

**Institut für Bauingenieurwesen VI  
Lehrstuhl und Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen  
Technische Universität München**

**Asphaltschichten auf hydraulisch gebundenen Tragschichten -  
Untersuchungen zum Tragverhalten**

**Dipl.-Ing. Univ. Uwe Willberg**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor – Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Kirchhoff

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. G. Leykauf
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Kreuzinger

Die Dissertation wurde am 16. 05. 2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 09. 07. 2001 angenommen.

<b><u>Inhaltsverzeichnis</u></b>	<b><u>Seite</u></b>
<b>1. Einsatz hydraulisch gebundener Tragschichten (HGT) unter Asphalt</b>	1
<b>2. Bemessungsverfahren</b>	4
2.1 Halbtheoretische oder empirische Bemessungsverfahren	4
2.2 Theoretische Bemessungsverfahren	5
2.2.1 Elastisch isotroper Halbraum	6
2.2.2 Mehrschichtentheorie	6
2.2.3 Elastisch gebettete Platte	6
2.2.4 Finite-Elemente-Methode	8
<b>3. Werkstoffkennwerte</b>	9
3.1 Maßgebende Parameter	9
3.2 Asphalt	10
3.3 HGT	11
3.4 Untergrund und Tragschichten ohne Bindemittel	14
<b>4. Generierung eines dreidimensionalen FE-Modells für Asphaltsschichten auf HGT</b>	16
4.1 Rechenmodell nach der Methode der Finiten Elemente (FE)	16
4.2 FE-Programm SOFISTIK	16
4.3 Dreidimensionales FE-Modell	18
<b>5. Plausibilitätskontrollen und Vergleichsrechnungen</b>	27
5.1 Plausibilitätskontrolle	27
5.2 Vergleichsrechnungen	28
5.2.1 Balken - Verfahren nach Zimmermann bzw. Müllersdorf	28
5.2.2 Elastisch gebettete Platte – Mehrschichtentheorie	30
5.2.2.1 Verfahren Westergaard/Eisenmann	31
5.2.2.2 BISAR	32
5.3 Zusammenfassung	33
<b>6. Finite-Elemente-Berechnungen</b>	35
6.1 Grundsystem der FE-Berechnungen	35
6.2 Lastfälle	37
6.2.1 Verkehrsbelastung	37

6.2.2 Temperaturbelastung	40
6.2.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung	42
6.3 Tragverhalten von Fahrbahnsystemen ohne und mit Riss in der HGT	43
6.3.1 Verkehrsbelastung	43
6.3.2 Temperaturbelastung	50
6.3.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung	56
6.3.4 Zusammenfassung	57
6.4 Einfluss des Verbundes zwischen Asphalt und HGT auf das Tragverhalten	59
6.4.1 Verkehrsbelastung	62
6.4.2 Temperaturbelastung	70
6.4.3 Zusammenfassung	76
6.5 Einfluss des Rissabstandes in der HGT auf das Tragverhalten	79
6.5.1 Verkehrsbelastung	79
6.5.2 Temperaturbelastung	83
6.5.3 Zusammenfassung	87
6.6 Einfluss der Elastizitätsmoduln von Asphalt und HGT auf das Tragverhalten	89
6.6.1 Fahrbahndeckensysteme ohne und mit Riss in der HGT	89
6.6.1.1 Verkehrsbelastung	90
6.6.1.2 Temperaturbelastung	94
6.6.1.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung	98
6.6.2 Lösen des Verbundes zwischen Asphalt und HGT	99
6.6.2.1 Verkehrsbelastung	99
6.6.2.2 Temperaturbelastung	104
6.6.3 Rissabstände in der HGT	108
6.6.3.1 Verkehrsbelastung	108
6.6.3.2 Temperaturbelastung	112
6.7 Gegenüberstellung der Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf das Tragverhalten	116
<b>7. Zusammenfassung der theoretischen Untersuchungen und Folgerungen für die Praxis</b>	<b>119</b>
<b>8. Literaturverzeichnis</b>	<b>124</b>
<b>9. Anlagenverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>10. Anlagen</b>	

## 1. Einsatz hydraulisch gebundener Tragschichten unter Asphalt

Fahrbahndeckensysteme für überörtliche Straßen bestehen heute üblicherweise aus Deck- und Tragschichten und werden derzeit zu ca. 72 % in Asphalt hergestellt [1]. Die Aufgabe der Tragschichten besteht dabei im Wesentlichen in der breiten und gleichmäßigen Lastverteilung auf die darunter liegenden Schichten. Hierfür eignen sich aufgrund der Festigkeitseigenschaften und des von der Temperatur unabhängigen Tragverhaltens in idealer Weise Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln. Während Betontragschichten wegen der Fugenproblematik heute kaum mehr ausgeführt werden und Walzbetontragschichten gerade erst das Versuchsstadium verlassen haben bzw. noch weitere praktische Erfahrungen gesammelt werden müssen, stellen vor allem hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) – insbesondere unter Betondecken – eine bewährte Bauweise dar.

Unter Asphaltdecken werden die Vorzüge der HGT derzeit nur relativ selten genutzt, da bei den in dieser Bauweise ausgeführten Straßenbefestigungen – insbesondere bei dünnen Asphaltüberdeckungen der Tragschichten – häufig Schäden in Form von Reflexionsrissen entstanden sind. Diese Risse haben ihre Entstehungsursache in den Rissen der hydraulisch gebundenen Unterlage, die an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss zu einer Überbeanspruchung des Asphaltes und damit zum Anriss führen. Durch die millionenfache Verkehrsbelastung und die jahreszeitlichen Zwängungsbeanspruchungen aus Temperatur in den Wintermonaten kommt es zu einer Ermüdung des Asphaltes über dem Riss und zu einem Anwachsen des Risses. Ab einer gewissen Querschnittsschwächung der Asphaltdecke können die Verkehrslast- und/oder Temperaturspannungen nicht mehr aufgenommen werden und der Riss schlägt bis zur Fahrbahnoberfläche hin durch.

Werden diese Risse nicht vergossen oder instandgesetzt, entstehen durch eindringendes Wasser weitere Schäden infolge von Frostsprengungen und Erosion insbesondere in den Tragschichten.

Risse sind in den nach den derzeit gültigen Vorschriften hergestellten HGT technisch unvermeidlich und entstehen durch Zugspannungen aus Schwinden und Abkühlen. Durch die Anordnung von Kerben bzw. Scheinfugen soll der Abstand dieser Risse verringert und vergleichmäßig und damit die Bewegungen der Rissufer reduziert werden, mit dem Ziel, die Beanspruchung des Asphaltes über dem Riss zu begrenzen [2, 3].

Die Abstände der Fugen in den früher üblichen Betonunterbauten unter Asphaltdecken von bis zu 20 m wurden 1960 auf einen Querfugenabstand von 3 bis 6 m in den Vorschriften re-

duziert [2]. Es zeigte sich aber schnell, dass allein ein geringerer Fugenabstand im Unterbau die Bildung von Reflexionsrissen nicht vollständig verhindern konnte. Auch die Art und die Dicke der Asphaltsschichten über den hydraulisch gebundenen Tragschichten beeinflusst nach den Untersuchungen von [3] die Rissbildung im Asphalt.

Die erforderliche Mindestdicke des Asphaltes auf zementverfestigten Tragschichten wurde z. B. in der Tschechoslowakei durch Auswertung zahlreicher Versuchsabschnitte ermittelt [4]. Nach diesen Untersuchungen ergab sich ein Verhältnis der Asphaltssdicke zur Dicke der Tragschicht von  $h_1/h_2 = 0,7$ , bei dem an keinem der untersuchten Streckenabschnitte mehr ein Durchschlagen der Risse durch den Asphalt festgestellt wurde. Bei einer Tragschichtdicke von z. B. 15 cm führte dies zu einer Mindestdicke des Asphaltes von 11 cm.

In Deutschland führten die mit dieser Bauweise gemachten Erfahrungen zur Festlegung einer Mindestdicke der Asphaltbefestigungen von 14 cm auf 15 cm HGT [5]. Durch eine Vergrößerung der Dicke der Asphaltüberdeckung gelang es, Reflexionsrisse zu vermeiden, was aber die Bauweise im Verhältnis zu den anderen Deckensystemen verteuerte. Eine Reduzierung der Dicke der HGT unter eine Mindestdicke von 15 cm schied aus baubetrieblichen Gründen aus, um eine Schädigung der Tragschicht aus dem Bauablauf zu verhindern; damit wurde die Bauweise nicht nur technisch schwierig, sondern vor allem unwirtschaftlich.

Ausgangspunkt der Schäden im Asphalt sind die Risse in der HGT; dadurch treten im darüber liegenden Asphaltoberbau vier Hauptbeanspruchungen auf, siehe Abb. 1.1:

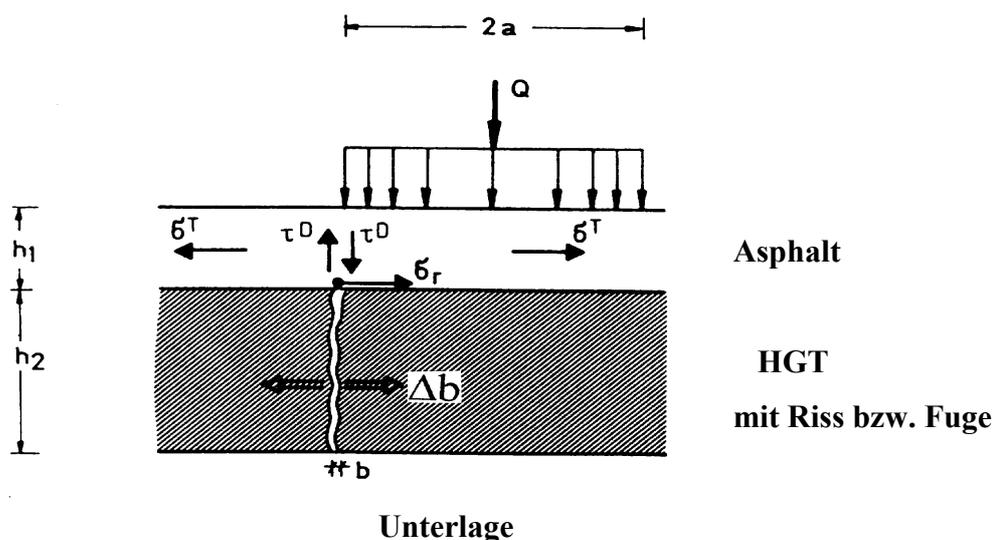


Abb. 1.1: Entstehung von Reflexionsrissen im Asphalt [5]

- Biegebeanspruchung aus Verkehrslast  $\sigma_r$
- Vertikale Schubbeanspruchung aus Verkehrslast  $\tau^D$
- Zugbeanspruchung aus Temperaturänderung  $\sigma^T$
- Asphaltdehnung  $\varepsilon$  infolge Rissatmung  $\Delta b$  in der HGT bei Temperaturänderung

Durch die Risse in der HGT ändert sich das Tragverhalten des Deckensystems grundlegend. Die Lastabtragung der HGT in Längsrichtung wird durch den Riss reduziert, während parallel zum Riss noch die volle Tragwirkung der beiden Schichten vorhanden ist.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, das Tragverhalten von Deckensystemen mit Asphalt-schichten auf ungerissenen Tragschichten mit denen auf gerissenen HGT im oben dargestellten Bereich (siehe Abb. 1.1) zu vergleichen, sowie die Einflüsse des Verbundes zwischen Asphalt und HGT, der Rissabstände und der Materialkennwerte der beiden Schichten auf das Tragverhalten genauer zu untersuchen.

Darüber hinaus werden Empfehlungen für die Praxis gegeben, um künftig den Einsatz dieser Bauweise - insbesondere bei dünnen Asphaltüberdeckungen - wieder zu fördern.

## 2. Bemessungsverfahren

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren, um die erforderliche Dicke von Fahrbahndecken und Tragschichten unter Verkehrslast festzulegen. Sie können in zwei Gruppen eingeteilt werden [6]:

- Halbtheoretische oder empirische Bemessungsverfahren
- Theoretische Bemessungsverfahren

### 2.1 Halbtheoretische oder empirische Bemessungsverfahren

Die halbtheoretischen oder empirischen Bemessungsverfahren waren in den 50er und 60er Jahren die üblicherweise eingesetzten Bemessungsmethoden. In der Bundesrepublik Deutschland setzte sich bereits Anfang der 60er Jahre eine Standardisierung der einzelnen Bauweisen durch, um technisch geeignete Deckensysteme, aber vor allem wirtschaftliche Bauweisen zu erhalten. Die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Praxis wurden laufend in technische Vorschriften, Richtlinien und Merkblätter eingearbeitet, und es entwickelte sich daraus eine Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, kurz die RStO, die heute in der Ausgabe von 1986 (mit Ergänzungen aus dem Jahr 1989) vorliegt. In dieser Richtlinie wird in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung, der Lage der Verkehrsfläche im Gelände, der geographischen Lage und den Bodenverhältnissen sowohl die Dicke der gebundenen als auch der ungebundenen Schichten festgelegt, um eine dauerhafte Straßenkonstruktion zu erhalten.

In Abb. 2.1 sind die Deckensysteme mit Asphalttragschichten (alte Bezeichnung bituminöse Tragschicht) und mit HGT unter Asphalt aus der RStO 86/89 dargestellt.

Bei einem Vergleich dieser Deckensysteme fällt auf, dass die Dicken der gebundenen Schichten in der Zeile 6, in allen Bauklassen deutlich größer sind. Diese Überdimensionierung der Mischbauweise hat 2 Gründe: Für die HGT ist wegen des Baustellenverkehrs eine Mindestdicke von 15 cm erforderlich und für die darüber liegenden Asphalttschichten sind aufgrund der Reflexionsrissproblematik, relativ große Asphaltdicken erforderlich.

Aus der Reflexionsrissproblematik entstanden auch die Festlegungen in den ZTVT-StB [7], die HGT in Querrichtung in Abständen von 2,5 m bis 5 m zu kerben, falls die HGT nicht mit einer Mindestdicke der Asphaltbefestigung größer 14 cm überbaut wird, oder falls die Druckfestigkeit der HGT einen bestimmten Mindestwert ( $9 \text{ N/mm}^2$ ) überschreitet, um durch

Zeile	Bauklasse	SV				I				II				III				IV				V				VI			
	Verkehrsbelastungszahl (VB)	> 3200				1800 - 3200				900 - 1800				300 - 900				60 - 300				10 - 60				< 10			
	Dicke d frostsch Oberbaues	60	70	80	90	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	40	50	60	70	40	50	60	70
1	Bituminöse Tragschicht auf Frostschuttschicht																												
	Deckschicht		4		8		4		8		4		8		4		8		4		8		4		8		10/51		
	Binderschicht bit Tragschicht		22		18		14		14		14		14		14		14		14		14		14		14		10/10		
Frostschuttschicht		34		30		26		22		18		14		10		6		2		2		2		2		2			
Dicke d Frostschuttschicht		26 <sup>21</sup>	36 <sup>11</sup>	46	56	-	30 <sup>11</sup>	40	50	-	34 <sup>11</sup>	44	54	28 <sup>21</sup>	38 <sup>11</sup>	48	58	32 <sup>11</sup>	42	52	62	26 <sup>11</sup>	36	46	56	30	40	50	60
6	Bituminöse Tragschicht und hydraulisch gebundene Tragschicht auf Frostschuttschicht																												
	Deckschicht		4		8		4		8		4		8		4		8		4		8		4		8		81		
	Binderschicht bit Tragschicht		14		10		8		8		8		8		8		8		8		8		8		8		15		
hydraulisch geb Tragschicht		15		15		15		15		15		15		15		15		15		15		15		15		23			
Frostschuttschicht		41		37		35		31		27		23		19		15		11		7		3		3		3			
Dicke d Frostschuttschicht		-	29 <sup>21</sup>	39 <sup>11</sup>	49	-	33 <sup>11</sup>	43	-	25 <sup>21</sup>	35 <sup>11</sup>	45	-	29 <sup>21</sup>	39 <sup>11</sup>	49	-	33 <sup>11</sup>	43	53	-	23 <sup>11</sup>	33	43	-	27 <sup>11</sup>	37	47	

- 1) Mit rundkörnigen Mineralstoffen nur bei örtlicher Bewährung anwendbar
- 2) Nur mit gebrochenen Mineralstoffen und bei örtlicher Bewährung anwendbar
- 4) Mit gezielten Maßnahmen zur gesteuerten Rissbildung (z. B. gemäß ZTVT-StB)
- 5) Tragdeckschicht

Abb. 2.1: Zeile 1 „Bituminöse Tragschicht“ und Zeile 6 „Bituminöse und hydraulisch gebundene Tragschicht“ der Tafel 1 der RStO 86/89 [8]

eine gezielte Rissbildung in kurzen Abständen kleine Öffnungsweiten der HGT-Risse zu gewährleisten. Durch die kleinen Rissweiten in der HGT sollten die Reflexionsrisse im Asphalt verhindert bzw. ihr Auftreten zeitlich möglichst weit nach hinten verlagert werden. Die getroffenen Festlegungen zur Bauweise HGT unter Asphalt beruhen somit im Wesentlichen auf praktischen Erfahrungen.

## 2.2 Theoretische Bemessungsverfahren

Bei den theoretischen Bemessungsverfahren unterschied man bisher drei Modelle [6]:

- Elastisch – isotroper Halbraum
- Mehrschichtensysteme
- Elastisch gebettete Platte

Eine vierte Gruppe kommt heute mit der

- Finite-Elemente-Methode dazu.

### **2.2.1 Elastisch isotroper Halbraum**

Die Theorie des elastisch isotropen Halbraumes eignet sich nur für die Dimensionierung von Erd- oder Schotterwegen, Pflasterdecken oder schwach befestigten Straßen bzw. für die Untersuchung der Vertikalspannungen in Mehrschichtensystemen (nach der Äquivalenztheorie von Odemark) [9].

Erstmals löste Boussinesq 1885 die Differentialgleichungen für die Berechnung der Vertikalspannungen unter der Einwirkung einer lotrechten Einzellast an der Halbraumoberfläche eines elastisch isotropen Halbraums [9].

### **2.2.2 Mehrschichtentheorie**

Die strenge Mehrschichtentheorie beruht auf der Elastizitätstheorie sowie dem Gleichgewicht und der Verträglichkeit der am Element auftretenden Spannungen und Verformungen [9]. Einen Sonderfall der Mehrschichtentheorie stellt der o. g. Halbraum dar, wofür Boussinesq eine Lösung fand.

Für zweischichtige Systeme auf einer elastischen Unterlage konnte Burmister 1943 die Differentialgleichungen für die Biegezug- und die Druckspannungen an der Unterseite der Asphaltbefestigung sowie die Einsenkung für den Lastfall Plattenmitte in der Lastachse (Querdehnzahl  $\mu = 0,5$ ) lösen und die Abhängigkeiten in Diagrammform grafisch darstellen [9].

Zur Berechnung von drei- oder mehrschichtig aufgebauten Deckensystemen - wie sie heute in der Praxis bei Asphaltaufbauten eigentlich immer vorliegen - ist der Einsatz der EDV notwendig. Die Firma Shell entwickelte mit dem Programm BISAR (**Bitumen Structures Analysis in Roads**) ein sehr leistungsfähiges Programm, das insbesondere für die Berechnung von Asphaltbefestigungen geeignet ist.

Eingangsparameter für die Berechnung sind neben dem Schichtenaufbau und der Last die E-Moduln und die Querdehnzahlen der jeweiligen Materialien, einschließlich des Untergrundes.

### **2.2.3 Elastisch gebettete Platte**

Auf der Grundlage von Untersuchungen des Physikers Hertz, der die Kontinuumszustände einer auf einer schweren Flüssigkeit schwimmenden Platte untersuchte, konnte Westergaard

1926 Gleichungen für die Berechnung von Biegezugspannungen und Verformungen einer Platte aus Beton auf elastischer Unterlage ableiten [10].

Diese Berechnungsmethode beruht auf der sogenannten Bettungsmodultheorie, d. h. eine Fahrbahndecke liegt auf einem durch Federn dargestellten Untergrund auf, wobei das Verformungsverhalten der Federn durch den Bettungsmodul beschrieben wird [9].

Die Gleichungen von Westergaard wurden von Eisenmann auf Dreischichtensysteme erweitert, indem er die beiden oberen Schichten aufbauend auf der Äquivalenztheorie von Ode-mark, zu einer gemeinsamen fiktiven Platte zusammenfasste und damit ein vereinfachtes Näherungsverfahren entwickelte, das sich für die im Straßenbau üblichen Bemessungsfälle durch eine gute Übereinstimmung zur strengen Mehrschichtentheorie auszeichnet [9].

Mit dem Verfahren Westergaard kann auch der Einfluss von Nachbarlasten anhand von Einflusslinien berücksichtigt werden [10].

Die o. g. Rechenverfahren haben aber gemeinsam, dass homogene Schichten vorausgesetzt werden und damit der Einfluss von Rissen in der HGT nicht direkt berücksichtigt werden kann.

Einen Lösungsansatz für die Berücksichtigung des Einflusses von Rissen bei der Bemessung entwickelte Eisenmann auf der Grundlage der Zunahme von Einsenkungen an Betondeckenrändern; er definierte einen Reduktionsfaktor  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Querkraftübertragung im Riss, wobei  $W$  der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung im Riss in % ist [10]:

$$\alpha = 0,29 * \frac{100 + W}{100},$$

$y_1$  = Einsenkung des belasteten Fugenrandes

$$W = \frac{2 * y_2}{y_1 + y_2} * 100\%$$

$y_2$  = Einsenkung des unbelasteten Fugenrandes

Für einen klaffenden Riss, der keine Querkraftübertragung mehr zulässt, nimmt die Einsenkung theoretisch auf den 3,46-fachen Wert zu und damit wird für  $W = 0$  % der Reduktionsfaktor  $\alpha = 1/3,46 = 0,29$  [10]. Bei einem Wirksamkeitsindex  $W = 100$  %, d. h. voller Querkraftübertragung, ergibt sich demzufolge ein Reduktionsfaktor  $\alpha = 0,58$ .

Dieser Reduktionsfaktor  $\alpha$  ist auch für hydraulisch gebundene Tragschichten unter Asphalt anwendbar, indem der E-Modul der HGT mit diesem Faktor multipliziert,

$$E_{\text{wirksam}} = \alpha \cdot E_{\text{ungerissen}}$$

und mit dem wirksamen E-Modul die Berechnung entweder mit BISAR oder mit Westergaard/Eisenmann wie bisher durchgeführt wird.

In der Praxis bewegt sich der Reduktionsfaktor  $\alpha$  üblicherweise zwischen 0,3 und 0,5. Messungen bestätigen die Richtigkeit dieser Annahme [10].

Während beim Programm BISAR sämtliche Verbundzustände zwischen den einzelnen Schichten untersucht werden können, lassen sich mit dem Verfahren Westergaard/Eisenmann nur die Zustände „voller Verbund“ oder „kein Verbund“ berechnen.

### **2.2.4 Finite-Elemente-Methode**

In den letzten Jahren setzte sich für die Untersuchung von Detailproblemen in Straßenbefestigungen immer mehr die Finite-Elemente-Methode durch, deren Einsatz erst durch die Entwicklung leistungsfähiger Computer möglich wurde. So können z. B. Fragen der Spurrinnenbildung oder der Rissbildung im Asphalt genauer untersucht werden. Allerdings ist es noch kaum gelungen, das temperatur-, zeitabhängige sowie visko-elastische Materialverhalten von Asphalt mit FE-Programmen realistisch abzubilden.

In dem für die Reflexionsrissbildung interessanten Temperaturbereich  $< -5^{\circ} \text{C}$  weist jedoch der Asphalt ein annähernd elastisches Materialverhalten auf, so dass der Einsatz konventioneller FE-Programme durchaus gerechtfertigt ist.

### 3. Werkstoffkennwerte

#### 3.1 Maßgebende Parameter

Voraussetzung für theoretische Untersuchungen zum Tragverhalten von Fahrbahnkonstruktionen unter Verkehrs- und Temperaturbelastung ist die Kenntnis der wichtigsten physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien, der sog. Werkstoffkennwerte.

Bei einem Fahrbahnaufbau aus Asphalt auf HGT, der sogenannten Mischbauweise, werden zwei physikalisch stark unterschiedliche Baustoffe eingesetzt. Zum einen der Asphalt, dessen mechanisches Verhalten man als visko-elastisch mit plastischen Verformungsanteilen beschreiben kann, und zum anderen eine hydraulisch gebundene Tragschicht, die - ähnlich wie Beton - ein eher elastisches Verhalten aufweist.

Ein weiterer, wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Materialien besteht darin, dass die Materialkennwerte des Asphaltes von der Belastungsgeschwindigkeit und der Temperatur abhängig sind, während dies bei einer HGT nicht der Fall ist.

Für die rechnerische Beurteilung von Fahrbahnkonstruktionen geht man im Allg. von einem Schichtenmodell gem. Abb. 3.1 aus. Dabei werden die einzelnen Schichten als homogen, isotrop und mit elastischen Eigenschaften angenommen und lassen sich somit durch den Elastizitätsmodul  $E$  und die Querdehnzahl  $\mu$  beschreiben.

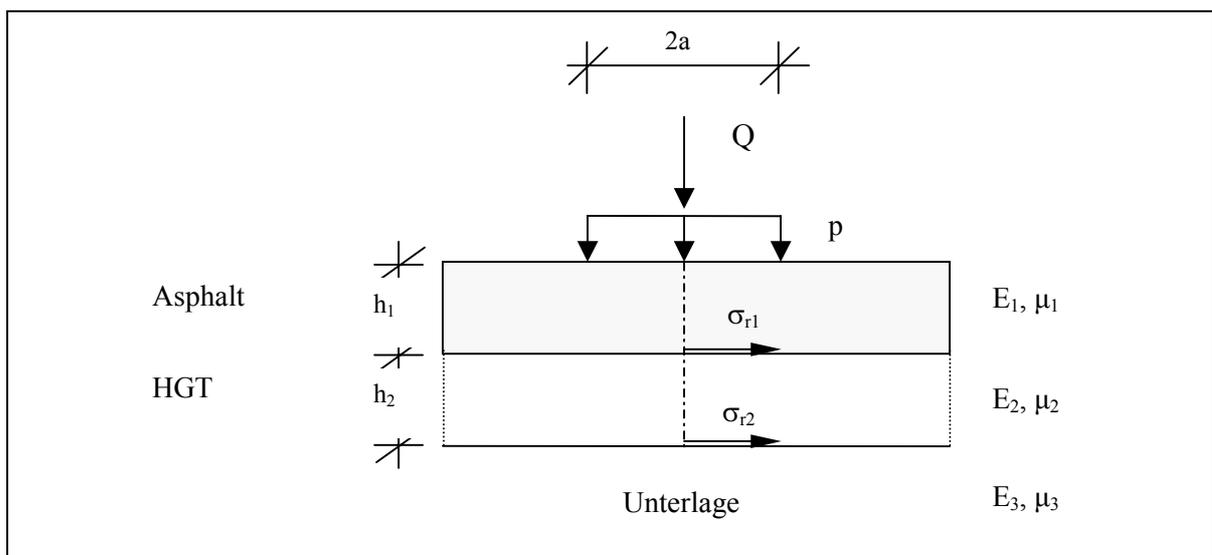


Abb. 3.1: Modell einer Fahrbahnbefestigung zur Berechnung der Beanspruchung aus Verkehr

In horizontaler Richtung werden die Schichten vereinfachend als unendlich ausgedehnt angenommen.

Für Detailuntersuchungen, wie z. B. die Beurteilung von Rissen auf das Tragverhalten von Fahrbahndeckensystemen, werden auch Finite-Elemente-Modelle eingesetzt. Aber auch dort sind i. Allg. als Eingangsparameter der E-Modul, die Querdehnzahl und eine Annahme für die Bettung des Deckensystems nötig.

Zu beachten ist dabei, dass die Belastungen aus Verkehrslast nicht nur einmal, sondern millionenfach auftreten können. Die Materialkennwerte müssen deshalb nicht nur aus statischen Belastungsversuchen, sondern unter oftmals wiederholten, dynamischen Belastungen ermittelt werden. Als zulässige Biegezugfestigkeiten sind die Zeitfestigkeiten des Asphaltes und die Dauerfestigkeiten der HGT anzusetzen. Am Prüfamf für Bau von Landverkehrswegen werden diese Werte für Asphalt in Schubversuchen und für die HGT an Balken, d.h. unter Biegezugbeanspruchung, ermittelt.

Neuerdings gibt es Bestrebungen, die zentrische Zugfestigkeit anhand von Spaltzugversuchen zu bestimmen.

### 3.2 Asphalt

Bituminös gebundene Baustoffe weisen ein von der Temperatur und der Belastungszeit abhängiges Verformungsverhalten auf. Bei tieferen Temperaturen ( $T \leq 5^\circ \text{C}$ ) und kurzen Belastungsdauern ( $\leq 0,1$  Sekunden) besitzt Asphalt ein nahezu elastisches Verhalten [9]. Aus Beobachtungen in der Praxis treten Reflexionsrisse nur bei tiefen Temperaturen auf. In Abb. 3.2 sind Anhaltswerte für die Werkstoffkennwerte aus Forschungsarbeiten zusammengestellt.

Aufgeführt sind der dynamische E-Modul und die zulässige Biegezugspannung an der Unterseite der Asphaltsschichten. Entsprechend der Definition ist die Zeit-Biegezugfestigkeit von der Anzahl der Lastwechsel abhängig; mit zunehmender Lastwechselzahl nimmt die Ermüdung zu. Im Gegensatz zu rein elastischen Werkstoffen gibt es keine Grenzspannung, die theoretisch unendlich oft ertragen werden kann, entsprechend einer Dauerfestigkeit. Aus diesem Grund wurde international eine Vereinbarung getroffen, nach der die zulässige Grenzlastspielzahl erreicht ist, wenn die Anfangssteifigkeit um 50 % abgenommen hat [11].

Temperatur	Dynamischer Elastizitätsmodul*)	Zeit-Biegezugfestigkeit			Schäden bei Überschreiten der zul. Spannungen
		10 <sup>4</sup> LS	10 <sup>5</sup> LS	10 <sup>6</sup> LS	
°C	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>			
- 10	12000 – 16000	4,0	2,3	1,4	Rißbildung
± 0	8000 – 11000	3,0	1,7	1,1	
+ 10	4000 – 6000	2,0	1,2	0,8	
+ 20	2000 – 3500	1,2	0,8	0,5	
+ 30	500 – 1500	–	0,3	0,2	Wellenbildung
+ 40	200 – 500	–	0,2	0,1	

LS – Lastspiele

\*) Bei einem weichen Bitumen 160/220 ist der untere Grenzwert und bei einem harten Bitumen 30/45 der obere Grenzwert in Ansatz zu bringen.

Abb. 3.2: Werkstoffkennwerte von Asphalttragschichten bei einer Lasteinwirkungsdauer (Sinusbelastung) von 0,1 sec [9]

Durch die in der Praxis vorhandenen Ruhepausen zwischen den einzelnen Belastungen vergrößern sich die in der o. g. Abb. enthaltenen zulässigen Lastspielzahlen in dem für die Dickenbemessung ausschlaggebenden Temperaturbereich von 18° bis 22° C um den Faktor 10 bis 15 [9].

Die zu den dyn. E-Moduln gehörigen Querdehnzahlen  $\mu$  liegen je nach Temperatur zwischen 0,2 und 0,4 [9].

### 3.3 Hydraulisch gebundene Tragschichten

Gemäß den ZTVT-StB [7] sind im Rahmen der Eignungsprüfung für HGT folgende Werkstoffkennwerte bzw. Kenngrößen zu bestimmen:

- Korngrößenverteilung
- Bindemittelgehalt
- Proctordichte
- Druckfestigkeit am Zylinder (D = 150 mm und Höhe = 125 mm)
- und ggf. der Frostwiderstand (bei Anteilen unter 0,063 mm zwischen 5 und 15 Gew.-%)

Von der bei der Eignungsprüfung ermittelten Druckfestigkeit hängt auch ab, ob die HGT unter Asphalttschichten während der Bauausführung gekerbt werden muss [7]. Andere alternative Maßnahmen zur gezielten Rissbildung sind ebenfalls in den ZTVT genannt.

Die für die Dimensionierung von Fahrbahnaufbauten mit HGT maßgebenden Werkstoffkennwerte, wie z. B. E-Modul und Biegezugfestigkeit, werden normalerweise weder im Rahmen der Eignungsprüfung noch im Zuge der Eigenüberwachungs- oder der Kontrollprüfung ermittelt.

Allerdings besteht die Möglichkeit, über die Druckfestigkeit und aus der Literatur bekannte Abhängigkeiten, z. B. zwischen Druckfestigkeit und E-Modul, die für die Dimensionierung maßgebenden Parameter zu bestimmen, siehe Abb. 3.3.

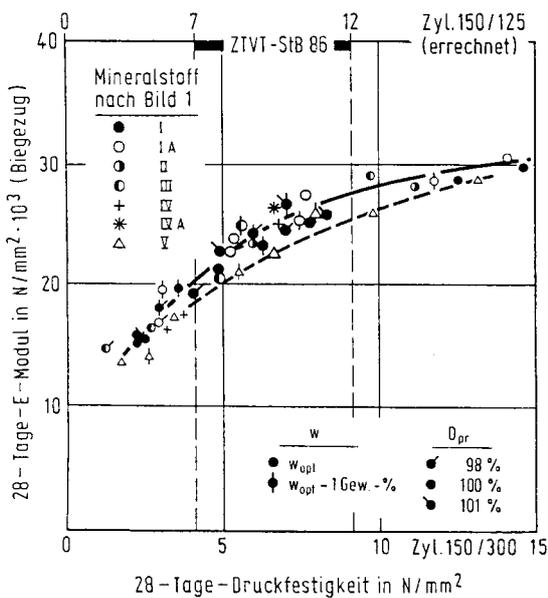


Abb. 3.3: Biegezug-Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit [12]

Die versuchstechnisch relativ leicht zu bestimmende Druckfestigkeit stellt somit als Hilfsp Parameter die Verbindung zu anderen Werkstoffkennwerten der HGT mit ausreichender Genauigkeit her. Im zulässigen Festigkeitsbereich der HGT kann von einem weitgehend konstanten Verhältniswert Druckfestigkeit/Biegezugfestigkeit ausgegangen werden.

In Abb. 3.4 sind für HGT unter Asphaltdecken die wesentlichen Werkstoffkennwerte und Verhältniswerte für HGT - Gemische nach ZTVT zusammengestellt. Bei der Überarbeitung der ZTVT im Jahr 1995 blieben diese Festigkeitsanforderungen - im Gegensatz zu denen für HGT unter Betondecken - unverändert.

Kennwerte für HGT mit 28-Tage-Druckfestigkeit 7-12 N/mm <sup>2</sup> und $\epsilon_{el} / \epsilon_{ges} \geq 0.93$						
1	2	3	4	5	6	7
	Prüfkörper mm	Meßwerte (Einzelwerte) N/mm <sup>2</sup>	Größen	Verhältnisswerte Gesamt- <sup>1)</sup> mittel	Größen	Gesamt- <sup>1)</sup> mittel
Druckfestigkeit $\beta_D$	150/125	7.3-12.1				
Druckfestigkeit $\beta_{D'}$	150/300	4.0- 9.4	$\beta_D / \beta_{D'}$	1.5 : 1	$\beta_{D'} / \beta_D$	0.67 : 1
Spaltzugfestigkeit $\beta_{SZ}$	150/125	0.5- 1.1	$\beta_D / \beta_{SZ}$	11.5 : 1	$\beta_{D'} / \beta_{SZ}$	7.7 : 1
Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ}$	150/150/700	1.0- 2.1	$\beta_D / \beta_{BZ}$	6.8 : 1	$\beta_{D'} / \beta_{BZ}$	4.6 : 1
E-Modul Druck $E_D$	150/300	12.4-21.5 · 10 <sup>3</sup>	$\beta_{BZ} / \beta_{SZ}$	1.8 : 1		
E-Modul Biegezug $E_{BZ}$	150/150/700	18.5-28.9 · 10 <sup>3</sup>	$E_{BZ} / E_D$	1.3 : 1		

1) Gesamtmittel aller Versuchsmischungen

Abb. 3.4: Kennwerte für HGT unter Asphaltdecken mit Druckfestigkeiten nach ZTVT [12]

Die Wiederverwendung von Ausbaumaterialien gewann im Straßenbau in den letzten Jahren ganz massiv an Bedeutung. Diese Tatsache fand im technischen Regelwerk des Straßenbaues, aufbauend auf zahlreichen Untersuchungen über die Verwendung von Recycling- oder Alternativmaterialien für HGT, ihren Niederschlag [13, 14].

Für diese alternativen Baustoffe bzw. Baustoffgemische gelten die o. g. Abhängigkeiten nicht ohne weiteres, vielmehr sind anhand von Versuchen die maßgebenden Werkstoffkennwerte zu überprüfen bzw. neu zu ermitteln [13].

Eine HGT wird aufgrund ihres relativ hohen Elastizitätsmoduls (auch im gerissenen Zustand) in einer Fahrbahnkonstruktion unter Verkehrslast auf Biegung beansprucht. Die zur Beurteilung der Tragfähigkeit maßgebende Spannung der HGT ist – wie bei allen gebundenen Trag-schichten - die Biegezugspannung  $\sigma_r$  an der Unterseite dieser Schicht.

Diese Biegezugspannung  $\sigma_r$  aus Verkehr muß kleiner als die Biegezugfestigkeit der HGT sein, wobei es nicht auf die statische Biegezugfestigkeit ankommt, sondern auf die Dauer-Biegezugfestigkeit  $\sigma_D$  (Biegezugfestigkeit, die mehr als 2 Mio. Lastwechsel ohne Bruch ertragen wird) oder die Zeit-Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit von den erreichten Lastwechseln.

Die in Abb. 3.4 angegebenen Werte für die Biegezugfestigkeiten  $\beta_{BZ}$  stellen allerdings statische Biegezugfestigkeiten und keine Dauerfestigkeiten dar.

Die Dauerfestigkeit bei HGT lässt sich durch Dauerschwingversuche an Biegebalken in Anlehnung an DIN 1048 ermitteln. Im Rahmen dieser Versuche wird auch der E-Modul (Biegezug)  $E_B$  aus den Verformungen errechnet, wobei dieser Wert den Elastizitätsmodul der ungerissenen Tragschicht darstellt.

Für HGT nach ZTVT-StB 86, für hydraulisch gebundene Sand-Tragschichten mit Sieblinien außerhalb der ZTVT-Bereiche und für hydraulisch gebundene Tragschichten mit Asphaltgranulat enthält [13] die für Tragfähigkeitsuntersuchungen maßgebenden Werkstoffkennwerte, die in Abb. 3.5 zusammengefasst sind.

	Hydr. geb. Kiestragschichten 0/32	Hydr. geb. Schottertragschichten 0/32 sowie 0/45	Hydr. geb. Sandtragschicht 0/2 sowie 0/16	HGT mit Asphaltgranulat		Normalbeton B 10
				Mischung „A“ (100% A.G.)	Mischung „B“ (82,5% A.G.) 17,5% N.S. 0/2	
Bindemittelgehalt [Gew.-%]	2,7–3,0	2,3–3,0	11,6 bzw. 6,0	9,0 Gew.-%	9,0 Gew.-%	
Würfelfestigkeit $\beta_{w28}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,7–5,4	5,3–6,2	8,6 bzw. 7,9	$\beta_c = 15,4$	$\beta_c = 16,8$	
Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,9–1,2	0,6–0,9	2,3 bzw. 1,9	$\beta_{BZ} = 2,9$	$\beta_{BZ} = 3,3$	
Biegemodul $E_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10000–16000	7500–12000	16000 bzw. 18600	$E_B = 10000$	$E_B = 12000$	
Dauerschwellfestigkeit $\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ] (extrapol. für $\sigma_u = 0$ N/mm <sup>2</sup> )	0,5–0,7	0,4–0,6	1,4 bzw. 1,1	1,2	1,2	
$\beta_w/\beta_{BZ}$	4,3–4,6	5,7–10	3,7–4,2	$\beta_c/\beta_{BZ} = 5,3$	$\beta_c/\beta_{BZ} = 5,0$	4,0– 5,0
$\beta_w/\beta_{SZ}$	8,7–9,4	13,0–20,0	6,3–7,0	$\beta_c/\beta_{SZ} = 8,0$	$\beta_c/\beta_{SZ} = 8,5$	6,7–10,0
$\beta_{BZ}/\beta_{SZ}$	1,9–2,2	1,8– 2,0	1,6–1,7	$\beta_{BZ}/\beta_{SZ} = 1,7$	$\beta_{BZ}/\beta_{SZ} = 1,7$	1,4– 2,5
Dauerfestigkeit $\sigma_D$	$0,50-0,57 \cdot \beta_{BZ}$	$0,56-0,63 \cdot \beta_{BZ}$	$0,59-0,60 \cdot \beta_{BZ}$	$\sigma_D = 0,41 \cdot \beta_{BZ}$	$\sigma_D = 0,35 \cdot \beta_{BZ}$	$0,5-0,6 \cdot \beta_{BZ}$

Abb. 3.5: Werkstoffkennwerte hydraulisch gebundener Tragschichten mit unterschiedlichen Zuschlagsstoffen und Sieblinien [15]

### 3.4 Untergrund und Tragschichten ohne Bindemittel

Für den Elastizitätsmodul des Untergrundes und der Frostschutzschicht kann der Verformungsmodul  $E_{v2}$  an der Oberseite der Frostschutzschicht eingesetzt werden. Dieser Wert ergibt sich aus dem Lastplattenversuch und ist eigentlich ein statischer Wert [9].

Unter den kurzzeitigen Verkehrsbelastungen stellt sich in Abhängigkeit von der anstehenden Unterlage ein um den Faktor 1,2 bis 2,5 höherer dynamischer E-Modul ein, der aber bei der Bemessung von Verkehrsflächen in der Regel nicht angesetzt wird. Im Allg. wird - auf der sicheren Seite liegend - der statische E-Modul verwendet.

Für Berechnungsverfahren, die auf der Bettungsmodultheorie beruhen, kann in Abhängigkeit vom jeweiligen Deckensystem der Bettungsmodul  $k$  der Fahrbahnkonstruktion mit der Äquivalenztheorie von Odemark ermittelt werden [9]. Dabei ergeben sich für verschiedene Asphaltstärken auf HGT jeweils unterschiedliche Bettungsmoduln, d. h. streng genommen ist der Bettungsmodul keine Konstante, sondern abhängig von der Dicke des gebundenen Oberbaues.

Um den Einfluss der übrigen Werkstoffkennwerte zu verdeutlichen, wird bei den nachfolgenden Untersuchungen, falls sie auf der Bettungsmodultheorie beruhen, von einem konstanten Bettungsmodul  $k = 0,08 \text{ N/mm}^3$  ausgegangen.

Ungebundene Schichten nehmen Biegezugspannungen nicht bzw. nur in sehr geringem Maße entsprechend dem aktivierten Reibkontakt zwischen den Mineralstoffen auf.

## **4. Generierung eines dreidimensionalen FE-Modells für Asphaltschichten auf HGT**

### **4.1. Rechenmodell nach der Methode der Finiten Elemente**

Die Finite-Elemente-Methode dient zur Berechnung von komplexen, vielfach statisch unbestimmten Tragwerken oder Strukturen. Hierzu wird das zu berechnende System in einzelne Elemente mit überschaubaren statischen Eigenschaften zerlegt, und die einzelnen Bausteine werden unter Wahrung der kinematischen Verträglichkeitsbedingungen und der statischen Gleichgewichtsbedingungen zum Gesamtsystem zusammengefügt. Das zu berechnende System lässt sich um so genauer wiedergeben, je feiner im Rahmen der numerischen Genauigkeiten die Elemententeilung vorgenommen wird [16]. Allerdings steigt die Rechenzeit mit zunehmender Zahl der Elemente quadratisch an, was der Feinheit des Modells „natürliche“ Grenzen setzt.

Unter Vorgabe entsprechender Rand- und Auflagerbedingungen können mit Hilfe numerischer Rechenverfahren aus dem Gleichungssystem die gesuchten Knotenverformungen und daraus über die Steifigkeitsbeziehungen die entsprechenden Knotenkräfte berechnet werden. Bei nichtlinearer Berechnung der Systeme ist eine iterative Lösung der Gleichungssysteme erforderlich, was zu einer entsprechenden Vergrößerung der Rechenzeit führt.

### **4.2. FE-Programm SOFISTIK**

Die im Folgenden beschriebenen Fahrbahndeckensysteme werden mit dem FE-Programm SOFISTIK untersucht. Dieses Programmpaket besteht aus einer Vielzahl von Programmteilen, von denen in dieser Arbeit folgende Teile Verwendung fanden [17]:

- MONET - zur grafisch interaktiven Konstruktion der Deckensysteme
- GENF - zur Generierung des FE-Modells
- ASE - zur Durchführung der Berechnungen
- ANIMATOR, GRAF, DBVIEW und WINGKX - zur Auswertung und grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse [17].

MONET ist ein CAD- (Computer Aided Design) ähnliches Programm, mit dem sich zwei- oder dreidimensionale Systeme verhältnismäßig einfach zeichnen lassen. Als interaktiver Modell- und Netzgenerator dient MONET hauptsächlich zur grafischen Erzeugung der gewünschten geometrischen FE-Strukturen, der Randbedingungen sowie der verschiedenen Lastfälle. Die Erzeugung der Systeme wird im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben. Entscheidender Vorteil von MONET liegt darin, dass die Systeme und die Lasten grafisch erzeugt werden und nicht - wie früher - in einem sogenannten Texteditor mit einer sehr aufwendigen Wertzuweisung für die einzelnen Knoten. Eine optische Kontrolle war damals während der Eingabe nicht möglich und eine Fehlersuche entsprechend aufwendig.

Nach der Erstellung des Systems muss die grafische Information für den Computer generiert werden, dies geschieht durch den Menü-Befehl „Datensätze erzeugen“, dabei werden die erzeugten binären Datensätze in unterschiedlichen Eingabedateien in einem Textformat, dem sogenannten ASCII-Format (American Standard Code of Information Interchange), abgespeichert, können dort eingesehen und ggf. mit einem Texteditor, dem TEDdy, bearbeitet und modifiziert werden [17].

Die Eingabemöglichkeiten MONET und TEDdy stehen sich dabei nicht als konkurrierende Systeme gegenüber, sondern sie ergänzen sich, und je nach Erfordernis kann der geeignetste Eingabemodus gewählt werden.

Die Berechnung des Systems wird vom TEDdy aus gestartet, dabei werden folgende Programmmodule durchlaufen:

- GENF: Generierung Finiter Elemente
- GRAF: Grafische Darstellung Finiter Elemente
- ASE: Allgemeine Statik Finiter Elemente
- GRAF: Grafische Darstellung Finiter Elemente

GENF greift auf die erzeugte Datenbank zurück und erstellt das Elementnetz der FE-Berechnung. GRAF setzt das Netz grafisch um [17]. Diese beiden Programmmodule benötigen nur relativ wenig Zeit.

Wesentlich länger dauert dagegen der nach dem Weggrößenverfahren arbeitende Programmteil ASE, da hier die Steifigkeitsmatrizen und die Lastvektoren aufgestellt, das Gleichungssystem gelöst und daraus die Schnittgrößen errechnet und in Ergebnisdateien gespeichert werden.

Im anschließenden Programmteil GRAF werden die gewonnenen Berechnungsergebnisse grafisch aufbereitet. ANIMATOR und WinGKX sind zwei mögliche Programme, mit denen sich nach einer vollständigen Berechnung eines Systems, die Resultate in verschiedenen Formen darstellen lassen.

Mit ANIMATOR besteht zunächst die Möglichkeit, das Verformungsverhalten des berechneten Systems unter den vorher definierten Lastfällen zu betrachten. Dazu werden die Verschiebungen eines jeden Lastfalles in einer frei wählbaren Überhöhung in einem bewegten Bild dargestellt. Mit dieser Animation wird zunächst kontrolliert, ob sich das Tragwerk den physikalischen Gesetzmäßigkeiten entsprechend verformt. Diese optische Kontrolle der Verformungsfigur, die sich aus allen beliebigen Blickrichtungen betrachtet lässt, ist ein hervorragendes Hilfsmittel, um Definitionsfehler oder Modellfehler im System zu entdecken, die sonst erst bei einer Vergleichsrechnung zu Tage treten würden.

Scheint das Modellverhalten plausibel zu sein, können anschließend die Spannungen und Verformungen in WinGKX ausgegeben werden. Da man diese Werte nicht an allen Punkten des Systems benötigt, ist es möglich, durch einen räumlich definierten Ausschnitt einen Teilbereich mit beliebiger optischer Vergrößerung auszuwählen. An den heraus gezoomten Elementknoten lassen sich die für den jeweiligen Lastfall interessanten Spannungs- oder Verformungswerte anzeigen. Ein Nachteil von WinGKX besteht allerdings darin, dass man diesen Ausschnitt, die sogenannte „box“, bei dreidimensionalen FE-Modellen nicht interaktiv festlegen kann, sondern sie in der Eingabedatei definieren und das zweite GRAF-Modul erneut berechnen muss.

### **4.3 Dreidimensionales FE – Modell**

Die Fahrbahnaufbauten aus Asphalt auf HGT gemäß RStO (siehe Abb. 2.1) sollen durch ein dreidimensionales FE-Modell möglichst realitätsnah dargestellt werden. Dazu ist es erforderlich, die in der Praxis in HGT unvermeidlichen Risse so darzustellen, dass Druckkräfte übertragen, Zugkräfte jedoch nicht aufgenommen werden können. Dies ist durch die Eingabe von Federn mit einer definierten Risslast möglich, führt aber zwangsläufig dazu, dass die Berechnung nicht-linear und somit iterativ durchgeführt werden muss, mit einer entsprechenden Verlängerung der Rechenzeit.

Das FE-Modell sieht die Möglichkeit vor, Risse im Abstand von 5,0 m bis 0,5 m in Abstufungen (1,67 m, 1,0 m und 0,5 m) zu modellieren. Um den Einfluss der Risse auf das Tragverhalten des Gesamtsystems besser erfassen zu können, soll der Rissbereich möglichst fein modelliert werden. Für ein dreidimensionales FE-Modell ist die optimale Elementform ein kubisches Würfelement, das allseits gleiche Kantenlängen aufweist. Je kleiner diese Würfelemente werden, desto genauer wird das System wiedergegeben. Bei der Untersuchung eines Straßenstücks von ca. 5 m x 5 m ergeben sich, bei einer Kantenlänge der Würfel von z. B. 1 cm und ca. 40 cm Gesamtdicke des Fahrbahnsystems, Elementzahlen in der Größenordnung von ca. 10 Mio. Elementen, die eine Berechnung unmöglich werden lassen.

Das Programm SOFISTIK gibt vor, dass plattige oder langgestreckte Quader mit einem Kantenverhältnis größer 5:1 zu vermeiden sind, ab einem Verhältnis eines Quaders größer 10 : 1 wird die Berechnung sogar automatisch abgebrochen [17]. Selbst unter Verwendung dieser langgestreckten Quader lässt sich bei einer gleichmäßigen Elementeinteilung ein System mit mehreren Rissen mit einem modernen PC nicht mehr berechnen.

Um den Einfluss der Risse auf das Tragverhalten des Gesamtsystems noch möglichst genau erfassen zu können, wird ein Bereich von jeweils 25 cm links und rechts vom Riss - als sogenannter Innenbereich - feiner dargestellt, während der Bereich zwischen den Rissen - als Außenbereich bezeichnet - gröber unterteilt und damit die Anzahl der Elemente begrenzt wird. Trotz dieser Reduzierung der Elementzahl und trotz der Ausnutzung der - später noch erläuterten - Symmetriebedingung ergeben sich je nach Rissabstand mit einem PC Rechenzeiten von bis zu 40 000 Sekunden.

Bei der Lage der Risse in Längsrichtung wird darauf geachtet, dass bei einer ungeraden Anzahl der Risse ein Riss in der Mitte liegt, und bei einer geraden Anzahl die Risse symmetrisch zur Balken- bzw. Plattenmitte liegen.

In Abb. 4.1 sind für eine 5 m x 5 m große Platte die Innen- und Außenbereiche für einen Rissabstand von 1,67 m dargestellt.

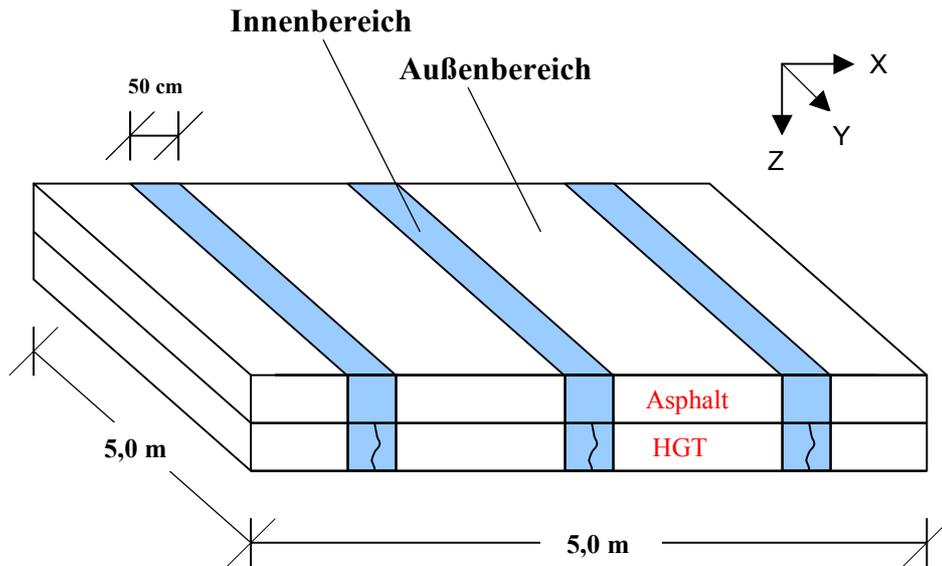


Abb. 4.1: Lage der Innen- und Außenbereiche bei einem Rissabstand R von 1,67 m

Die Fahrbahnaufbauten lassen sich in einfachster Weise als 5,0 m lange und 50 cm breite Balken darstellen. Eine im MONET vorhandene Kopierfunktion ermöglicht es, einen Balken sehr schnell zur Platte zu erweitern. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass die Rechenzeiten am Balken wesentlich kürzer sind als an einer Platte und eventuelle Systemfehler durch eine Kontrollrechnung am Balken früher erkannt werden können.

Durch die Kopierfunktion ändert sich der Ausgangsbalken nicht mehr, d. h. evtl. später auftretende Fehler sind auf ein fehlerhaftes Zusammenfügen der einzelnen Balken zurückzuführen.

Im ersten Schritt wird ein Baukastensystem entwickelt, mit dem beliebige Schichtaufbauten der RStO dargestellt werden können.

Bei der Festlegung der Größe der einzelnen Grundbausteine ist – wie bereits erwähnt - zu berücksichtigen, dass das Seitenverhältnis der einzelnen und benachbarten Volumenelemente maximal 1 : 5 sein sollte, aber in keinem Fall größer als 1:10 sein darf.

Die Abmessungen der Volumenelemente, die entsprechend ihrer Nähe zum Riss einer Staffelung unterliegen, betragen für den

- Innenbereich: Länge / Breite / Höhe - 2 / 10 / 2 cm bis 10 / 10 / 5,5 cm
- Außenbereich: Länge / Breite / Höhe - 25 / 10 / 4 cm bis 50 / 10 / 10 cm

Die dreidimensionalen schichtenförmigen Bausteine werden in Abhängigkeit vom gewünschten Rissabstand gezeichnet und in einer „Bibliothek“ abgelegt. Durch schichtweises Zusammenfügen dieser einzelnen 50 cm breiten Bausteine entsteht eine Schicht mit der gewünschten Dicke, bzw. durch Aufeinanderfügen der einzelnen Schichten das gewünschte Deckensystem mit den entsprechenden Dicken für Asphalt und HGT.

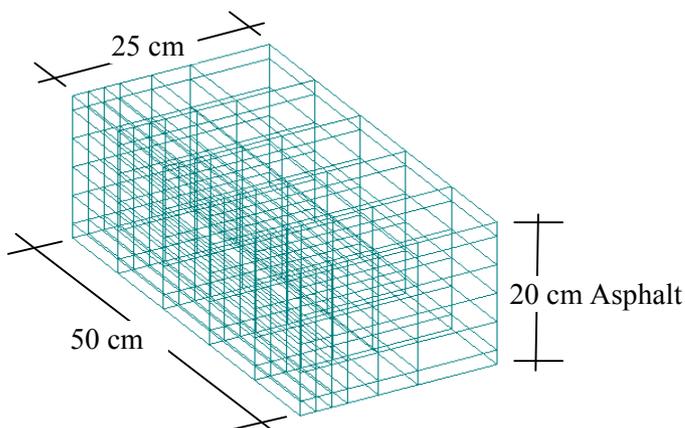


Abb. 4.2: Asphaltbaustein im Innenbereich

In Abb. 4.2 ist ein Asphaltbaustein für einen Innenbereich mit einer Länge von 25 cm, einer Tiefe von 50 cm und einer Dicke von 20 cm zu sehen. Es besteht aus insgesamt 180 Volumenelementen, sogenannten Bric-Elementen, deren Größe

	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
von	2 cm	10 cm	2 cm
	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
bis	10 cm	10 cm	4 cm

reicht.

Mit MONET ist es nicht möglich, auf ein System, das ausschließlich aus Volumenelementen besteht, eine Flächenlast an beliebiger Stelle aufzubringen. Deshalb sind auf allen Außenflächen des Bausteines 5 mm dünne Flächenelemente erforderlich, die in SOFISTIK die Bezeichnung QUAD-Elemente haben.

Die Abb. 4.3 stellt links und rechts den Asphaltbaustein der Abb. 4.2 dar, jedoch links mit den eingblendeten Volumenelementen (BRICs) und rechts mit den eingblendeten Flächenelementen, den QUADs.

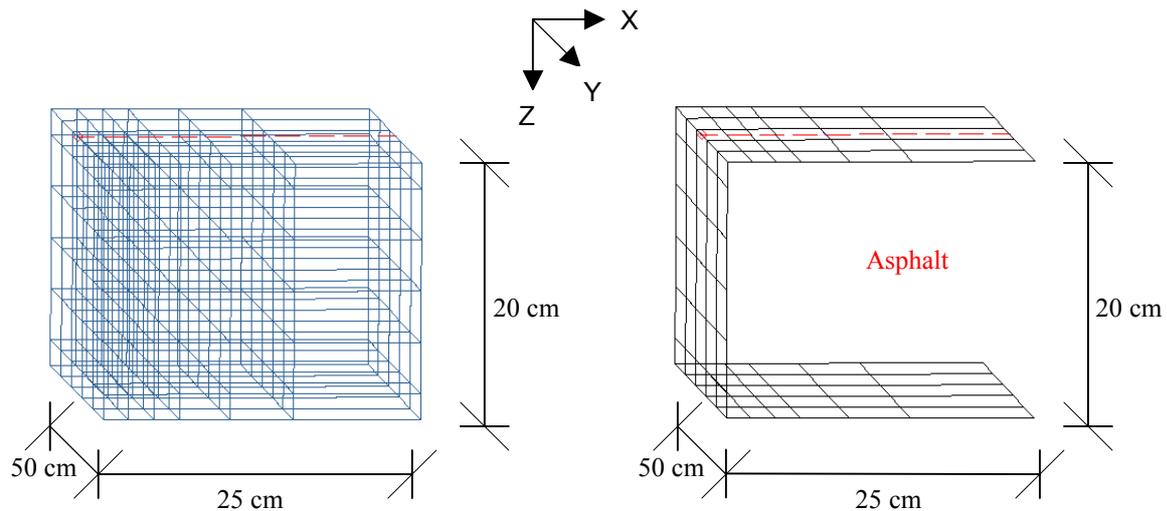


Abb. 4.3: Grundelement für 20 cm Asphalt im Innenbereich

links Darstellung mit BRIC-Elementen,

rechts mit QUAD-Elementen

Zur besseren Übersichtlichkeit werden in den folgenden Bildern die Volumenelemente ausgeblendet und nur die QUAD-Elemente angezeigt.

Am Beispiel einer 5 m x 5 m großen Platte mit einem Rissabstand von 1,67 m wird im Folgenden erläutert, wie das Erzeugen des Systems mit dem Programm-Modul MONET abläuft. Alle Bausteine werden nach dem Baukastenprinzip für den jeweiligen Rissabstand zusammengesetzt.

Unterhalb des Asphalt (gem. Abb. 4.3) wird im nächsten Schritt mit Hilfe einer Importfunktion ein Grundelement der HGT für den Innenbereich angefügt; dabei verbleibt zwischen den beiden Bausteinen ein hier nicht sichtbarer, horizontaler, 0,5 mm breiter Spalt, der u. a. deswegen erforderlich ist, um sich später die Spannungswerte für Asphalt und HGT getrennt anzeigen zu lassen. Dieser Spalt wird entweder starr durch feste Kopplungen (benachbarte Punkte weisen die gleichen Verschiebungen und Verdrehungen auf) oder elastisch durch Federn geschlossen.

In der Grundfläche der HGT ist bereits die Bettung mit einem Bettungsmodul von  $k = 0,08 \text{ N/mm}^3$  enthalten. Dieser Bettungsmodul kann über die E-Moduln der einzelnen Schichten, deren Dicken und den E-Modul des Untergrundes nach der Äquivalenztheorie von Odemark berechnet werden [10].

Anschließend wird an diese Hälfte des Innenbereiches der Außenbereich mit den entsprechenden Grundbausteinen für den Asphalt und für die HGT angefügt. Das System sieht jetzt folgendermaßen aus:

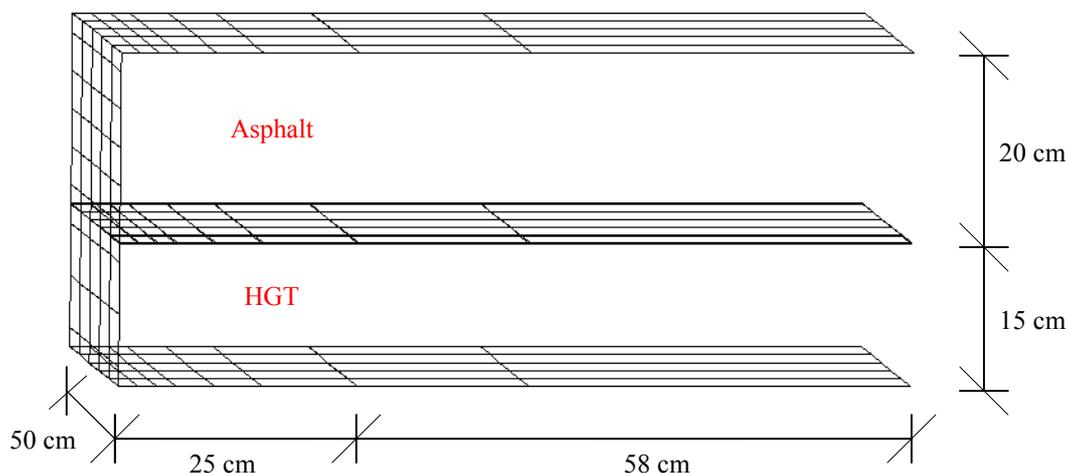


Abb. 4.4: Asphalt und HGT, Innen- und Außenbereich mit 0,5 mm horizontalem Spalt

Der o. g. kleine, horizontale Spalt von 0,5 mm Breite zwischen den beiden Schichten wird jetzt, wie bereits oben beschrieben, mit Kopplungen oder Federn geschlossen.

Sind alle Knotenpunkte des Asphaltes und der HGT vertikal miteinander verbunden, ist das System so an der Rissebene zu spiegeln, dass zwischen der linken und der rechten Hälfte ein Spalt von 0,5 mm verbleibt. Dieser Spalt stellt den künftigen Riss in der HGT dar. Da der Riss ausschließlich in der HGT simuliert werden soll, wird der vertikale Spalt im Asphalt mit festen Koppellementen geschlossen, die keine Verschiebungen oder Verdrehungen zwischen benachbarten Punkten zulassen. Im HGT-Riss stellen horizontale Federn die Übertragung von Druckkräften sicher, das Zugversagen wird durch die Eingabe einer Risslast erreicht. Dabei ist darauf zu achten, dass die Federn immer in Richtung der positiven x-Achse definiert werden. Das sich ergebende System hat jetzt eine Länge von 1,67 m; dies entspricht 1/3 der Gesamtlänge (siehe Abb. 4.5).

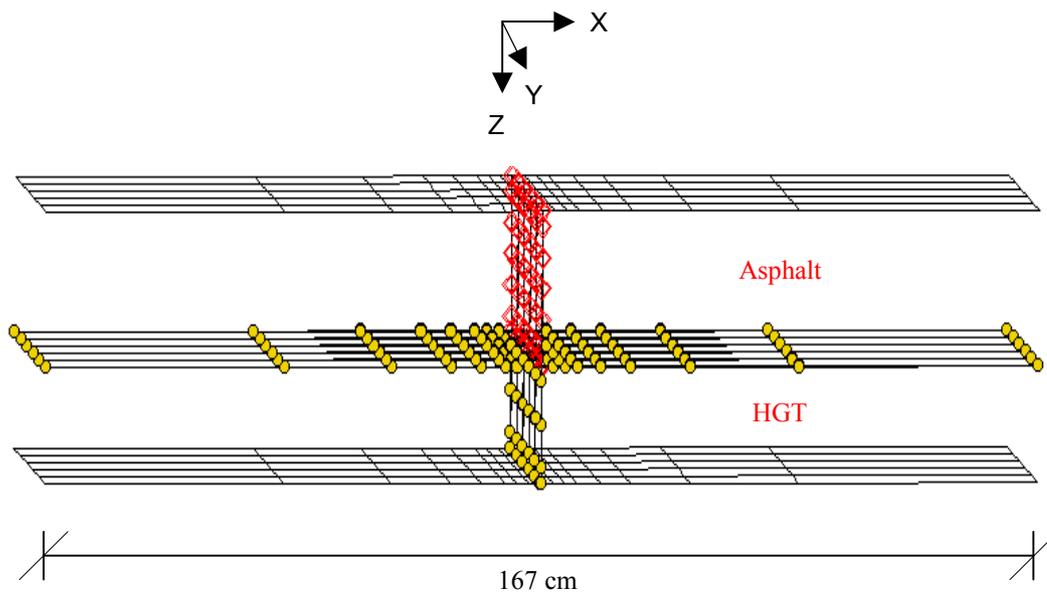


Abb. 4.5: Asphalt und HGT mit einem Riss in der HGT

Um auf die angestrebte Länge von 5 m zu kommen, muss das System noch zwei Mal in Längsrichtung kopiert werden. Bis auf die Belastung und die Fixierungen des Balkens an den Enden, die eine freie Verschiebbarkeit des Modells im Raum verhindern sollen ist, der Balken jetzt fertiggestellt, siehe Abb. 4.6.

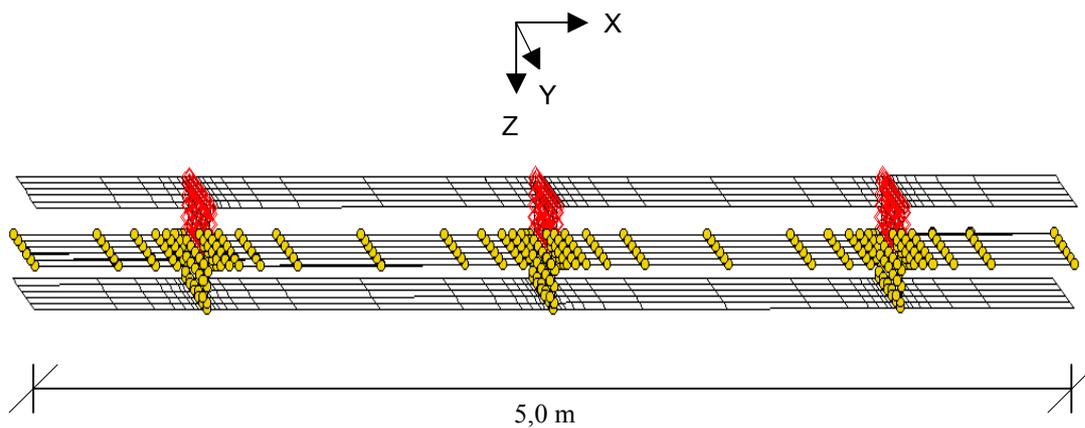


Abb. 4.6: Fertiger Balken mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit 3 Rissen

Mit diesem Balken werden die ersten Kontrollrechnungen durchgeführt, um zu festzustellen, ob das Zusammenfügen fehlerfrei erfolgt ist. Erst nach Abschluss dieser Berechnungen, der

Kontrolle im Animator und der Plausibilitätsprüfung durch eine Handrechnung mit dem Verfahren Zimmermann [10] erfolgt die Erweiterung des Systems zur Platte.

Durch neunmaliges Kopieren würde aus dem 50 cm breiten Balken eine Platte mit den Abmessungen 5 m x 5 m entstehen. Um die Anzahl der Elemente zu reduzieren, wird die Symmetrie des Systems um die x-Achse ausgenutzt, d. h. die Verschiebungen in y-Richtung sind an der Symmetrieachse null, und es findet keine Verdrehung um die x-Achse statt. Diese Symmetriebedingungen müssen durch entsprechende Fixierungen (MXPY) an allen Knotenpunkten auf der Rückseite des Balkens in der Symmetrieachse eingefügt werden.

Ist dies geschehen, fügt man den Ausgangsbalken (ohne Symmetriebedingungen) vier Mal in positiver y-Richtung an und erhält das gewünschte Plattenmodell mit den Maßen 5,0 m Länge auf 2,5 m Breite. Jetzt sind lediglich die Festhaltungen des Gesamtsystems erforderlich, um es im Raum zu fixieren.

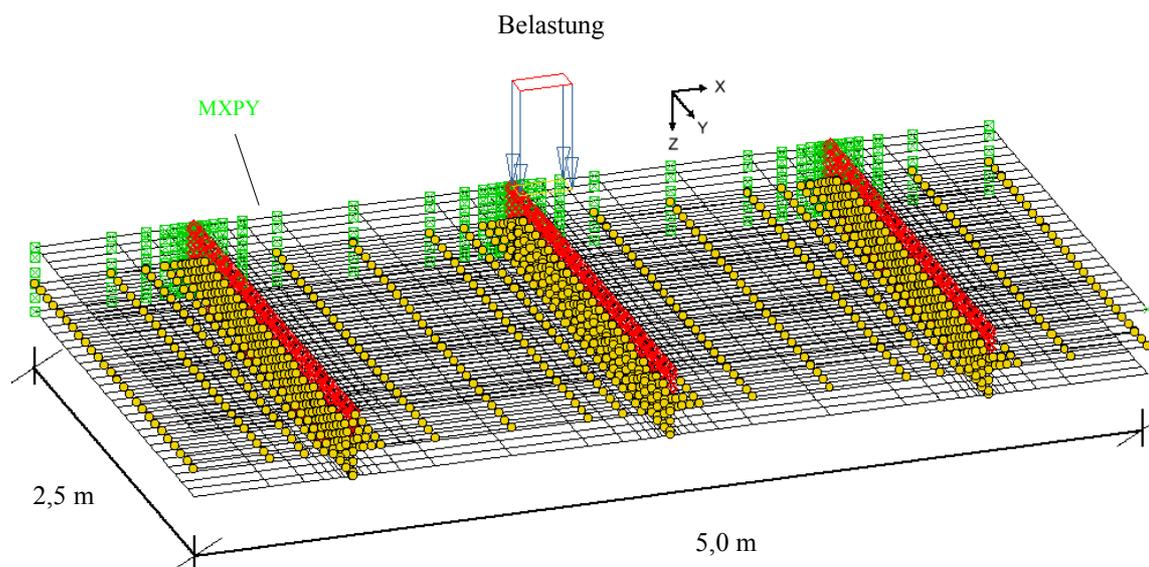


Abb. 4.7: Fertige „halbe“ Platte: mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit 3 Rissen

Soll dieses halbe System mit einer einzelnen Flächenlast beaufschlagt werden, so ist die Radlast ebenfalls nur mit der halben Aufstandsfläche anzusetzen. Aus einem 50 kN - Einzelrad mit einem Kontaktdruck  $p$  von  $0,7 \text{ N/mm}^2$  ergibt sich eine Aufstandsfläche von ca.  $267 \text{ mm} \times 267 \text{ mm}$ , die aufgrund der Symmetrie reduzierte Lastfläche ergibt sich dann zu  $267 \text{ mm} \times 133,5 \text{ mm}$ . Üblicherweise wird die Last, wie in Abb. 4.7 dargestellt, in der Nähe des mittleren Risses aufgebracht, entweder unmittelbar rechts daneben oder mittig darüber.

Die Bearbeitung in MONET ist damit abgeschlossen, die Datensätze des Systems können vom Programm erzeugt, und anschließend die Modifikationen der Eingabedatei im System TEDdy vorgenommen werden.

