned} \text{FQS}(a_0, a_1) &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i)^2 \end{aligned}$$

ihren kleinsten Wert annimmt. Dies ist dann der Fall, wenn die partiellen Ableitungen erster Ordnung

$$\frac{\delta \text{FQS}}{\delta a_1} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (-x_i \cdot y_i + a_1 \cdot x_i^2 + a_0 \cdot x_i) \quad \text{und}$$

$$\frac{\delta \text{FQS}}{\delta a_0} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (-y_i + a_1 \cdot x_i + a_0)$$

verschwinden, das heißt, zu Null werden.

Die daraus gewonnenen zwei Normalgleichungen

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) \cdot a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \cdot a_0 = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i),$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \cdot a_1 + n \cdot a_0 = \sum_{i=1}^n y_i$$

bilden ein lineares Gleichungssystem mit zwei Unbekannten. Es besitzt genau eine Lösung

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} ,$$

$$a_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} .$$

Die Konstante a_0 stellt den Abschnitt auf der y-Achse dar, der - von ihrem Nullpunkt an gerechnet - durch die Regressionsgerade abgetrennt wird. Der Regressionskoeffizient a_1 gibt die Steigung der Geraden an.

Zusätzlich wird zur Beurteilung der Güte des linearen Ansatzes das Bestimmtheitsmaß B

$$r^2 = B = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{mit } 0 \leq B \leq 1$$

berechnet. B erfaßt den durch die Regression erklärten Anteil der Varianz auf der Regressionsgeraden an der Gesamtvarianz und gilt folglich als Maß für die Genauigkeit, mit der die beobachteten Werte y_i durch die berechneten Schätzwerte $\hat{y}_i(x)$ approximiert werden. Das Bestimmtheitsmaß läßt auch erkennen, in welchem Umfang die Streuungen systematischer Natur sind. Der Rest auf Eins ist dem Zufall und/oder nicht erfaßten Einflüssen zuzuschreiben.

2.3.2 Signifikanztest

Im Anschluß an eine einfache lineare Regressionsanalyse ist häufig zu prüfen, ob der Regressionskoeffizient b sich signifikant von einem aufgrund plausibler Annahmen gewählten Wert b_0 - beispielsweise Null oder Eins - unterscheidet. Dazu müssen das Steigungsmaß b , der hypothetische Regressionskoeffizient b_0 , die Anzahl der Freiheitsgrade $(n-2)$ mit n gleich Anzahl der Wertepaare sowie die Stan-

dardabweichungen s_y der Zielgröße und s_x der Einflußgröße bekannt sein. Die Prüfgröße $\hat{t}$ kann dann wie folgt berechnet werden:

$$\hat{t} = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s_x^2 \cdot |b - b_0|}}{\sqrt{s_y^2 - b^2 \cdot s_x^2}} .$$

Ist die Prüfgröße $\hat{t}$ kleiner oder höchstens gleich einem von der Anzahl der Freiheitsgrade $(n-2)$ und der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α abhängigen Schwellenwert $t(n-2; \alpha)$, so wird die Hypothese angenommen, zwischen b und b_0 bestehe kein signifikanter Unterschied. Die Signifikanzzahl wird zu $\alpha = 0,05$ - entsprechend einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % - gewählt. Ist die Prüfgröße $\hat{t}$ größer als der Schwellenwert $t(n-2; \alpha)$, so gilt die Alternativhypothese $b \neq b_0$ als zutreffend.

2.3.3 Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation

Mit Hilfe multipler Varianzanalysen können die Einflüsse von zwei und mehr Faktoren auf die Gesamtvariabilität einer Merkmalsgröße und gleichzeitig die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren erkannt und quantitativ ermittelt werden. Das Berechnungsprinzip besteht darin, die Faktoren so einzusetzen, daß sich ihre Effekte und Wechselwirkungen sowie die Variabilität dieser Effekte messen, untereinander vergleichen und gegen die zufällige Variabilität abgrenzen lassen.

Gemäß der Klassifikation von Eisenhart [10] können zur Lösung von Problemen mit varianzanalytischen Methoden grundsätzlich drei Modelle unterschieden werden:

- Modell I mit festen Effekten, wobei die Stufen der Einflußfaktoren gezielt ausgewählt und festgelegt werden,
- Modell II mit zufälligen Effekten, wobei die Stufen der Einflußfaktoren auf Zufallsstichproben aus einer Grundgesamtheit beruhen sowie
- Modell III mit gemischten Effekten, wobei sich die Einflußfaktoren sowohl aus dem Modell I als auch aus dem Modell II ergeben.

Ferner unterscheidet man bei multiplen Varianzanalysen zwischen einer Kreuzklassifikation und einer hierarchischen Klassifikation. Bei der Kreuzklassifikation treten alle Stufen des einen Einflußfaktors in allen Stufen aller anderen Einflußfaktoren auf. Bei der hierarchischen Klassifikation hingegen treten alle Stufen einer Einflußgröße immer nur mit einer Stufe einer anderen Einflußgröße gemeinsam auf.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche sind so angelegt, daß stets Varianzanalysen mit Kreuzklassifikation nach dem Modell I (mit festen Effekten) auf das vorliegende Datenmaterial angewendet werden können.

Bei dem erhobenen Datenmaterial für die im dynamischen Stempeleindringversuch ermittelten relativen Stempeleindringtiefen liegt eine Drei-Variablen-Klassifikation mit Wiederholungen vor, nämlich für die Variationsursachen Asphaltart/-sorte, Prüftemperatur und Abkühlgeschwindigkeit beziehungsweise Expositionsdauer mit systematisch ausgewählten Stufen der drei Faktoren. Da die Variabilitätsanteile der einzelnen Einflüsse und ihre Wechselwirkungen an der Gesamtvarianz interessieren, werden die zu prüfenden Daten einer Merkmalsgröße zunächst in folgende Gruppen unterteilt:

Faktor A (Asphaltart/-sorte)	mit den Stufen $i = 1$ bis $i = a$, wobei a Stufen in der Grundgesamtheit auftreten,
Faktor B (Prüftemperatur)	mit den Stufen $j = 1$ bis $j = b$, wobei b Stufen in der Grundgesamtheit auftreten,
Faktor C (Abkühlgeschwindigkeit bzw. Expositionsdauer)	mit den Stufen $k = 1$ bis $k = c$, wobei c Stufen in der Grundgesamtheit auftreten.

Da angenommen werden darf, daß durch die systematische Auswahl der Stufen a , b und c jeweils der ganze relevante Bereich der Faktoren A, B und C erfaßt wird, kann das Modell I für alle betrachteten Faktoren zugrunde gelegt werden.

Die Anzahl der Stufen beträgt $a = 3$ (bei der Asphaltart/-sorte), $b = 3$ (bei der Prüftemperatur) und $c = 2$ (bei der Abkühlgeschwindigkeit) beziehungsweise $c = 3$ (bei

der Expositionsdauer). Total sind $a \cdot b \cdot c = 18$ beziehungsweise 27 Stufen vorhanden. Jede Stufe für die relative Stempfeleindringtiefe umfaßt $n = 3$ Werte ("Beobachtungen").

Die Gesamtzahl der Meßwerte ist gleich $N = a \cdot b \cdot c \cdot n = 54$ beziehungsweise 81.

Für das Untersuchungsmaterial wurde ein varianzanalytisches lineares Modell gewählt mit der Modellgleichung:

$$x_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}.$$

Hierbei bezeichnet der Index i stets die Nummer der Stufe des Faktors A, der Index j die des Faktors B, der Index k die des Faktors C, während der Index l die Nummer der Beobachtung von $l = 1$ bis n angibt.

Dabei bedeuten:

x_{ijkl}	=	einen Beobachtungswert, der in der i -ten Stufe des Faktors A, j -ten Stufe des Faktors B, k -ten Stufe des Faktors C und l -ten Beobachtung liegt,
μ	=	Gesamtmittel,
α_i bis γ_l	=	Stufeneffekt der Faktoren A bis C; die Abweichung der Stufenmittel vom Gesamtmittel,
$(\alpha\beta)_{ij}$ bis $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$	=	Wechselwirkungseffekt zwischen den im Index angegebenen Stufen der betreffenden Faktoren; so bezeichnet zum Beispiel $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ den Wechselwirkungseffekt zwischen der i -ten Stufe des Faktors A, der j -ten Stufe des Faktors B und der k -ten Stufe des Faktors C,
ε_{ijkl}	=	Effekt der zufälligen Einflüsse.

In diesem Modell wird vorausgesetzt, daß die Stichproben zufällig aus den $a \cdot b \cdot c$ Grundgesamtheiten entnommen worden sind und daß jede dieser Grundgesamtheiten normalverteilt ist mit statistisch gleicher Varianz σ^2 ; das heißt, die x_{ijk} sollen unabhängig und normalverteilt mit der Varianz σ^2 sein. Für die notwendigen Berech-

nungen der SQ (Summen der quadratischen Abweichungen) wird folgender Weg gewählt. Zunächst wird die Hilfsgröße K bestimmt:

$$K = \frac{\sum x_{ijkl}^2}{N},$$

wobei x die durch Indizierung gekennzeichneten Meßwerte darstellt. Mit der Hilfsgröße K ergeben sich die Einzeleffekte der Faktoren zu:

$$SQ(A) = \sum_i \frac{x_{i...}^2}{n \cdot b \cdot c} - K; \quad v = a - 1,$$

$$SQ(B) = \sum_j \frac{x_{.j...}^2}{n \cdot a \cdot c} - K; \quad v = b - 1,$$

$$SQ(C) = \sum_k \frac{x_{...k}^2}{n \cdot a \cdot b} - K; \quad v = c - 1,$$

sowie die Wechselwirkungseffekte zwischen zwei Faktoren zu:

$$SQ(AB) = \sum_i \sum_j \frac{x_{ij..}^2}{n \cdot c} - K - SQ(A) - SQ(B); \quad v = (a-1) \cdot (b-1),$$

$$SQ(AC) = \sum_i \sum_k \frac{x_{i.k.}^2}{n \cdot b} - K - SQ(A) - SQ(C); \quad v = (a-1) \cdot (c-1).$$

Die übrigen Summen SQ(BC) und deren Freiheitsgrade v werden durch entsprechenden Umtausch der Indices und der jeweiligen Anzahl der Stufen analog berechnet. Für die Wechselwirkungseffekte zwischen drei Faktoren gilt:

$$SQ(ABC) = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{x_{ijk.}^2}{n} - K - SQ(A) - SQ(B) - SQ(C) - SQ(AB) - SQ(AC) - SQ(BC); \quad v = (a-1) \cdot (b-1) \cdot (c-1).$$

Die Gesamtabweichungssumme (Total) kann mit folgender Gleichung

$$SQ(To) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l x_{ijkl}^2 - K; \quad v = (a \cdot b \cdot c \cdot n) - 1 = N - 1$$

bestimmt werden.

Die Rest- oder Fehlerquadratsumme wird wie folgt festgestellt:

$$\begin{aligned} \text{SQ(R)} = & \text{SQ (To)} - \text{SQ (A)} - \text{SQ (B)} - \text{SQ (C)} - \text{SQ (AB)} - \text{SQ (AC)} \\ & - \text{SQ (BC)} - \text{SQ (ABC)} \\ v = & a \cdot b \cdot c \cdot (n-1). \end{aligned}$$

Die Mittleren Quadrate MQ lassen sich durch Teilung der Summen der Abweichungsquadrate SQ durch die zugehörigen Freiheitsgrade ermitteln.

Mit Hilfe des F-Tests ist dann zu untersuchen, ob die Effekte der Einflußfaktoren und der Wechselwirkungen signifikante Änderungen der Merkmalsgröße bewirken. Gemäß der gestellten Aufgabe sind folgende Null-Hypothesen zu prüfen: Die Einflußfaktoren und deren Wechselwirkungen bewirken in allen Stufen jeweils keinen Effekt. Wird die Null-Hypothese angenommen, so besteht kein Unterschied zwischen den Mittelwerten der Stufen des zu prüfenden Effekts, was bedeutet, daß die Unterschiede zwischen den Stufen dieses Effekts keinen Einfluß auf die Merkmalsänderungen ausüben.

Die Prüfung der Null-Hypothesen erfolgt jeweils durch Vergleich eines rechnerischen $\hat{F}$ -Werts, gebildet aus dem Quotienten des jeweiligen Mittleren Quadrats MQ und dem Mittleren Quadrat des Resteinflusses, mit einem theoretischen F-Wert. Ist die Prüfgröße $\hat{F}$ größer als der tabellierte F-Wert der Fisher-Verteilung, so wird die entsprechende Null-Hypothese nicht akzeptiert, das heißt, die der geprüften Variationsursache zugeordnete Varianz ist nicht zufällig, sondern signifikant unterschiedlich von der Fehlervarianz.

Die rechnerischen $\hat{F}$ -Werte und die zugehörigen Freiheitsgrade lassen sich für das gewählte varianzanalytische Modell mit festen Effekten aus folgenden Beziehungen ermitteln:

$$\hat{F}(A) = \frac{MQ(A)}{MQ(R)} ; \quad v_1 = (a - 1), v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(B)$; $\hat{F}(C)$ und deren zugehörige Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(AB) = \frac{MQ(AB)}{MQ(R)} ; \quad v_1 = (a - 1) \cdot (b - 1), v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(AC)$; $\hat{F}(BC)$ und deren zugehörige Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(ABC) = \frac{MQ(ABC)}{MQ(R)} ; \quad v_1 = (a - 1) \cdot (b - 1) \cdot (c - 1),$$

$$v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

Die theoretischen F-Werte werden jeweils für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für die zugehörigen Freiheitsgrade v_1 und v_2 ermittelt.

Weiterhin werden die Varianzkomponenten der Haupt- und Wechselwirkungen ermittelt, um die Effekte dieser Wirkungen abschätzen zu können. In Anlehnung an [24, Weber] erweisen sich die Mittleren Quadrate MQ als Summen von Varianzkomponenten, die die Wirkungen und Wechselwirkungen der verschiedenen Einflußfaktoren charakterisieren. Für das gewählte Modell mit festen Effekten lassen sich nach Weber [24] die Varianzkomponenten s^2 aus folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\begin{aligned} MQ &= E(MQ), \\ MQ(A) &= s_R^2 + b \cdot c \cdot n \cdot s_A^2, \\ MQ(B) &= s_R^2 + a \cdot c \cdot n \cdot s_B^2, \\ MQ(C) &= s_R^2 + a \cdot b \cdot n \cdot s_C^2, \\ MQ(AB) &= s_R^2 + c \cdot n \cdot s_{AB}^2, \\ MQ(AC) &= s_R^2 + b \cdot n \cdot s_{AC}^2, \\ MQ(BC) &= s_R^2 + a \cdot n \cdot s_{BC}^2, \\ MQ(ABC) &= s_R^2 + n \cdot s_{ABC}^2, \\ MQ(R) &= s_R^2. \end{aligned}$$

Die dadurch ermittelten s^2 können als prozentuale Anteile an der Gesamtvarianz angegeben werden:

$$s_A^2 + s_B^2 + s_C^2 + s_{AB}^2 + s_{AC}^2 + s_{BC}^2 + s_{ABC}^2 + s_R^2 ,$$

mit der Bedingung: $s_{(T_0)}^2 \hat{=} 100 \%$.

2.3.4 Varianzanalyse der zweifachen Klassifikation

Die Gleichungen für die Varianzanalyse der zweifachen Klassifikation ergeben sich aus den Gleichungen für die Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation durch Schluß von n auf $(n-1)$.

2.3.5 Einfacher Varianzvergleich

Soll die Gleichheit der Varianzen zweier normalverteilter, von Ausreißern bereinigter Datensätze überprüft werden, so wird nach [22, Sachs] zunächst die Null-Hypothese aufgestellt, die Varianzen seien gleich:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 .$$

Die Null-Hypothese wird abgelehnt, wenn die aus den Stichprobenvarianzen berechnete Testgröße

$$\hat{F} = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ den für die Freiheitsgrade $\nu_1 = (n_1 - 1)$ und $\nu_2 = (n_2 - 1)$ (mit n_1, n_2 = Stichprobenumfang) in [12, FGSV] tabellierten Schwellenwert der F-Verteilung überschreitet; dann wird die Alternativhypothese

$$H_A : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

angenommen, das heißt, die Hypothese der Varianzhomogenität verworfen. Für die Berechnung der Testgröße $\hat{F}$ wird die Stichprobe mit der größeren Varianz als Nr. 1 mit s_1^2 und die andere als Nr. 2 mit s_2^2 bezeichnet.

2.3.6 Einfacher Mittelwertvergleich

Stichproben- umfänge	Varianzen	
	gleich: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	ungleich: $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$
gleich: $n_1 = n_2 = n$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}}$ $FG = 2n - 2$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}}$ $FG = n - 1 + \frac{2n - 2}{\frac{s_1^2}{s_2^2} + \frac{s_2^2}{s_1^2}}$
ungleich: $n_1 \neq n_2$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\left[\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \left[\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}}$ $FG = n_1 + n_2 - 2$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$ $FG = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}}$

Tabelle 2.16 : Vergleich zweier Mittelwerte unabhängiger Stichproben normalverteilter Grundgesamtheiten

Stellt sich die Aufgabe, über einen Mittelwertvergleich festzustellen, ob sich im statistischen Sinne die Mittelwerte zweier Meßreihen mit den Anzahlen n_1 und n_2 der verträglichen Einzelwerte unterscheiden, so wird nach [22, Sachs] die Null-Hypo-

these formuliert, daß die Mittelwerte gleich seien, das heißt, die Differenz der Mittelwerte im statistischen Sinne gleich Null ist:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 .$$

Die Testgröße $\hat{t}$ zur Überprüfung der Null-Hypothese ist für die Fälle gleicher und ungleicher Stichprobenumfänge sowie gleicher und nichtgleicher Varianzen formelmäßig in Tabelle 2.16 angegeben. Überschreitet die Testgröße $\hat{t}$ bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ die für die Anzahl der Freiheitsgrade ν in [22, Sachs] angegebene Signifikanzschranke der t-Verteilung, so wird die Alternativhypothese

$$H_A = \mu_1 \neq \mu_2$$

akzeptiert; das heißt, die Null-Hypothese auf Homogenität der Stichprobenmittelwerte wird abgelehnt.

3. Untersuchungsergebnisse

In Kapitel 3 werden unter Ziffer 3.1 die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache der Viskosität von Bitumen und unter Ziffer 3.2 die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten vorgestellt. Gleichzeitig erfolgt die Auswertung unter Anwendung bewertender Methoden der mathematischen Statistik.

3.1 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache der Viskosität von Bitumen

Der Abschnitt 3.1 gliedert sich in drei Teile. Während im ersten Teil mit der Ziffer 3.1.1 Ausführungen zur Zeitspanne für den Übergang von der Expositionstemperatur zur Prüftemperatur gemacht werden, werden im zweiten Abschnitt (Ziffer 3.1.2) die Ergebnisse der Messungen zur Feststellung der komplexen Viskosität tabellarisch dokumentiert und im Abschnitt 3.1.3 deren Abhängigkeit von der Ansteuerrichtung der Prüftemperatur - von einem höheren oder einem niedrigeren Temperaturniveau aus - untersucht.

Zum besseren Verständnis der vorzustellenden Ergebnisse seien im Folgenden einige Ausführungen zu deren Zustandekommen gemacht: Sowohl bei den Straßenbaubitumen B 80 und B 65 als auch beim polymermodifizierten Bitumen PmB 45 wurde im Bereich der niedrigeren Prüftemperaturen von $T_{Pr} = + 10\text{ °C}$ und $T_{Pr} = + 25\text{ °C}$ - von Prüfstreuungen abgesehen - praktisch keine Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der applizierten Schubspannung τ beobachtet. Bei der Prüftemperatur $T_{Pr} = + 40\text{ °C}$ beginnt - stärker ausgeprägt beim Bitumen B 80, schwächer ausgeprägt beim Bitumen B 65 und nur in Ansätzen erkennbar beim polymermodifizierten Bitumen PmB 45 - die komplexe Viskosität η^* bei größeren und weiter zunehmenden Schubspannungen τ kleiner zu werden (siehe Abbildung 3.01). Findet die Viskositätsmessung bei der Prüftemperatur $T_{Pr} = + 55\text{ °C}$ statt, so wird - insbesondere bei dem weicheren und dem mittelharten Straßenbaubitumen B 80 und B 65, noch nicht bei dem polymermodifizierten Bitumen PmB 45 - bei größe-

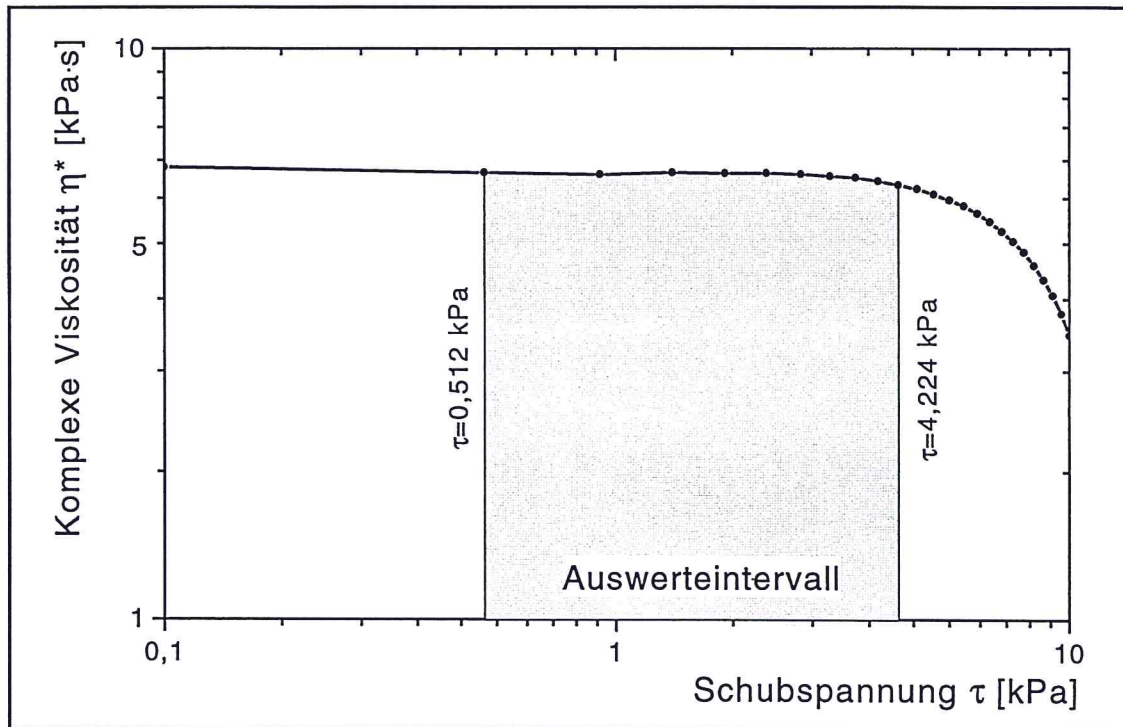


Abbildung 3.01: Komplexe Viskosität η^* des Bitumens **B 80** bei einer Prüftemperatur von $T_{Pr} = +40\text{ °C}$ nach 60minütiger Exposition bei der Temperatur $T_{Ex} = +30\text{ °C}$ und 15minütiger Verweildauer bei der Prüftemperatur in Abhängigkeit von der Schubspannung τ

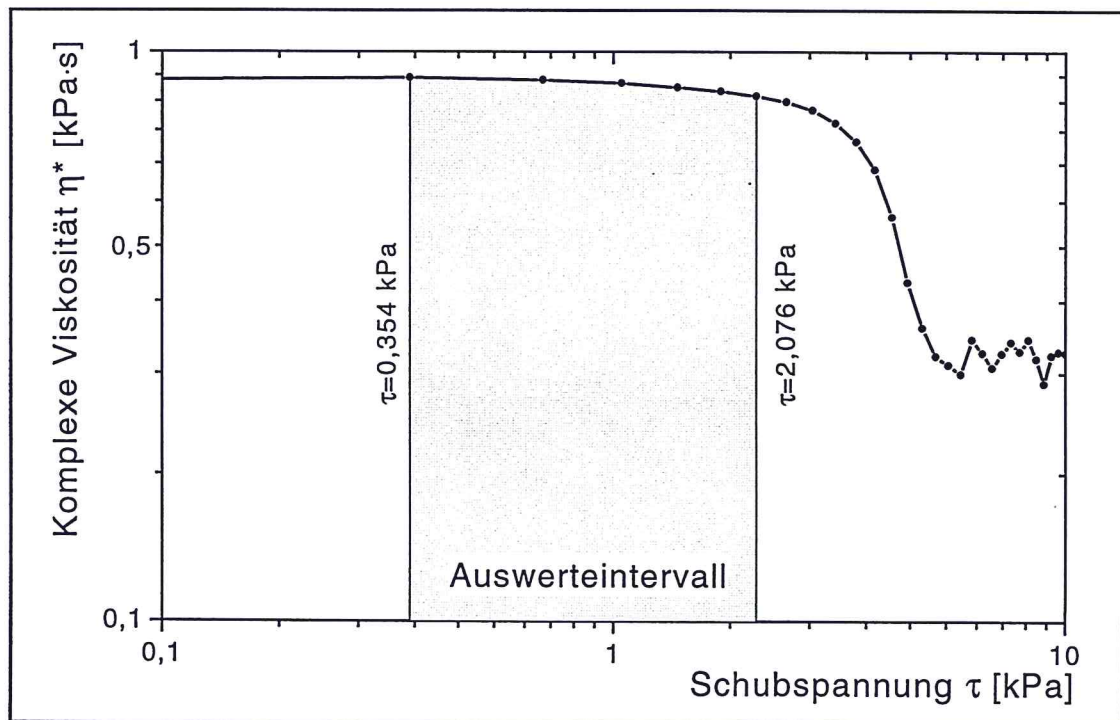


Abbildung 3.02: Komplexe Viskosität η^* des Bitumens **B 80** bei einer Prüftemperatur von $T_{Pr} = +55\text{ °C}$ nach 60minütiger Exposition bei der Temperatur $T_{Ex} = +45\text{ °C}$ und 15minütiger Verweildauer bei der Prüftemperatur in Abhängigkeit von der Schubspannung τ

ren Schubspannungen τ der für den Solzustand charakteristische zweite Newtonsche Bereich der Viskosität erreicht (siehe Abbildung 3.02).