Um die linear elastischen Materialeigenschaften der beiden Schichten im Texteditor zu definieren, ist es erforderlich, für den Asphalt und die HGT den E-Modul, die Querdehnzahl  $\mu$ , den Temperaturkoeffizienten  $\alpha_T$  und das spezifische Gewicht  $\gamma$  einzugeben.

Die Definition der Materialeigenschaften im TEDdy ermöglicht es, diese Werkstoffkennwerte zu variieren, allerdings muss das gesamte System für die jeweiligen Parameter neu berechnet werden.

Aufgrund des sehr kleinen, vertikalen und horizontalen Spaltes von 0,5 mm ergibt sich bei SOFISTIK die Notwendigkeit, die Wirkungsrichtung der Kopplungen und Federn im Texteditor erneut zu definieren. Zusätzlich ist das Zugversagen der Federn, die nichtlineare Berechnung und die erforderliche Größe des Arbeitsspeichers, insbesondere für die Berechnung der Platten, festzulegen.

## 5. Plausibilitätskontrollen und Vergleichsrechnungen

### 5.1 Plausibilitätskontrollen

Nach einer vollständig durchgeführten und fehlerfreien Berechnung des Systems ist als erste Kontrolle der ANIMATOR zur Überprüfung des Systemverhaltens zweckmäßig, siehe Abb. 5.1.

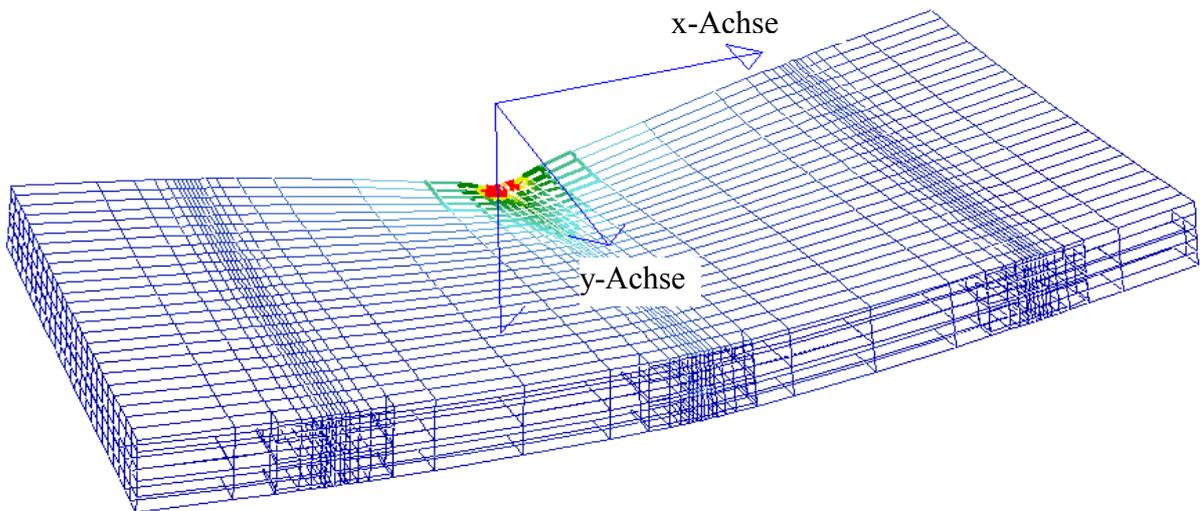


Abb. 5.1: Verformungsfigur einer Platte mit 1,67 m Rissabstand im ANIMATOR unter mittiger Verkehrslast

In einer überhöhten Darstellung kann die Vertikalverformung unter dem jeweils aufgebracht Lastfall in Form von stehenden oder bewegten Bildern aus verschiedenen Blickrichtungen betrachtet werden.

Dabei lassen sich mit Hilfe einer ZOOM - Funktion einzelne Tragwerksausschnitte in einer beliebigen optischen Vergrößerung anzeigen, z. B. ist es möglich, das Öffnen des Risses in der HGT unter Last zu kontrollieren oder die Verschiebung der beiden Schichten entlang ihrer Grenzflächen bei gelöstem Verbund zwischen Asphalt und HGT.

Eine weitere Kontrollmöglichkeit, die Überprüfung der Restkräfte im System, sei hier nur namentlich erwähnt, sie ist aber auch sehr aussagekräftig in Bezug auf evtl. Systemfehler.

## 5.2 Vergleichsrechnungen

Ein wichtiger Schritt zur Überprüfung der gefundenen Ergebnisse, insbesondere bei der Erstellung eines neuen FE-Modells, ist ein Vergleich mit konventionellen Berechnungsverfahren. Dies kann meist nur unter Annahme bestimmter Randbedingungen geschehen, lohnt sich aber in jedem Fall und schafft zusätzliches Vertrauen zu den Berechnungsergebnissen.

Da die Fahrbahnplatte durch das mehrfache Kopieren der Balken hergestellt wird, ergibt sich die erste Kontrollmöglichkeit - wie bereits erwähnt - am fertigen Balken.

### 5.2.1 Balken - Verfahren nach Zimmermann bzw. Müllersdorf

Als geeignetes Handrechenverfahren für einen Balken bietet sich das aus dem Eisenbahnbau bekannte Verfahren Zimmermann [18, 19] an, welches allerdings nur einen Vergleich für eine oder mehrere Einzellasten zulässt. Für die Praxis ist dieser Vergleich ohne Bedeutung, da balkenförmige Straßen nicht vorkommen, es können jedoch grobe Systemfehler bereits vor der aufwendigen Erstellung der Fahrbahnplatten erkannt werden. Dabei wird ein einschichtiger, unendlich langer Träger auf elastischer Unterlage, d. h. ein Zweischichtsystem untersucht. Beim vorliegenden Balken handelt es sich um ein Dreischichtsystem mit zwei verfestigten Schichten auf Untergrund, das erst in ein fiktives Zweischichtsystem (Längsbalken mit der Ersatzhöhe  $h_{II}$  und dem Ersatzträgheitsmoment  $I_E$ ) nach dem Verfahren Eisenmann umzuwandeln ist [18], um es anschließend nach den Verfahren von Zimmermann (unendlich langer Balken) bzw. Müllersdorf (endliche Balkenlänge) berechnen zu können.

Bei den beiden Verfahren wird eine punktuelle Einzellast von 50 kN berücksichtigt, während bei der FE-Berechnung statt dessen eine Linienlast von 100 kN/m über die Breite (50 cm) des Balkens angesetzt wird, die der Einzellast entspricht. Auf diese Weise reduzieren sich die Einflüsse im Lasteinleitungsbereich. Die Linienlast greift in Balkenmitte unmittelbar rechts neben dem 0,5 mm breiten, durch feste Kopplungen geschlossenen Spalt an, siehe Abb. 5.2.

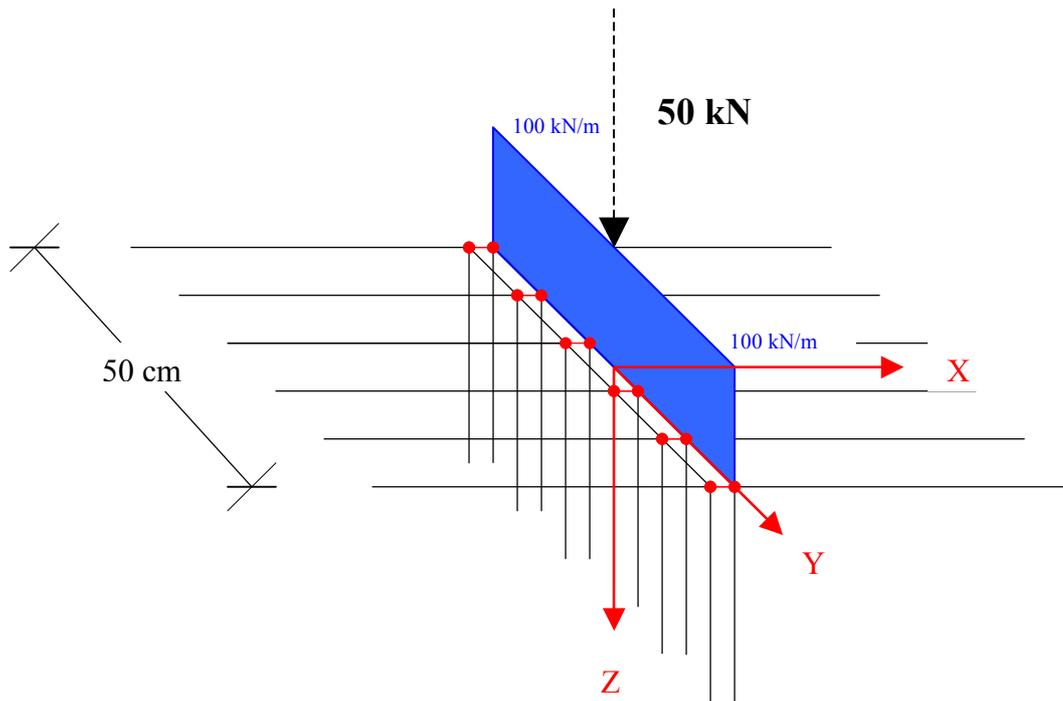


Abb. 5.2: Ersatz-Linienlast am Balken für einen Vergleich mit der Handrechnung

Nur bei der Untersuchung eines Balkens ohne Risse in der HGT lassen sich die Ergebnisse nach dem Verfahren Zimmermann mit der FE-Berechnung direkt vergleichen. Dies ge-

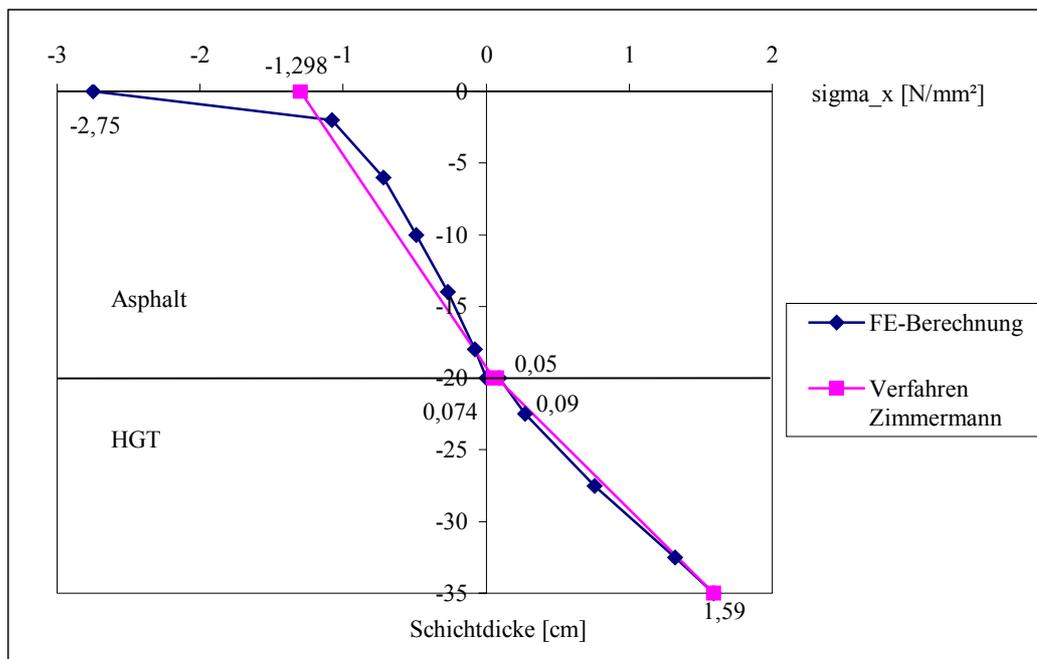


Abb. 5.3: Vergleich der  $\sigma_x$ -Spannungen am Balken ohne Riss zwischen FE-Berechnung und Verfahren Zimmermann

schiebt dadurch, dass die Steifigkeiten der Federn im HGT-Riss entsprechend erhöht werden und zusätzlich das Zugversagen der Federn ausgeschaltet wird.

Beim Vergleich der Spannungswerte  $\sigma_x$  über die Höhe des Balkens an der Stelle unmittelbar neben dem Riss ergibt sich bis auf den obersten Bereich (ca. 2 cm unmittelbar unter der Last) eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Berechnungen, siehe Abb.5.3.

Die Einsenkungen in Balkenmitte betragen nach der FE-Berechnung 0,58 mm und nach der Handrechnung mit dem Verfahren Zimmermann 0,54 mm. Bei einem Vergleich der Werte ist jedoch zu berücksichtigen, dass beim Verfahren Zimmermann an einem unendlich langen Balken gerechnet wird.

Der Einfluss der endlichen Balkenlänge kann mit dem Verfahren Müllersdorf [20] berücksichtigt werden; hier ergibt sich bei einer Einsenkung in Balkenmitte von 0,59 mm eine sehr gute Übereinstimmung mit der FE-Berechnung. Die Spannungswerte nach dem Verfahren Müllersdorf sind identisch mit den Werten nach Zimmermann, d. h. die Verhältnisse am untersuchten System entsprechen bereits weitgehend dem unendlich langen Balken.

Für einen Balken mit einem Riss ist ein Vergleich mit dem Handrechenverfahren nicht sinnvoll, da die Spannungen in Balkenlängsrichtung am Riss in der HGT null sein müssen, während beim Einsatz der Reduktionsfaktoren  $\alpha$  Spannungswerte in Querrichtung berechnet werden, die in einer Ebene parallel zum Riss liegen. Eine Quertragwirkung ist aber beim Balken praktisch nicht vorhanden.

### **5.2.2 Elastisch gebettete Platte - Mehrschichtentheorie**

Falls der Vergleich am Balken eine gute Übereinstimmung ergeben hat, kann die Platte erzeugt und berechnet werden. Auch hier werden zuerst Platten auf ungerissenen HGT im Rahmen der Vergleichsrechnung untersucht und im Anschluss der Einfluss der Risse in der HGT betrachtet.

Als Belastung wird bei der FE-Berechnung auf die Platte eine Art „Topflast“ mit einer quadratischen Form der Belastungsfläche aufgebracht, wobei aufgrund der Symmetrie nur die halbe Last anzusetzen ist, siehe Kap 4.3. Die Verkehrslast steht auf der Asphaltoberseite unmittelbar neben dem künftigen Riss.

### 5.2.2.1 Verfahren Westergaard/Eisenmann

Bei diesem Verfahren [5.4] muss das Dreischichtsystem - analog zum Balken - in ein Zweischichtsystem auf elastischer Unterlage umgewandelt werden. Dabei ist in der Berechnung zwischen den beiden Verbundzuständen „voller Verbund“ und „kein Verbund“ zu unterscheiden.

In einem ersten Schritt werden die Spannungen und Verformungen für eine 20 cm dicke Asphaltsschicht auf einer 15 cm dicken, ungerissenen HGT für den Fall des vollen Verbundes zwischen Asphalt und HGT untersucht, siehe Abb. 5.4. Die Materialkennwerte  $E$ ,  $\mu$  und  $k$  entsprechen den Werten der FE-Berechnung (siehe Kap 6.1).

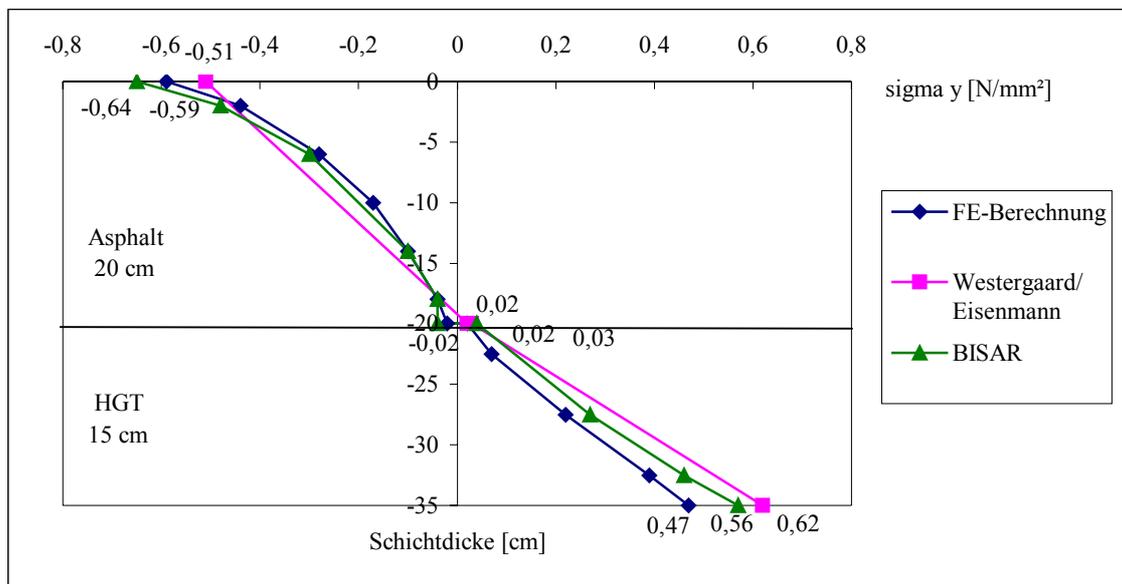


Abb. 5.4: Vergleich der  $\sigma_y$ -Spannungen für 20 cm Asphalt auf 15 cm ungerissener HGT zwischen FE-Berechnung, dem Verfahren Westergaard/Eisenmann und BISAR

Die Einsenkungen in Plattenmitte betragen nach der FE-Berechnung 0,10 mm und sind fast identisch mit dem Wert nach dem Verfahren Westergaard/Eisenmann mit 0,11 mm.

Im nächsten Schritt erfolgt der Vergleich für ein Plattensystem auf einer gerissenen HGT, unter Annahme von vollem Verbund zwischen den beiden Schichten und einem klaffenden Riss in der HGT (Wirksamkeitsindex  $W = 0\%$ ); daraus ergibt sich ein Reduktionsfaktor

$\alpha = 0,29$  (siehe Kap. 3.3) und ein wirksamer E-Modul von  $E_{\text{wirksam}} = 0,29 * E_{\text{HGT}} = 4350 \text{ N/mm}^2$ .

Für den Spannungsvergleich werden nicht die Spannungsverläufe  $\sigma_x$  verwendet, da durch den Riss in der HGT die Spannungen in Längsrichtung, d. h. senkrecht zum Riss, in diesem Bereich auf null absinken. Vergleichen lassen sich die Spannungsverläufe  $\sigma_y$  parallel zum Riss über die Dicke der Platte unmittelbar am Rand der Last, diese sind in Abb. 5.5 dargestellt.

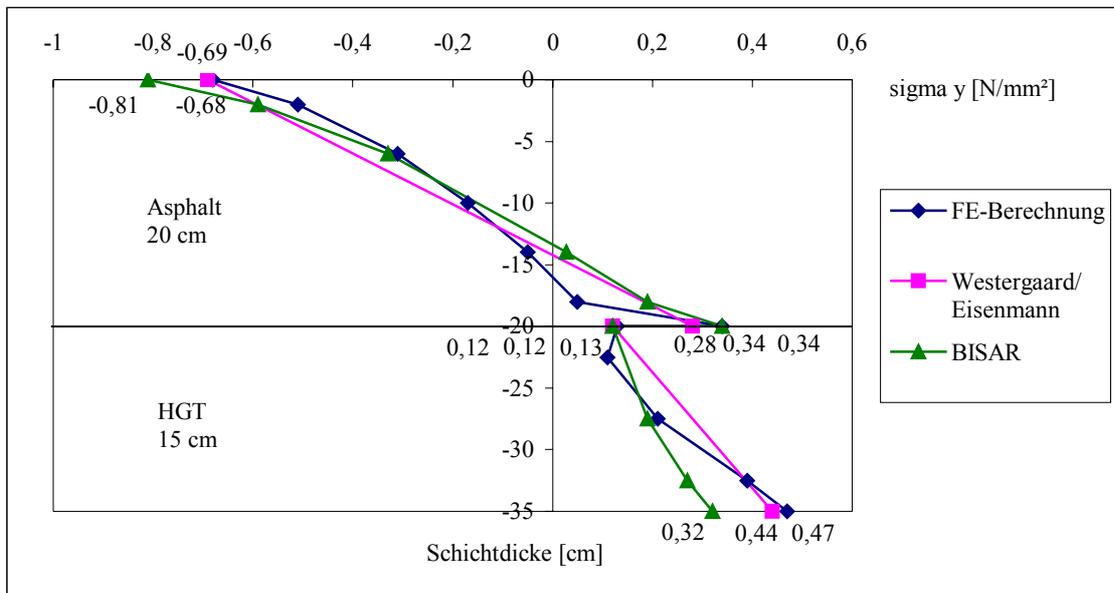


Abb. 5.5: Vergleich der  $\sigma_y$ -Spannungen für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit Riss zwischen FE - Berechnung, dem Verfahren Westergaard/Eisenmann und BISAR

Insgesamt gesehen gibt es nur relativ geringe Unterschiede zwischen den Spannungswerten der FE-Berechnung und dem Verfahren Westergaard/Eisenmann. Deutlichere Unterschiede sind im Bereich über bzw. unter dem Schichtwechsel Asphalt/ HGT festzustellen, wobei dies auf die Art der Rissmodellierung im FE-Modell zurückzuführen ist.

### 5.2.2.2 BISAR

Als weitere Möglichkeit für eine Vergleichsberechnung bietet sich das in Kap. 2.2.3 beschriebene Computerprogramm BISAR an. Allerdings sind dabei folgende Besonderheiten zu beachten:

Zum einen erfolgt die Berechnung an unendlich ausgedehnten Schichten mit linearen Spannungs-Dehnungs-Verhältnissen, zum anderen wird der Untergrund nicht durch einen Bettungsmodul, sondern durch einen E-Modul und eine Querdehnzahl beschrieben. Risse in der HGT lassen sich - wie beim Verfahren Westergaard/Eisenmann - nicht direkt, sondern nur indirekt über den wirksamen E-Modul der HGT berücksichtigen.

Um vergleichbare Untergrundverhältnisse zu schaffen, werden für den Fall des vollen Verbundes zwischen den einzelnen Schichten die E-Moduln des Untergrundes aus dem Bettungsmodul ermittelt und in die Berechnung eingesetzt. Es ergibt sich ein Wert für  $E_3$  von ca.  $100 \text{ MN/m}^2$  für die Deckensysteme mit ungerissener HGT bzw. von ca.  $115 \text{ MN/m}^2$  für 20 cm Asphalt auf gerissener HGT, bei einer Querdehnzahl des Untergrundes von  $\mu = 0,5$ .

Wichtig für einen Vergleich ist, dass die Spannungen  $\sigma_y$  und die Einsenkung nicht genau in der Lastachse, sondern am Lastrand untersucht werden. Die Ergebnisse der Spannungsrechnungen sind in den Abb. 5.4 und 5.5 dargestellt.

Für ungerissene Deckensysteme ergeben sich gute Übereinstimmungen sowohl mit der FE-Berechnung als auch mit dem Verfahren Westergaard/Eisenmann. Lediglich die Einsenkungen betragen mit 0,15 mm etwas mehr als bei den anderen beiden Verfahren (0,10 mm bzw. 0,11mm). Dies ist auf die unterschiedliche Modellierung des Untergrundes zurückzuführen. Aus diesem Grund ergeben sich auch beim Deckensystem auf gerissener HGT andere Spannungswerte in der Tragschicht und eine Einsenkung von 0,21 mm (0,11 mm bzw. 0,14 mm).

Unter Berücksichtigung der o. g. Randbedingungen ergeben sich gute Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen der Finite-Elemente- und BISAR-Berechnungen.

### **5.3 Zusammenfassung:**

Vor einer genauen Betrachtung der Einzelergebnisse der FE-Berechnungen und vor einem Vergleich mit anderen Berechnungsverfahren ist die kritische Überprüfung des Verformungsverhaltens im ANIMATOR von SOFISTIK eine sehr gute Kontrollmöglichkeit.

Das generierte FE-System kann für den Lastfall Verkehr neben dem Riss unter bestimmten Randbedingungen mit Hilfe von Vergleichsberechnungen überprüft werden.

Die maßgebenden Werte für die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der Asphalt-schichten und der HGT sowie die Einsenkungen sind in nachfolgender Tabelle für 20 cm Asphalt auf einer HGT mit einem Riss für vollen Verbund noch einmal zusammengefasst und gegenübergestellt:

	Westergaard/ Eisenmann	BISAR	FE-Berechnung mit Riss
$\sigma_y$ -Spannung an der Asphaltunterseite in N/mm <sup>2</sup>	0,28	0,34	0,34
$\sigma_y$ -Spannung an der HGT-Unterseite in N/mm <sup>2</sup>	0,44	0,32	0,47
Einsenkungen in Plattenmitte in mm	0,14	0,21	0,11

Abb. 5.6:  $\sigma_y$ -Spannungen und Einsenkungen der FE - Berechnungen und Vergleichsrechnungen für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit einem Riss und vollem Verbund zwischen Asphalt und HGT

Abschließend kann zum Vergleich der FE-Berechnungen mit dem Verfahren Westergaard/Eisenmann und BISAR festgestellt werden, dass die Übereinstimmung relativ gut ist.

Für die Praxis ergibt sich daraus die Schlussfolgerung, dass auf eine exakte Modellierung eines Risses in der HGT für die üblichen Bemessungsfälle verzichtet werden kann bzw. die Genauigkeit des Handrechenverfahrens Westergaard/Eisenmann oder der Einsatz des Programms BISAR ausreichend sind.

Für eine detaillierte Untersuchung des Tragverhaltens im unmittelbaren Rissbereich sowie der Einflüsse des Rissabstandes in der HGT bzw. des abschnittsweise gelösten Verbundes kann aber auf eine exakte Modellierung des Risses, die nur mit der FE-Methode möglich ist, nicht verzichtet werden.

## 6. Finite-Elemente-Berechnungen

### 6.1 Grundsystem der FE-Berechnungen

Ausgangssystem der FE-Berechnungen ist eine quadratische Fahrbahnplatte mit den Abmessungen 5 m x 5 m. Die 50 kN Einzellast aus Verkehr wird als Flächenlast mit einer quadratischen Belastungsfläche in Plattenmitte aufgebracht. Aufgrund der Symmetrie der Platte und der Last zur Plattenlängsrichtung (x-Achse), lassen sich die Berechnungen unter Ausnutzung der Symmetriebedingungen an einem System mit 5,0 m Länge und 2,5 m Breite gemäß Abb. 6.1.1 durchführen. Dementsprechend wird auch die Belastungsfläche der Verkehrslast halbiert.

Das Grundsystem hat einen Fahrbahnaufbau mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT.

Senkrecht zur Plattenlängsrichtung weist das Deckensystem 3 Risse in der HGT, d. h. einen Rissabstand von 1,67 m auf, wobei der mittlere Riss genau in Plattenmitte liegt, siehe Abb. 6.1.1. Durch kraftschlüssiges Schließen der beiden äußeren Risse entsteht das Grundsystem einer Platte mit einem wirksamen Riss in Plattenmitte bzw. mit einem Rissabstand von 5,0 m.

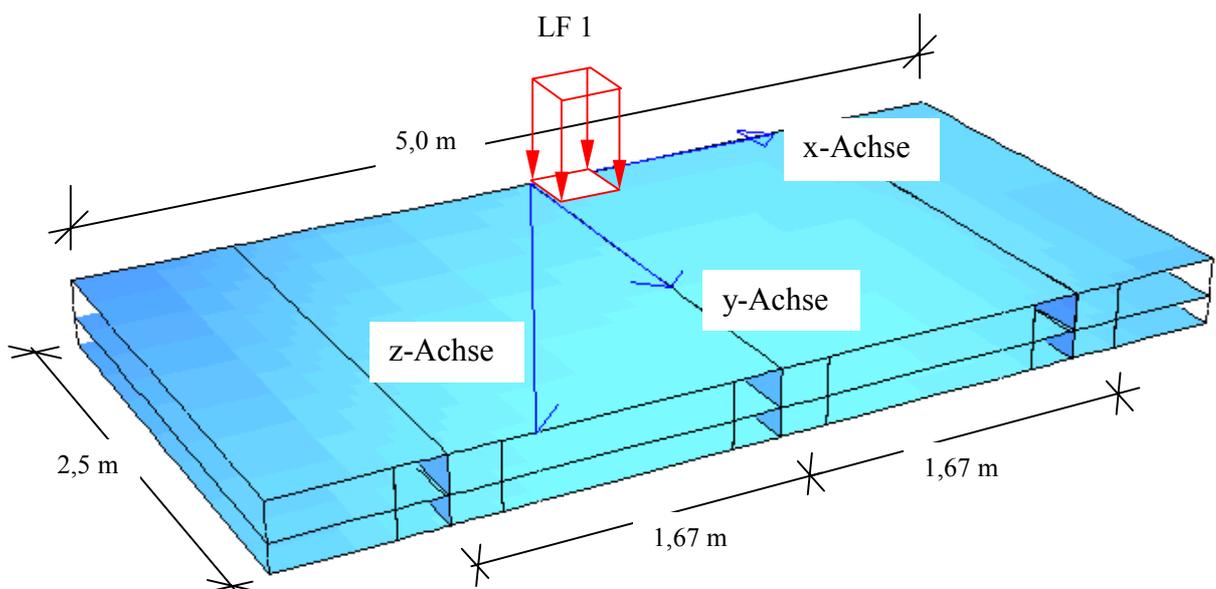


Abb. 6.1.1: Grundsystem der FE-Berechnung (20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit einem wirksamen Riss in der HGT in Plattenmitte)

Die geometrischen Verhältnisse und die Belastung für den Lastfall 1 „Last neben dem Riss“ (LF 1) sind in Abb. 6.1.1 noch einmal vereinfacht dargestellt. Die x-Achse des FE-Modells liegt auf der Symmetrieachse.

Die Randbedingungen des Grundsystems haben - wie aus Vergleichsrechnungen hervorgeht - insbesondere bei den Temperaturlastfällen einen erheblichen Einfluss auf die Verformungen und die Spannungen.

Aus diesem Grund wird die Fahrbahnplatte in x-Richtung an den Stirnseiten biegesteif eingespannt, so dass lediglich Verformungen in z-Richtung möglich sind. Auf diese Weise lässt sich eine unendlich lange Platte (Straße) simulieren. Für eine breite Straße, z. B. eine Autobahn, muss auch in Plattenquerrichtung eine Einspannung wie in x-Richtung eingefügt werden, während für eine schmale, einbahnige Straße ein freier Rand, d. h. ohne Festhaltungen, wirklichkeitsnäher ist. Die Berechnungen berücksichtigen auch in y-Richtung am äußeren Rand eine Einspannung.

Für Asphalt werden die Materialkennwerte für eine Temperatur von ca.  $-5^{\circ}\text{C}$  angenommen. Die verwendeten Materialkennwerte für das Grundsystem sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Materialkennwert	Asphalt	HGT
E-Modul in $\text{N}/\text{mm}^2$	10 000	15 000
Querdehnzahl $\mu$	0,28	0,16
Spezifisches Gewicht $\gamma$ in $\text{kN}/\text{m}^3$	23	23
Temperaturdehnkoeffizient $\alpha_T$ in $1/\text{K}$	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$

Abb. 6.1.2: Ausgangswerte für Asphalt und HGT

## 6.2 Lastfälle

### 6.2.1. Verkehrsbelastung

Als Verkehrsbelastung wird das Einzelrad einer Lkw-Achse mit 10 t Achsfahrmassse angesetzt. Die Einzellast von 50 kN wirkt als Flächenlast mit einer Grundfläche von 267 mm x 267 mm und einem Kontaktdruck von ca. 0,7 N/mm<sup>2</sup>. Die Last steht - je nach Anzahl der Risse - in Plattenlängsrichtung in etwa in Plattenmitte an der Symmetrieachse; wobei aufgrund der Symmetrie die Lastfläche halbiert wird.

Die Verkehrslasten überrollen das Deckensystem mit dem Riss in der HGT. Dabei sind folgende Extremwerte für die Laststellung möglich, siehe Abb. 6.2.1

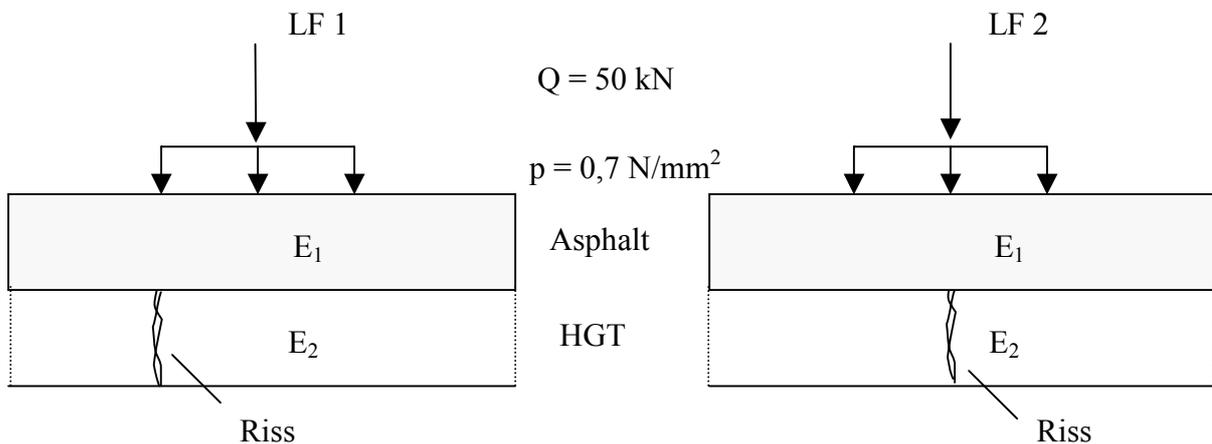


Abb. 6.2.1: Verkehrslaststellungen

links: Last neben dem Riss (LF 1)

rechts: Last mittig über dem Riss (LF 2)

Die Last kann an der Oberseite des Asphalttes entweder unmittelbar neben dem Riss (LF 1) stehen, wobei im Asphalt über dem Riss die maximale, vertikale Schubbeanspruchung auftritt, oder die Last steht mittig über dem HGT-Riss (LF 2) und verursacht voraussichtlich die maximale Biegebeanspruchung des Deckensystems.

Am Grundsystem werden die beiden Lastfälle miteinander verglichen, und in Abb. 6.2.2 sind beispielhaft die Spannungsverläufe für die  $\sigma_x$ - und die  $\tau_{xz}$ -Spannungen dargestellt.

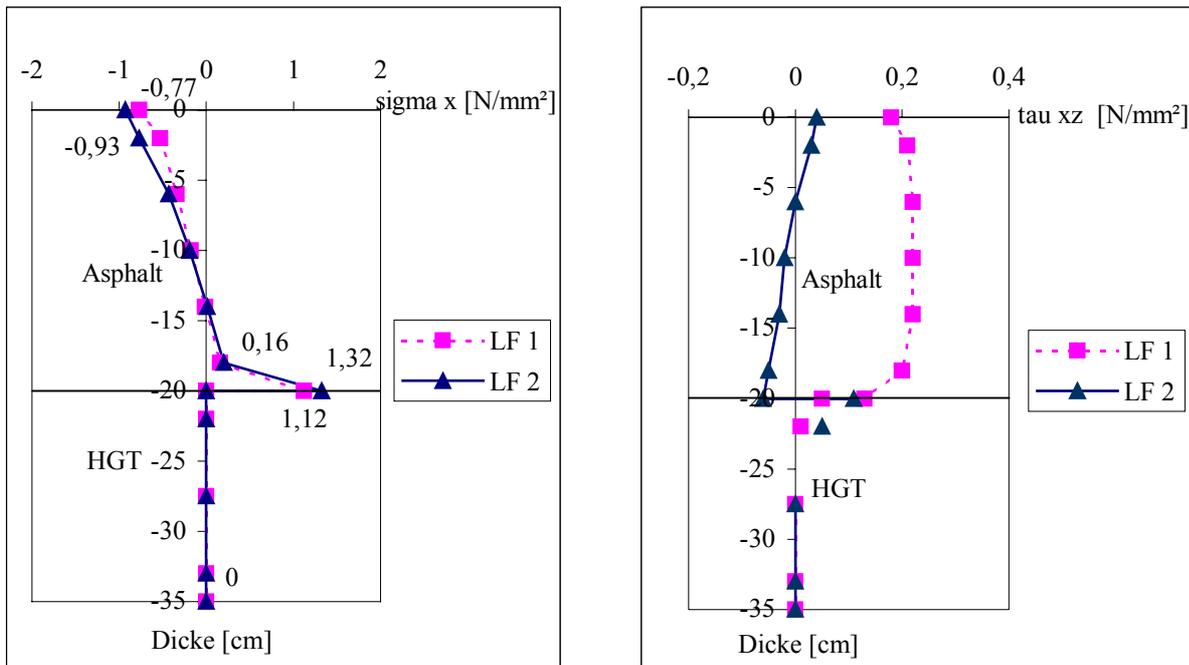


Abb. 6.2.2: Vergleich der Lastfälle „Last neben dem Riss, LF 1“ - „Last über dem Riss, LF 2“ am Grundsystem ( 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit einem Riss in Plattenmitte)  
links:  $\sigma_x$ -Spannungen                      rechts:  $\tau_{xz}$ -Spannungen

Vergleicht man die  $\sigma_x$ -Spannungen der beiden Lastfälle, so zeigt sich, dass bei einer Laststellung neben dem Riss (LF 1) an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss gegenüber der mittig über dem Riss stehenden Last (LF 2) um ca. 18 % kleinere Spannungswerte entstehen. Bei den  $\sigma_y$ -Spannungen ist zwar der prozentuale Unterschied bei den Spannungswerten an der Unterseite des Asphaltes in Plattenmitte nur in etwa halb so groß, aber auch in Plattenquer- richtung tritt im LF 2 die größere Biegebeanspruchung im Asphalt auf (siehe Anlage 6.1).

Die Einsenkungen in Plattenmitte und am Plattenrand sind bei beiden Lastfällen gleich groß.

Bei den vertikalen Schubspannungen  $\tau_{xz}$  stellt sich bei einer Laststellung neben dem Riss (LF 1) im Asphalt eine nahezu konstante Schubspannungsverteilung ein, während sich bei einer Laststellung mittig über dem Riss (LF 2) eine über die Dicke des Asphaltes linear ver- änderliche Schubspannungsverteilung ergibt, siehe Abb. 6.2.2. Beim LF 1 werden erwar- tungsgemäß die höheren Spannungswerte erreicht.

In den obersten Zentimetern der HGT treten im Rissbereich modellbedingt noch geringe ver- tikale Schubspannungen auf, die aufgrund des klaffenden Risses in der HGT nicht vorhanden sein dürften.

Die o. g. Feststellungen gelten auch für die anderen Asphaltstärken zwischen 12 cm und 26 cm, wobei die prozentualen Unterschiede der  $\sigma_x$ -Spannungswerte an der Unterseite des Asphaltes zwischen den beiden Lastfällen in etwa gleich groß bleiben, siehe Abb. 6.2.3.

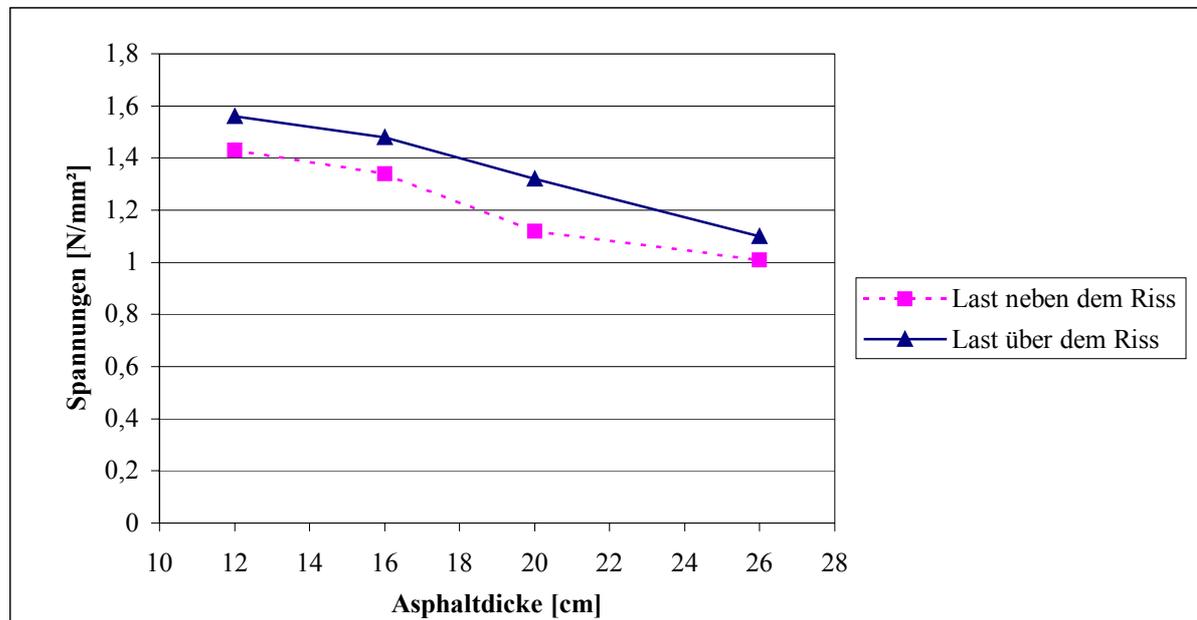


Abb. 6.2.3:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss für LF 1 und LF 2

Bei den  $\sigma_y$ -Spannungen ergibt sich bei wesentlich kleineren Absolutwerten ein ähnliches Bild (siehe Anlage 6.1). Bei allen Asphaltstärken liegen die Spannungswerte bei einer Laststellung mittig über dem Riss über den Werten des LF 1, allerdings wird mit zunehmender Asphaltstärke der prozentuale Unterschied langsam kleiner.

Bei den Schubspannungen  $\tau_{xz}$  entstehen dagegen bei der Laststellung neben dem Riss generell die höheren Maximalwerte im Asphalt und zwar bei allen Asphaltstärken (siehe Anlage 6.1).

Die größten Hauptspannungen  $\sigma_I$  und deren Verläufe sind nahezu identisch mit den  $\sigma_x$ -Spannungen, dies bedeutet, dass die Hauptspannungsrichtung entlang der x-Achse liegt.

Den weiteren Berechnungen liegt für die Ermittlung der Biege- und Hauptspannungen Lastfall 2 „Last mittig über dem Riss“ und für die Ermittlung der Schubspannungen  $\tau_{xz}$  Lastfall 1 „Last neben dem Riss“ zugrunde, womit jeweils die ungünstigsten Verhältnisse erfasst werden.

## 6.2.2 Temperaturbelastung

Aufgrund der behinderten Ausdehnungsmöglichkeiten entstehen unter Temperatureinflüssen in Fahrbahndeckensystemen aus Asphalt- und hydraulisch gebundenen Schichten in gewissen Abständen von den Fahrbahnrändern sowohl in Längs- als auch in Querrichtung Temperaturspannungen. Die Besonderheit dieser Deckensysteme liegt in der Verwendung von zwei im Bezug auf das temperaturabhängige Verformungsverhalten unterschiedlichen Materialien.

Asphalt dehnt sich zwar bei Erwärmung aus und verkürzt sich bei Abkühlung, die Besonderheit besteht aber darin, dass bei einer behinderten Bewegung der Asphaltsschichten die Zwangsspannungen bei Temperaturbelastung je nach Ausgangstemperatur des Asphaltes unterschiedlich groß sind und unterschiedlich schnell durch Relaxation abgebaut werden können, siehe Abb. 6.2.4

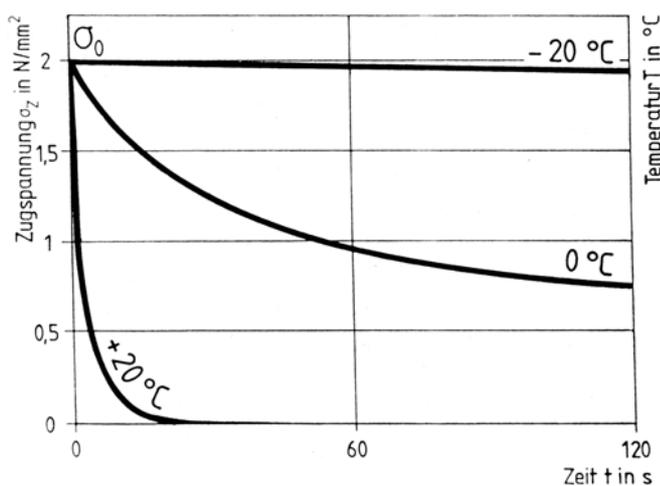


Abb. 6.2.4: Spannungsabfall von Walzasphalt durch Relaxation in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur [21]

So werden bei Temperaturen von z. B. + 20° C aufgebrachte Zwängungsspannungen selbstständig innerhalb von einigen Sekunden abgebaut. Liegt die Ausgangstemperatur bei ca. 0° C, so dauert der Spannungsabfall deutlich länger, und bei Ausgangstemperaturen von - 20° C ist der Spannungsabbau durch Relaxation nur mehr gering ausgeprägt.

Diese Temperaturabhängigkeit des Relaxationsvermögens von Asphalt führt dazu, dass bei einer Abkühlung des Fahrbahndeckensystems mit behindertem Schrumpf bei höheren Tempe-

raturen praktisch keine und bei tieferen Temperaturen mit dem Temperaturabfall deutlich zunehmende Zugspannungen auftreten [21], siehe Abb. 6.2.5.

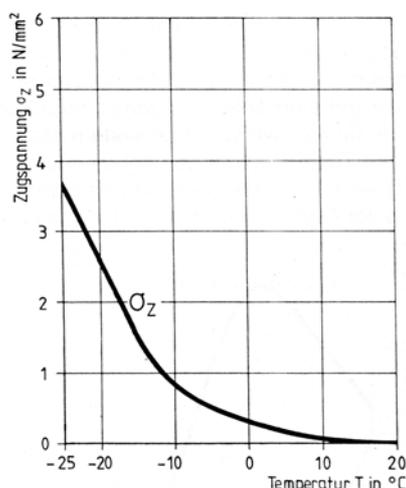


Abb. 6.2.5: Thermisch induzierte Zugspannungen  $\sigma_z$  in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Abkühlgeschwindigkeit von 10 K/h [21]

Dabei spielt die Größe der Abkühlgeschwindigkeit eine vernachlässigbare Rolle [22]. Deutliche Zugspannungen werden erst bei einer Temperatur  $\leq +5\text{ °C}$  im Deckensystem aktiviert.

Demgegenüber weisen hydraulisch gebundene Tragschichten - ähnlich wie Beton - ein lineares Spannungsdehnungsverhalten unter Temperaturbeanspruchung auf. Dies führt bei einer Abkühlung von  $\Delta T = 10\text{ K}$  und einer Ausgangstemperatur von z. B.  $+20\text{ °C}$  dazu, dass bei vollständig behinderter Bewegung und bei Betrachtung eines Stabes eine Zugspannung  $\sigma = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 15000 = 1,5\text{ N/mm}^2$  entsteht, die i. Allg. größer als die Zugfestigkeit der HGT ist. Spätestens jetzt bilden sich in der HGT im Bereich der Kerben durchgehende Risse, die dann eine weitere Verkürzung der einzelnen Schollen der HGT erlauben. Der Rissabstand in der HGT hängt neben dem Abstand der Kerben auch von der Zugfestigkeit der HGT, sowie von der Größe der Reibspannung ab, die in der Schichtgrenze zum Asphalt und an der Unterseite der HGT durch die behinderte Längenänderung auftritt.

Werden Asphalt und HGT in einem Fahrbahndeckensystem kombiniert, entstehen bei einer Abkühlung zuerst in der HGT Zugspannungen, die durch Risse bzw. die Kerben wieder abgebaut werden. Für Temperaturen  $\leq +5\text{ °C}$  entstehen bei einer Abkühlung auch im Asphalt Zugspannungen, die bei tiefen Temperaturen bis zur Zugfestigkeit des Asphalt anwachsen

können. Welchen Einfluss die Kerben in der HGT auf die Spannungsverteilung im Deckensystem haben, wird im Kapitel 6.3 untersucht.

Dabei sind aber noch weitere Unterschiede zwischen den beiden Materialien zu berücksichtigen. Asphalt und HGT weisen unterschiedliche Temperaturdehnungskoeffizienten, E-Moduln und Querdehnzahlen auf.

Der Temperaturdehnungskoeffizient einer HGT entspricht dem von Beton und schwankt zwischen  $5 \cdot 10^{-6}$  und  $14 \cdot 10^{-6}$  1/K und wird üblicherweise mit  $1 \cdot 10^{-5}$  1/K angesetzt [23].

Der einaxiale, temperaturabhängige Temperaturdehnungskoeffizient von Asphalt beträgt je nach Zuschlag und Bindemittel bzw. Bindemittelgehalt im Mittel  $2 \cdot 10^{-5}$  1/K [24]; er ist damit doppelt so hoch wie der einer HGT. Daraus ergibt sich bei einer gleichmäßigen Erwärmung oder Abkühlung bei niedrigen Ausgangstemperaturen neben der Ausdehnung bzw. Verkürzung zusätzlich noch eine Verwölbung des Deckensystems.

Die E-Moduln des hier betrachteten Grundsystems werden für Asphalt mit  $10\,000$  N/mm<sup>2</sup> (Temperatur des Asphaltes ca.  $-5^\circ$  C) und für die ungerissene HGT mit  $15\,000$  N/mm<sup>2</sup> angesetzt; diese Werte führen wiederum dazu, dass die oben beschriebene Verwölbung weniger ausgeprägt ist.

Die angenommenen Querdehnzahlen für das Grundsystem betragen für Asphalt 0,28 und für die HGT 0,16. Die Materialkennwerte des Grundsystems sind im Kapitel 6.1 tabellarisch zusammengefasst (siehe Abb. 6.1.2).

Bei der Ermittlung der Spannungen aus Temperatur wurde die Biegebeanspruchung aus dem Eigengewicht der Fahrbahnplatte berücksichtigt.

Für das Grundsystem wurden die beiden Lastfälle „gleichmäßige Temperaturerhöhung um 5 K“ (LF 3) über die gesamte Deckendicke und eine „gleichmäßige Abkühlung um 5 K“ (LF 4) untersucht; maßgebend für die Beanspruchung des Deckensystems ist die gleichmäßige Abkühlung um 5 K über die gesamte Dicke.

### 6.2.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung

Treten in einem Fahrbahndeckensystem die beiden Beanspruchungen Verkehr und Temperatur (Kombinationslastfall = LF 5) gleichzeitig auf, so stellt sich die Frage, welche Auswirkungen dadurch auf das Tragverhalten entstehen. Eine direkte Überlagerung der beiden Lastfälle ist aufgrund der nichtlinearen FE-Berechnung der Deckensysteme (zur Modellierung des Rissversagens der Federn im HGT-Riss) nicht möglich.

### 6.3 Tragverhalten von Fahrbahnsystemen ohne und mit Riss in der HGT

Die Gesamttragwirkung von Deckensystemen mit Asphalt auf gerissener HGT unterscheidet sich von der ungerissener Deckensysteme; die vorhandenen Unterschiede sollen in diesem Kapitel dargestellt werden.

Um ein Deckensystem auf ungerissener HGT zu erzeugen, werden im Ausgangssystem (20 cm Asphalt auf 15 cm HGT) die Risse durch Koppelemente biegesteif geschlossen.

#### 6.3.1 Verkehrsbelastung

Zur Veranschaulichung der erwarteten Spannungsverlagerung aufgrund des unterschiedlichen Tragverhaltens sollen die beiden in Abb. 6.3.1 und 6.3.2 abgebildeten Spannungsverläufe der Biegespannung  $\sigma_x$  in Plattenlängsrichtung dienen. Zur besseren Übersichtlichkeit wird eine farbige Höhengichtliniendarstellung verwendet, bei der die  $\sigma_x$ -Spannungen über die komplette Höhe der Deckensysteme farblich dargestellt sind.

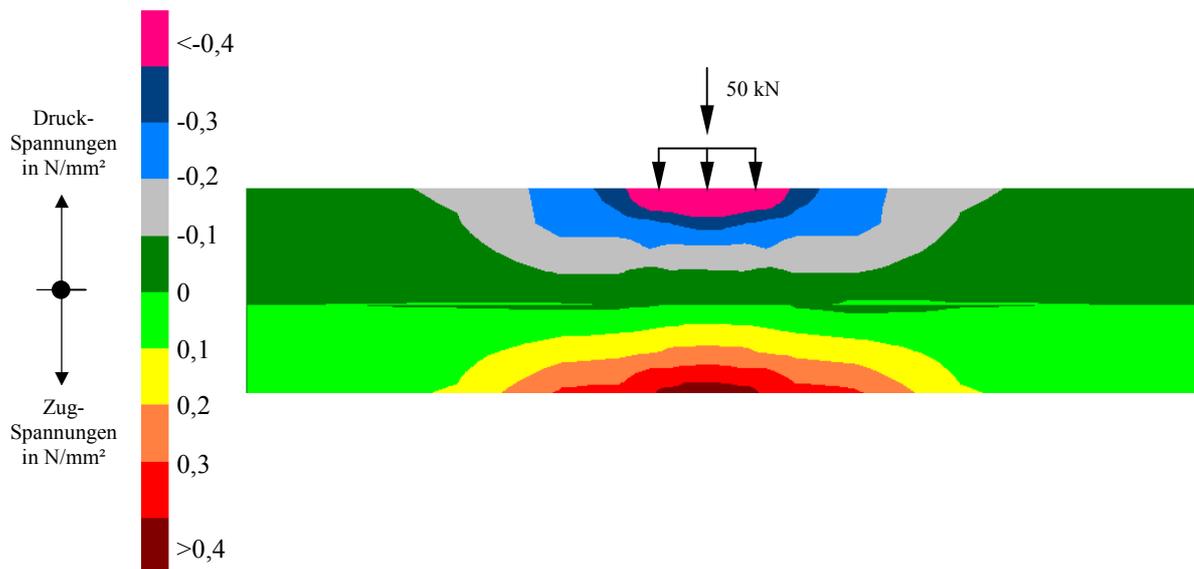


Abb. 6.3.1: Höhengichtlinien der  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an einem System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT **ohne Riss** unter Verkehrsbelastung

Im Deckensystem ohne HGT-Riss (Abb. 6.3.1) stellt sich unter der Last eine ausgeprägte Druckzone im Asphalt ein, während die HGT fast vollständig auf Zug beansprucht wird. Der

Nulldurchgang der Biegespannungen liegt bei 20 cm Asphaltstärke ziemlich genau an der Schichtgrenze zwischen Asphalt und HGT.

Beim System mit einem klaffenden Riss ( $W = 0\%$ ) in der HGT fällt in Plattenlängsrichtung (x-Richtung) die Tragschicht für die Lastabtragung im unmittelbaren Rissbereich vollständig aus; die Biegebeanspruchung muss in Längsrichtung jetzt allein vom Asphalt übernommen werden, siehe Abb. 6.3.2.

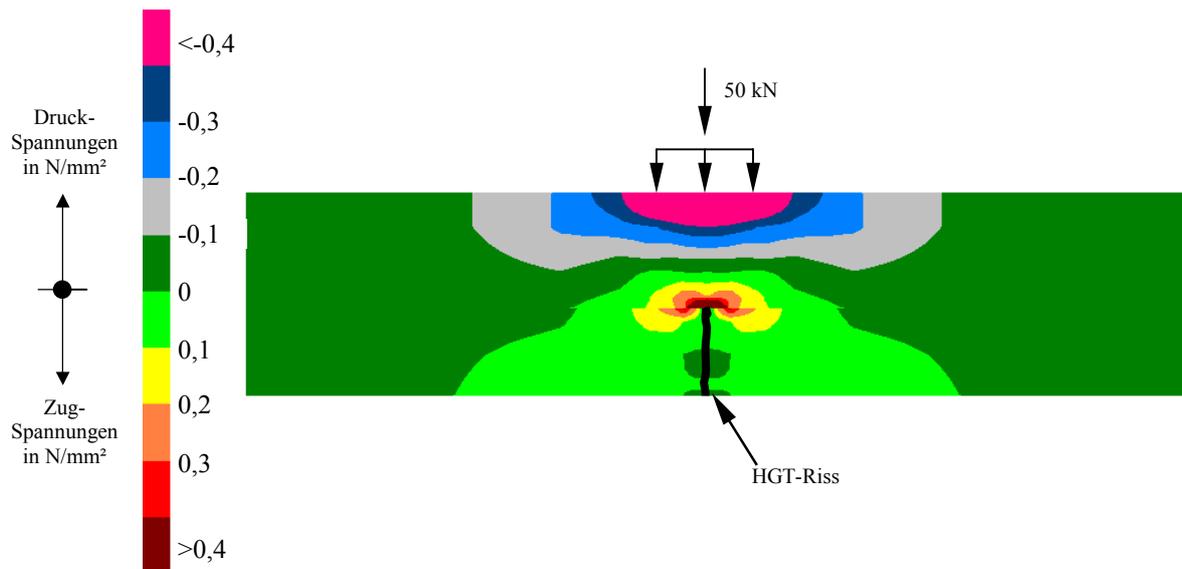


Abb. 6.3.2: Hörschichtlinien der  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an einem System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT **mit Riss** unter Verkehrsbelastung

Durch den Riss in der HGT entsteht in x-Richtung eine nahezu spannungsfreie Zone um den Riss, die Spannungen verlagern sich nach oben in die Asphaltdecken; dadurch ergibt sich an der Unterseite des Asphaltes über dem HGT-Riss ein Bereich mit deutlichen Biegezugspannungen, der beim ungerissenen System noch fast vollständig in der Druckzone gelegen ist. Die Spannungsverlagerung konzentriert sich auf den unmittelbaren Bereich unter der Last, die seitlichen Auswirkungen sind relativ gering. Die Biegebeanspruchung an der Unterseite der HGT wird in Plattenlängsrichtung insgesamt wesentlich reduziert.

Durch das Vorhandensein eines Risses in der HGT findet auch in Plattenquerrichtung (y-Richtung) eine Spannungsumlagerung statt. Die Biegezugspannungen an der Unterseite des Asphaltes in y-Richtung, die vor dem Entstehen des Risses in etwa null waren, wachsen an, wobei in Plattenquerrichtung keine lokale Spannungsspitze entsteht. Die maximalen

Spannungswerte betragen in y-Richtung ca. 30 % bis 40 % der Werte der Spannungsspitzen in x-Richtung. Dagegen sinken die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT unmittelbar am Riss um ca. 20 % gegenüber den Werten in der ungerissenen HGT ab (siehe Anlage 6.2).

In Abb. 6.3.3 sind die Spannungsverteilungen der  $\sigma_x$ -Spannungen über die Dicke der Fahrbahnbefestigung für beide Zustände „ohne“ und „mit Riss in der HGT“ unmittelbar im Rissbereich dargestellt. Während vor dem Auftreten des Risses der Asphalt über die gesamte Dicke im Druckbereich lag, treten danach an der Unterseite des Asphaltdecks deutliche Zugspannungen auf, wobei die Spannungsspitze im Asphalt unmittelbar über dem Riss deutlich zu erkennen ist. Bereits 2 cm über der Schichtgrenze betragen die  $\sigma_x$ -Spannungen im Asphalt nur noch ca. 20 % des Maximalwertes.

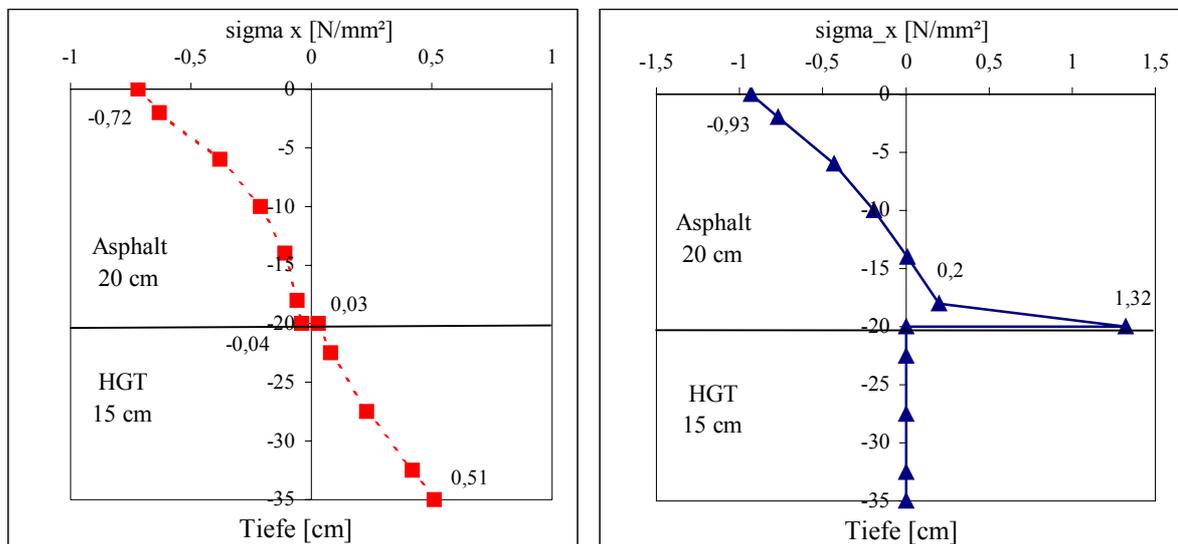


Abb. 6.3.3: Spannungsverteilung der  $\sigma_x$ -Spannungen über die Dicke des Fahrbahnsystems  
 links: ungerissene HGT                      rechts: mit HGT-Riss  
 mittig unter einer Verkehrsbelastung

Während unmittelbar am Riss zwischen den beiden Systemen erhebliche Unterschiede in der Verteilung der Biegespannungen in x-Richtung zu erkennen sind, verringern sich diese Unterschiede rasch mit zunehmendem Abstand in Plattenlängsrichtung, dies wird in Abb.6.3.4 sehr deutlich. Auffallend ist die große und lokal eng begrenzte Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltdecks beim System mit Riss in der HGT. Bereits 2 cm seitlich neben dem Riss nehmen die Spannungswerte auf ca. 60 % des Maximalwertes ab. Diese Spannungsspitze kann bei einer gleichzeitig vorhandenen Zugbeanspruchung, z. B. aus Temperatur, die unter Um-

ständen den Riss in der HGT erst ausgelöst hat, zu einem Anriss des Asphalttes an der Unterseite führen.

Die quantitative Größe der Spannungsspitze unmittelbar an der Unterseite des Asphalttes hängt neben der Art und Größe der Belastung auch von der Rissbreite in der HGT ab, und könnte mit den Methoden der Bruchmechanik ggf. weiteruntersucht werden.

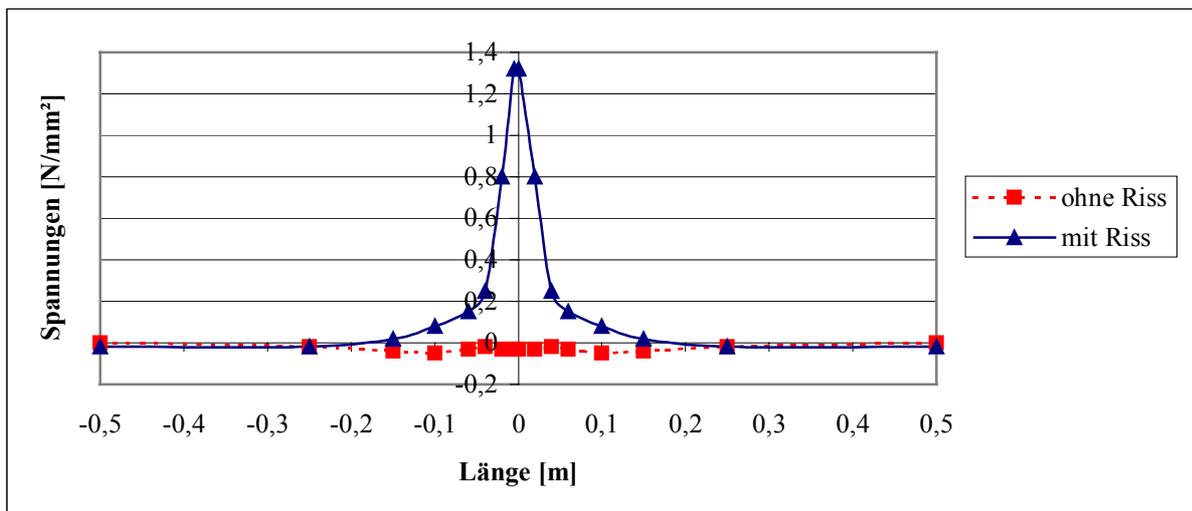


Abb. 6.3.4:  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an der Unterseite des Asphalttes am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT unter Verkehrsbelastung

An der Unterseite der HGT gehen die Spannungen durch den entstehenden Riss in der unmittel-

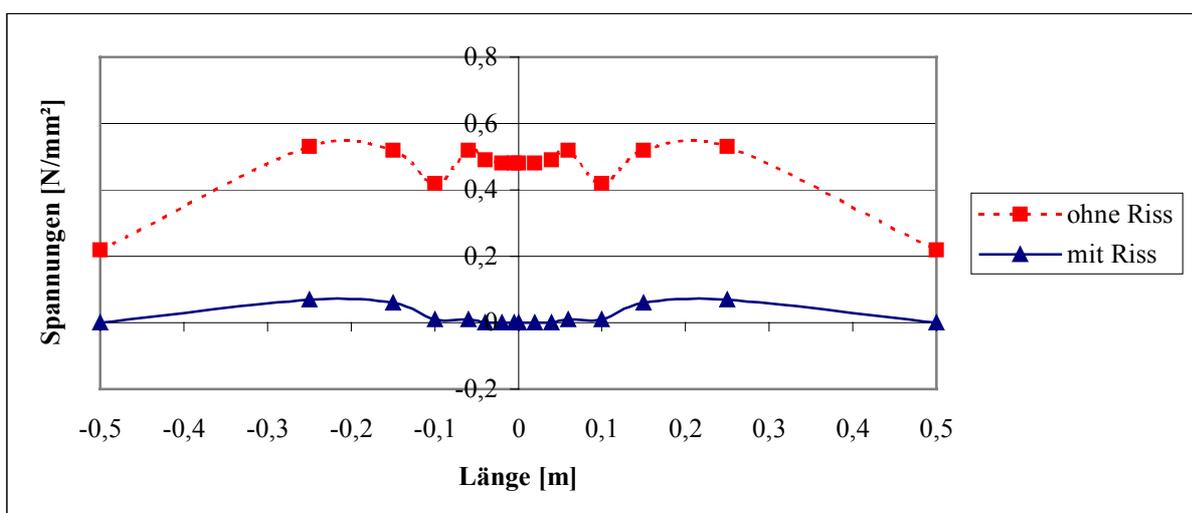


Abb. 6.3.5:  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT unter Verkehrsbelastung

telbaren Umgebung auf Null zurück und bauen sich erst in einem gewissen Abstand davon allmählich wieder auf, siehe Abb. 6.3.5.

Die Spannungsverteilungen der Biegespannungen in Plattenquerrichtung sind in Anlage 6.3 dargestellt. Die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltbelags steigen beim Vorhandensein eines Risses auf eine große Breite an und haben einen Maximalwert in der Lastachse.

An der Unterseite der HGT sinken die  $\sigma_y$ -Spannungen durch den Riss um ca. 30 % ab, die Abnahme der Biegespannungen erfolgt relativ gleichmäßig über eine größere Breite, d. h. das Tragverhalten der HGT in y-Richtung ändert sich im Gegensatz zur x-Richtung nicht grundlegend, es findet aber auch hier eine Spannungsverlagerung von der HGT in die Asphalt-schichten statt (siehe Anlage 6.3).

Die maximale Einsenkung des ungerissenen Systems beträgt 0,1 mm, beim System mit Riss 0,11 mm. Die Zunahme beträgt 10 %, absolut betrachtet jedoch lediglich 0,01 mm. Für die Praxis bedeutet dies, dass ein einzelner Riss in der HGT unter einer intakten 20 cm dicken Asphaltdecke nicht eindeutig festgestellt werden kann, da die sonstigen Einflüsse und Schwankungen, wie z. B. die Temperatur des Asphaltbelags oder die Schichtdicken, deutlich größere Schwankungen bei Einsenkungsmessungen hervorrufen als das Vorhandensein eines Risses.

Die an der Unterseite des Asphaltbelags auftretende lokale Spannungsspitze hängt von der Schichtstärke des darüber liegenden Asphaltbelags ab, siehe Abb. 6.3.6.

Beim Vergleich der Spannungsverhältnisse an der Unterseite des Asphaltbelags fällt auf, dass bei den ungerissenen Systemen Druck- oder mit zunehmender Dicke des Asphaltbelags sehr kleine Zugspannungen vorhanden sind, während bei den Systemen mit Riss die Zugspannungsspitze mit abnehmender Schichtdicke zunimmt, siehe Abb. 6.3.6. Für eine Asphaltüberdeckung von 12 cm ist die Spannungsspitze um ca. 42 % größer als bei 26 cm Asphaltüberdeckung. Dies bestätigt die in der Praxis gemachte Erfahrung, dass bei dünnen Asphaltüberdeckungen Reflexionsrisse eher und schneller entstehen als bei größeren Asphaltbelagstärken.

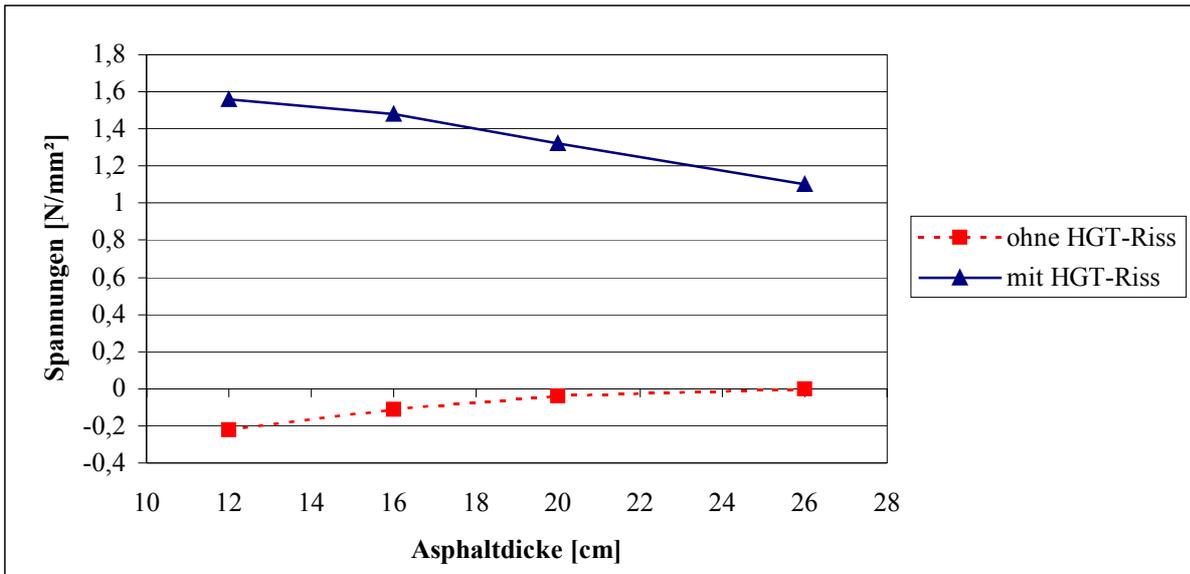


Abb. 6.3.6:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Abhängigkeit von der Asphaltstärke unter Verkehrsbelastung

Im Gegensatz dazu werden die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes beim Vorhandensein eines Risses wesentlich weniger von der darüber liegenden Asphaltstärke beeinflusst; so beträgt die Zunahme der Biegespannungen in y-Richtung bei einer Reduzierung der Asphaltstärke von 26 cm auf 12 cm nur ca. 18 % (siehe Anlage 6.4).

Die Biegespannungen in Plattenquerrichtung an der Unterseite der HGT unmittelbar am Riss wachsen in Abhängigkeit von der Asphaltüberdeckung bei 12 cm Asphaltstärke gegenüber 26 cm Asphaltüberdeckung um ca. 100 % an, wobei die Spannungswerte bei den Deckensystemen mit Riss immer um ca. 30 % kleiner sind als bei den Deckensystemen ohne Riss (siehe Anlage 6.4).

Der Verlauf der Hauptspannungen  $\sigma_1$  entspricht nahezu dem Verlauf der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, wobei sich mit zunehmender Asphaltstärke die Größen der beiden Spannungen aufgrund der kleiner werdenden Schubspannungen immer mehr annähern, siehe Abb. 6.3.7.

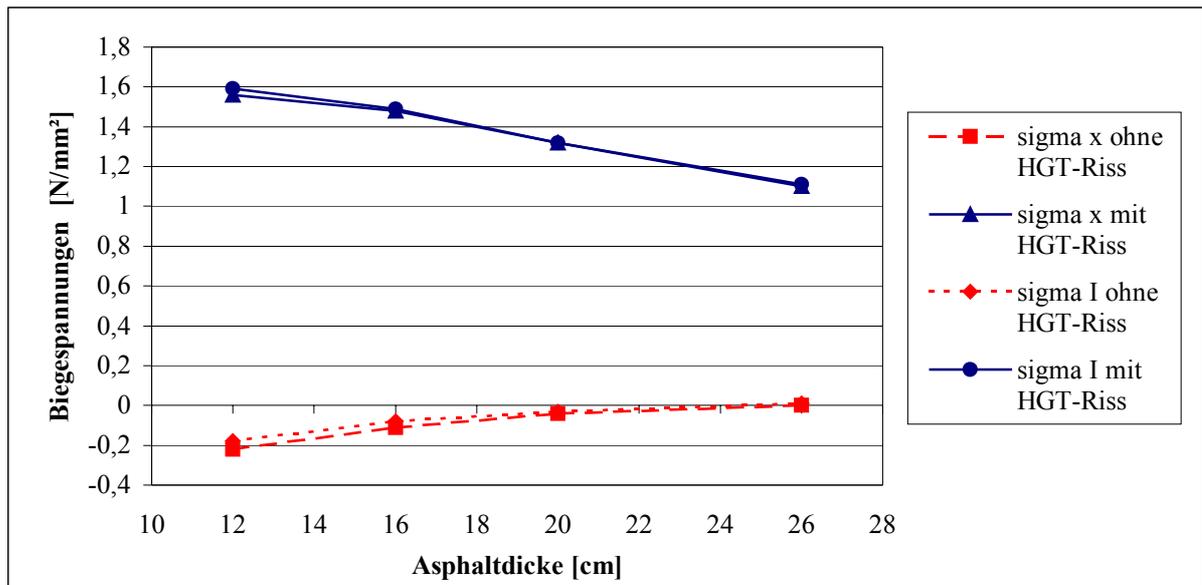


Abb. 6.3.7:  $\sigma_x$  - und  $\sigma_I$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Abhängigkeit von der Asphaltstärke unter Verkehrsbelastung

Die Einsenkungen an der Oberkante (OK) Fahrbahn bei Deckensystemen mit einem Riss in der HGT vergrößern sich je nach Dicke der Asphaltüberdeckung zwischen 20 % (bei 12 cm Asphalt) und ca. 10 % (bei 26 cm Asphalt), siehe Abb. 6.3.8.

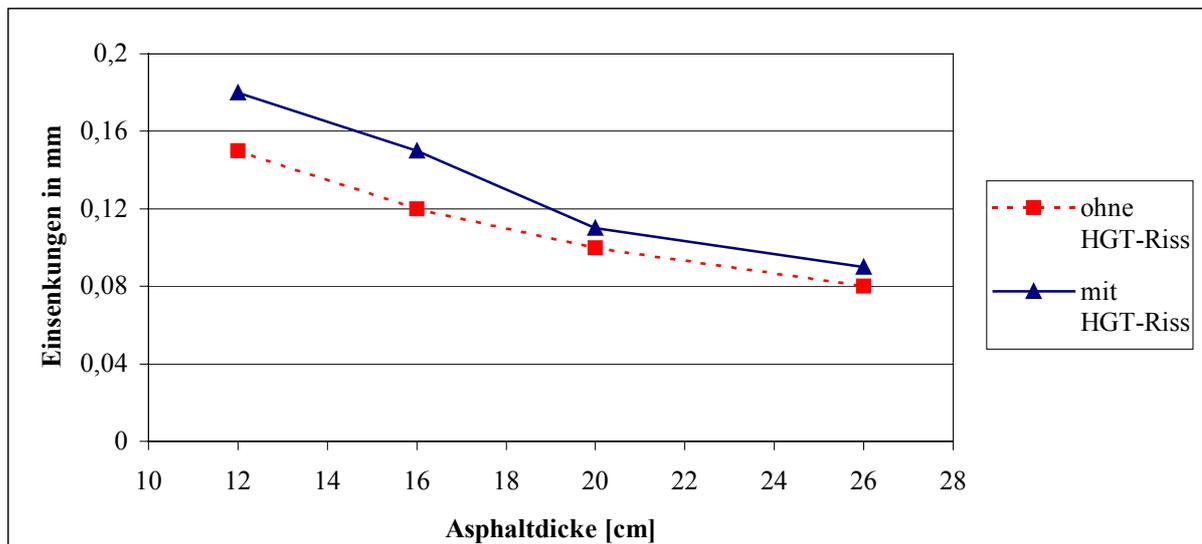


Abb. 6.3.8: Einsenkungen an OK Fahrbahn für Deckensysteme ohne und mit HGT-Riss in Abhängigkeit von der Asphaltstärke unter Verkehrsbelastung

Deren absolute Zunahme beträgt beim Entstehen eines Risses je nach Dicke der Asphaltüberdeckung zwischen 0,01 mm und 0,03 mm und ist somit unter den in der Praxis vorkommenden Randbedingungen und Schwankungen der maßgebenden Parameter durch Einsenkungsmessungen nicht eindeutig nachweisbar.

### 6.3.2 Temperaturbelastung

Bei einer Abkühlung eines Deckensystems mit Asphalt auf HGT um 5 K entstehen aufgrund der behinderten Ausdehnungsmöglichkeiten sowohl in x- als auch in y-Richtung Temperaturspannungen. Zur Veranschaulichung werden die Spannungsverläufe der  $\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen als farbige Höhengichtlinienverläufe über die komplette Höhe der Deckensysteme dargestellt.

Für das Deckensystem ohne Riss in der HGT ist deutlich die horizontale Schichtgrenze zwischen Asphalt und HGT zu erkennen, siehe Abb. 6.3.9. Aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffkennwerte (E-Modul,  $\alpha_T$ ) weisen die beiden Schichten unterschiedlich große Spannungen auf. Da die Absolutwerte relativ nahe bei 1 N/mm<sup>2</sup> liegen, kommen beim Übergang vom gröber unterteilten Außenbereich zum feiner modellierten Innenbereich in der HGT die dargestellten Unstetigkeitsstellen vor.



Abb. 6.3.9: Höhengichtlinien der  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an einem System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT **ohne Riss** bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K

Bei Vorhandensein eines Risses entsteht in der HGT eine nahezu spannungsfreie Zone um den Riss, die Spannungen verlagern sich nach oben in die Asphaltschichten und an der Unterseite der Asphaltschicht entsteht eine lokale Spannungsspitze mit einer  $\sigma_x$ -Spannung, die etwa dem 6-fachen der Spannungswerte im ungestörten Bereich entspricht, siehe Abb. 6.3.10.

Die räumliche Ausdehnung der Spannungsverlagerung in Plattenlängsrichtung beträgt auf beiden Seiten des Risses jeweils ca. 25 cm.

Gleichzeitig findet auch in Plattenquerrichtung am Riss eine Spannungsumlagerung statt (siehe Anlage 6.5). Die Zugspannungen  $\sigma_y$  im Asphalt steigen unmittelbar an der Schichtgrenze ebenfalls deutlich an, sie erreichen aber nur maximal ca. 50 % der Werte der Spannungsspitzen in Plattenlängsrichtung (siehe Anlage 6.6). Die Zugspannungen  $\sigma_y$  in der HGT nehmen in Plattenquerrichtung geringfügig ab (siehe Anlage 6.6).

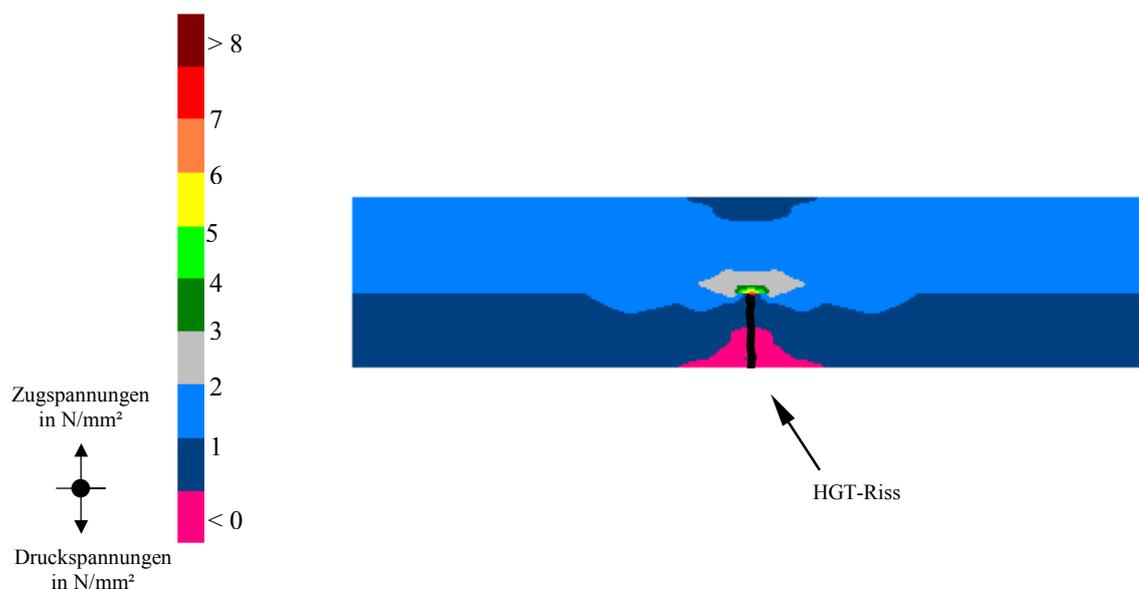


Abb. 6.3.10: Höhengschichtlinien der  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an einem System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT **mit Riss** bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K

Während vor dem Auftreten des Risses sowohl im Asphalt als auch in der HGT jeweils konstante Spannungsverteilungen über die Dicke vorhanden sind, tritt beim System mit gerissener HGT an der Unterseite des Asphalt über dem Riss eine lokale Spannungsspitze mit einem Spannungswert auf, der vom Asphalt unter Umständen nicht aufgenommen werden

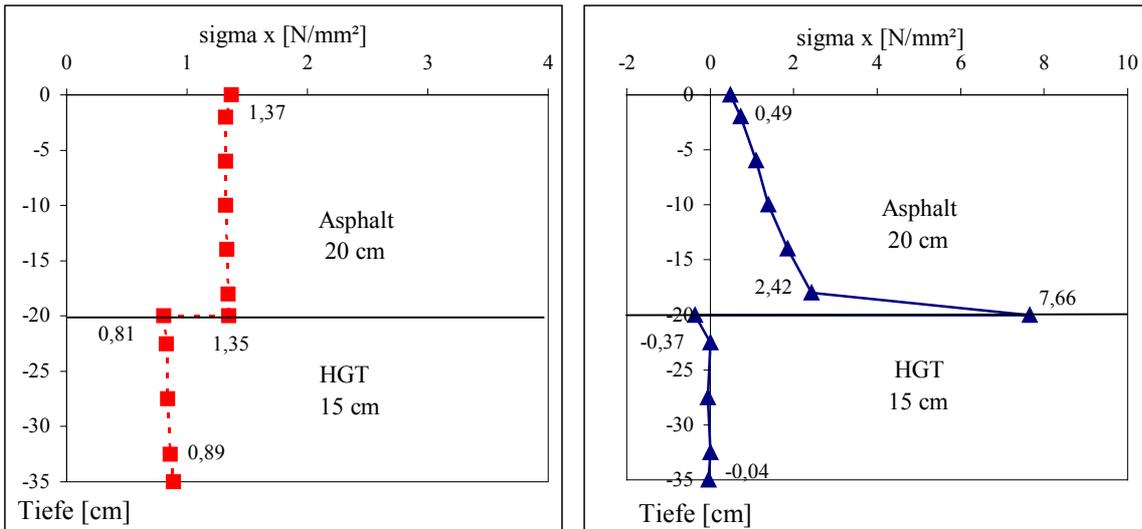


Abb. 6.3.11: Spannungsverteilung der  $\sigma_x$ -Spannungen über die Dicke des Fahrbahnsystems bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K  
links: ungerissene HGT      rechts: mit HGT-Riss

kann, d. h. es kommt möglicherweise zu einem örtlichen Materialversagen falls keine Entspannung durch Relaxation stattfindet, siehe Abb. 6.3.11. Bereits 2 cm über der Unterseite des Asphalttes sind die  $\sigma_x$ -Spannungen auf ca. 30 % des Maximalwertes abgesunken.

In Plattenlängsrichtung beschränken sich die Unterschiede der  $\sigma_x$ -Spannungen in beiden

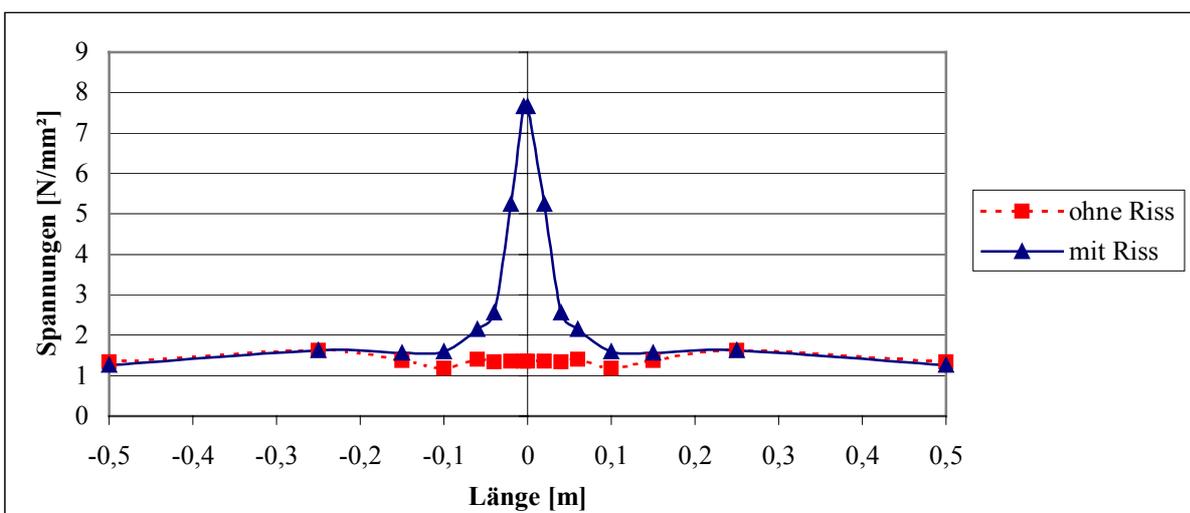


Abb. 6.3.12:  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an der Unterseite des Asphalttes am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT bei einer Abkühlung um 5 K

Deckensystemen auf einen Bereich von jeweils ca. 25 cm um den Riss, siehe Abb. 6.3.12. Bereits 2 cm neben dem Riss verringern sich die Spannungswerte um 1/3.

In der HGT werden die Spannungen im Bereich des Risses erheblich reduziert und bauen sich erst mit zunehmendem Abstand in Plattenlängsrichtung wieder auf, siehe Abb. 6.3.13.

Es erfolgt auch beim Temperaturlastfall eine Spannungsverlagerung von der HGT in die Asphaltsschichten.

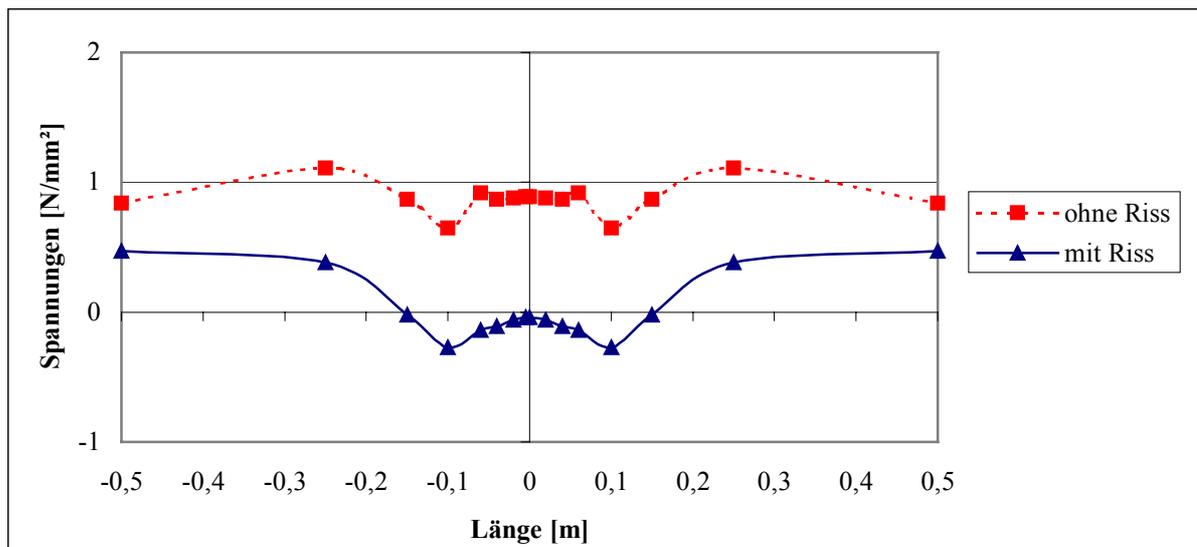


Abb. 6.3.13:  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT bei einer Abkühlung um 5 K

Die vertikalen Verformungen eines ungerissenen Systems bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K betragen einheitlich über die gesamte Plattenlänge 0,14 mm und werden im Wesentlichen durch das Eigengewicht der Fahrbahnplatte verursacht, siehe Abb. 6.3.14. Eine Verwölbung der Platte zwischen Plattenmitte und -rand ergibt sich bei diesem System nicht, bzw. sie ist kleiner als 0,01 mm.

Beim Deckensystem mit einem Riss in der HGT erhöht sich die vertikale Verformung an der Fahrbahnoberkante über dem Riss (Plattenmitte) auf 0,21 mm, während sie an den Rändern (volle Einspannung) auf 0,12 mm zurückgeht. Daraus ergibt sich eine Verwölbung von 0,09 mm zwischen Plattenmitte und Plattenrand in Längsrichtung, es findet ein sogenanntes „Aufwölben“ der Plattenränder, d. h. zwischen den Rissen statt, siehe Abb. 6.3.14.

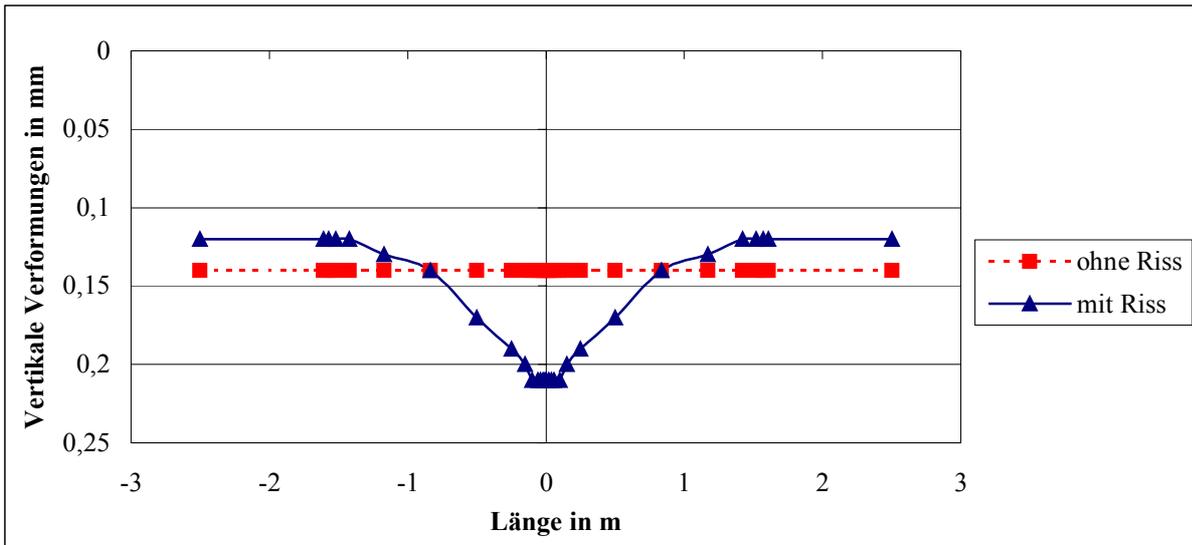


Abb. 6.3.14: Vertikale Verformungen in Plattenlängsrichtung an der Fahrbahnoberseite am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT bei einer Abkühlung um 5 K

Diese Verwölbungen hängen von den Werkstoffkennwerten (E-Modul,  $\alpha_T$ ) der einzelnen Schichten und der Asphaltstärke des Deckensystems ab. In Abb. 6.3.15 sind die Differenzen der vertikalen Verformungen zwischen Plattenmitte und Plattenrand in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für Deckensysteme ohne und mit Riss in der HGT aufgetragen.

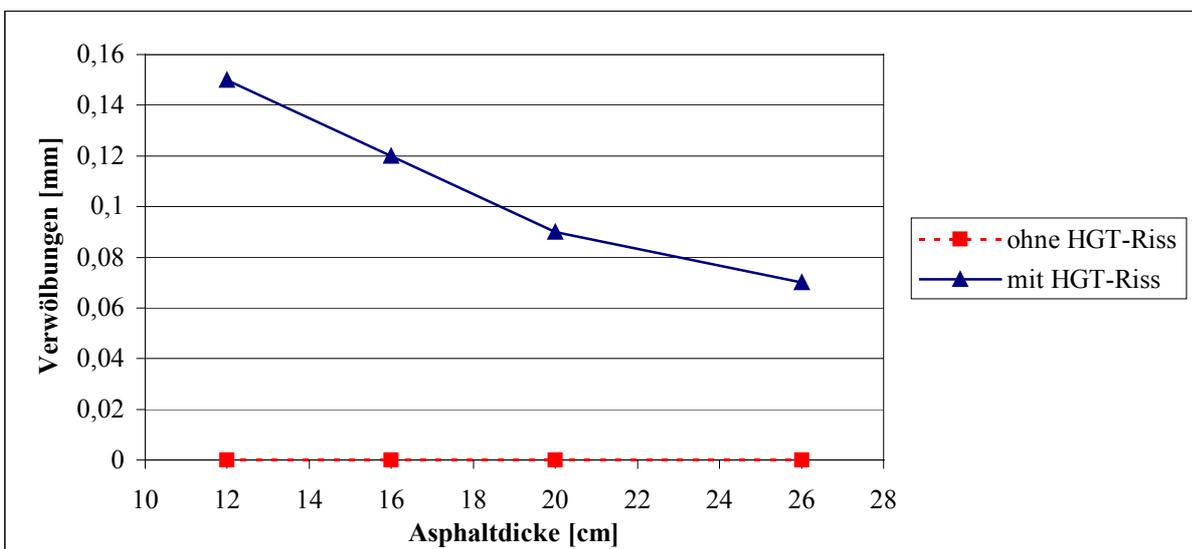


Abb. 6.3.15: Verwölbungen zwischen Plattenmitte und Plattenrand an OK Fahrbahn für Systeme ohne und mit HGT-Riss in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für eine gleichmäßige Abkühlung um 5 K

Mit zunehmender Asphaltstärke verringern sich die Verwölbungen zwischen der Plattenmitte und den Rändern aufgrund des zunehmenden Widerstandsmomentes des Asphaltüberbaus. Die Verformungen sind insgesamt als sehr gering zu bezeichnen; in der Praxis lassen sie sich wohl nur mit großem messtechnischen Aufwand nachweisen. Allerdings könnten sie beim Abtrocknen einer feuchten Fahrbahnoberfläche optisch in Erscheinung treten. Bei den Deckensystemen mit ungerissener HGT gibt es praktisch keine Verwölbungen und zwar bei allen Asphaltstärken.

Für Deckensysteme ohne HGT-Riss sind die  $\sigma_x$ -Spannungen bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K erwartungsgemäß unabhängig von der Asphaltstärke, während bei den Systemen mit HGT-Riss mit zunehmender Asphaltstärke eine Abnahme der lokalen Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes beobachtet werden kann, siehe Abb. 6.3.16. Gegenüber einer Asphaltstärke von 12 cm weist eine 26 cm dicke Asphaltbefestigung eine um ca. 10 % niedrigere Spannungsspitze auf. Bei allen Aufbauten ist die lokale Spannungsspitze so groß, dass es zu einem örtlichen Fließen des Materials kommen wird bzw. durch ein Lösen des Verbundes zwischen Asphalt und HGT wird sich die Spannungsspitze auf eine größere Dehnlänge verteilen und damit reduzieren (siehe Kapitel „Einfluss des Verbundes“).

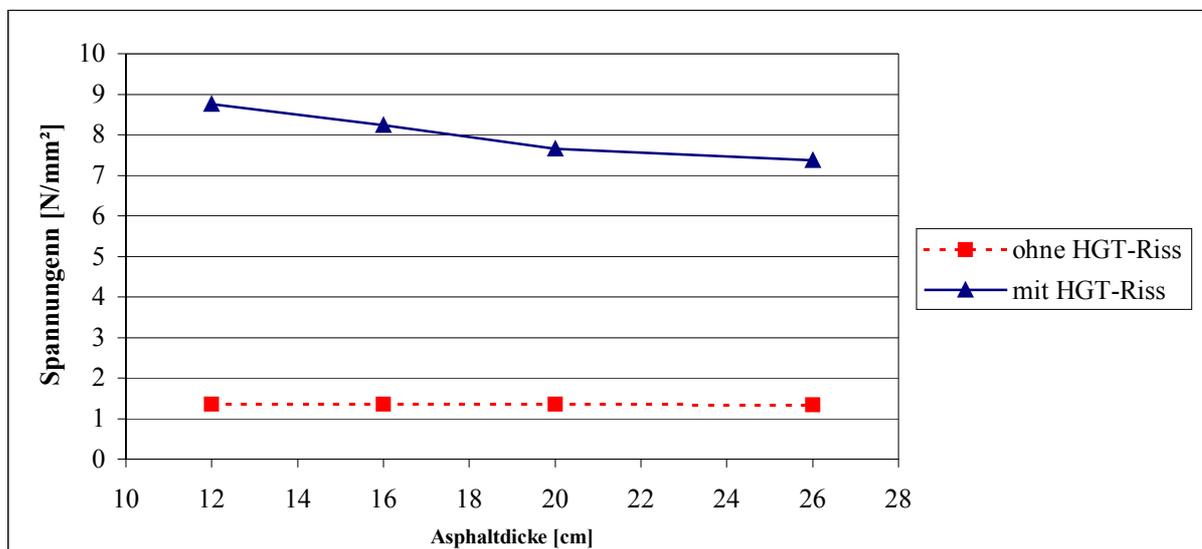


Abb. 6.3.16:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Abhängigkeit von der Asphaltstärke bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K

Für die  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung ergeben sich für die Deckensysteme mit ungerissener HGT dieselben Spannungswerte wie in Plattenlängsrichtung (siehe Anlage 6.7).

Bei Systemen mit Riss in der HGT gilt für die Zugspannungen an der Unterseite des Asphalttes für alle Asphaltstärken in etwa der beim Grundsystem festgestellte Zusammenhang, dass die maximalen  $\sigma_y$ -Spannungen ca. 50 % der Werte der Spannungsspitzen in Plattenlängsrichtung betragen (siehe Anlage 6.7).

Die Zugspannungen in Plattenquerrichtung an der Unterseite der HGT unmittelbar am Riss sind sowohl bei den Deckensystemen ohne als auch mit Riss unabhängig von der Asphaltstärke, wobei bei den ungerissenen Systemen ca. 16 % größere Spannungswerte auftreten (siehe Anlage 6.7).

Die Spannungswerte der Hauptspannung  $\sigma_1$  in Plattenmitte an der Unterseite des Asphalttes sind nahezu identisch mit dem Werten der  $\sigma_x$ -Spannungen an dieser Stelle, dies gilt nicht nur für das Grundsystem sondern auch für den Einfluss der Asphaltstärken auf die Größe der Hauptspannungen an dieser Stelle (siehe Anlage 6.8).

### 6.3.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung

Bei den Deckensystemen ohne Riss führt eine Berechnung der gleichzeitigen Beanspruchungen aus Verkehr und Temperatur gegenüber der Überlagerung der einzelnen Lastfälle nur zu Abweichungen aufgrund von Rundungsdifferenzen (siehe Anlage 6.9), da hier eine Superposition der Lastfälle möglich ist.

Bei den Deckensystemen mit Riss in der HGT, bei denen aufgrund der nichtlinearen (iterativen) Berechnungen keine Überlagerung der Lastfälle möglich ist, wird die Biegebeanspruchung in Plattenmitte weitgehend von der Temperaturbelastung bestimmt. An der Unterseite des Asphalttes über dem Riss entsteht eine Spannungsspitze, die um ca. 10 % unter dem Spannungswert liegt, der sich bei einer näherungsweise Überlagerung der Spannungen aus Temperatur und Verkehr errechnen würde. In den Bereichen, in denen die Unterschiede zwischen den Systemen ohne und mit Riss sehr klein waren, kann eine einfache Überlagerung der beiden Lastfälle eine sehr gute Näherung darstellen. Je nach betrachtetem Punkt und untersuchter Schnittkraft ergeben sich unterschiedliche Größen der Einflussbereiche. So sind z. B. bei den Biegespannungen  $\sigma_x$  in Plattenlängsrichtung an der Unterseite des Asphalttes nach den Abb. 6.3.4 und 6.3.12 nur im Bereich zwischen ca. 25 cm links und rechts vom Riss Abweichungen vorhanden (siehe Anlage 6.10). Im Normalfall werden bei einer Überlagerung der beiden Lastfälle die Spannungen gegenüber dem Kombinationslastfall überschätzt, allerdings betragen die Unterschiede i. Allg. weniger als 5 %. Lediglich an der Unterseite der HGT sind beim

Übergang vom feiner modellierten Innenbereich zum Außenbereich etwas größere Abweichungen vorhanden.

Bei den  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes ergeben sich in Plattenquerrichtung auf eine deutlich größere Breite Unterschiede (siehe Anlage 6.11), wobei bei der Überlagerung um ca. 10 % zu hohe Spannungswerte ermittelt werden. An der Unterseite der HGT treten zwischen der Überlagerung der beiden Lastfälle und dem Kombinationslastfall nur noch vernachlässigbare Unterschiede auf.

Die Einsenkungen beim Grundsystem unterscheiden sich in Plattenmitte zwischen der Überlagerung der beiden Lastfälle und dem Kombinationslastfall lediglich um 0,02 mm, am Rand sind die Einsenkungen identisch.

#### **6.3.4. Zusammenfassung**

In einem Deckensystem mit einer gerissenen HGT in Querrichtung entstehen unter Verkehrs- und/oder Temperaturbelastung in Plattenlängsrichtung über dem Riss an der Unterseite des Asphalttes lokale Spannungsspitzen (siehe Abb. 6.3.4 und 6.3.12), die in der Längsrichtung sehr schnell wieder abgebaut werden. Durch den Riss nimmt die Biegebeanspruchung der HGT sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ab, es findet eine Spannungsverlagerung in die darüber liegenden Asphaltsschichten statt.

Im Vergleich zur Verkehrsbelastung fällt auf, dass aus Temperaturbeanspruchung eine wesentlich höhere Spannungsspitze (6-facher Wert) an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss auftritt, wobei das Relaxationsvermögen des Asphalttes bei der Bewertung dieser Spannungsspitze zu berücksichtigen ist. Derartig hohe Spannungswerte kann der Asphalt - falls sie tatsächlich auftreten - nicht aufnehmen, d. h. es findet ein örtliches Fließen statt oder der Asphalt reißt an der Unterseite an. Dies entspricht auch den in der Praxis gemachten Erfahrungen, bei denen nach kalten Winternächten über die gesamte Fahrbahnbreite Querrisse im Asphalt festgestellt wurden, teilweise ohne zusätzliche Verkehrsbelastung. Da die Spannungen in Plattenquerrichtung nur ca. 50 % der Werte der Plattenlängsrichtung betragen, ist das Auftreten von Querrissen dominierend.

Die Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem HGT-Riss hängt von der darüber liegenden Asphalttdicke ab, sie wächst mit abnehmender Dicke des Asphalttes für beide Lastfälle deutlich an.

In der Praxis kann anhand von Einsenkungsmessungen nicht zweifelsfrei festgestellt werden, ob unter einer oberflächlich intakten Asphaltenschicht die HGT gerissen ist oder nicht, da die Zunahme der Einsenkungen bei den Systemen mit Riss in der HGT nur wenige hundertstel Millimeter beträgt und aufgrund der natürlichen Schwankungen der einzelnen Parameter (Schichtdicke, Elastizitätsmodul, Temperatur usw.) innerhalb des Toleranzbereiches von Einsenkungsmessungen liegt.

Die Größe der Einsenkungen und Spannungen beim gleichzeitigen Vorhandensein einer Verkehrs- und Temperaturbelastung kann mit einer einfachen Überlagerung der beiden Lastfälle auf der sicheren Seite abgeschätzt werden.

Für HGT unter Asphaltenschichten, die aufgrund der Festlegungen in den ZTVT [7] auch in Längsrichtung gekerbt werden müssen, gelten die Aussagen sinngemäß.

## 6.4 Einfluss des Verbundes

Ausgehend von einem Riss in der HGT kann sich der Verbund zwischen Asphalt und HGT allmählich lösen. Mit dem Verfahren Westergaard/Eisenmann lassen sich nur die beiden Grenzfälle „voller Verbund“ und „kein Verbund“ untersuchen. Mit dem Programm BISAR ist es möglich mit Hilfe eines Verbundfaktors auch Zwischenzustände zu untersuchen, wobei der Verbundfaktor immer für die gesamte Grenzfläche zwischen zwei benachbarten Schichten gilt. Ein von einer Schadstelle ausgehendes abschnittsweises Lösen des Verbundes lässt sich mit beiden Verfahren nicht simulieren; dieses Problem soll mit Hilfe des FE-Modells analysiert werden.

In den ersten Voruntersuchungen waren zwischen Asphalt und HGT feste Kopplungen eingefügt worden. Wegen der besseren Übersichtlichkeit musste die Bearbeitung jeweils am Balkenmodell in MONET durchgeführt und anschließend die Balken wieder zu einer Platte zusammengefügt werden. Im Anschluss wurden für die neu entstandenen Systeme die Datensätze erneut generiert.

Die Kopplungen schufen einen festen Verbund zwischen den beiden Schichten Asphalt, d. h. benachbarte Knoten auf beiden Seiten des horizontalen Spaltes wiesen die gleichen Verformungen auf. Für den vollen Verbund war dies eine richtige Darstellung der Realität.

Zum abschnittsweise Lösen des Verbundes wurden gem. Abb. 6.4.1 die Kopplungen auf beiden Seiten des Risses auf die gesamte Breite reihenweise parallel zum Riss entfernt.

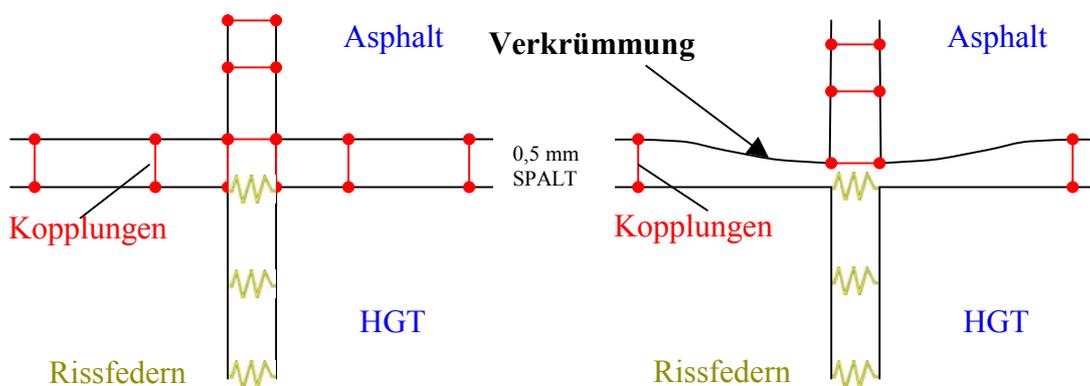


Abb. 6.4.1: Schematische Darstellung des „Koppel-Modells“ im Rissbereich  
links: voller Verbund      rechts: je zwei Kopplungen gelöst

Der vorhandene 0,5 mm breite Spalt zwischen den Schichten blieb beim abschnittsweisen Lösen des Verbundes erhalten.

Durch diese Art der Modellierung fehlte der Asphalt schicht im gelösten Bereich des Verbundes die vertikale Auflagerung der Asphaltteile. Sie konnten sich nach unten verformen und die erste nicht mehr entfernte Kopplung erhielt eine Art Auflagerfunktion mit einer entsprechenden Druckbeanspruchung, siehe Abb. 6.4.1.

Im gesamten, gelösten Bereich entstanden an der Asphaltunterseite vornehmlich Druckspannungen, obwohl hier in Wirklichkeit Zugbeanspruchungen auftreten müssen. Dieses „Koppel-Modell“ war für die wirklichkeitsnahe Untersuchung der Spannungen an der Asphaltunterseite beim Lösen des Verbundes in Teilbereichen daher nicht geeignet.

In einem zweiten Schritt wird ein „Feder-Modell“ erzeugt. Dazu werden in MONET in den Spalt zwischen benachbarten Knoten des Asphaltes und der HGT vertikale (CP) und horizontale (CQ) Federn eingefügt, siehe Abb. 6.4.2. Das Lösen des Verbundes lässt sich nun durch eine Variation der horizontalen Federsteifigkeit simulieren. Wird diese sehr klein ( $CQ = 1 \text{ N/mm}$ ), ist der Verbund gelöst, bzw. bei einer sehr hohen Federsteifigkeit ( $CQ = 2 \text{ Mio. N/mm}$ ) herrscht voller Verbund.

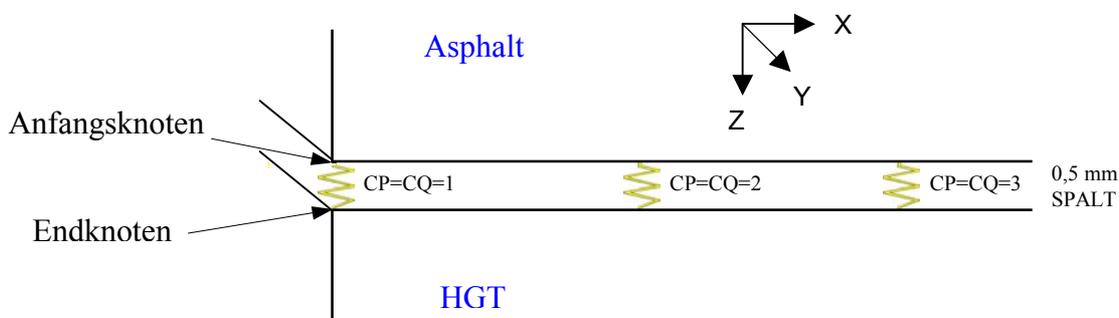


Abb. 6.4.2: Einbau von Federn im Bereich des Schichtwechsels

Idealerweise soll das Lösen des Verbundes so erfolgen, dass eine erneute Bearbeitung in MONET und eine neue Generierung des Systems nicht mehr erforderlich ist. Dies trifft beim FE-Programm SOFISTIK zu; dort können die Federsteifigkeiten im Texteditor TEDdy geändert werden. Ein Problem besteht darin, am generierten System die genaue Lage der einzelnen Federn im Gesamtsystem festzustellen, um den Verbund - ausgehend vom Riss in der HGT - gezielt und möglichst einfach zu lösen.

Dies lässt sich erreichen, indem bei der ersten Erstellung des Balkens in MONET die Federn in einer ganz bestimmten Reihenfolge und mit entsprechenden Federsteifigkeiten erzeugt werden. Die erste Reihe direkt am Riss erhält die vertikale und horizontale Federsteifigkeit von 1 N/mm; die nächsten Federreihen Federsteifigkeiten in aufsteigender Nummerierung entsprechend dem zunehmenden Abstand der jeweiligen Federreihe vom Riss, siehe Abb. 6.4.2. Dies erleichtert zusammen mit der Gruppenzuordnung das schnellere Auffinden der Federn im anschließend generierten Datensatz. Im Texteditor ist es jetzt möglich, die Federsteifigkeiten entsprechend den zu untersuchenden Verbundzuständen zu modifizieren.

Die vertikale Federsteifigkeit CP ist beim Lösen des Verbundes nicht betroffen, sie erhält einen einheitlichen Wert von 2 Mio. N/mm.

Diese Vorgehensweise hat sich nach den Voruntersuchungen als die geeignetste Variante erwiesen; sie erlaubt zum einen das abschnittsweise Lösen des Verbundes und stellt zum anderen eine gute Abbildung der Realität dar.

Am Ausgangssystem werden die nachfolgenden Verbundzustände untersucht; diese Schritte wurden gewählt, um die Veränderungen im Tragverhalten des Systems zu verdeutlichen. Es bedeutet beispielsweise „Verbund 4 cm gelöst“, dass auf jeweils 2 cm links und rechts vom HGT-Riss über die gesamte Plattenbreite keine Verbundwirkung mehr zwischen Asphalt und HGT vorhanden ist, während in den übrigen Bereichen immer noch der volle Verbund herrscht.

Verbundzustände:

- Voller Verbund
- Verbund 4 cm gelöst
- Verbund 8 cm gelöst
- Verbund 12 cm gelöst
- Verbund 20 cm gelöst
- Verbund 30 cm gelöst
- Verbund 50 cm gelöst
- Verbund 100 cm gelöst
- Kein Verbund

### 6.4.1 Verkehrsbelastung

Zur Veranschaulichung der Biegebeanspruchung des Deckensystems unter Verkehrsbelastung (Einzellast mit 50 kN) zeigt die Bildfolge in Abb. 6.4.3 die abschnittsweise zunehmende Verbundlösung in Form ausgefüllter Höhenschichtlinien für die  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung über die komplette Dicke auf. Im Anschluss werden die einzelnen Zustände auch zahlenmäßig analysiert.

Die nur für den vollen Verbund abgebildete Farblegende und die Laststellung gelten für alle Systeme. Jede Farbstufe - bis auf die Maximalwerte - entspricht einer Spannungsgröße von 0,1 N/mm<sup>2</sup>.

Ausgangspunkt der Verbundlösung ist das Grundsystem mit einem Riss in der HGT und vollem Verbund. Die relativ hohen Zugspannungen an der Unterseite des Asphaltes konzentrieren sich auf die unmittelbare Umgebung über dem Riss. Außerhalb des unmittelbaren Rissbereiches treten auch an der Oberseite der HGT geringe Zugspannungen auf.

Löst sich der Verbund auf 4 cm bzw. 8 cm Länge, so ergeben sich gegenüber dem Ausgangssystem qualitativ geringe Unterschiede. Der Bereich der Zugspannungen an der Unterseite des Asphaltes ist lokal noch relativ stark begrenzt. An der Oberseite der HGT treten jetzt generell geringe Druckspannungen auf, jedoch nur in der unmittelbaren Rissumgebung. Löst sich der Verbund auf 12 bzw. 20 cm um den Riss, dehnt sich die Zone mit großen Zugspannungen an der Unterseite des Asphaltes entsprechend aus, während sich in der HGT die Druckspannungsbereiche vom Riss ausgehend nach beiden Seiten hin vergrößern, wie sie typisch für Deckensysteme ohne Verbund sind. Spannungsumlagerungen durch das Lösen des Verbundes finden im Wesentlichen nur im Innenbereich des FE-Modells statt, d. h. lediglich im Bereich von 25 cm links und rechts vom Riss, außerhalb davon sind die Veränderungen sehr gering.

Löst sich der Verbund bis auf 50 cm (= Größe des gesamten Innenbereiches des FE-Modells) bzw. weiter auf 100 cm, nehmen die Bereiche mit Zugbeanspruchung an der Asphaltunterseite und mit Druckbeanspruchung an der Oberseite der HGT entsprechend zu. Die Biegebeanspruchung an der Unterseite der HGT ändert sich nur geringfügig.

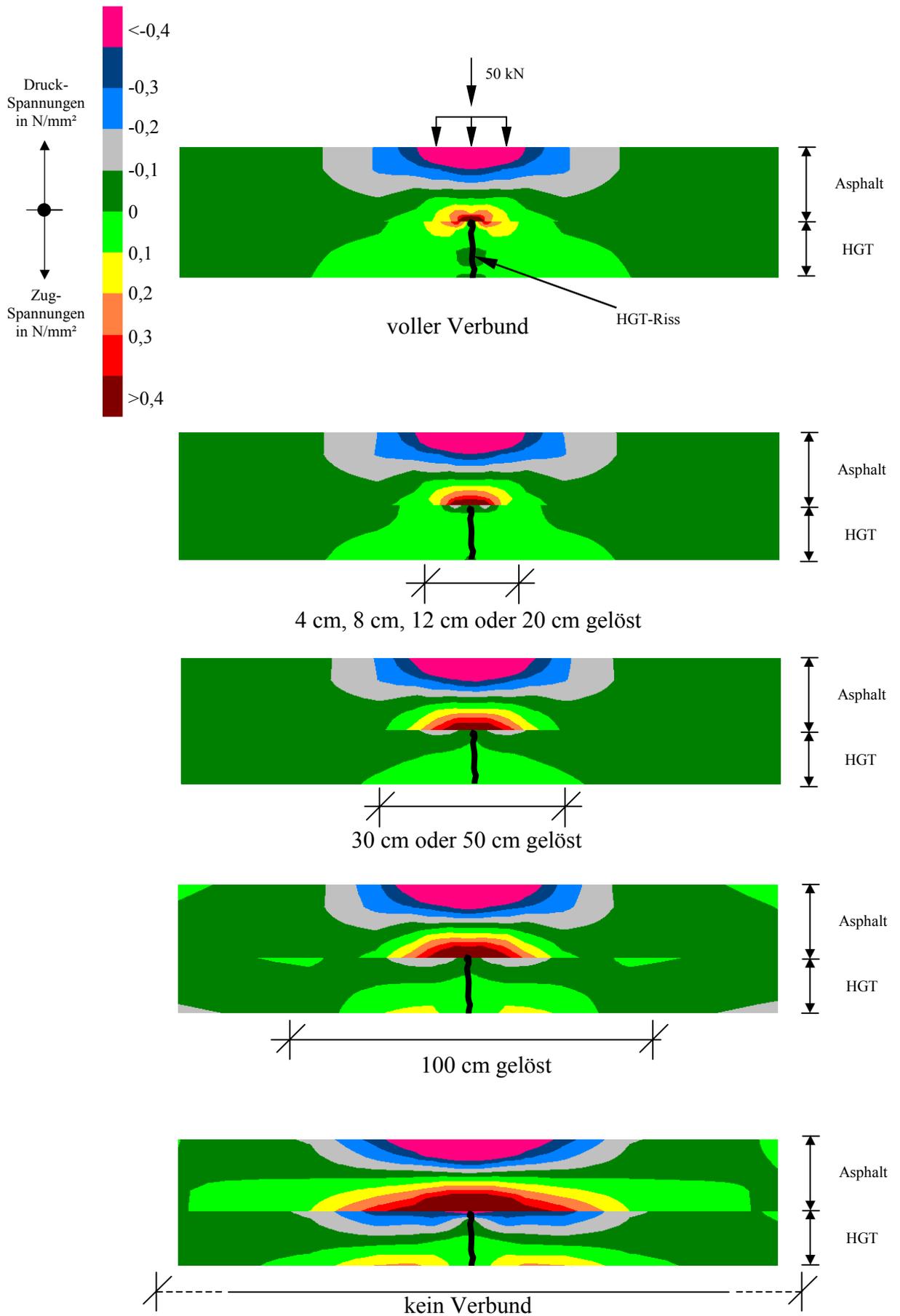


Abb. 6.4.3: Hörschichtlinien der  $\sigma_x$ -Spannungen am Grundsystem beim abschnittsweisen Verbundlösen zwischen Asphalt und HGT unter Verkehrsbelastung

Löst sich der Verbund auf die gesamte Plattenlänge, verdoppelt sich in etwa gegenüber dem Zustand „Verbund auf 100 cm gelöst“ die Größe des Bereiches mit erheblichen Zugspannungen an der Unterseite des Asphaltes. Gleichzeitig treten an der Oberseite der HGT im Rissbereich deutlich größere Druckspannungen auf, und es findet eine erhebliche Verbreiterung des Druckbereiches in Plattenlängsrichtung statt.

Aus dieser Abfolge der Spannungsbilder wird erkennbar, dass sich der Zustand „kein Verbund“ erst einstellt, falls der Verbund auf große Bereiche beiderseitig des Risses gelöst ist.

Nachfolgend werden zunächst die Differenzen der maximalen Einsenkungen  $v_z$  zwischen Plattenmitte und Plattenrand aus Verkehrslast betrachtet, die sich an der Fahrbahnoberseite beim abschnittsweisen Lösen des Verbundes (vom HGT-Riss ausgehend) ergeben:

Verbundzustand	Maximale Einsenkung $v_z$ zwischen Plattenmitte und Plattenrand [mm]	Zunahme der Einsenkung in %
Voller Verbund	0,11	-
4 cm gelöst	0,11	0
8 bis 30 cm gelöst	0,12	9
50 cm gelöst	0,13	18
100 cm gelöst	0,14	27
Kein Verbund	0,22	100

Mit zunehmendem Grad der Verbundlösung steigen die maximalen Einsenkungen von 0,11 mm bei vollem Verbund auf 0,22 mm beim System ohne Verbund, d. h. um 100 %. Dabei fällt auf, dass die Einsenkungen am Anfang der Verbundlösung nicht oder nur relativ langsam anwachsen, so hat sich z. B. für 100 cm gelösten Verbund die Einsenkung erst um ca. 27 % vergrößert. Dies bestätigt die Vermutung, dass der Zustand „kein Verbund“ erst relativ spät erreicht wird.

Nachfolgend werden die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Asphalt- und HGT- Unterseite in Plattenlängsrichtung untersucht. Abb. 6.4.4 gibt die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes mittig unter der Last für die Verbundzustände „voller Verbund“ bis „20 cm gelöster Verbund“ in Plattenlängsrichtung wieder, wobei - wegen der besseren Übersichtlichkeit - nicht alle Einzelschritte aufgenommen sind.

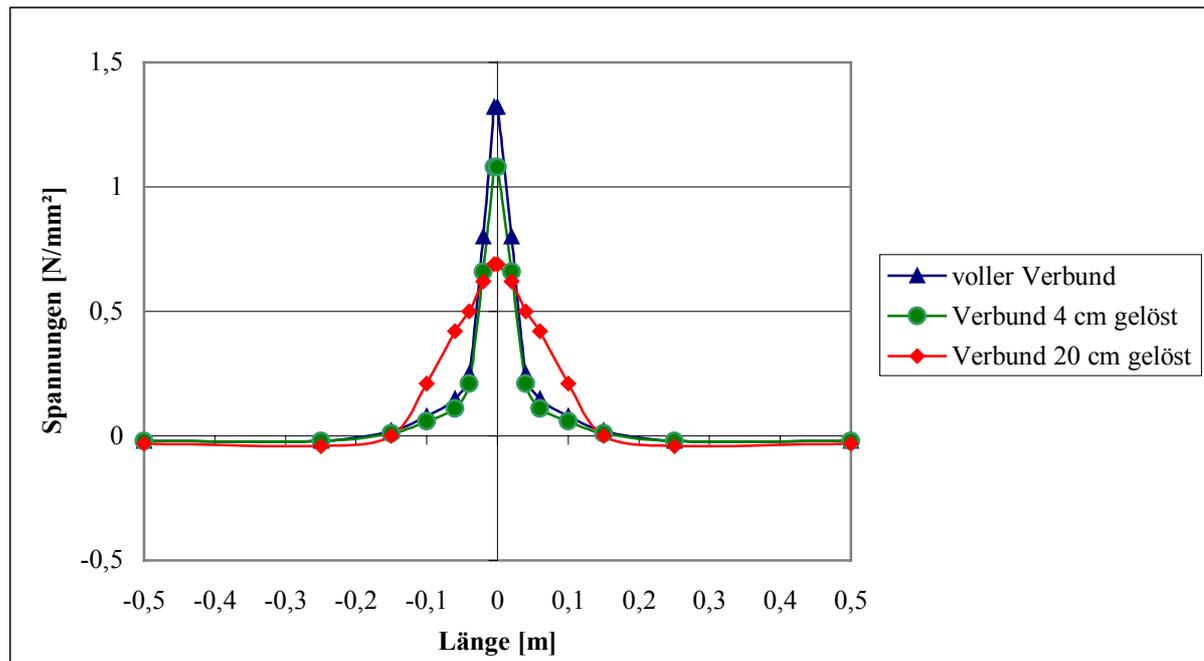


Abb. 6.4.4:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenlängsrichtung bei abschnittsweiser Verbundlösung (voller Verbund – 20 cm Verbund gelöst) am Grundsystem unter Verkehrsbelastung

Ausgehend von der lokalen Spannungsspitze im Asphalt über dem HGT-Riss (gem. Abb. 6.2.4), fällt bei einer Reduzierung der Verbundwirkung unmittelbar am Riss (Reduzierung der horizontalen Federsteifigkeit am Riss) die  $\sigma_x$ -Spannung an der Unterkante (UK) Asphalt schon deutlich ab und erreicht beim Lösen des Verbundes auf 4 cm („Ausfall“ der 1. Feder am Riss) einen Wert von ca. 82 % der Spannungsspitze bei vollem Verbund.

Fehlt der Verbund auf insgesamt 8 cm, vermindert sich die Biegezugspannung über dem Riss gegenüber dem maximalen Wert bereits auf ca. 62 %, gleichzeitig verbreitert sich der Bereich mit großen Zugspannungswerten geringfügig.

Löst sich der Verbund zwischen Asphalt und HGT noch weiter, sinken die Werte der  $\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss weiter ab und erreichen beim Lösen des Verbundes auf insgesamt 20 cm Breite ein Minimum in der Größenordnung von ca. 54 % der Spannungsspitze bei vollem Verbund.

Bei Aufhebung des Verbundes am Grundsystem um mehr als 20 cm, beginnt die Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen wieder anzuwachsen und erreicht bei einem System ohne Verbund

einen Wert, der ca. 85 % der Spannungsspitze bei vollem Verbund entspricht, siehe Abb. 6.4.5.

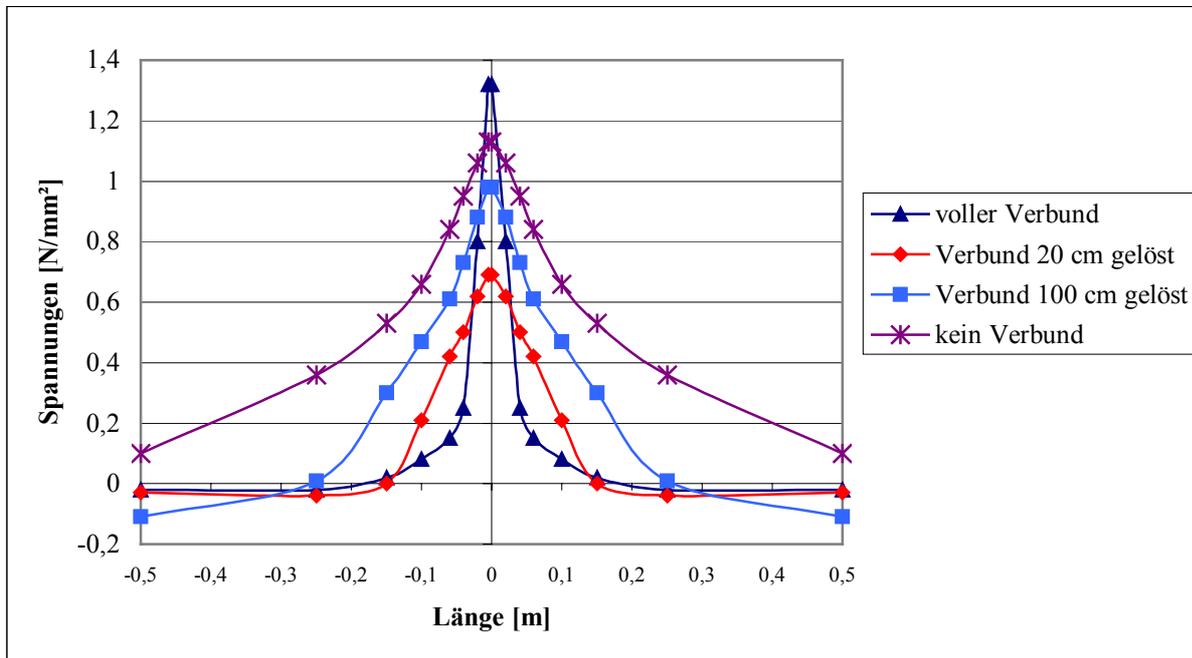


Abb. 6.4.5:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenlängsrichtung bei abschnittsweiser Verbundlösung (20 cm Verbund gelöst – kein Verbund) am Grundsystem unter Verkehrsbelastung

Mit zunehmendem Lösen des Verbundes dehnt sich auch der Bereich der größeren Zugspannungen an der Unterseite des Asphaltes mehr zur Seite hin aus, wobei selbst bei einem auf insgesamt 100 cm gelösten Verbund die  $\sigma_x$ -Spannungen an UK Asphalt noch innerhalb des Innenbereiches des FE-Modells, d. h. maximal 25 cm links und rechts vom Riss, auf die Werte des vollen Verbundes abgesunken sind. Allerdings hat die Spannungsspitze unmittelbar über dem Riss an der Unterseite des Asphaltes beim auf 100 cm gelösten Verbund wieder ca. 75 % der Spannungsspitze des vollen Verbundes erreicht, siehe Abb. 6.4.5. Eine Spannungsverteilung wie beim System ohne Verbund wird somit erst erreicht, wenn sich der Verbund auf deutlich mehr als 1,0 m Länge löst, siehe Abb. 6.4.5.

Bei einem System „ohne Verbund“ treten gegenüber dem System „mit vollem Verbund“ bis zu einem Abstand zur Lastachse von ca. 0,5 m Abweichungen bei den  $\sigma_x$ -Spannungen  $\geq 0,1$  N/mm<sup>2</sup> auf, siehe Abb. 6.4.5.

Auf die Biegezugspannungen an der Unterseite der HGT in Plattenlängsrichtung sind die Auswirkungen des VerbundlöSENS wesentlich geringer, siehe Abb. 6.4.6. Beginnt sich der

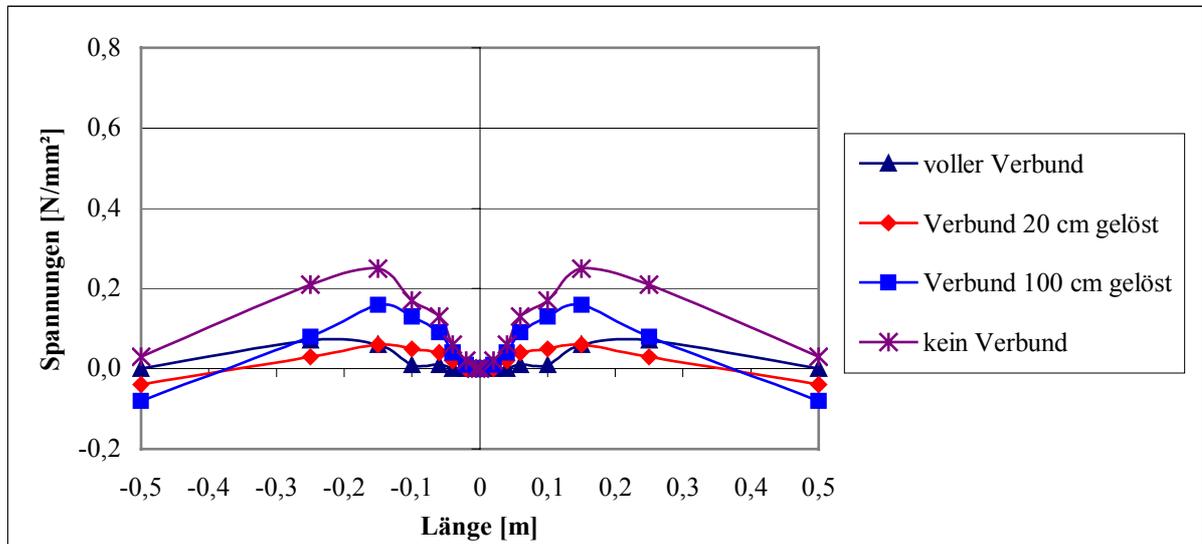


Abb. 6.4.6:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite der HGT in Plattenlängsrichtung bei einer stufenweisen Verbundlösung unter Verkehrsbelastung

Verbund zwischen Asphalt und HGT zu lösen, ändern sich die  $\sigma_x$ -Spannungen in der Umgebung des Risses nur geringfügig. Erst wenn der Verbund auf mehr als 20 cm fehlt, wachsen die Spannungswerte allmählich an und erreichen Maximalwerte beim vollständig gelösten Verbund in der Größenordnung von ca. 0,25 N/mm<sup>2</sup>. Dieser Maximalwert liegt ca. 20 cm vom Riss entfernt.

In Plattenquerrichtung (y-Richtung), parallel zum Riss, ergibt sich beim Entstehen eines Risses in der HGT in Plattenmitte keine lokale Spannungsspitze an der UK Asphalt, sondern eine relativ gleichmäßige Spannungserhöhung über die Breite mit einem Maximum in der Lastachse (siehe Anlagen 6.3 und 6.12).

Wird der Verbund zwischen Asphalt und HGT abschnittsweise aufgehoben, findet an der Asphaltunterseite in Querrichtung unmittelbar am Riss zuerst eine Entspannung statt, wobei sich der Spannungswert in der Lastachse relativ wenig verändert, sondern die Entspannung hauptsächlich in größerem Abstand (0,1 m bis 0,5 m) stattfindet (siehe Anlage 6.12). Löst sich der Verbund um mehr als 20 cm, wachsen die  $\sigma_y$ -Spannungen, insbesondere in der Lastachse, kontinuierlich bis zum System ohne Verbund um ca. 110 % an. Der Maximalwert der

$\sigma_y$ -Spannungen beträgt beim System ohne Verbund ca. 75 % des Wertes der Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen bei vollem Verbund.

An der Unterseite der HGT verändern sich für die Plattenquerrichtung die  $\sigma_y$ -Spannungen beim Lösen des Verbundes am Anfang praktisch nicht (siehe Anlage 6.12). Bei 20 cm gelöstem Verbund ist der Wert in der Lastachse noch identisch mit dem Spannungswert für den vollen Verbund. Auch außerhalb der Lastachse sind die Veränderungen gering.

Fehlt der Verbund zwischen Asphalt und HGT auf insgesamt 100 cm, steigen die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT in der Lastachse um ca. 10 % an.

Herrscht kein Verbund mehr, erhöhen sich die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT gegenüber dem System mit vollem Verbund um ca. 45 %.

Insgesamt ist festzustellen, dass das Lösen des Verbundes bis 20 cm am Grundsystem eine Entspannung bzw. keinen wesentlichen Anstieg der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung verursacht, und dass der Verbund sich erst auf relativ große Länge ( $> 100$  cm) lösen muss, um die Werte für ein System ohne Verbund zu erreichen.

Beim Vergleich der  $\sigma_x$ - mit den  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in der Lastachse liegen die Spannungswerte in Plattenquerrichtung generell unter den Werten der -längsrichtung, siehe Abb. 6.4.7.

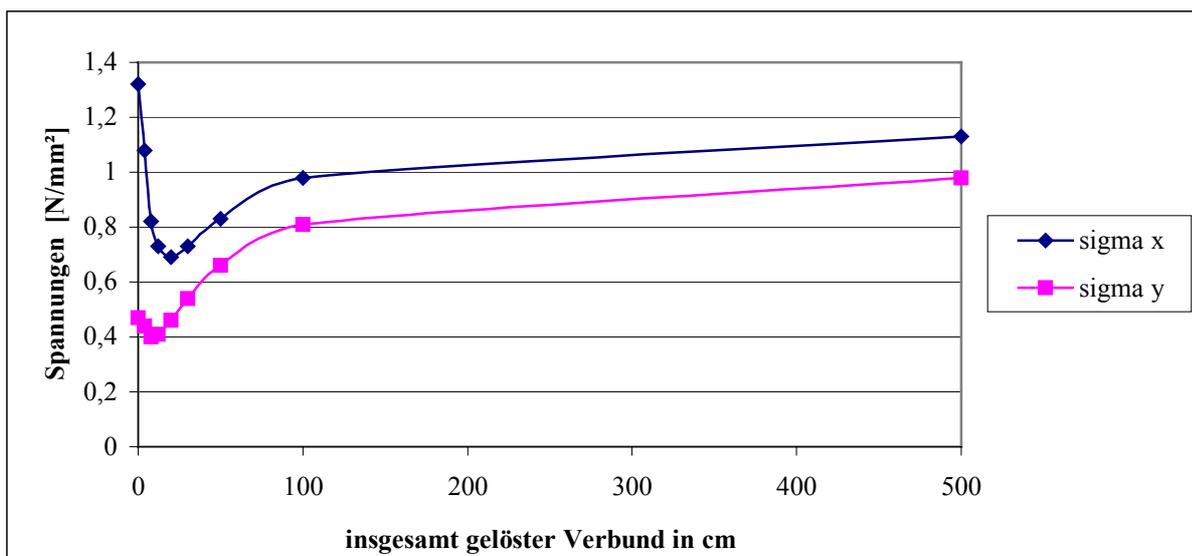


Abb. 6.4.7: Maximalwerte der  $\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK des Asphaltes über dem Riss am Grundsystem in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung

Es ergibt sich dabei ein Minimum der  $\sigma_x$ -Spannungen bei ca. 20 cm gelöstem Verbund, dies entspricht der Dicke der Asphaltüberdeckung.

Die  $\sigma_y$ -Spannungen sind generell geringer und erreichen ein Minimum bei ca. 8 cm gelöstem Verbund, bei dem die Spannungswerte auf ca. 85 % des Wertes bei vollem Verbund absinken. Wird der Verbund auf 20 cm gelöst, liegen die  $\sigma_y$ -Spannungen wieder in der Größenordnung der Werte für den vollen Verbund.

Bei einem weiteren Lösen des Verbundes wachsen die Spannungen in x- und y-Richtung gleichmäßig bis zu den Spannungswerten des Systems ohne Verbund an.

Aus Abb. 6.4.7 und Anlage 6.13 ist auch gut ersichtlich, dass die Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss im Asphalt bei vollem Verbund - bei dünnen Asphaltüberdeckungen bis ca. 180 mm - in etwa dem Spannungswert des Systems ohne Verbund entspricht. Dies bestätigt die Abschätzung von [10], der in erster Näherung für die Biegezugspannung in Längsrichtung in einer nicht gerissenen Schicht die  $\sigma_x$ -Spannungen an einem System ohne Verbund angibt.

Bei größeren Asphaltstärken wird die Spannungsspitze bei diesem Vorgehen unterschätzt, wobei allerdings wiederum der Einfluss einer Relaxation des Asphaltes berücksichtigt werden muss (siehe Anlage 6.13).

Für Asphaltstärken von 12 bis 26 cm ergeben sich beim Lösen des Verbundes für die  $\sigma_x$ -Spannungen in Abhängigkeit von der Länge des fehlenden Verbundes jeweils Minimalwerte, falls der insgesamt gelöste Verbundbereich in etwa der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht, siehe Anlage 6.13.

Der Verlauf und die Größe der Hauptspannungen  $\sigma_I$  an der Unterseite des Asphaltes sind weitgehend mit den  $\sigma_x$ -Spannungen vergleichbar, auf eine eingehende Untersuchung wird daher verzichtet. (siehe Anlage 6.14).

Nach den durchgeführten Untersuchungen wäre es für die Beanspruchung des Deckensystems aus Verkehrsbelastung günstig, den Verbund entlang der Kerben insgesamt auf eine Breite zu lösen, die der Dicke der vorgesehenen Asphaltüberbauung entspricht. Allerdings wäre bei der Ausführung auf der Baustelle genau darauf zu achten, dass nicht nach dem Motto „viel hilft viel“ gearbeitet wird, da die Biegebeanspruchung der Fahrbahndecke wieder ansteigt, falls der

Verbund auf zu großer Länge gelöst wird; dieses Vorgehen hat in der Vergangenheit zu Schäden geführt.

### 6.4.2 Temperaturbelastung

Zur Veranschaulichung der  $\sigma_x$ -Spannungen unter Temperaturbelastung (gleichmäßige Abkühlung um 5 K) wird in einer ersten Bildfolge die abschnittsweise zunehmende Verbundlösung in Form farbiger, ausgefüllter Höhenschichtlinien über die komplette Dicke der Platten in Längsrichtung dargestellt, siehe Abb. 6.4.8. Im Gegensatz zu den  $\sigma_x$ -Spannungen aus Verkehrsbelastung (gem. Abb. 6.4.3) gilt ein anderer Maßstab - nämlich  $1,0 \text{ N/mm}^2$  (statt  $0,1 \text{ N/mm}^2$ ) - für die Farbstufen der Spannungswerte. Gleichzeitig wird bei der Temperaturbeanspruchung das Eigengewicht der Fahrbahn mit berücksichtigt. Die nur beim System mit vollem Verbund abgebildete Farblegende steht stellvertretend für alle Systeme. Um einen Vergleich zum Verbundlösen unter Verkehrsbeanspruchung herstellen zu können, werden die gleichen Zwischenzustände dargestellt.

Ausgangspunkt der Verbundlösung ist wieder das Grundsystem mit einem Riss in der HGT und vollem Verbund zwischen Asphalt und HGT, siehe auch Abb.6.3.11.

Über dem Riss in der HGT tritt bei einer Abkühlung um 5 K eine extrem hohe Spannungsspitze für die  $\sigma_x$ -Spannung in der Größenordnung von  $7,7 \text{ N/mm}^2$  auf.

Löst sich der Verbund auf insgesamt 4 cm Länge (jeweils 2 cm links und rechts vom Riss) vermindert sich die Spannungsspitze bereits um ca. 18 %. Der prozentuale Abfall der Spannungsspitze entspricht der Entspannung aus Verkehrslast bei diesem Grad der Verbundlösung.

Wird der Verbund zwischen den beiden Schichten weiter aufgehoben, sinkt auch der Wert der Spannungsspitze weiter ab und beträgt bei 20 cm gelöstem Verbund (= Dicke der Asphaltüberdeckung) ca. 47 % der Spannungsspitze bei vollem Verbund.

Löst sich der Verbund zwischen Asphalt und HGT auf noch größere Bereiche, so fallen die Spannungswerte an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss - im Gegensatz zur Verkehrsbeanspruchung – noch weiter ab und erreichen bei einem System ohne Verbund einen Minimalwert in der Größenordnung von ca. 17 % des Maximalwertes bei vollem Verbund.

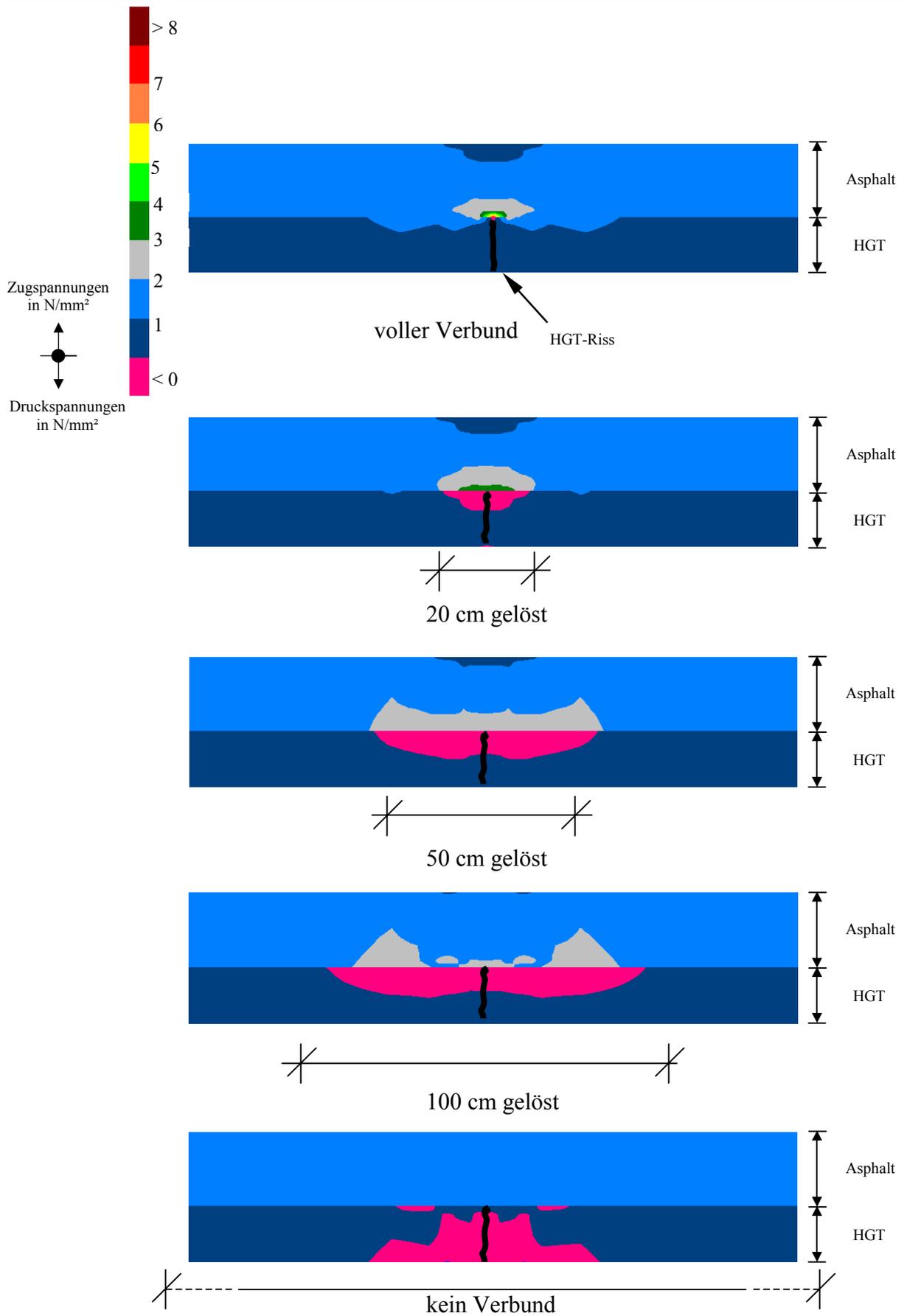


Abb. 6.4.8: Hörschichtlinien der  $\sigma_x$ -Spannungen am Grundsystem beim abschnittswelsen Verbundlösen zwischen Asphalt und HGT unter Temperaturbelastung

Damit wird deutlich, dass es zur Minimierung der  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung bei einer gleichmäßigen Abkühlung am günstigsten wäre, den Verbund auf die gesamte Plattenlänge vollständig zu lösen.