Die Auswertung aller Versuche erfolgte stets durch Mittelwertbildung im ersten Newtonschen Bereich, der den ungestörten Gelzustand des Bitumens kennzeichnet. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, daß das verwendete Rheometer bauartbedingt die Applikation hinreichend großer Schubspannungen zum Erreichen des zweiten Newtonschen Bereiches bei härteren Bitumen und tieferen Prüftemperaturen nicht zuläßt. Die Beschränkung auf den ersten Newtonschen Bereich bei der Auswertung erlaubt den unmittelbaren Vergleich der unter unterschiedlichsten Bedingungen - Bitumenart/-sorte, Expositionstemperatur, Prüftemperatur - zustande gekommenen Meßwerte, was nicht zulässig wäre, wenn diese teils im ersten und teils im zweiten Newtonschen Bereich ermittelt worden wären.

3.1.1 Zeitspanne für den Übergang von der Expositionstemperatur zur Prüftemperatur

Wie im Abschnitt 2.1.4 beschrieben, werden die flach-zylindrischen Bitumenproben für die Dauer von 60 min bei der gewählten Expositionstemperatur T_{Ex} gehalten und anschließend auf die Prüftemperatur T_{Pr} gebracht. Der Übergang von der Expositionstemperatur T_{Ex} zur Prüftemperatur gilt dann als abgeschlossen, wenn die obere bewegliche Kreisplatte des Rheometers satt auf der Bitumenprobe aufliegt.

Die Zeitspannen Δt für den Übergang von der Expositionstemperatur T_{Ex} zur Prüftemperatur T_{Pr} einschließlich des Heranfahrens der oberen Kreisplatte an die Bitumenprobe sind in Tabelle 3.01 - für die überwiegende Anzahl von Fällen als arithmetische Mittel aus jeweils drei Einzelwerten - aufgelistet.

Insbesondere an den arithmetischen Mitteln der vorletzten Zeile ist zu erkennen, daß die Übergangszeitspanne Δt um so länger ist, je größer die Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} ausfällt, wobei die Annäherung an die Prüftemperatur T_{Pr} von einem höheren Temperaturniveau aus

Bitumen- art/ -sorte	Prüf- tempe- ratur T_{Pr}	Zeitspanne Δt in Minuten für den Übergang von der Expositionstemperatur T_{Ex} zur Prüftemperatur T_{Pr}						Arithmetisches Mittel und Standard- abweichung	
		$\Delta T = -40$	$\Delta T = -25$	$\Delta T = -10$	$\Delta T = +10$	$\Delta T = +25$	$\Delta T = +40$		
-	°C	K	K	K	K	K	K	$\bar{x}$	s
B 80	+ 10	41	27	23	23	35	63	35,3	15,3
	+ 25	22	16	12	13	23	33	19,8	7,9
	+ 40	16	11	8	16	21	31	17,2	8,1
	+ 55	20	11	7	11	21	23	15,5	6,6
B 65	+ 10	23	20	27	21	29	52	28,7	11,9
	+ 25	20	12	8	12	29	32	18,8	9,9
	+ 40	17	12	9	20	25	33	19,3	8,8
	+ 55	16	11	7	22	24	31	18,5	8,9
PmB 45	+ 10	31	20	16	22	38	53	30,0	13,8
	+ 25	20	20	15	19	33	45	25,3	11,4
	+ 40	21	16	10	21	34	36	23,0	10,2
	+ 55	16	16	11	17	26	40	21,0	10,5
Arithm. Mittel $\bar{x}$		21,9	16,0	12,8	18,1	28,2	39,3	22,7	-
Standardabw. s		7,3	5,0	6,5	4,2	5,7	11,6	-	6,0 9,7

Tabelle 3.01: **Zeitspanne Δt in min** für den Übergang von der Expositionstemperatur T_{Ex} zur Prüftemperatur T_{Pr} in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $\Delta T = (T_{Ex} - T_{Pr})$ in K

mehr Zeit beansprucht als die Annäherung an die Prüftemperatur T_{Pr} von einem tieferen Temperaturniveau aus. Diese Aussage wird durch Varianzanalysen der dreifachen Klassifikation voll bestätigt (siehe Tabelle 3.02). Beim Übergang zur Prüftemperatur T_{Pr} von einer höheren Expositionstemperatur T_{Ex} aus wird der Einfluß der Differenz ΔT zwischen beiden durch einen Varianzanteil von fast 60 % an der Gesamtvariabilität beschrieben, beim Übergang von einer niedrigeren Expositi-

Übergang von einer höheren Expositionstemperatur T_{Ex} zur Prüftemperatur T_{Pr}						
Anzahl der Stufen für Faktor A	:	3		Temperaturdifferenz ΔT		
Anzahl der Stufen für Faktor B	:	4		Prüftemperatur		
Anzahl der Stufen für Faktor C	:	3		Bitumenart/-sorte		
Anzahl der Einzelwerte je Stufe	:	1		Übergangs-Zeitspanne		
Anzahl der Stufen insgesamt	:	36				
Gesamtzahl der Einzelwerte	:	36				
Ursache	SQ	v	MQ	F (Ursache)		
A	2711.722222	2	1355.861111	111.610518		
B	969.861111	3	323.287037	26.612043		
C	229.055556	2	114.527778	9.427591		
AB	444.055556	6	74.009259	6.092226		
AC	42.444444	4	10.611111	0.873476		
BC	218.055556	6	36.342593	2.991616		
Fehler	145.777778	12	12.148148			
Total	4760.972222	35				
Ursache	v1	v2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]
A	2	12	3.890	ja	106.949074	59.60
B	3	12	3.490	ja	25.009259	13.94
C	2	12	3.890	ja	6.643519	3.70
AB	6	12	3.000	ja	20.620370	11.49
AC	4	12	3.260	nein	-0.384259	
BC	6	12	3.000	nein	8.064815	4.49
Fehler					12.148148	6.77
Summe					179.435185	100.00
Übergang von einer niedrigeren Expositionstemperatur T_{Ex} zur Prüftemperatur T_{Pr}						
Anzahl der Stufen für Faktor A	:	3		Temperaturdifferenz ΔT		
Anzahl der Stufen für Faktor B	:	4		Prüftemperatur		
Anzahl der Stufen für Faktor C	:	3		Bitumenart/-sorte		
Anzahl der Einzelwerte je Stufe	:	1		Übergangs-Zeitspanne		
Anzahl der Stufen insgesamt	:	36				
Gesamtzahl der Einzelwerte	:	36				
Ursache	SQ	v	MQ	F (Ursache)		
A	518.388889	2	259.194444	21.809895		
B	913.111111	3	304.370370	25.611219		
C	53.555556	2	26.777778	2.253214		
AB	27.388889	6	4.564815	0.384106		
AC	49.611111	4	12.402778	1.043631		
BC	138.888889	6	23.148148	1.947799		
Fehler	142.611111	12	11.884259			
Total	1843.555556	35				
Ursache	v1	v2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]
A	2	12	3.890	ja	21.175926	30.57
B	3	12	3.490	ja	32.060185	46.29
C	2	12	3.890	nein	0.259259	0.37
AB	6	12	3.000	nein	-2.439815	
AC	4	12	3.260	nein	0.129630	0.19
BC	6	12	3.000	nein	3.754630	5.42
Fehler					11.884259	17.16
Summe					69.263889	100.00

Tabelle 3.02: Varianzanalysen der dreifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der positiven beziehungsweise der negativen Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} sowie der Prüftemperatur T_{Pr} selbst und der Bitumenart/-sorte auf die Übergangs-Zeitspanne Δt

onstemperatur T_{Ex} aus immerhin noch durch einen Varianzanteil von gut 30 %. Die Temperaturdifferenz ΔT bestimmt also die Übergangs-Zeitspanne Δt sehr stark.

Die vorletzte Spalte der Tabelle 3.01 zeigt, daß die Annäherung an eine höhere Prüftemperatur T_{Pr} schneller zu bewerkstelligen ist als an eine tiefere.

Da die komplexe Viskosität von Bitumen wegen dessen thixotroper Eigenschaften auch von der Zeit abhängt, in welcher das Bitumen sich im nicht beanspruchten Zustand befindet, dürften die recht unterschiedlichen Übergangs-Zeitspannen Δt zwischen 7 min und 63 min nicht ohne Einfluß auf das Ergebnis der Messungen im Rahmen der Hauptversuche bleiben. Da sich Unterschiede in den Übergangs-Zeitspannen Δt aber auch bei sorgfältigster Vorgehensweise nicht vollständig vermeiden lassen, müssen sie hingenommen werden. Sie könnten allenfalls als Interpretationshilfen dienen.

3.1.2 Komplexe Viskosität

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache der komplexen Viskosität η^* der beiden Straßenbaubitumen B 80 und B 65 sowie des polymermodifizierten Bitumens PmB 45 sind in den Tabellen 3.03 bis 3.14 zahlenmäßig dokumentiert.

Während in der ersten Spalte die Expositionstemperatur T_{Ex} und in der zweiten Spalte die Differenz zur Prüftemperatur $\Delta T = (T_{Ex} - T_{Pr})$ registriert sind, finden sich in den Spalten 3 und 4 Angaben zu den Schubspannungen τ am Anfang und am Ende des Auswerteintervalls. In den Spalten 5 und 6 wird die komplexe Viskosität η^* als arithmetisches Mittel $\bar{x}$ aller Einzelwerte im Auswerteintervall und als Standardabweichung s dokumentiert.

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 50	+ 40	1,337	7,936	394,20	18,97
		1,750	7,936	407,77	21,83
		3,399	10,000	[597,79]	37,22
$\bar{x}$				400,985	
s				9,595	
+ 35	+ 25	3,399	7,111	244,66	12,71
		3,812	10,000	530,57	32,33
		2,162	6,286	491,99	18,36
$\bar{x}$				422,407	
s				155,137	
+ 20	+ 10	1,750	5,461	243,95	12,56
		5,874	10,000	508,51	7,03
		3,399	8,348	509,39	14,89
$\bar{x}$				420,617	
s				152,998	
0	- 10	3,812	10,000	484,39	12,75
		3,812	10,000	461,64	10,23
		5,874	10,000	[649,23]	9,24
$\bar{x}$				473,015	
s				16,087	
- 15	- 25	4,637	10,000	[702,88]	38,36
		2,987	7,936	617,54	45,06
		5,874	10,000	602,24	19,63
$\bar{x}$				609,890	
s				10,819	
- 30	- 40	4,637	10,000	505,50	20,99
		2,574	9,586	[102,00]	14,55
		3,812	8,348	547,18	13,47
$\bar{x}$				526,340	
s				29,472	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.03: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 80** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 10 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 65	+ 40	2,574	10,000	47,245	0,623
		5,461	9,586	53,411	0,559
		4,224	10,000	[73,403]	0,619
$\bar{x}$				50,328	
s				4,360	
+ 50	+ 25	3,812	10,000	56,151	0,562
		4,637	10,000	62,563	0,666
		5,049	10,000	[88,161]	1,264
$\bar{x}$				59,357	
s				4,534	
+ 35	+ 10	4,224	10,000	59,639	0,510
		5,461	10,000	53,758	0,679
		5,874	10,000	[67,413]	0,739
$\bar{x}$				56,698	
s				4,158	
+ 15	- 10	4,637	10,000	47,286	1,521
		6,286	10,000	54,974	0,969
		5,874	10,000	74,863	0,532
$\bar{x}$				59,041	
s				14,231	
0	- 25	2,574	10,000	70,511	0,777
		1,750	10,000	55,711	1,576
		4,637	10,000	58,832	0,867
$\bar{x}$				61,685	
s				7,802	
- 15	- 40	3,399	10,000	63,362	0,644
		3,399	10,000	[41,571]	1,587
		2,987	10,000	63,226	1,099
$\bar{x}$				63,294	
s				0,096	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.04: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 80** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 25 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 80	+ 40	0,9248	4,637	5,7439	0,0586
		0,5124	3,812	5,1964	0,0693
		0,9248	4,637	[6,9170]	0,0530
$\bar{x}$				5,4702	
s				0,3871	
+ 65	+ 25	0,5124	4,637	5,6328	0,0838
		0,9248	4,637	5,959	0,0628
		0,9248	5,049	[7,1764]	0,0890
$\bar{x}$				5,8094	
s				0,2497	
+ 50	+ 10	0,5124	6,699	7,4321	0,0946
		0,9248	6,699	[7,8849]	0,0794
		0,5124	5,049	6,4758	0,1158
$\bar{x}$				6,9540	
s				0,6762	
+ 30	- 10	0,5124	4,224	[5,9639]	0,1000
		0,9248	5,874	6,9719	0,1427
		0,9248	4,224	7,156	0,1226
$\bar{x}$				7,0640	
s				0,1302	
+15	- 25	0,5124	3,812	[5,3777]	0,2376
		0,5124	3,812	5,7529	0,2065
		0,9248	5,874	7,7708	0,1247
$\bar{x}$				6,7618	
s				1,4269	
0	- 40	0,9248	10,000	8,4564	0,3889
		0,5124	4,637	7,6645	0,1136
		,5124	7,523	6,6582	0,1491
$\bar{x}$				7,5930	
s				0,9012	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.05: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 80** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 40 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T_{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η^*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 95	+ 40	0,3544	1,732	0,6653	0,0234
		0,3544	1,732	0,6717	0,0232
		0,0100	1,732	0,6496	0,0082
$\bar{x}$				0,6622	
s				0,0114	
+ 80	+ 25	0,3544	1,388	0,5528	0,0133
		0,3544	2,421	0,8519	0,0212
		0,3544	1,388	[0,5014]	0,0812
$\bar{x}$				0,7024	
s				0,2115	
+ 65	+ 10	0,3544	2,421	0,8798	0,0211
		0,3544	3,110	[0,9399]	0,0384
		0,3544	2,756	0,8653	0,0083
$\bar{x}$				0,8726	
s				0,0103	
+ 45	- 10	0,3544	2,076	0,8709	0,0244
		0,3544	3,454	0,9903	0,0311
		0,3544	2,076	0,8431	0,0204
$\bar{x}$				0,9014	
s				0,0782	
+30	- 25	0,4262	2,091	0,9264	0,0322
		0,3544	3,110	0,9629	0,0204
		0,3544	2,765	[0,7436]	0,0225
$\bar{x}$				0,9446	
s				0,0258	
+ 15	- 40	0,0100	3,399	1,0016	0,0345
		0,3544	2,756	0,9249	0,0258
		1,3880	3,454	[0,8823]	0,0453
$\bar{x}$				0,9632	
s				0,0542	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.06: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 80** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 55 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 50	+ 40	6,286	10,000	391,63	6,370
		4,637	10,000	502,35	33,01
		2,987	10,000	610,51	9,880
$\bar{x}$				501,50	
s				109,44	
+ 35	+ 25	5,874	10,000	547,98	13,49
		5,874	10,000	467,48	2,960
		2,987	10,000	526,41	21,84
$\bar{x}$				513,96	
s				41,67	
+ 20	+ 10	3,399	7,9360	559,94	18,25
		5,461	10,000	457,42	41,39
		5,049	10,000	572,12	17,53
$\bar{x}$				529,83	
s				63,00	
0	- 10	4,637	10,000	[373,23]	3,100
		4,224	10,000	465,17	34,25
		2,162	10,000	607,25	24,83
$\bar{x}$				536,21	
s				100,47	
- 15	- 25	2,987	7,111	570,77	38,01
		5,461	9,586	529,88	10,81
		5,049	10,000	546,01	17,87
$\bar{x}$				548,89	
s				20,60	
- 30	- 40	5,049	10,000	489,62	6,740
		2,574	10,000	612,08	57,37
		1,337	5,049	484,11	47,02
$\bar{x}$				528,60	
s				72,35	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.07: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 65** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 10 \text{ °C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 65	+ 40	0,9248	10,000	68,564	1,525
		2,162	10,000	85,640	0,654
		4,224	10,000	75,706	0,951
$\bar{x}$				76,637	
s				8,576	
+ 50	+ 25	3,812	10,000	74,828	0,930
		5,049	10,000	86,332	1,345
		2,162	10,000	83,978	0,604
$\bar{x}$				81,713	
s				6,077	
+ 35	+ 10	4,224	10,000	90,305	0,794
		4,224	10,000	73,776	2,962
		4,637	10,000	79,176	0,934
$\bar{x}$				81,086	
s				8,428	
+ 15	- 10	5,049	10,000	[70,152]	1,737
		5,461	10,000	82,532	1,071
		5,874	10,000	80,089	1,241
$\bar{x}$				81,310	
s				1,727	
0	- 25	2,574	7,111	77,615	1,114
		1,337	10,000	[67,935]	1,997
		4,224	10,000	119,670	1,180
$\bar{x}$				98,642	
s				29,737	
- 15	- 40	2,987	10,000	98,016	1,329
		2,574	10,000	[73,469]	1,100
		3,812	5,049	105,230	0,880
$\bar{x}$				101,623	
s				5,101	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.08: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 65** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 25 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 80	+ 40	0,1000	6,699	9,279	0,249
		0,5124	4,224	8,008	0,073
		0,5124	6,286	10,487	0,162
$\bar{x}$				9,255	
s				1,244	
+ 65	+ 25	0,5124	4,224	8,601	0,128
		0,5124	5,049	10,248	0,060
		0,9248	7,523	[11,209]	0,271
$\bar{x}$				9,424	
s				1,165	
+ 50	+ 10	0,5124	3,812	8,318	0,217
		0,5124	5,874	10,522	0,157
		0,5124	5,874	9,458	0,225
$\bar{x}$				9,433	
s				1,102	
+ 30	- 10	1,337	9,173	11,823	0,266
		0,9248	4,224	9,183	0,152
		0,9248	10,000	[13,437]	2,034
$\bar{x}$				10,503	
s				1,867	
+15	- 25	0,5124	8,761	10,552	0,380
		0,5124	4,637	[8,851]	0,311
		0,5124	5,049	9,469	0,251
$\bar{x}$				10,010	
s				0,766	
0	- 40	0,1000	10,000	10,725	0,701
		0,9248	8,348	11,214	0,400
		0,9248	7,523	10,522	0,232
$\bar{x}$				10,820	
s				0,3560	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.09: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 65** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 40 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 95	+ 40	0,3544	2,076	[0,9826]	0,0194
		0,3544	2,765	1,1451	0,0321
		0,3544	3,110	1,4040	0,0475
$\bar{x}$				1,2746	
s				0,1831	
+ 80	+ 25	0,3544	2,765	1,1414	0,0292
		0,3544	3,454	1,5211	0,0414
		0,3544	3,454	1,4727	0,0495
$\bar{x}$				1,3784	
s				0,2067	
+ 65	+ 10	0,3544	3,110	1,4574	0,0266
		0,3544	3,454	1,4735	0,0256
		0,3544	2,765	1,4746	0,0223
$\bar{x}$				1,4692	
s				0,0102	
+ 45	- 10	0,3544	3,454	1,4909	0,0294
		0,3544	3,799	1,5177	0,0401
		0,3544	3,799	[1,5819]	0,0440
$\bar{x}$				1,5043	
s				0,0190	
+30	- 25	0,3544	2,765	1,4909	0,0237
		0,3544	3,454	1,5776	0,0287
		0,3544	4,487	[1,7791]	0,0395
$\bar{x}$				1,5342	
s				0,0613	
+ 15	- 40	0,3544	3,110	1,4554	0,0142
		0,3544	3,110	1,4492	0,0385
		0,3544	3,454	1,6291	0,0222
$\bar{x}$				1,5112	
s				0,1021	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.10: Komplexe Viskosität η^* des Straßenbaubitumens **B 65** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 55 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 50	+ 40	0,9248	10,000	528,13	50,95
		1,750	15,000	[669,48]	100,71
		2,162	10,000	639,93	37,27
$\bar{x}$				584,030	
s				79,055	
+ 35	+ 25	7,336	10,000	[625,85]	6,53
		4,224	6,286	619,30	16,43
		5,874	9,173	421,12	31,18
$\bar{x}$				520,210	
s				140,134	
+ 20	+ 10	3,812	7,523	702,43	8,49
		3,399	10,000	419,59	27,37
		3,812	7,936	390,39	36,23
$\bar{x}$				504,137	
s				172,347	
0	- 10	2,574	10,000	536,77	21,47
		5,049	10,000	631,06	2,37
		5,874	10,000	630,92	27,23
$\bar{x}$				599,583	
s				54,398	
- 15	- 25	5,461	10,000	[442,43]	15,96
		5,461	10,000	528,55	61,94
		6,699	10,000	654,840	121,207
$\bar{x}$				591,695	
s				89,301	
- 30	- 40	4,224	8,348	678,97	25,62
		7,523	10,000	[361,84]	0,79
		2,987	4,224	614,20	3,92
$\bar{x}$				646,585	
s				45,80	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.11: Komplexe Viskosität η^* des polymermodifizierten Bitumens **PmB 45** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 10 \text{ °C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 65	+ 40	4,637	10,000	95,726	9,270
		6,499	10,000	[126,110]	0,970
		5,049	10,000	97,414	6,590
$\bar{x}$				96,570	
s				1,194	
+ 50	+ 25	3,399	10,000	[101,94]	1,140
		2,987	10,000	91,282	12,620
		2,987	10,000	96,183	8,840
$\bar{x}$				93,732	
s				3,466	
+ 35	+ 10	3,812	10,000	[111,58]	1,680
		2,987	10,000	104,320	1,120
		3,812	10,000	105,760	0,930
$\bar{x}$				105,040	
s				1,018	
+ 15	- 10	2,987	10,000	93,857	8,070
		3,399	10,000	99,986	12,740
		1,750	10,000	112,99	0,690
$\bar{x}$				102,278	
s				9,770	
0	- 25	5,049	10,000	100,570	0,920
		7,111	10,000	125,540	0,280
		5,049	10,000	92,835	14,060
$\bar{x}$				106,315	
s				17,093	
- 15	- 40	2,574	10,000	[77,484]	13,080
		5,049	10,000	107,370	0,560
		4,637	10,000	119,660	1,380
$\bar{x}$				113,515	
s				8,690	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.12: Komplexe Viskosität η^* des polymermodifizierten Bitumens **PmB 45** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 25 ^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 80	+ 40	0,5124	5,461	9,7466	0,3793
		0,9248	5,874	8,9525	0,6219
		0,5124	5,049	11,8480	0,2630
$\bar{x}$				10,182	
s				1,496	
+ 65	+ 25	4,224	10,000	17,121	0,332
		4,224	10,000	13,097	0,393
		1,337	10,000	[19,451]	0,364
$\bar{x}$				15,109	
s				2,845	
+ 50	+ 10	3,812	10,000	15,811	0,205
		0,9248	10,000	16,156	0,410
		2,162	10,000	[17,008]	0,354
$\bar{x}$				15,984	
s				0,244	
+ 30	- 10	1,750	7,523	17,018	0,230
		1,750	7,523	16,188	0,231
		0,9248	8,761	[18,818]	0,255
$\bar{x}$				16,603	
s				0,587	
+15	- 25	0,5124	7,936	[11,113]	0,222
		1,337	7,523	15,643	0,292
		1,337	7,111	19,487	0,206
$\bar{x}$				17,565	
s				2,718	
0	- 40	2,162	10,000	17,637	0,235
		1,750	10,000	18,577	0,166
		1,750	10,000	19,137	0,194
$\bar{x}$				18,450	
s				0,7580	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.13: Komplexe Viskosität η^* des polymermodifizierten Bitumens **PmB 45** bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{\text{Ex}} - T_{\text{Pr}})$ in K