Im Gegensatz dazu wachsen die Biegespannungen  $\sigma_x$  aus Verkehrsbeanspruchung beim lösenden Verbundes auf mehr als 20 cm Länge wieder an und erreichen beim System ohne Verbund Werte, die in der Größenordnung der Werte für den vollen Verbund liegen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die maximalen Differenzen der vertikalen Verformungen  $v_z$  zwischen Plattenmitte und Plattenrand für die verschiedenen Stufen der Verbundlösung unter Temperaturbelastung zusammengefasst:

Verbundzustand	Differenz der vertikalen Verformungen $v_z$ [mm]
Voller Verbund	0,09
4 bis 8 cm gelöst	0,11
12 cm gelöst	0,12
20 cm gelöst	0,13
30 cm gelöst	0,15
50 cm gelöst	0,16
100 cm gelöst	0,17
Kein Verbund	0

Mit zunehmendem Grad der Verbundlösung steigen die Differenzen der vertikalen Verformungen zwischen Plattenmitte und Plattenrand von 0,09 mm bis zum System mit 100 cm gelöstem Verbund auf 0,17 mm an, um beim System ohne Verbund auf 0 mm zurückzugehen. Beim System ohne Verbund zwischen Asphalt und HGT muss dieser Wert null sein, da beim vollständig gelösten Verbund keine Verwölbung des Deckensystems mehr stattfindet. Bis zum Zustand „Verbund auf 100 cm gelöst“ haben sich die Einsenkungen kontinuierlich vergrößert, d. h. das Aufwölben hat bis dorthin laufend zugenommen. Ein Rückgang dieser Verwölbungen findet erst nach dem Lösen des Verbundes auf noch größere Längen statt.

Bereits aus den Höhenschichtlinien der Abb. 6.4.8 wird deutlich, dass die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes mit zunehmendem Lösen des Verbundes kontinuierlich abnehmen und einen minimalen Wert beim System ohne Verbund erreichen. In Abb. 6.4.9 sind für

einen Ausschnitt in Plattenlängsrichtung die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in der HGT noch einmal maßstäblich aufgetragen.

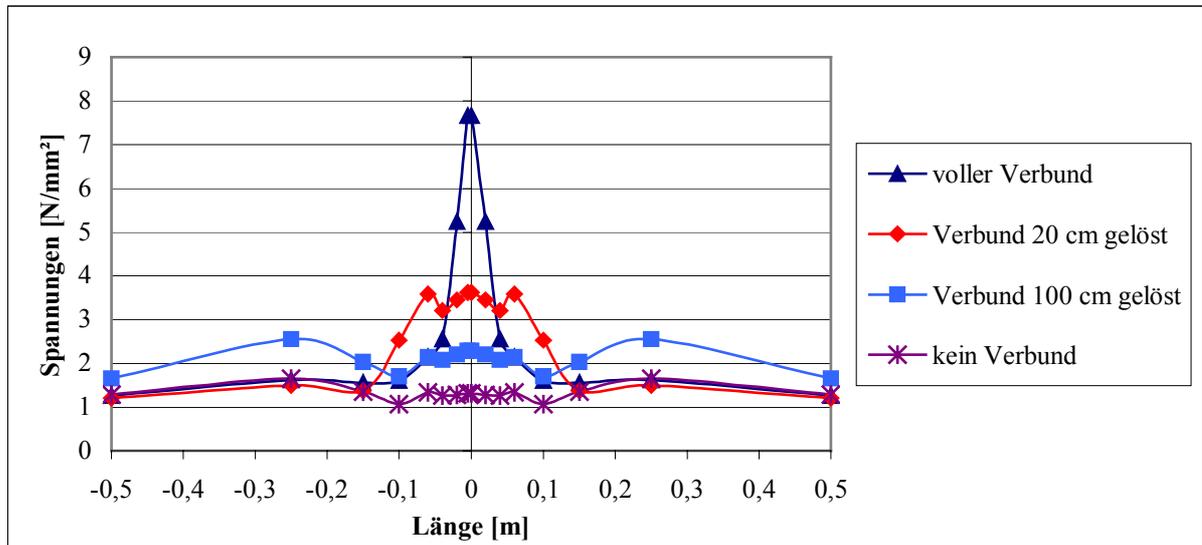


Abb. 6.4.9:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenlängsrichtung beim Lösen des Verbundes am Grundsystem bei einer Abkühlung um 5 K

Löst sich der Verbund zwischen Asphalt und HGT, wird die lokale Spannungsspitze abgebaut; gleichzeitig vergrößert sich aber die Länge, in der größere Biegezugspannungen (z. B.  $> 2 \text{ N/mm}^2$ ) auftreten, vom unmittelbaren Rissbereich ( $\pm 4 \text{ cm}$ ) auf ca.  $\pm 10 \text{ cm}$  um den Riss (beim Lösen des Verbundes auf insgesamt 20 cm) bzw. auf ca.  $\pm 40 \text{ cm}$  um den Riss (beim Lösen des Verbundes auf insgesamt 100 cm). Dies führt dazu, dass der Asphalt in einem größeren Bereich bei einer gleichzeitigen Verkehrsbelastung schneller ermüdet, und Fehlstellen in der Rissumgebung einen Reflexionsriss verursachen können, der seitlich versetzt zum HGT-Riss an der Fahrbahnoberfläche durchschlägt.

Im Bereich um den Riss treten an der Unterseite der HGT in Plattenlängsrichtung beim System mit vollem Verbund durch die Verwölbung der Fahrbahnplatte Druckspannungen auf, siehe Abb. 6.4.10. Sobald der Verbund gelöst wird, verringern sich die Druckspannungen um den Riss und gehen in Zugspannungen über, um beim System ohne Verbund auf null zu sinken siehe Abb. 6.4.10. Allerdings bleibt bei diesem FE-Modell die Reibung zwischen der Unterseite HGT und elastischer Bettung unberücksichtigt.

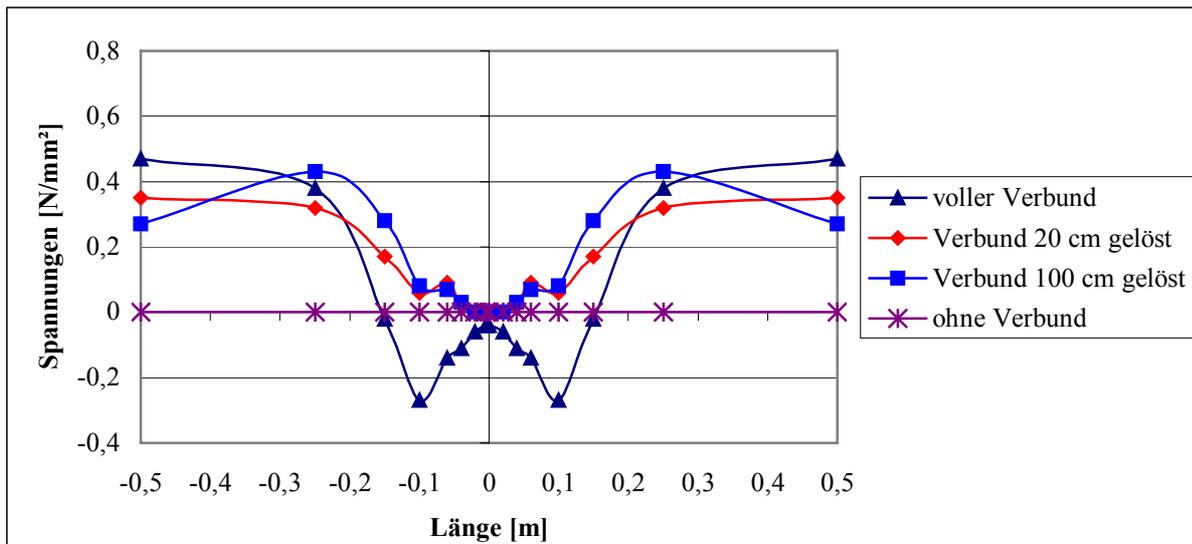


Abb. 6.4.10:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite der HGT in Plattenlängsrichtung beim Lösen des Verbundes am Grundsystem bei einer Abkühlung um 5 K

In Plattenquerrichtung ergibt sich bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K unmittelbar am Riss bei vollem Verbund eine nahezu konstante Spannungsverteilungen der  $\sigma_y$ -Spannungen über die Plattenbreite (siehe Anlage 6.15). Der maximale Spannungswert beträgt ca. 50 % der Spannungsspitze in Plattenlängsrichtung.

Löst sich der Verbund abschnittsweise, sinken die  $\sigma_y$ -Spannungen über die Breite kontinuierlich ab und erreichen einen minimalen Wert beim System ohne Verbund (siehe Anlage 6.15), wobei die Spannungswerte über die Plattenbreite jeweils fast konstant bleiben. Aus diesem Grund wird auf eine farbige Darstellung der Höhenschichtlinien der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung beim Lösen des Verbundes verzichtet. Der minimale Wert der  $\sigma_y$ -Spannungen entspricht erwartungsgemäß den  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes für ein System ohne Verbund.

Für die  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung an der Unterseite der HGT ergibt sich ein ähnliches Bild; vom Maximalwert bei vollem Verbund ausgehend nehmen die gleichmäßig über die Breite verteilten Zugspannungen ab und sind beim System ohne Verbund minimal (ca. 56 % des Maximalwertes), siehe Anlage 6.15.

Die Hauptspannungen  $\sigma_1$  an der Unterseite des Asphaltes sind mit der  $\sigma_x$ -Spannung und an der Unterseite der HGT mit der  $\sigma_y$ -Spannung identisch.

Insgesamt lässt sich nach der Analyse der einzelnen Spannungen festhalten, dass es für die Beanspruchung aus Temperatur am günstigsten ist, den Verbund vollständig zwischen Asphalt und HGT zu lösen, siehe Abb. 6.4.11.

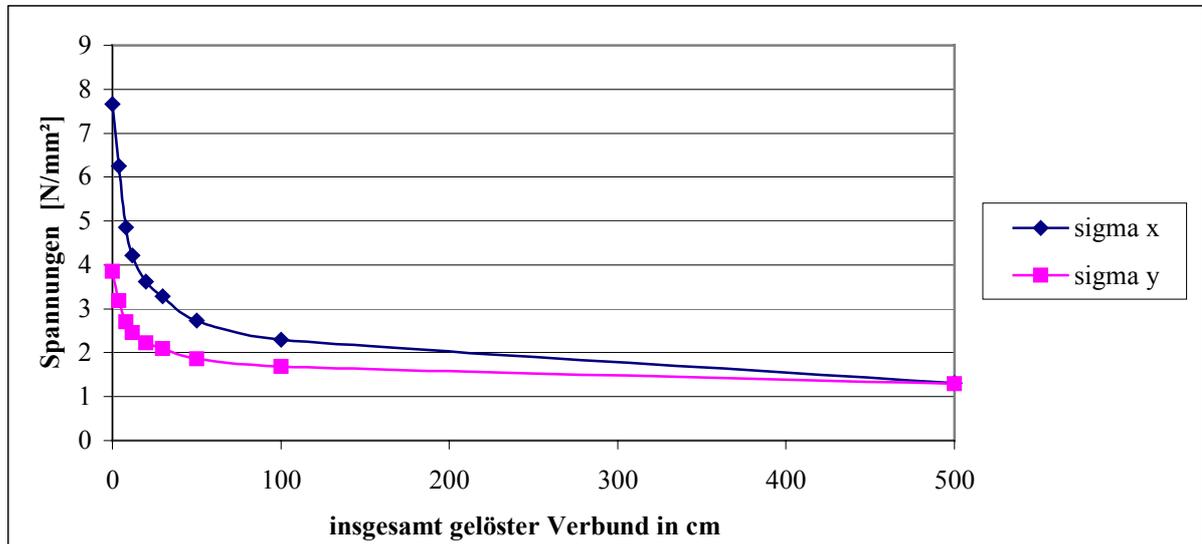


Abb. 6.4.11:  $\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss am Grundsystem in Abhängigkeit von der Verbundlösung bei einer Abkühlung um 5 K

Für die Asphaltstärken von 12 bis 26 cm ergeben sich bei einer gleichmäßigen Abkühlung des Deckensystems um 5 K beim Lösen des Verbundes ähnliche Spannungsverläufe (siehe Anlage 6.16). Die Werte der Spannungsspitzen an der UK Asphalt für die  $\sigma_x$ -Spannungen nehmen bei vollem Verbund mit wachsender Asphaltstärke von 12 cm auf 26 cm um ca. 16 % ab. Die  $\sigma_y$ -Spannungen betragen für den vollen Verbund jeweils ca. 50 % der Werte der  $\sigma_x$ -Spannungen. Ist der Verbund zwischen Asphalt und HGT vollständig gelöst, sind die Spannungen in beiden Plattenrichtungen gleich groß und jeweils am geringsten (siehe Abb. 6.4.11 und Anlage 6.16).

### 6.4.3 Zusammenfassung

In einem Deckensystem mit einer gerissenen HGT unter Asphalt entstehen sowohl unter Verkehrs- als auch unter Temperaturbelastung über dem Riss lokale Spannungsspitzen in Plattenlängsrichtung (siehe Kap. 6.2). Löst sich der Verbund zwischen Asphalt und HGT um den Riss, führt dies anfänglich unter beiden Belastungen zu einem Absinken der Spannungen in Plattenlängs- und -querrichtung, siehe Abb. 6.4.12 und 6.4.13.

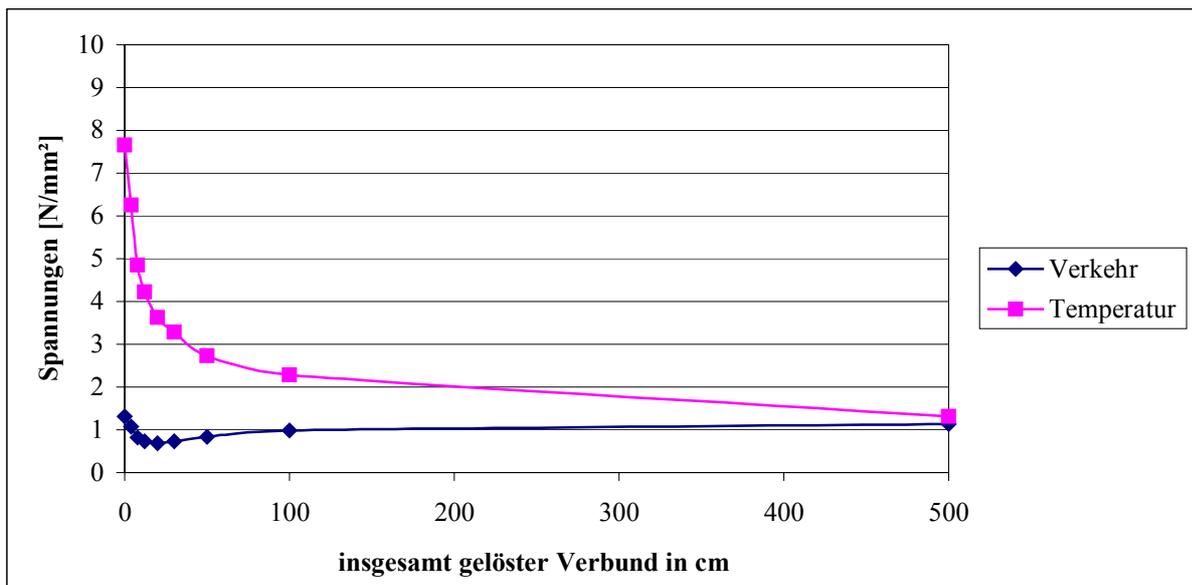


Abb. 6.4.12:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss am Grundsystem beim Lösen des Verbundes

Die  $\sigma_x$ -Spannungen aus Temperatur sind bei vollem Verbund fast 6-fach so hoch wie aus Verkehr, d. h. für die Reflexionsrissbildung hat die Temperaturbeanspruchung wesentlich größere Bedeutung als die Verkehrsbelastung. Lediglich bei den Systemen ohne Verbund liegen die  $\sigma_x$ -Spannungen aus Temperatur und Verkehr in derselben Größenordnung.

Während sich beim Grundsystem (20 cm Asphalt) unter Verkehrslast ein Minimum bei einem auf 20 cm Länge gelösten Verbund ergibt, sprechen die Ergebnisse für den Lastfall Temperatur dafür, den Verbund vollständig zu lösen (siehe Abb. 6.4.12 und Anlage 6.17).

Für die  $\sigma_y$ -Spannungen am Grundsystem sind in beiden Lastfällen die Ausgangswerte der Spannungen kleiner (für die Verkehrsbeanspruchung beträgt der Bezugswert ca. 36 % und für Temperatur ca. 50 % der Spannungen in x-Richtung), siehe Abb. 6.4.13.

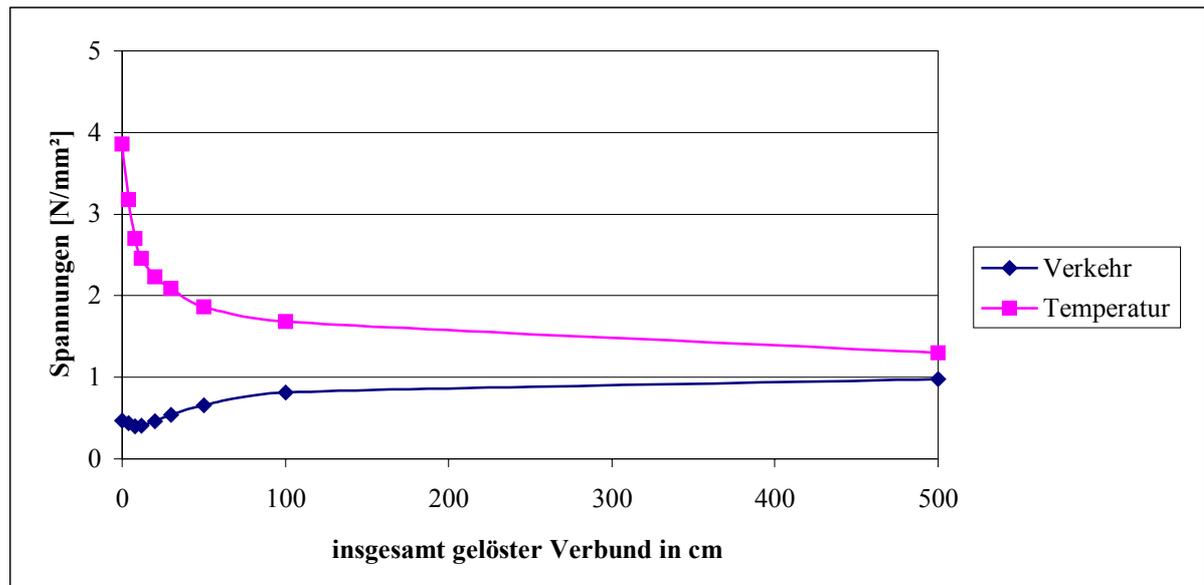


Abb. 6.4.13:  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss am Grundsystem beim Lösen des Verbundes

Eine Abnahme der  $\sigma_y$ -Spannungen aus Verkehrsbelastung findet nur bis zu 8 cm gelöstem Verbund statt, sie liegt bei Aufheben des Verbundes auf insgesamt 20 cm wieder beim Ausgangswert und steigt anschließend bis zum System ohne Verbund auf ca. 210 % des Ausgangswertes an (siehe Abb. 6.4.13 und Anlage 6.17).

Die  $\sigma_y$ -Spannungen aus Temperaturbeanspruchung sinken - ähnlich wie die Spannungen in Plattenlängsrichtung - bis zum System ohne Verbund kontinuierlich ab und erreichen schließlich 34 % des Ausgangswertes, siehe Abb. 6.4.13.

Die getroffenen Aussagen gelten auch für die Asphaltdecken von 12 cm bis 26 cm (siehe Anlagen 6.18 bis 6.23), wobei die Spannungsspitzen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss aus Temperatur bei dünnen Asphaltüberdeckung größer sind als bei dicken Asphalt-schichten. Reduziert sich die Asphaltstärke von 26 cm auf 12 cm, wächst die Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen um ca. 19 % an.

In jedem Fall sind die Spannungen aus Temperatur für die Entstehung von Reflexionsrissen wesentlich gefährlicher als die Spannungen aus Verkehrsbelastung. Die kleinsten Spannungen aus Temperatur in Plattenlängsrichtung entstehen beim vollständigen Lösen des Verbundes zwischen Asphalt und HGT.

Die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen aus der Verkehrsbeanspruchung sind von der Dicke der Asphaltüberdeckung abhängig und treten auf, wenn der Verbund insgesamt auf eine Länge ge-

löst wird, die der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht (siehe Anlagen 6.18, 6.20 und 6.22).

Die  $\sigma_y$ -Spannungen aus Temperatur an der Unterseite des Asphaltes betragen maximal ca. 50 % der Werte der Plattenlängsrichtung.

Das Minimum der  $\sigma_y$ -Spannungen unter Verkehrsbelastung stellt sich beim Lösen des Verbundes auf ungefähr 8 bis 10 cm Gesamtlänge ein, wobei es bei dünneren Asphaltüberdeckungen bei 8 cm und bei dickeren Asphaltüberdeckungen eher bei 10 cm liegt.

Für die Spannungen aus einer gleichmäßigen Abkühlung wäre es bei allen Asphaltstärken vorteilhaft, den Verbund zwischen Asphalt und HGT vollständig zu lösen. Bei der Bewertung der Spannungen aus Temperatur ist jedoch das Relaxationsvermögen des Asphaltes zu berücksichtigen.

Für die Biegebeanspruchung aus Verkehrslast wäre es für Deckensysteme mit Asphaltdecken auf HGT am günstigsten, den Verbund um den Riss in der HGT insgesamt auf eine Länge zu lösen, die der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht, wobei bei der Ausführung darauf zu achten wäre, dass der Verbund darüber hinaus nicht noch deutlich weiter gelöst wird, um ein erneutes Ansteigen der Biegebeanspruchung aus Verkehr zu verhindern.

Durch diese Maßnahme würden auch die Spannungen aus Temperatur bereits ganz erheblich reduziert.

Aus o. g. Feststellungen ergibt sich die Konsequenz, dass die im Stadtstraßenbau früher übliche Praxis [5], in Betontragschichten unter dünnen Asphaltdecken den Verbund zum Asphalt um die Fugen herum durch einen Glattstrich und einen Kalkanstrich gezielt auf ca. 40 cm zu lösen, von der grundsätzlichen Überlegung her richtig war. Allerdings wurde der Verbund auf zu große Länge gelöst; dies führte zu einer erheblichen Zusatzbeanspruchung des Asphaltes aus der Verkehrsbelastung und verursachte damit vorzeitige Schäden im Deckensystem.

Durch eine Reduzierung der Länge des gelösten Verbundes auf die Dicke der Asphaltüberdeckung könnte hier eine Verbesserung des Tragverhaltens erzielt werden.

## 6.5 Einfluss des Rissabstandes in der HGT auf das Tragverhalten

Gemäß ZTVT [7] beträgt der Längsabstand der Kerben in Querrichtung in einer HGT maximal 5 m, bei einer Gesamteinbaudicke des Asphaltes von 14 cm oder weniger maximal 2,5 m. Durch die Kerben in regelmäßigen Abständen werden der HGT Sollbruchstellen vorgegeben, an denen möglichst frühzeitig Risse entstehen sollen. Es wird nun untersucht, welchen Einfluss der Abstand der Risse auf das Tragverhalten des Deckensystems hat.

Ausgangspunkt der Betrachtung ist das Grundsystem (20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit einem Riss in Plattenmitte) mit vollem Verbund zwischen Asphalt und HGT. Es werden für dieses System die Rissabstände 1,67 m, 1,0 m und 0,5 m modelliert und untersucht. Anschließend werden die Auswirkungen der Asphaltstärken 12 cm, 16 cm und 26 cm auf diese Ergebnisse betrachtet.

### 6.5.1 Verkehrsbelastung

Für eine Asphaltstärke von 20 cm auf 15 cm HGT sind in Abb. 6.5.1 für den Lastfall 2 „Last mittig über dem Riss“ die Spannungsverläufe der  $\sigma_x$ -Spannungen über die Dicke des Deckensystems für unterschiedliche Rissabstände (R) aufgetragen.

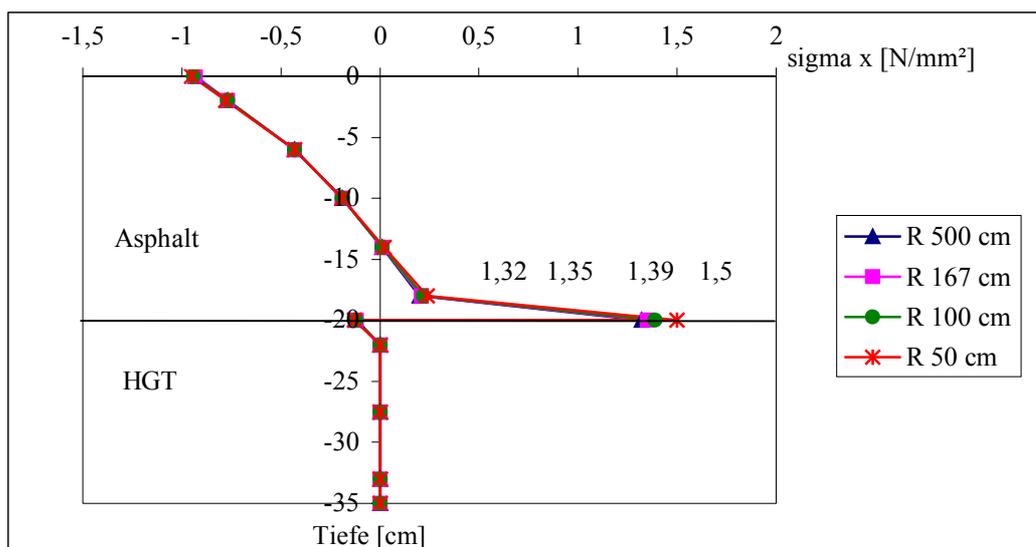


Abb. 6.5.1: Biegespannungsverlauf  $\sigma_x$  über die Dicke am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT unter Verkehrsbelastung für verschiedene Rissabstände in der HGT

Es ist zu beobachten, dass die  $\sigma_x$ -Spannungen nur an der Unterseite des Asphalttes vom Rissabstand beeinflusst werden; ansonsten sind die Unterschiede in den Spannungswerten vernachlässigbar klein.

Zwischen einer Platte mit einem Riss, d. h. Rissabstand 5,0 m, und dem Rissabstand 1,67 m in der Platte ergeben sich an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss Unterschiede in den  $\sigma_x$ -Spannungen in der Größenordnung von ca. 2 %. Dies bedeutet, dass bei einem Abstand der Kerben von 1,67 m und mehr jeder Riss quasi wie ein Einzelriss wirkt und eine gegenseitige Beeinflussung der Risse nicht mehr stattfindet.

Bei einer Reduzierung des Rissabstandes auf 1,0 m wachsen die  $\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt um ca. 5 % gegenüber dem System mit Rissen im 5 m-Abstand an. Bei einer weiteren Verringerung des Rissabstandes auf 50 cm führt dies zu einer Spannungserhöhung gegenüber dem Ausgangssystem von ca. 14 %.

Eine weitere Verkürzung der Kerbenabstände ist aus baupraktischen Überlegungen nicht mehr sinnvoll.

Eine Reduzierung des Rissabstandes in der HGT wirkt sich somit bei den Biegezugspannungen  $\sigma_x$  aus Verkehr bei einer Asphaltstärke von 20 cm auf 15 cm HGT erst bei einem Rissabstand kleiner als 1,0 m deutlich aus. Hervorzuheben ist dabei, dass auch bei einem engen Rissabstand ein voller Verbund zwischen Asphalt und HGT vorausgesetzt wird; in der Praxis führen Risse meistens auch zu einem Lösen des Verbundes zwischen den beiden Schichten.

Gleichzeitig erhöhen sich die  $\sigma_y$ -Spannungen bei einer Reduzierung des Rissabstandes von 5,0 m auf 0,5 m um maximal 17 %, wobei auch hier Unterschiede in den Spannungsverteilungen nur an der Unterseite des Asphalttes erkennbar sind (siehe Anlage 6.24). Eine Abstufung der Spannungswerte bei einer Reduzierung der Rissabstände ist im Gegensatz zur Plattenlängsrichtung auch bei den größeren Rissabständen erkennbar; so beträgt bei einem Rissabstand von 1,67 m die Zunahme ca. 4 % und bei 1,0 m ca. 9 %. Eine höhere Biegebeanspruchung in Querrichtung bei Rissabständen kleiner als 1,0 m ist auch hier sichtbar.

Die Biegespannungen an der UK der HGT am Riss werden bei 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT sowohl in Plattenlängs- als auch in -querrichtung durch die Rissabstände nur wenig beeinflusst, siehe Abb. 6.5.1 und Anlage 6.24.

Die Hauptspannung  $\sigma_1$  an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss ist mit der oben beschriebenen  $\sigma_x$ -Spannungen fast identisch, ebenso die Abhängigkeit vom Rissabstand, siehe Anlage 6.24.

Die Differenzen der Einsenkungen zwischen Plattenmitte (über dem Riss) und -rand erhöhen sich bei einer Reduzierung des Rissabstandes von 5,0 m auf 0,50 m von 0,11 mm auf 0,13 mm (Zunahme ca. 18 %); in der Praxis sind derart kleine Unterschiede von 0,02 mm mit Einsenkungsmessungen nicht eindeutig nachweisbar.

Bei dünnen Asphaltüberdeckungen wirkt sich ein reduzierter Rissabstand stärker auf die Biegespannungen in Plattenlängsrichtung über dem Riss aus als bei dicken Asphaltsschichten, siehe Abb. 6.5.2. So bewirkt z. B. eine Verringerung des Rissabstandes von 5,0 m auf 50 cm

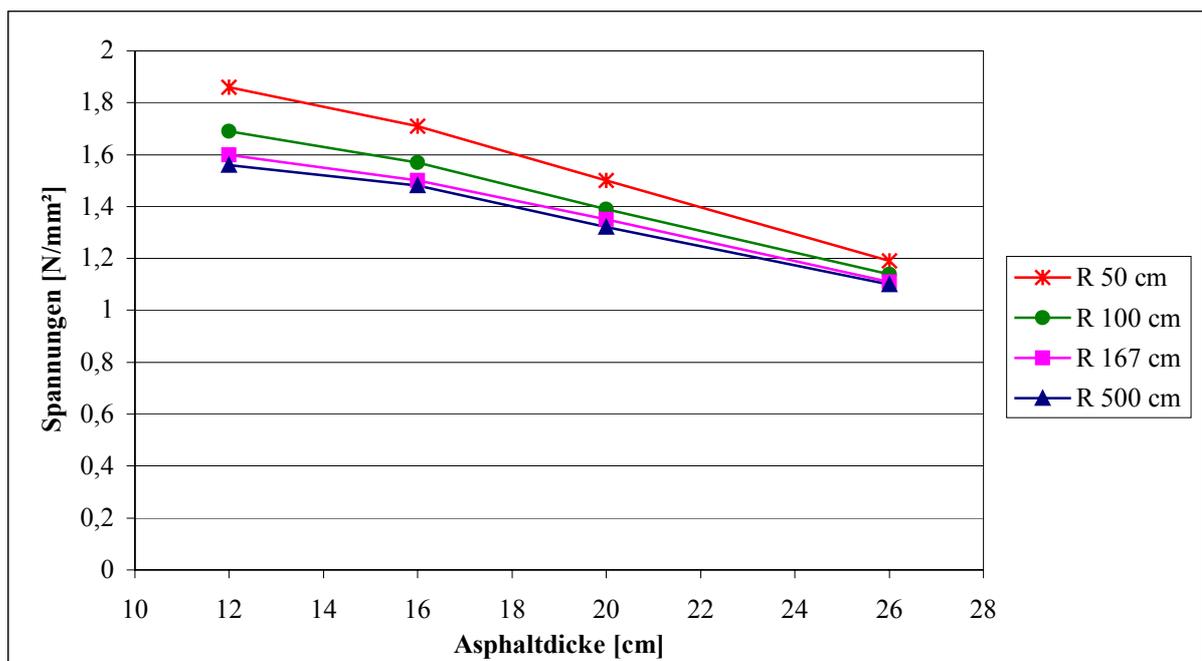


Abb. 6.5.2:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für verschiedene Rissabstände R [cm] unter Verkehrsbelastung

bei einer Asphaltstärke von 12 cm eine Zunahme der  $\sigma_x$ -Spannungen um ca. 19 %, bei einer Asphaltstärke von 26 cm lediglich um ca. 8 %.

Im Umkehrschluss lässt sich daraus schließen, dass zur Vermeidung von Reflexionsrissen bei dünnen Asphaltdecken auf HGT der Kerbabstand der HGT z. B. auf 1,0 m reduziert werden kann, ohne eine wesentliche Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Deckensystems unter Verkehrsbeanspruchung zu erhalten, siehe Abb. 6.5.3.

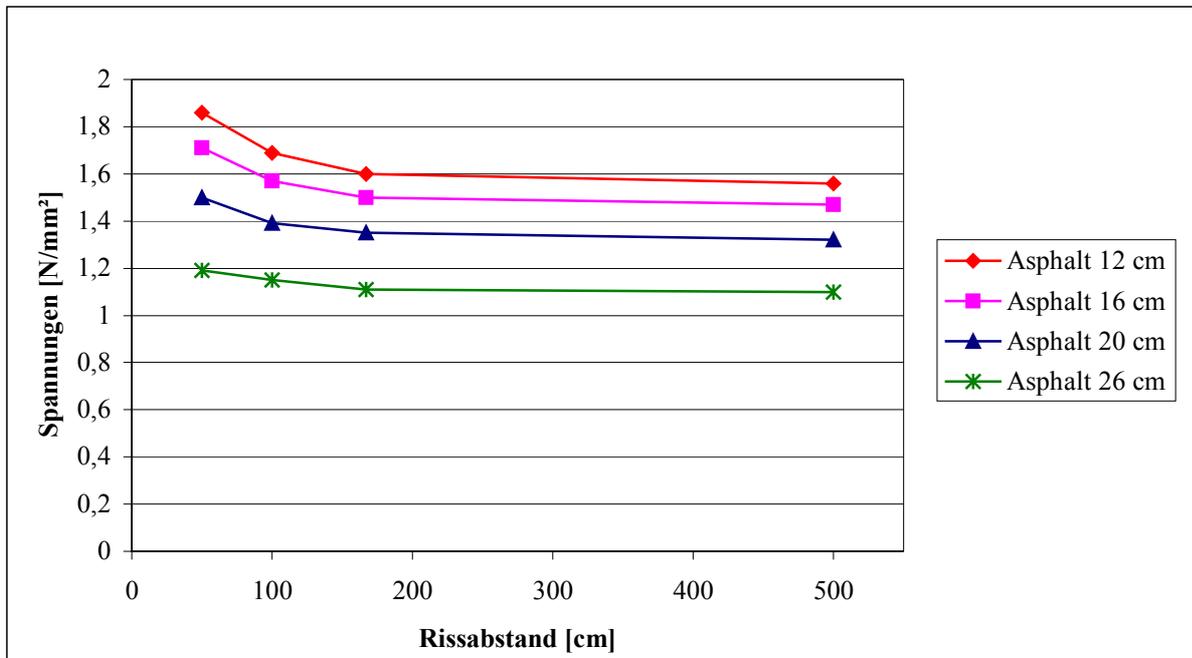


Abb. 6.5.3:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss in Abhängigkeit vom Rissabstand für verschiedene Asphaltstärken unter Verkehrsbelastung

Die  $\sigma_y$ -Spannungen an UK Asphalt ändern sich in Abhängigkeit von Rissabstand und Asphaltstärke etwas weniger als die Biegespannungen in Plattenlängsrichtung (siehe Anlage 6.25). Die Zunahme beträgt bei einer Reduzierung des Rissabstandes von 5,0 m auf 0,50 m und einer Asphaltstärke von 26 cm ca. 5 % und bei 12 cm ca. 12 %.

Die Biegespannungen  $\sigma_y$  an der Unterseite der HGT am Riss werden von den Rissabständen in der HGT erst bei  $R < 100$  cm spürbar beeinflusst; sie erhöhen sich selbst für dünne Asphaltüberdeckungen, z. B. 12 cm, und einem Rissabstand von 0,5 m lediglich um 5 % (siehe Anlage 6.26). Für die Biegebeanspruchung der HGT in Plattenquerrichtung ist somit der Rissabstand von geringer Bedeutung.

Die Differenzen der Einsenkungen an der Asphaltoberseite zwischen der Plattenmitte und dem Plattenrand nehmen selbst bei einer Asphaltstärke von 12 cm und einer Reduzierung des Rissabstandes von 5,0 m auf 0,5 m rechnerisch nur unwesentlich, um ca. 0,02 mm, zu, während bei einer Asphaltstärke von 26 cm ein Einfluss der Rissabstände nicht mehr feststellbar ist (siehe Anlage 6.26).

### 6.5.2 Temperaturbelastung

In Abb. 6.5.4 sind die  $\sigma_x$ -Spannungen über die Dicke des Deckensystems für die für eine Asphaltstärke von 20 cm (auf 15 cm HGT) für den Lastfall 4 „gleichmäßige Abkühlung um 5 K“ in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Rissabständen dargestellt.

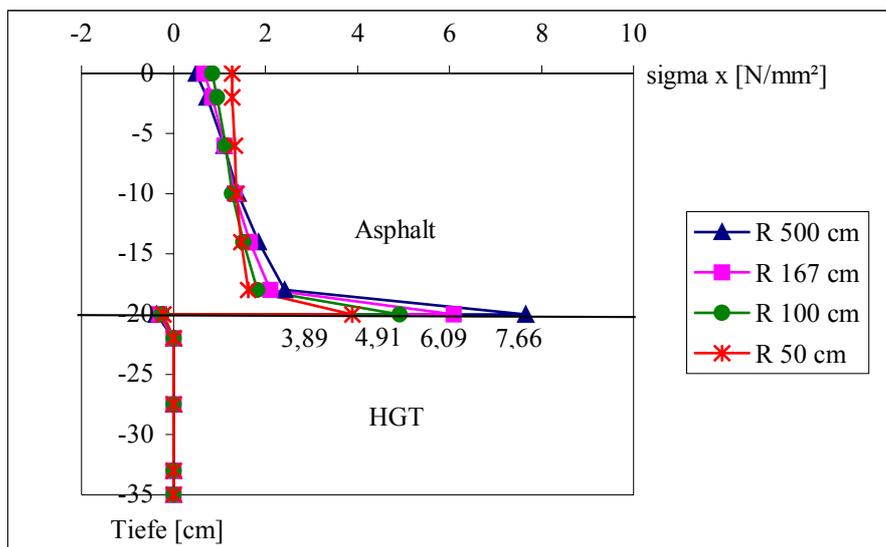


Abb. 6.5.4:  $\sigma_x$ -Spannungen über die Dicke am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT bei Abkühlung um 5 K für verschiedene Rissabstände in der HGT

Eine Reduzierung des Rissabstandes in der HGT führt zu einer erheblichen Reduzierung der Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes: so nimmt die  $\sigma_x$ -Spannung bei einem Rissabstand von 0,5 m um ca. 50 % gegenüber dem Ausgangssystem mit 5,0 m ab.

Weiter entsteht bei den größeren Rissabständen infolge der ausgeprägteren Plattenwirkung eine Biegebeanspruchung über den Asphaltquerschnitt, die bei kleineren Rissabständen abnimmt und zu einer fast konstanten Zugbeanspruchung des Asphaltes über nahezu die gesamte Schichtdicke (mit Ausnahme der Asphaltunterseite) führt, siehe Abb. 6.5.4.

Die Spannungen über die Plattendicke in y-Richtung (siehe Anlage 6.27) zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die  $\sigma_x$ -Spannungen, d. h. der Maximalwert an der Unterseite des Asphaltes reduziert sich bei einer Verringerung des Rissabstandes kontinuierlich, ebenso die Biegebeanspruchung über den Asphaltquerschnitt in Plattenquerrichtung.

Dieses Maximum der  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes beträgt bei vollem Verbund ca. 50 % der größten  $\sigma_x$ -Spannung bei einem Rissabstand von 5,0 m und ca. 60 % bei einem Rissabstand von 0,5 m. Dieser Anstieg des Verhältniswertes beruht darauf, dass der Abfall der Spannungen in Plattenlängsrichtung bei einer Verkleinerung der Rissabstände größer ist als in Plattenquerrichtung.

Die Hauptspannungen  $\sigma_1$  an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss sind mit der  $\sigma_x$ -Spannungen nahezu identisch, ebenso deren Abnahme bei einer Verkleinerung der Rissabstände in der HGT (siehe Anlage 6.27).

Die Spannungen in der HGT aus der Temperaturbelastung werden sowohl in Plattenlängs- als auch Plattenquerrichtung vom Abstand der Risse nicht wesentlich beeinflusst, siehe Abb. 6.5.4 und Anlage 6.27.

Die Differenzen der vertikalen Verformungen an der Fahrbahnoberkante zwischen einem

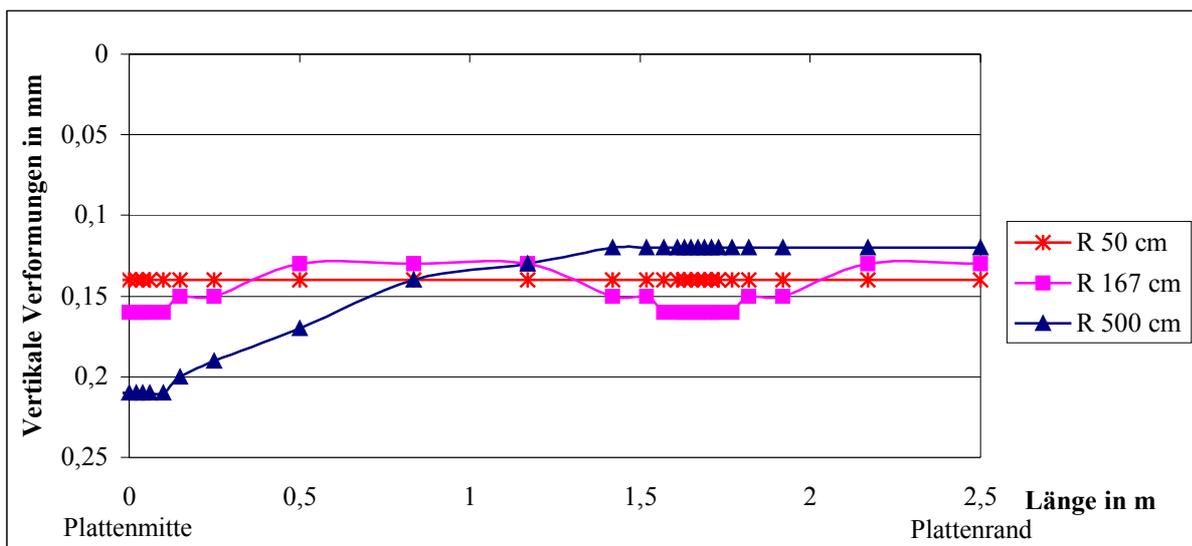


Abb. 6.5.5: Vertikale Verformungen in Plattenlängsrichtung an der Fahrbahnoberseite von der Plattenmitte bis zum Plattenrand für die Rissabstände 0,5 m, 1,67 m und 5,0 m bei einer Abkühlung um 5 K

Punkt über dem Riss und der Mitte zwischen zwei Rissen, die ein Maß für die Verwölbung des Deckensystems sind, nehmen bei einem System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT bei einer Reduzierung der Rissabstände ab und werden bei einem Rissabstand von 0,5 m zu null, siehe Abb. 6.5.5.. Durch die Verkürzung der Rissabstände wird somit die Verwölbung des Deckensystems in Plattenlängsrichtung verkleinert.

Durch eine Verringerung der Rissabstände in der HGT lässt sich erreichen, dass die Spannungsspitzen der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss nahezu unabhängig von der darüber liegenden Asphaltstärke werden, siehe Verlauf der Kurve R 50 cm in Abb. 6.5.6.

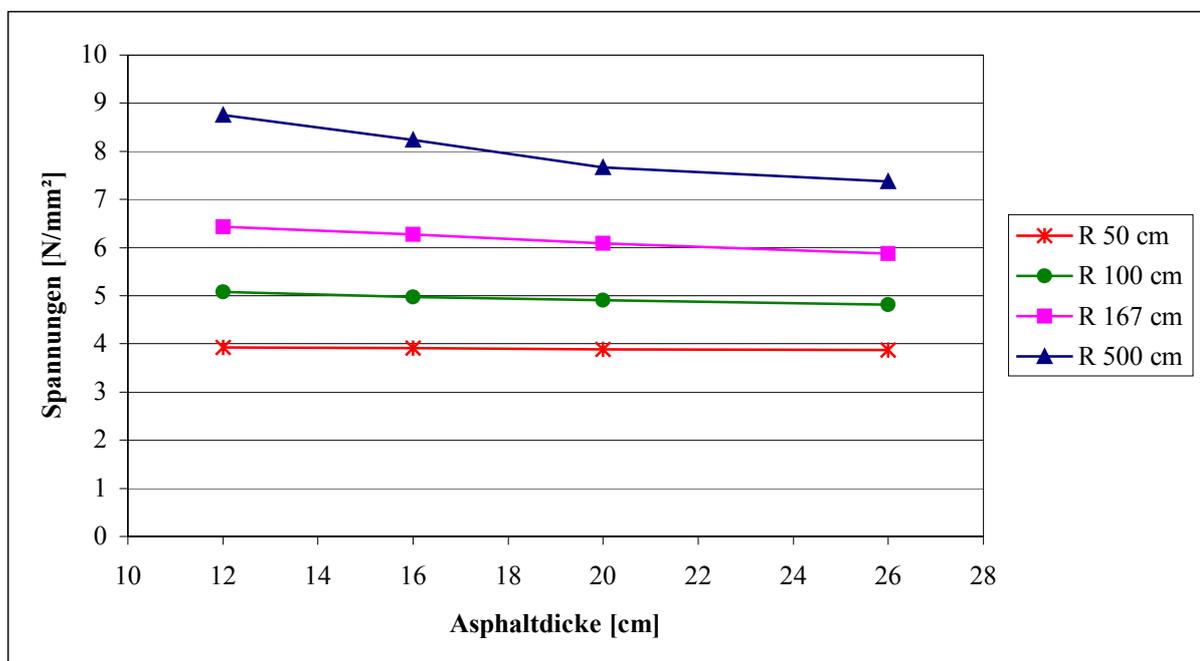


Abb. 6.5.6:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für verschiedene Rissabstände R [cm] unter Temperaturbelastung

Für die Beanspruchung des Deckensystems aus Temperatur wäre es am günstigsten, den Kerbenabstand so klein wie möglich zu wählen.

Aus Abb. 6.5.7. ist ersichtlich, dass durch die Festlegung der ZTVT [7], bei dünnen Asphaltüberdeckungen ( $\leq 14$  cm) den Abstand der Kerben auf 2,5 m zu verkürzen, die  $\sigma_x$ -Spannungen gegenüber dem Abstand von 5,0 m um ca. 20 % (für 12 cm Asphalt) abnehmen.

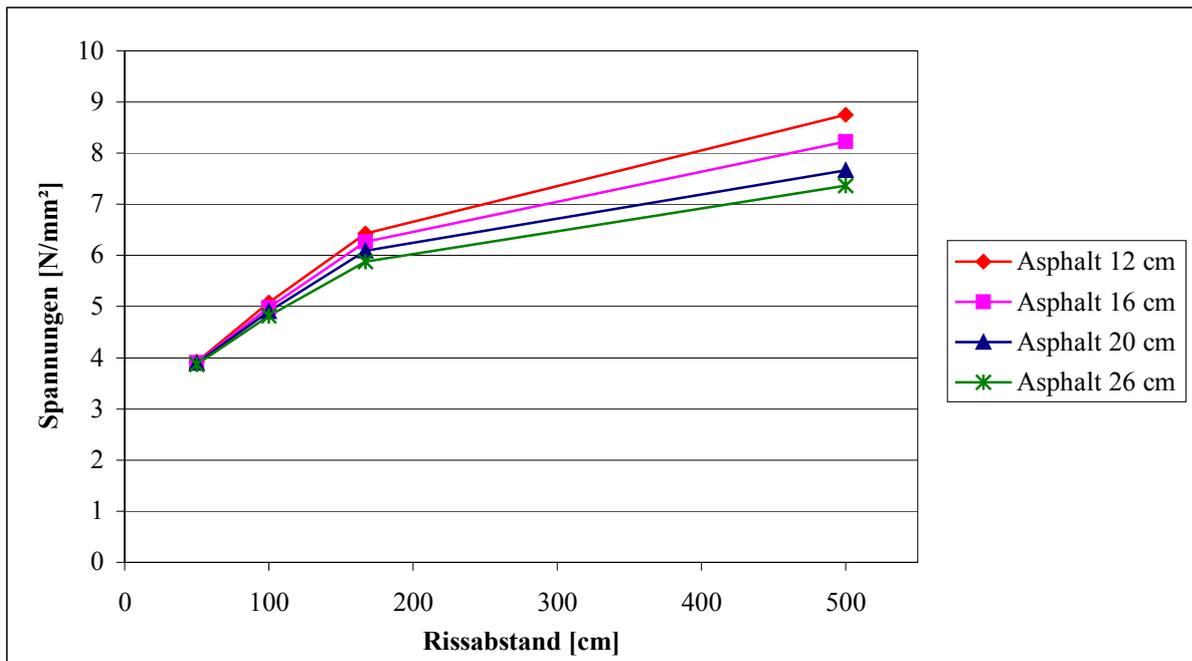


Abb. 6.5.7:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Abhängigkeit vom Rissabstand für verschiedene Asphaltstärken unter Temperaturbelastung

Durch eine weitere Verringerung des Kerbenabstandes könnte noch eine erhebliche Reduzierung der Spannungen aus Temperatur in den Deckensystemen erreicht werden.

Auch für die anderen Asphaltstärken ist eine Verkürzung des Kerbenabstandes für die Beanspruchung aus Temperatur in jedem Fall günstig, siehe Abb. 6.5.7.

Die  $\sigma_y$ -Spannungen hängen etwas weniger als die  $\sigma_x$ -Spannungen von den Rissabständen und den Asphaltstärken ab (siehe Anlage 6.28).

Die Spannungen an der Unterseite der HGT sind für alle Asphaltstärken gleich groß und unabhängig vom Rissabstand (siehe Anlage 6.29).

Die Verwölbungen der Deckensysteme nehmen bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K für einen vorgegebenen Kerbenabstand bei kleineren Asphaltstärken zu (siehe Anlage 6.29). Durch eine Reduzierung des Kerbenabstandes werden bei einer vorgegebenen Asphaltstärke die Verwölbungen kleiner und betragen für einen Rissabstand von 0,5 m für alle Asphaltstärken null (siehe Anlage 6.29).

### 6.5.3 Zusammenfassung

Der Abstand der Kerben hat je nach Belastung unterschiedliche Konsequenzen für die Beanspruchung des Fahrbahndeckensystems. Während unter Verkehrsbeanspruchung die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss mit abnehmendem Rissabstand anwachsen, fallen die  $\sigma_x$ -Spannungen aus der Temperaturbelastung dagegen stark ab, siehe Abb. 6.5.8.

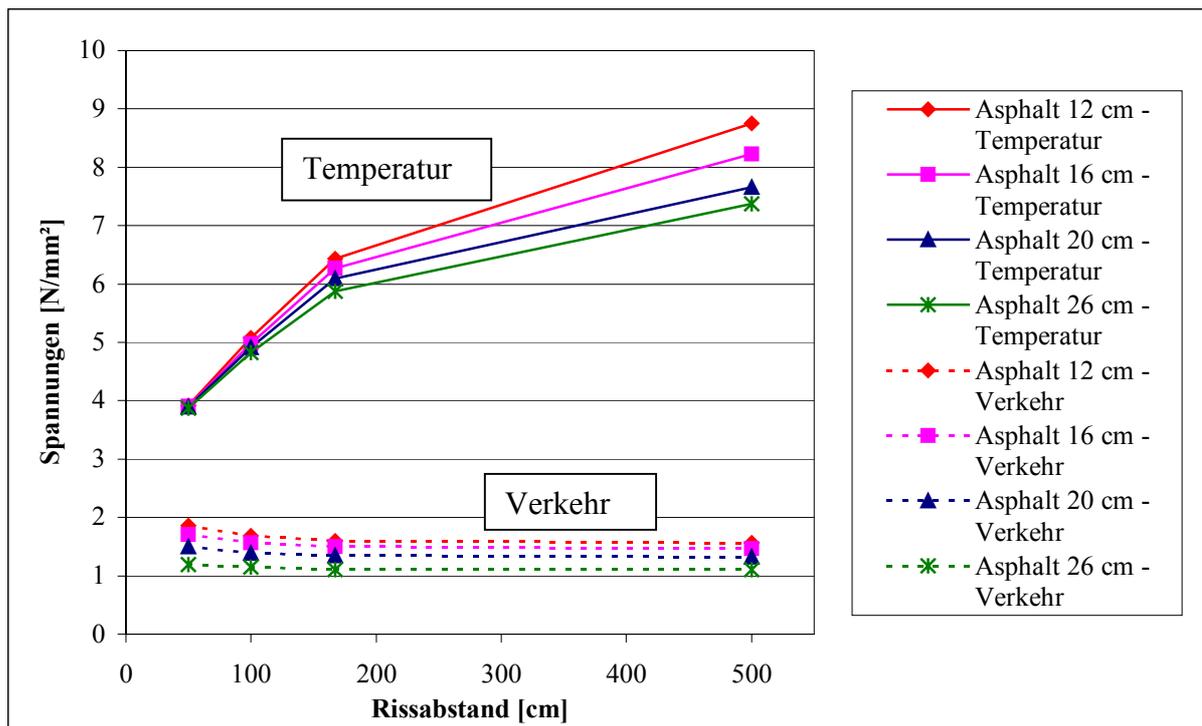


Abb. 6.5.8:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, in Abhängigkeit vom Rissabstand für verschiedene Asphaltstärken unter Verkehrs- oder Temperaturbelastung

Für die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes ergeben sich vergleichbare Kurvenverläufe mit niedrigeren Spannungswerten (siehe Anlage 6.30).

Für die Beanspruchung des Asphaltes über dem Riss in der HGT sind nach den o. g. Ergebnissen der Abb. 6.5.8 die Temperaturbeanspruchungen wesentlich kritischer als die Verkehrsbelastungen. Allerdings ist bei der Bewertung der Ergebnisse das Relaxationsvermögen des Asphaltes zu berücksichtigen.

Treten in einem Deckensystem bei niedrigen Ausgangstemperaturen und einer gleichmäßigen Abkühlung derart hohe Spannungen auf, kann trotz des Relaxationsvermögens von Asphalt bereits die Temperaturbeanspruchung im Deckensystem einen Anriss an der Unterseite des Asphaltes hervorrufen.

Im Übrigen ist bei der Beurteilung der Spannungen aus Verkehrslast zu beachten, dass sie wesentlich häufiger als die Temperaturspannungen auftreten und auch geringe Zunahmen in den Biegespannungen bei einem bestimmten E-Modul ganz erheblich zur Ermüdung des Asphaltes über dem Riss beitragen (vergleiche Anlage 6.31 [25]).

Ein Rissabstand bzw. ein Abstand der Kerben von mehr als 1,67 m hat praktisch keinen Einfluss mehr auf die Biegebeanspruchung des Deckensystems durch Verkehrslasten in Plattenlängsrichtung. Die Festlegung des Kerbabstandes in Abhängigkeit von der Asphaltstärke in der ZTVT ist für die Biegebeanspruchung in Plattenlängsrichtung unter Verkehr fast bedeutungslos, da jede Kerbe als Einzelriss wirkt und eine gegenseitige Beeinflussung nicht stattfindet, siehe Abb. 6.5.8.

Durch eine Reduzierung des Kerbenabstandes auf 1,67 m bzw. 1,0 m könnten die Spannungen aus Temperatur erheblich reduziert werden, ohne gleichzeitig eine zu starke Erhöhung der Biegebeanspruchung aus Verkehr zu bewirken, siehe Abb. 6.5.8.

Aufgrund der o. g. Ergebnisse wäre es sinnvoll, die in den ZTVT [7] enthaltene Festlegung des Kerbenabstandes - maximal 2,5 m für eine Gesamteinbaudicke des Asphaltes von 14 cm oder weniger - auf einen Abstand zwischen 1,0 m und 1,67 m zu verkürzen.

Gegen einen solchen Schritt sprechen Erfahrungen aus der Baupraxis, da zum einen der Aufwand für die Herstellung der Kerben nicht unerheblich ist und zum anderen jede Kerbe eine Gefügestörung in der HGT verursacht. Durch den Baustellenverkehr auf der HGT sind weitere Schäden im Kerbenbereich möglich.

Die Regelungen der ZTVT stellen wohl derzeit unter Berücksichtigung aller Gesichtspunkte für Asphaltstärken < 14 cm einen geeigneten Kompromiss dar.

Auch für Asphaltstärken zwischen 14 cm und 20 cm wäre es günstig, den Abstand der Kerben in der HGT auf 2,5 m zu verkürzen, da dadurch die Verkehrslastspannungen nur unwesentlich erhöht, die Spannungen aus Temperatur aber bereits deutlich reduziert werden.

## **6.6 Einfluss der Elastizitätsmoduln von Asphalt und HGT auf das Tragverhalten**

Maßgebende Einflussgröße auf die Verformungen und Spannungen aus Verkehr und Temperatur in Fahrbahndecken aus Asphalt auf HGT sind die E-Moduln der jeweiligen Schichten. Bei den bisherigen Untersuchungen wurden für den Asphalt und die HGT, die im Kap. 6.1 beschriebenen Materialkennwerte (E-Asphalt = 10000 N/mm<sup>2</sup> und E-HGT = 15000 N/mm<sup>2</sup>) verwendet.

Der Elastizitätsmodul einer Schicht wird maßgeblich vom Bindemittel und den Zuschlägen beeinflusst. Neben der Mischgutzusammensetzung hängt der E-Modul des Asphaltes - im Gegensatz zu dem der HGT - außerdem stark von der Temperatur ab.

In diesem Kapitel soll untersucht werden, welchen Einfluss andere E-Moduln für den Asphalt und die HGT auf die Ergebnisse der Kapitel 6.2, 6.4 und 6.5 haben.

Dazu werden für die verschiedenen Deckensysteme unter Verkehrs- oder Temperaturbeanspruchung unterschiedliche E-Moduln des Asphaltes (15000, 10000, 5000 und 2500 N/mm<sup>2</sup>) und der HGT (15000, 10000 und 5000 N/mm<sup>2</sup>) und ihre Auswirkungen auf die Verformungen und Spannungen in den einzelnen Schichten betrachtet, wobei jeweils nur der E-Modul einer Schicht variiert und der zweite E-Modul unverändert vom Ausgangssystem übernommen wird.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass steifere Schichten (größerer E-Modul) mehr zur Lastabtragung beitragen, d. h. höhere Biegebeanspruchungen erleiden. Für den Asphalt werden mit dem variierten E-Modul verschiedene Temperaturzustände zum Belastungszeitpunkt (z. B. Winter oder Sommer) simuliert, wobei zu beachten ist, dass Spannungen aus einer Abkühlung um 5 K - aufgrund der Relaxationsfähigkeit von Asphalt - nur bei E-Moduln größer als etwa 5000 N/mm<sup>2</sup> entstehen können. Die Berechnungen berücksichtigen aber zur Verdeutlichung der tendenziellen Aussagen auch die Werte für E-Asphalt von 2500 N/mm<sup>2</sup>.

### **6.6.1 Fahrbahndeckensysteme ohne und mit Riss in der HGT**

Für Fahrbahndeckensysteme ohne Riss lässt sich der Einfluss unterschiedlicher E-Moduln in den einzelnen Schichten auch mit den gebräuchlichen Handrechenverfahren (z. B. Westergaard/ Eisenmann) oder mit dem Programm BISAR (Mehrschichtentheorie) untersuchen. Um einen besseren Vergleich für die Systeme mit Riss zu erhalten, werden auch die Deckensysteme ohne Riss mit FE-Modellen berechnet.

Die Berechnungen werden, soweit nicht anders vermerkt, für Deckensysteme mit vollem Verbund durchgeführt.

### 6.6.1.1 Verkehrsbelastung

Die Verkehrsbelastung steht als 50 kN Einzellast mittig über dem künftigen Riss in der HGT. Betrachtet werden die Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, an der Unterseite der HGT unmittelbar am Riss und die Verformungen an der Fahrbahnoberseite über dem künftigen Riss in der HGT.

In Abb. 6.6.1 sind die Spannungen an der Unterseite des Asphaltes am System ohne Riss und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes aufgetragen (der E-Modul der HGT beträgt wie beim Ausgangssystem 15000 N/mm<sup>2</sup>). Deutlich erkennbar ist die größere

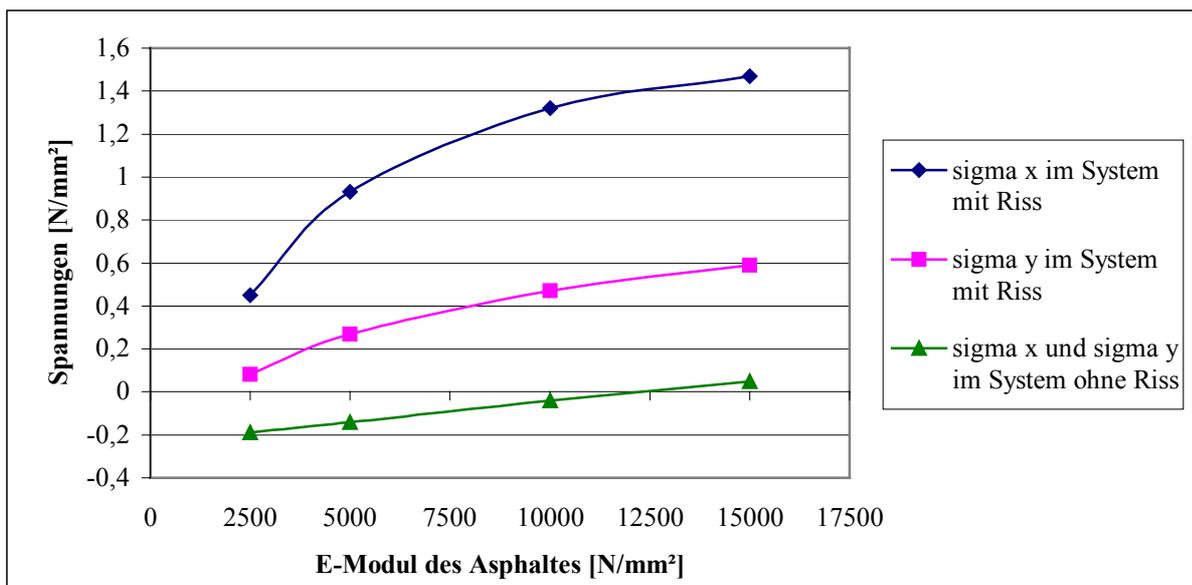


Abb. 6.6.1: Spannungen an der Unterseite des Asphaltes am System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT unter Verkehrsbelastung in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes

Abhängigkeit der Werte für die Spannungsspitzen der  $\sigma_x$ -Spannungen vom E-Modul des Asphaltes bei den Systemen mit HGT-Riss als bei den ungerissenen Systemen.

Während im Deckensystem ohne Riss an der Unterseite des Asphaltes nur Druck- oder sehr kleine Zugspannungen auftreten, entstehen im gerissenen System je nach E-Modul des As-

phaltes über dem Riss zum Teil erhebliche Biegezugspannungen, die zu einer schnelleren Ermüdung des Asphaltes an dieser Stelle führen.

Im Gegensatz dazu ist Tragwirkung in Plattenquerrichtung durch den Riss nicht wesentlich beeinträchtigt, und die Abhängigkeit der  $\sigma_y$ -Spannungen vom E-Modul des Asphaltes an der Asphaltunterseite am Riss entspricht in etwa der eines ungerissenen Systems (siehe Abb. 6.6.1).

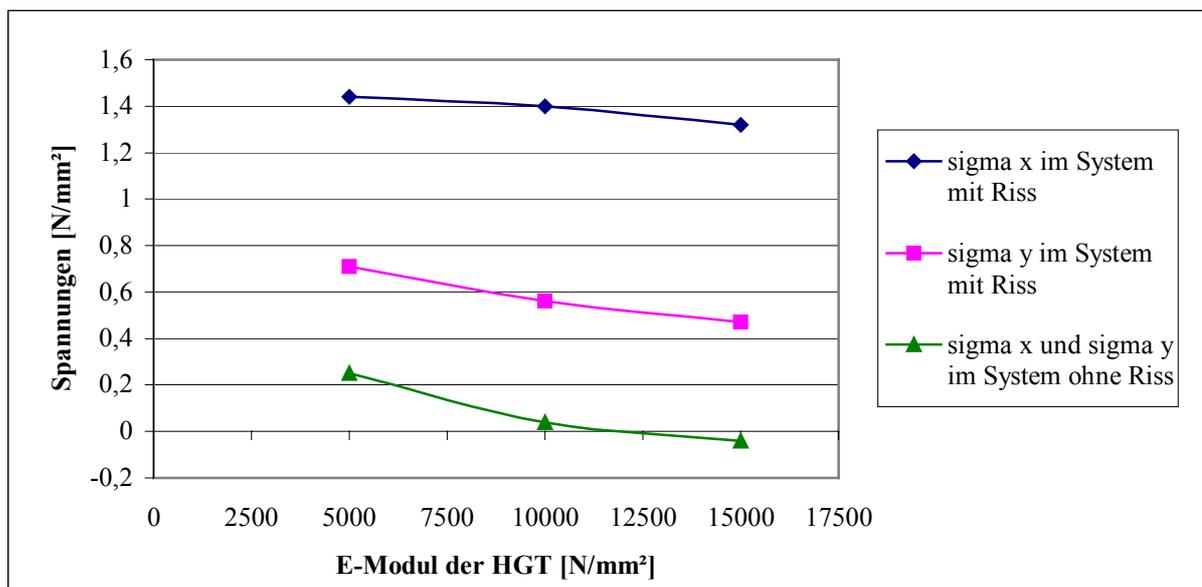


Abb. 6.6.2: Spannungen an der Unterseite des Asphaltes am System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT unter Verkehrsbelastung in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT

Sinkt der E-Modul der HGT, steigen die Spannungen an der Unterseite des Asphaltes an; allerdings ist das Anwachsen der Werte für die Spannungsspitzen der  $\sigma_x$ -Spannungen weniger ausgeprägt als in einem ungerissenen System, siehe Abb. 6.6.2. Fällt der E-Modul der ungerissenen HGT z. B. von 15000 auf 5000 N/mm<sup>2</sup> ab, erhöhen sich die  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss um 0,12 N/mm<sup>2</sup>, während sie bei einem System ohne Riss um 0,29 N/mm<sup>2</sup> anwachsen.

Die Abhängigkeit der  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes vom E-Modul der HGT entspricht ungefähr der der ungerissenen Systeme, siehe Abb. 6.6.2.

Die Spannungen an der Unterseite der HGT verhalten sich bei einer Änderung der E-Moduln im Asphalt oder in der HGT ähnlich wie das Deckensystem ohne Riss in der HGT (siehe Anlage 6.32).

Die Differenzen der Einsenkungen zwischen Plattenmitte und Plattenrand verändern sich beim System ohne und mit Riss in Abhängigkeit von den E-Moduln von Asphalt und HGT im Wesentlichen gleichmäßig (siehe Anlage 6.33).

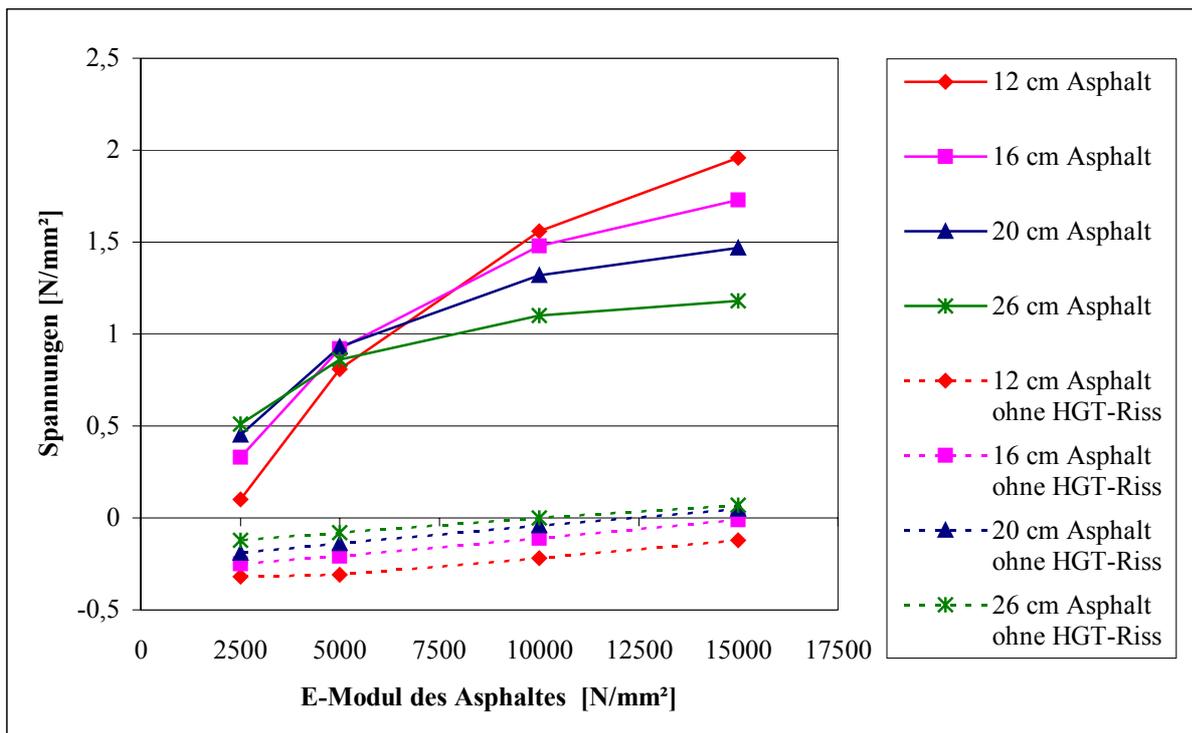


Abb. 6.6.3:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für Asphaltstärken 12 cm bis 26 cm in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter Verkehrsbelastung

Je geringer die Asphaltüberdeckung über dem Riss ist, desto größer wird die Abhängigkeit der  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss vom E-Modul des Asphaltes, siehe Abb. 6.6.3. Bei einer Asphaltstärke von 12 cm führt ein Anstieg des E-Moduls im Asphalt von 10000 N/mm² auf 15000 N/mm² bei tiefen Temperaturen zu einer Zunahme der Spannungsspitze aus Verkehrsbeanspruchung um ca. 26 %, bei einer Asphaltstärke von 20 cm beträgt die Zunahme nur ca. 11 %. Bei niedrigeren E-Moduln des Asphaltes, d. h. höheren Temperaturen im Asphalt, sind

die Unterschiede in den  $\sigma_x$ -Spannungen in Abhängigkeit von den Asphaltmicken merklich geringer.

Aus einem Vergleich mit den ungerissenen Systemen wird der starke Einfluss des E-Moduls des Asphaltes auf die Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen deutlich, siehe Abb. 6.6.3.