Expositions- temperatur T _{Ex}	Temperatur- differenz ΔT	Schubspannung τ		Komplexe Viskosität η*	
		Anfang	Ende	$\bar{x}$	s
°C	K	kPa	kPa	kPas	kPas
+ 95	+ 40	1,388	4,143	2,7949	0,0690
		0,3544	4,487	2,5585	0,1023
		0,3544	2,976	3,2522	0,0152
$\bar{x}$				2,8685	
s				0,3527	
+ 80	+ 25	0,3544	3,110	2,7903	0,0352
		0,3544	4,832	3,1968	0,0716
		0,3544	4,143	2,7448	0,0696
$\bar{x}$				2,9106	
s				0,2489	
+ 65	+ 10	0,3544	4,143	3,1432	0,0698
		0,3544	3,799	2,7651	0,0519
		0,3544	4,832	3,0155	0,0833
$\bar{x}$				2,9763	
s				0,1945	
+ 45	- 10	0,010	2,076	2,9134	0,0351
		0,6988	7,587	[3,391]	0,0847
		0,3544	5,521	3,376	0,0468
$\bar{x}$				3,1447	
s				0,3271	
+30	- 25	0,3544	2,421	2,9024	0,0246
		0,3544	5,521	3,1671	0,0600
		0,3544	5,176	[2,7787]	0,0909
$\bar{x}$				3,0349	
s				0,1870	
+ 15	- 40	0,3544	4,143	3,2172	0,0462
		0,6988	4,832	[2,7575]	0,0445
		1,3880	5,521	2,9707	0,0516
$\bar{x}$				3,0940	
s				0,1743	

[] = Werte in eckigen Klammern wegen mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt

Tabelle 3.14: Komplexe Viskosität η^* des polymermodifizierten Bitumens **PmB 45** bei einer Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 55$ °C in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur $\Delta T = (T_{Ex} - T_{Pr})$ in K

Von wenigen Ausnahmen - insbesondere bei dem polymermodifizierten Bitumen PmB 45 - einmal abgesehen, sind die Variationskoeffizienten - das sind die Quotienten aus der Standardabweichung s und dem arithmetischen Mittel $\bar{x}$ - in der überwiegenden Anzahl aller Fälle deutlich kleiner als 10 % (relativ), was für die Sorgfalt der von Frau Dipl.-Ing. Anja Sörensen betreuten Versuchsdurchführung und Auswertung spricht. Wenn man bedenkt, daß die komplexe Viskosität η^* sich bei einer Änderung der Prüftemperatur um 15 K um den Faktor 6 bis 10 ändert, so können relative Schwankungen von 10 % hingenommen werden, ohne daß das Ergebnis als zu wenig präzise verworfen werden müßte.

Die unter gleichen Versuchsbedingungen ermittelten und in den fünften Spalten der Tabellen aufgelisteten komplexen Viskositäten η^* werden zu arithmetischen Mitteln aus in aller Regel drei Einzelwerten zusammengefaßt. Werte, die wegen mangelnder Plausibilität bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt wurden, stehen in eckigen Klammern.

Ein Vergleich der für das jeweils gleiche Bitumen bei verschiedenen Temperaturen gemessenen komplexen Viskositäten η^* zeigt das bekannte Bild, nämlich daß die Viskosität mit steigenden Temperaturen deutlich geringer wird. Auffällig ist aber auch, daß die bei ein und derselben Prüftemperatur T_{Pr} gemessenen komplexen Viskositäten η^* davon abhängen, ob die Prüftemperatur T_{Pr} von einem höheren oder einem niedrigeren Temperaturniveau aus angesteuert worden ist. Erfolgt die Ansteuerung der Prüftemperatur T_{Pr} von einer höheren Expositionstemperatur T_{Ex} aus, so ist die komplexe Viskosität η^* regelmäßig kleiner als im umgekehrten Fall, wenn die Ansteuerung der Prüftemperatur T_{Pr} von einem niedrigeren Niveau der Expositionstemperatur T_{Ex} aus beginnt. Hierauf wird im folgenden Abschnitt noch besonders einzugehen sein.

3.1.3 Abhängigkeit der komplexen Viskosität von der Ansteuerrichtung der Prüftemperatur

Hauptzweck der Viskositätsmessungen ist es festzustellen, ob und gegebenenfalls in welchem Maße, die komplexe Viskosität η^* bei einer bestimmten Prüftemperatur T_{Pr} davon abhängt, ob diese Temperatur von einem höheren Temperaturniveau oder von einem niedrigeren Temperaturniveau aus angesteuert wurde. Um diese Frage beantworten und einen gegebenenfalls vorhandenen Trend quantitativ beschreiben zu können, wurden für die drei eingesetzten Bindemittel - die Straßenbaubitumen B 80 und B 65 sowie das polymermodifizierte Bitumen PmB 45 - und die vier Prüftemperaturen - $T_{Pr} = + 10\text{ °C}$, $T_{Pr} = + 25\text{ °C}$, $T_{Pr} = + 40\text{ °C}$ und $T_{Pr} = + 55\text{ °C}$ - insgesamt zwölf lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Deren Ergebnisse sind in den Tabellen 3.15 bis 3.26 für jeden der zwölf genannten Fälle dokumentiert.

Die genannten Tabellen enthalten im oberen Teil graphische Darstellungen und in der Mitte zahlenmäßige Angaben zur komplexen Viskosität η^* in Abhängigkeit von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} . Im unteren Teil findet sich das Ergebnis der linearen Regressionsanalyse unter Angabe der Regressionskoeffizienten a und b und des Bestimmtheitsmaßes B . Das wichtigste Ergebnis der Linearregression ist zunächst einmal das Steigungsmaß b einschließlich seines Vorzeichens, wobei ein negatives Vorzeichen beim Steigungsmaß b anzeigt, daß die komplexe Viskosität η^* um so kleiner ist, je höher die Expositionstemperatur T_{Ex} gewählt wird und umgekehrt.

Als Letztes ist in den Tabellen das Ergebnis eines Signifikanztests zu finden, mit dem abgefragt wird, ob das Steigungsmaß b sich signifikant von Null unterscheidet oder nicht. Lediglich dann, wenn ein signifikanter Unterschied zwischen dem Steigungsmaß b und Null nachgewiesen werden kann, darf von einem systematischen Zusammenhang gesprochen werden.

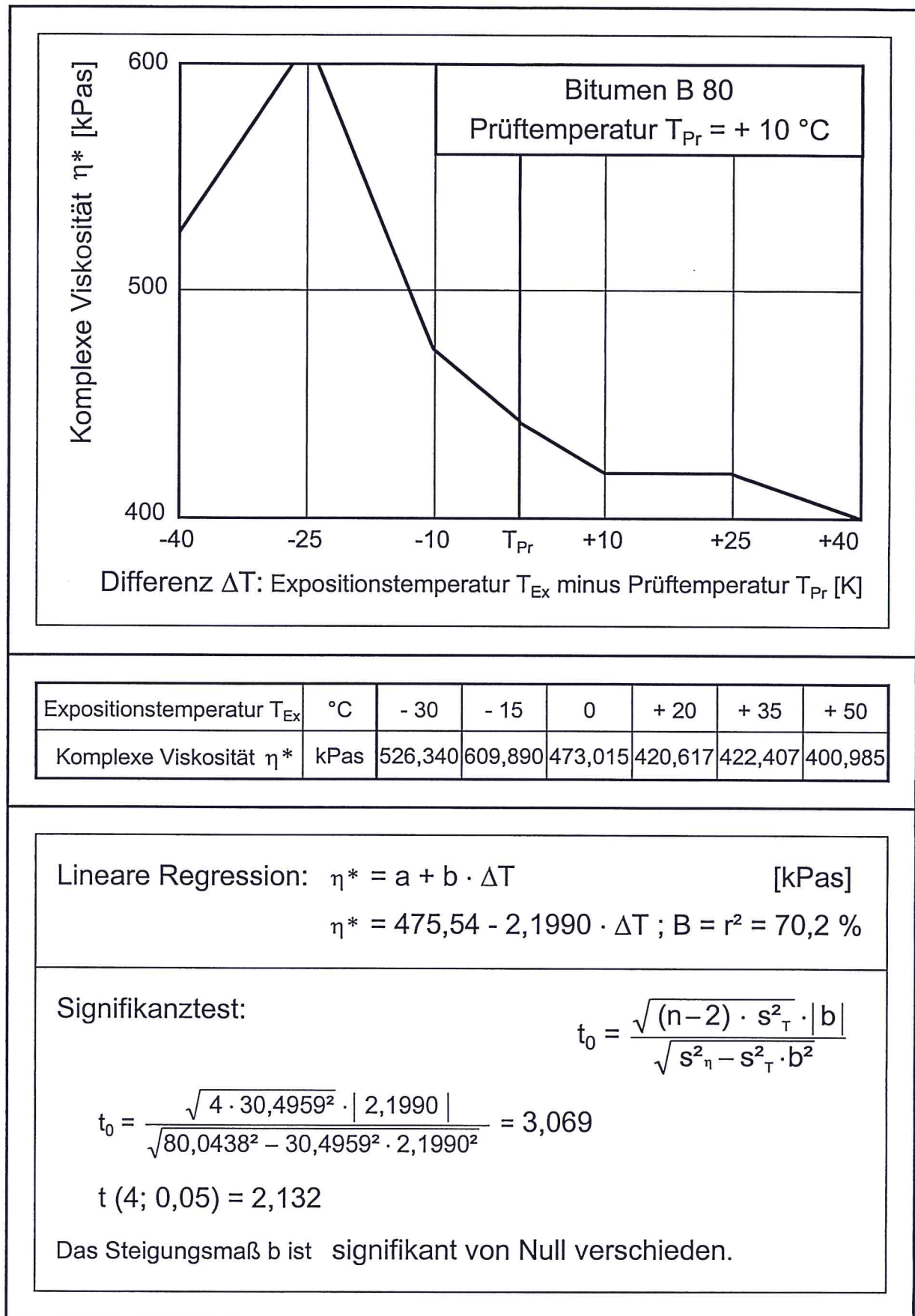
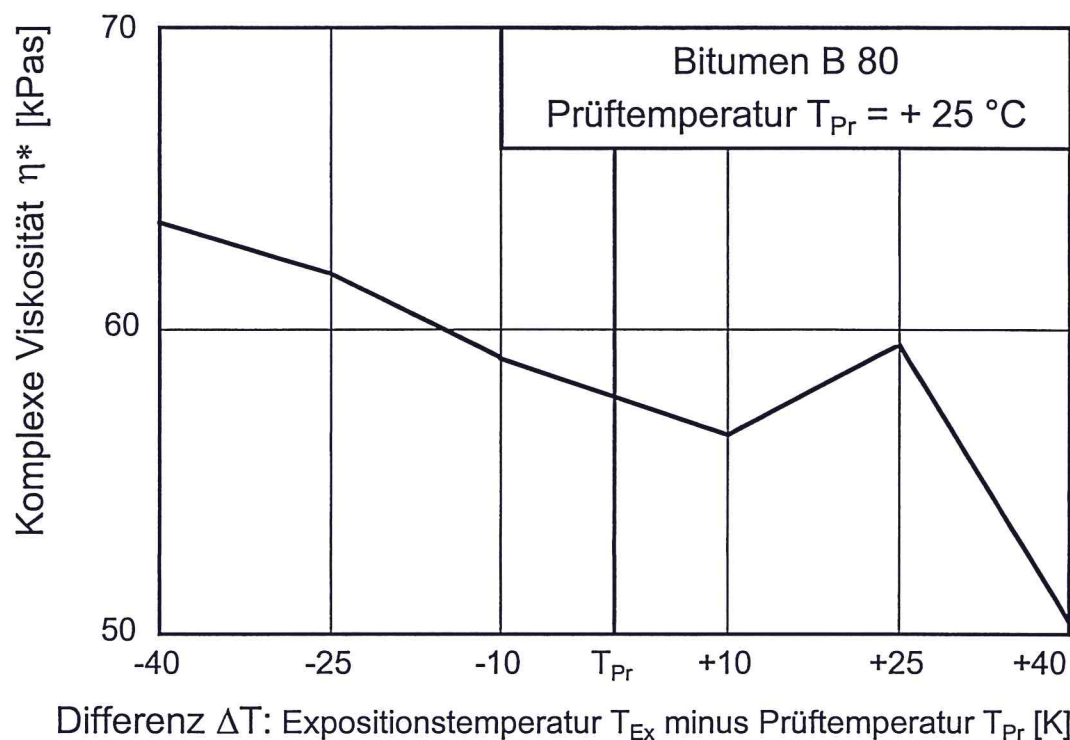


Tabelle 3.15: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüftemperatur $T_{Pr} = + 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Expositionstemperatur T_{Ex}	°C	- 15	0	+ 15	+ 35	+ 50	+ 65
Komplexe Viskosität η^*	kPas	63,294	61,685	59,041	56,698	59,357	50,328

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]

$$\eta^* = 58,400 - 0,1291 \cdot \Delta T ; B = r^2 = 74,4\%$$

Signifikanztest:

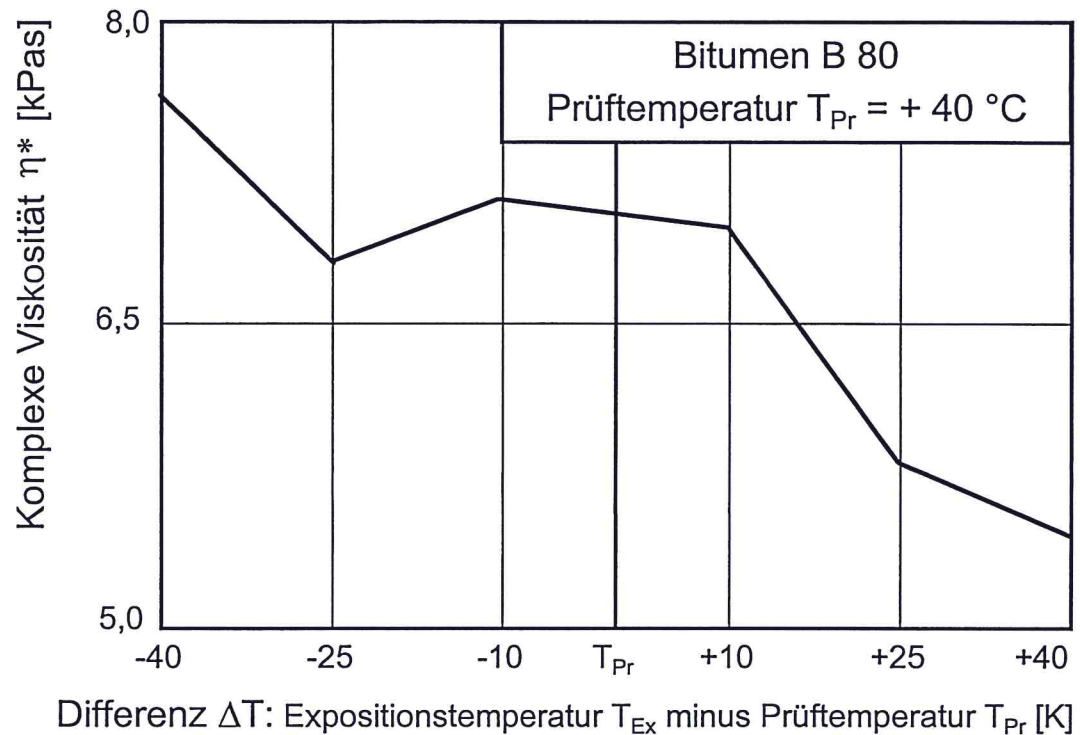
$$t_0 = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s^2_T} \cdot |b|}{\sqrt{s^2_{\eta} - s^2_T \cdot b^2}}$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot 30,4959^2} \cdot |0,1291|}{\sqrt{4,5634^2 - 30,4959^2 \cdot 0,1291^2}} = 3,412$$

$$t(4; 0,05) = 2,132$$

Das Steigungsmaß b ist signifikant von Null verschieden.

Tabelle 3.16: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüftemperatur $T_{Pr} = +25\text{ °C}$



Expositionstemperatur T_{Ex}	°C	0	+ 15	+ 30	+ 50	+ 65	+ 80
Komplexe Viskosität η^*	kPas	7,5930	6,7618	7,0640	6,9540	5,8094	5,4702

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]
 $\eta^* = 6,609 - 0,02362 \cdot \Delta T$; $B = r^2 = 79,7\%$

Signifikanztest:

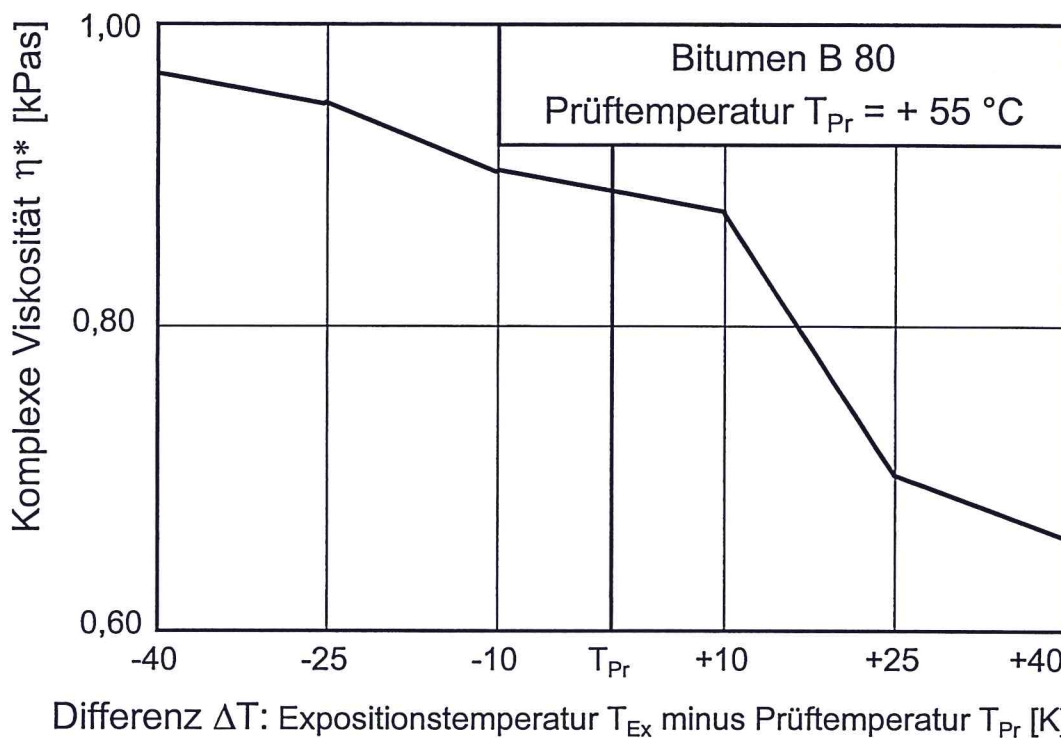
$$t_0 = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s_T^2} \cdot |b|}{\sqrt{s_{\eta}^2 - s_T^2 \cdot b^2}}$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot 30,4959^2} \cdot |0,02362|}{\sqrt{0,8067^2 - 30,4959^2 \cdot 0,02362^2}} = 3,966$$

$$t(4; 0,01) = 3,747$$

Das Steigungsmaß b ist hoch signifikant von Null verschieden.

Tabelle 3.17: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüftemperatur $T_{Pr} = +40\text{ °C}$



Expositionstemperatur T_{Ex}	$^{\circ}\text{C}$	+ 15	+ 30	+ 45	+ 65	+ 80	+ 95
Komplexe Viskosität η^*	kPas	0,9632	0,9446	0,9014	0,8726	0,7024	0,6622

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]
 $\eta^* = 0,8411 - 0,00395 \cdot \Delta T$; $B = r^2 = 89,2 \%$

Signifikanztest:

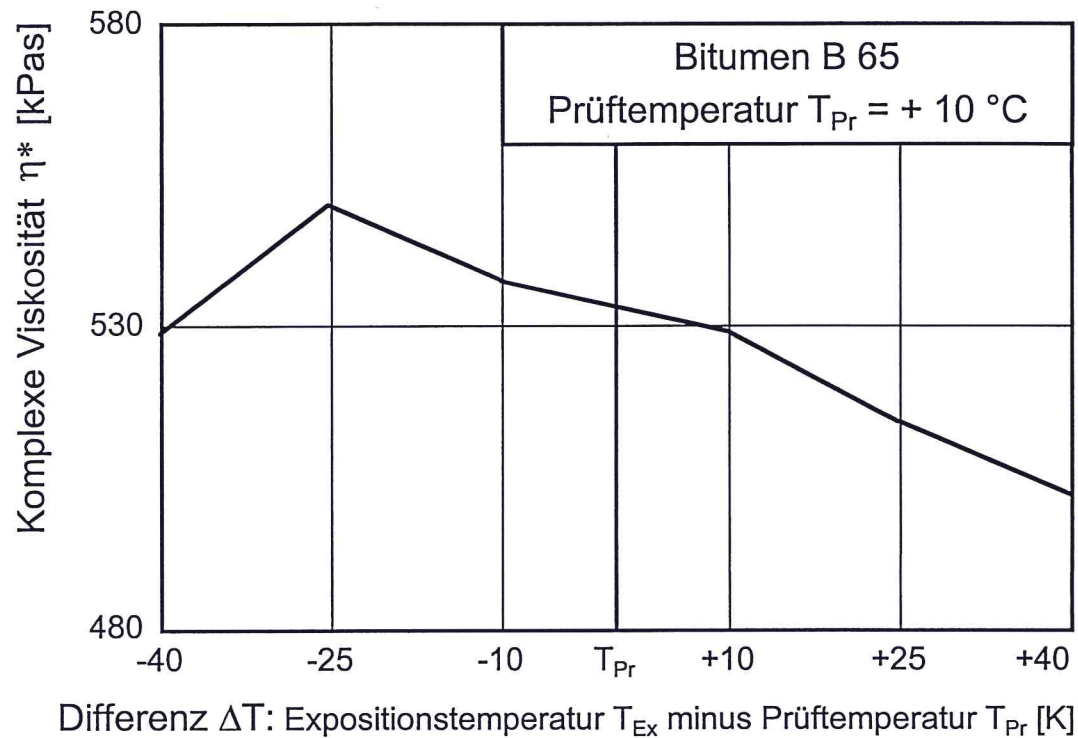
$$t_0 = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s^2_T} \cdot |b|}{\sqrt{s^2_{\eta} - s^2_T \cdot b^2}}$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot 30,4959^2} \cdot |0,00395|}{\sqrt{0,1277^2 - 30,4959^2 \cdot 0,00395^2}} = 5,683$$

$$t(4; 0,01) = 3,747$$

Das Steigungsmaß b ist hoch signifikant von Null verschieden.

Tabelle 3.18: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüf­temperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüf­temperatur $T_{Pr} = + 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Expositionstemperatur T_{Ex}	°C	- 30	- 15	0	+ 20	+ 35	+ 50
Komplexe Viskosität η^*	kPas	528,60	548,89	536,21	529,83	513,96	501,50

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]
 $\eta^* = 526,50 - 0,4346 \cdot \Delta T$; $B = r^2 = 63,0\%$

Signifikanztest:

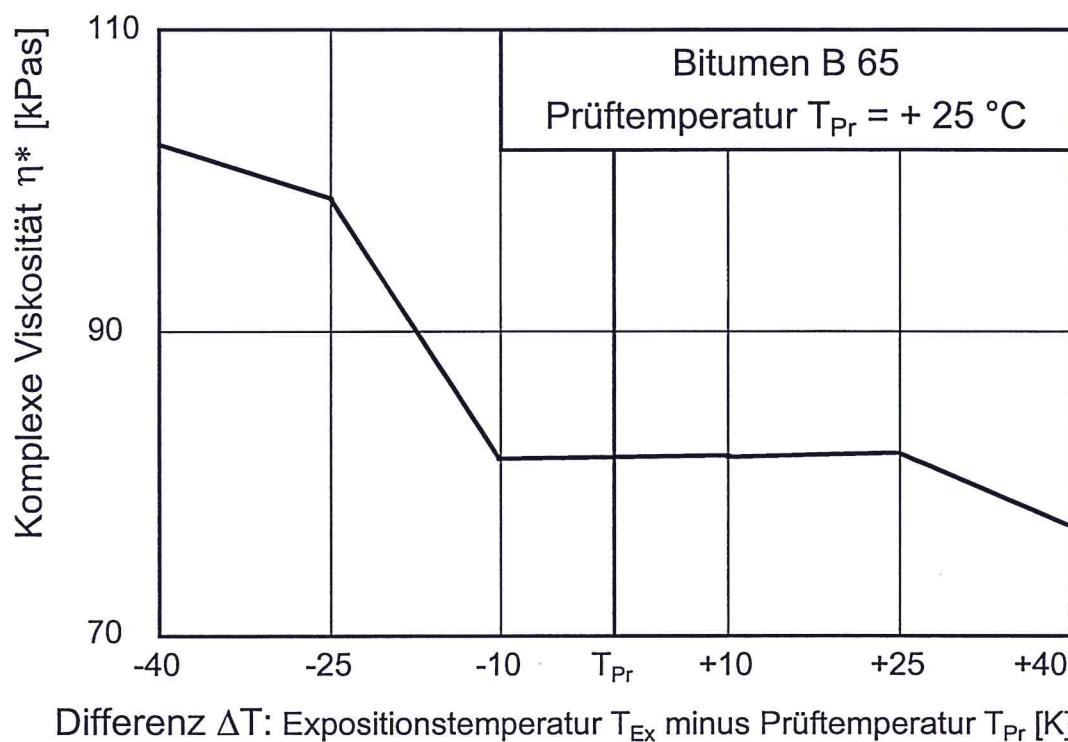
$$t_0 = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s_T^2} \cdot |b|}{\sqrt{s_{\eta}^2 - s_T^2 \cdot b^2}}$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot 30,4959^2} \cdot |0,4346|}{\sqrt{16,6934^2 - 30,4959^2 \cdot 0,4346^2}} = 2,612$$

$$t(4; 0,05) = 2,132$$

Das Steigungsmaß b ist signifikant von Null verschieden.

Tabelle 3.19: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüftemperatur $T_{Pr} = +10\text{ °C}$



Expositionstemperatur T_{Ex}	°C	- 15	0	+ 15	+ 35	+ 50	+ 65
Komplexe Viskosität η^*	kPas	101,623	98,642	81,310	81,086	81,713	76,637

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]

$$\eta^* = 86,835 - 0,3064 \cdot \Delta T ; B = r^2 = 79,1 \%$$

Signifikanztest:

$$t_0 = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s^2_T} \cdot |b|}{\sqrt{s^2_\eta - s^2_T \cdot b^2}}$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot 30,4959^2} \cdot |0,3064|}{\sqrt{10,5062^2 - 30,4959^2 \cdot 0,3064^2}} = 3,891$$

$$t(4; 0,01) = 3,747$$

Das Steigungsmaß b ist hoch signifikant von Null verschieden.

Tabelle 3.20: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüftemperatur $T_{Pr} = + 25 \text{ °C}$

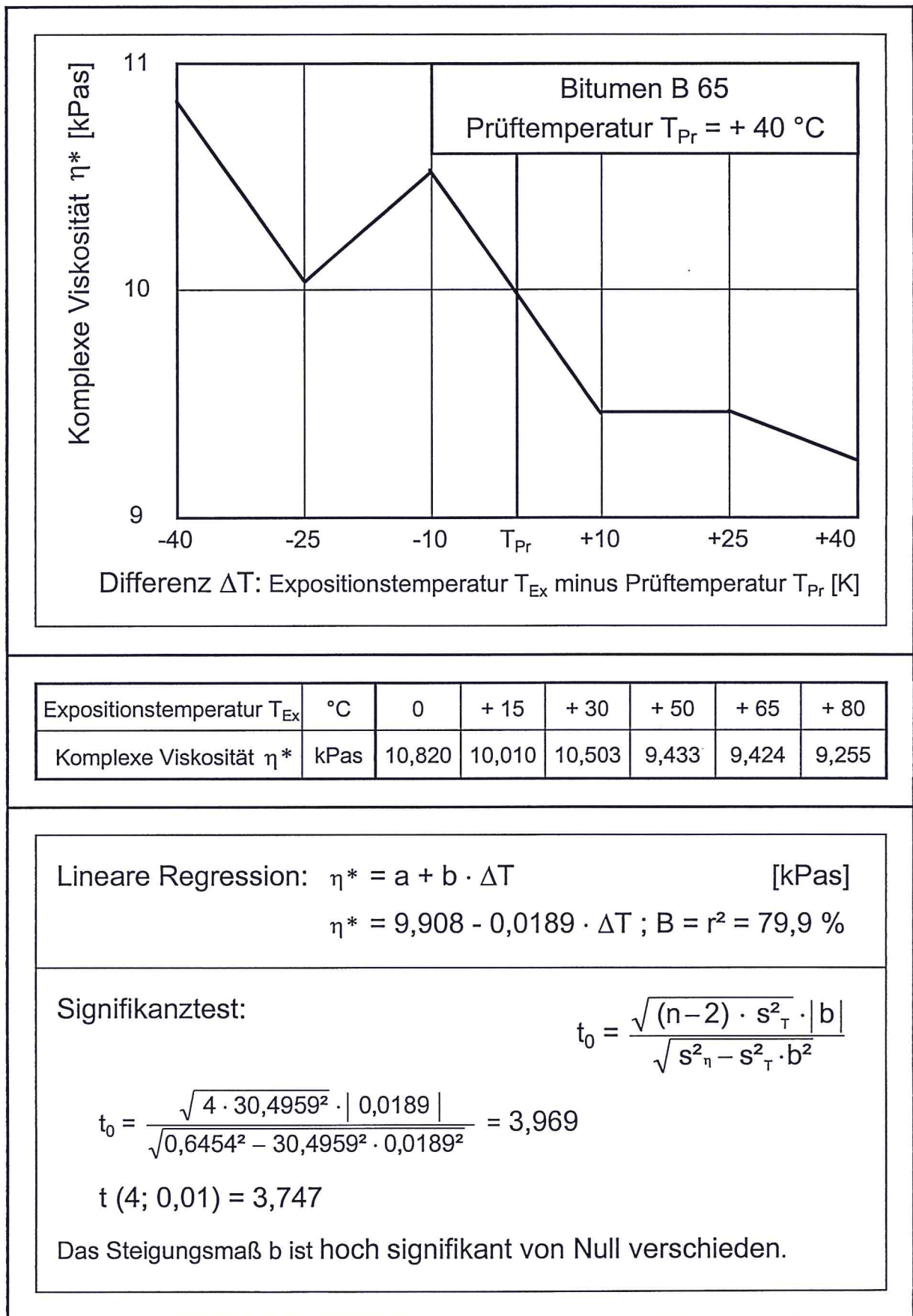


Tabelle 3.21: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüftemperatur $T_{Pr} = +40\text{ °C}$

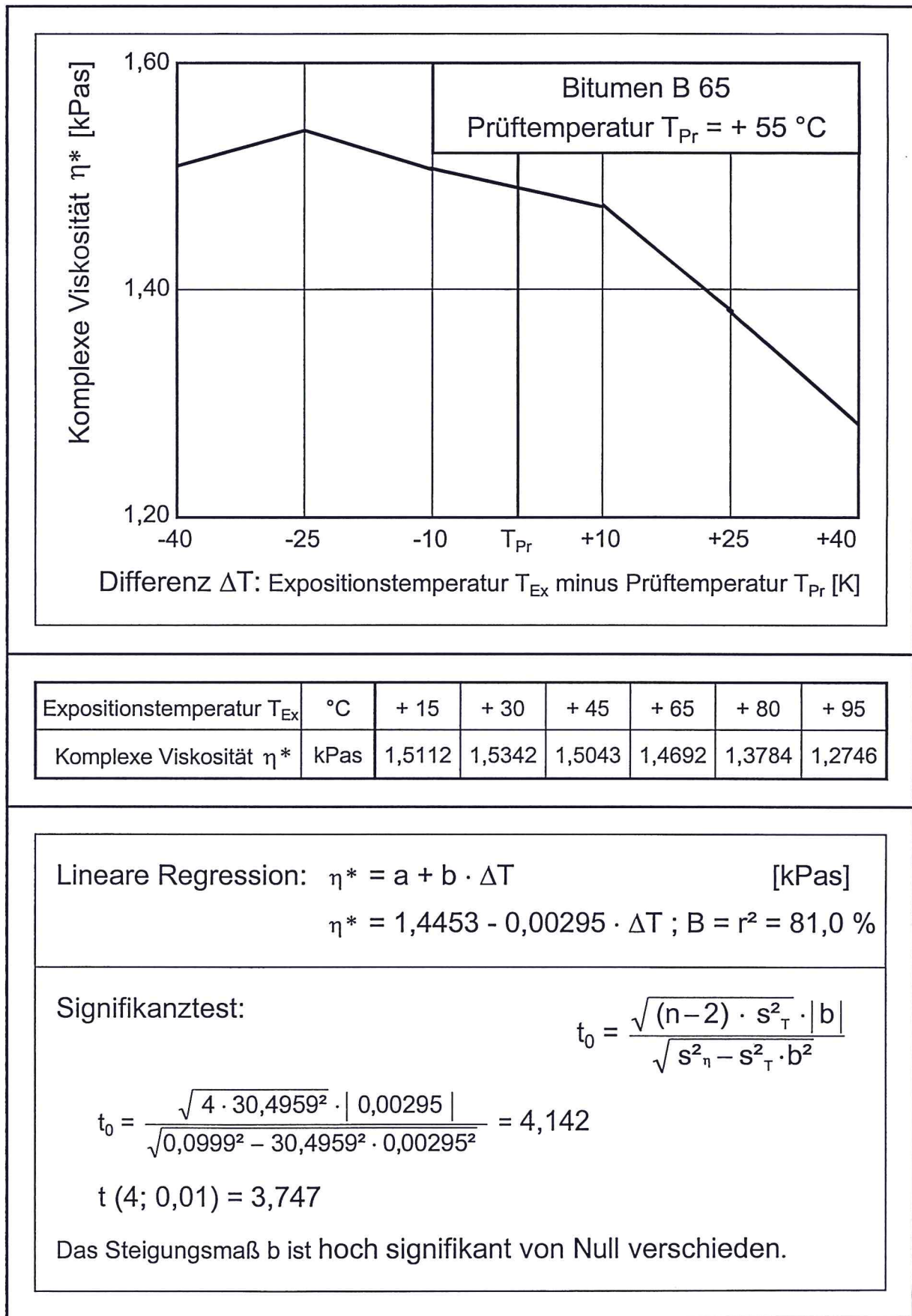
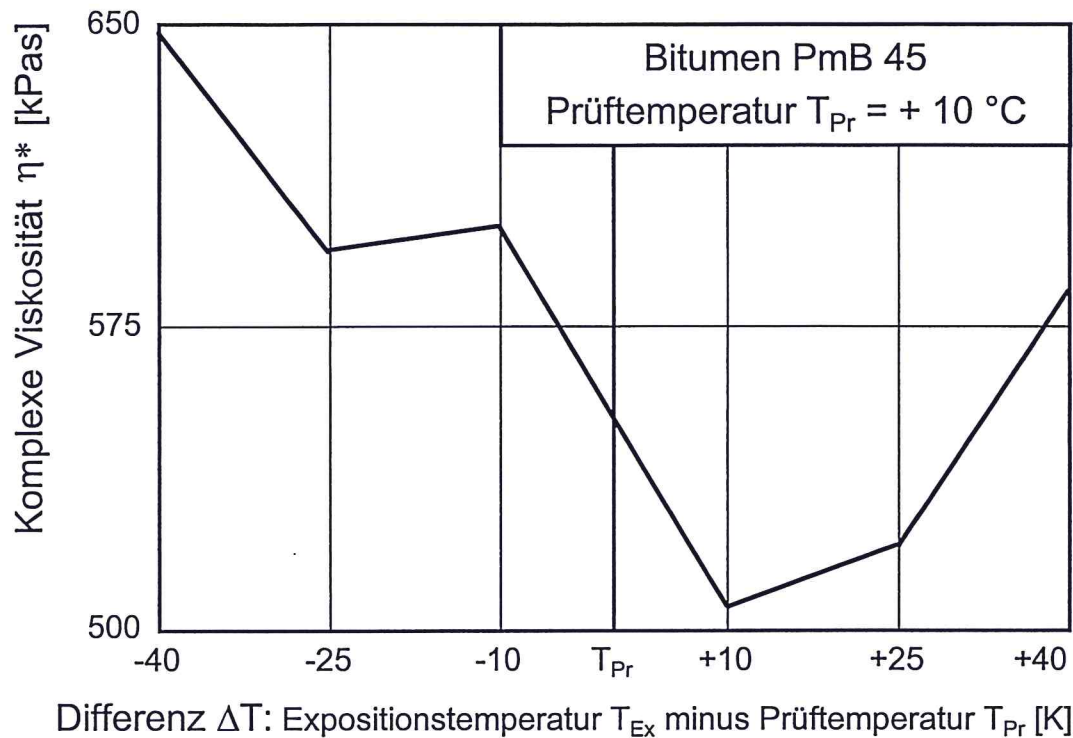


Tabelle 3.22: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüf­temperatur T_{Tr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen B 80; Prüf­temperatur $T_{Pr} = + 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Expositionstemperatur T_{Ex}	°C	- 30	- 15	0	+ 20	+ 35	+ 50
Komplexe Viskosität η^*	kPas	646,585	591,695	599,583	504,137	520,210	584,030

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]

$$\eta^* = 574,37 - 1,1277 \cdot \Delta T ; B = r^2 = 41,9 \%$$

Signifikanztest:

$$t_0 = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s^2_T} \cdot |b|}{\sqrt{s^2_\eta - s^2_T \cdot b^2}}$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot 30,4959^2} \cdot |1,1277|}{\sqrt{53,1228^2 - 30,4959^2 \cdot 1,1277^2}} = 1,581$$

$$t(4; 0,05) = 2,132$$

Das Steigungsmaß b ist nicht signifikant von Null verschieden.

Tabelle 3.23: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen PmB 45; Prüftemperatur $T_{Pr} = +10\text{ °C}$

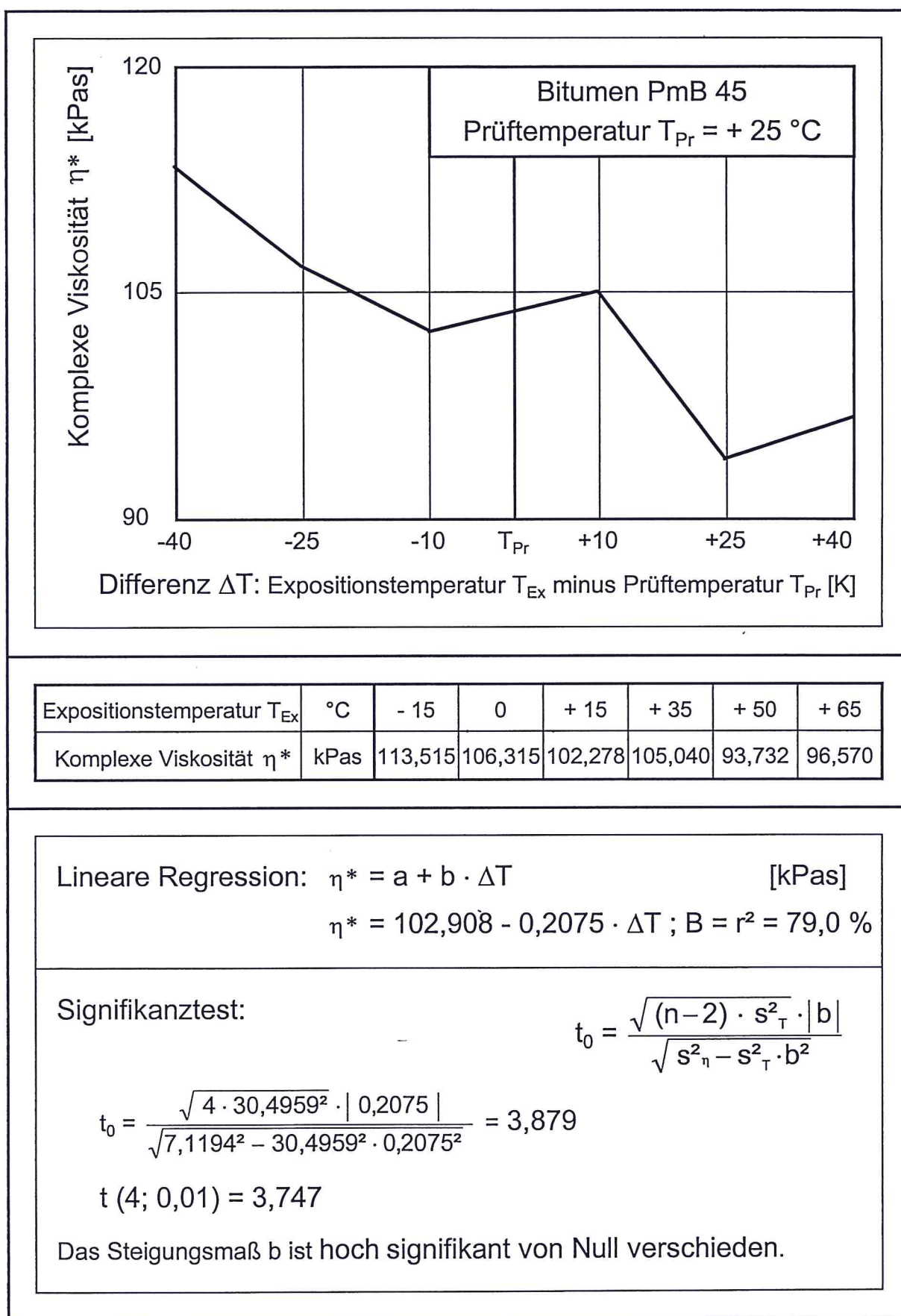


Tabelle 3.24: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen PmB 45; Prüftemperatur $T_{Pr} = + 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

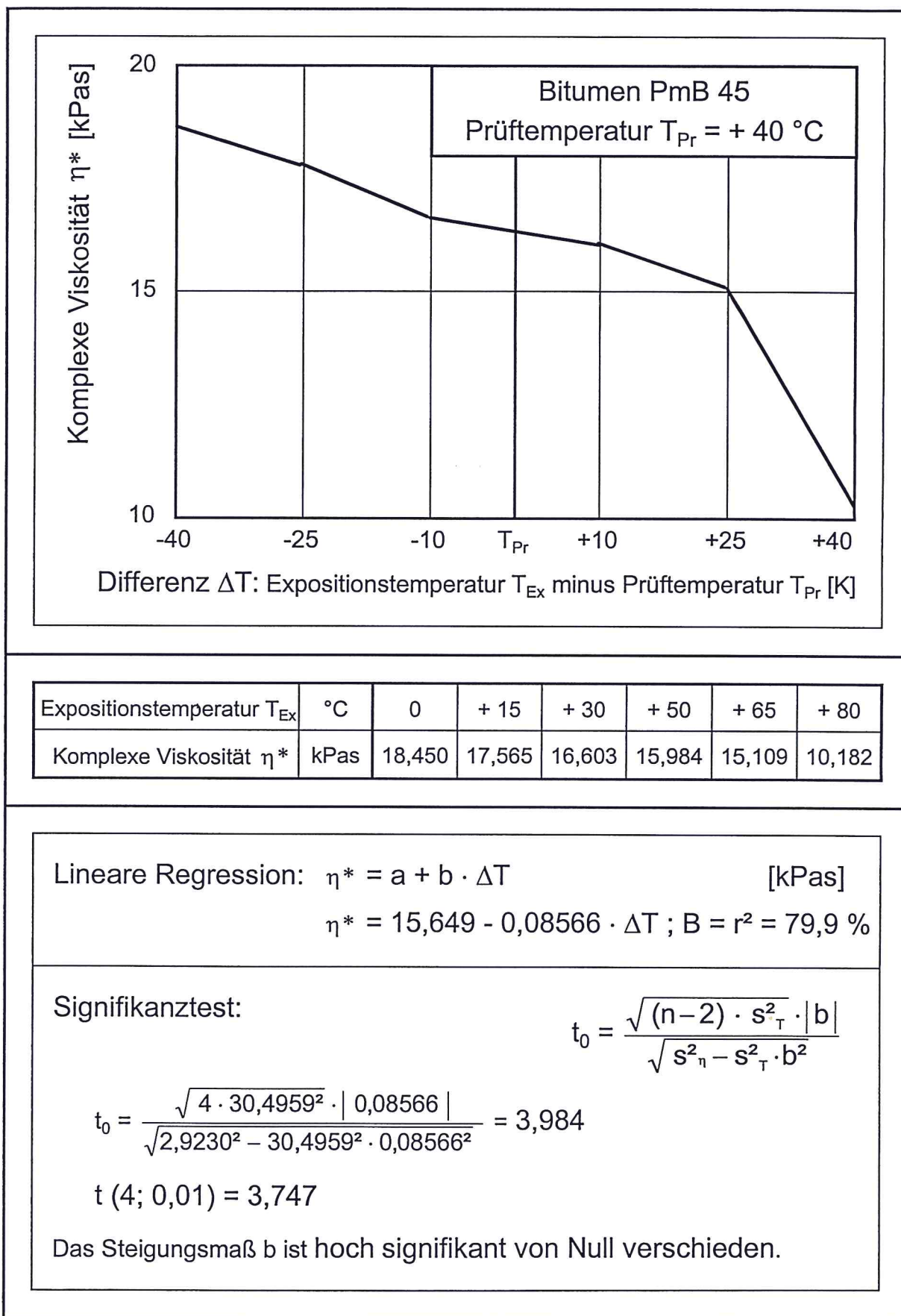
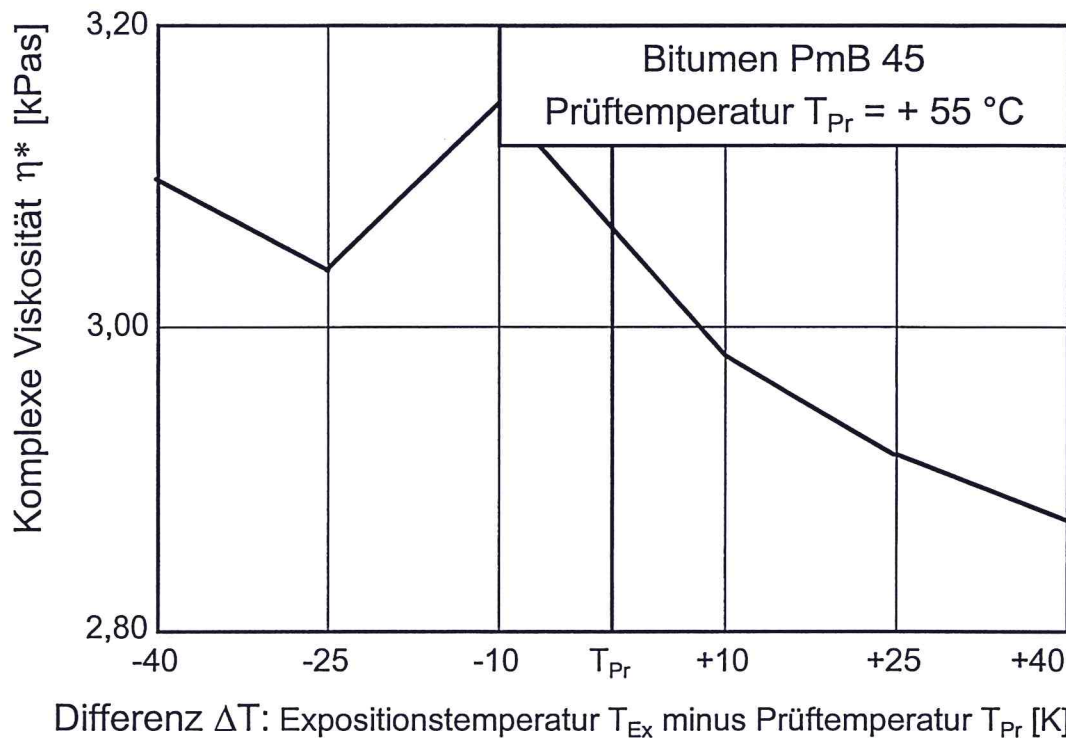


Tabelle 3.25: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen PmB 45; Prüftemperatur $T_{Pr} = + 40 \text{ °C}$



Expositionstemperatur T_{Ex}	°C	+15	+ 30	+ 45	+ 65	+ 80	+ 95
Komplexe Viskosität η^*	kPas	3,0940	3,0349	3,1447	2,9763	2,9106	2,8685

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]

$$\eta^* = 3,0048 - 0,00297 \cdot \Delta T ; B = r^2 = 72,4 \%$$

Signifikanztest:

$$t_0 = \frac{\sqrt{(n-2) \cdot s^2_T} \cdot |b|}{\sqrt{s^2_{\eta} - s^2_T \cdot b^2}}$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot 30,4959^2} \cdot |0,00297|}{\sqrt{0,1065^2 - 30,4959^2 \cdot 0,00297^2}} = 3,233$$

$$t(4; 0,05) = 2,132$$

Das Steigungsmaß b ist signifikant von Null verschieden.