Im Gegensatz dazu nehmen die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss mit steigendem E-Modul der HGT ab bzw. mit sinkendem E-Modul der HGT zu, siehe Abb. 6.6.4. Ein Verringerung des E-Moduls in der HGT von 15000 auf 5000 N/mm<sup>2</sup> führt bei

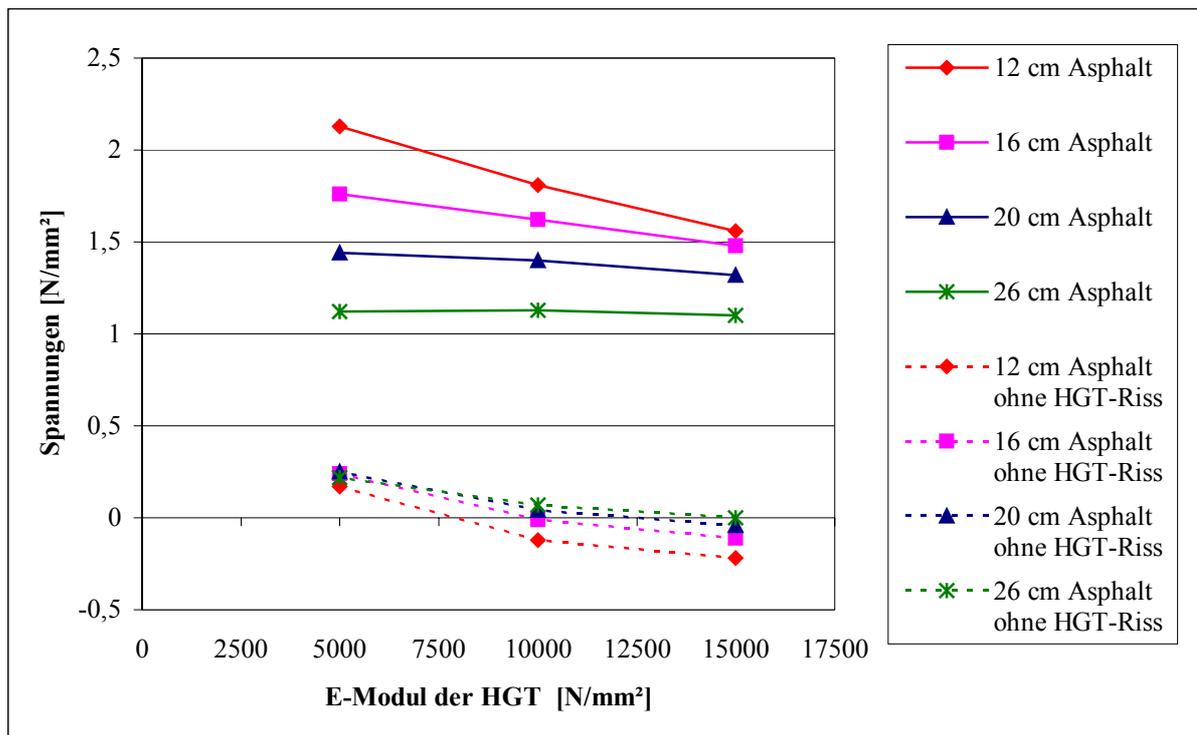


Abb. 6.6.4:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für Asphaltmicken 12 cm bis 26 cm in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Verkehrsbelastung

einer Asphaltmicke von 12 cm zu einem Anstieg der  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss um ca. 37 % (bei 20 cm Asphaltmicke ca. 9 %). Dieser Anstieg wird umso größer, je kleiner die Asphaltmicke über dem Riss ist, siehe Abb. 6.6.4. Für den Einfluss des E-Moduls der HGT ergibt sich damit der umgekehrte Trend wie für den E-Modul des Asphaltes.

An der Unterseite des Asphaltes gibt es bei den Deckensystemen mit Riss in der HGT im Vergleich zu den ungerissenen Systemen - ähnlich wie bei den  $\sigma_x$ -Spannungen - eine erhöhte

Abhängigkeit der  $\sigma_y$ -Spannungen bei dünnen Asphaltdecken vom E-Modul des Asphaltes, allerdings fallen die Absolutwerte der Spannungen in Plattenquerrichtung kleiner aus als in Längsrichtung (siehe Anlage 6.34).

Der Einfluss des E-Moduls der HGT auf die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Asphaltunterseite bei den Systemen mit Riss entspricht in etwa den Abhängigkeiten bei den ungerissenen Deckensystemen (siehe Anlage 6.34).

Die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT verhalten sich in Abhängigkeit von den E-Moduln des Asphaltes und der HGT bei den ungerissenen und gerissenen Systemen gleichförmig (siehe Anlage 6.35). Die Spannungswerte der Systeme mit Riss liegen generell unter den  $\sigma_y$ -Spannungen der Systeme ohne Riss.

### 6.6.1.2 Temperaturbelastung

Die Werte der  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss wachsen bei einer Abkühlung um 5 K für ein System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit zunehmendem E-Modul des Asphaltes etwas stärker an als die  $\sigma_y$ -Spannungen im gerissenen System bzw. die Spannungen in einem Deckensystem ohne Riss, siehe Abb. 6.6.5. Für ein Deckensystem ohne Riss ergibt sich

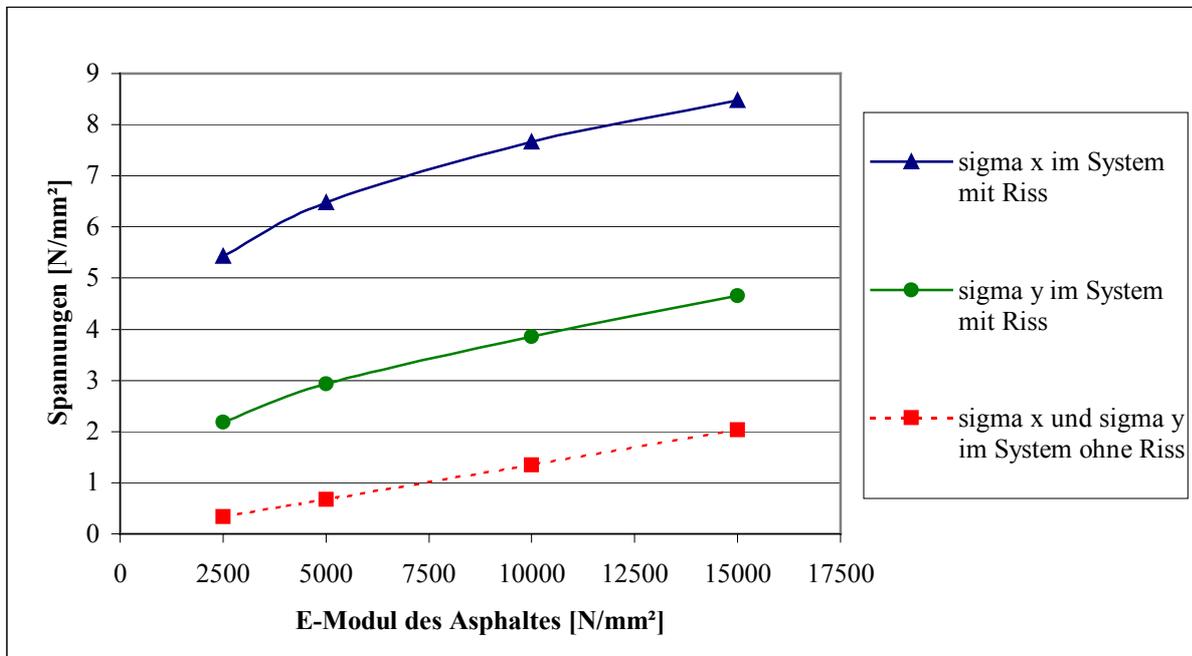


Abb. 6.6.5: Spannungen an der Unterseite des Asphaltes am System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT unter Temperaturbelastung in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes

erwartungsgemäß ein linearer Zusammenhang zwischen dem E-Modul des Asphaltes und den Spannungen an der Unterseite des Asphaltes.

Die Abhängigkeiten der Spannungen an der Unterseite des Asphaltes vom E-Modul der HGT sind in Abb. 6.6.6 aufgetragen. Auffallend ist hier die starke Einfluss des E-Moduls der HGT

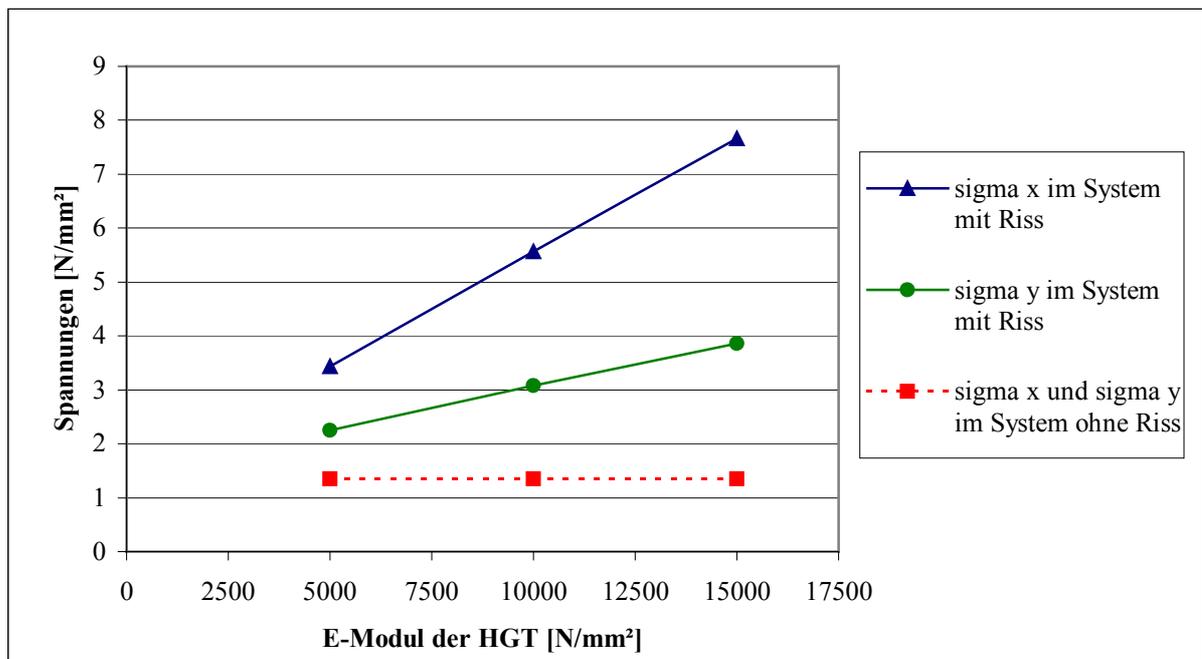


Abb. 6.6.6: Spannungen an der Unterseite des Asphaltes am System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT unter Temperaturbelastung in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT

auf die  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss. Sinkt der E-Modul der HGT von 15000 N/mm<sup>2</sup> auf 10000 N/mm<sup>2</sup>, nimmt die  $\sigma_x$ -Spannung um ca. 27 % ab; fällt der E-Modul der HGT auf 5000 N/mm<sup>2</sup>, beträgt die Verringerung der  $\sigma_x$ -Spannung sogar 55 %. Aufgrund des linearen Zusammenhanges können Zwischenwerte interpoliert werden.

Gleichzeitig vermindern sich auch die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes mit sinkendem E-Modul der HGT, wobei die Abnahme nicht so groß ist wie bei den  $\sigma_x$ -Spannungen, siehe Abb. 6.6.6.

Bei einem System ohne Riss beeinflusst der E-Modul der HGT - im Gegensatz zum System mit Riss in der HGT - die Spannungen an der Unterseite des Asphaltes nicht, siehe Abb. 6.6.6.

Auf die Spannungen an der Unterseite der HGT haben die E-Moduln des Asphaltes beim System mit Riss in der HGT nur eine sehr geringe und beim System ohne Riss keine Auswirkung (siehe Anlage 6.36). Dagegen besitzen die E-Moduln der HGT nicht nur beim System mit Riss sondern auch ohne Riss in der Tragschicht einen linearen Einfluss auf die Spannungen an der Unterseite der HGT (siehe Anlage 6.36).

Bei den Einsenkungen ergeben sich für die Fahrbahndeckensysteme ohne Riss in der HGT auf die gesamte Plattenlänge nur gleichmäßige Einsenkungen durch das Eigengewicht, eine Verwölbung des Deckensystems tritt aufgrund der Einspannungen der Schichten an den Rändern nicht auf.

Beim Vorhandensein eines Risses in der HGT findet auch eine Verwölbung des Deckensystems statt, die sowohl von den E-Moduln des Asphaltes als auch der HGT abhängt (siehe Anlage 6.37). Sinkt der E-Modul des Asphaltes sehr stark ab, wird das Verformungsverhalten nicht mehr beeinflusst, und die Verwölbung des Deckensystems geht auf null zurück.

Im Vergleich zu den Deckensystemen ohne Riss ist bei Systemen mit Riss in der HGT für alle Asphaltmicken eine geringfügig größere Abhängigkeit der  $\sigma_x$ -Spannungen vom E-Modul des

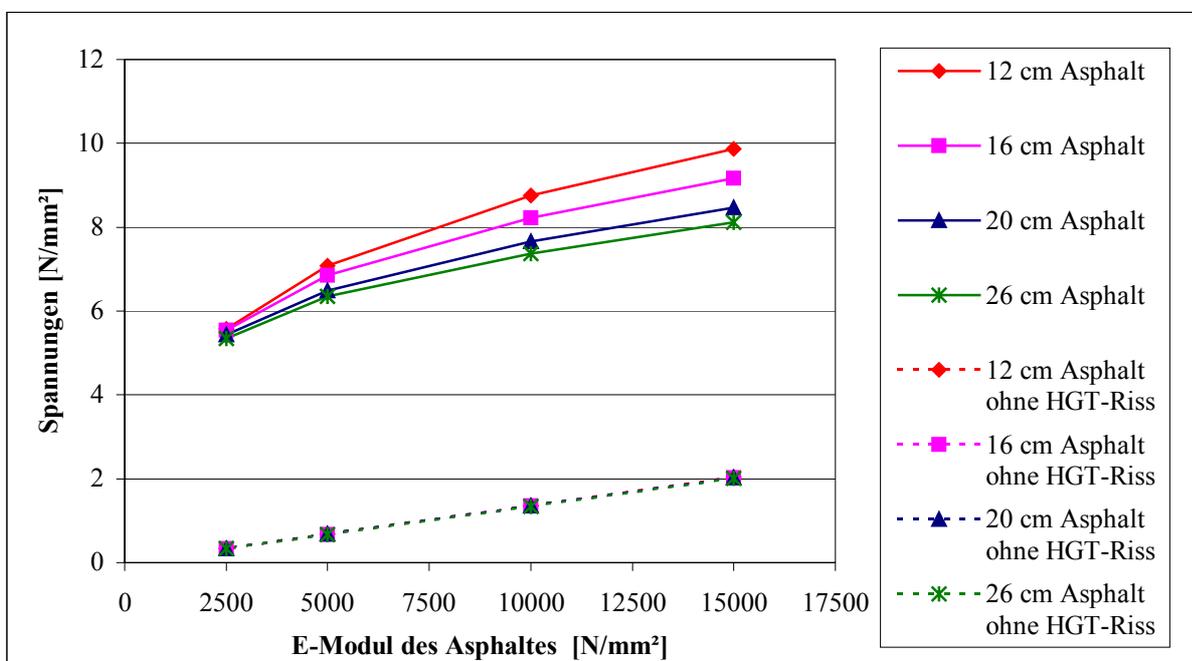


Abb. 6.6.7:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für Asphaltmicken 12 cm bis 26 cm in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter Temperaturbelastung

Asphaltes festzustellen, siehe Abb. 6.6.7. Dabei gilt: je geringer die Asphaltüberdeckung, desto größer ist die Abhängigkeit der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss vom E-Modul des Asphaltes. Bei einer Zunahme von 10000 N/mm<sup>2</sup> auf 15000 N/mm<sup>2</sup> steigen die  $\sigma_x$ -Spannungen für 12 cm Asphaltstärke um ca. 13 %, für 20 cm um ca. 11 %.

Im Vergleich zur Abhängigkeit der  $\sigma_x$ -Spannungen vom E-Modul des Asphaltes unter Verkehrsbelastung (Abb. 6.6.3), ist unter Temperaturbeanspruchung (Abb. 6.6.7) die Abhängigkeit bei dünnen Asphaltstärken geringer, allerdings betragen die Absolutwerte der Spannungen aus Temperatur das 5- bis 6-fache.

Ein Einfluss des E-Moduls der HGT auf die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss ist aus Abb. 6.6.8 klar erkennbar, während er bei den Deckensystemen ohne

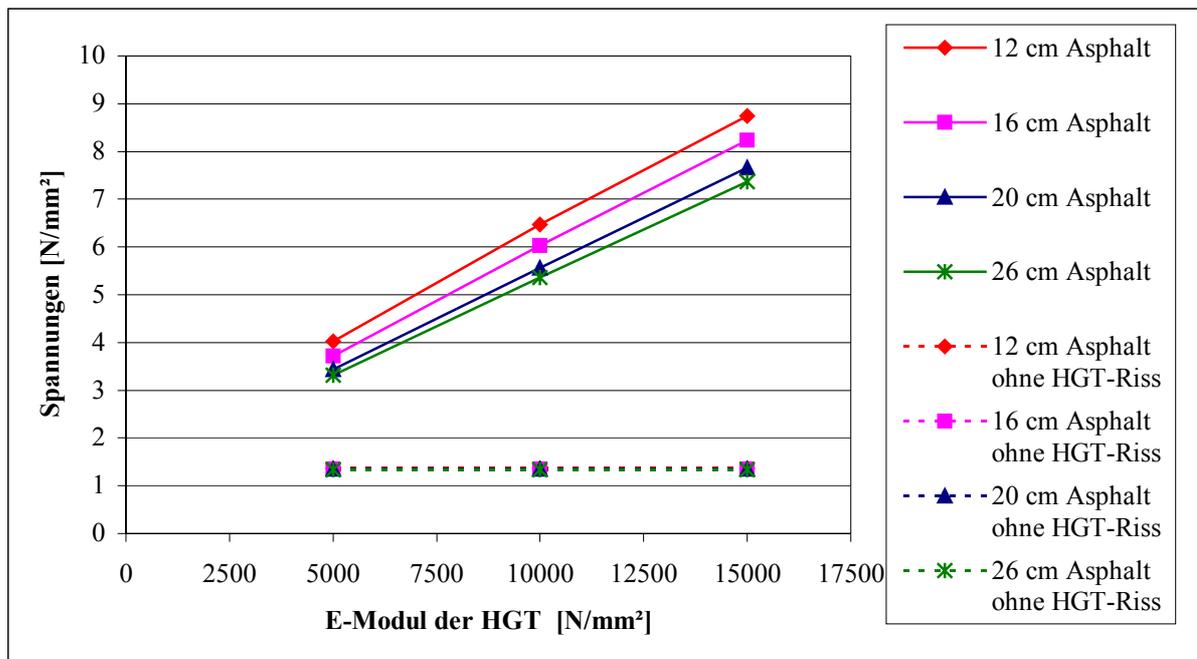


Abb. 6.6.8:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für Asphaltstärken 12 cm bis 26 cm in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Temperaturbelastung

Riss erwartungsgemäß nicht vorhanden ist. Veränderungen bei den E-Moduln der HGT wirken sich auf die Änderungen der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes stärker aus als die Variation der E-Moduln des Asphaltes, wobei letztere die größeren Absolutwerte der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes ergeben (siehe Abb. 6.6.7).

Die Auswirkungen der E-Moduln der HGT auf die  $\sigma_x$ -Spannungen sind bei allen Asphaltstärken in etwa gleich groß, siehe Abb. 6.6.8.

Die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss verändern sich in Abhängigkeit von den E-Moduln des Asphaltes und der HGT gleichförmig wie die Spannungen in Plattenlängsrichtung, dabei betragen die Spannungswerte maximal 50 % der Werte in Längsrichtung (siehe Anlage 6.38).

Der Einfluss der E-Moduln des Asphaltes auf die Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss in Plattenquerrichtung ist für die unterschiedlichen Asphaltstärken vernachlässigbar klein (siehe Anlage 6.39). Die Absolutwerte der  $\sigma_y$ -Spannungen am Riss liegen ca. 17 % unter den Werten der Deckensysteme ohne Riss.

Die E-Moduln der HGT beeinflussen die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT der Deckensysteme mit und ohne Riss ungefähr gleich stark (siehe Anlage 6.39). Auch hier sind die Spannungswerte der ungerissenen Systeme größer als die der gerissenen Systeme.

### 6.6.1.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung

Bei der Berechnung der Kombinationslastfälle (gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung mit Eigengewicht) mit und ohne Riss in der HGT mit einem FE-Modell für die unterschiedlichen E-Moduln des Asphaltes und der HGT ergeben sich für die Spannungen grundsätzlich ähnliche Kurvenläufe wie bei den Systemen unter Temperaturbelastung, d. h. die Beanspruchung aus Temperatur bestimmt maßgeblich das Gesamttragverhalten im Kombinationslastfall (siehe Anlagen 6.40 und 6.41).

Die Werte für die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss werden im Vergleich zu den Systemen ohne Riss wesentlich stärker von den E-Moduln des Asphaltes und der HGT beeinflusst (siehe Anlage 6.40).

Die Differenzen der Einsenkungen zwischen Plattenmitte und Plattenrand (Verwölbungen) sind bei einer gleichzeitigen Belastung aus Verkehr und Temperatur maßgebend vom E-Modul des Asphaltes abhängig, wobei sich die Systeme mit und ohne Riss in der HGT in gleichartiger Weise verhalten (siehe Anlage 6.42).

Im untersuchten Bereich verursachen die E-Moduln der HGT bei einem System mit Riss in der Tragschicht keine Veränderungen bei den Verwölbungen (siehe Anlage 6.42).

## 6.6.2 Lösen des Verbundes zwischen Asphalt und HGT

Nachdem die Größe der  $\sigma_x$ -Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss von den E-Moduln des Asphaltes und der HGT beeinflusst wird, gilt es zu untersuchen, welche Einflüsse die E-Moduln auf die Beanspruchung der Fahrbahndeckensysteme beim abschnittswise Lösen des Verbundes - insbesondere unter Verkehrsbelastung - haben.

### 6.6.2.1 Verkehrsbelastung

Beim Grundsystem (20 cm Asphalt auf 15 cm HGT) mit den Werkstoffkennwerten gem. Kap. 6.1 ergibt sich ein Minimum der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss für den Fall, dass der Verbund um den Riss insgesamt auf eine Länge gelöst wird, die in etwa der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht. Diese Beziehung gilt auch für die übrigen Asphaltstärken mit den Werkstoffkennwerten des Ausgangssystems.

Beim Lösen des Verbundes sind die Größen der Spannungswerte für  $\sigma_x$  von den E-Moduln des Asphaltes abhängig, es entstehen vier nahezu parallele Kurvenverläufe, wobei mit abnehmendem E-Modul des Asphaltes der minimale Spannungswert tendenziell bereits beim Lösen auf kürzere Längen auftritt, siehe Abb. 6.6.9.

Bei einer Detailbetrachtung der Spannungswerte für die Aufhebung des Verbundes in einem Bereich von 0 bis 50 cm wird diese Verschiebung deutlicher, siehe Abb. 6.6.10. Tritt die kleinste  $\sigma_x$ -Spannung bei einem E-Modul des Asphaltes von 10000 N/mm<sup>2</sup> bei einem insgesamt gelösten Verbund von 20 cm (jeweils 10 cm links und rechts vom Riss) auf, so entsteht bei einem E-Modul des Asphaltes von 2500 N/mm<sup>2</sup> ein Minimum bei einer Aufhebung des Verbundes auf insgesamt ca. 10 cm Länge, siehe Abb. 6.6.10.

Wird bei einem E-Modul des Asphaltes von 2500 N/mm<sup>2</sup> der Verbund auf insgesamt 20 cm gelöst, treten zwar nicht mehr die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes auf, doch sie liegen nur geringfügig darüber und noch deutlich unter dem Spannungswert für den vollen Verbund.

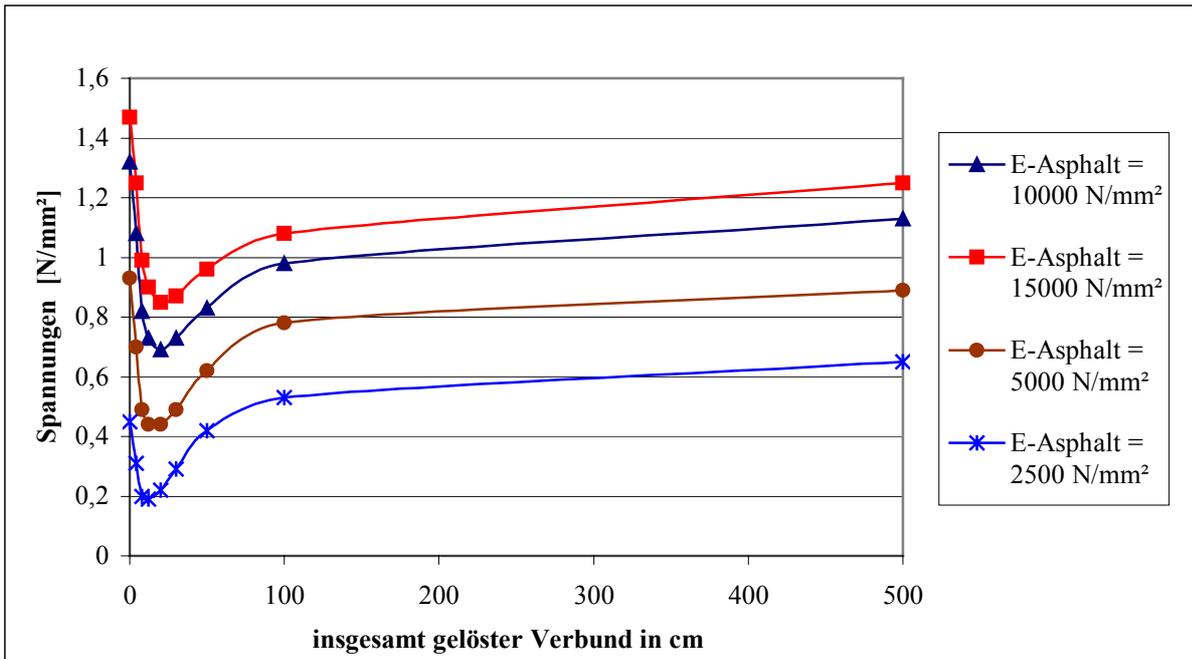


Abb. 6.6.9:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung

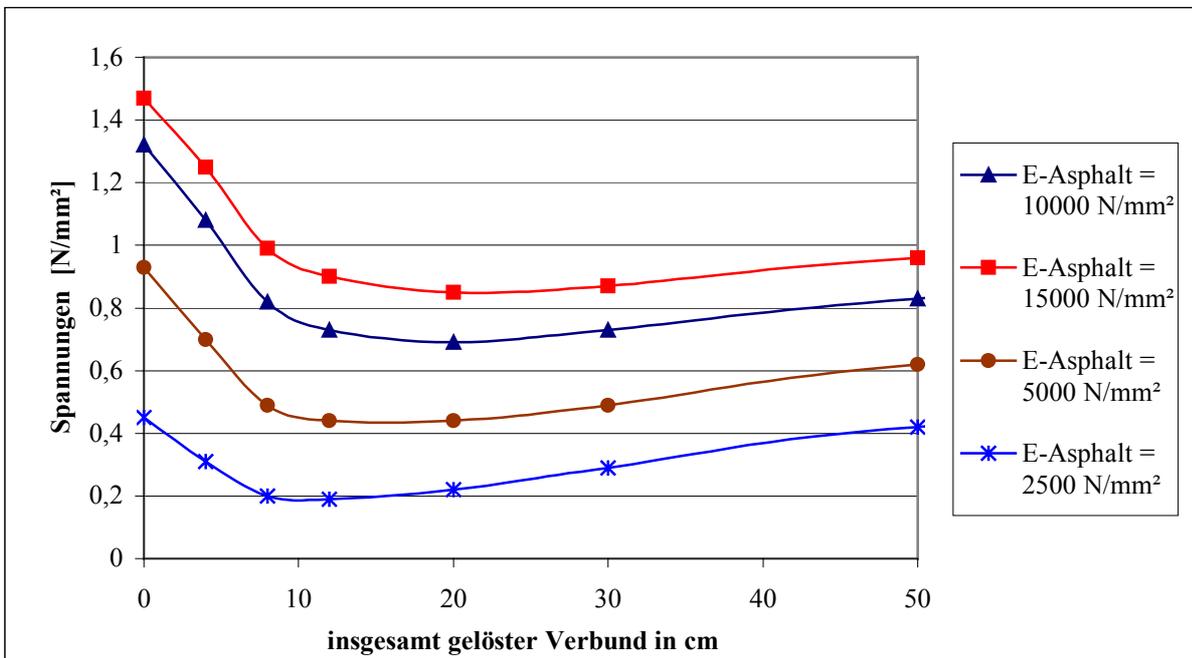


Abb. 6.6.10:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm aus Abb. 6.6.9

Steigt der E-Modul des Asphaltes gegenüber dem Ausgangswert z. B. auf 15000 N/mm<sup>2</sup> bei sehr tiefen Temperaturen an, liegt das Minimum der  $\sigma_x$ -Spannungen weiterhin in etwa bei einem insgesamt auf 20 cm gelösten Verbund.

Die Absolutwerte der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss wachsen mit einem zunehmenden E-Modul des Asphaltes an.

Insgesamt ist festzustellen, dass für die untersuchten E-Moduln des Asphaltes sich bei einem auf 20 cm (= Asphaltstärke) gelösten Verbund deutlich kleinere Spannungsspitzen der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss ergeben als bei Deckensystemen mit vollem Verbund.

Bei einer Variation der E-Moduln der HGT entstehen die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes bei einem auf insgesamt 20 cm gelösten Verbund. Die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen ergeben sich für alle E-Moduln der HGT bei derselben Länge für den gelösten Verbund (siehe Anlage 6.43).

Mit einem abnehmenden E-Modul der HGT wachsen die Biegespannungen in Plattenlängsrichtung an, wobei die relative Zunahme bei vollem Verbund geringer ist als bei einem abschnittsweise gelösten Verbund (siehe Anlage 6.43).

Für die Biegespannungen  $\sigma_y$  an der Asphaltunterseite in Plattenquerrichtung gelten die gleichen Abhängigkeiten von den E-Moduln des Asphaltes wie in Plattenlängsrichtung. Die minimalen  $\sigma_y$ -Spannungen an einem System mit 20 cm Asphalt ergeben sich bei einem insgesamt auf ca. 8 cm gelösten Verbund; dabei ist auch hier festzustellen, dass mit abnehmendem E-Modul des Asphaltes sich das Minimum bei einem auf kürzerer Länge gelösten Verbund einstellt, z. B. bei E-Asphalt = 2500 N/mm<sup>2</sup> bei 4 cm gelöstem Verbund (siehe Anlage 6.44).

Wird der Verbund auf insgesamt 20 cm gelöst, haben die  $\sigma_y$ -Spannungen die gleiche Größenordnung wie bei vollem Verbund, lediglich bei einem E-Asphalt = 2500 N/mm<sup>2</sup> liegen die Spannungswerte über den Werten des vollen Verbundes, aber absolut gesehen noch auf sehr niedrigem Niveau (siehe Anlage 6.44).

Der E-Modul der HGT beeinflusst die Biegespannungen an der Asphaltunterseite in Plattenquerrichtung genauso wie die  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung, die minimalen  $\sigma_y$ -Spannungen ergeben sich für alle E-Moduln der HGT bei derselben Länge des gelösten Verbundes (siehe Anlage 6.45).

An der Unterseite der HGT nehmen die Spannungen  $\sigma_y$  in Plattenquerrichtung bei einem fallenden E-Modul des Asphaltes zu; fällt z. B. der E-Modul des Asphaltes im Sommer von 10000 N/mm<sup>2</sup> auf 2500 N/mm<sup>2</sup>, steigen die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT bei vollem Verbund um ca. 40 % an. In den Sommermonaten trägt der Asphalt nur relativ wenig zur Abtragung der Verkehrslasten bei.

Löst sich der Verbund zwischen Asphalt und HGT in Plattenlängsrichtung auf insgesamt maximal 30 cm, ergeben sich gegenüber den Spannungswerten bei vollem Verbund keine wesentlichen Unterschiede (siehe Anlage 6.46). Wird der Verbund auf eine noch größere Länge aufgehoben, wachsen die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT bei niedrigen E-Moduln des Asphaltes stärker an, während sie bei höheren E-Moduln des Asphaltes (Winter) nur geringer ansteigen (siehe Anlage 6.46). Der Einfluss der E-Moduln des Asphaltes macht sich beim Lösen des Verbundes erst auf größere Längen (> 30 cm) deutlicher bemerkbar.

Sinkt der E-Modul der HGT, so fallen die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT entsprechend ab (siehe Anlage 6.47). Die verschiedenen E-Moduln der HGT wirken sich erst beim Lösen des Verbundes auf über 50 cm richtig aus, darunter sind die Spannungswerte bei den jeweiligen E-Moduln nahezu unabhängig von der Größe des gelösten Bereiches (siehe Anlage 6.47).

Für Asphaltstärken von 12 cm, 16 cm und 26 cm ergeben sich beim Lösen des Verbundes unter Berücksichtigung der unterschiedlichen E-Moduln des Asphaltes und der HGT ähnliche Kurvenverläufe für die  $\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes. Da der Bereich der minimalen Biegespannungen von besonderem Interesse ist, werden - zusätzlich zu den Diagrammen mit dem abschnittsweisen Lösen des Verbundes bis maximal 500 cm - noch Detailausschnitte bis zu insgesamt 50 cm gelöstem Verbund dargestellt, beides in Abhängigkeit von den E-Moduln des Asphaltes und der HGT (siehe Anlage 6.48 bis 6.59).

Bei allen Asphaltstärken entstehen für die meisten der untersuchten E-Moduln des Asphaltes die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes, wenn der Verbund insgesamt auf eine Länge gelöst wird, die in etwa der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht. Lediglich bei einem E-Modul des Asphaltes von 2500 N/mm<sup>2</sup> werden die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen bereits bei einem Lösen des Verbundes auf geringere Länge erreicht (siehe Anlagen 6.48, 6.52 und 6.56).

Hebt man den Verbund auf eine Länge, die ungefähr der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht, auf, ist der Spannungswert nur geringfügig größer, in jedem Fall aber wesentlich kleiner als bei vollem Verbund.

Die E-Moduln der HGT haben für Asphaltstärken zwischen 12 cm und 26 cm keinen Einfluss auf die Größe des gelösten Verbundbereiches, bei dem sich die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen ergeben (siehe Anlagen 6.49, 6.53 und 6.57).

Für die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenquerrichtung ergeben sich für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm bei größeren E-Moduln des Asphaltes Minimalwerte, falls der Verbund in Plattenlängsrichtung auf ca. 8 cm (für 12 cm Asphaltstärke) bis ca. 10 cm (für 26 cm Asphaltstärke) gelöst wird (siehe Anlagen 6.50, 6.54 und 6.58). Diese Feststellung gilt auch für alle untersuchten E-Moduln der HGT (siehe Anlagen 6.51, 6.55 und 6.59). Nur bei einem starken Abfall des E-Moduls des Asphaltes, z. B. auf 2500 N/mm<sup>2</sup>, treten bei dünnen Asphaltstärken ( $\leq 16$  cm) die minimalen  $\sigma_y$ -Spannungen für den vollen Verbund auf, und das Lösen des Verbundes verursacht einen Anstieg der Biegespannungen in Plattenquerrichtung; die Absolutwerte der  $\sigma_y$ -Spannungen sind aber in diesem Fall sehr klein ( $< 0,2$  N/mm<sup>2</sup>).

Die Spannungen  $\sigma_y$  an der Unterseite der HGT direkt am Riss werden für Asphaltstärken zwischen 12 cm und 16 cm beim Lösen des Verbundes auf eine Länge von maximal 20 cm und für Asphaltstärken  $> 20$  cm bei einer Länge bis maximal 30 cm relativ wenig verändert, erst bei einem Aufheben des Verbundes über größere Strecken wachsen die Spannungen stärker an (siehe Anlagen 6.46, 6.47, 6.60, 6.61 und 6.62).

Einen deutlich größeren Einfluss auf die Biegespannungen an der Unterseite der HGT als das Lösen des Verbundes haben die E-Moduln des Asphaltes und der HGT, wobei ein sinkender E-Modul des Asphaltes und ein steigender E-Modul der HGT - wie beim System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT - zu einer Erhöhung der  $\sigma_y$ -Spannungen führen (siehe Anlagen 6.46, 6.47, 6.60, 6.61 und 6.62). Dies verursacht an der Unterseite der HGT durch die temperaturabhängigen E-Moduln des Asphaltes jahreszeitliche Spannungsänderungen zwischen 40 % und 70 % aus der Verkehrsbelastung. Durch eine Reduzierung der E-Moduln der HGT, z. B. von 15000 N/mm<sup>2</sup> auf 5000 N/mm<sup>2</sup>, kann eine Verringerung der Biegespannungen in Plattenquerrichtung von ca. 30 bis 40 % erreicht werden.

Fazit:

Ein Lösen des Verbundes um den Riss in der HGT auf eine Länge, die insgesamt der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht, reduziert die maßgebenden Spannungen  $\sigma_x$  an der Unterseite des Asphaltes unter Verkehrsbeanspruchung in etwa auf ein Minimum. In Plattenquerrichtung ergeben sich für diesen Fall an der Unterseite des Asphaltes im allgemeinen geringere Spannungswerte als bei vollem Verbund. Lediglich in den Sommermonaten (= niedriger E-Modul des Asphaltes) treten in Plattenquerrichtung bei dünnen Asphaltüberdeckungen größere Spannungswerte als bei vollem Verbund auf, allerdings liegen diese Werte in einer Größenordnung  $\leq 0,2 \text{ N/mm}^2$ .

Wird der Verbund auf zu große Länge gelöst, führt dies zu einem erneuten Anwachsen der Spannungen aus Verkehrslast.

### 6.6.2.2 Temperaturbelastung

Für das Grundsystem (20 cm Asphalt auf 15 cm HGT) und die Ausgangswerte der beiden Schichten gilt, dass sich bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K die minimale Beanspruchung im Deckensystem ergibt, wenn der Verbund zwischen Asphalt und HGT auf die gesamte Länge vollständig gelöst wird.

Für vom Ausgangswert abweichende E-Moduln des Asphaltes entstehen beim abschnittsweisen Lösen des Verbundes für die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss vergleichbare Kurvenverläufe, bei denen die Maximalwerte der  $\sigma_x$ -Spannungen bei vollem Verbund und die Minimalwerte bei den Systemen ohne Verbund auftreten, siehe Abb. 6.6.11.

Wird der Verbund z. B. insgesamt auf eine Länge von 20 cm gelöst, reduzieren sich bei einem E-Modul des Asphaltes von  $10000 \text{ N/mm}^2$  die  $\sigma_x$ -Spannungen um ca. 53 %, bei einem E-Asphalt von  $5000 \text{ N/mm}^2$  um ca. 62 %. Der Entspannungseffekt verstärkt sich mit abnehmendem E-Modul des Asphaltes noch bzw. verringert sich bei steigendem E-Modul des Asphaltes (bei E-Asphalt =  $15000 \text{ N/mm}^2$  beträgt die Reduktion ca. 46 %), siehe Abb. 6.6.12.

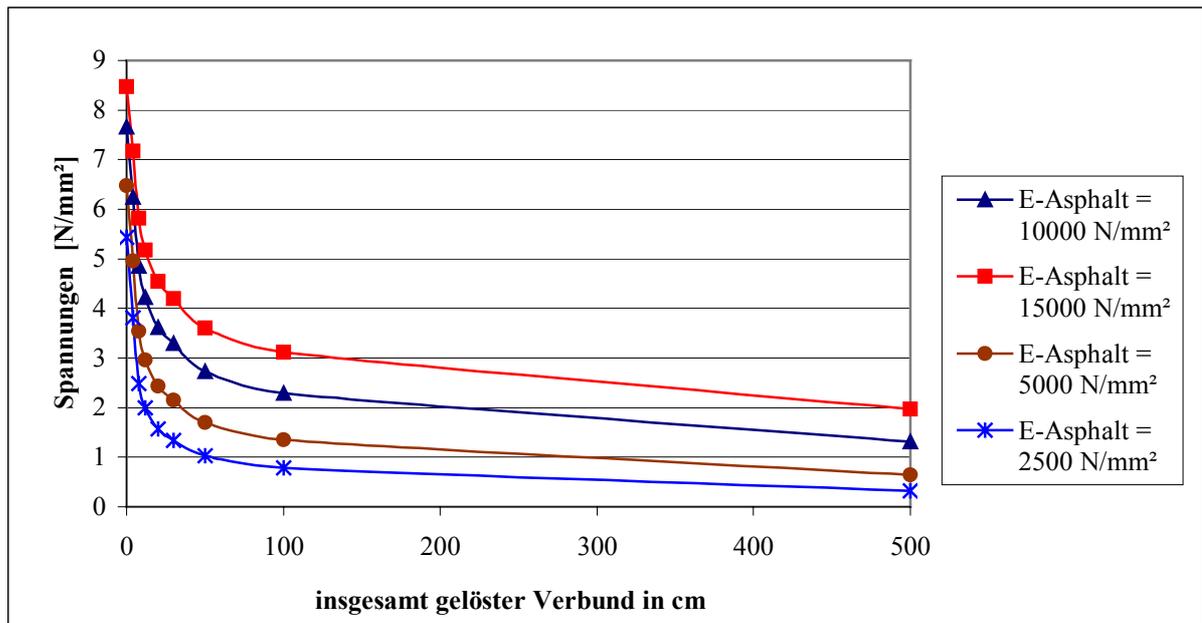


Abb. 6.6.11:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Temperaturbelastung

Ein Lösen des Verbundes auf eine Länge von 8 cm bei einem E-Asphalt von 15000 N/mm² bewirkt eine größere Reduzierung der Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem

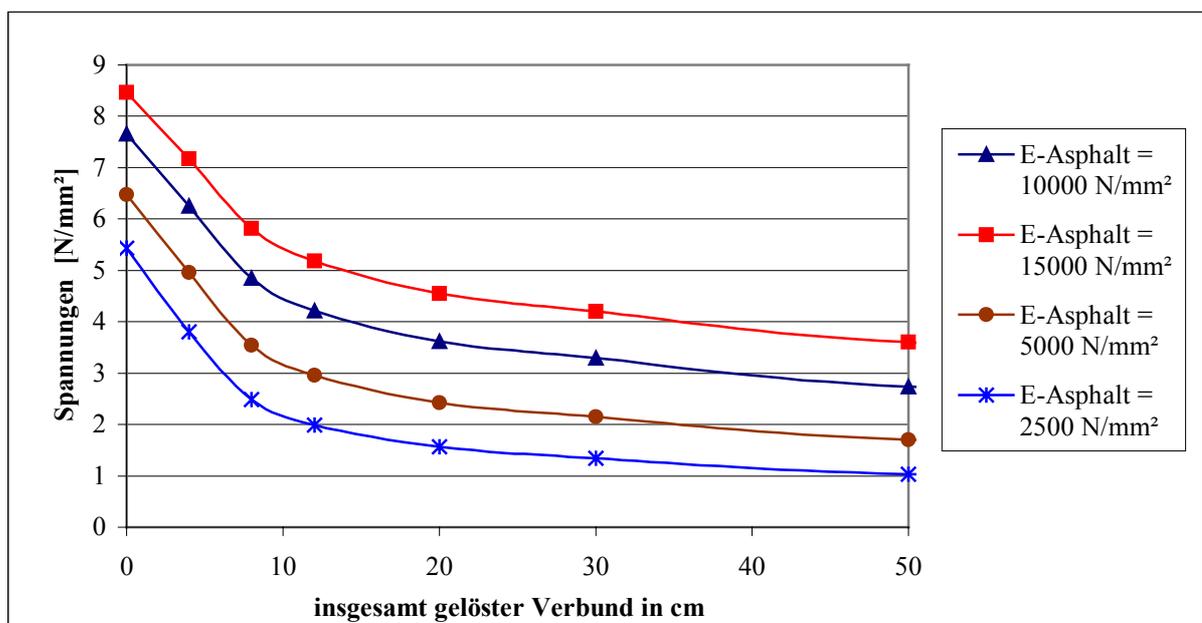


Abb. 6.6.12:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, Detailausschnitt aus Abb. 6.6.11

Riss als eine Abnahme des E-Moduls des Asphaltes auf 5000 N/mm<sup>2</sup> bei vollem Verbund, siehe Abb. 6.6.12.

Da die jahreszeitlichen Schwankungen des E-Moduls des Asphaltes nur wenig beeinflusst werden können, führt ein Lösen des Verbundes auf relativ geringe Längen zu einer erheblichen Entlastung des Asphaltes über dem Riss, siehe Abb. 6.6.12. Für die Anwendung in der Praxis ist es somit günstiger, den Verbund gezielt auf eine kurze Länge zu lösen als ein weiches Bindemittel zu verwenden, um einer Reflexionsrissbildung vorzubeugen.

Ähnliche Kurvenverläufe ergeben sich auch für die Abhängigkeit der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss vom E-Modul der HGT, wobei hier die prozentualen Abnahmen der Spannungswerte mit sinkendem E-Modul kleiner werden; z. B. beträgt die Abnahme bei 20 cm gelöstem Verbund bei einem E-HGT von 15000 N/mm<sup>2</sup> ca. 53 % und bei einem E-HGT von 5000 N/mm<sup>2</sup> ca. 35 % (siehe Anlage 6.63).

Insgesamt bewirkt eine Reduzierung des E-Moduls der HGT z. B. von 15000 N/mm<sup>2</sup> auf 5000 N/mm<sup>2</sup> bei vollem Verbund die gleiche Reduzierung der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes wie ein Lösen des Verbundes auf insgesamt ca. 30 cm Länge. Eine Kombination der beiden Maßnahmen führt zu einer noch größeren Verringerung der Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss (siehe Anlage 6.63).

Für die  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung an der Unterseite des Asphaltes gelten die gleichen grundsätzlichen Abhängigkeiten von den E-Moduln des Asphaltes und der HGT, wobei die Spannungswerte generell wesentlich niedriger sind als in Plattenlängsrichtung (siehe Anlagen 6.64 und 6.65).

Die Spannungen  $\sigma_y$  an der Unterseite der HGT werden bei den unterschiedlichen E-Moduln des Asphaltes beim Lösen des Verbundes erst spürbar beeinflusst, wenn sich der Verbund auf größeren Längen (> 50 cm) löst. Für kleinere Längen sind die Auswirkungen des Verbundlösen und der verschiedenen E-Moduln des Asphaltes auf die  $\sigma_y$ -Spannungen vernachlässigbar klein (siehe Anlage 6.66).

Dagegen übt der E-Modul der HGT auf die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT einen relativ großen Einfluss aus; so fallen die Spannungswerte um ca. 70 %, falls der E-Modul der HGT von 15000 N/mm<sup>2</sup> auf 5000 N/mm<sup>2</sup> abnimmt (siehe Anlage 6.67).

Das Lösen des Verbundes zwischen Asphalt und HGT wirkt sich auf die Spannungen an der Unterseite der HGT erst aus, wenn sich der Verbund insgesamt auf mehr als 50 cm Länge gelöst hat (siehe Anlage 6.67).

Für die Spannungsspitzen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Plattenlängsrichtung  $\sigma_x$  und in -querrichtung  $\sigma_y$  ergeben sich für die Asphaltmicken 12 cm, 16 cm und 26 cm keine grundsätzlich unterschiedlichen Verhältnisse (siehe Anlagen 6.68 bis 6.73) gegenüber dem Ausgangssystem mit 20 cm Asphalt. Die Darstellung in den Anlagen 6.68 bis 6.73 wird deshalb auf den Bereich 0 bis 50 cm gelöster Verbund begrenzt.

Die Biegespannungen  $\sigma_y$  an der Unterseite der HGT am Riss werden - ähnlich wie beim System 20 cm Asphalt - für die Asphaltmicken 12 cm bis 26 cm beim Lösen des Verbundes bis maximal 50 cm vom E-Modul des Asphaltes nur relativ wenig beeinflusst, während eine Variation der E-Moduln der HGT sich ganz erheblich auf diese Spannungen auswirkt (siehe Anlagen 6.74 bis 6.76).

Fazit:

Um zu starke Beanspruchungen von Deckensystemen mit Asphalt auf gerissener HGT an der Unterseite des Asphaltes bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K über die Dicke zu vermeiden, wäre es am günstigsten, den Verbund zwischen Asphalt und HGT auf die gesamte Plattenlänge vollständig zu lösen.

Bei einem abschnittswisen Lösen des Verbundes auf kurze Bereiche um den Riss, werden in Abhängigkeit von den E-Moduln des Asphaltes die Spannungen an der Unterseite des Asphaltes sowohl in Plattenlängs- als auch in -querrichtung erheblich reduziert. Da die Schwankungen des E-Moduls des Asphaltes temperaturabhängig und somit weitgehend unvermeidbar sind, können durch das gezielte Lösen des Verbundes die Spannungsspitzen an der Unterseite des Asphaltes, die vor allem in den Wintermonaten auftreten, teilweise verringert werden.

Eine Variation der E-Moduln der HGT beeinflusst ebenfalls sehr stark die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss. Hier besteht die Möglichkeit durch eine gezielte Mischgutzusammensetzung den E-Modul der HGT zu verringern; dies würde eine ganz erhebliche Reduzierung der Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss hervorrufen.

Außerdem lässt sich durch gezielte Aufhebung des Verbundes selbst auf kurze Längen eine zusätzliche Entspannung erreichen.

Für die Beanspruchung an der Unterseite der HGT am Riss hat das gezielte Lösen des Verbundes um den Riss auf eine Länge, die der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht, keinen Einfluss.

Eine Variation der E-Moduln des Asphaltes führt hier nur zu geringen Veränderungen bei den  $\sigma_y$ -Spannungen, während ein niedrigerer E-Modul der HGT die Spannungswerte deutlich reduziert.

### 6.6.3. Rissabstände in der HGT

Für die Ausgangswerte des Asphaltes und der HGT ergibt sich bei einer Reduzierung des Kerbenabstandes in der HGT unter Verkehrsbeanspruchung ein leichter Anstieg der Biegespannungen in Plattenlängs- und -querrichtung an der Unterseite des Asphaltes. Bei einer gleichmäßigen Abkühlung der Deckensysteme über die Dicke um 5 K hat eine Verkürzung des Kerbenabstandes einen deutlichen Abfall der Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss zur Folge.

Die Auswirkungen unterschiedlicher E-Moduln für Asphalt und HGT sollen im Folgenden untersucht werden.

#### 6.6.3.1 Verkehrsbelastung

Die Höhe der Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss wird wesentlich stärker von den E-Moduln des Asphaltes beeinflusst als vom Abstand der Kerben in der HGT, siehe Abb. 6.6.13.

Bei tiefen Temperaturen (großer E-Modul des Asphaltes) erreichen die  $\sigma_x$ -Spannungen aus Verkehrsbeanspruchung um ca. 50 % höhere Spannungswerte als in den Sommermonaten mit entsprechend niedrigem E-Modul des Asphaltes. Der Anstieg der  $\sigma_x$ -Spannungen bei kleineren Rissabständen nimmt zwar mit abnehmendem E-Modul des Asphaltes zu, liegt aber deutlich unter den jahreszeitlichen Schwankungen der Spannungswerte.

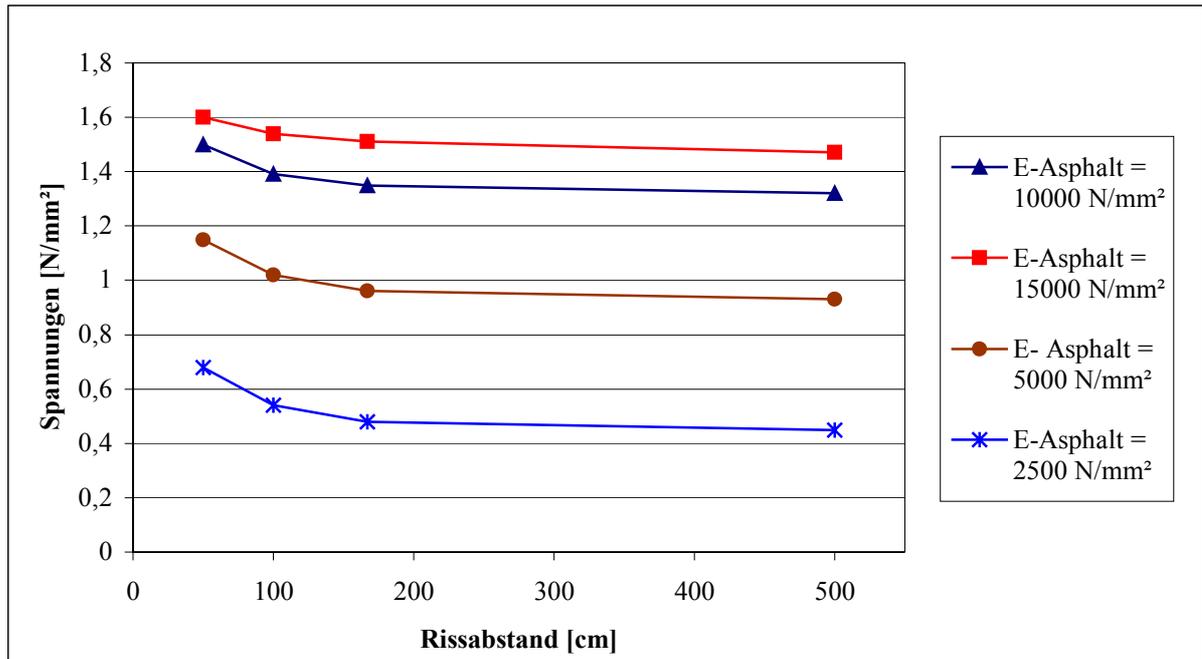


Abb. 6.6.13:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes in Abhängigkeit des Rissabstandes R unter Verkehrsbelastung

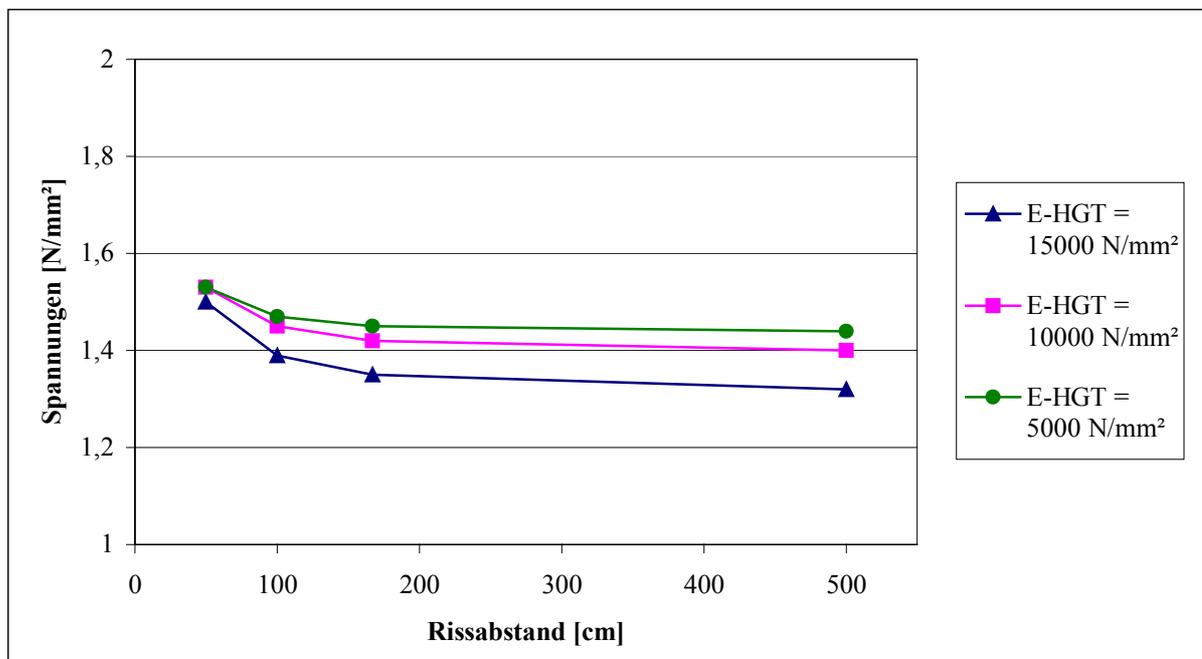


Abb. 6.6.14:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT in Abhängigkeit des Rissabstandes R unter Verkehrsbelastung

Der E-Modul der HGT übt auf die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Abhängigkeit vom Rissabstand einen kleineren Einfluss aus als die E-Moduln des Asphaltes, siehe Abb. 6.6.14.

Beträgt bei einem E-Modul der HGT von 15000 N/mm<sup>2</sup> die Zunahme der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss durch die Reduzierung von R von 5,0 m auf 1,0 m ca. 5 %, so sind es bei einem E-Modul der HGT von 5000 N/mm<sup>2</sup> nur ca. 2 %, d. h. bei einem abnehmendem E-Modul der HGT spielt der Abstand der Kerben auf die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes erst bei einem Kerbenabstand kleiner als 1,0 m eine nennenswerte Rolle.

Bei sehr kleinen Rissabständen z. B. 0,50 m wirkt sich der E-Modul der HGT auf die Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss praktisch nicht mehr aus.

Für die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenquerrichtung gelten die gleichen Zusammenhänge wie für die Plattenlängsrichtung; der Einfluss der E-Moduln des Asphaltes auf die Biegebeanspruchung ist deutlich größer als der der Rissabstände (siehe Anlage 6.77). Erst bei einer Verkleinerung der Rissabstände in der HGT auf unter 1,0 m wachsen die  $\sigma_y$ -Spannungen stärker an. Die Spannungswerte  $\sigma_y$  in Plattenquerrichtung aus Verkehrsbelastung betragen max. 50 % der Werte der Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung.

Auf die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes hat der E-Modul der HGT stärkere Auswirkungen als in Plattenlängsrichtung (siehe Anlage 6.77). Fällt der E-Modul der HGT bei einem Rissabstand von 5,0 m von 15000 N/mm<sup>2</sup> auf 5000 N/mm<sup>2</sup> ab, so steigen die  $\sigma_y$ -Spannungen um ca. 51 % an, bei einem Rissabstand von 1,0 m beträgt diese Zunahme noch ca. 43 %, d. h. mit sinkendem Rissabstand wird der Einfluss des E-Moduls der HGT auf die Spannungen in Plattenquerrichtung etwas geringer (siehe Anlage 6.77). Insgesamt sind auch hier die Auswirkungen der unterschiedlichen E-Moduln in der HGT unter Verkehrslast wesentlich größer als der Einfluss der Rissabstände in der HGT.

Die Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss hängen in Plattenquerrichtung von den E-Moduln des Asphaltes und der HGT deutlich stärker ab als von den Rissabständen in der HGT (siehe Anlage 6.78). Ein Abfall des E-Moduls des Asphaltes im Sommer führt zwangsläufig zu einem Anstieg der Spannungen  $\sigma_y$  an der Unterseite der HGT, der bis zu ca. 60 % betragen kann.

Eine Variation der E-Moduln der HGT ruft Spannungsveränderungen bei den  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT in einer Größenordnung von bis zu 50 % hervor (siehe Anlage 6.78). Der Einfluss der Rissabstände auf diese Spannungen ist dagegen sehr gering.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen E-Moduln für Asphalt und HGT auf die Biegespannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Abhängigkeit von den Rissabständen für die Asphaltstärken 12, 16 und 26 cm sind in den Anlagen 6.79 bis 6.84 dargestellt.

Für alle Asphaltstärken gilt, dass der E-Modul des Asphaltes auf diese Spannungen den stärksten Einfluss ausübt, wobei bei kleinen Asphaltstärken die Unterschiede bei den Spannungswerten von den E-Moduln im Winter und im Sommer am größten sind (siehe Anlagen 6.79, 6.81 und 6.83).

Mit abnehmender Asphaltstärke wird auch die Abhängigkeit der Spannungswerte von den Rissabständen bei den jeweiligen E-Moduln des Asphaltes stärker (vergleiche Anlagen 6.79 und 6.83).

Der Einfluss des E-Moduls der HGT auf die Spannungsspitze in Längsrichtung an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss ist unter Verkehrsbeanspruchung bei kleineren Asphaltstärken (12 cm und 16 cm) größer als die Auswirkungen der Rissabstände (siehe Anlagen 6.79 und 6.81). Bei großen Asphaltüberdeckungen (26 cm) werden die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss vom E-Modul der HGT und den Rissabständen nahezu unabhängig (siehe Anlage 6.83).

Da die  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung maximal 50 % der Werte der Plattenlängsrichtung erreichen, ist für die Beurteilung des Verhaltens eines Deckensystems bezüglich der Reflexionsrissbildung in erster Linie die Plattenlängsrichtung zu betrachten (siehe z. B. Anlagen 6.79 und 6.80).

Für das Verhalten im Hinblick auf eine Reflexionsrissbildung sind nur die Abhängigkeiten der Rissabstände bei hohem E-Moduln des Asphaltes von Bedeutung. So beträgt bei einem E-Modul des Asphaltes von 15000 N/mm<sup>2</sup> die Spannungszunahme der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes bei 12 cm Asphaltstärke für eine Reduzierung des Rissabstandes R von 5,0 m auf 1,0 m ca. 6 %, während sie bei den Ausgangswerten für die Materialien noch ca. 8 % betragen hat (siehe Anlage 6.79). Für die Verkehrsbeanspruchung wäre dieser prozentuale Anstieg der Biegespannungen in Plattenlängsrichtung noch vertretbar, falls durch diese

Maßnahme ein entsprechend günstigeres Verhalten unter Temperaturbeanspruchung erreicht wird.

### 6.6.3.2 Temperaturbelastung

Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei Verkehrsbeanspruchung führt eine Reduzierung des Rissabstandes in der HGT bei einer gleichmäßigen Abkühlung des Ausgangssystems um 5 K zu einem starken Absinken der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss und zwar für alle untersuchten E-Moduln des Asphaltes, siehe Abb. 6.6.15. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass die Spannungswerte aus Temperatur um ein Vielfaches größer sind als die Verkehrslastspannungen. Die Abnahme der  $\sigma_x$ -Spannungen wird zwar bei tiefen Temperaturen des Asphaltes (großer E-Modul) geringer, ist aber wesentlich größer als die Zunahme der Verkehrslastspannungen bei tiefen Temperaturen und reduzierten Rissabständen (vergleiche Abb. 6.6.13).

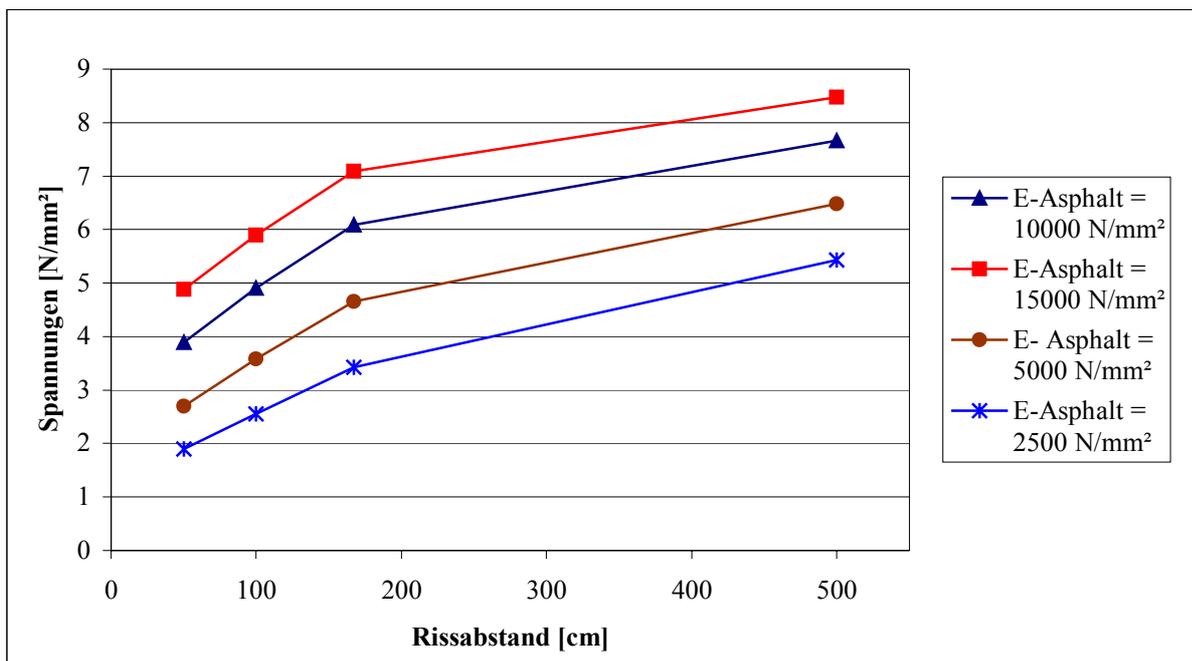


Abb. 6.6.15:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter Temperaturbelastung

Eine ähnlich große Wirkung auf die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes bei einer Abkühlung um 5 K übt der E-Modul der HGT aus, siehe Abb. 6.6.16. Bei einer Reduzierung des E-Moduls der HGT ergeben sich bei einem Rissabstand von 5,0 m die größten prozentualen Verringerungen bei den  $\sigma_x$ -Spannungen, aber auch für kleinere Rissabstände werden noch deutliche Abnahmen erreicht. Allerdings geht der Einfluss des Rissabstandes in der HGT mit sinkendem E-Modul der HGT zurück.

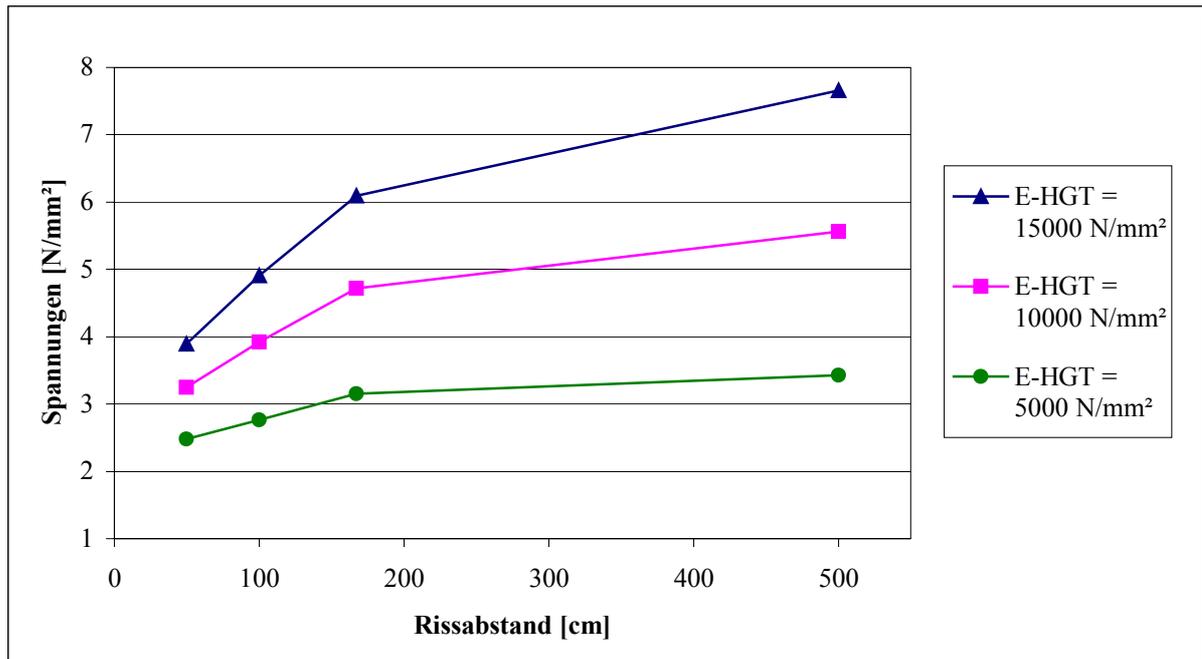


Abb. 6.6.16:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss, für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT in Abhängigkeit des Rissabstandes R unter Temperaturbelastung

Für einen niedrigen E-Modul der HGT z. B. 5000 N/mm<sup>2</sup> liegen die Spannungswerte in einer Größenordnung, die durch eine Reduzierung des Rissabstandes bei einer HGT mit konventionellem E-Modul (E-HGT = 15000 N/mm<sup>2</sup>) nicht erreicht werden kann.

Während der E-Modul des Asphaltes wesentlich stärker von den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen des Deckensystems als vom Bindemittel und Zuschlägen beeinflusst wird, besteht bei der „temperaturunabhängigen“ HGT die Möglichkeit, durch eine gezielte Mischgutzusammensetzung, insbesondere durch die Wahl des Bindemittels, den E-Modul der HGT zu reduzieren und bei einem vorgegebenen Kerbenabstand die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes günstig zu beeinflussen, siehe Abb. 6.6.16.

Diese qualitativen Feststellungen gelten auch für die  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss (siehe Anlage 6.85).

Die Spannungen  $\sigma_y$  an der Unterseite der HGT am Riss werden bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K weder von den Rissabständen noch vom E-Modul des Asphaltes beeinflusst (siehe Anlage 6.86).

Die Wirkungen verschiedener E-Moduln der HGT auf diese Spannungen zeigen ebenfalls keine Abhängigkeit von den Rissabständen in der HGT (siehe Anlage 6.86).

Aufgrund der Ergebnisse kann eine weitere Untersuchung der Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss für andere Asphaltstärken entfallen.

Die Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenlängs- und -querrichtung über dem Riss für die Asphaltstärken 12 cm, 16 cm und 26 cm und die veränderten E-Moduln des Asphaltes und der HGT bei einer gleichmäßigen Abkühlung der Deckensysteme über die Dicke um 5 K sind in den Anlagen 6.87 bis 6.92 dargestellt.

Beim Vergleich der Spannungsverläufe fällt auf, dass für einen Rissabstand von 50 cm die Spannungen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  für alle Asphaltstärken bei den jeweiligen E-Moduln des Asphaltes und der HGT praktisch gleich groß sind (siehe Anlagen 6.87, 6.89 und 6.91 bzw. 6.88, 6.90 und 6.92); dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einem Kerbenabstand von 50 cm kein Verwölben der Deckensysteme mehr stattfindet.

Mit zunehmenden Rissabständen werden die Unterschiede in den Spannungswerten zwischen den einzelnen Deckensystemen größer und erreichen schließlich Maximalwerte bei einem Rissabstand von 5,0 m. Die größten Spannungen treten beim Deckensystem mit 12 cm Asphalt auf.

Ansonsten ergeben sich gegenüber dem System mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT keine qualitativen Unterschiede.

Fazit:

Eine Reduzierung der Rissabstände in der HGT führt unter Verkehrsbelastung zu einem Anstieg der Spannungen an der Unterseite des Asphaltes sowohl in Plattenlängs- als auch in -querrichtung.

Der Einfluss der Rissabstände auf die Spannungswerte an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss ist deutlich geringer als die Auswirkungen der jahreszeitlichen Schwankungen der E-Moduln des Asphaltes.

Der E-Modul der HGT hat wesentlich kleinere Auswirkungen auf die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes als die Variation der E-Moduln im Asphalt. Bei einem kleinen E-Modul der HGT (5000 N/mm<sup>2</sup>) wirken sich erst Rissabstände, die kleiner als 1,0 m sind, auf die Verkehrslastspannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenlängsrichtung nennenswert aus. Je größer die Asphaltüberdeckung über dem Riss ist, desto kleiner sind die Auswirkungen des E-Moduls der HGT auf die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes.

Der Erhöhung der Verkehrslastspannungen bei einer Verkürzung der Kerbenabstände steht eine starke Reduzierung der Spannungen aus Temperatur an der Unterseite des Asphaltes gegenüber.

Die Größe der  $\sigma_x$ -Spannungen aus einer Abkühlung um 5 K wird am meisten vom E-Modul des Asphaltes beeinflusst. Die Schwankungen der E-Moduln im Asphalt sind stark temperaturabhängig und damit jahreszeitlich weitgehend unvermeidbar.

Dagegen kann der E-Modul der HGT durch eine geeignete Wahl des Bindemittels bzw. der Mischgutzusammensetzung gesenkt werden, was sich günstiger auf die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes auswirkt als eine Veränderung der Rissabstände in der HGT.

Aber auch durch eine alleinige Verkürzung des Kerbenabstandes in der HGT können die Spannungen aus Temperatur bereits erheblich reduziert werden.

## 6.7 Gegenüberstellung der Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf das Tragverhalten

Bisher wurden die Einflüsse des VerbundlöSENS und der Rissabstände auf das Tragverhalten einzeln und jeweils mit veränderten E-Moduln betrachtet. Entscheidender Parameter für die Beurteilung des Tragverhaltens von Deckensystemen mit Asphalt-schichten auf gerissener HGT ist die  $\sigma_x$ -Spannung an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss.

Die Auswirkungen der Einzelmaßnahmen unter Verkehrsbelastung auf diese  $\sigma_x$ -Spannungen für die Asphalt-dicken von 12 cm bis 26 cm sind in Abb. 6.7.1 gegenübergestellt. Eine Kombination aller Maßnahmen in einem Deckensystem fand bisher nicht statt.