Tabelle 3.26: Überprüfung der Abhängigkeit der komplexen Viskosität η^* von der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} mittels linearer Regression und Signifikanztest; hier: Bitumen PmB 45; Prüftemperatur $T_{Pr} = +55\text{ °C}$

Die Ergebnisse der linearen Regressionsanalysen sind in Tabelle 3.27 unter Angabe der Regressionskoeffizienten a und b und des Bestimmtheitsmaßes B sowie der Beantwortung der Frage nach der Signifikanz übersichtlich zusammengestellt.

Wie unschwer zu erkennen ist, führt die lineare Regression lediglich in einem von zwölf Fällen zu einem nicht plausiblen Ergebnis, nämlich bei dem polymermodifizierten Bitumen PmB 45 und der Prüftemperatur $T_{Pr} = + 10 \text{ °C}$. Wegen der unsystematischen Streuungen der Versuchsergebnisse (siehe Tabelle 3.23) konnte nur ein Bestimmtheitsmaß von knapp 42 % und keine Signifikanz für das Steigungsmaß b ermittelt werden.

Dieser Fall wird bei den folgenden Überlegungen nicht weiter betrachtet.

Von den übrigbleibenden elf Fällen ist das Steigungsmaß b fünfmal signifikant und siebenmal hochsignifikant von Null verschieden. Es darf also festgestellt werden, daß die komplexe Viskosität η^* durch die Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} systematisch beeinflusst wird.

Um die Frage zu klären, ob dieser systematische Einfluß bei unterschiedlichen Prüftemperaturen T_{Pr} unterschiedlich groß ist, wurden die Quotienten b/a der Regressionskoeffizienten a und b berechnet und in der fünften Spalte der Tabelle 3.27 zahlenmäßig angegeben. Zunächst ist zu konstatieren, daß die Quotienten b/a stets ein negatives Vorzeichen besitzen. Außerdem sind sie - erkennbar an der Zehnerpotenz - alle von gleicher Größenordnung. Sie werden daher unter Ausschluß des Wertes für das polymermodifizierte Bitumen PmB 45 bei der Prüftemperatur $T_{Pr} = + 10 \text{ °C}$ zu einem arithmetischen Mittel zusammengefaßt. Dieses beträgt rund $b/a = - 0,0029 \text{ K}^{-1}$ bei einem mittleren Bestimmtheitsmaß von etwa 77 %.

Das Zusammenfassen der relativen Steigungsmaße b/a zu einem arithmetischen Mittel erscheint zulässig, da trotz aller Streuungen keine systematische Abhängigkeit von der Prüftemperatur T_{Pr} erkennbar ist.

Lineare Regression: $\eta^* = a + b \cdot \Delta T$ [kPas]						
Bitumen	Prüf-temperatur T_{Pr}	a	b	b/a	Bestimmtheitsmaß $B = r^2$	Signifikanz? ja/nein
-	°C	kPas	kPas · K ⁻¹	K ⁻¹	%	-
B 80	+ 10	475,54	- 2,1990	- 46,242 · 10 ⁻⁴	70,2	ja
	+ 25	58,400	- 0,1291	- 22,106 · 10 ⁻⁴	74,4	ja
	+ 40	6,609	- 0,02362	- 35,739 · 10 ⁻⁴	79,7	ja, hoch
	+ 55	0,8411	- 0,00395	- 46,962 · 10 ⁻⁴	89,2	ja, hoch
B 65	+ 10	526,50	- 0,4346	- 8,255 · 10 ⁻⁴	63,0	ja
	+ 25	86,835	- 0,3064	- 35,285 · 10 ⁻⁴	79,1	ja, hoch
	+ 40	9,908	- 0,0189	- 19,075 · 10 ⁻⁴	79,9	ja, hoch
	+ 55	1,4453	- 0,00295	- 20,411 · 10 ⁻⁴	81,0	ja, hoch
PmB 45	+ 10	574,37	- 1,1277	[- 19,634 · 10 ⁻⁴]	[41,9]	nein
	+ 25	102,908	- 0,2075	- 20,164 · 10 ⁻⁴	79,0	ja, hoch
	+ 40	15,649	- 0,08566	- 54,738 · 10 ⁻⁴	79,9	ja, hoch
	+ 55	3,0048	- 0,00297	- 9,884 · 10 ⁻⁴	72,4	ja
Im Mittel				- 28,987 · 10 ⁻⁴ ± 15,687	77,1 ± 6,8	

Tabelle 3.27: Lineare Regressionsanalyse zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen der komplexen Viskosität η^* und der Differenz ΔT zwischen der Expositionstemperatur T_{Ex} und der Prüftemperatur T_{Pr} unter Angabe des Bestimmtheitsmaßes B und der Signifikanz des Steigungsmaßes b

Da die Zahlenangabe $b/a = -0,0029 \text{ K}^{-1}$ es an Anschaulichkeit missen läßt, sei die Bedeutung des relativen Steigungsmaßes b/a anhand eines Zahlenbeispiels erläutert: Wenn die Prüftemperatur T_{Pr} von einem um 40 K höheren Temperaturniveau aus angesteuert wird, so ist die komplexe Viskosität η^* des Bitumens wegen des negativen Vorzeichens um $100 \cdot 0,0029 \cdot 40 = 11$ bis 12 % niedriger als wenn die Prüftemperatur T_{Pr} über längere Zeit hinweg konstant gehalten worden wäre. Umgekehrt ist die komplexe Viskosität η^* für den Fall, daß die Prüftemperatur T_{Pr} von einem um 40 K niedrigeren Temperaturniveau aus angesteuert worden ist, um ebenfalls $100 \cdot 0,0029 \cdot 40 = 11$ bis 12 % größer als wenn die Prüftemperatur T_{Pr} über längere Zeit konstant gehalten worden wäre.

Der hiermit nachgewiesene Einfluß der Expositionstemperatur T_{Ex} auf die komplexe Viskosität η^* entspricht damit nicht nur qualitativ sondern größenordnungsmäßig auch quantitativ den Ergebnissen der Ringanalyse des Arbeitskreises "Bitumen" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen aus dem Jahre 1994 [14, Halfmann], mit der nachgewiesen worden war, daß die Penetration des Bitumens im sogenannten Abkühlungstrend im Vergleich zum sogenannten Erwärmungstrend um 6,5 bis 14,5 % (relativ) größer ist.

Damit bleibt nur noch die Frage zu klären, ob die bei verschiedenen Prüftemperaturen festgestellten mittleren komplexen Viskositäten $\bar{\eta}^*$ der drei untersuchten Bitumen B 80, B 65 und PmB 45 in der bekannten Weise exponentiell von der Prüftemperatur T_{Pr} abhängen. Hierzu wurden Linearregressionen mit folgender Gleichung:

$$\log \bar{\eta}^* = a + b \cdot T_{Pr}$$

gerechnet, deren Ergebnisse der Tabelle 3.28 entnommen werden können.

Wie schon die Bestimmtheitsmaße mit Werten von $B = 99,9 \%$ und mehr andeuten und paarweise Vergleiche zwischen den berechneten und den gemessenen Werten

Bitumen	Mittlere komplexe Viskosität $\bar{\eta}^*$ [kPas] bei $T_{Pr} =$					a	b	B
	-	+ 10 °C	+ 25 °C	+ 40 °C	+ 55 °C	kPas	kPas/K	%
B 80	gemessen	475,54	58,400	6,609	0,8411	3,2912	- 0,0614	99,99
	berechnet	476,04	57,190	6,871	0,8254			
B 65	gemessen	526,50	86,835	9,908	1,4453	3,3232	- 0,0575	99,89
	berechnet	559,83	76,798	10,535	1,4452			
PmB 45	gemessen	574,37	102,908	15,649	3,0048	3,2711	- 0,0511	99,94
	berechnet	575,83	98,646	16,899	2,8950			

Tabelle 3.28: Überprüfung der Abhängigkeit der mittleren komplexen Viskosität $\bar{\eta}^*$ von der Prüftemperatur T_{Pr} mittels der Gleichung:

zeigen, kann das experimentell ermittelte Datenmaterial sehr gut durch die Funktion

$$\bar{\eta}^* = 10^{(a+b \cdot T_{Pr})} \quad [\text{kPas}]$$

approximiert werden, was als Beweis für die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der Viskositätsmessungen gelten darf. Es erscheint daher zulässig, hinter der Tatsache, daß die Viskosität von der Ansteuerrichtung der Prüftemperatur abhängt, eine physikalische Gesetzmäßigkeit zu vermuten, die dem thixotropen Charakter des Bitumens zuzuschreiben ist.

Der Ordnung halber sei darauf hingewiesen, daß bei diesen Betrachtungen Strukturbildungseffekte infolge Thixotropie bei **längerer** Lagerungsdauer des Bitumens nicht berücksichtigt worden sind. Dennoch läßt das gewählte Beispiel erkennen, daß es für den Asphaltstraßenbau von Bedeutung ist, eine fertiggestellte Asphalt-schicht zunächst erst einmal auskühlen zu lassen, ehe sie durch Verkehrskräfte beansprucht wird, um den positiven Einfluß einer höheren Viskosität in der Wiedererwärmungsphase nach vorausgegangener Abkühlung des Bitumens auf den Verformungswiderstand des Asphalts zu nutzen.

3.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten

Die Untersuchungen über den Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit frisch verlegter Asphaltsschichten sowie über den Einfluß der Expositionsdauer und einer anschließenden Wiedererwärmung auf den Verformungswiderstand wurden für drei verschiedene Asphaltarten/-sorten - nämlich zwei Asphaltbetone AB 0/11 L und AB 0/11 S sowie einen Splittmastixasphalt SMA 0/11 S - in Form dynamischer Stempel-eindringversuche unter zwei- beziehungsweise dreifacher Variation (siehe Abschnitt 2.2.3.2) der Einflußgrößen Abkühlgeschwindigkeit - schnell beziehungsweise langsam - und Expositionsdauer - nämlich $t_{Ex} = 2 \text{ h}$, 16 h und 40 h - durchgeführt. Zur Bestimmung des Einflusses der Expositionstemperatur wurden darüber hinaus die Probekörper des Asphaltbetons 0/11 L bei zwei verschiedenen Temperaturen - nämlich $T_{Ex} = + 25 \text{ °C}$ und $+ 10 \text{ °C}$ - exponiert, ehe sie auf die Prüftemperatur T_{Pr} gebracht wurden (siehe ebenfalls Abschnitt 2.2.3.2).

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung der relativen Stempeleindring-tiefen sind in Abhängigkeit von

- der Abkühlgeschwindigkeit in Abschnitt 3.2.1,
- der Expositionstemperatur in Abschnitt 3.2.2 und
- der Expositionsdauer in Abschnitt 3.2.3

dokumentiert. Sie werden in diesen Abschnitten auch unter Anwendung bewerten-der Methoden der mathematischen Statistik ausgewertet und kommentiert.

3.2.1 Relative Stempeleindringtiefen in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit

Die entsprechend den Ausführungen in den Abschnitten 2.2.3.2 und 2.2.4 ermittel-ten relativen Eindringtiefen sind als Ergebnisse der dynamischen Stempeleindring-versuche bei drei Prüftemperaturen - $T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$, $+ 40 \text{ °C}$ und $+ 25 \text{ °C}$ - nach un-terschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten - schnell oder langsam - für die drei As-phaltarten/-sorten AB 0/11 L, AB 0/11 S und SMA 0/11 S - unter Angabe der Einzel-

Prüf- temperatur T_{Pr}	Relative Eindringtiefen ε im dynamischen Stempeleindringversuch [‰]					
	AB 0/11 L		AB 0/11 S		SMA 0/11 S	
	Abkühlgeschwindigkeit		Abkühlgeschwindigkeit		Abkühlgeschwindigkeit	
	schnell	langsam	schnell	langsam	schnell	langsam
+ 55 °C	16,52	15,25	9,87	8,78	6,41	6,10
	17,16	13,50	8,75	7,30	7,25	5,65
	16,04	14,37	8,94	8,05	6,83	6,75
$\bar{x}$	16,57	14,37	9,19	8,04	6,83	6,17
s	0,562	0,875	0,599	0,740	0,420	0,553
+ 40 °C	10,83	6,10	6,83	4,69	6,08	5,91
	9,98	6,88	6,01	5,66	5,80	5,60
	10,36	6,52	6,46	5,37	5,52	5,28
$\bar{x}$	10,39	6,50	6,43	5,24	5,80	5,60
s	0,426	0,390	0,411	0,498	0,280	0,315
+ 25 °C	4,70	3,58	4,04	2,68	3,38	3,04
	4,50	4,16	3,83	2,64	3,53	2,89
	4,96	4,06	3,60	3,14	3,67	2,74
$\bar{x}$	4,72	3,93	3,82	2,82	3,53	2,89
s	0,231	0,310	0,220	0,278	0,145	0,150

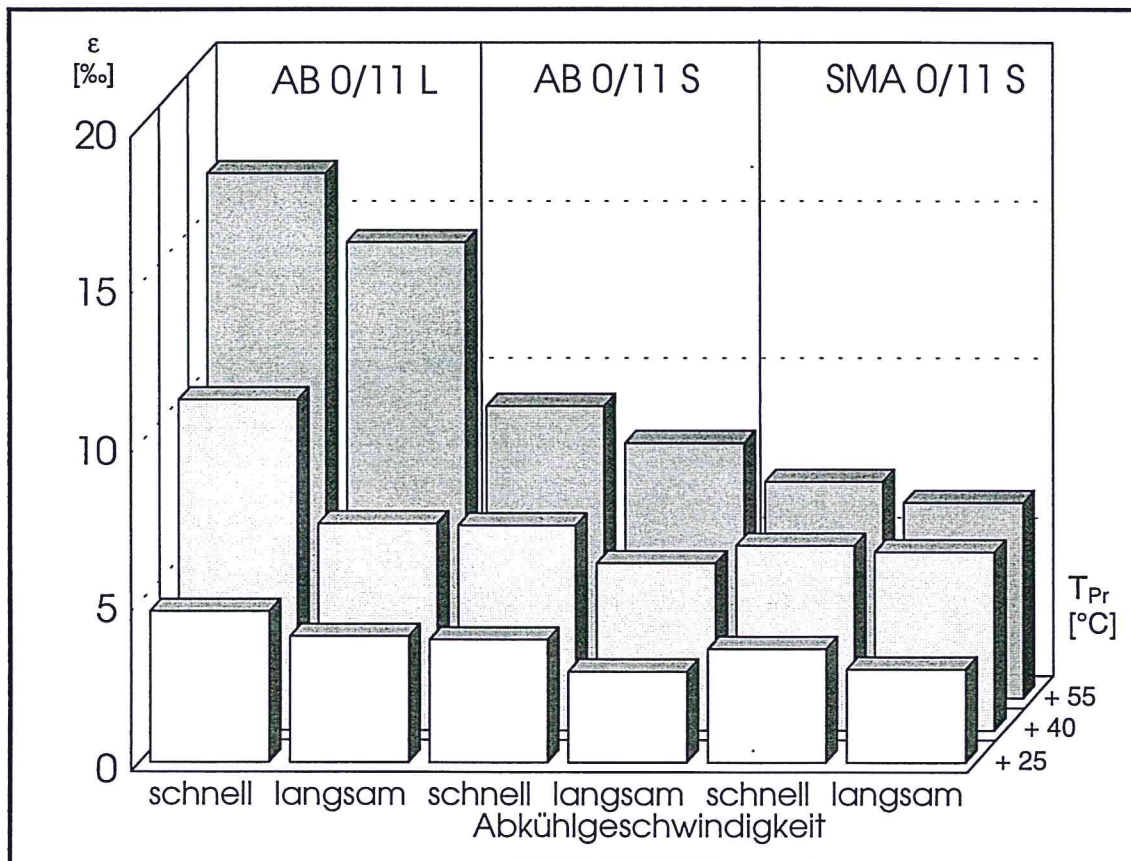


Tabelle 3.29: Relative Eindringtiefen ε als Ergebnis des dynamischen Stempeleindringversuchs an drei Asphaltarten/-sorten in Abhängigkeit von der Prüftemperatur T_{Pr} sowie der Abkühlgeschwindigkeit

und Mittelwerte sowie der Standardabweichungen in Tabelle 3.29 zahlenmäßig und graphisch wiedergegeben.

Ein Blick auf die Zahlenwerte und die graphische Darstellung der Tabelle 3.29 zeigt, daß - unabhängig von der Asphaltart/-sorte und der Prüftemperatur - eine langsame Abkühlung stets zu niedrigeren relativen Eindringtiefen im dynamischen Stempel-eindringversuch geführt hat als eine schnelle Abkühlung. Um zu hinterfragen, ob die bereits nach Augenschein erkennbaren Unterschiede systematischer oder nur zufälliger Natur sind, wurden Varianzanalysen der mehrfachen Klassifikation und einfache Mittelwertvergleiche nach vorausgegangenen Varianzvergleichen gerechnet, deren Ergebnisse im folgenden vorgestellt und erläutert werden sollen.

Tabelle 3.30 enthält die Ergebnisse einer Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte, der Prüftemperatur und der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempel Eindringtiefe.

Anzahl der Stufen für Faktor A	:	3	Asphaltart/-sorte			
Anzahl der Stufen für Faktor B	:	3	Prüftemperatur			
Anzahl der Stufen für Faktor C	:	2	Abkühlgeschwindigkeit			
Anzahl der Einzelwerte je Stufe	:	3	Belegung			
Anzahl der Stufen insgesamt	:	18				
Gesamtzahl der Einzelwerte	:	54				
Ursache		SQ	v	MQ	F (Ursache)	
A		186.753604	2	93.376802	452.208179	
B		390.006326	2	195.003163	944.367589	
C		22.893067	1	22.893067	110.867279	
AB		110.662185	4	27.665546	133.979597	
AC		7.459011	2	3.729506	18.061369	
BC		2.052400	2	1.026200	4.969714	
ABC		5.418889	4	1.354722	6.560692	
Fehler		7.433667	36	0.206491		
Total		732.679148	53			
Ursache	v1	v2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]
A	2	36	3.260	ja	3.518693	18.72
B	2	36	3.260	ja	9.314785	49.56
C	1	36	4.113	ja	0.721929	3.84
AB	4	36	2.630	ja	4.385137	23.33
AC	2	36	3.260	ja	0.263865	1.40
BC	2	36	3.260	ja	-0.036502	
ABC	4	36	2.630	ja	0.382744	2.04
Fehler					0.206491	1.10
Summe					18.793644	100.00

Tabelle 3.30: Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte, der Prüftemperatur und der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempel Eindringtiefe

Es ist unschwer zu erkennen, daß die Prüftemperatur mit einem Varianzanteil von fast 50 % (relativ) das Problem dominiert, während die Abkühlgeschwindigkeit als Variabilitätsursache nur einen Varianzanteil von knapp 4 % (relativ) beisteuert. Den zweitgrößten Varianzanteil eines Einzelfaktors liefert die Einflußgröße Asphaltart/-sorte mit rund 19 % (relativ), die mit einem Wechselwirkungsanteil von mehr als 23 % (relativ) auch zusammen mit der Einflußgröße Prüftemperatur die Gesamtvariabilität entscheidend mit prägt. Erfreulich ist die Tatsache, daß der zufallsbedingten Steuungen und nicht erklärten Einflüssen zuzuschreibende Varianzanteil des Fehlers sich lediglich auf rund 1 % (relativ) beläuft.

Der starke Einfluß der Prüftemperatur auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempeleindringtiefe ist erwartungskonform und plausibel. Jedem Praktiker ist bekannt, daß der Verformungswiderstand von Asphalten im hohen Maße durch die Temperatur geprägt wird. Um den Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die relative Stempeleindringtiefe schärfer herausarbeiten zu können, wurden daher Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation gerechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte und der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempeleindringtiefe in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit können der Tabelle 3.31 entnommen werden. Es zeigt sich, daß die Abkühlgeschwindigkeit bei der hohen Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$ mit einem Varianzanteil von 3,4 % (relativ) nur einen vergleichsweise bescheidenen Beitrag zur Gesamtstreuung der relativen Stempeleindringtiefe leistet, während sie bei der Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 25 \text{ °C}$ mit einem Varianzanteil von mehr als 43 % (relativ) zu Buche steht. Mit abnehmender Prüftemperatur nimmt der Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die relative Stempeleindringtiefe zu.

Um die Ergebnisse der Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation abzusichern, wurden zusätzlich einfache Mittelwertvergleiche nach vorausgegangenen Varianzvergleichen gerechnet, deren Ergebnisse in Tabelle 3.32 für die drei Asphaltarten/-sorten in Abhängigkeit von der Prüftemperatur aufgelistet sind. Die ersten beiden Zeilen eines jeden Temperaturblocks in Tabelle 3.32 enthalten die arithmetischen Mittel und Standardabweichungen der gerade betrachteten Fälle aus Tabelle 3.29.

T _{Pr} [°C]	Anzahl der Stufen für Faktor A : 3				Asphaltart/-sorte			
	Anzahl der Stufen für Faktor B : 2				Abkühlgeschwindigkeit			
	Anzahl der Einzelwerte je Stufe : 3				Belegung			
	Anzahl der Stufen insgesamt : 6							
	Gesamtzahl der Einzelwerte : 18							
+ 55	Ursache		SQ	v	MQ	F (Ursache)		
	A		264.135278	2	132.067639	320.751477		
	B		8.026689	1	8.026689	19.494347		
	AB		1.854144	2	0.927072	2.251572		
	Fehler		4.940933	12	0.411744			
	Total		278.957044	17				
			Verwerfung der					
	Ursache		v1	v2	F	Ho-Hypothese	Var. komponente	Var. Anteil [%]
	A		2	12	3.890	ja	21.856761	94.09
	B		1	12	4.752	ja	0.788846	3.40
	AB		2	12	3.890	nein	0.171776	0.74
	Fehler						0.411744	1.77
	Summe						23.229128	100.00
	+ 40	Ursache		SQ	v	MQ	F (Ursache)	
		A		28.733433	2	14.366717	92.901602	
B		13.974422	1	13.974422	90.364851			
AB		10.921811	2	5.460906	35.312653			
Fehler		1.855733	12	0.154644				
Total		55.485400	17					
		Verwerfung der						
Ursache		v1	v2	F	Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]	
A		2	12	3.890	ja	1.484302	34.09	
B		1	12	4.752	ja	0.945946	21.73	
AB		2	12	3.890	ja	1.768754	40.63	
Fehler						0.154644	3.55	
Summe						4.353646	100.00	
+ 25		Ursache		SQ	v	MQ	F (Ursache)	
		A		4.547078	2	2.273539	42.829618	
	B		2.944356	1	2.944356	55.466667		
	AB		0.101944	2	0.050972	0.960230		
	Fehler		0.637000	12	0.053083			
	Total		8.230378	17				
			Verwerfung der					
	Ursache		v1	v2	F	Ho-Hypothese	Var. komponente	Var. Anteil [%]
	A		2	12	3.890	ja	0.370428	49.72
	B		1	12	4.752	ja	0.321487	43.15
	AB		2	12	3.890	nein	-0.000704	
	Fehler						0.053083	7.13
	Summe						0.744998	100.00

Tabelle 3.31: Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte und der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempfeleindringtiefe in Abhängigkeit von der Prüftemperatur T_{Pr}

T_{Pr} [°C]	Test- größen		AB 0/11 L		AB 0/11 S		SMA 0/11 S	
			schnell	langsam	schnell	langsam	schnell	langsam
+ 55	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	16,573	14,373	9,187	8,043	6,830	6,167
	s_1	s_2	0,5619	0,8750	0,5994	0,7400	0,4200	0,5530
	$\hat{F}$		2,42		1,52		1,73	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		3,66		2,08		1,65	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		gleich		gleich	
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	10,390	6,500	6,433	5,240	5,800	5,597
	s_1	s_2	0,4258	0,3904	0,4106	0,4979	0,2800	0,3150
	$\hat{F}$		1,19		1,47		0,84	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		11,66		3,20		0,84	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich		gleich	
+ 25	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	4,720	3,933	3,823	2,820	3,503	2,890
	s_1	s_2	0,2307	0,3101	0,2201	0,2778	0,1124	0,1500
	$\hat{F}$		1,81		1,59		1,78	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		3,53		4,90		5,67	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich		ungleich	

Tabelle 3.32: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit bzw. Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;
statistische Sicherheit: S = 95 %,

hier: Vergleiche der relativen Stempeleindringtiefen **nach schneller beziehungsweise langsamer Abkühlung**
für alle drei Asphaltarten/-sorten

In der dritten Zeile ist sodann die Testgröße $\hat{F}$ angegeben, die als Quotient der Varianzen s_1^2 und s_2^2 berechnet wird, wobei die größere der beiden Varianzen stets im Zähler des Quotienten und die kleinere stets im Nenner steht. Diese Testgröße $\hat{F}$ muß mit dem Schwellenwert F der Fisher-Verteilung (siehe Zeile 5 der Tabelle 3.32) verglichen werden, dessen Größe seinerseits durch die Anzahl der Freiheitsgrade ν_1 und ν_2 bestimmt wird. Diese beiden Freiheitsgrade ν_1 und ν_2 nehmen stets den Wert 2,0 an, da alle Zellen der Prüfergebnisse ausnahmslos dreifach belegt sind, was bedeutet, daß die arithmetischen Mittel stets aus drei Einzelwerten gebildet worden sind. In der sechsten Zeile wird verbal angegeben, ob die beiden Varianzen, deren arithmetische Mittel zum Vergleich anstehen, im statistischen Sinne gleich sind oder nicht. Vorgreifend läßt sich sagen, daß im statistischen Sinne ungleiche Varianzen nicht beobachtet worden sind.

In der siebten Zeile der Tabelle 3.32 sind die Testgrößen $\hat{t}$ zu finden, die gemäß Abschnitt 2.3.6 berechnet worden sind. Diese sind mit dem von der Anzahl der Freiheitsgrade - hier stets $\nu = 4,0$ - abhängigen Schwellenwert der Student-Verteilung - hier stets $t = 2,78$ - zu vergleichen. Ist die Testgröße $\hat{t}$ größer als der Schwellenwert t , so sind die beiden zu vergleichenden arithmetischen Mittel mit einer statistischen Sicherheit von $S = 95 \%$ signifikant voneinander verschieden. Auch diese Aussage wird verbal belegt, was in der jeweils zehnten Zeile eines jeden Temperaturblocks der Tabelle 3.32 geschieht. Die besagte Tabelle läßt also durch einen Blick auf die Zeile 10 eines jeden Temperaturblocks sofort erkennen, ob die arithmetischen Mittel der relativen Stempfeleindringtiefen nach schneller beziehungsweise langsamer Abkühlung im statistischen Sinne gleich sind oder nicht.

Wie leicht zu realisieren ist, sind die arithmetischen Mittel der relativen Stempfeleindringtiefen nach schneller beziehungsweise langsamer Abkühlung bei der Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$ in einem von drei Fällen - und zwar beim Asphaltbeton 0/11 L - ungleich, bei der Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 40 \text{ °C}$ in zwei von drei Fällen und bei der Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 25 \text{ °C}$ in allen Fällen ungleich. Dieses Resultat deckt sich prinzipiell mit dem Ergebnis der Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation (siehe Tabelle 3.31), nach dem der Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit

auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempелеindringtiefe - erkennbar an ihren Varianzanteilen - mit abnehmender Prüftemperatur zunimmt.

Seine Erklärung findet dieses Ergebnis in Abbildung 2.12: Während zum Erreichen der Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$ bei schneller und bei langsamer Abkühlung annähernd gleich lange Zeiträume benötigt werden, verlängern sich die Zeiten bis zum Erreichen der angestrebten Prüftemperatur mit deren Abnahme zunehmend. Das Bitumen im Asphalt hat also bei langsamerer Abkühlung - mit fallender Prüftemperatur steigend - mehr Zeit, auf Vernetzungsvorgängen basierende Strukturen auszubilden, die einen Beitrag zur Erhöhung des Verformungswiderstandes leisten.

Von Interesse scheint auch die Frage, ob Unterschiede bei den Verformungswiderständen der unterschiedlichen Asphaltarten/-sorten festgestellt werden können oder nicht. Zu diesem Zweck werden einfache Mittelwertvergleiche nach vorausgegangen Varianzvergleichen für die Kombinationen

- Asphaltbeton 0/11 L gegen Asphaltbeton 0/11 S und
- Asphaltbeton 0/11 S gegen Splittmastixasphalt 0/11 S

durchgeführt. Dabei ist zwischen den Fällen schnelle und langsame Abkühlung zu unterscheiden.

Die Ergebnisse der einfachen Mittelwertvergleiche zur Klärung der Frage nach Gleichheit beziehungsweise Ungleichheit der relativen Stempелеindringtiefen der Asphaltbetone 0/11 L und 0/11 S nach schneller oder langsamer Abkühlung sind in Tabelle 3.33 für alle drei Prüftemperaturen wiedergegeben. Unter Rückgriff auf die jeweils paarweise zu vergleichenden arithmetischen Mittel läßt sich aus besagter Tabelle ableiten, daß die Asphaltbetone 0/11 S im Vergleich zu den Asphaltbetonen 0/11 L stets einen statistisch signifikant größeren Verformungswiderstand aufweisen. Dieses Ergebnis ist erwartungskonform und plausibel; es bestätigt die Erfahrungen der Praxis.

In Tabelle 3.34 sind die Ergebnisse der einfachen Mittelwertvergleiche für die relativen Stempелеindringtiefen der Asphaltbetone 0/11 S und der Splittmastixasphalte 0/11 S dokumentiert. In vier von sechs Fällen - und zwar bei den Prüftemperaturen

T_{Pr} [°C]	Test- größen		schnell abgekühlt		langsam abgekühlt	
			AB 0/11 L	AB 0/11 S	AB 0/11 L	AB 0/11 S
+ 55	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	16,573	9,187	14,373	8,043
	s_1	s_2	0,5619	0,5994	0,8750	0,7400
	$\hat{F}$		1,14		1,40	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		15,57		9,57	
	v		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich	
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	10,390	6,433	6,500	5,240
	s_1	s_2	0,4258	0,4106	0,3904	0,4979
	$\hat{F}$		1,08		1,63	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		11,59		3,45	
	v		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich	
+ 25	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	4,720	3,823	3,933	2,820
	s_1	s_2	0,2307	0,2201	0,3101	0,2778
	$\hat{F}$		1,10		1,25	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		4,87		4,63	
	v		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich	

Tabelle 3.33: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit bzw. Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;
 statistische Sicherheit: $S = 95 \%$,
hier: Vergleiche der relativen Stempfeleindringtiefen der
Asphaltbetone 0/11 L und 0/11 S
 nach schneller oder langsamer Abkühlung

T_{Pr} [°C]	Test- größen		schnell abgekühlt		langsam abgekühlt	
			AB 0/11 S	SMA 0/11 S	AB 0/11 S	SMA 0/11 S
+ 55	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	9,187	6,830	8,043	6,167
	s_1	s_2	0,5994	0,4200	0,7400	0,5530
	$\hat{F}$		2,04		1,79	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		5,58		3,52	
	v		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich	
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	6,433	5,800	5,240	5,597
	s_1	s_2	0,4106	0,2800	0,4979	0,3150
	$\hat{F}$		2,15		2,50	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		2,21		1,05	
	v		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		gleich	
+ 25	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	3,823	3,527	2,820	2,890
	s_1	s_2	0,2201	0,1450	0,2778	0,1500
	$\hat{F}$		2,30		3,43	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		1,95		0,38	
	v		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		gleich	

Tabelle 3.34: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit bzw. Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;
 statistische Sicherheit: $S = 95 \%$,
 hier: Vergleiche der relativen Stempfeleindringtiefen von
Asphaltbeton 0/11 S und Splittmastixasphalt 0/11 S
 nach schneller oder langsamer Abkühlung

$T_{Pr} = + 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+ 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - sind im statistischen Sinne - unabhängig von der Geschwindigkeit der Abkühlung - keine Unterschiede zwischen den Stempeleindringtiefen der beiden zu vergleichenden Asphaltdeckschichtvarianten zu konstatieren; bei der höheren Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erweist sich dagegen der Splittmastixasphalt 0/11 S gegenüber dem Asphaltbeton 0/11 S als verformungsresistenter, wobei für beide Abkühlgeschwindigkeiten statistische Signifikanz nachgewiesen werden kann. Der Splittmastixasphalt 0/11 S scheint folglich eine geringere Temperaturempfindlichkeit des Verformungswiderstandes zu besitzen, was sich in den kleineren relativen Stempeleindringtiefen bei der höchsten Prüftemperatur sowie einem geringeren Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die relative Stempeleindringtiefe manifestiert. Letzteres zeigt sich darin, daß die relativen Stempeleindringtiefen bei langsamerer Abkühlung

- bei den Asphaltbetonen um durchschnittlich rund 20 % (relativ) und
- beim Splittmastixasphalt 0/11 S nur um durchschnittlich 10 % (relativ) geringer sind als bei schneller Abkühlung.

3.2.2 Relative Stempeleindringtiefen in Abhängigkeit von der Expositionstemperatur

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung der relativen Stempeleindringtiefen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, der Expositionsdauer und der Expositionstemperatur sind für den Asphaltbeton 0/11 L in Tabelle 3.35 zahlenmäßig aufgelistet und in Form von Säulendiagrammen graphisch dargestellt.

Ein Blick auf Tabelle und Graphik läßt erkennen, daß die Prüftemperatur (erwartungsgemäß) die wirksamste Einflußgröße auf den Verformungswiderstand ist. Nicht zu übersehen ist auch, daß die relativen Stempeleindringtiefen bei längeren Expositionsdauern deutlich kleiner sind als bei einer Expositionsdauer $t_{Ex} = 2 \text{ h}$. Auf den ersten Blick nicht klar erkennbar ist der Einfluß der Expositionstemperatur. Diesem wird daher unter Anwendung von Varianzanalysen der dreifachen und der zweifachen Klassifikation sowie von einfachen Mittelwertvergleichen nachgegangen.

Prüf- temperatur T_{Pr}	Relative Eindringtiefen ε im dynamischen Stempfeindringversuch [%]					
	Expositionsdauer t_{Ex} bei einer Expositionstemperatur T_{Ex}					
	$T_{Ex} = + 10\text{ °C}$			$T_{Ex} = + 25\text{ °C}$		
	2 h	16 h	40 h	2 h	16 h	40 h
+ 55 °C	16,79	9,86	12,04	15,34	10,27	10,52
	15,92	11,33	11,30	15,30	11,63	12,10
	15,05	10,30	10,76	14,81	10,73	9,09
$\bar{x}$	15,92	10,50	11,37	15,15	10,88	10,57
s	0,870	0,754	0,643	0,295	0,692	1,506
+ 40 °C	10,15	7,21	7,79	8,31	6,77	7,16
	10,59	7,53	7,01	8,45	6,53	6,97
	11,03	6,83	7,30	7,73	6,19	6,96
$\bar{x}$	10,59	7,19	7,37	8,16	6,50	7,03
s	0,440	0,350	0,394	0,382	0,291	0,113
+ 25 °C	4,34	3,75	3,49	4,70	3,88	3,38
	4,08	3,99	3,73	4,24	3,71	3,85
	4,51	3,55	3,25	4,47	3,50	3,60
$\bar{x}$	4,31	3,76	3,49	4,47	3,70	3,61
s	0,217	0,220	0,240	0,230	0,190	0,235

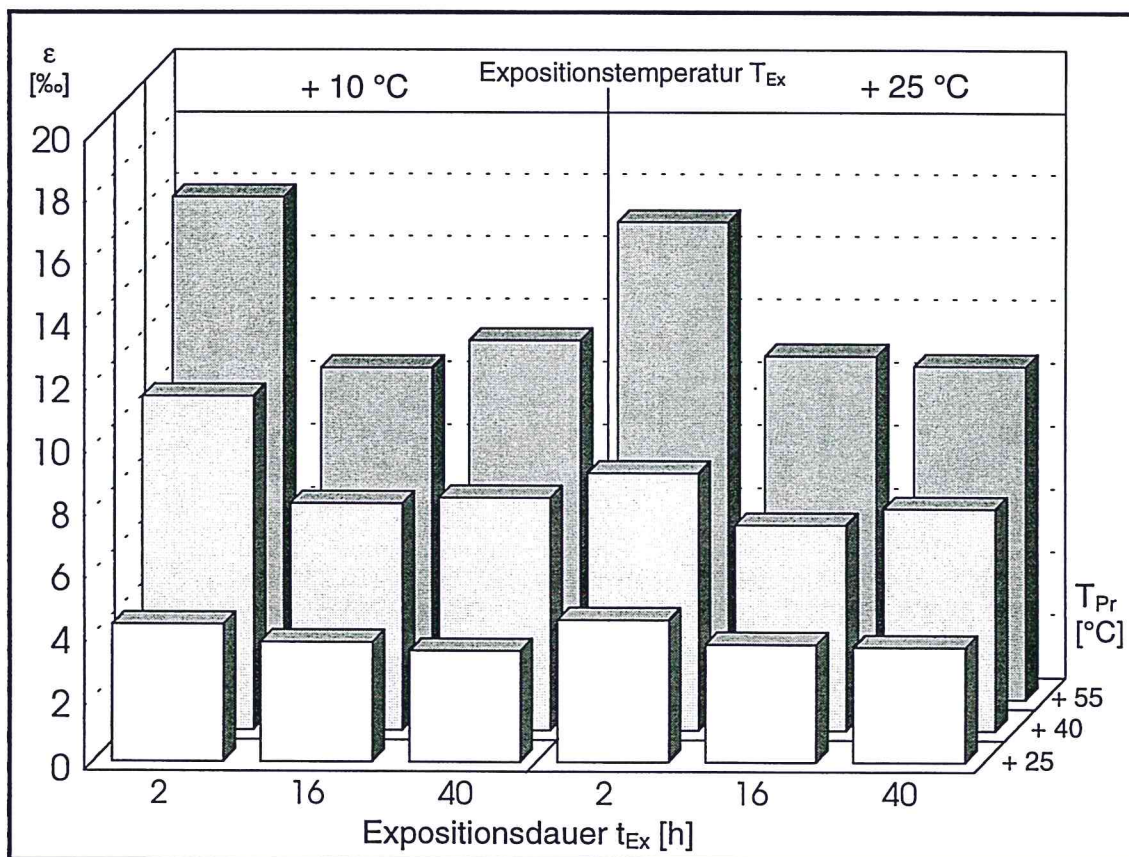


Tabelle 3.35: Relative Eindringtiefen ε als Ergebnis des dynamischen Stempfeindringversuchs am Asphaltbeton 0/11 L in Abhängigkeit von der Prüftemperatur T_{Pr} , der Expositionsdauer t_{Ex} sowie der Expositionstemperatur T_{Ex}

Das Ergebnis der Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der oben genannten Faktoren - nämlich der Expositionstemperatur, der Prüftemperatur und der Expositionsdauer - auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempelleindringtiefe beim Asphaltbeton 0/11 L können der Tabelle 3.36 entnommen werden. Es zeigt sich - wie bereits vermutet - der dominante Einfluß der Prüftemperatur mit einem Varianzanteil von fast 83 % (relativ). Zweitstärkste Einflußgröße ist die Expositionsdauer mit einem Varianzanteil von 8,5 % (relativ). Erfreulich ist die Tatsache, daß der Varianzanteil des Fehlers, in welchem zufallsbedingte Streuungen und nicht erfaßte Einflußgrößen repräsentiert sind, sich nur auf rund 1,5 % (relativ) beläuft.

Anzahl der Stufen für Faktor A	:	2	Expositionstemperatur
Anzahl der Stufen für Faktor B	:	3	Prüftemperatur
Anzahl der Stufen für Faktor C	:	3	Expositionsdauer
Anzahl der Einzelwerte je Stufe	:	3	Belegung
Anzahl der Stufen insgesamt	:	18	
Gesamtzahl der Einzelwerte	:	54	

Ursache	SQ	v	MQ	F (Ursache)
A	3.270817	1	3.270817	10.542960
B	652.635026	2	326.317513	1051.832870
C	81.606115	2	40.803057	131.522199
AB	3.430300	2	1.715150	5.528515
AC	1.925478	2	0.962739	3.103236
BC	32.199196	4	8.049799	25.947254
ABC	3.222189	4	0.805547	2.596554
Fehler	11.168533	36	0.310237	
Total	789.457654	53		

Ursache	v ₁	v ₂	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]
A	1	36	4.113	ja	0.051795	0.24
B	2	36	3.260	ja	17.631006	82.79
C	2	36	3.260	ja	1.810893	8.50
AB	2	36	3.260	ja	0.101067	0.47
AC	2	36	3.260	nein	0.017466	0.08
BC	4	36	2.630	ja	1.207375	5.67
ABC	4	36	2.630	nein	0.165103	0.78
Fehler					0.310237	1.46
Summe					21.294943	100.00

Tabelle 3.36: Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Expositionstemperatur, der Prüftemperatur und der Expositionsdauer auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempelleindringtiefe beim Asphaltbeton 0/11 L

Angeichts des alles beherrschenden Varianzanteils der Prüftemperatur erscheint es angebracht, Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation unter Fortlassen eben des Faktors Prüftemperatur durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Varianzanalysen sind in Tabelle 3.37 für die drei verschiedenen Prüftemperaturen

T _{Pr} [°C]	Anzahl der Stufen für Faktor A :		2	Expositionstemperatur			
	Anzahl der Stufen für Faktor B :		3	Expositionsdauer			
	Anzahl der Einzelwerte je Stufe :		3	Belegung			
	Anzahl der Stufen insgesamt :		6				
	Gesamtzahl der Einzelwerte :		18				
+ 55	Ursache	SQ	v	MQ	F (Ursache)		
	A	0.704089	1	0.704089	0.924082		
	B	88.880233	2	44.440117	58.325466		
	AB	1.353878	2	0.676939	0.888449		
	Fehler	9.143200	12	0.761933			
	Total	100.081400	17				
	Ursache	v ₁	v ₂	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. komponente	Var. Anteil [%]
	A	1	12	4.752	nein	0.003017	0.04
	B	2	12	3.890	ja	7.293863	90.51
	AB	2	12	3.890	nein	-0.028331	
	Fehler					0.761933	9.45
	Summe					8.058813	100.00
	+ 40	Ursache	SQ	v	MQ	F (Ursache)	
A		5.974272	1	5.974272	50.119733		
B		22.577878	2	11.288939	94.705863		
AB		3.749878	2	1.874939	15.729353		
Fehler		1.430400	12	0.119200			
Total		33.732428	17				
Ursache		v ₁	v ₂	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]
A		1	12	4.752	ja	0.455481	16.69
B		2	12	3.890	ja	1.569000	57.50
AB		2	12	3.890	ja	0.585246	21.45
Fehler						0.119200	4.37
Summe						2.728928	100.00
+ 25		Ursache	SQ	v	MQ	F (Ursache)	
	A	0.022756	1	0.022756	0.458987		
	B	2.347200	2	1.173600	23.671896		
	AB	0.043911	2	0.021956	0.442851		
	Fehler	0.594933	12	0.049578			
	Total	3.008800	17				
	Ursache	v ₁	v ₂	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. komponente	Var. Anteil [%]
	A	1	12	4.752	nein	0.000089	0.04
	B	2	12	3.890	ja	0.191941	79.44
	AB	2	12	3.890	nein	-0.009207	
	Fehler					0.049578	20.52
	Summe					0.241607	100.00

Tabelle 3.37: Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Expositionstemperatur und der Expositionsdauer auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempfeleindringtiefe beim Asphaltbeton 0/11 L in Abhängigkeit von der Prüftemperatur T_{Pr}

$T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$, $+40 \text{ °C}$ und $+ 25 \text{ °C}$ getrennt dokumentiert. Es zeigt sich, daß die Varianzanteile, die den Einfluß der Expositionstemperatur beschreiben, bei den Prüftemperaturen von $T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$ und $+ 25 \text{ °C}$ kleiner sind als 0,1 % (relativ). Darüber hinaus werden sie als statistisch nicht signifikant identifiziert. Bei den

genannten Prüftemperaturen besitzt also die Expositionstemperatur keinen Einfluß auf die Größe der relativen Stempeleindringtiefen.

Anders liegen die Verhältnisse bei der Prüftemperatur $T_{Pr} = + 40 \text{ °C}$. Hier wird für die Expositionstemperatur ein Varianzanteil von rund 16,7 % (relativ) ausgewiesen, der in statistisch signifikanter Weise zur Gesamtvariabilität beiträgt. Es bleibt zu hinterfragen, worauf der große Varianzanteil der Expositionstemperatur zurückzuführen ist. Dieses geschieht mittels einfacher Mittelwertvergleiche nach vorausgegangenen Varianzvergleichen. Deren Ergebnisse sind in Tabelle 3.38 zahlenmäßig dargestellt. Aus besagter Tabelle kann entnommen werden, daß mit einer statistischen Sicherheit von $S = 95 \text{ %}$ abgesicherte Unterschiede zwischen den relativen Stempeleindringtiefen lediglich bei der Expositionsdauer von $t_{Ex} = 2 \text{ h}$ existieren, bei den Expositionsdauern von $t_{Ex} = 16 \text{ h}$ und 40 h dagegen nicht.