Dieser Vergleich soll in der letzten Spalte für die Asphalt-dicken 12 cm und 26 cm für die  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss unter Verkehrsbelastung vorgenommen werden, und zwar für ein System mit einem **Rissabstand von 1,67 m, einem auf einer in etwa der Asphalt-dicke entsprechenden Länge gelösten Verbund und für einen reduzierten E-Modul der HGT = 10000 N/mm<sup>2</sup>.**

Systeme unter Verkehrsbelastung	Ausgangs-System <b>R = 5,0 m</b>  voller Verbund  <b>E-HGT = 15000 N/mm<sup>2</sup></b>	Geänderte Einflussgröße <b>R = 1,67 m</b>	Geänderte Einflussgröße  Verbund auf Asphalt-dicke gelöst	Geänderte Einflussgröße  <b>E-HGT = 10000 N/mm<sup>2</sup></b>	Vergleichs-system <b>R = 1,67 m</b> Verbund auf Asphalt-dicke gelöst <b>E-HGT = 10000 N/mm<sup>2</sup></b>
	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>
12 cm Asphalt	1,56	1,6	0,89	1,81	1,25
16 cm Asphalt	1,48	1,5	0,8	1,62	
20 cm Asphalt	1,32	1,35	0,69	1,4	
26 cm Asphalt	1,1	1,11	0,55	1,13	0,65

Abb. 6.7.1:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

Gegenüberstellung von Ausgangssystem, verschiedenen Einflussgrößen und dem Vergleichssystem, das alle Einflussgrößen gleichzeitig berücksichtigt unter **Verkehrsbelastung**

Für den Lastfall Temperatur ist die gleiche Gegenüberstellung in Abb. 6.7.2 enthalten.

Systeme unter <b>Temperaturbelastung</b>	Ausgangs- System <b>R = 5,0 m</b>  <b>voller Verbund</b>  <b>E-HGT = 15000 N/mm<sup>2</sup></b>	Geänderte Einflussgröße <b>R = 1,67 m</b>	Geänderte Einflussgröße  <b>Verbund auf Asphalt Dicke Gelöst</b>	Geänderte Einflussgröße  <b>E-HGT = 10000 N/mm<sup>2</sup></b>	Vergleichs- system <b>R = 1,67 m</b> <b>Verbund auf Asphalt Dicke gelöst</b> <b>E-HGT = 10000 N/mm<sup>2</sup></b>
	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_x$ -Spannung N/mm <sup>2</sup>
12 cm Asphalt	8,75	6,43	5,0	6,47	3,26
16 cm Asphalt	8,23	6,27	4,03	6,03	
20 cm Asphalt	7,66	6,09	3,62	5,56	
26 cm Asphalt	7,37	5,88	3,14	5,36	2,21

Abb. 6.7.2:  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss

Gegenüberstellung von Ausgangssystem, verschiedenen Einflussgrößen und dem Vergleichssystem, das alle Einflussgrößen gleichzeitig berücksichtigt unter **Temperaturbelastung**

Die größte Entspannungswirkung für die  $\sigma_x$ -Spannungen wird sowohl für die Verkehrs- als auch Temperaturbelastung durch das Lösen des Verbundes auf eine Länge erreicht, die in etwa der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht.

Der Rissabstand in der HGT und auch die Verringerung des E-Moduls der HGT haben für die  $\sigma_x$ -Spannungen aus Verkehrs- und Temperaturbelastung gegenläufige Auswirkungen.

Unter Verkehrslast wachsen die  $\sigma_x$ -Spannungen selbst bei dünnen Asphaltüberdeckungen nur gering an, während sie unter Temperaturbeanspruchung stark abfallen. In beiden Fällen ist die Entlastung bei einer Abkühlung um 5 K deutlich größer als die Zusatzbeanspruchung aus Verkehrslast.

Nachdem die Vergrößerung der  $\sigma_x$ -Spannungen aus Verkehrslast bei einer Verkürzung des Kerbenabstandes von 5,0 m auf 1,67 m sehr gering, die Entlastungswirkung unter Temperatur jedoch erheblich ist, sollte nicht nur - wie in den ZTVT [7] gefordert - für Deckensysteme mit Asphaltmässen  $< 14$  cm der Abstand der Kerben auf maximal 2,5 m reduziert werden.

Eine weitere Verkürzung (z. B. auf 1,25 m) wäre nach den Ergebnissen sinnvoll, lässt sich aber aus baupraktischen Überlegungen wohl nicht ausführen.

Eine Senkung des E-Moduls der ungerissenen HGT auf 10000 N/mm<sup>2</sup> oder niedriger als Einzelmaßnahme ist für alle Asphaltmässen anzustreben.

Die Entspannungswirkung auf die  $\sigma_x$ -Spannungen bei Temperaturbelastung ist bei einem reduzierten E-Modul der ungerissenen HGT größer als der Einfluss der Rissabstände. Gleichzeitig hängen aber auch die Biegespannungen aus Verkehrslast an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss etwas stärker vom E-Modul der HGT ab als vom Abstand der Risse.

Lediglich bei 12 cm Asphaltmässen ist die alleinige Reduzierung des E-Moduls in der HGT nicht unproblematisch, da die Erhöhung der  $\sigma_x$ -Spannungen aus Verkehrslast bereits ca. 16 % (gegenüber dem Ausgangssystem) beträgt. Da aber derartige Befestigungssysteme nur für Straßen mit niedriger Verkehrsbelastung (Bauklasse IV gem. Abb. 2.1) eingesetzt werden, ist diese Erhöhung noch vertretbar. Gleichzeitig ergibt sich bei den  $\sigma_x$ -Spannungen aus Temperatur noch eine erhebliche größere Entlastung.

Das gleichzeitige Zusammenwirken der einzelnen Maßnahmen lässt sich nicht durch einfache Überlagerung der Veränderungen bei den einzelnen Parametern exakt beschreiben. Dies wird durch die Vergleichsrechnungen für 12 cm und 26 cm Asphaltmässen deutlich. Bei der gleichzeitigen Anwendung aller geänderten Einflussgrößen ergeben sich insbesondere für die Temperaturbelastung gegenüber dem Ausgangssystem erhebliche Abminderungen bei den  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss.

## 7. Zusammenfassung der theoretischen Untersuchungen und Folgerungen für die Praxis

In Fahrbahndeckensystemen mit Asphalt auf HGT lässt sich bei den derzeit verwendeten hydraulisch gebundenen Tragschichten eine Rissbildung in der Tragschicht aus dem Abbindeprozess bzw. Temperatur nicht vermeiden. Durch den Einbau von Kerben wird versucht, eine gleichmäßige Längsverteilung der Risse zu erreichen und deren Entstehung so zu steuern, dass bereits vor dem Überbauen der HGT mit Asphalt die Rissbildung in der HGT abgeschlossen ist.

Mit einem Finite-Elemente-Modell wird ein 5,0 m x 5,0 m großes Teilstück einer Straßenbefestigung mit 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT nachgebildet, um die Spannungen und Verformungen im Asphalt und der HGT im unmittelbaren Bereich um den Riss in der HGT unter Verkehrs- und Temperaturbelastung zu untersuchen. Anschließend werden die Ergebnisse auf Asphaltstärken von 12 cm, 16 cm und 26 cm erweitert.

Durch die **Rissbildung** in der HGT ändert sich das Tragverhalten des endgültigen Fahrbahnsystems gegenüber einem ungerissenen Deckensystem grundsätzlich; die HGT fällt im Rissbereich lokal zur Lastabtragung in Plattenlängsrichtung aus, was zu einer stärkeren Beanspruchung der darüber liegenden Asphaltstärken führt. Durch eine mittig über dem Riss stehende **Verkehrslast** entsteht an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss in Plattenlängsrichtung eine große, räumlich aber eng begrenzte Spannungsspitze. Diese Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen in Längsrichtung ist immer größer als  $\sigma_y$  in Plattenquerrichtung.

Diese Spannungswerte steigen umso mehr, je dünner die Asphaltüberdeckung und je höher der E-Modul des Asphaltes ist.

Der Einfluss des E-Moduls der HGT auf die Spannungsspitze unter Verkehrsbelastung ist bei dicken Asphaltüberdeckungen (> 20 cm) relativ gering, er nimmt aber mit abnehmender Asphaltüberdeckung und sinkendem E-Modul der HGT deutlich zu.

Die Biegebeanspruchung der HGT unter Verkehrsbelastung im Rissbereich verringert sich durch das Entstehen bzw. Vorhandensein eines Risses in der HGT sowohl in Plattenlängs- als auch -querrichtung.

Bei einer **gleichmäßigen Abkühlung** des Deckensystems über die gesamte Dicke um 5 K entsteht über dem HGT-Riss an der Unterseite des Asphalttes ebenfalls eine lokale Spannungsspitze in einer Größenordnung, die bis zum 6-fachen des Spannungswertes aus der Verkehrsbelastung betragen kann.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse aus der Temperaturbeanspruchung ist immer zu berücksichtigen, dass Spannungen aus einer Abkühlung des Asphalttes i. Allg. nur bei Temperaturen  $< 5^\circ \text{C}$  entstehen und in Abhängigkeit vom Relaxationsvermögen des Asphalttes relativ schnell wieder abgebaut werden. Eine quasi lineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Asphalt gilt normalerweise erst bei Temperaturen  $< -5^\circ \text{C}$ .

Die Spannungsspitze aus Abkühlung an der Unterseite des Asphalttes hängt stark vom E-Modul des Asphalttes und der HGT ab und wächst mit zunehmenden E-Moduln deutlich an, insbesondere bei Deckensystemen mit dünnen Asphalttschichten. Diese  $\sigma_x$ -Spannungen sind in jedem Fall deutlich größer als die  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung bei Temperaturbelastung.

Löst sich der **Verbund** zwischen Asphalt und HGT auf beiden Seiten des Rissrandes bzw. wird dieser Verbund durch bauliche Maßnahmen (z. B. Einlegen eines Vlieses) gezielt verhindert, so stellt sich unter **Verkehrsbelastung** ein Minimum der  $\sigma_x$ -Spannungen in Plattenlängsrichtung ein, wenn der Verbund um den Riss auf eine Gesamtlänge gelöst wird, die in etwa der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht. Diese Länge, bei der sich die minimalen  $\sigma_x$ -Spannungen ergeben, wird vom E-Modul des Asphalttes beeinflusst, ist aber nahezu unabhängig vom E-Modul der HGT.

In Plattenquerrichtung ist der Entspannungseffekt für die  $\sigma_y$ -Spannungen beim anfänglichen Lösen des Verbundes unter Verkehrsbeanspruchung deutlich kleiner und kann bei niedrigen E-Moduln des Asphalttes auch ganz entfallen. Falls ein Minimum der  $\sigma_y$ -Spannungen entsteht, tritt es bereits bei einem Lösen des Verbundes auf eine kleinere Länge auf als es für das Erreichen des Minimums der  $\sigma_x$ -Spannungen erforderlich ist. Wird der Verbund auf eine Gesamtlänge um den Riss gelöst, die der Dicke der Asphaltüberdeckung entspricht, erhöhen sich die  $\sigma_y$ -Spannungen gegenüber einem System mit vollem Verbund nicht oder nur geringfügig.

Löst sich der Verbund insgesamt auf größere Längen als der Dicke der Asphaltüberdeckung entsprechend um den Riss, wachsen unter Verkehrsbeanspruchung sowohl die  $\sigma_x$ - als auch die  $\sigma_y$ -Spannungen an und erreichen einen Größtwert für Deckensysteme ohne Verbund zwischen Asphalt und HGT.

Bei einer **Abkühlung** des Deckensystems entstehen die kleinsten Spannungen sowohl in Plattenlängs- als auch in -querrichtung, wenn der Verbund zwischen Asphalt und HGT vollständig gelöst wird. Bereits durch ein Lösen des Verbundes auf kurze Länge um den Riss sinken die  $\sigma_x$ - und die  $\sigma_y$ -Spannungen erheblich ab.

Auch durch den **Rissabstand** in der HGT lassen sich die Werte der Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss beeinflussen. Unter **Verkehrsbeanspruchung** führt eine Verringerung des Rissabstandes in Plattenlängsrichtung zu einem Anstieg der  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss. Dieser Anstieg fällt bei einer Verkürzung des Rissabstandes von 5,0 m auf 1,67 m noch sehr gering aus und macht sich erst bei Rissabständen unter 1,0 m deutlich bemerkbar, wobei der Anstieg bei dünnen Asphaltsschichten größer ist als bei dicken Asphaltbelägen.

Die Spannungen  $\sigma_y$  in Plattenquerrichtung nehmen in Abhängigkeit vom Rissabstand weniger zu als in Plattenlängsrichtung; die Werte erreichen maximal 50 % der Spannungsspitzen der  $\sigma_x$ -Spannungen.

Der E-Modul des Asphaltes hat auf die Spannungsspitze der  $\sigma_x$ -Spannungen einen deutlich stärkeren Einfluss als der Rissabstand; mit steigendem E-Modul des Asphaltes erhöht sich auch die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss.

Die Wirkung des E-Moduls der HGT auf die Spannungsspitze ist trendmäßig gleich, aber zahlenmäßig wesentlich kleiner. Mit abnehmendem E-Modul der HGT macht sich ein nennenswerter Einfluss des Kerbenabstandes auf die Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss erst bei Abständen unter 1,0 m bemerkbar.

Bei einer **gleichmäßigen Abkühlung** des Deckensystems um 5 K wirken sich sowohl der Rissabstand in der HGT als auch die E-Moduln des Asphaltes und der HGT wesentlich auf die Spannungsspitzen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss aus. Durch sinkende E-Moduln des Asphaltes und der HGT und eine Verkürzung des Rissabstandes in der HGT können die  $\sigma_x$ -Spannungen über dem Riss deutlich reduziert werden. Diese Aussagen gelten auch für die  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung, dabei sind die Absolutwerte der Spannungen generell kleiner als die der  $\sigma_x$ -Spannungen an der Asphaltunterseite über dem Riss.

Aus diesen Feststellungen können folgende Konsequenzen für die Praxis gezogen werden:

Zum einen besteht die Möglichkeit, die Baustoffgemische entsprechend zu optimieren:

- Für Deckensysteme mit Asphaltsschichten auf HGT wäre es am günstigsten, Risse in der Tragschicht aus dem Erhärtungsprozess oder der Abkühlung zu vermeiden; dies verhindert die Ausbildung von Spannungsspitzen an der Unterseite des Asphaltes. Um dieses Ziel zu erreichen, müssten HGT mit visko-elastischen Eigenschaften hergestellt werden, was durch eine Reduzierung der hydraulischen Komponente beim Bindemittel, z. B. durch die Zugabe von Bitumen in Form von Bitumenemulsion oder Schaumbitumen, erreicht werden kann. Erste vielversprechende Ansätze hierzu sind aus Österreich, die sogenannte HGT mit Bitumenzusatz [26, 27], und vom Kaltrecycling in situ [28] bekannt.
- Falls die Reissneigung beim Abbinden der Tragschicht nicht ausgeschlossen werden kann, sollte der E-Modul der gebundenen Schicht reduziert werden, beispielsweise durch den Einsatz von Mischbindemitteln aus Zement und Bitumen. Der wahrscheinlich zwangsläufig damit verbundene Festigkeitsverlust ließe sich durch eine entsprechende Vergrößerung der Schichtdicke der HGT kompensieren.  
Das am Lehrstuhl und Prüfamnt für Bau von Landverkehrswegen durchgeführte Forschungsvorhaben [29] kann zusammen mit den Erkenntnissen aus Österreich Grundlage für weitere Arbeiten in dieser Richtung sein.  
Eine weitere Möglichkeit, den E-Modul der ungerissenen HGT zu reduzieren, besteht in der Verwendung von Zuschlagsstoffen aus Asphaltgranulat [13, 30].
- Die aus Verkehrslast und Temperatur resultierende Spannungsspitze an der Unterseite des Asphaltes über einem Riss hängt sehr stark vom E-Modul des Asphaltes und seinem Relaxationsverhalten ab; insbesondere der starke Anstieg des E-Moduls bei tiefen Temperaturen ist ungünstig für die Reflexionsrissbildung. Durch den Einsatz von polymermodifizierten Bitumina für Asphaltsschichten auf HGT sollte eine Verringerung der Temperaturabhängigkeit des Elastizitäts- bzw. Schubmoduls des Asphaltes angestrebt werden [22].

Zum anderen kann durch folgende konstruktive Maßnahmen das Verhalten gegenüber Reflexionsrissen günstig beeinflusst werden:

- Eine Verkürzung des Kerbenabstandes - insbesondere bei dünnen Asphaltüberdeckungen - auf weniger als die im Technischen Regelwerk geforderten 2,50 m reduziert die Spannungen aus Temperatur im Deckensystem erheblich. Der geringfügige Anstieg der Biegespannungen aus den Verkehrslasten erscheint akzeptabel.
- Durch eine Verkürzung des Kerbenabstandes von 5,0 m auf 2,5 m auch für Asphalt-schichten zwischen 14 cm und 20 cm wird voraussichtlich das Reflexionsrissverhalten dieser Deckensysteme deutlich verbessert, ohne eine nennenswerte Verschlechterung des Tragverhaltens unter Verkehrslasten zu bewirken.
- Durch ein gezieltes Lösen des Verbundes zwischen Asphalt und HGT auf beiden Seiten des Risses in Plattenlängsrichtung, können die Spannungsspitzen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss wesentlich abgebaut werden.

Dabei ist darauf zu achten, dass der Verbund auf beiden Seiten des Risses maximal auf eine Gesamtlänge gelöst wird, die der Dicke der Asphaltüberdeckung über der HGT entspricht. Baupraktisch kann dies durch Einbau eines hitzebeständigen Vlieses in entsprechender Breite über den Kerben erreicht werden.

Ein weiteres Lösen des Verbundes auf noch größere Länge wird zu einer erhöhten Beanspruchung des Deckensystems aus den Verkehrslasten und damit zu einer schnelleren Ermüdung des Asphaltes über dem Rissbereich in der HGT führen. Die Folge wäre das genaue Gegenteil, nämlich eine verfrühte Reflexionsrissbildung. Dieser Zusammenhang ist bei der Bauausführung äußerst sorgfältig zu beachten.

Durch eine Kombination der oben beschriebenen baustofflichen und konstruktiven Maßnahmen ist es möglich, das Reflexionsrissverhalten von Asphalt-schichten auf HGT deutlich zu verbessern und den Einsatz dieser wirtschaftlichen Mischbauweise zu fördern.

## **8. Literaturverzeichnis:**

- [1] „Der Elsner 1998“. Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen, Berlin, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 1998
- [2] Streit, Gerhard: „Betonunterbau für bituminöse Fahrbahndecken mit gesteuerter Rissbildung“. Beton 1963, Heft 1, S. 501 – 502.
- [3] Herion, Gerhard, „Die Grenzen der Dehnbarkeit bituminöser Straßenbeläge in Abhängigkeit von Temperatur, Bauweise, Deckenstärke, Bindemittel und freier Dehnlänge“. Dissertation an der Fakultät für Bauwesen der Rheinisch Westfälischen Hochschule Aachen, 1955.
- [4] Pospisil F.: „Kritische Belagsdicke auf zementverfestigten Tragschichten“. Straßen- und Tiefbau, 1973, Heft 6, S. 417 – 424.
- [5] Leykauf, Günther: „Reflexionsrisse bei Asphaltstraßen“. Straßen- und Tiefbau, 1986, Heft 4, S. 8 – 16 und Heft 5, S. 23.
- [6] Mais, Rudolf: „Ein Beitrag zur Ermittlung der Beanspruchung standardisierter Fahrbahnbefestigungen mit Hilfe der Mehrschichtentheorie“ in „Zur Beanspruchung von bituminösen Fahrbahnbefestigungen“, Straßenbau- und Straßenverkehrstechnik Heft 138, Hrg. Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn, 1973.
- [7] „Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau – ZTVT-StB 95, Ausgabe 1995, ergänzte Fassung 1998“. Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 1998.
- [8] „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen – RStO 86/89, Ausgabe 1986, ergänzte Fassung 1989“, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1989.
- [9] Eisenmann, Josef, Leykauf, Günther: „Bau von Verkehrsflächen. Betonkalender 1987 Teil II, Taschenbuch für Beton- Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie der verwandten Fächer, Berlin, Verlag Wilhelm Ernst, 1987.
- [10] Eisenmann, Josef: „Betonfahrbahnen“. Handbuch für Beton- Stahlbeton- und Spannbetonbau, Berlin, Verlag Wilhelm Ernst, 1979.
- [11] Lempe, Ulrich: „Dynamischer Schubmodul und Dauerschubfestigkeit bituminöser Baustoffe“. Heft 130 der Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesverkehrsministeriums und der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e. V., Bonn, 1972.
- [12] Bonzel Justus, Schmidt, Michael: „Zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von hydraulisch gebundenen Tragschichten des Straßenbaues“. Straße und Autobahn, 1987, Heft 10, S. 359 – 367.

- [13] Leykauf, Günther und Moss, Theodor: „Laborversuche mit hydraulisch gebundenem Asphaltgranulat und Auswirkung auf die Bemessung“. Straße und Autobahn 38 (1987), Heft 11, Seite 412 – 417.
- [14] Leykauf, Günther: „Hydraulisch gebundene Tragschichten aus alternativen Mineralstoffgemischen“. Straßen- und Tiefbau, 1987, Heft 1, S. 10 – 14.
- [15] Schubenz, Dieter: „Straßenbau heute, Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln“. 2. Auflage, Schriftenreihe der Bauberatung Zement, Heft 2, Düsseldorf, Beton Verlag, 1990.
- [16] Werkle, Horst: „Finite Elemente in der Baustatik Band 1 – Lineare Statik der Stab- und Flächentragwerke, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1995.
- [17] Sofistik – Handbuch, Sofistik GmbH, Oberschleißheim, 1987 – 1996, 1998.
- [18] Eisenmann, Josef, Leykauf, Günther: „Feste Fahrbahn für Schienenbahnen. Betonkalendar 2000 Teil II, Taschenbuch für Beton- Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie der verwandten Fächer, Berlin, Verlag Wilhelm Ernst, 2000.
- [19] Eisenmann, Josef: „Die Schiene als Träger und Fahrbahn - theoretische Grundlagen und praktische Beispiele“ S. 9 – 78 in „Die Eisenbahnschiene“, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1977.
- [20] Müllersdorf, Uku: „Einflußlinien für Balken auf elastischer Bettung“, Die Bautechnik, 1963, Heft 2, S. 52 – 55.
- [21] Arand, Wolfgang: „Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf das Ermüdungsverhalten von Asphalten“. Straße und Autobahn, 1983, S. 424 – 431.
- [22] Forschungsbericht „Die experimentelle Ermittlung des Tieftemperaturverhaltens und des dynamischen Schubmoduls von Asphaltprobekörpern mit modifizierten Bindemitteln“. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1220 vom 15. 3. 1988 (nicht veröffentlicht).
- [23] Wesche, Karlhans: „Baustoffe für tragende Bauteile 2, Beton – Mauerwerk“, 3. Aufl., Wiesbaden, Bauverlag, 1993.
- [24] „Merkblattes über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt“, Entwurf Stand: Februar 2000
- [25] Leykauf, Günther: „Flexible Fahrbahnbefestigungen“, Vertieferumdrucke für das 8. Semester, Lehrstuhl für Bau von Landverkehrswegen, Technische Universität München, 2000
- [26] Sommer, Hermann, Müllner, Johanna: „HGT mit Bitumenzusatz – Laboruntersuchungen“. Straßenforschung Heft 424, Hrg. Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 1994.

- [27] Bohrn, Johanna: „Stabilisierung mit Bitumenemulsion – Zement – Gemisch“. Schriftenreihe des Lehrstuhls Straßenbau der Technischen Universität Dresden, Heft 8, 1998.
- [28] Neußner, Ernst: „Kaltrecycling – Bauweisen im Härtetest- das Projekt Nauberg“. Straße und Autobahn 51 (2000), Heft 2, Seite 137 - 143.
- [29] Forschungsbericht „Stoffkennwerte einer HGT mit Zusatz von Bitumenemulsion“. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1841 vom 13. 10. 2000 (nicht veröffentlicht).
- [30] Forschungsbericht „Prüfung und Eignung einer HGT aus gebrochenem Altbeton mit bis zu 100 % Asphaltgranulat“. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1371 vom 27. 05. 1991 (nicht veröffentlicht).

## **9. Anlagenverzeichnis**

### **Ziffer 6.2 Lastfälle**

Anlage 6.1  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss für LF 1 und LF 2  
Maximale Schubspannungen  $\tau_{xz}$  im Asphalt für LF 1 und LF 2

### **Ziffer 6.3 Tragverhalten von Fahrbahnsystemen ohne und mit Riss in der HGT**

#### **Ziffer 6.3.1 Verkehrsbelastung**

Anlage 6.2 Höhenschichtlinien der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung am System  
20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit HGT-Riss  
6.3  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterkante Asphalt für 20 cm Asphalt  
 $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterkante HGT für 20 cm Asphalt  
6.4  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss für verschiedene  
Asphaltdicken  
 $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss für verschiedene  
Asphaltdicken

#### **Ziffer 6.3.2 Temperaturbelastung**

Anlage 6.5 Höhenschichtlinien der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung am System  
20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit HGT-Riss  
6.6  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes für 20 cm Asphalt  
 $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT für 20 cm Asphalt  
6.7  $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss für verschiedene  
Asphaltdicken  
 $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss für verschiedene  
Asphaltdicken  
6.8  $\sigma_y$ - und  $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes  
für verschiedene Asphaltdicken

#### **Ziffer 6.3.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung**

Anlage 6.9 Gegenüberstellung Spannungsüberlagerung – Kombinationslastfall am System  
20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit HGT-Riss  
6.10 Gegenüberstellung Spannungsüberlagerung – Kombinationslastfall  
 $\sigma_x$ -Spannung an der Unterseite des Asphaltes am Grundsystem  
 $\sigma_x$ -Spannung an der Unterseite der HGT am Grundsystem  
6.11 Gegenüberstellung Spannungsüberlagerung – Kombinationslastfall  
 $\sigma_y$ -Spannung an der Unterseite des Asphaltes am Grundsystem  
 $\sigma_y$ -Spannung an der Unterseite der HGT am Grundsystem

**Ziffer 6.4 Einfluss des Verbundes zwischen Asphalt und HGT auf das Tragverhalten**

**Ziffer 6.4.1 Verkehrsbelastung**

- Anlage 6.12  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK des Asphaltes und der HGT des Grundsystems  
6.13  $\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss  
bei 12 cm Asphalt, 16 cm Asphalt und 26 cm Asphalt  
6.14  $\sigma_x$ - und  $\sigma_l$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss des Grundsystems

**Ziffer 6.4.2 Temperaturbelastung**

- Anlage 6.15  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK des Asphaltes und der HGT des Grundsystems  
6.16  $\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss  
bei 12 cm Asphalt, 16 cm Asphalt und 26 cm Asphalt

**Ziffer 6.4.3 Zusammenfassung**

- Anlage 6.17  $\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss  
6.18  $\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt  
6.19  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt  
6.20  $\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt  
6.21  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt  
6.22  $\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt  
6.23  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt

**Ziffer 6.5 Einfluss des Rissabstandes in der HGT auf das Tragverhalten**

**Ziffer 6.5.1 Verkehrsbelastung**

- Anlage 6.24  $\sigma_y$ -Spannungen über die Fahrbahndicke für 20 cm Asphalt  
Hauptspannung  $\sigma_1$  an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt  
6.25  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss  
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke und dem Rissabstand  
6.26  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss  
in Abhängigkeit vom Rissabstand für verschiedene Asphaltstärken  
Einsenkungen an OK Fahrbahn zwischen Plattenmitte und Plattenrand  
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für verschiedene Rissabstände

**Ziffer 6.5.2 Temperaturbelastung**

- Anlage 6.27  $\sigma_y$ -Spannungen über die Fahrbahndicke für 20 cm Asphalt  
Hauptspannung  $\sigma_1$  an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt  
6.28  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss  
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke und dem Rissabstand  
6.29  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss  
in Abhängigkeit vom Rissabstand für verschiedene Asphaltstärken  
Verwölbungen in Abhängigkeit von der Asphaltstärke  
für verschiedene Rissabstände

**Ziffer 6.5.3 Zusammenfassung**

- Anlage 6.30  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für verschiedene Rissabstände unter Verkehrs- oder Temperaturbelastung
- 6.31 Zeit-Biegezugfestigkeit von Asphalt [25]

**Ziffer 6.6 Einfluss der Elastizitätsmoduln von Asphalt und HGT auf das Tragverhalten****Ziffer 6.6.1 Fahrbahndeckensysteme ohne und mit Riss in der HGT****Ziffer 6.6.1.1 Verkehrsbelastung**

- Anlage 6.32 Biegespannungen an der UK HGT für 20 cm Asphalt ohne und mit HGT-Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.33 Einsenkungen an OK Fahrbahn für 20 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.34  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm bis 26 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.35  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 12 cm bis 26 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT

**Ziffer 6.6.1.2 Temperaturbelastung**

- Anlage 6.36 Spannungen an der UK HGT für 20 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.37 Verwölbungen an OK Fahrbahn für 20 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.38  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm bis 26 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.39  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 12 cm bis 26 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT

**Ziffer 6.6.1.3 Gleichzeitige Verkehrs- und Temperaturbelastung**

- Anlage 6.40 Spannungen an der UK Asphalt für 20 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.41 Spannungen an der UK HGT für 20 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
- 6.42 Verwölbungen an OK Fahrbahn für 20 cm Asphalt ohne und mit Riss in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT

**Ziffer 6.6.2 Lösen des Verbundes zwischen Asphalt und HGT****Ziffer 6.6.2.1 Verkehrsbelastung**

- Anlage 6.43  $\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
- 6.44  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes

Anlage	6.45	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.46	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.47	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.48	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.49	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.50	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.51	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.52	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.53	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.54	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.55	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.56	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.57	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.58	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.59	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.60	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt und der HGT
	6.61	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt und der HGT
	6.62	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt und der HGT

**Ziffer 6.6.2.2 Temperaturbelastung**

Anlage	6.63	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.64	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.65	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.66	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt
	6.67	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT
	6.68	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt und der HGT
	6.69	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt und der HGT
	6.70	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt und der HGT

Anlage	6.71	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.72	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.73	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.74	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.75	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.76	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT

### **Ziffer 6.6.3 Rissabstände in der HGT**

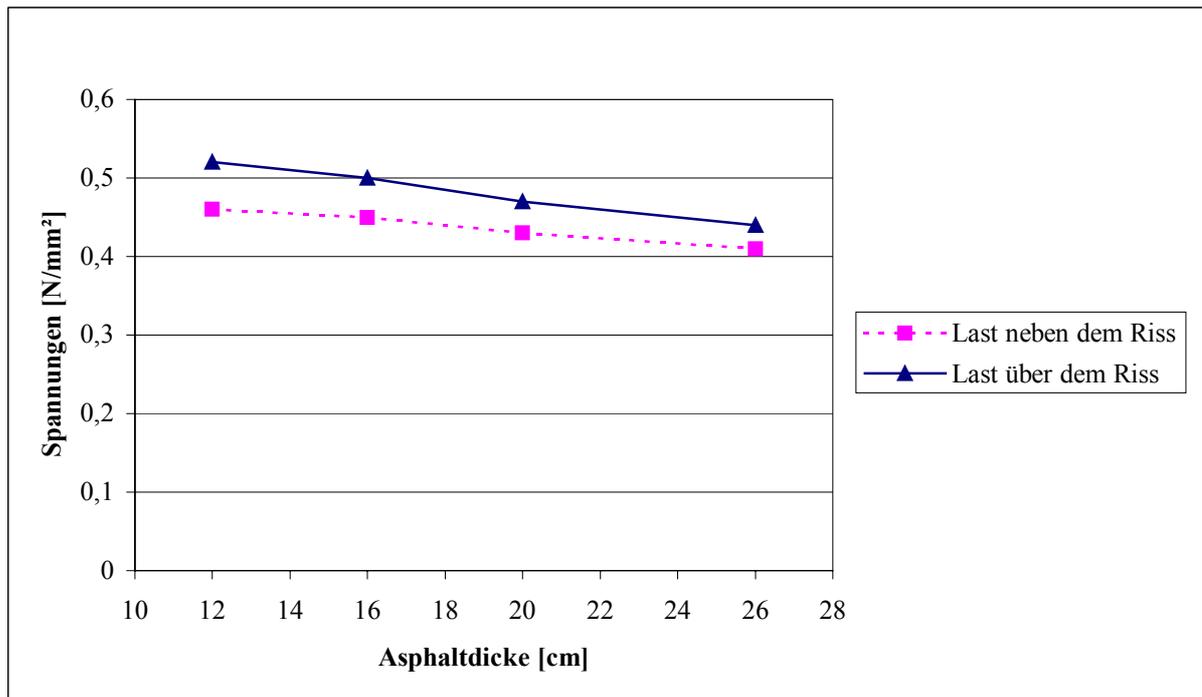
#### **Ziffer 6.6.3.1 Verkehrsbelastung**

Anlage	6.77	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.78	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.79	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.80	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.81	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.82	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.83	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.84	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT

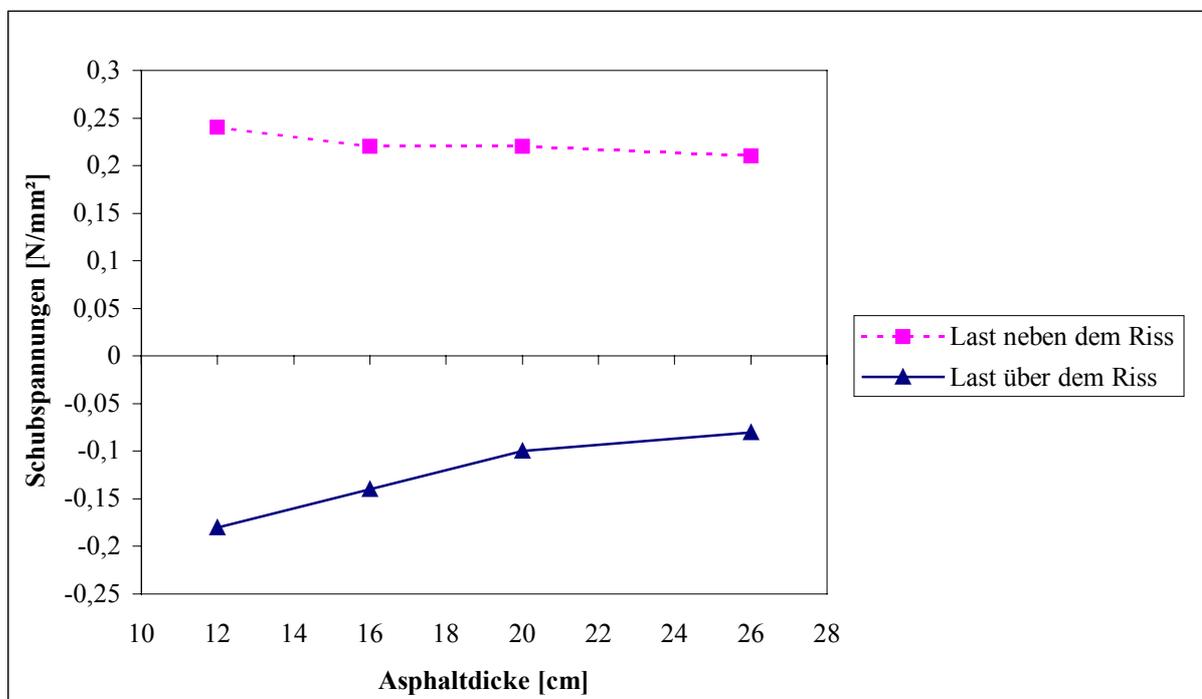
#### **Ziffer 6.6.3.2 Temperaturbelastung**

Anlage	6.85	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.86	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK HGT am Riss für 20 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.87	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.88	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 12 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.89	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.90	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 16 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.91	$\sigma_x$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT
	6.92	$\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss für 26 cm Asphalt in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes und der HGT

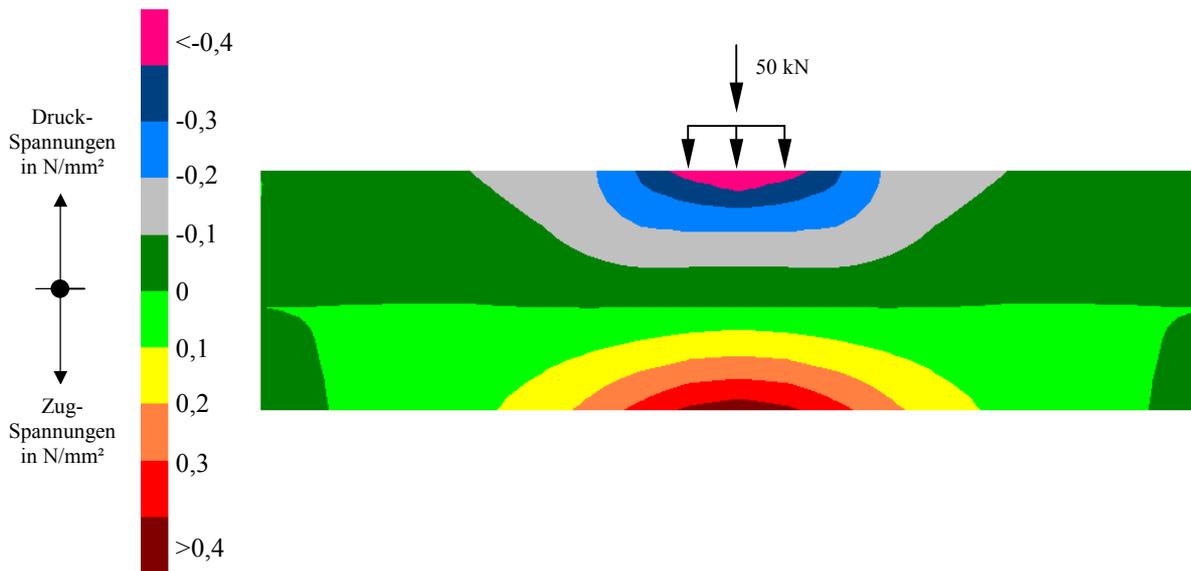
## **10. Anlagen**



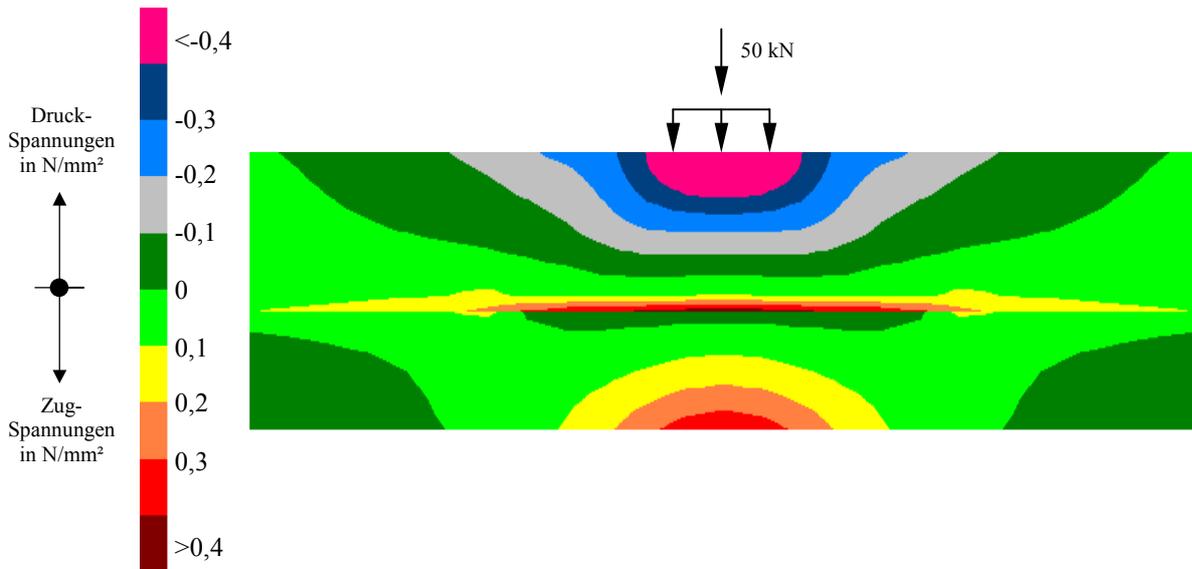
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss für LF 1 und LF 2



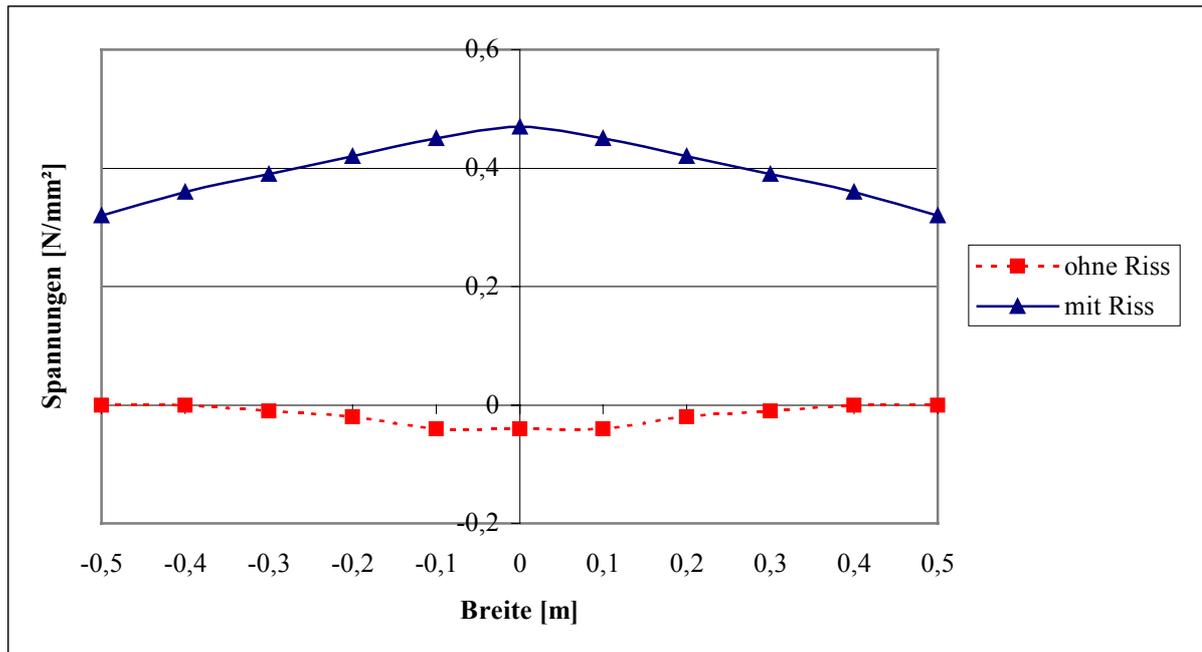
Maximale  $\tau_{xz}$ -Spannungen im Asphalt für LF 1 und LF 2



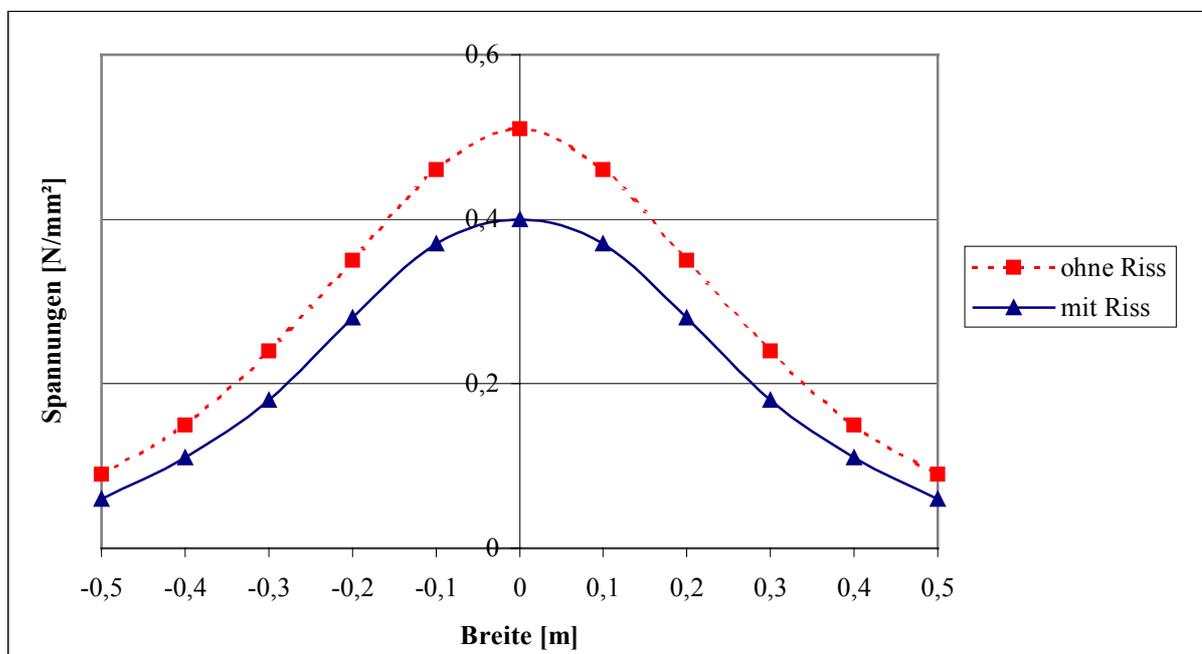
Höhenschichtlinien der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung  
 an einem System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne Riss  
 unter Verkehrsbelastung



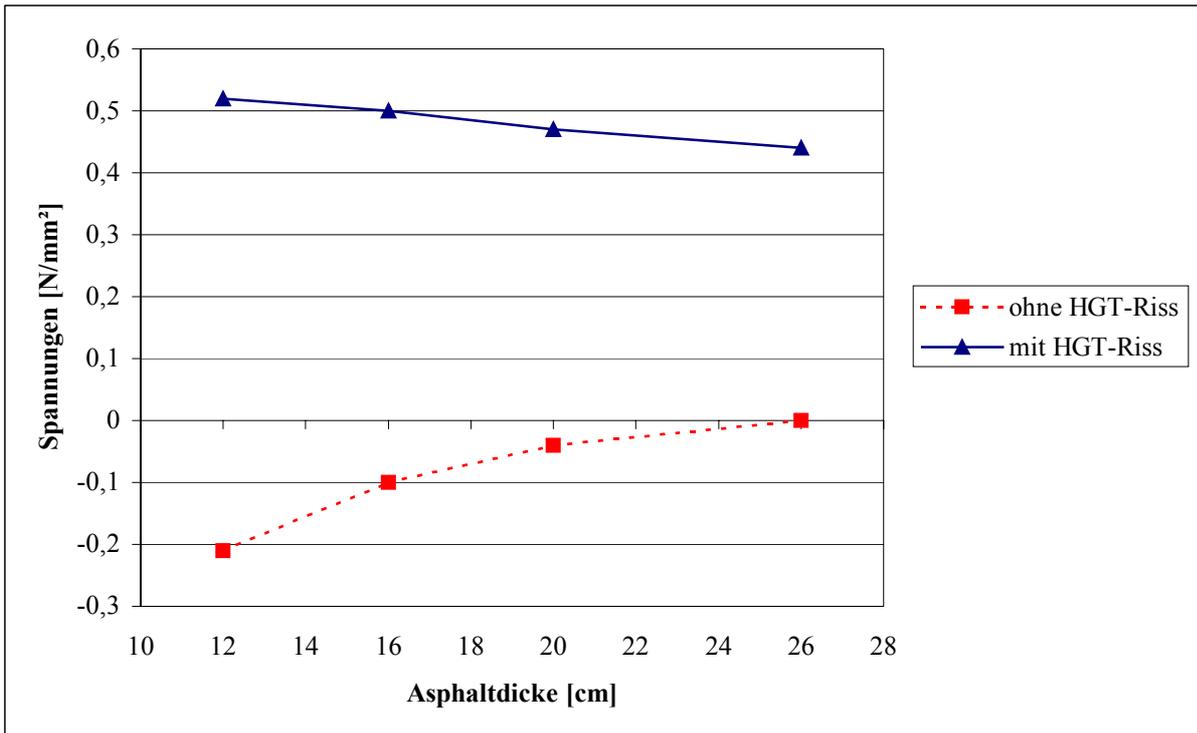
Höhenschichtlinien der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung  
 an einem System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT mit Riss  
 unter Verkehrsbelastung



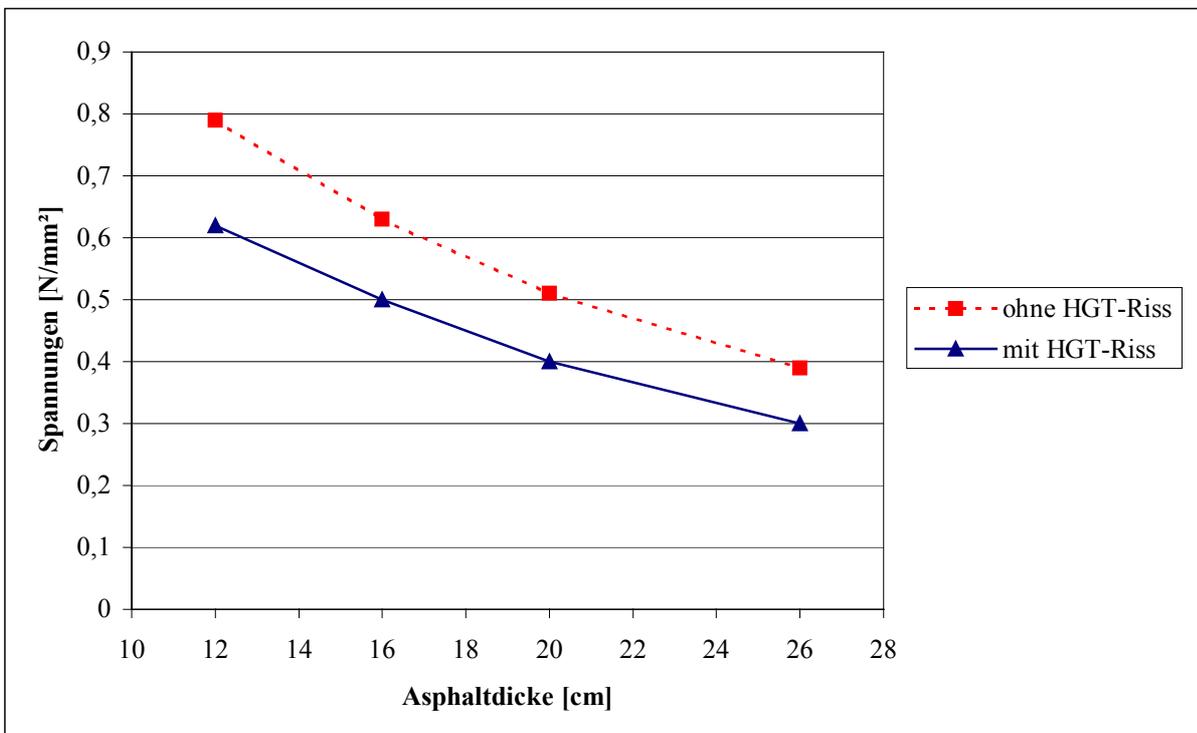
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterkante Asphalt in Plattenquerrichtung  
des Grundsystems unter Verkehrsbelastung



$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterkante HGT in Plattenquerrichtung  
des Grundsystems unter Verkehrsbelastung



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss**  
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke unter **Verkehrsbelastung**



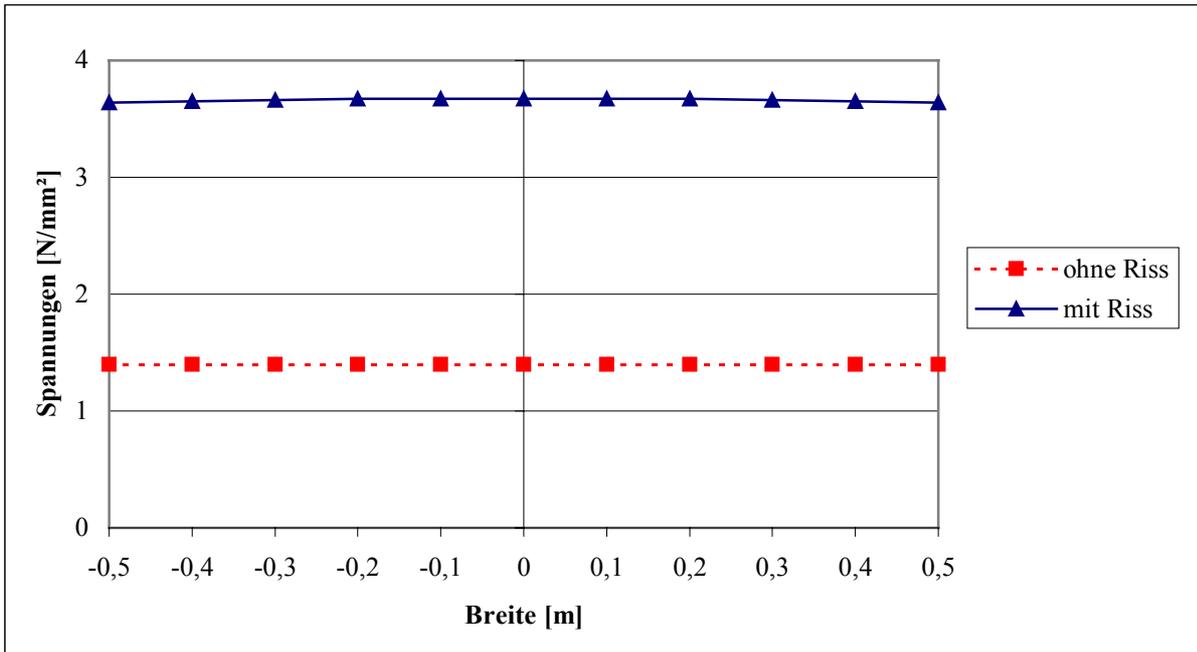
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss**  
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke unter **Verkehrsbelastung**



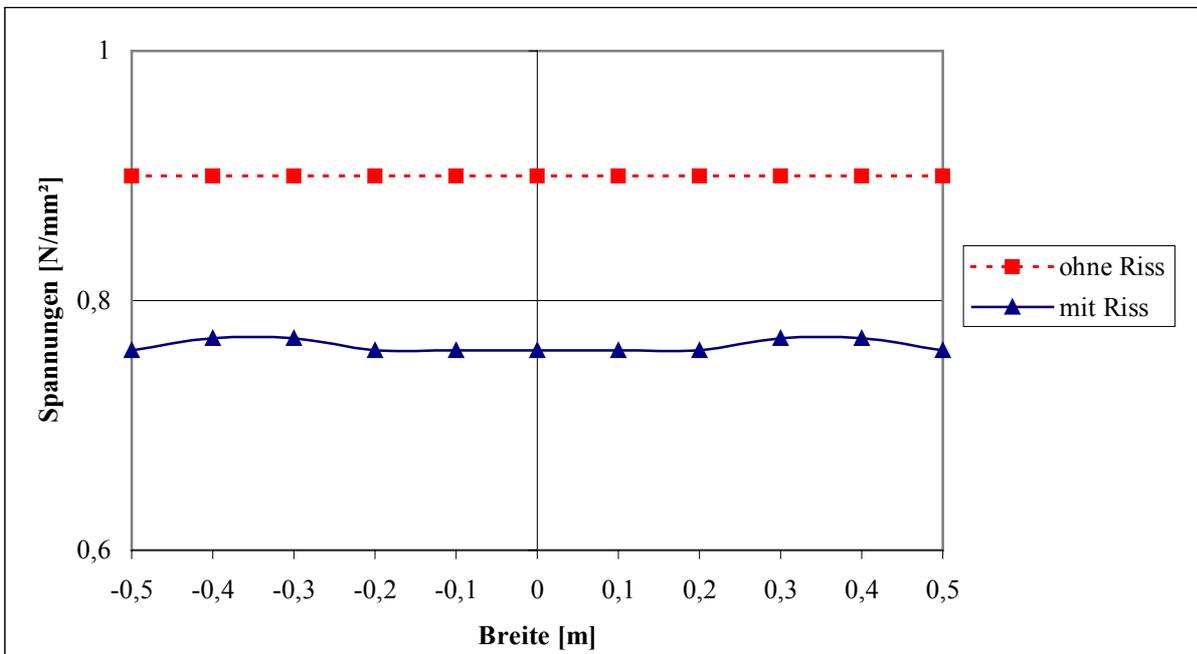
Höhenschichtlinien der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung bei **Abkühlung um 5 K** an einem System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT **ohne Riss**



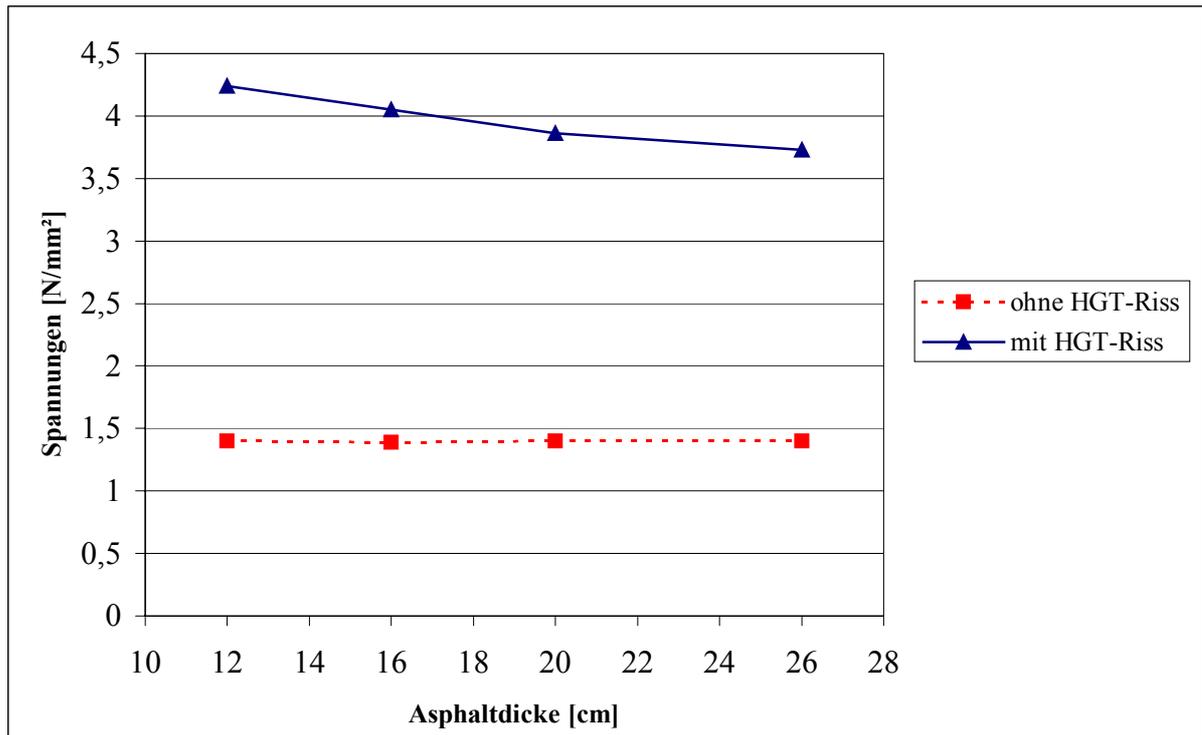
Höhenschichtlinien der  $\sigma_y$ -Spannungen in Plattenquerrichtung bei **Abkühlung um 5 K** an einem System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT **mit Riss**



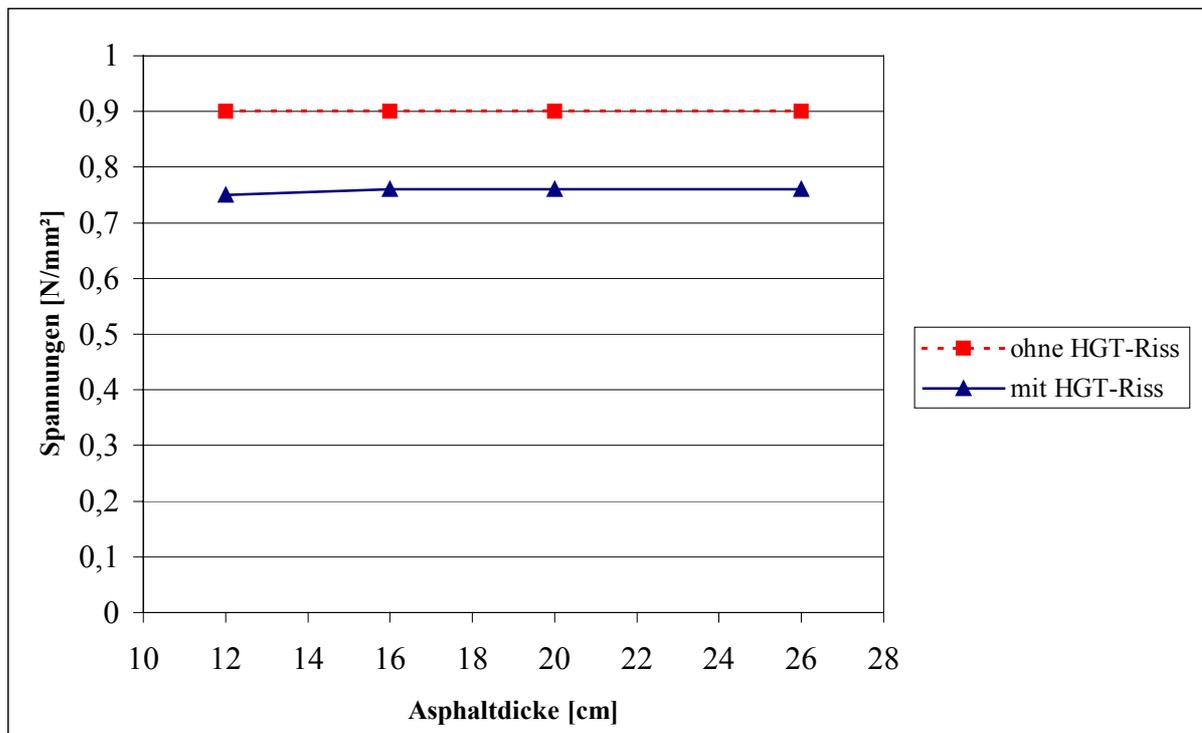
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes  
des Grundsystems in Plattenquerrichtung bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K



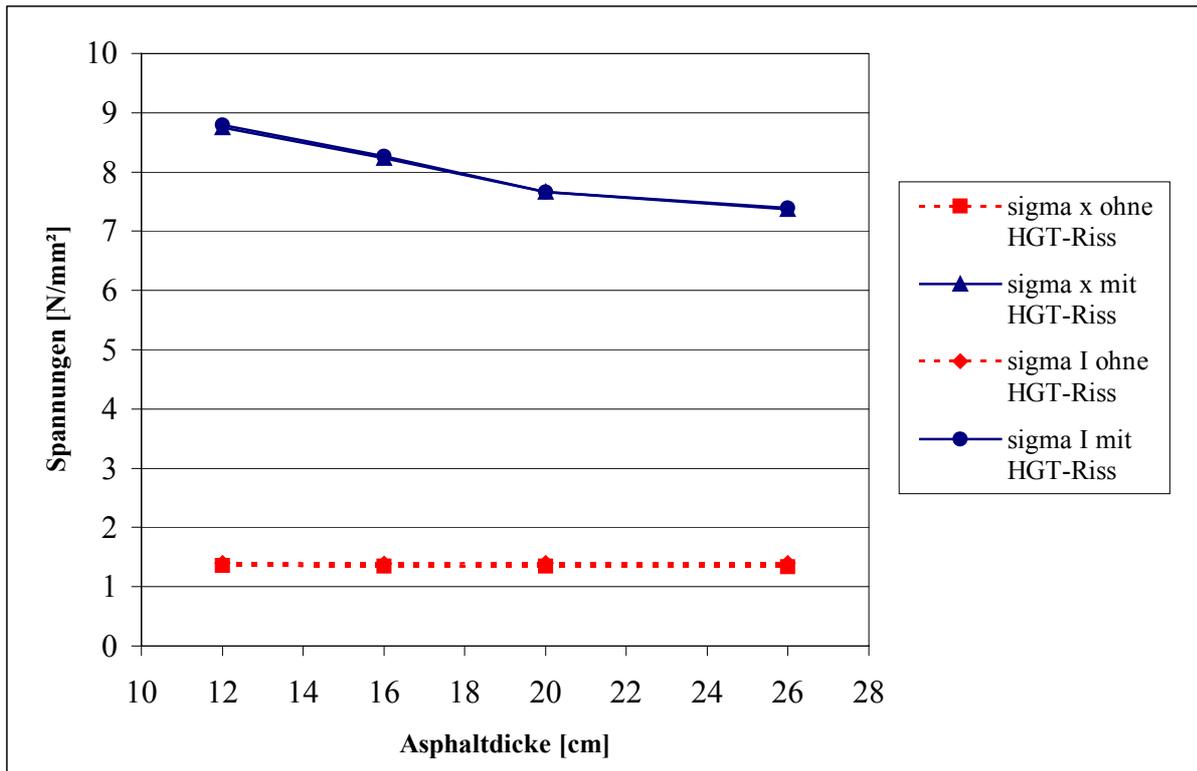
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT  
des Grundsystems in Plattenquerrichtung bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss**  
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss**  
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K



### $\sigma_I$ - und $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenmitte

in Abhängigkeit von der Asphaltstärke bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K

**Asphalt 20 cm auf 15 cm HGT ohne Riss**

Lastfall	Einsenkung Plattenmitte	Einsenkung Plattenrand	Einsenkung	UK Asphalt		UK HGT	
			Differenz	sigma x	sigma y	sigma x	sigma y
			Mitte-Rand	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
	[mm]	[mm]	[mm]	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Verkehr	0,11	0,01	0,1	-0,04	-0,04	0,51	0,51
Temperatur + Eigengewicht	0,14	0,14	0	1,35	1,4	0,89	0,9
Überlagerung	0,25	0,15	0,1	1,31	1,36	1,4	1,41

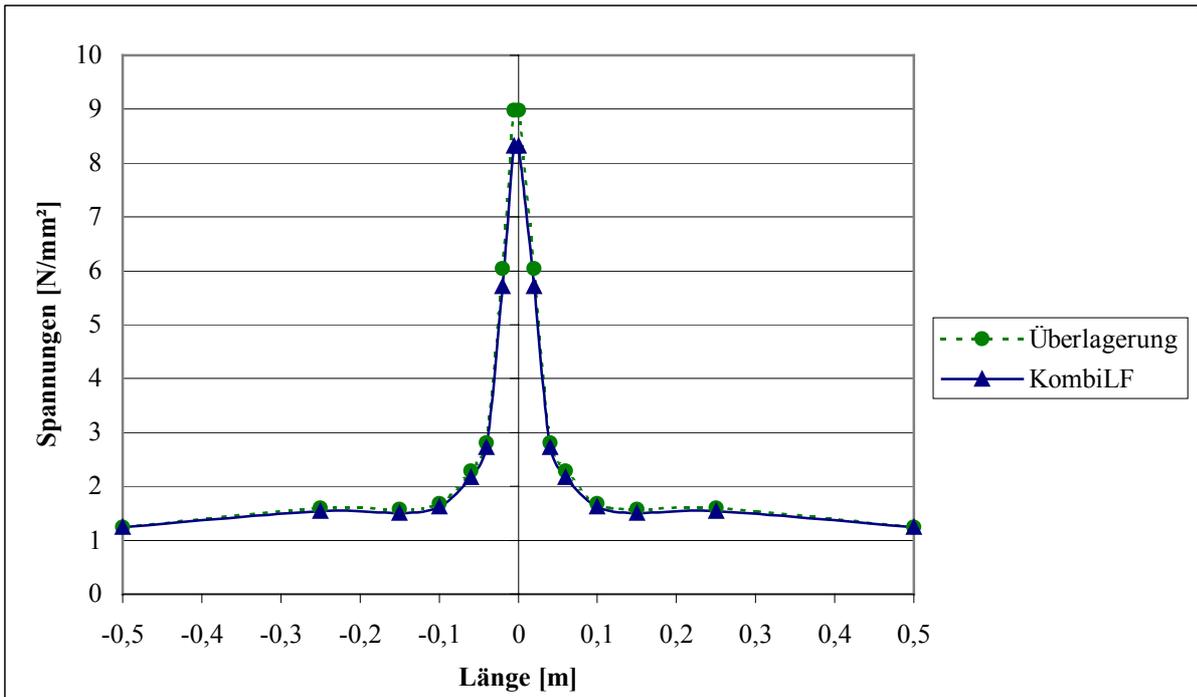
Kombination Eigengewicht, Verkehr und Temperatur	0,25	0,15	0,1	1,31	1,36	1,41	1,41
---	------	------	-----	------	------	------	------

**Gegenüberstellung Spannungsüberlagerung - Kombinationslastfall**für **20 cm Asphalt** auf 15 cm ungerissener HGT**Asphalt 20 cm auf 15 cm HGT mit einem Riss**

Lastfall	Einsenkung Plattenmitte	Einsenkung Plattenrand	Einsenkung	UK Asphalt		UK HGT	
			Differenz	sigma x	sigma y	sigma x	sigma y
			Mitte-Rand	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
	[mm]	[mm]	[mm]	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Verkehr	0,12	0,01	0,11	1,32	0,47	0	0,4
Temperatur + Eigengewicht	0,21	0,12	0,09	7,66	3,86	-0,04	0,76
Überlagerung	0,33	0,13	0,2	8,98	4,33	-0,04	1,16

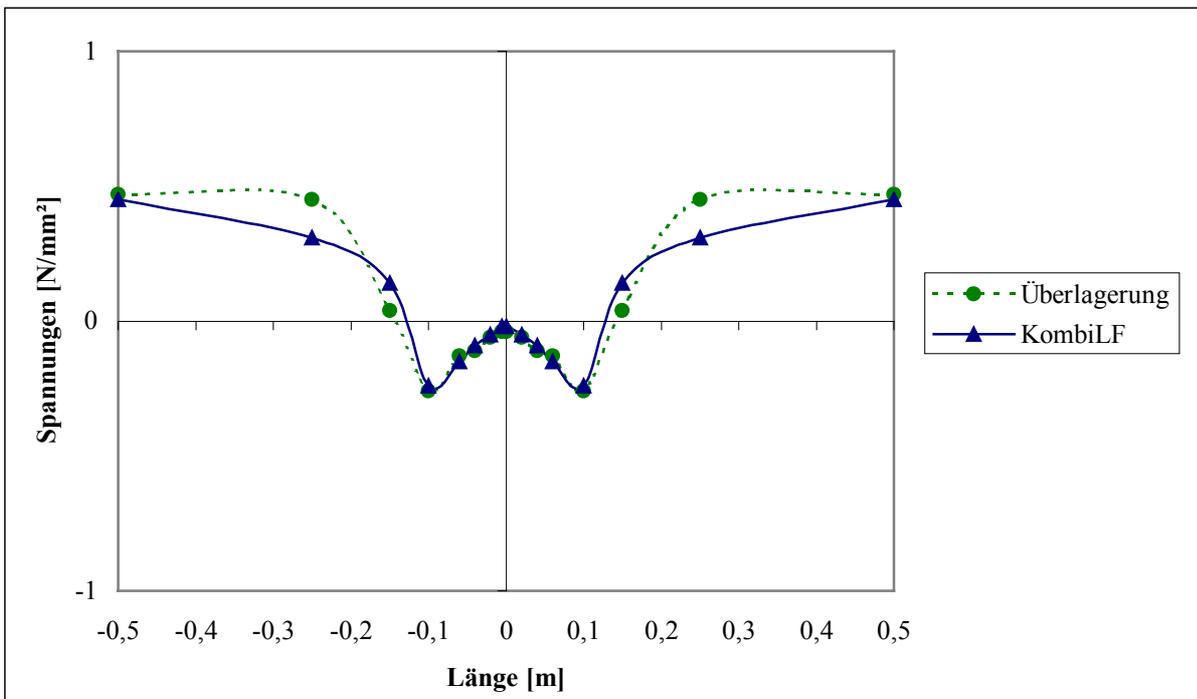
Kombination Eigengewicht, Verkehr und Temperatur	0,31	0,13	0,18	8,32	3,91	-0,02	1,8
---	------	------	------	------	------	-------	-----

**Gegenüberstellung Spannungsüberlagerung - Kombinationslastfall**für das **Grundsystem** mit einem Riss



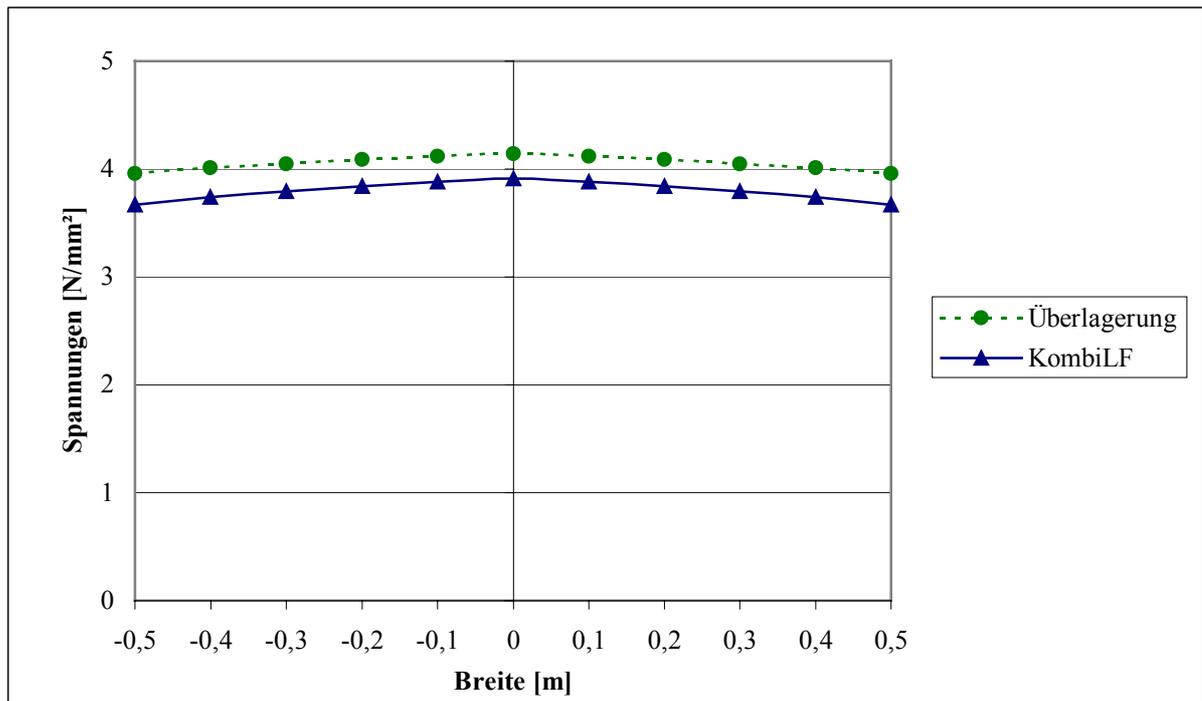
**$\sigma_x$ -Spannung an der Unterseite des Asphaltes in Plattenlängsrichtung**

Gegenüberstellung der Spannungsüberlagerung und des Kombinationslastfalles (Verkehr + Abkühlung um 5 K) am **Grundsystem**



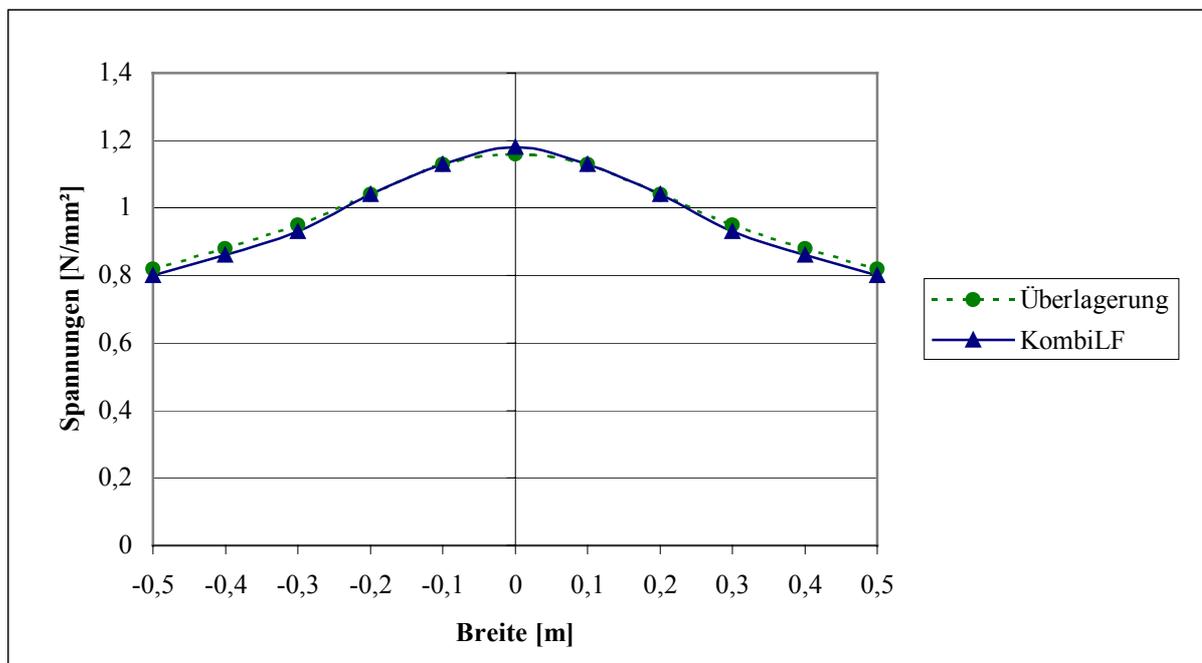
**$\sigma_x$ -Spannung an der Unterseite der HGT in Plattenlängsrichtung**

Gegenüberstellung der Spannungsüberlagerung und des Kombinationslastfalles (Verkehr + Abkühlung um 5 K) am **Grundsystem**



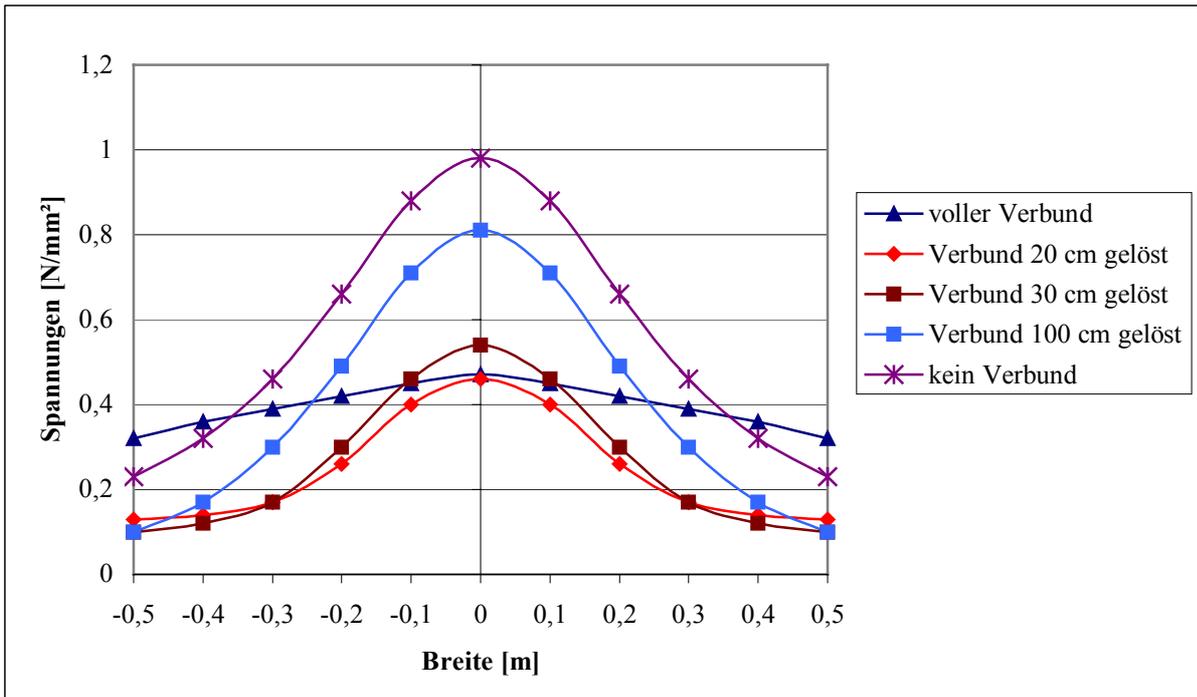
### $\sigma_y$ -Spannung an der Unterseite des Asphaltes in Plattenquerrichtung

Gegenüberstellung der Spannungsüberlagerung und des Kombinationslastfalles (Verkehr + Abkühlung um 5 K) am **Grundsystem**

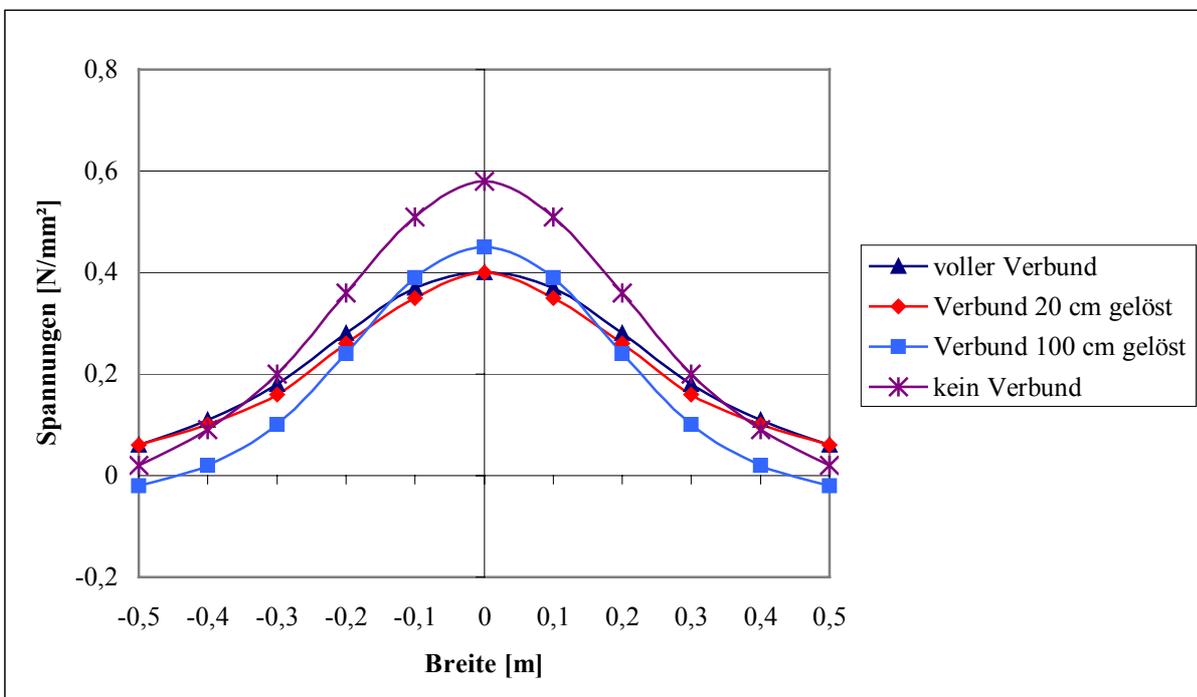


### $\sigma_y$ -Spannung an der Unterseite der HGT in Plattenquerrichtung

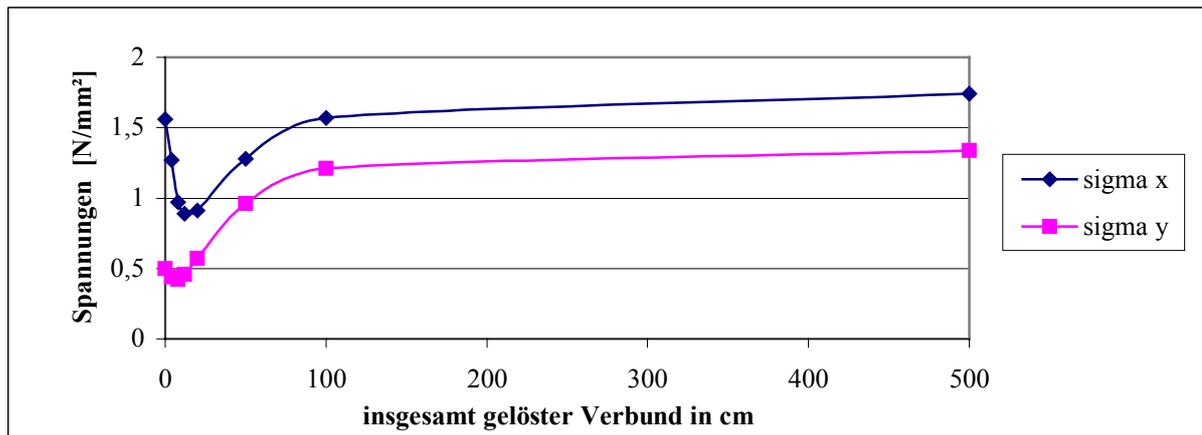
Gegenüberstellung der Spannungsüberlagerung und des Kombinationslastfalles (Verkehr + Abkühlung um 5 K) am **Grundsystem**



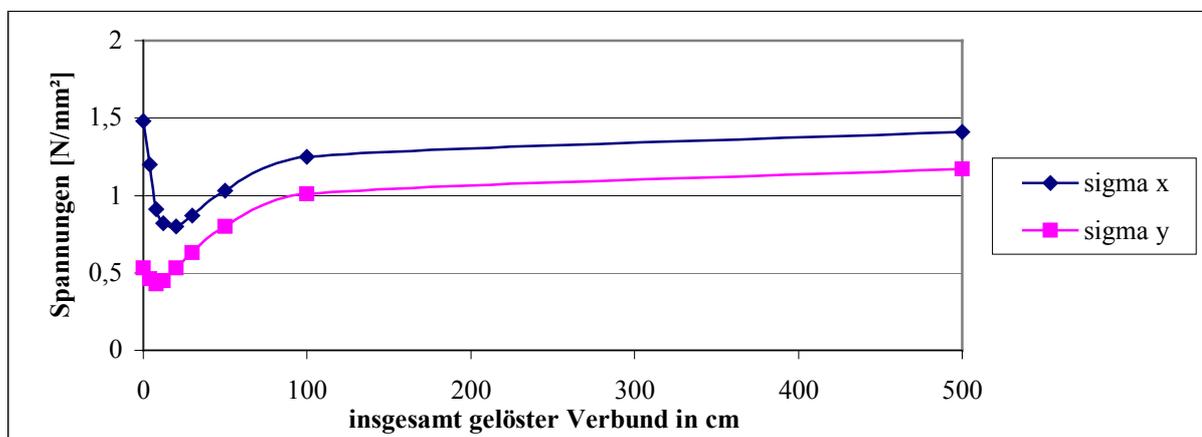
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt**  
**des Grundsystems in Plattenquerrichtung**  
**unter Verkehrsbelastung**



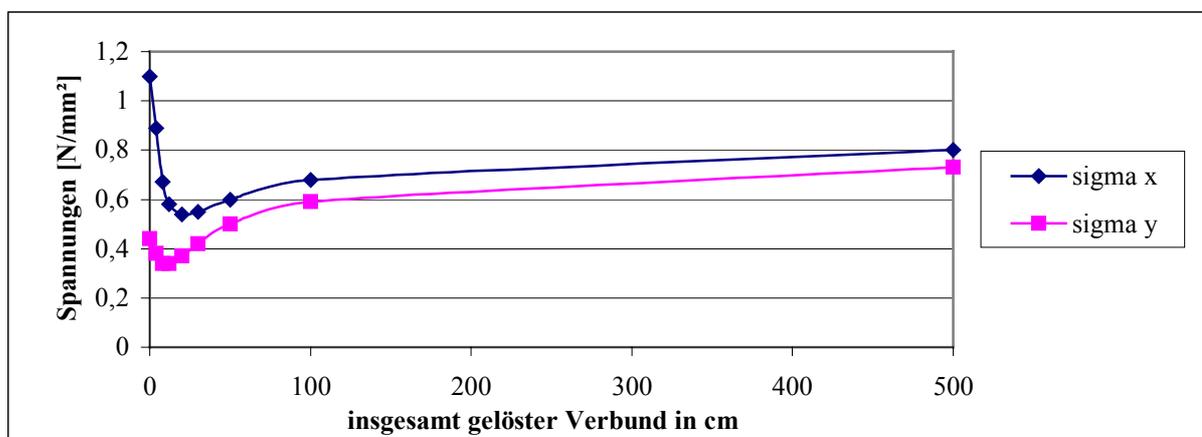
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT**  
**des Grundsystems in Plattenquerrichtung**  
**unter Verkehrsbelastung**



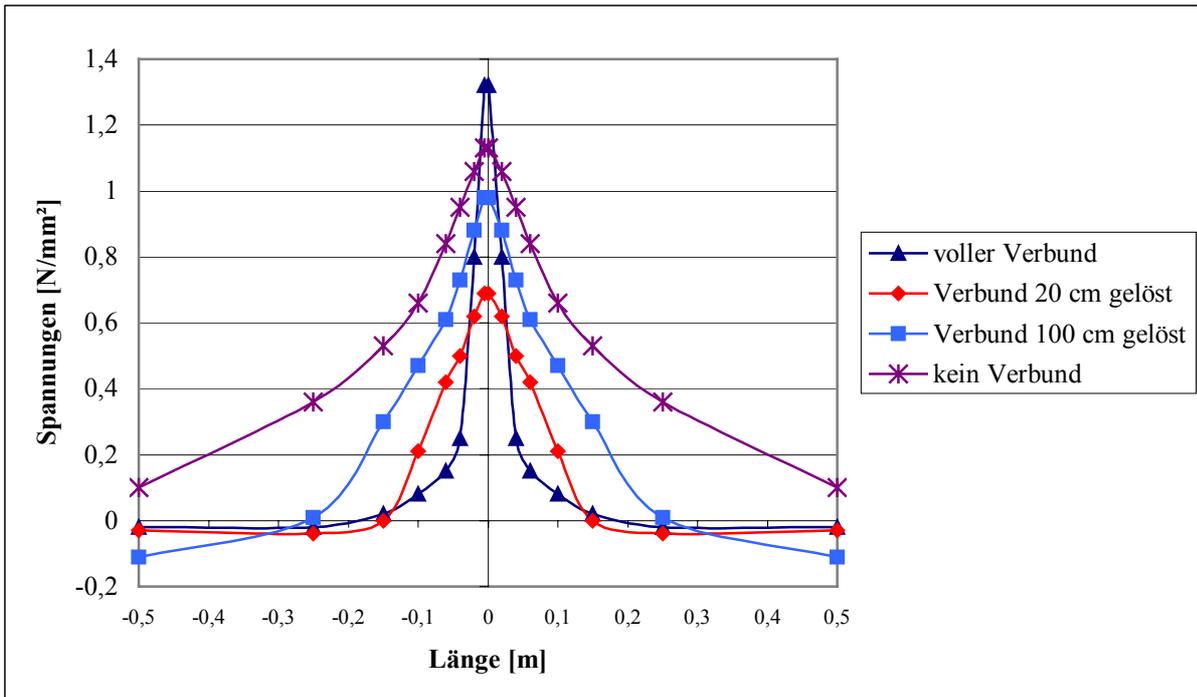
$\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss bei **12 cm Asphalt** auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung



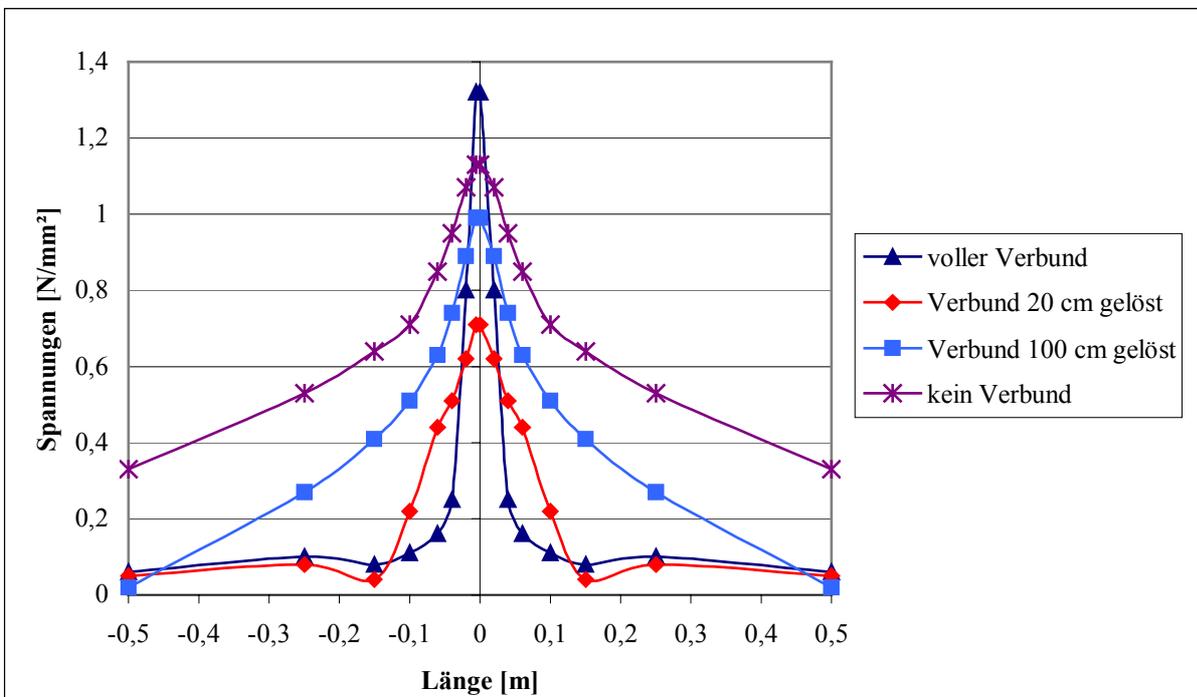
$\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss bei **16 cm Asphalt** auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung



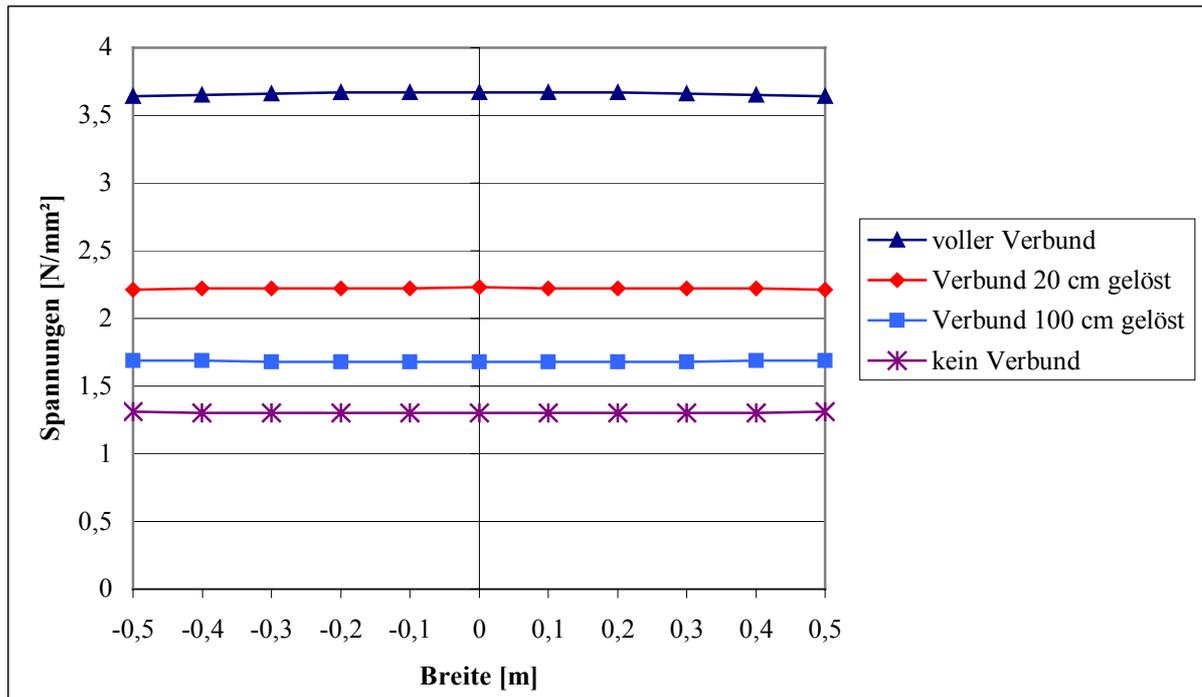
$\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss bei **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung



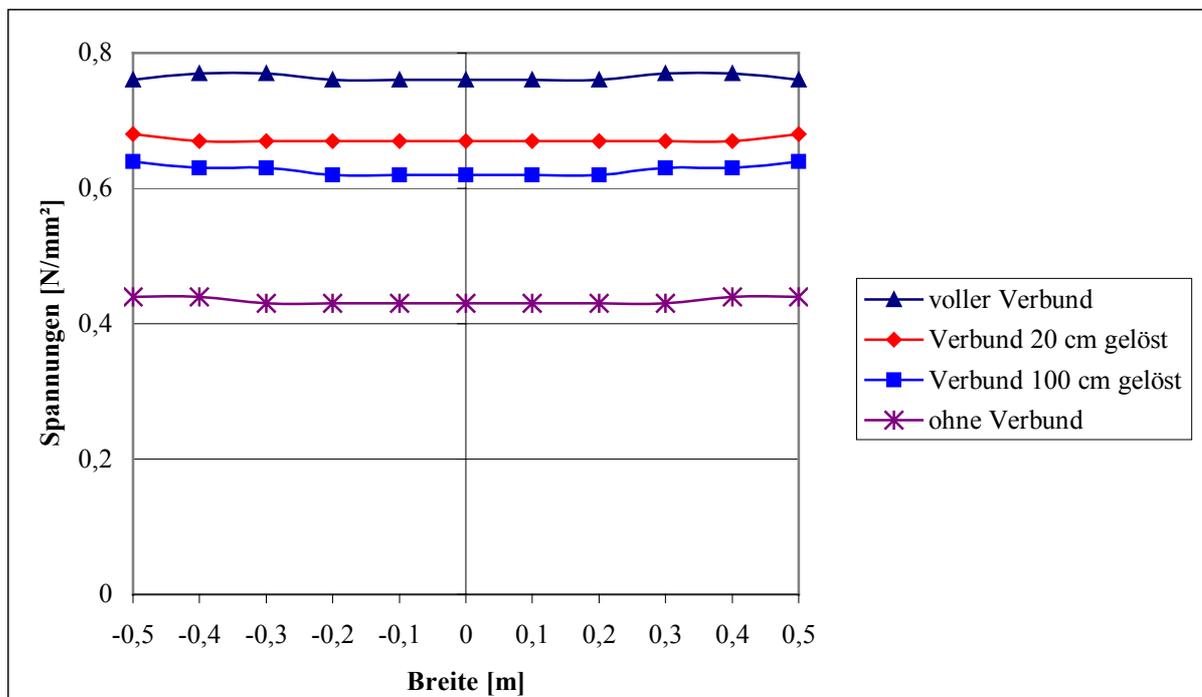
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss am Grundsystem in Plattenlängsrichtung unter Verkehrsbelastung**



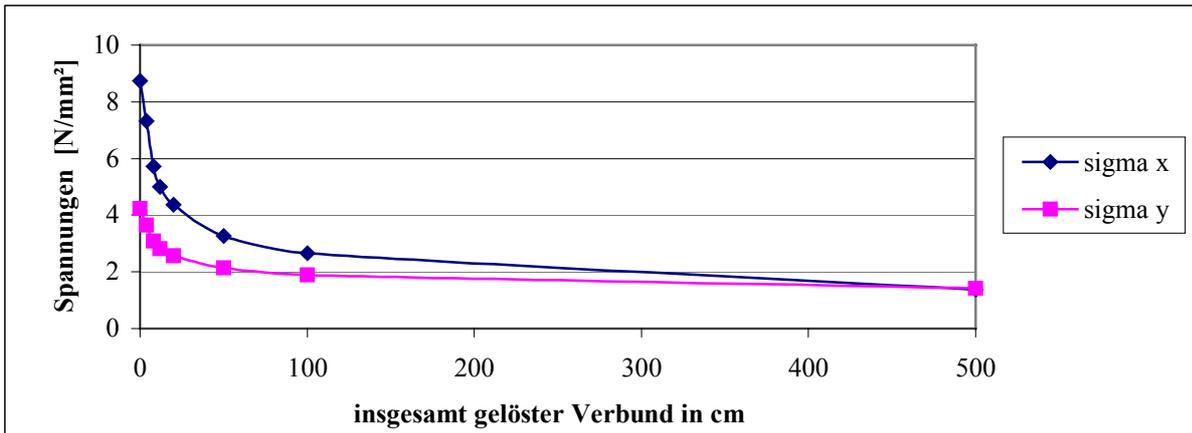
**$\sigma_l$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss am Grundsystem in Plattenlängsrichtung unter Verkehrsbelastung**



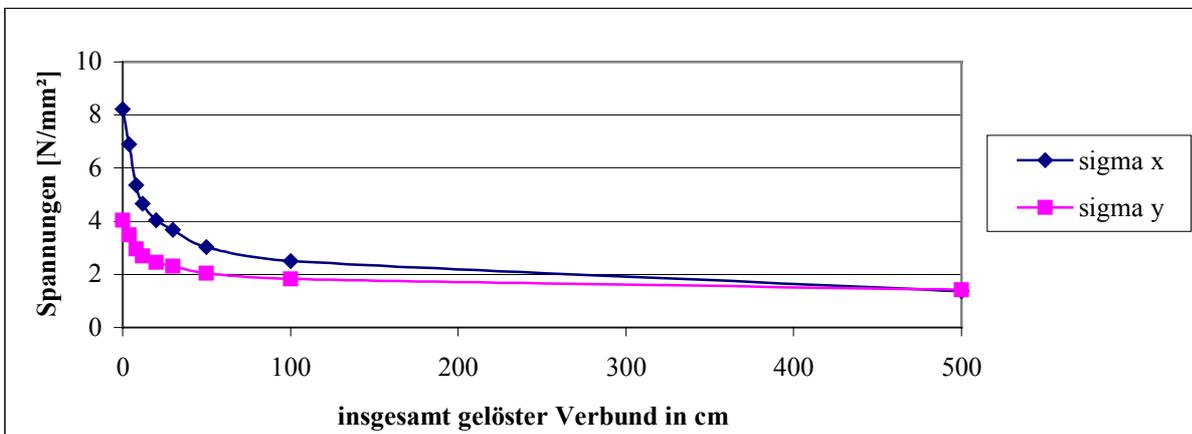
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes in Plattenquerrichtung**  
beim Lösen des Verbundes bei einer Abkühlung um 5 K



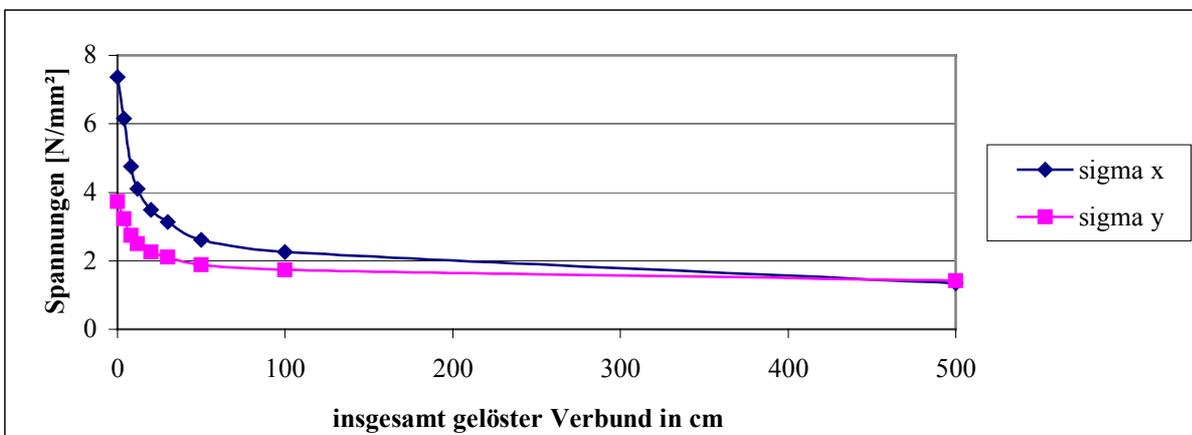
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT in Plattenquerrichtung**  
beim Lösen des Verbundes bei einer Abkühlung um 5 K



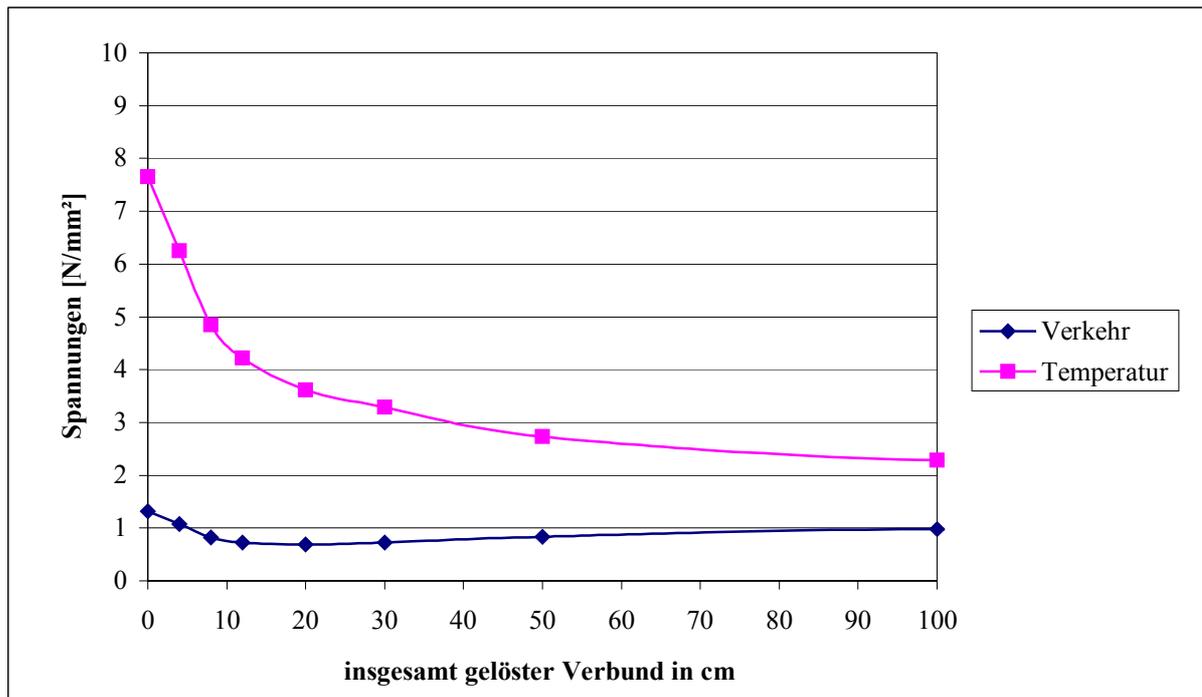
$\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss bei **12 cm Asphalt** auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K



$\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss bei **16 cm Asphalt** auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K



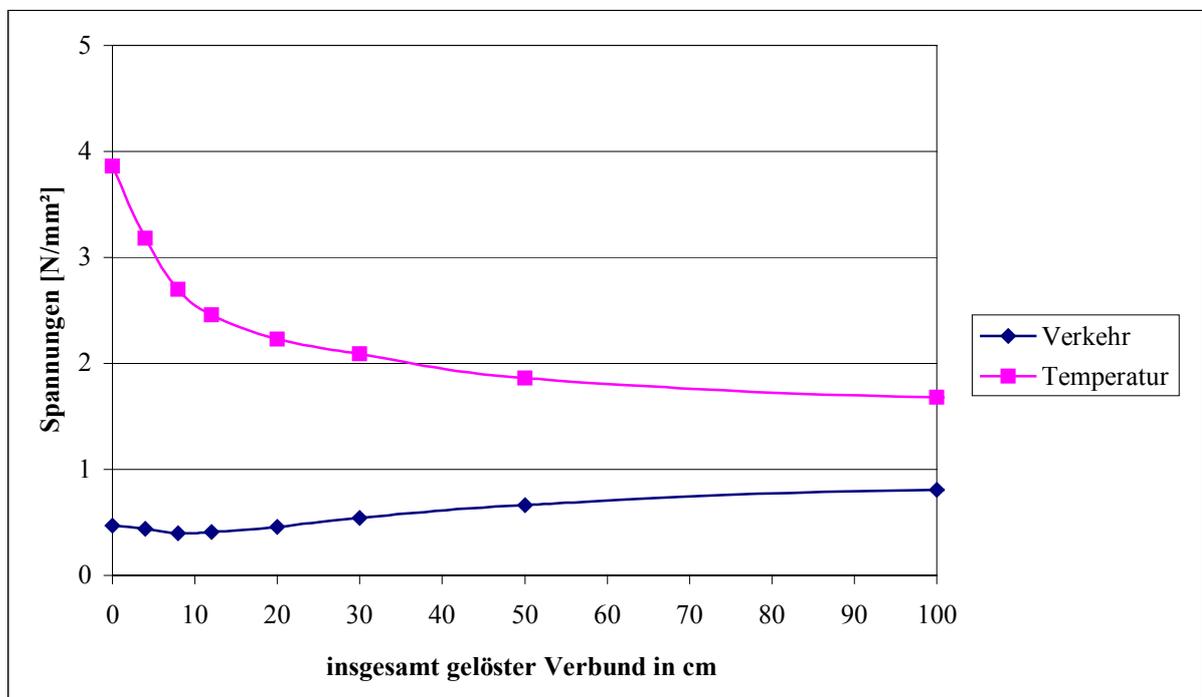
$\sigma_x$ - und  $\sigma_y$ -Spannungen an der UK Asphalt über dem Riss bei **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung bei einer gleichmäßigen Abkühlung um 5 K



### $\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

bei 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

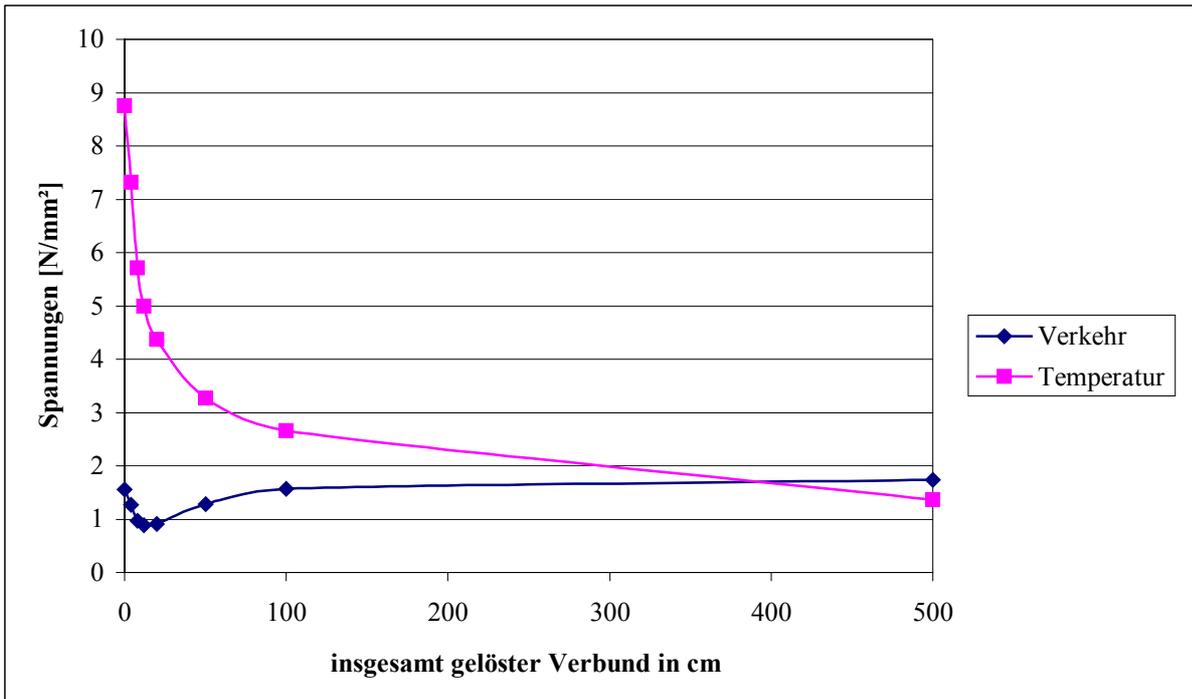
Detailausschnitt bis 100 cm aus Abb. 6.4.12



### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

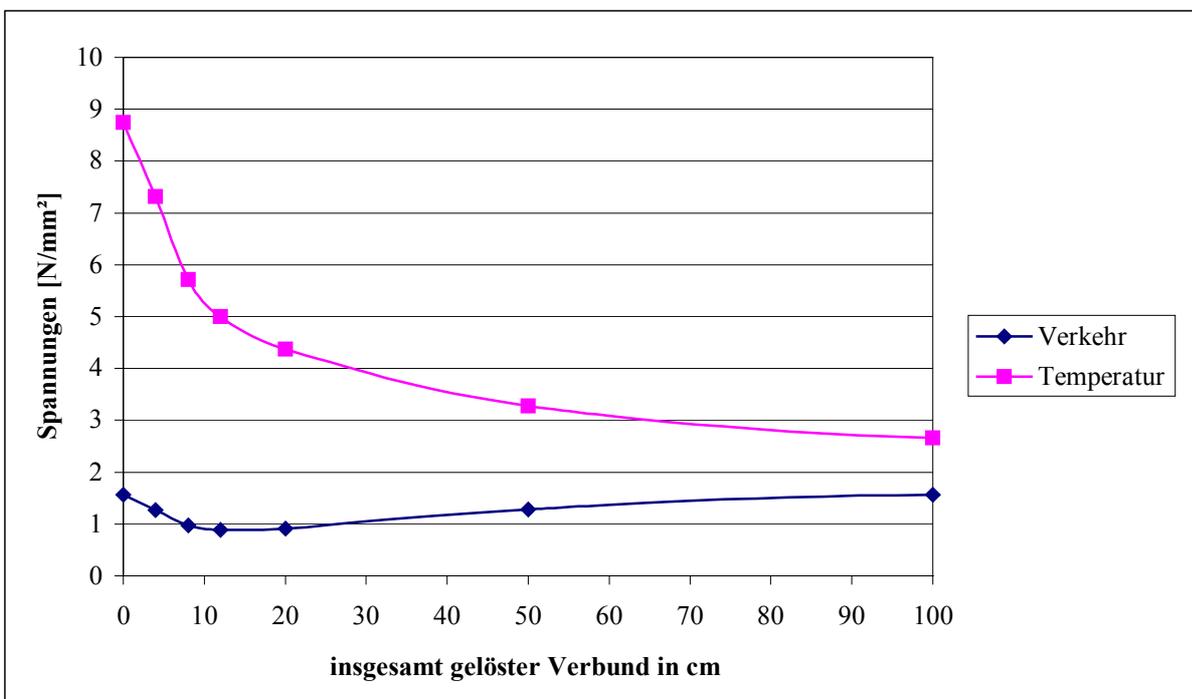
bei 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

Detailausschnitt bis 100 cm aus Abb. 6.4.13



**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss**

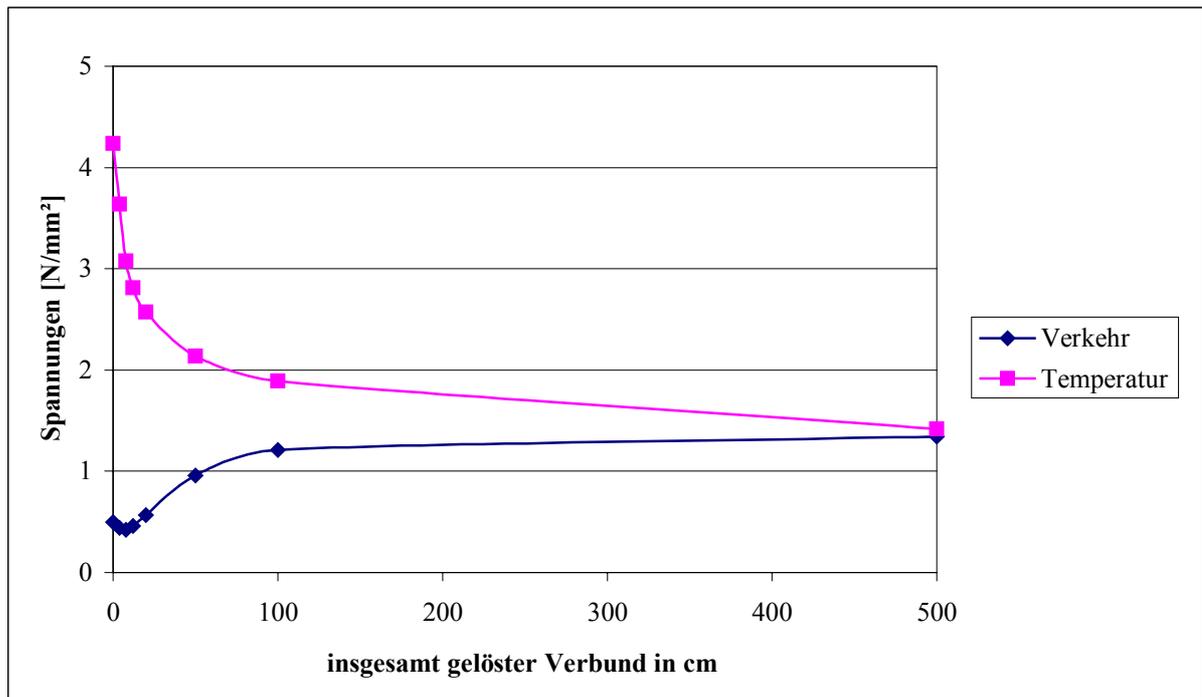
bei 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung



**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss**

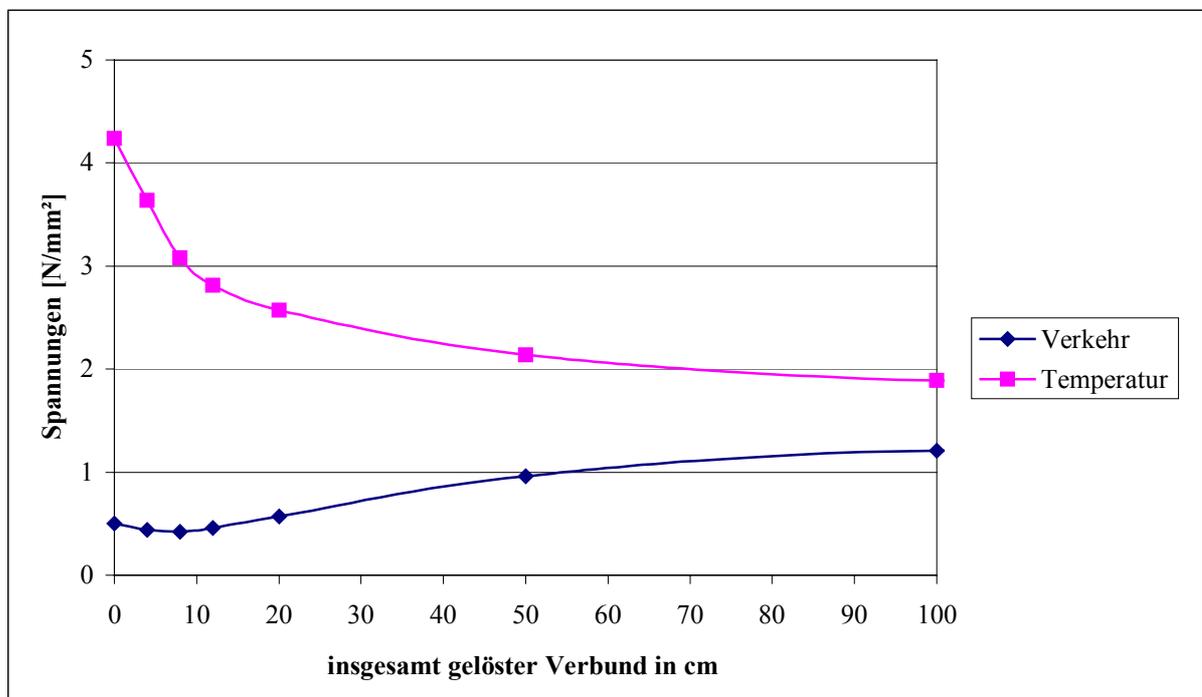
bei 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

Detailausschnitt bis 100 cm



### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

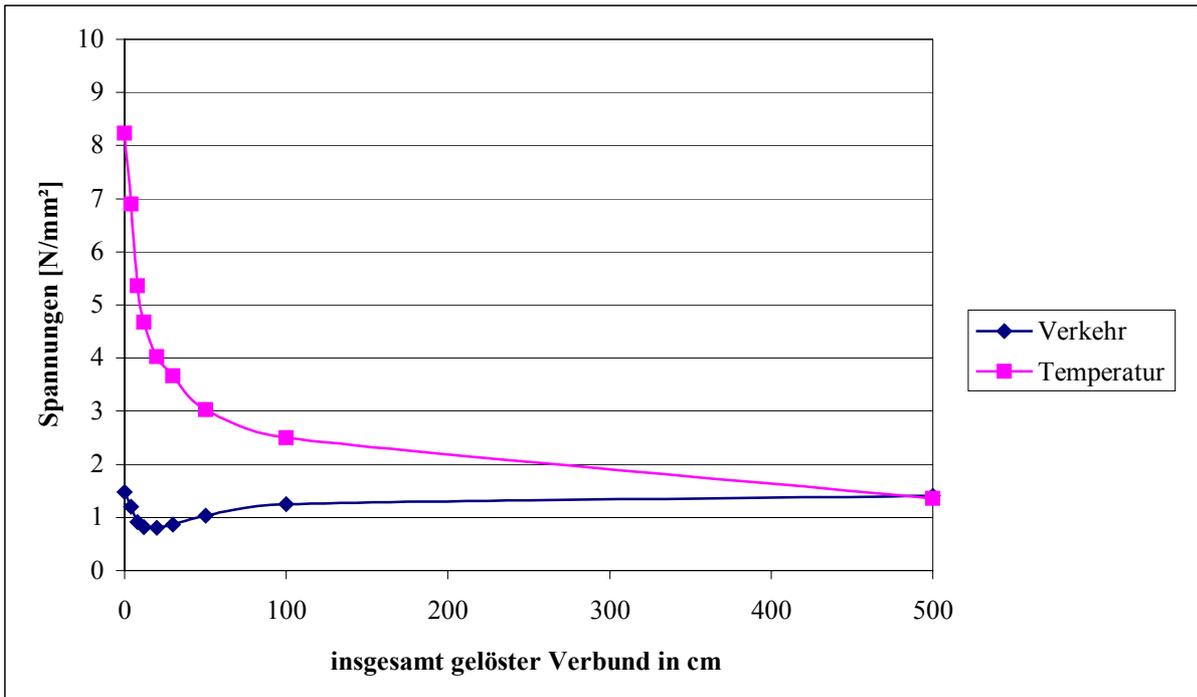
bei 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung



### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

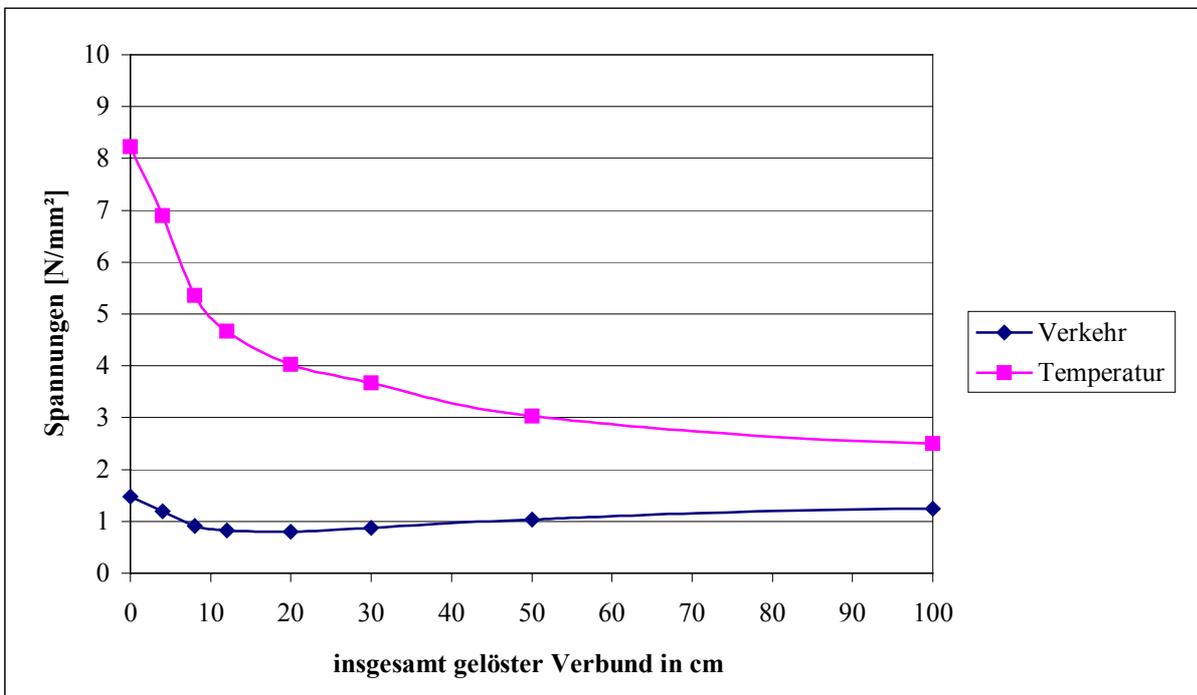
bei 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

Detailausschnitt bis 100 cm



**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss**

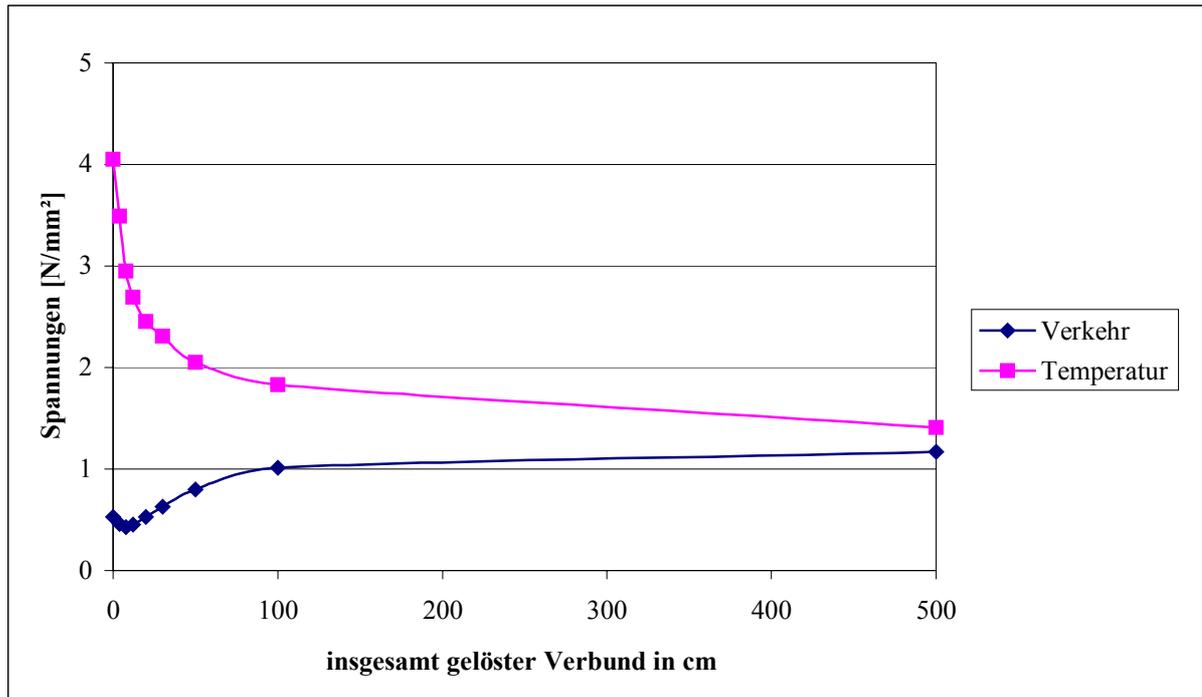
bei 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung



**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss**

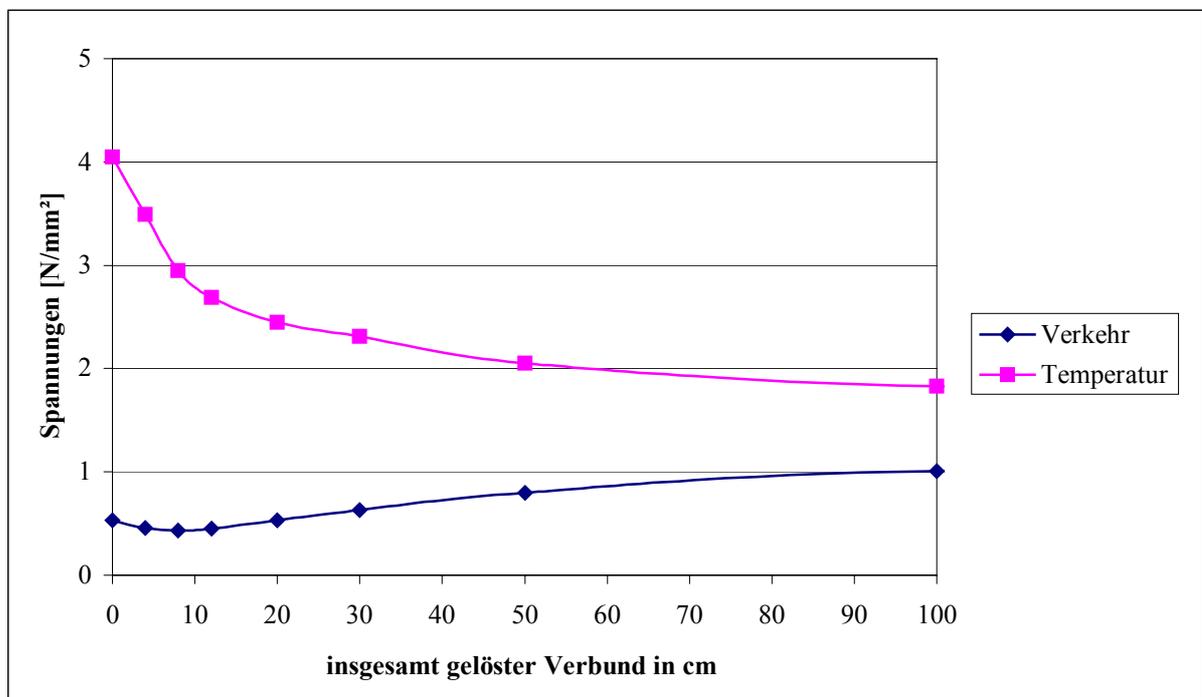
bei 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

Detailausschnitt bis 100 cm



### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

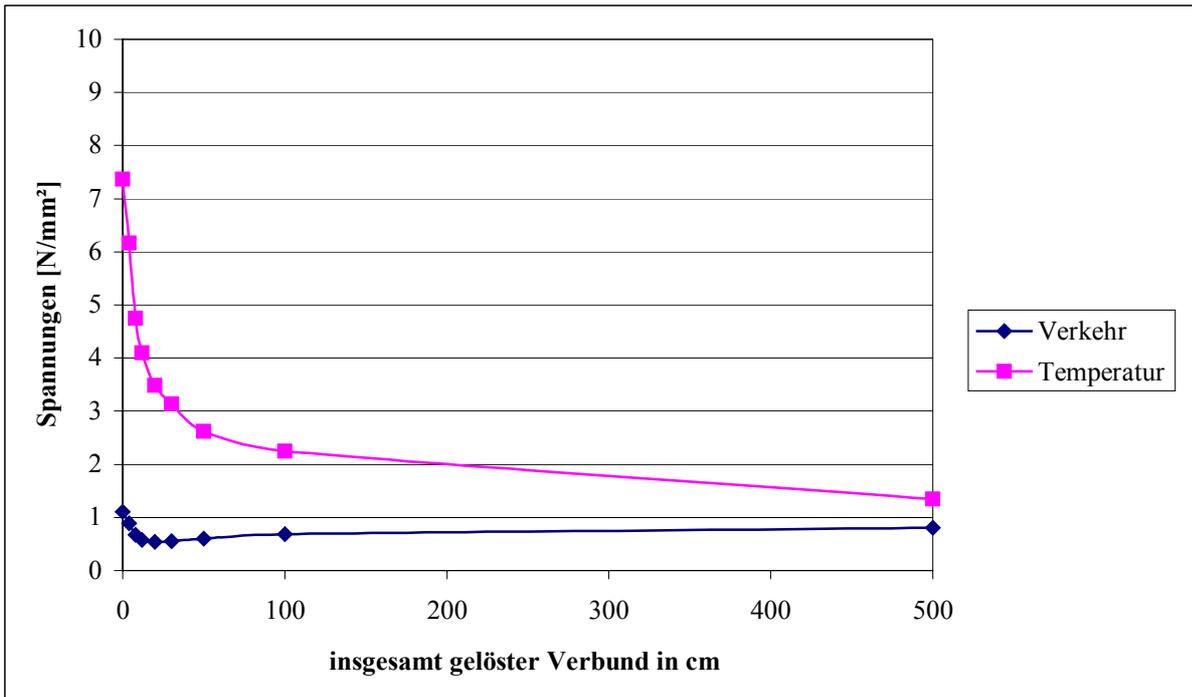
bei 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung



### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

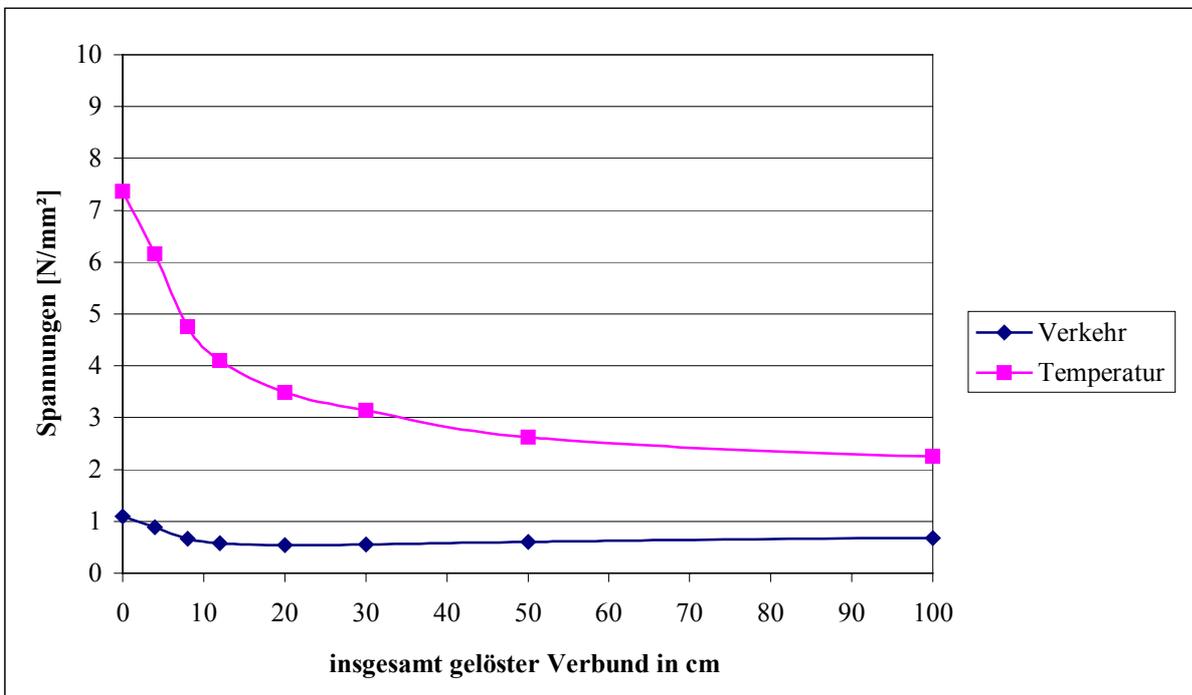
bei 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

Detailausschnitt\_bis 100 cm



**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss**

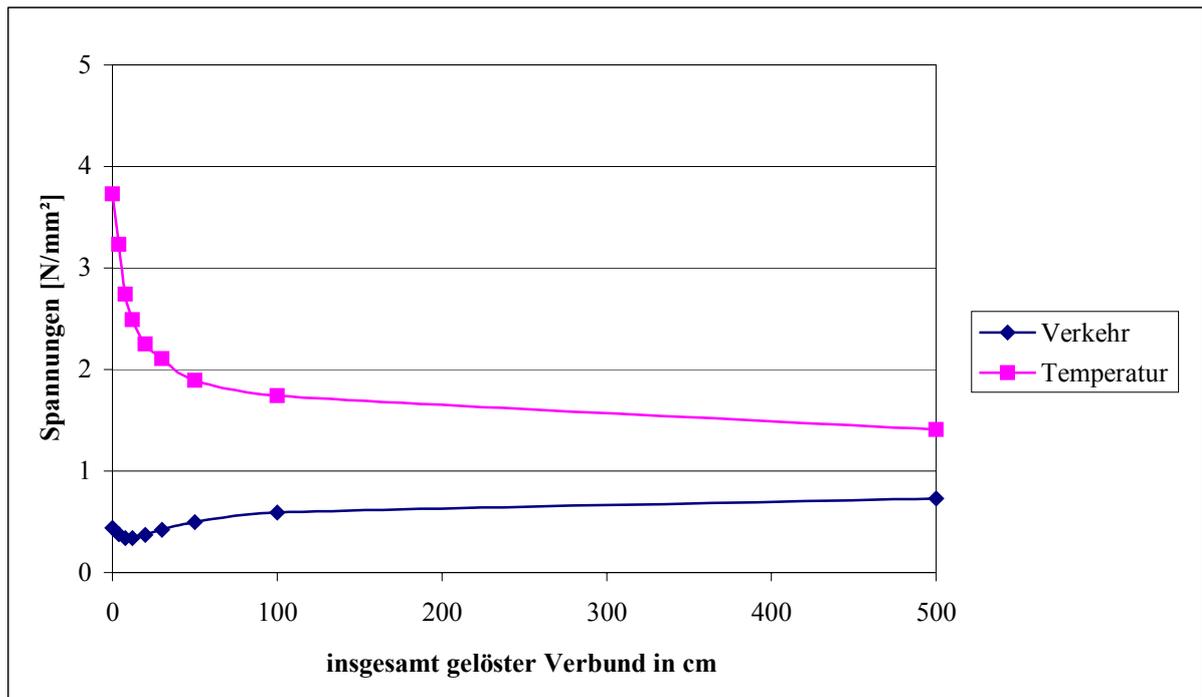
bei 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung



**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss**

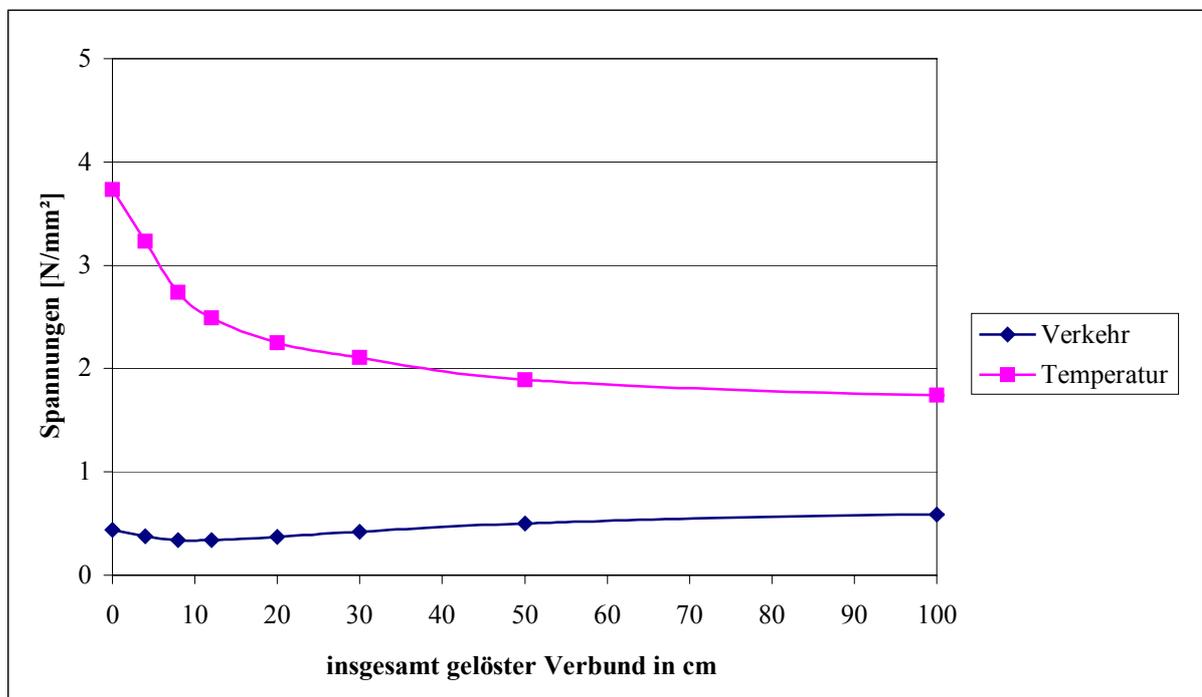
bei 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

Detailausschnitt bis 100 cm



### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

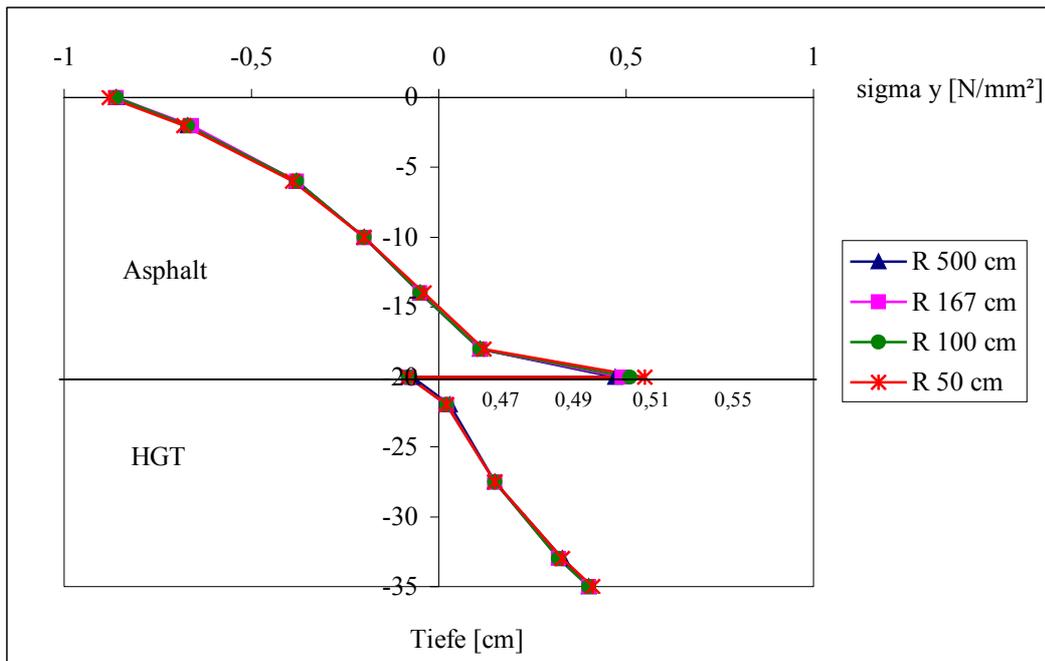
bei 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung



### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

bei 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT in Abhängigkeit von der Verbundlösung

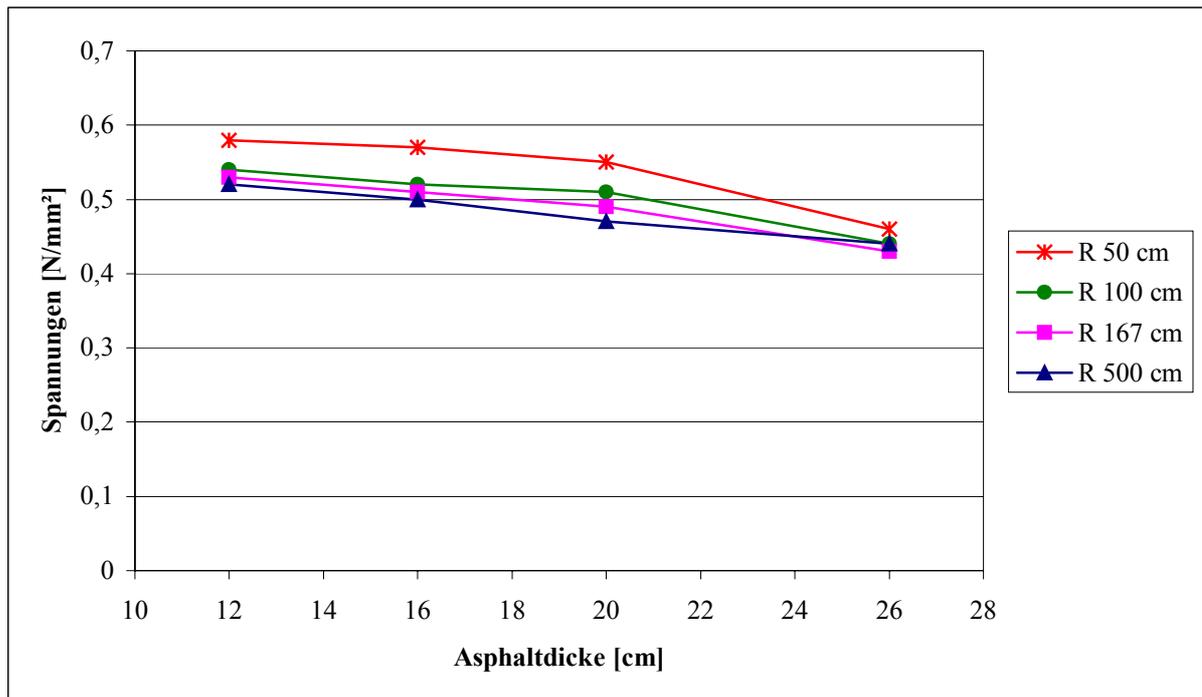
Detailausschnitt bis 100 cm



**Biegespannungsverlauf  $\sigma_y$  über die Fahrbahndicke bei 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene Rissabstände in der HGT unter Verkehrsbelastung**