T_{Pr} [°C]	Test- größen		$t_{Ex} = 2 \text{ h}$		$t_{Ex} = 16 \text{ h}$		$t_{Ex} = 40 \text{ h}$	
			10 °C	25 °C	10 °C	25 °C	10 °C	25 °C
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	10,590	8,163	7,190	6,497	7,367	7,030
	s_1	s_2	0,4400	0,3818	0,3504	0,2914	0,3943	0,1127
	$\hat{F}$		1,33		1,46		12,24	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		7,22		2,63		1,42	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		gleich		gleich	

Tabelle 3.38: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit beziehungsweise Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;
statistische Sicherheit: $S = 95 \text{ %}$,
hier: Vergleiche der relativen Stempeleindringtiefen von Asphaltbetonen 0/11 L bei einer Prüftemperatur von $T_{Pr} = + 40 \text{ °C}$ nach Expositionsdauern von $t_{Ex} = 2 \text{ h}$, 16 h und 14 h in Abhängigkeit von der **Expositionstemperatur** von $T_{Ex} = + 10 \text{ °C}$ beziehungsweise $+ 25 \text{ °C}$

Betrachtet man die Gesamtheit der in den Tabellen 3.36 bis 3.38 dokumentierten Ergebnisse der statistischen Analysen, so darf festgestellt werden, daß die Expositionstemperatur nur in einem von neun Fällen signifikante Unterschiede zwischen den verglichenen relativen Stempелеindringtiefen bewirken konnte. Die Ursache für die bei einer Prüftemperatur $T_{Pr} = + 40 \text{ °C}$ nach einer Expositionsdauer $t_{Ex} = 2 \text{ h}$ nachgewiesenen systematischen Unterschiede in den relativen Stempелеindringtiefen lassen sich nicht präzise angeben: Sie können in der Probekörpervorbehandlung, ungewollten Abweichungen der Prüftemperatur oder der Expositionsdauer oder ähnlichem begründet sein. Der Versuch, diese Ursachen anhand der Laborprotokolle zu identifizieren, war leider nicht zielführend. Nach der Gesamtlage muß davon ausgegangen werden, daß hier ein systematischer Fehler bei der Versuchsdurchführung vorliegt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Klärung des Einflusses der Expositionstemperatur auf die relativen Stempелеindringtiefen lassen sich daher nur so zusammenfassen, daß die Expositionstemperatur keinen statistisch signifikanten Einfluß besitzt.

Dieses Ergebnis ist überraschend, da eine der Arbeitshypothesen davon ausging, daß die relativen Stempелеindringtiefen als Merkmalsgröße zur Beschreibung des Verformungswiderstandes von Asphaltdeckschichtvarianten bei niedrigen Expositionstemperaturen kleiner ausfallen müßten als bei höheren.

Bei den Untersuchungen zur Überprüfung des Einflusses der Expositionsdauer auf die relativen Stempелеindringtiefen der drei in Rede stehenden Asphaltdeckschichtvarianten wird daher auch einheitlich mit der Expositionstemperatur $T_{Ex} = + 10 \text{ °C}$ gearbeitet.

3.2.3 Relative Stempелеindringtiefen in Abhängigkeit von der Expositionsdauer

In Tabelle 3.39 finden sich für die Prüftemperaturen $T_{Pr} = + 55 \text{ °C}$, $+ 40 \text{ °C}$ und $+ 25 \text{ °C}$ die Ergebnisse der dynamischen Stempелеindringversuche an den drei untersuchten Asphaltdeckschichtvarianten nach unterschiedlich langen Exposi-

tionsdauern $t_{\text{Ex}} = 2 \text{ h}$, 16 h und 40 h . Bezugnehmend auf Abschnitt 2.2.3 sei daran erinnert, daß nach unterschiedlich langer Lagerung bei der Expositionstemperatur von $T_{\text{Ex}} = + 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ die Probekörper innerhalb von 12 min, 18 min beziehungsweise 24 min auf die Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $+ 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $+ 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt worden sind; nach einer weiteren zehnminütigen Lagerung bei der Prüftemperatur T_{Pr} zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung innerhalb der Probekörper wurden sie dann dem dynamischen Stempелеindringversuch unterworfen.

Ein Blick auf die Zahlenwerte und die graphische Darstellung der Tabelle 3.39 läßt bereits nach Augenschein erkennen, daß die relativen Stempелеindringtiefen als Ergebnisse dynamischer Stempелеindringversuche bei einer Steigerung der Expositionsdauer von $t_{\text{Ex}} = 2 \text{ h}$ auf 16 h deutlich geringer werden, während eine systematische Veränderung der relativen Stempелеindringtiefen bei Expositionsdauern zwischen $t_{\text{Ex}} = 16 \text{ h}$ und 40 h nicht mehr erkennbar ist.

Um sicherzustellen, daß die nach Augenschein getroffenen Aussagen zulässig und zuverlässig sind, wurde zunächst eine Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte, der Prüftemperatur und der Expositionsdauer auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempелеindringtiefe durchgeführt. Das Ergebnis der Varianzanalyse ist in Tabelle 3.40 zu finden. Es zeigt sich das bekannte Bild: Am stärksten wird die relative Stempелеindringtiefe durch die Prüftemperatur mit einem Varianzanteil von fast 55 % (relativ) geprägt. Der zweitgrößte Varianzanteil entfällt auf den Faktor Asphaltart/-sorte mit rund 20 % (relativ), während die Expositionsdauer lediglich einen Varianzanteil von etwa 6,6 % (relativ) beisteuert. Von der Wechselwirkung zwischen der Prüftemperatur und der Asphaltart/-sorte abgesehen, sind die Wechselwirkungsanteile von nachgeordneter Bedeutung. Der Varianzanteil für den Fehler mit rund 1,6 % (relativ) spricht für sorgfältiges Experimentieren, was sich auch in der Tatsache zeigt, daß alle Varianzanteile signifikant größer sind als der Varianzanteil des Fehlers.

Angeichts des dominierenden Varianzanteils der Prüftemperatur erscheint es wieder angebracht, unter Fortlassen dieses Faktors eine Varianzanalyse der zweifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte und der

Prüf- temperatur T_{Pr}	Relative Eindringtiefen ε im dynamischen Stempfeleindringversuch [%]								
	AB 0/11 L			AB 0/11 S			SMA 0/11 S		
	Expositionsdauer t_{Ex} bei einer Expositionstemperatur von $T_{Ex} = + 10\text{ °C}$								
	2 h	16 h	40 h	2 h	16 h	40 h	2 h	16 h	40 h
+ 55 °C	16,79	9,86	12,04	7,09	7,46	5,71	8,63	6,55	7,28
	15,92	11,33	11,30	7,68	5,58	7,16	8,99	6,08	6,80
	15,05	10,30	10,76	8,34	6,52	6,44	8,38	6,13	6,25
$\bar{x}$	15,92	10,50	11,37	7,70	6,52	6,44	8,67	6,25	6,78
s	0,870	0,754	0,643	0,625	0,940	0,725	0,307	0,258	0,515
+ 40 °C	10,15	7,21	7,79	6,55	5,09	4,30	7,00	5,02	5,37
	10,59	7,53	7,01	5,28	4,67	4,52	6,69	4,69	4,56
	11,03	6,83	7,30	5,98	4,24	5,26	6,60	5,36	4,99
$\bar{x}$	10,59	7,19	7,37	5,94	4,67	4,69	6,76	5,02	4,97
s	0,440	0,350	0,394	0,636	0,425	0,503	0,210	0,335	0,405
+ 25 °C	4,34	3,75	3,49	3,00	3,06	2,46	3,42	2,48	2,36
	4,08	3,99	3,73	3,32	2,78	2,67	3,28	2,20	2,48
	4,51	3,55	3,25	3,19	2,81	2,89	3,13	2,34	2,20
$\bar{x}$	4,31	3,76	3,49	3,17	2,88	2,67	3,28	2,34	2,35
s	0,217	0,220	0,240	0,161	0,154	0,215	0,145	0,140	0,140

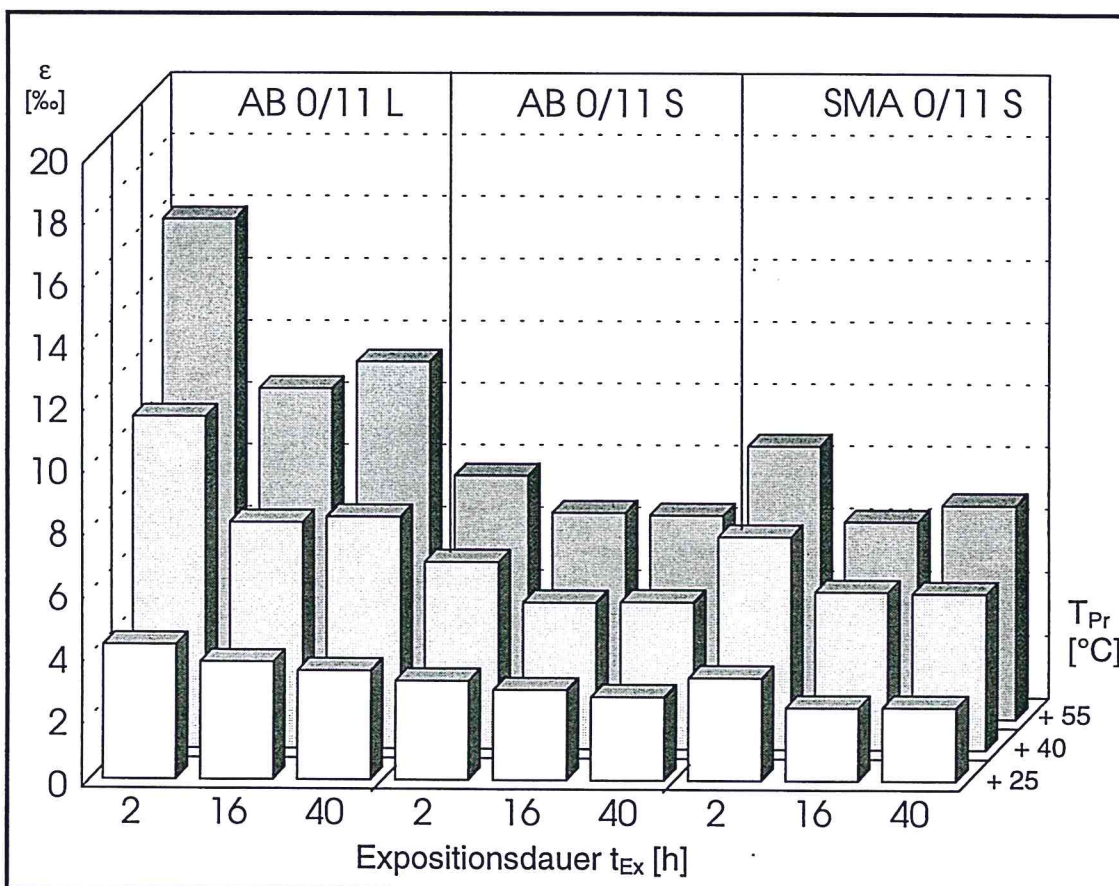


Tabelle 3.39: Relative Eindringtiefen ε als Ergebnis des dynamischen Stempfeleindringversuchs an drei Asphaltarten/-sorten in Abhängigkeit von der Prüftemperatur T_{Pr} sowie der Expositionsdauer t_{Ex}

Anzahl der Stufen für Faktor A	:	3	Asphaltart/-sorte
Anzahl der Stufen für Faktor B	:	3	Prüftemperatur
Anzahl der Stufen für Faktor C	:	3	Expositionsdauer
Anzahl der Einzelwerte je Stufe	:	3	Belegung
Anzahl der Stufen insgesamt	:	27	
Gesamtzahl der Einzelwerte	:	81	

Ursache	SQ	v	MQ	F (Ursache)
A	186.640462	2	93.320231	426.672991
B	450.713262	2	225.356631	1030.361656
C	62.187299	2	31.093649	142.164462
AB	61.410686	4	15.352672	70.194536
AC	13.248360	4	3.312090	15.143334
BC	14.874605	4	3.718651	17.002187
ABC	7.809825	8	0.976228	4.463450
Fehler	11.810667	54	0.218716	
Total	808.695165	80		

Ursache	v1	v2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]
A	2	54	3.170	ja	2.801174	19.95
B	2	54	3.170	ja	7.676353	54.68
C	2	54	3.170	ja	0.927375	6.61
AB	4	54	2.540	ja	1.597383	11.38
AC	4	54	2.540	ja	0.259540	1.85
BC	4	54	2.540	ja	0.304714	2.17
ABC	8	54	2.120	ja	0.252504	1.80
Fehler					0.218716	1.56
Summe					14.037759	100.00

Tabelle 3.40: Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte, der Prüftemperatur und der Expositions-
dauer auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempleindringtiefe

Expositions-
dauer auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempleindringtiefe in
Abhängigkeit von der Prüftemperatur zu rechnen. Deren Ergebnis kann der Ta-
belle 3.41 entnommen werden. Nach Eliminierung der Prüftemperatur als eine der
Ursachen der Variabilität tritt der Einfluß der Expositions-
dauer mit einem durch-
schnittlichen Varianzanteil von rund 23 % (relativ) schon deutlicher hervor. Er wird
aber immer noch von dem Einfluß der Asphaltart/-sorte mit einem Varianzanteil von
zwei Drittel der Gesamtvariabilität deutlich übertroffen.

Um den eindeutig nachgewiesenen Einfluß der Expositions-
dauer auf die relativen
Stempleindringtiefe deutlicher herauszuarbeiten wird eine Reihe einfacher Mit-
telwertvergleiche nach vorausgegangenen Varianzvergleichen durchgeführt, deren
Ergebnisse in den Tabellen 3.42 bis 3.45 dargestellt sind.

T _{Pr} [°C]	Anzahl der Stufen für Faktor A :		3	Asphaltart/-sorte				
	Anzahl der Stufen für Faktor B :		3	Expositionsdauer				
	Anzahl der Einzelwerte je Stufe :		3	Belegung				
	Anzahl der Stufen insgesamt :		9					
	Gesamtzahl der Einzelwerte :		27					
+ 55	Ursache		SQ	v	MQ	F (Ursache)		
	A		184.354689	2	92.177344	209.196370		
	B		47.506867	2	23.753433	53.908388		
	AB		16.077244	4	4.019311	9.121822		
	Fehler		7.931267	18	0.440626			
	Total		255.870067	26				
	Ursache		v1	v2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. komponente	Var. Anteil [%]
	A		2	18	3.550	ja	9.795337	71.91
	B		2	18	3.550	ja	2.192680	16.10
	AB		4	18	2.930	ja	1.192895	8.76
	Fehler						0.440626	3.23
	Summe						13.621538	100.00
+ 40	Ursache		SQ	v	MQ	F (Ursache)		
	A		56.500007	2	28.250004	155.930595		
	B		26.752496	2	13.376248	73.832427		
	AB		4.622281	4	1.155570	6.378363		
	Fehler		3.261067	18	0.181170			
	Total		91.135852	26				
	Ursache		v1	v2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. Komponente	Var. Anteil [%]
	A		2	18	3.550	ja	3.010493	61.76
	B		2	18	3.550	ja	1.357853	27.86
	AB		4	18	2.930	ja	0.324800	6.66
	Fehler						0.181170	3.72
	Summe						4.874316	100.00
+ 25	Ursache		SQ	v	MQ	F (Ursache)		
	A		7.196452	2	3.598226	104.746199		
	B		2.802541	2	1.401270	40.791698		
	AB		0.358659	4	0.089665	2.610189		
	Fehler		0.618333	18	0.034352			
	Total		10.975985	26				
	Ursache		v1	v2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var. komponente	Var. Anteil [%]
	A		2	18	3.550	ja	0.389840	66.26
	B		2	18	3.550	ja	0.145734	24.77
	AB		4	18	2.930	nein	0.018438	3.13
	Fehler						0.034352	5.84
	Summe						0.588364	100.00

Tabelle 3.41: Varianzanalysen der zweifachen Klassifikation zur Feststellung des Einflusses der Asphaltart/-sorte und der Expositionsdauer auf die Gesamtvariabilität der relativen Stempfeleindringtiefe in Abhängigkeit von der Prüftemperatur T_{Pr}

T_{Pr} [°C]	Test- größen		AB 0/11 L		AB 0/11 S		SMA 0/11 S	
			2 h	16 h	2 h	16 h	2 h	16 h
+ 55	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	15,920	10,497	7,703	6,520	8,667	6,253
	s_1	s_2	0,8700	0,7545	0,6253	0,9400	0,3066	0,2581
	$\hat{F}$		1,33		2,26		1,41	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		8,16		1,82		10,43	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		gleich		ungleich	
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	10,590	7,190	5,937	4,667	6,763	5,023
	s_1	s_2	0,4400	0,3504	0,6361	0,4250	0,2098	0,3350
	$\hat{F}$		1,58		2,24		2,55	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		10,47		2,88		7,62	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich		ungleich	
+ 25	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	4,310	3,763	3,170	2,883	3,277	2,340
	s_1	s_2	0,2166	0,2203	0,1609	0,1537	0,1450	0,1400
	$\hat{F}$		1,03		1,10		1,07	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		3,07		2,23		8,05	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		gleich		ungleich	

Tabelle 3.42: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit bzw. Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;

statistische Sicherheit: S = 95 %,

hier: Vergleiche der relativen Stempfeindringtiefen nach **Expositions-dauern** von $t_{Ex} = 2 \text{ h}$ beziehungsweise **16 h** für alle drei Asphalt-arten/-sorten

Tabelle 3.42 zeigt den Vergleich der relativen Stempeleindringtiefen nach Expositionsdauern von $t_{\text{Ex}} = 2$ h beziehungsweise 16 h für alle drei Asphaltarten/-sorten, wobei den Aussagen eine statistische Sicherheit von $S = 95 \%$ zugrundeliegt. Den jeweils zehnten Zeilen eines jeden Temperaturblocks aus oben erwähnter Tabelle kann ohne Mühe entnommen werden, daß die nach sechzehnständiger Expositionsdauer gemessenen relativen Stempeleindringtiefen in sieben von neun Fällen signifikant kleiner sind als die nach zweistündiger Expositionsdauer gemessenen. In den beiden anderen, nur den Asphaltbeton 0/11 S betreffenden Fällen zeigt sich zwar die gleiche Tendenz, jedoch ohne statistische Signifikanz. Bei den bei einer Prüftemperatur $T_{\text{Pr}} = + 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ermittelten relativen Stempeleindringtiefen des Asphaltbetons 0/11 S kann das nicht erwartungskonforme Ergebnis der statistischen Analyse durch die vergleichsweise große Standardabweichung bei den nach sechzehnständiger Expositionsdauer gemessenen Werten erklärt werden; bei den bei einer Prüftemperatur von $T_{\text{Pr}} = + 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessenen Werten zieht dieses Argument nicht. Wenn man trotzdem aus den einfachen Mittelwertvergleichen eine allgemein gültige Feststellung ableiten will, so kann diese nur lauten: Eine Expositionsdauer von $t_{\text{Ex}} = 16$ h ist im Vergleich zu einer Expositionsdauer von $t_{\text{Ex}} = 2$ h vorteilhaft für den Verformungswiderstand von Asphalten für Deckschichten.

Um abzuklären, ob die bei einem Vergleich der relativen Stempeleindringtiefen aller drei Asphaltarten/-sorten nach Expositionsdauern von $t_{\text{Ex}} = 16$ h und 2 h erkennbaren Tendenzen sich auch bei einer weiteren Steigerung der Expositionsdauer auf $t_{\text{Ex}} = 40$ h fortsetzen, wurden weitere einfache Mittelwertvergleiche nach vorausgegangenen Varianzvergleichen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 3.43 aufgelistet sind. Die in dieser Tabelle dokumentierten Ergebnisse der einfachen Mittelwertvergleiche besagen ausnahmslos, daß die relativen Stempeleindringtiefen nach Expositionsdauern von $t_{\text{Ex}} = 40$ h und 16 h im statistischen Sinne nicht signifikant voneinander verschieden sind. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen - nämlich Asphalte für Deckschichten mit definierter Zusammensetzung mit einer stets annähernd gleichen Probekörperdicke von $d = 45$ mm - wirkt sich offenkundig eine Verlängerung der Expositionsdauer über mehr als $t_{\text{Ex}} = 16$ h hinaus nicht mehr positiv auf den Verformungswiderstand aus. Diese Aussage darf aber nicht verallgemeinert werden, da Asphaltdeckschichten anderer Zusammensetzung in anderen

T_{Pr} [°C]	Test- größen		AB 0/11 L		AB 0/11 S		SMA 0/11 S	
			16 h	40 h	16 h	40 h	16 h	40 h
+ 55	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	10,497	11,367	6,520	6,437	6,253	6,777
	s_1	s_2	0,7545	0,6426	0,9400	0,7250	0,2581	0,5154
	$\hat{F}$		1,38		1,68		3,99	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		1,52		0,12		1,57	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		gleich		gleich	
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	7,190	7,367	4,667	4,693	5,023	4,973
	s_1	s_2	0,3504	0,3943	0,4250	0,5029	0,3350	0,4053
	$\hat{F}$		1,27		1,40		1,46	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		0,58		0,07		0,16	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		gleich		gleich	
+ 25	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	3,763	3,490	2,883	2,673	2,340	2,347
	s_1	s_2	0,2203	0,2400	0,1537	0,2150	0,1400	0,1405
	$\hat{F}$		1,19		1,96		1,01	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		1,45		1,38		0,06	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		gleich		gleich	

Tabelle 3.43: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit bzw. Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;
 statistische Sicherheit: $S = 95 \%$,
hier: Vergleiche der relativen Stempfeindringtiefen nach **Expositions-**
dauern von $t_{Ex} = 16 \text{ h}$ beziehungsweise **40 h** für alle drei Asphalt-
 arten/-sorten

T_{Pr} [°C]	Test- größen		$t_{Ex} = 2 \text{ h}$		$t_{Ex} = 16 \text{ h}$		$t_{Ex} = 40 \text{ h}$	
			AB 0/11 L	AB 0/11 S	AB 0/11 L	AB 0/11 S	AB 0/11 L	AB 0/11 S
+ 55	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	15,920	7,703	10,497	6,520	11,367	6,437
	s_1	s_2	0,8700	0,6253	0,7545	0,9400	0,6426	0,7250
	$\hat{F}$		1,94		1,55		1,27	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		13,28		5,71		8,81	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich		ungleich	
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	10,590	5,937	7,190	4,667	7,367	4,693
	s_1	s_2	0,4400	0,6361	0,3504	0,4250	0,3943	0,5029
	$\hat{F}$		2,09		1,47		1,63	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		10,42		7,93		7,25	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich		ungleich	
+ 25	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	4,310	3,170	3,763	2,883	3,490	2,673
	s_1	s_2	0,2166	0,1609	0,2203	0,1537	0,2400	0,2150
	$\hat{F}$		1,81		2,05		1,25	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		7,32		5,67		4,39	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		ungleich		ungleich		ungleich	

Tabelle 3.44: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit bzw. Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;
 statistische Sicherheit: S = 95 %,
hier: Vergleiche der relativen Stempfeindringtiefen der **Asphaltbetone 0/11 L und 0/11 S** bei drei verschiedenen Expositionsdauern t_{Ex}

T_{Pr} [°C]	Test- größen		$t_{Ex} = 2 \text{ h}$		$t_{Ex} = 16 \text{ h}$		$t_{Ex} = 40 \text{ h}$	
			AB 0/11 S	SMA 0/11 S	AB 0/11 S	SMA 0/11 S	AB 0/11 S	SMA 0/11 S
+ 55	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	7,703	8,667	6,520	6,253	6,437	6,777
	s_1	s_2	0,6253	0,3066	0,9400	0,2581	0,7250	0,5154
	$\hat{F}$		4,16		13,26		1,98	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		2,40		0,47		0,66	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		gleich		gleich	
+ 40	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	5,937	6,763	4,667	5,023	4,693	4,973
	s_1	s_2	0,6361	0,2098	0,4250	0,3350	0,5029	0,4053
	$\hat{F}$		9,19		1,61		1,54	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		2,14		1,14		0,75	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		gleich		gleich	
+ 25	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	3,170	3,277	2,883	2,340	2,673	2,347
	s_1	s_2	0,1609	0,1450	0,1537	0,1400	0,2150	0,1405
	$\hat{F}$		1,23		1,21		2,34	
	v_1	v_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	F		19,00		19,00		19,00	
	$s_1^2 = s_2^2 ?$		gleich		gleich		gleich	
	$\hat{t}$		0,85		4,53		2,20	
	v		4,0		4,0		4,0	
	t		2,78		2,78		2,78	
	$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 ?$		gleich		ungleich		gleich	

Tabelle 3.45: Ergebnisse einfacher **Mittelwertvergleiche** nach vorausgegangenen Varianzvergleichen zur Klärung der Frage nach Gleichheit bzw. Ungleichheit bestimmter Merkmalsprägungen;
statistische Sicherheit: S = 95 %,

hier: Vergleiche der relativen Stempfeleindringtiefen von **Asphaltbeton 0/11 S und Splittmastixasphalt 0/11 S** bei drei verschiedenen Expositionsdauern t_{Ex}

Schichtdicken naturgemäß andere Wärmekapazitäten besitzen können, die einen Einfluß auf die zeitliche Entwicklung des Verformungswiderstands nehmen können.

Wie schon bei der Betrachtung des Einflusses der Abkühlgeschwindigkeit und der Expositionstemperatur auf die relativen Stempeleindringtiefen als Merkmalsgrößen zur Beschreibung des Verformungswiderstandes lassen die Zahlenwerte der Tabelle 3.39 auch die Klärung der Frage zu, ob die relativen Stempeleindringtiefen durch die Asphaltart/-sorte bestimmt werden. Der Klärung dieser Frage dienen wiederum einfache Mittelwertvergleiche nach vorausgegangenen Varianzvergleichen, deren Ergebnisse in den Tabellen 3.44 und 3.45 dokumentiert sind. Abermals zeigt sich, daß die relativen Stempeleindringtiefen der Asphaltbetone 0/11 L ausnahmslos statistisch signifikant größer sind als die der Asphaltbetone 0/11 S (siehe Tabelle 3.44). Dagegen besteht zwischen den relativen Stempeleindringtiefen der Asphaltbetone 0/11 S und der Splittmastixasphalte 0/11 S - von einer Ausnahme bei den relativen Stempeleindringtiefen für die Prüftemperatur $T_{Pr} = + 25\text{ °C}$ nach Expositionsdauern von $t_{Ex} = 16\text{ h}$ abgesehen - kein statistisch signifikanter Unterschied (siehe Tabelle 3.45). Auch hier ist eine Verallgemeinerung der Ergebnisse nicht zulässig, da der zum Einsatz gekommene Asphaltbeton 0/11 S und der Splittmastixasphalt 0/11 S zufällig ausgewählte Vertreter ihrer Spezies und damit nicht repräsentativ für die Gesamtkollektive der beiden Asphaltarten sind.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die relative Stempeleindringtiefe nach sechzehnständiger Expositionsdauer im Vergleich zur zweistündigen Expositionsdauer

- beim Asphaltbeton 0/11 S um durchschnittlich 15 % (relativ) und
- beim Splittmastixasphalt 0/11 S um 25 bis 30 % (relativ)

geringer ausfällt, was auf einen nicht zu unterschätzenden Gewinn an Verformungswiderstand beim Splittmastixasphalt 0/11 S mit zunehmender Expositionsdauer bis zu $t_{Ex} = 16\text{ h}$ hinweist.

4. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen

Im folgenden Kapitel werden im Abschnitt 4.1 die Untersuchungsergebnisse zusammenfassend dargestellt und im Abschnitt 4.2 offen gebliebene Probleme behandelt.

4.1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Nach einer Kommentierung der Untersuchungsergebnisse zur Ansprache der Viskosität von Bitumen (siehe Abschnitt 4.1.1) und zur Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten (siehe Abschnitt 4.1.2) werden in diesem Abschnitt die Untersuchungsergebnisse zum Zweck der Umsetzung in die Praxis zusammengeführt (siehe Abschnitt 4.1.3).

4.1.1 Ansprache der Viskosität von Bitumen

Die Viskosität von drei unterschiedlichen Bitumen - nämlich zwei Straßenbaubitumen B 80 und B 65 und einem polymermodifizierten Bitumen PmB 45 - wurde bei vier verschiedenen Prüftemperaturen - $T_{Pr} = +10\text{ °C}$, $+25\text{ °C}$, $+40\text{ °C}$ und $+55\text{ °C}$ - bei Ansteuerung der Prüftemperatur von einem höheren Temperaturniveau aus - Expositionstemperatur $T_{Ex} = (T_{Pr} + 40)\text{ K}$, $(T_{Pr} + 25)\text{ K}$ und $(T_{Pr} + 10)\text{ K}$ - und einem niedrigeren Temperaturniveau aus - nämlich Expositionstemperatur $T_{Ex} = (T_{Pr} - 40)\text{ K}$, $(T_{Pr} - 25)\text{ K}$ und $(T_{Pr} - 10)\text{ K}$ - mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters der Firma HAAKE untersucht. Zum Einsatz gelangte das Rheometer RheoStress RS 100 mit einer Platte-Platte-Meßeinrichtung PP 20, welches im Oszillationsbetrieb eingesetzt wurde, wodurch die Meßsubstanz nicht so stark mechanisch beansprucht wird, daß ihre molekulare Netzstruktur durch den Versuch bleibend zerstört wird. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse erfolgte ausschließlich im für den Gelzustand charakteristischen ersten Newtonschen Bereich, auch wenn im Versuch bei weichen Bitumen und höheren Prüftemperaturen des öfteren der für den Solzustand typische zweite Newtonsche Bereich erreicht wurde.

Als Ergebnis der Untersuchungen ist festzustellen, daß die Viskosität von Bitumen nicht nur durch die Prüftemperatur selbst sondern in nicht unerheblichem Umfang auch durch die Ansteuerrichtung der Prüftemperatur - von einem höheren oder niedrigeren Temperaturniveau aus - beeinflußt wird. Das Maß der Beeinflussung der Viskosität des Bitumens durch die Ansteuerrichtung der Prüftemperatur kann als Durchschnittswert für alle drei untersuchten Bitumenvarietäten auch quantitativ angegeben werden. Beim Ansteuern der Prüftemperatur von einer um 40 K höheren Expositionstemperatur aus werden auf allen Niveaus der Prüftemperatur durchschnittlich um 11 bis 12 % (relativ) niedrigere Viskositäten gemessen, bei Ansteuerung der Prüftemperatur von einer um 40 K niedrigeren Expositionstemperatur um das gleiche Maß von 11 bis 12 % (relativ) höhere Viskositäten, als wenn die Prüftemperatur vor Beginn der eigentlichen Prüfung über längere Zeit konstant gehalten worden wäre.

Der durch die Oszillationsversuche nachgewiesene Einfluß einer von der Prüftemperatur abweichenden Expositionstemperatur auf die Viskosität der Bitumen entspricht nicht nur qualitativ sondern größenordnungsmäßig auch quantitativ den Ergebnissen einer Ringanalyse des Arbeitskreises „Bitumen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen aus dem Jahre 1994, mit der nachgewiesen worden war, daß die Penetration des Bitumens im sogenannten Abkühlungstrend im Vergleich zum sogenannten Erwärmungstrend um 6,5 bis 14,5 % (relativ) größer ist.

Die Tatsache, daß die Viskosität von Bitumen durch die Ansteuerrichtung der Prüftemperatur beeinflußt werden kann, ist dem thixotropen Charakter des Bitumens zuzuschreiben. Im mechanisch nicht beanspruchten Bitumen bilden sich auf Vernetzungsvorgängen beruhende Strukturen aus, die von Viskositätserhöhungen begleitet sind und sich positiv auf den Verformungswiderstand von Asphalten auswirken.

Aus dieser Tatsache ist für den Asphaltstraßenbau die Forderung abzuleiten, eine fertiggestellte Asphaltsschicht zunächst einmal auskühlen zu lassen, ehe sie durch

Verkehrskräfte beansprucht wird, um den positiven Einfluß einer höheren Viskosität in der Wiedererwärmungsphase nach vorausgegangener Abkühlung des Bitumens auf den Verformungswiderstand zu nutzen.

4.1.2 Ansprache des Verformungswiderstandes von Asphalten

Der Verformungswiderstand von drei Asphaltdeckschichtvarianten - nämlich zwei Asphaltbetonen AB 0/11 L und AB 0/11 S sowie einem Splittmastixasphalt SMA 0/11 S - wurde mit Hilfe des dynamischen Stempeleindringversuchs bei drei verschiedenen Prüftemperaturen - nämlich $T_{Pr} = + 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+ 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+ 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ - angesprochen. Dabei wurden diese Prüftemperaturen mit unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten - schnell oder langsam - angesteuert. Darüber hinaus wurden die Asphaltprobekörper nach schneller Abkühlung auf eine Expositionstemperatur von alternativ $T_{Ex} = + 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $+ 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei unterschiedlich langen Expositionsdauern - $t_{Ex} = 2\text{ h}$, 16 h und 40 h - nach Wiedererwärmung auf Prüftemperatur auf ihren Verformungswiderstand hin untersucht. Als Merkmalsgröße zur quantitativen Beschreibung des Verformungswiderstandes gilt die relative Stempeleindringtiefe in ‰, das ist: die tausendfache Eindringtiefe in mm geteilt durch die Probekörperdicke in mm.

Die statistische Auswertung der experimentell ermittelten Daten zur relativen Stempeleindringtiefe mittels multipler Varianzanalysen und einfacher Mittelwertvergleiche nach vorausgegangen Varianzvergleichen führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Die unter systematischer Variation der Versuchsbedingungen ermittelten relativen Stempeleindringtiefen dreier Asphaltdeckschichtvarianten haben die bekannten Zusammenhänge zwischen dem Verformungswiderstand von Asphalten und der Temperatur vollauf bestätigt: Der Verformungswiderstand von Asphalten nimmt mit fallenden Temperaturen zu.

2. Der leicht verdichtbare Asphaltbeton 0/11 L erweist sich als weniger verformungsbeständig als der schwer verdichtbare Asphaltbeton 0/11 S. Zwischen den beiden zufällig aus dem Gesamtkollektiv ausgewählten Vertretern der Spezies "Asphalt mit hohem Verformungswiderstand" - nämlich dem Asphaltbeton 0/11 S und dem Splittmastixasphalt 0/11 S - konnte kein statistisch signifikanter Unterschied bei den relativen Stempeleindringtiefen beobachtet werden.
3. Eine langsamere Abkühlung wirkt sich im Vergleich mit der schnelleren Abkühlung vorteilhaft auf die relativen Stempeleindringtiefen - also auf den Verformungswiderstand - aus. Bei langsamer Abkühlung wurden bei den Asphaltbetonen durchschnittlich um rund 20 % (relativ) und beim Splittmastixasphalt 0/11 S durchschnittlich um etwa 10 % (relativ) geringere relative Stempeleindringtiefen beobachtet. Von dieser Tatsache kann in der Praxis jedoch kaum Gebrauch gemacht werden, da die Geschwindigkeit der Abkühlung der Asphaltsschicht durch das Wetter bestimmt wird und ohne größeren technischen Aufwand praktisch nicht beeinflussbar ist.
4. Überraschenderweise konnte so gut wie kein Einfluß der Expositionstemperatur auf den Verformungswiderstand des untersuchten Asphaltbetons 0/11 L nachgewiesen werden. Eine Übertragung dieser Aussage auf andere Asphaltdeckschichtvarianten ist mangels experimenteller Absicherung nicht zulässig.
5. Eine Veränderung der Expositionsdauer von $t_{\text{Ex}} = 2 \text{ h}$ auf 16 h führt zu einer Verringerung der relativen Stempeleindringtiefen
 - beim Asphaltbeton 0/11 S um durchschnittlich 15 % (relativ) und
 - beim Splittmastixasphalt 0/11 S um durchschnittlich 25 bis 30 % (relativ).
 Eine weitere Verlängerung der Expositionsdauer auf $t_{\text{Ex}} = 40 \text{ h}$ bewirkt praktisch keine weitere Verringerung der relativen Stempeleindringtiefen. Eine Verallgemeinerung dieser Aussage für Asphaltsschichten anderer Dicke ist wegen der Abhängigkeit der Wärmekapazität abkühlender Asphaltsschichten von ihrer Schichtdicke nicht zulässig.

4.1.3 Umsetzung der Ergebnisse für die Praxis

Bei der prüftechnischen Ansprache der Viskosität unterschiedlicher Bitumen in Abhängigkeit von der Ansteuerrichtung der Prüftemperatur ist festgestellt worden, daß sich die Viskosität des Bitumens bei einer Differenz zwischen der Expositionstemperatur und der Prüftemperatur von 40 K um etwa 11 bis 12 % (relativ) ändert. Dabei werden niedrigere Viskositäten gemessen, wenn die Prüftemperatur von einer höheren Expositionstemperatur aus angesteuert wird, und umgekehrt. Werden die beiden 40-K-Intervalle - beispielsweise entsprechend einer Abkühlung von einer Ausgangstemperatur nach dem Verdichten von $T = + 105\text{ °C}$ auf eine Temperatur von $T = + 25\text{ °C}$ - addiert, so ergibt sich eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 80\text{ K}$. Dieser entspricht eine Verringerung der Viskosität des Bitumens um etwa 20 bis 25 % (relativ) im Vergleich zur Viskosität des Bitumens, die sich ergeben würde, wenn vor der eigentlichen Viskositätsmessung die Temperatur von $T = + 25\text{ °C}$ über einen längeren Zeitraum hinweg konstant gehalten worden wäre.

Bei den Untersuchungen zur Feststellung des Verformungswiderstandes dreier Asphaltdeckschichtvarianten in Abhängigkeit von

- der Abkühlgeschwindigkeit (schnell oder langsam) und
- der Expositionsdauer ($t_{\text{Ex}} = 2\text{ h}$, 16 h und 40 h)

ist beobachtet worden, daß die relativen Stempeleindringtiefen als Merkmalsgrößen zur Beschreibung des Verformungswiderstandes

- bei langsamer Abkühlung um 10 bis 20 % (relativ) und
 - nach Expositionsdauern von $t_{\text{Ex}} = 16\text{ h}$ und mehr um 15 bis 30 % (relativ)
- niedriger ausfallen als bei den entsprechenden ungünstigeren Bedingungen.

Der Verformungswiderstand der Asphalte ändert sich also in Abhängigkeit vom Temperaturregime in etwa derselben Größenordnung wie die Viskosität der Bitumen, woraus geschlossen werden kann, daß die Hypothese, die Druckverhältnisse in äußerlich abgeschlossenen Hohlräumen trügen im nennenswerten Umfang zur

Entstehung bleibender Verformungen in der Abkühlphase von Asphalten bei, nicht ungeprüft aufrecht erhalten werden kann.

Betrachtet man - weil dieses die Verhältnisse deutlicher erkennen läßt - einen Asphalt mit einem (absichtlich sehr groß gewählten) Gehalt an äußerlich abgeschlossenen Hohlräumen von **10 V-%**, der von einer Temperatur von $T = + 105\text{ °C}$ auf eine Temperatur von $T = + 25\text{ °C}$ abgekühlt wird, so ändert sich der Anfangsdruck in den unzugänglichen Hohlräumen von rund 98 kPa - dieses ist der Atmosphärendruck - infolge Vergrößerung des Hohlraumgehalts um rund 0,65 V-% und Abkühlung von $T = + 105\text{ °C}$ auf $T = + 25\text{ °C}$ entsprechend dem Boyle-Mariotteschen Gesetz auf rund 73 kPa, also um etwa 25 kPa (relativ). Diese Druckänderung wirkt wegen des besagten Hohlraumgehalts von 10 V-% auf eine Querschnittsfläche von 10 % der Gesamtfläche, was bedeutet, daß durch den infolge Hohlraumvergrößerung und Temperaturverringerung entstehenden Unterdruck eine „Vorspannung“ von $0,1 \times 25\text{ kPa} = 2,5\text{ kPa}$ auf den Asphalt einwirkt. Gemessen an den Flächenpressungen hochbelasteter Lkw-Reifen bis zu etwa 800 kPa erscheint die „Vorspannung“ von 2,5 kPa vernachlässigbar klein und nicht geeignet, das Phänomen vorzeitiger Verformungen frisch verlegter Asphaltdeckschichten zu erklären, zumal in Asphalten mit geringeren Hohlraumgehalten eine noch kleinere "Vorspannung" vorhanden ist.

Es bleibt also festzuhalten, daß für die Entstehung vorzeitiger Verformungen infolge zu früher Verkehrsfreigabe während der Abkühlphase frisch verlegter Asphaltdeckschichten offenkundig die Tatsache verantwortlich ist, daß die Viskosität des thixotropen Bitumens von der Ansteuerrichtung der gerade vorherrschenden Temperatur abhängt. Es ist daher unverzichtbar, frisch verlegte Asphalte erst einmal über Nacht abkühlen zu lassen, ehe sie dem Verkehr übergeben werden, wenn die Entstehung vorzeitiger Verformungen möglichst zuverlässig vermieden werden soll.

In diesem Zusammenhang werden die Festlegungen des Bundesministeriums für Verkehr aus seinem Rundschreiben vom 29. September 1997 begrüßt, in dem ausgeführt wird, daß „zur Sicherstellung einer ausreichenden Abkühlung von Deck-

schichten im Asphaltoberbau ... zwischen Fertigstellung der Deckenbaumaßnahme und der Freigabe der Straße (des Straßenabschnitts) für den Verkehr eine Frist von mindestens 24 Stunden vorzusehen“ ist. Nach den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit kann diese Frist bei Asphaltdeckschichten mit einer Schichtdicke von etwa $d = 4$ cm auch auf mindestens 16 Stunden verkürzt werden, sofern eine Nacht in diesen Zeitraum hineinfällt.

Unter Ziffer 3 des oben erwähnten Rundschreibens des Bundesministeriums für Verkehr heißt es „Bei Kompaktbauweise (gemeinsamer Einbau von Asphaltdeckschicht und Binderschicht) ist eine verlängerte Abkühlungsfrist von ca. 36 Stunden vorzusehen.“ Auch diese Regelung ist wegen der Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit von Asphaltsschichten von ihrer Wärmekapazität und damit von ihrer Dicke zu begrüßen. Diese Regelung sollte allerdings nicht nur bei der Kompaktbauweise sondern generell beim Einbau dickerer Asphaltsschichten angewendet werden. Im übrigen sollte der Zeitraum von 36 Stunden stets zwei Nächte einschließen, so daß sie nicht ungeprüft auf Nachtbaumaßnahmen - beispielsweise bei Asphaltarbeiten auf Flugplätzen - angewendet werden darf.

4.2 Offen gebliebene Probleme

1. Bei der Ermittlung der Viskosität weicherer Bitumen im Oszillationsversuch unter Einsatz des Rheometers RheoStress 100 ist festgestellt worden, daß bei höheren Schubspannungen auch schon der zweite Newtonsche Bereich der Viskosität eines thixotropen Stoffes erreicht werden kann. Da nicht ausgeschlossen werden kann, daß das Bitumen im Asphalt auf Straßen bei höheren Temperaturen durch größere Schubspannungen als bei den Experimenten im Oszillationsversuch - $\tau_{\max} = 10$ kPa - beansprucht wird, sollte der Frage nachgegangen werden, ob und gegebenenfalls wie sich Viskositäten von Bitumen im zweiten Newtonschen Bereich auf den Verformungswiderstand von Asphalten auswirken.

2. Bei den Untersuchungen zur Ansprache des Verformungswiderstandes der drei eingesetzten Asphaltdeckschichtvarianten ist festgestellt worden, daß die relative Stempleindringtiefe durch die Expositionstemperatur - hier $t_{\text{Ex}} = + 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+ 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - scheinbar nicht beeinflußt wird. Dieses Ergebnis ist nicht erwartungskonform, insbesondere deswegen nicht, weil die Untersuchungen zur Viskosität der Bitumen in Abhängigkeit von der Ansteuerrichtung der Prüftemperatur ergeben haben, daß letztere einen signifikanten Einfluß auf die Viskosität selbst besitzt. Da nicht auszuschließen ist, daß das Problem auch durch die spezielle Zusammensetzung der eingesetzten Asphaltarten/-sorten mitbestimmt worden ist, wird angeregt, das hier zur Anwendung gelangte Untersuchungsprogramm zur Ansprache des Verformungswiderstandes der Asphalte auch auf Asphalte mit systematischer Variation der Zusammensetzung anzuwenden.
3. Da im Rahmen der hier referierten Untersuchungen nur Asphaltproben mit praktisch gleicher Dicke eingesetzt worden sind, muß die Frage offen bleiben, wie sich die Wärmekapazität dickerer Asphaltschichten auf deren Abkühlung und damit auf die notwendigen Fristen bis zur Verkehrsfreigabe auswirkt. Hier ist weiterer Forschungsbedarf gegeben, wenn eine zuverlässige Antwort auf diese Frage gegeben werden soll.

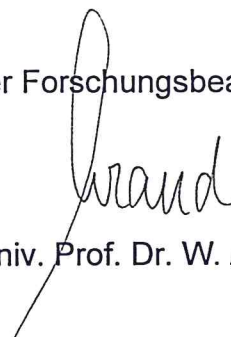
Braunschweig, den 15. April 1998

Der Sachbearbeiter:



(Dipl.-Ing. Ulf Zander)

Der Forschungsbeauftragte:



(Univ. Prof. Dr. W. Arand)

5. Literatur

- [1] Arand W. et al.: Schlußbericht der Kommission 12 "Standfeste bituminöse Beläge" der Association Technique de la Route, der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen und der Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute, Köln 1979
- [2] Arand, W.; Dörschlag, S.; Pohlmann, P.: Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur. Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des Bundesministers für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 558, Bonn-Bad Godesberg 1989
- [3] Arand W.; von der Decken, St.; Hase, M.; Rubach, K.: Ermüdungsverhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen unter Last und Zwang. Schlußbericht zum Forschungsauftrag Nr. Ar 168/2-1 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Braunschweig 1991
- [4] Arand, W.; Lorenzl, H.: Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur; Teil 2. Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des Bundesministeriums für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 696, Bonn-Bad Godesberg 1995
- [5] Arand, W.; von der Decken, S.: Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau - behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes. AiF-Forschungsvorhaben Nr. Q 27, Braunschweig 1996
- [6] Böhm, W.; Gose, G.; Kahmann, J.: Methoden der Numerischen Mathematik. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden 1985
- [7] Bossemeyer, H.R.: Die Temperaturverhältnisse beim Einbau von bituminösem Mischgut. Bitumen 29 (1967) 5, 133 - 138
- [8] Bossemeyer, H.R.: Die praktische Berechnung der Abkühlung bituminöser Schichten. Bitumen 30 (1968) 1, 10 - 18
- [9] Dickinson, E.: A Method for calculating the Temperature Gradients in Asphaltic Concrete Pavement Structures Based on Climatic Data. Australian Road Research 8 (1978) 4, 16 - 34
- [10] Eisenhart, C.: Assumptions underlying the Analyses of Variance. Biometrics 3, 1951

- [11] Eisenmann, J.; Lempe, U.: Ermittlung der Werkstoffkonstanten und der Dauerfestigkeit von bituminös gebundenen Baustoffen. Straße und Autobahn 21 (1970) 3, 89 - 97
- [12] FGSV: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Behandlung von abweichenden Meßwerten (Ausreißern). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1978
- [13] FGSV: Merkblatt über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Asphaltstraßen", Köln 1985
- [14] Halfmann, U.: Vorläufige Auswertung der Ringanalyse "Slow-Setting-Effekt". Vorgelegt zur Sitzung des Arbeitskreises "Bitumen" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 18. April 1994
- [15] Huschek, S.: Möglichkeiten zur Verringerung der Misch- und Einbautemperatur von Asphalt. Asphalt 28 (1994) 6, 46 - 49
- [16] Klein, R.: Wärmeaustausch im Straßenkörper. Straße und Autobahn 11 (1960) 9, 377 - 381
- [17] Krebs, H.G.; Böllinger, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper und Erstellung von Jahreszyklen der Fahrbahntemperaturen. Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des Bundesministers für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 347, Bonn-Bad Godesberg 1981
- [18] Pohlmann, P.: Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphalten. Schriftenreihe "Straßenwesen" des Instituts für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig, Heft 9, Braunschweig 1989
- [19] Potschka, V.; Lehr, R.; Schmidt, H.; Schniering, A.: Ursachen und Auswirkungen unvollständiger Entwässerung von Mineralstoffen bei der Herstellung von bituminösem Mischgut. Schlußbericht zum Forschungsauftrag Nr. 7.091 des Bundesministers für Verkehr, Essen 1990
- [20] Reiner, M.: Rheologie in elementarer Darstellung, 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, München 1969
- [21] Robinson, R.G.: A Model for Calculation Pavement Temperatures from Meteorological Data. Transport and Road Research Laboratory, Research Report 44 (1985)
- [22] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Springer-Verlag Berlin - Heidelberg - New York, 6. Auflage 1984

- [23] Schramm, G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Gebrüder HAAKE GmbH, Karlsruhe 1995
- [24] Weber, E.: Grundriß der biologischen Statistik;. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 9. Auflage 1986
- [26] Zenke, G.: Modellversuche zum Ablauf der thermischen Alterung von Bitumen. Bitumen 37 (1975) 2, 44 - 48