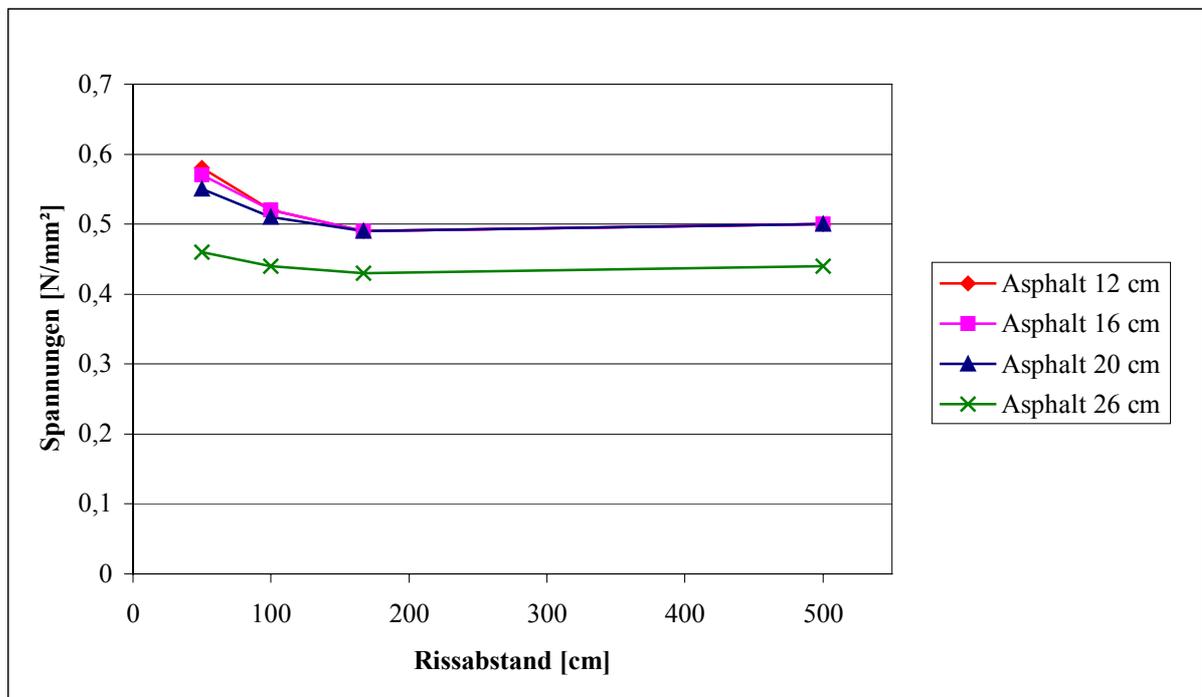
Rissabstand in m	Hauptspannung $\sigma_I$ [N/mm²]	Zunahme in %
5,0	1,32	-
1,67	1,36	3
1,0	1,4	6
0,5	1,5	14

**Hauptspannungen  $\sigma_I$  an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss bei 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene Rissabstände in der HGT unter Verkehrsbelastung**



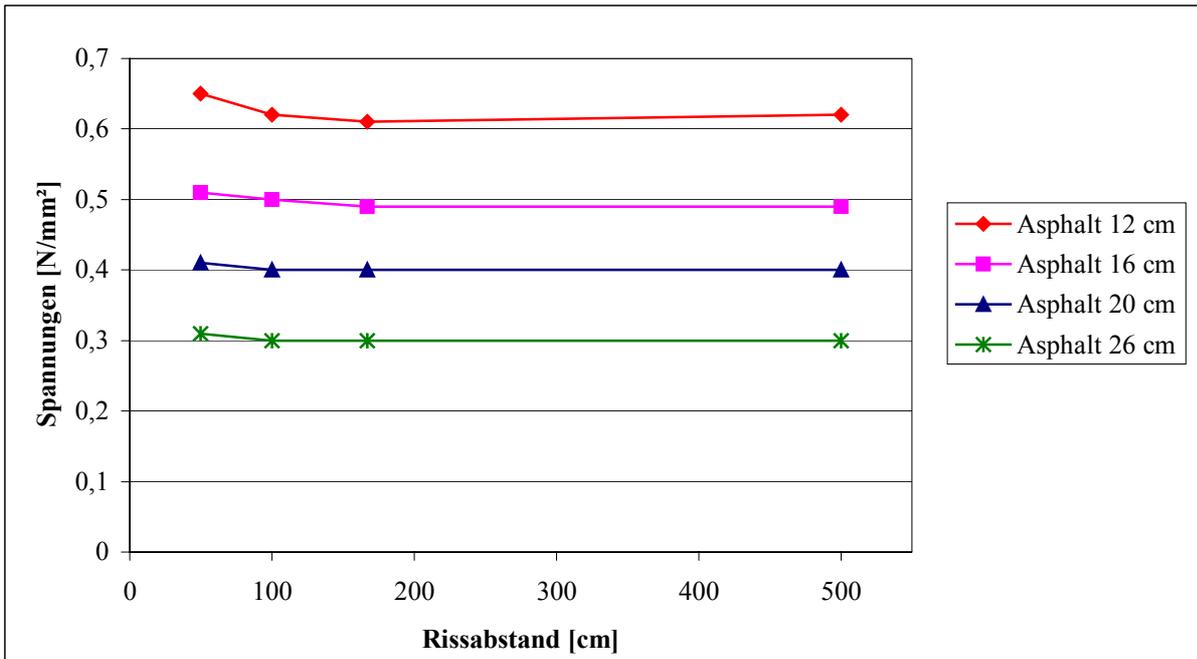
### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss

in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für verschiedene Rissabstände R unter Verkehrsbelastung



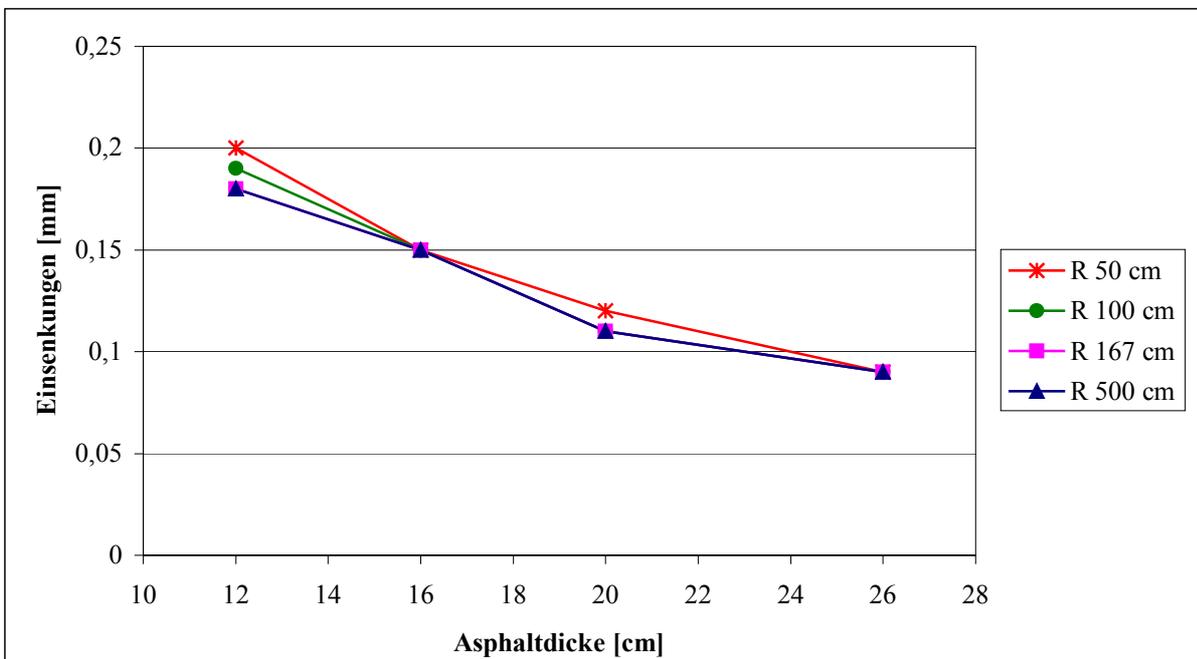
### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,

in Abhängigkeit vom Rissabstand R [cm] für verschiedene Asphaltstärken unter Verkehrsbelastung



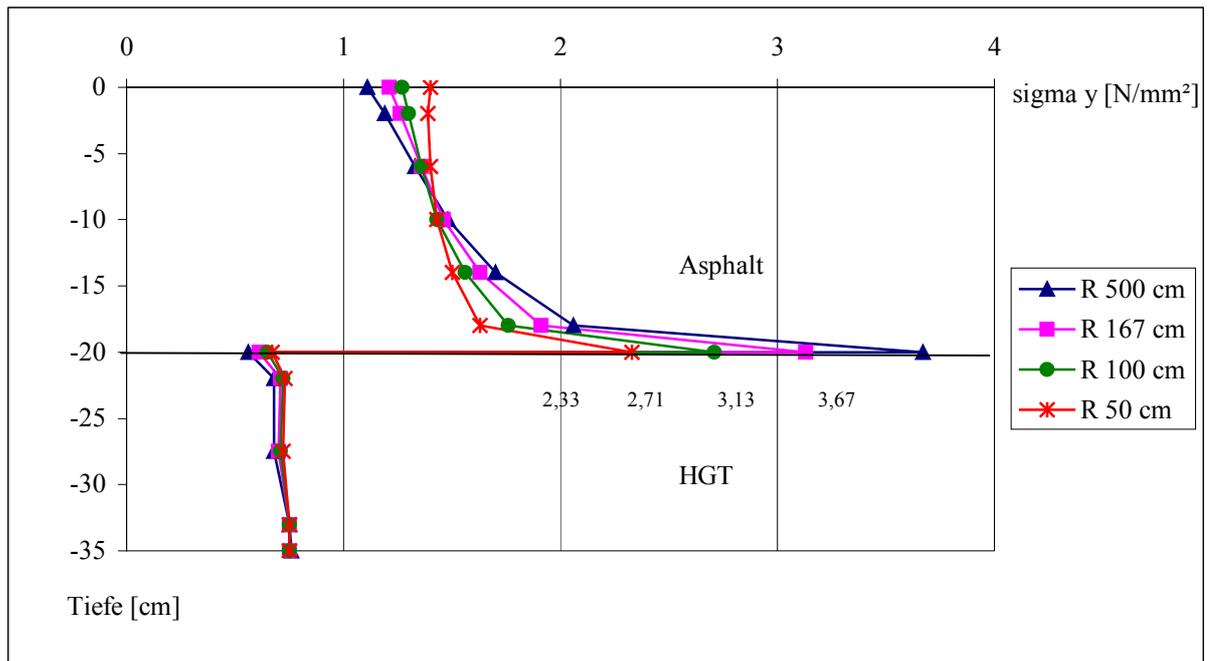
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss**

in Abhängigkeit vom Rissabstand R [cm] für verschiedene Asphaltstärken unter **Verkehrsbelastung**



**Differenz der Einsenkungen über dem Riss zwischen Plattenmitte und dem Plattenrand**

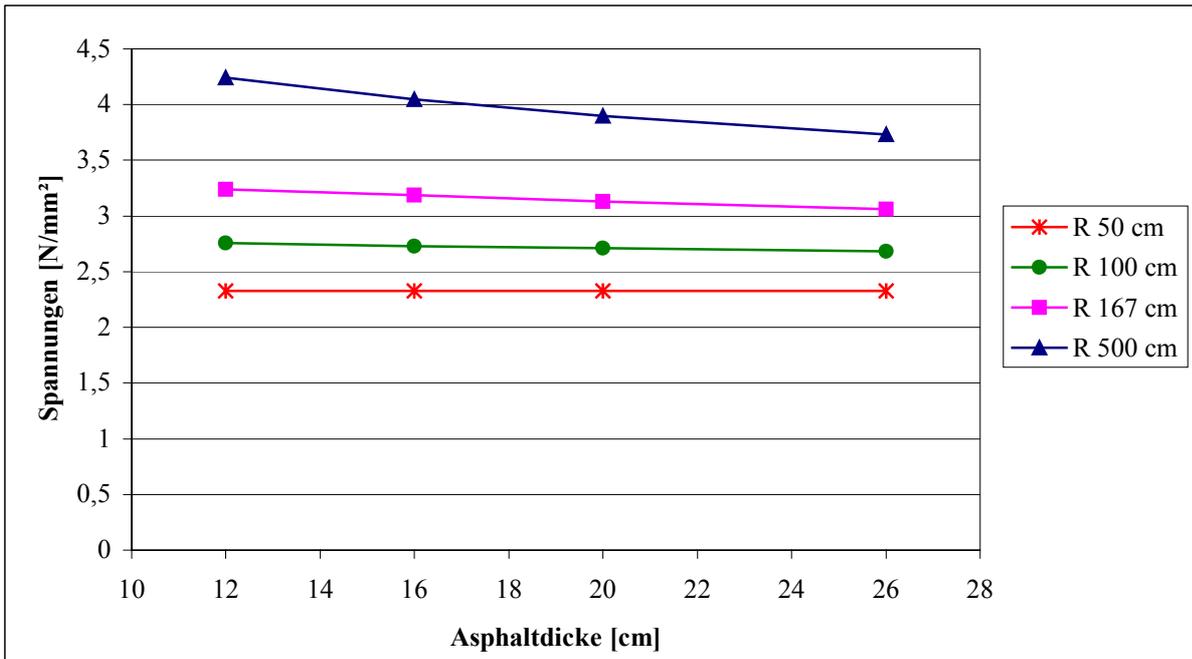
in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für verschiedene Rissabstände R [cm] unter **Verkehrsbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen über die Fahrbahndicke bei 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene Rissabstände in der HGT unter Temperaturbelastung**

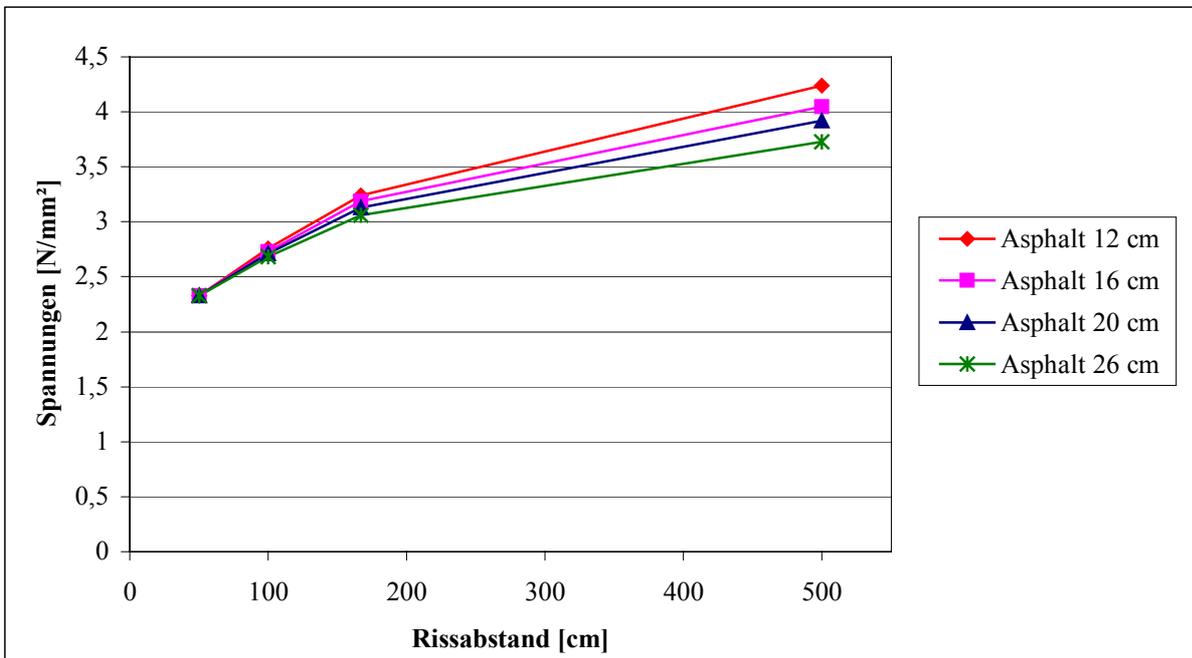
Rissabstand in m	Hauptspannung $\sigma_I$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Abnahme in %
5,0	7,66	-
1,67	6,09	20
1,0	4,91	36
0,5	3,89	49

**Hauptspannungen  $\sigma_I$  an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss bei 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene Rissabstände in der HGT unter Temperaturbelastung**



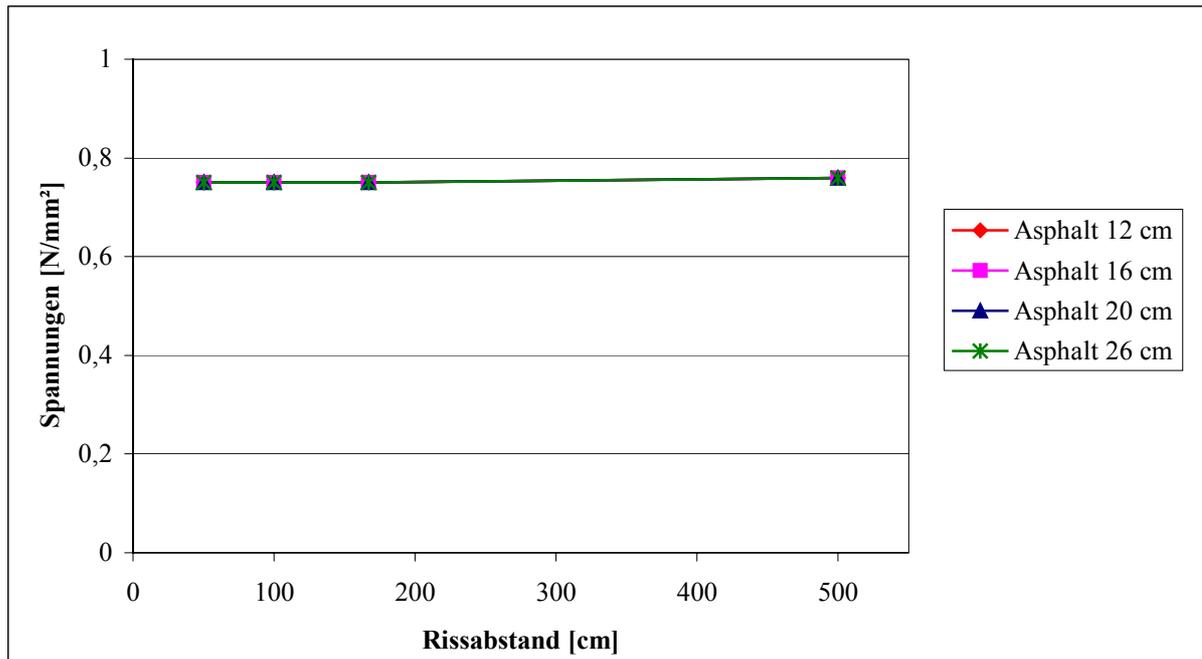
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der Asphalttschicht über dem Riss**

in Abhängigkeit von der Asphalttdicke für verschiedene Rissabstände unter **Temperaturbelastung**



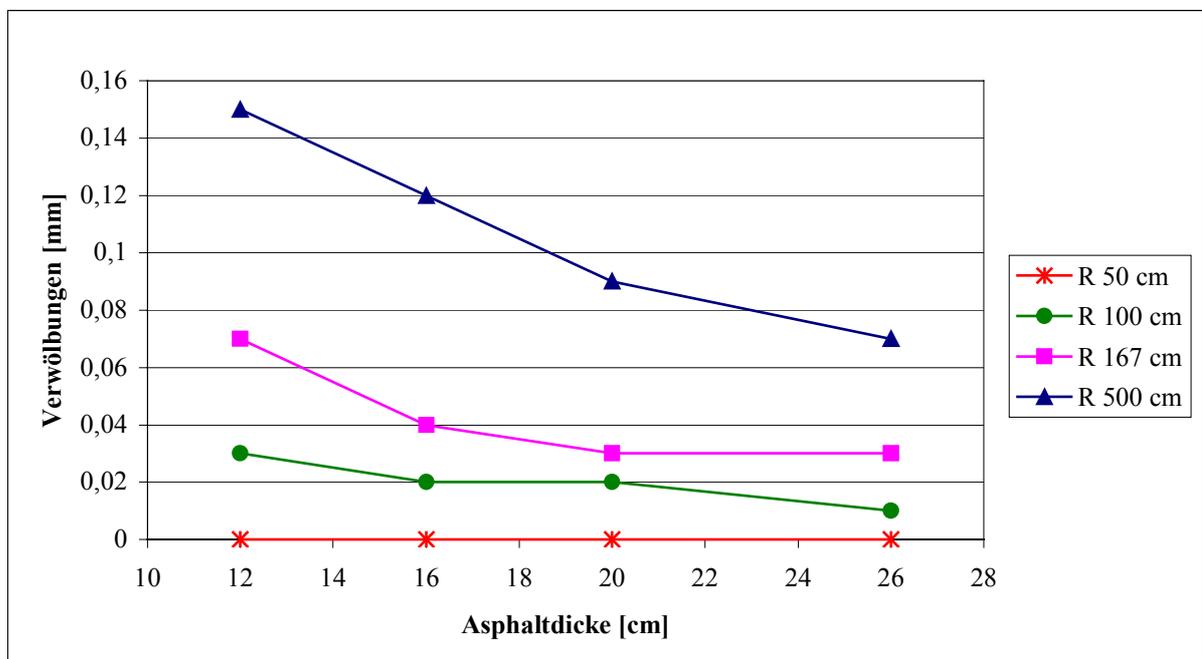
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der Asphalttschicht über dem Riss**

in Abhängigkeit vom Rissabstand R [cm] für verschiedene Asphalttdicken unter **Temperaturbelastung**



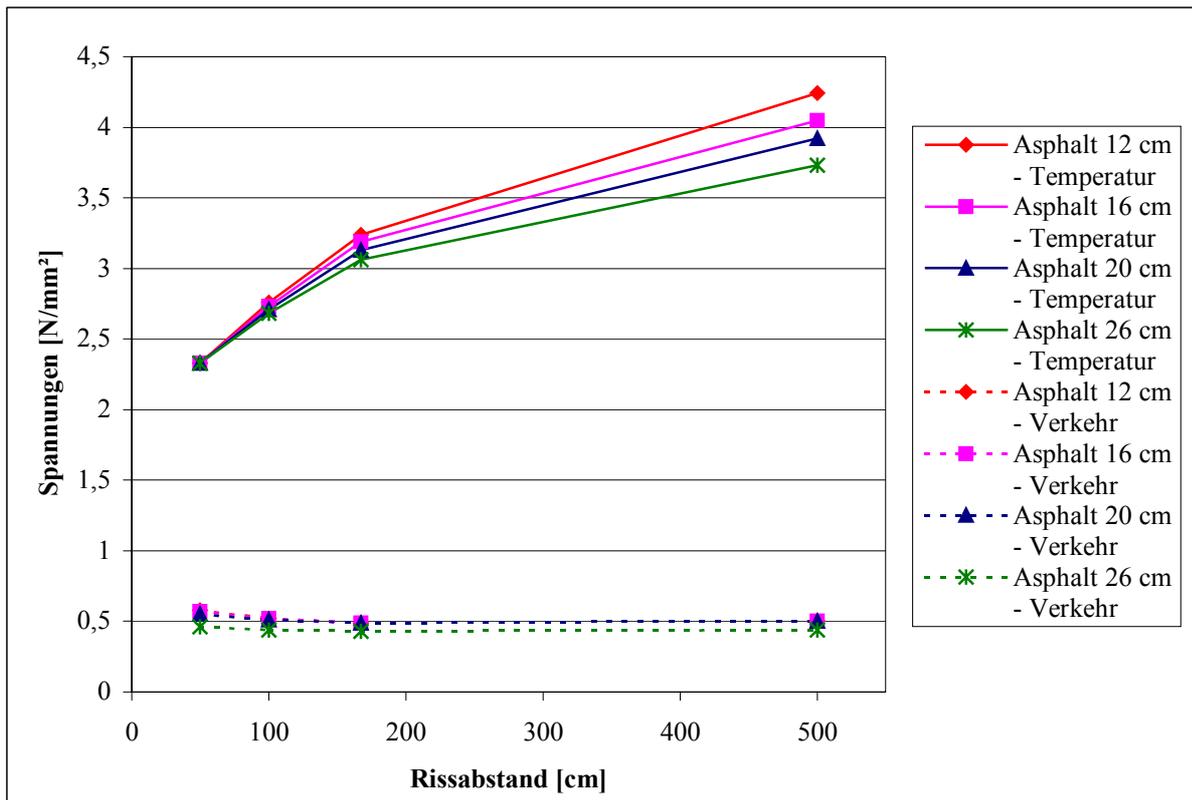
### $\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss

in Abhängigkeit vom Rissabstand R [cm] für verschiedene Asphaltstärken  
unter **Temperaturbelastung**

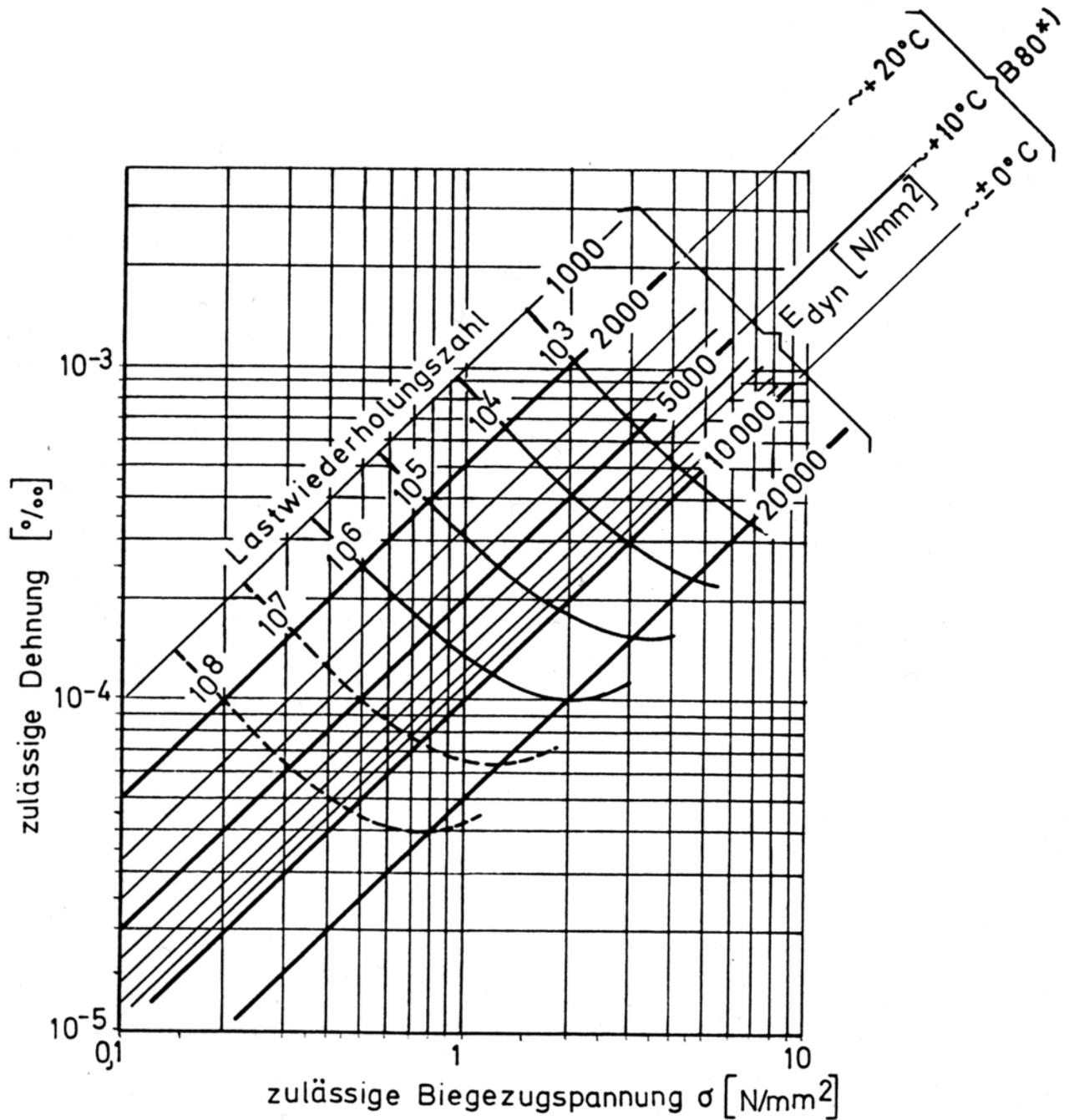


### Verwölbungen der Fahrbahnoberseiten über dem Riss

in Abhängigkeit von der Asphaltstärke für verschiedene Rissabstände  
unter **Temperaturbelastung**

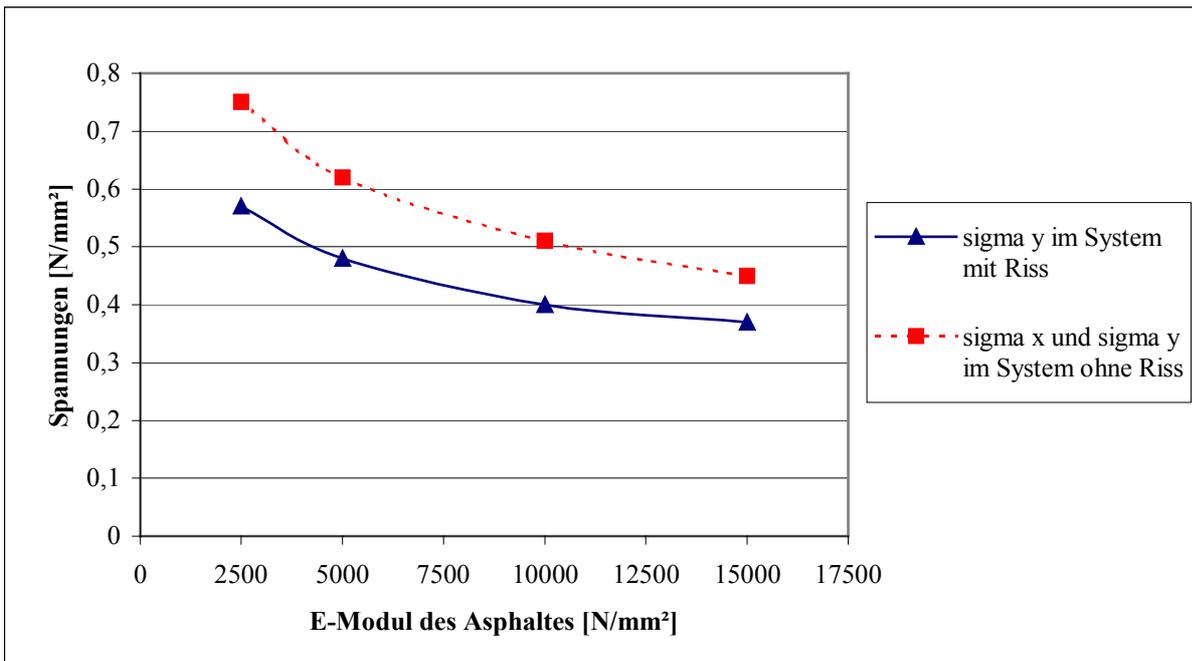


$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,  
in Abhängigkeit vom Rissabstand für verschiedene Asphaltstärken  
unter Verkehrs- und Temperaturbelastung

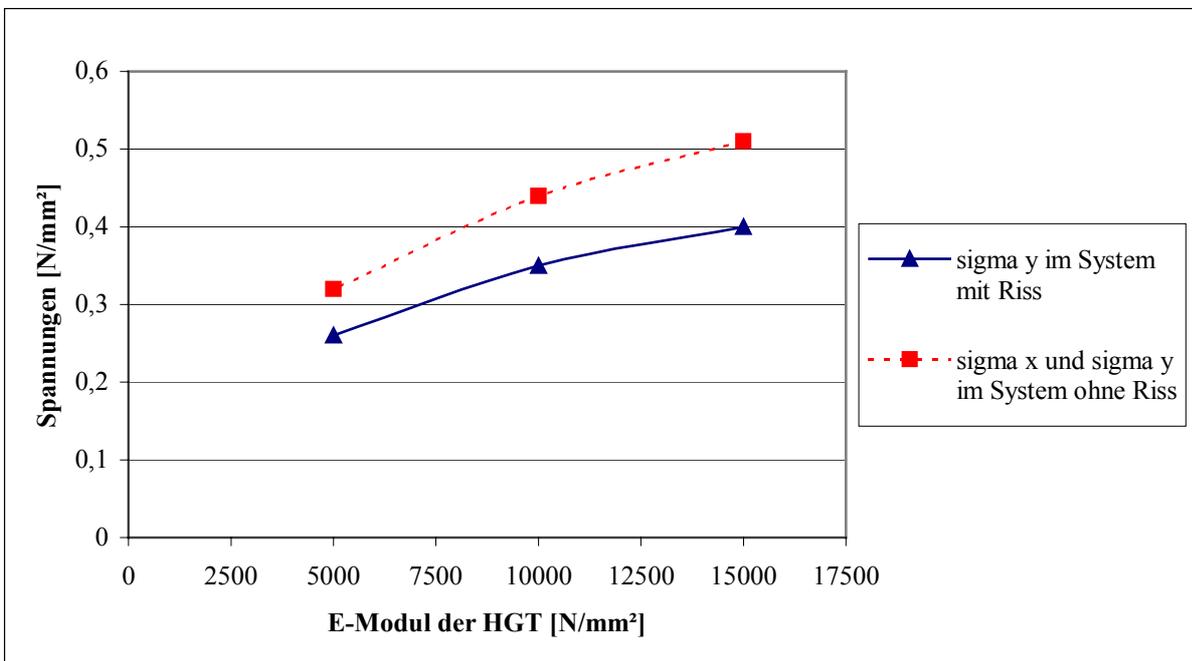
**ZEIT - BIEGEZUGFESTIGKEIT**

Ergebnisse der Fa. Shell, Amsterdam (3-Punkt-Biegeapparat, Sandasphalt)

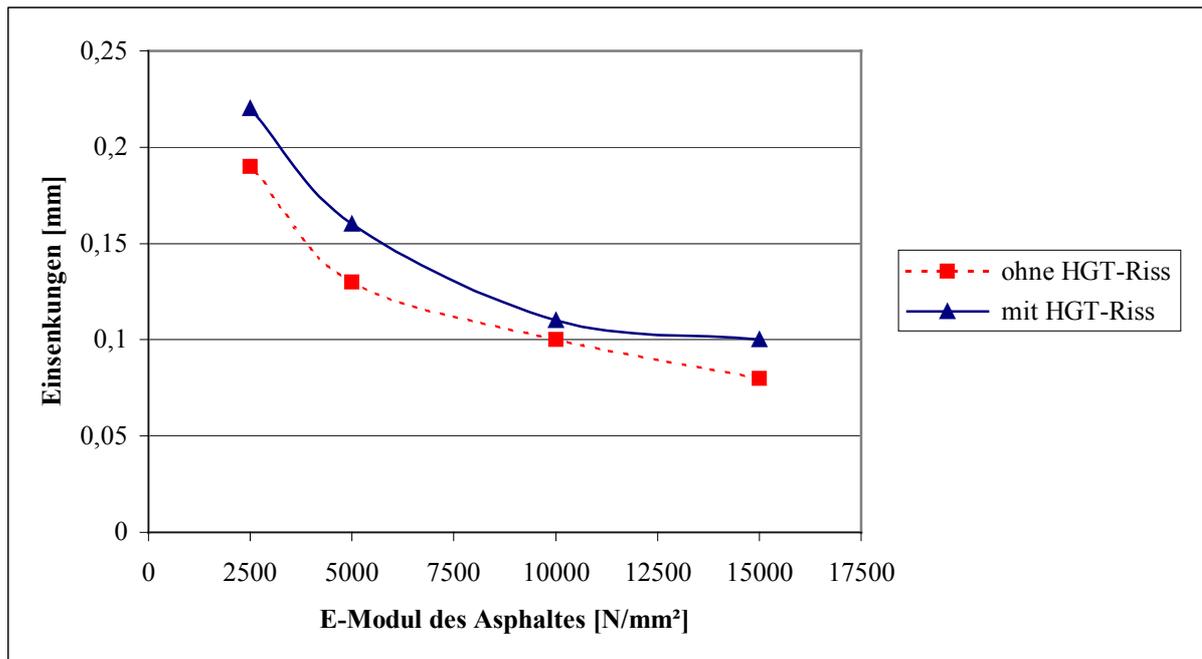
\*) Bei Verwendung von Bitumen 50/70 (B 65) ist die Temperatur um ca. 5°C zu erniedrigen.  
Bei Verwendung von Bitumen 160/220 (B 200) ist die Temperatur um ca. 5°C zu erhöhen.



**Biegespannungen an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter Verkehrsbelastung**



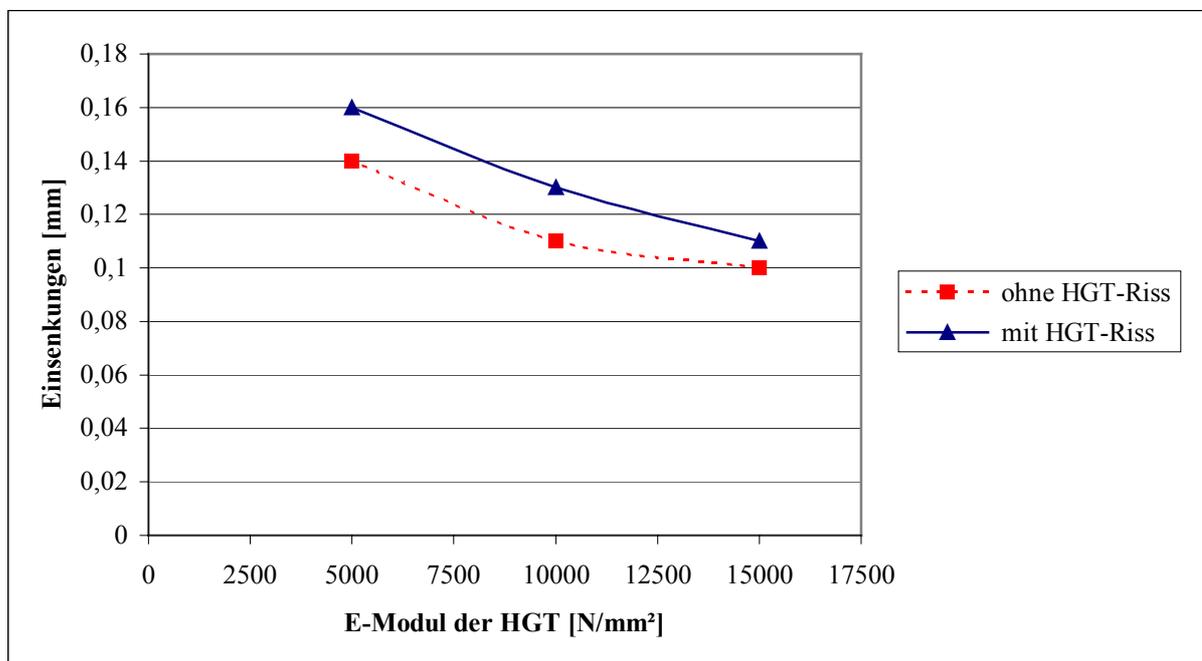
**Biegespannungen an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Verkehrsbelastung**



### Einsenkungen an OK Fahrbahn zwischen Plattenmitte und -rand

am System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT

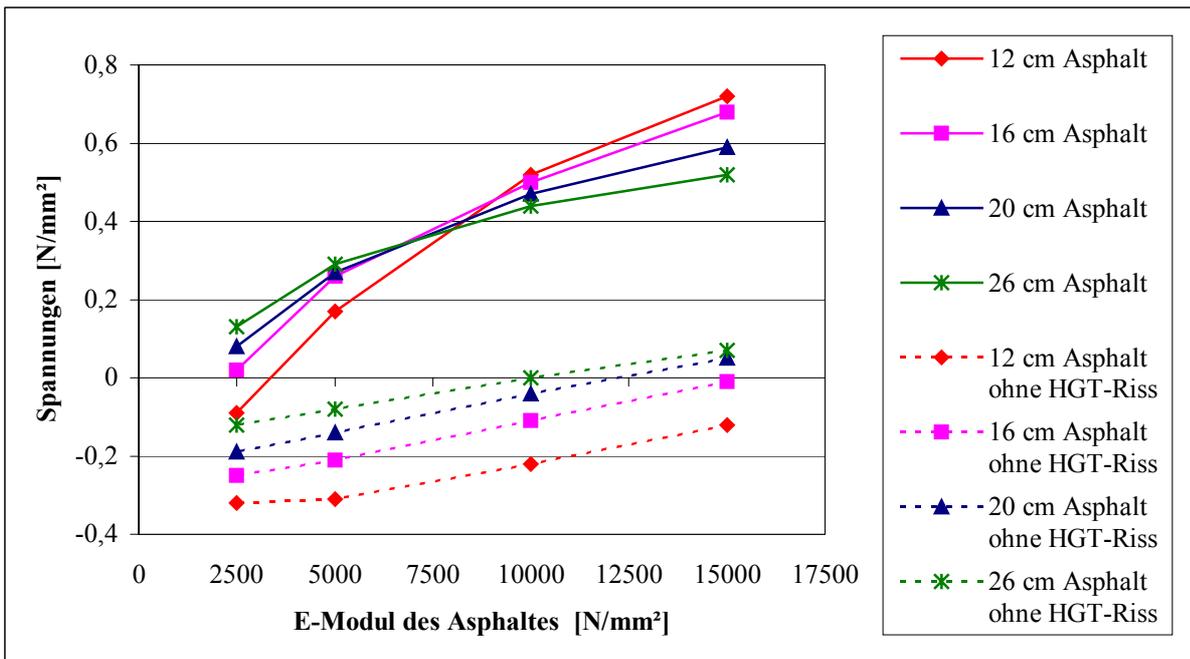
in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter **Verkehrsbelastung**



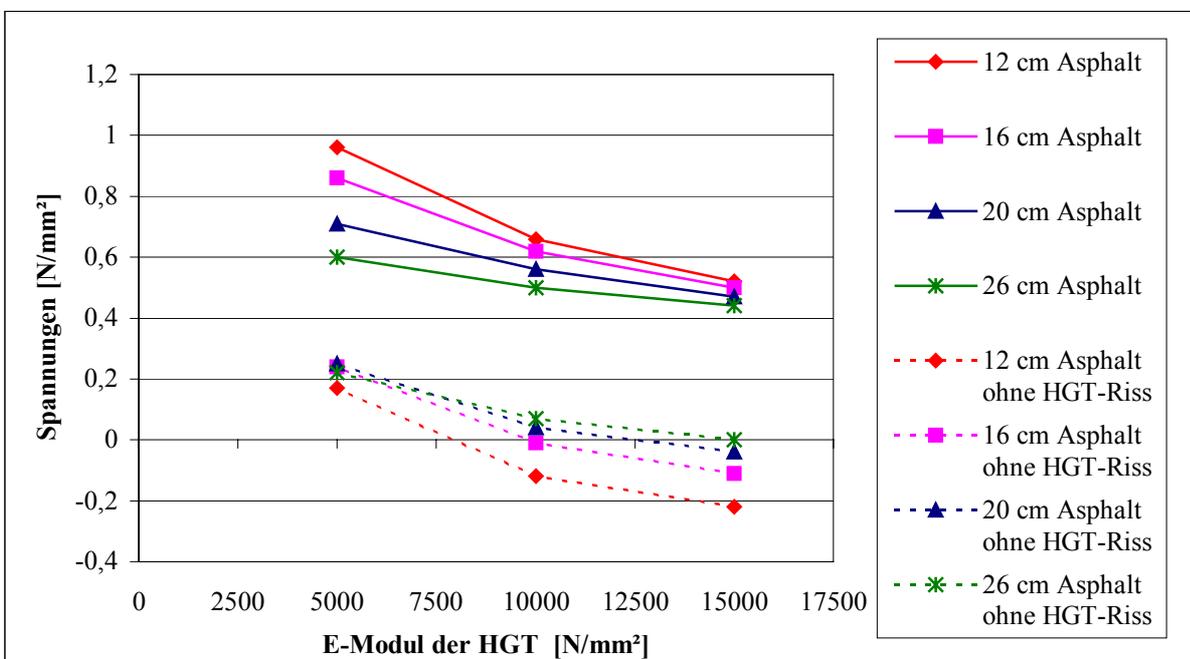
### Einsenkungen an OK Fahrbahn zwischen Plattenmitte und -rand

am System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT

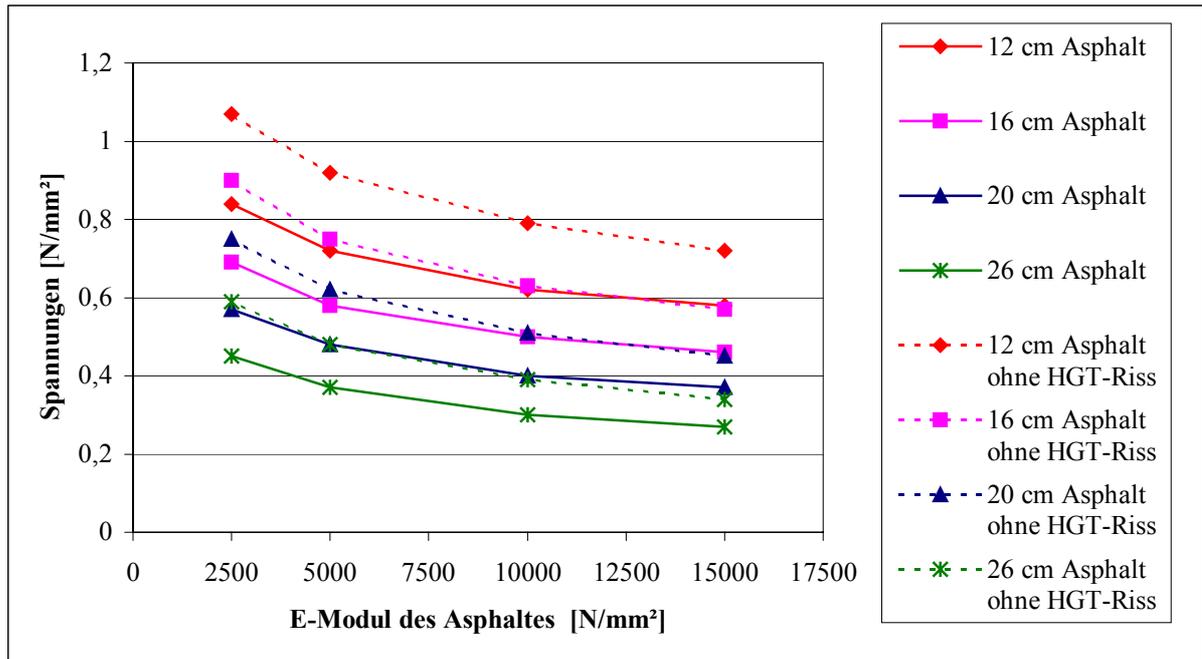
in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter **Verkehrsbelastung**



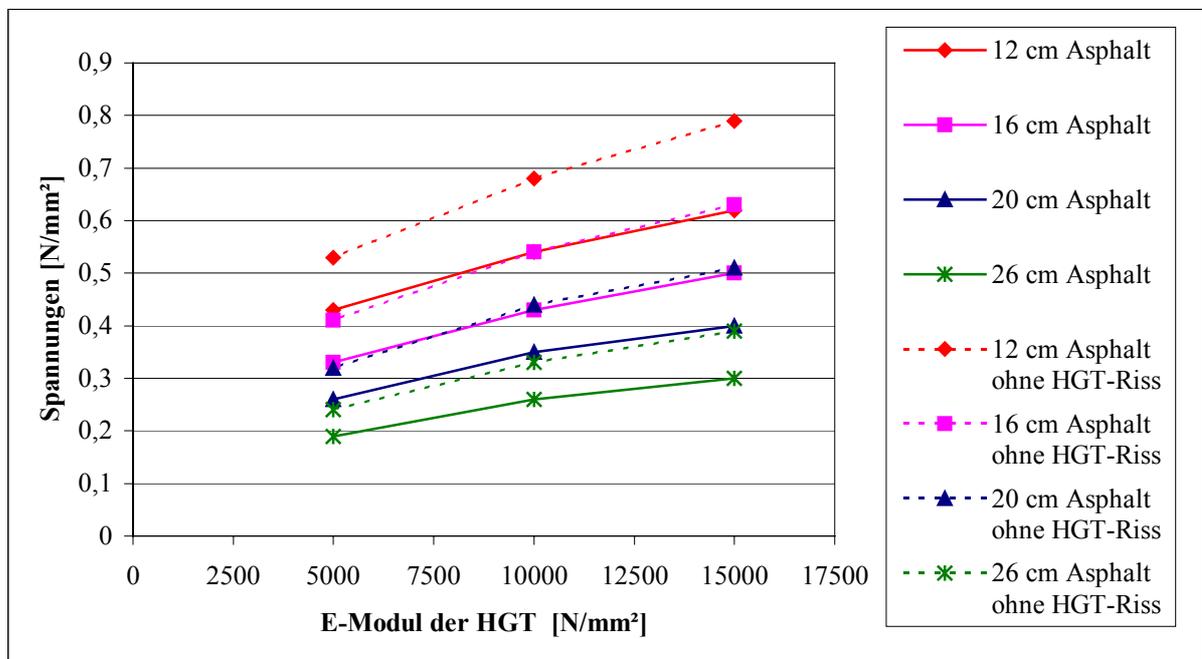
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalttes unter Verkehrsbelastung**



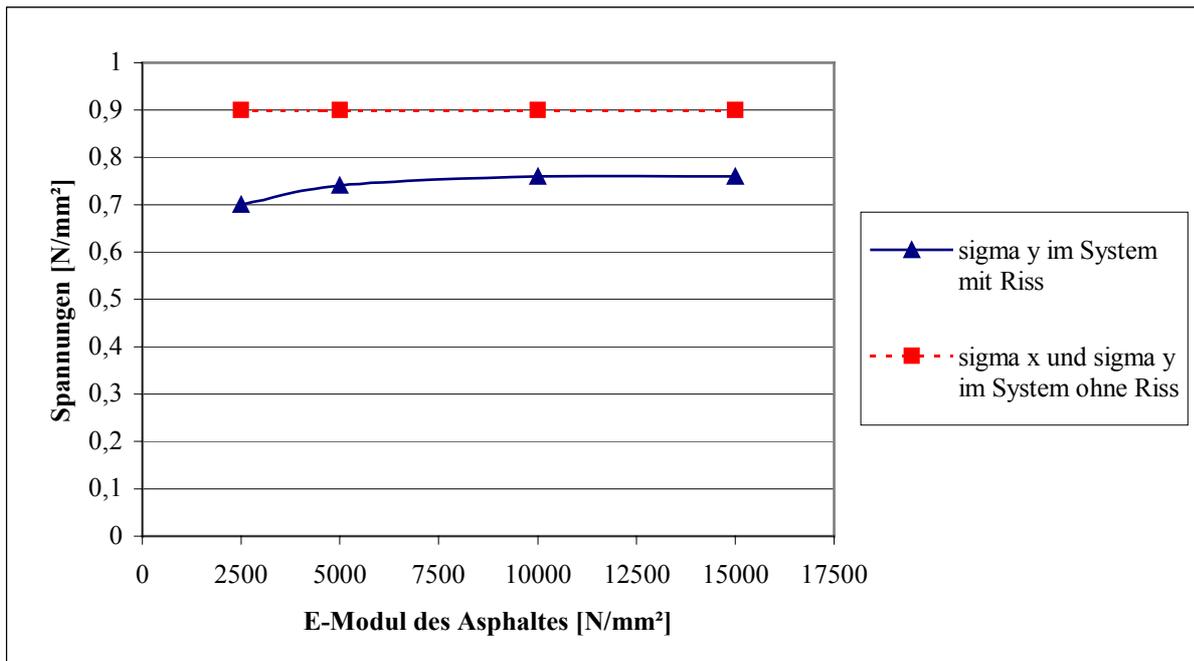
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Verkehrsbelastung**



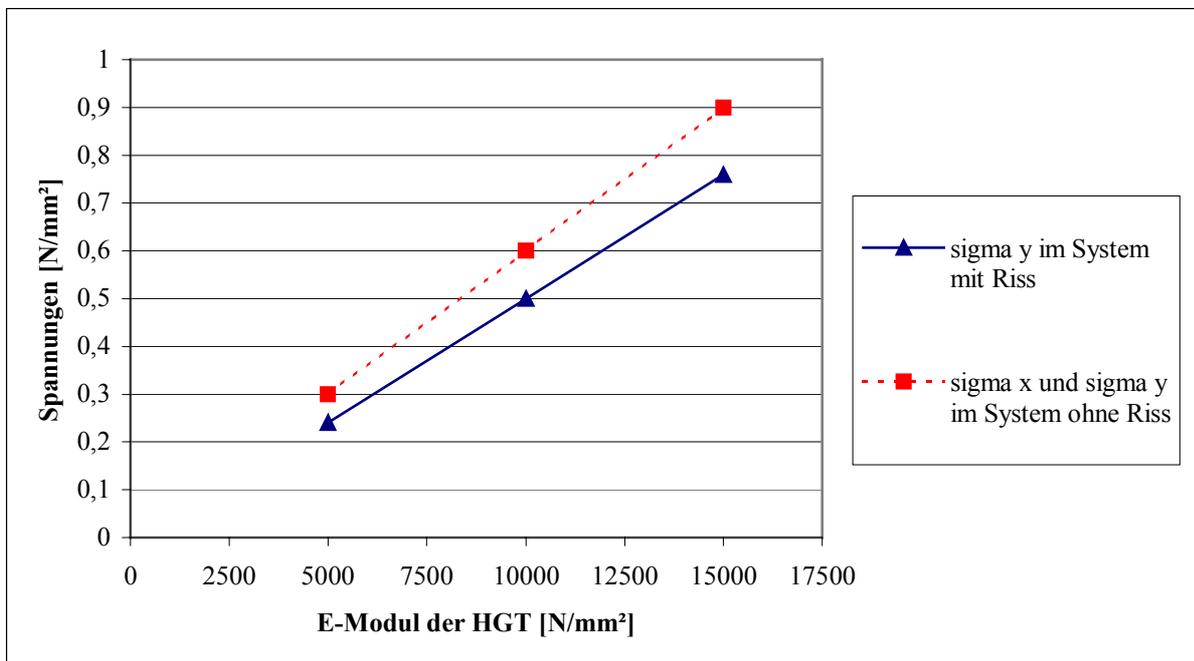
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt unter Verkehrsbelastung**



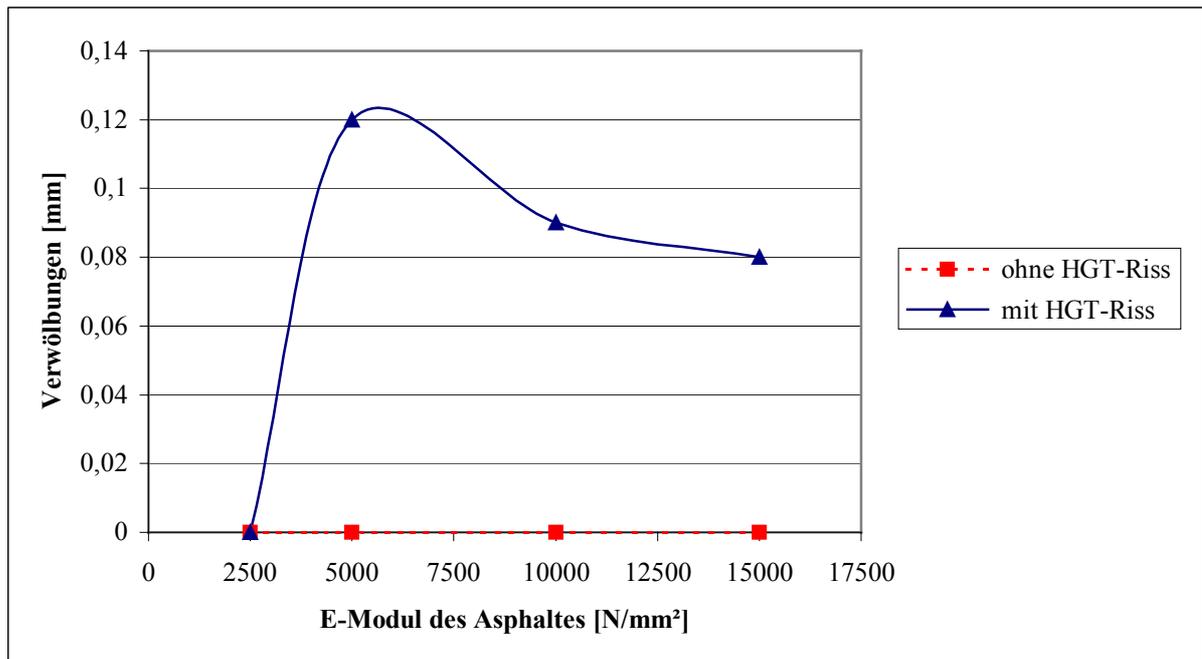
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Verkehrsbelastung**



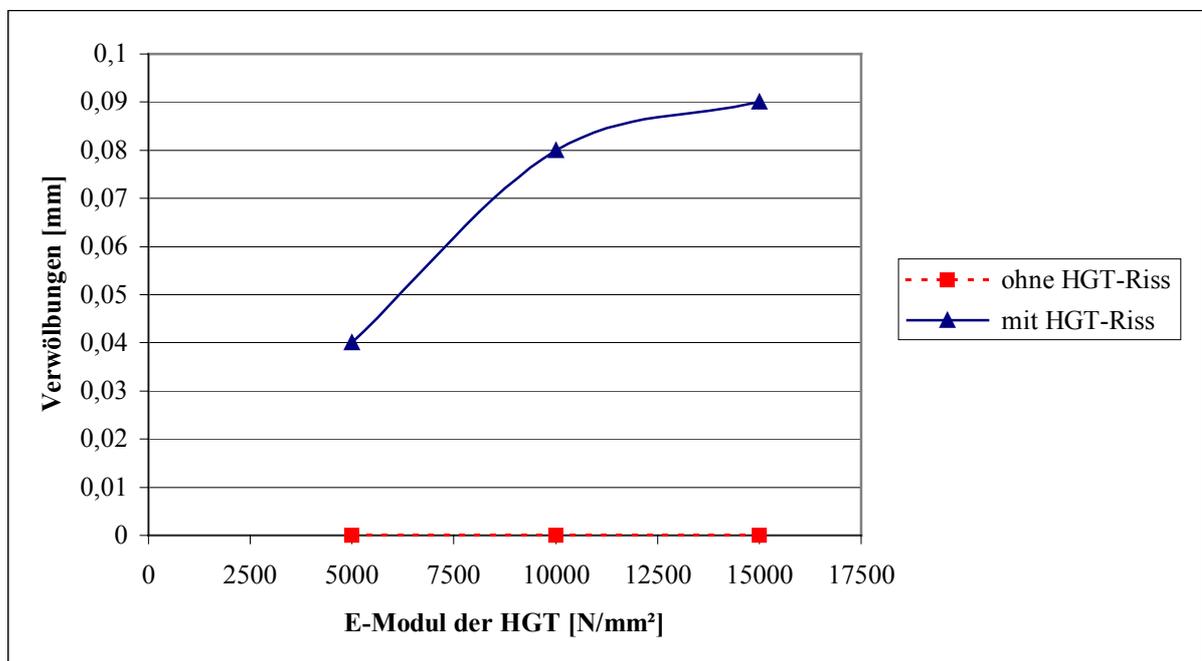
**Spannungen an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter Temperaturbelastung**



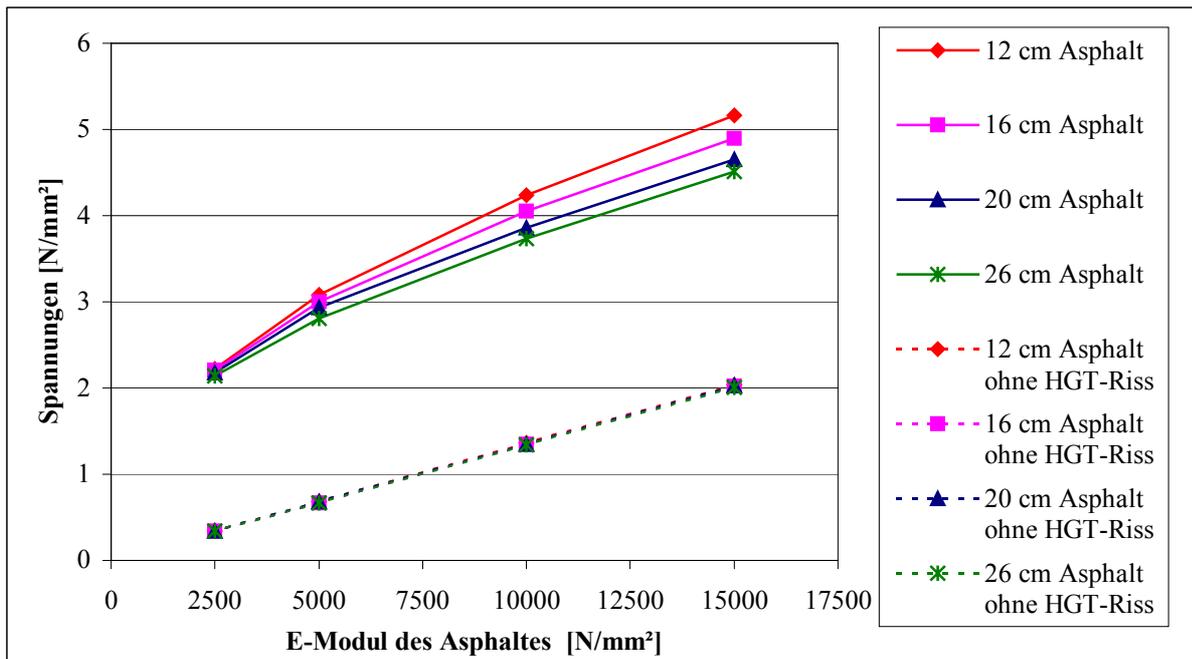
**Spannungen an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Temperaturbelastung**



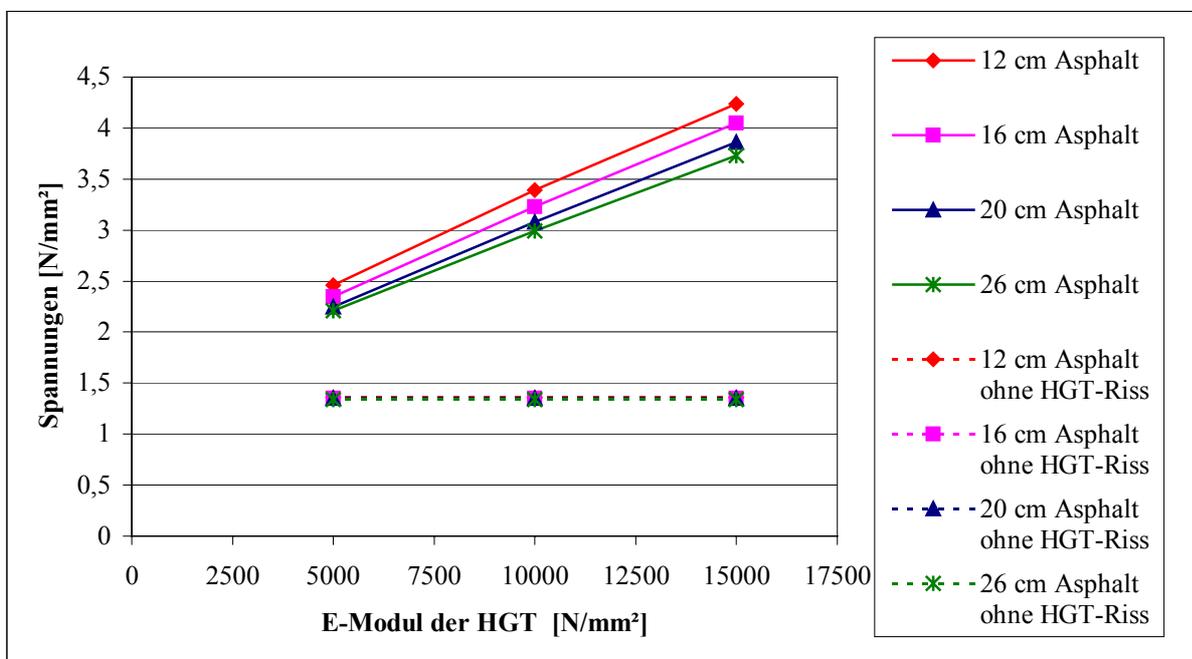
**Einsenkungen an OK Fahrbahn zwischen Plattenmitte und -rand**  
am System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT  
in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter **Temperaturbelastung**



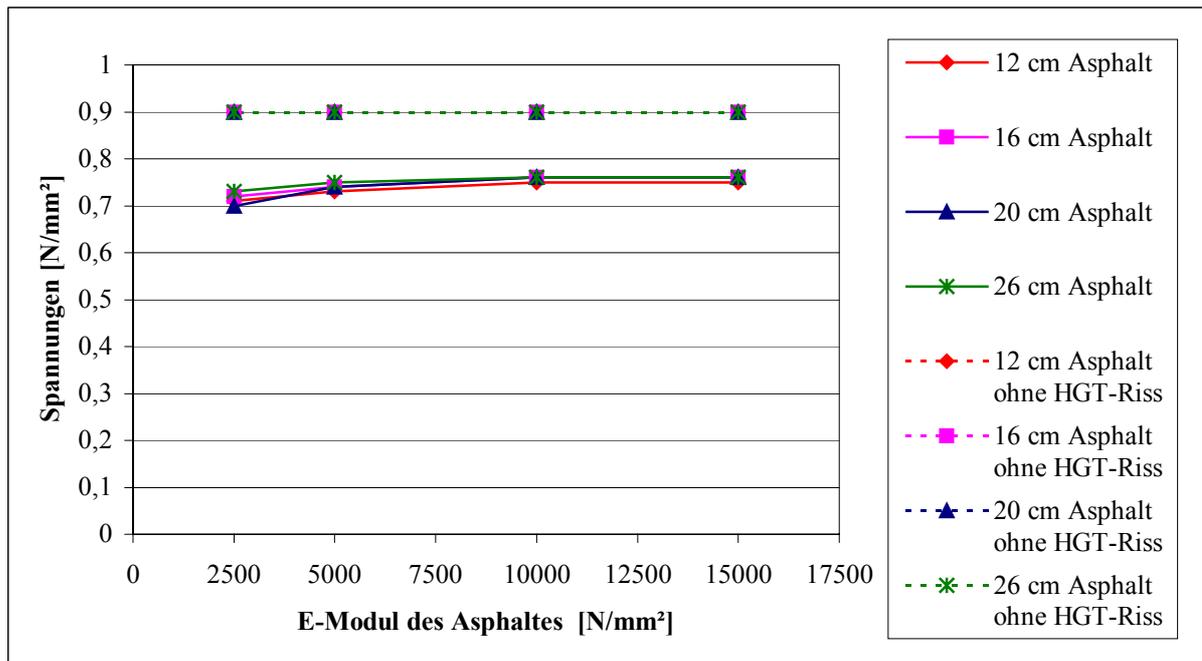
**Einsenkungen an OK Fahrbahn zwischen Plattenmitte und -rand**  
am System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT  
in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter **Temperaturbelastung**



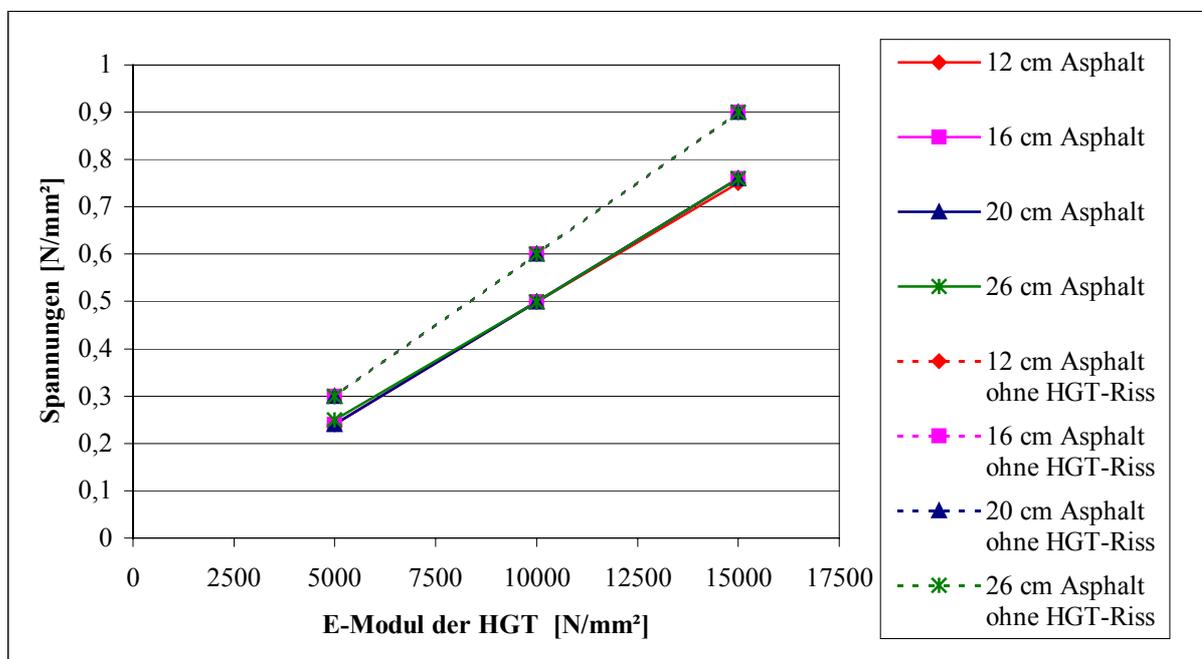
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalttes unter Temperaturbelastung**



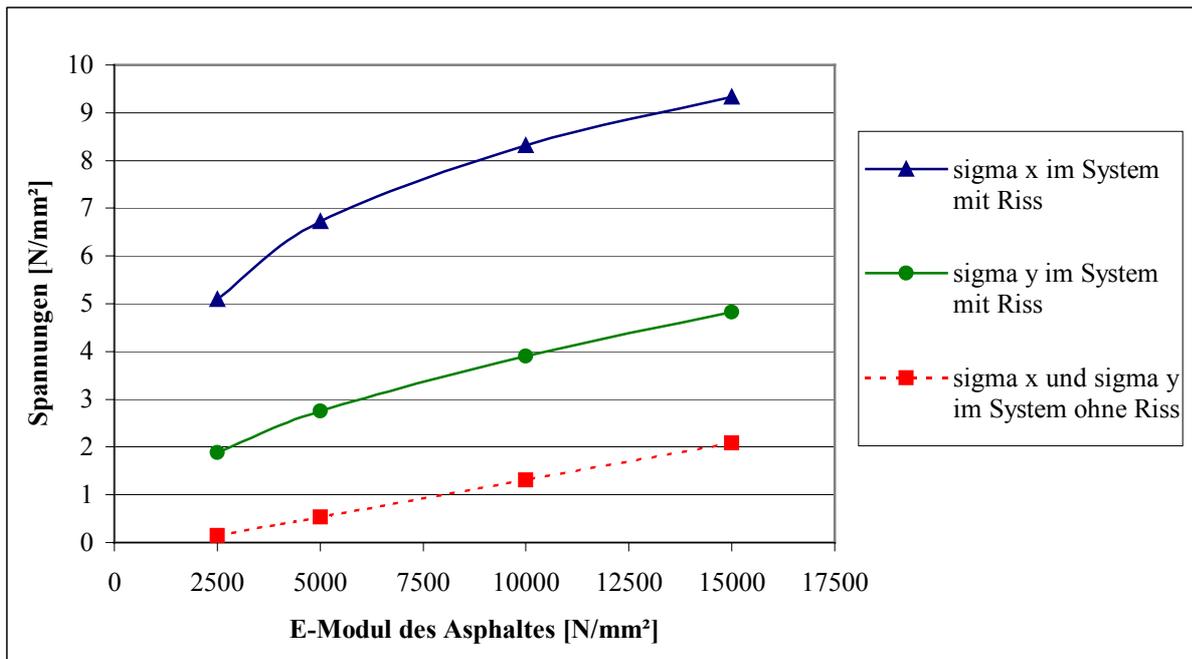
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Temperaturbelastung**



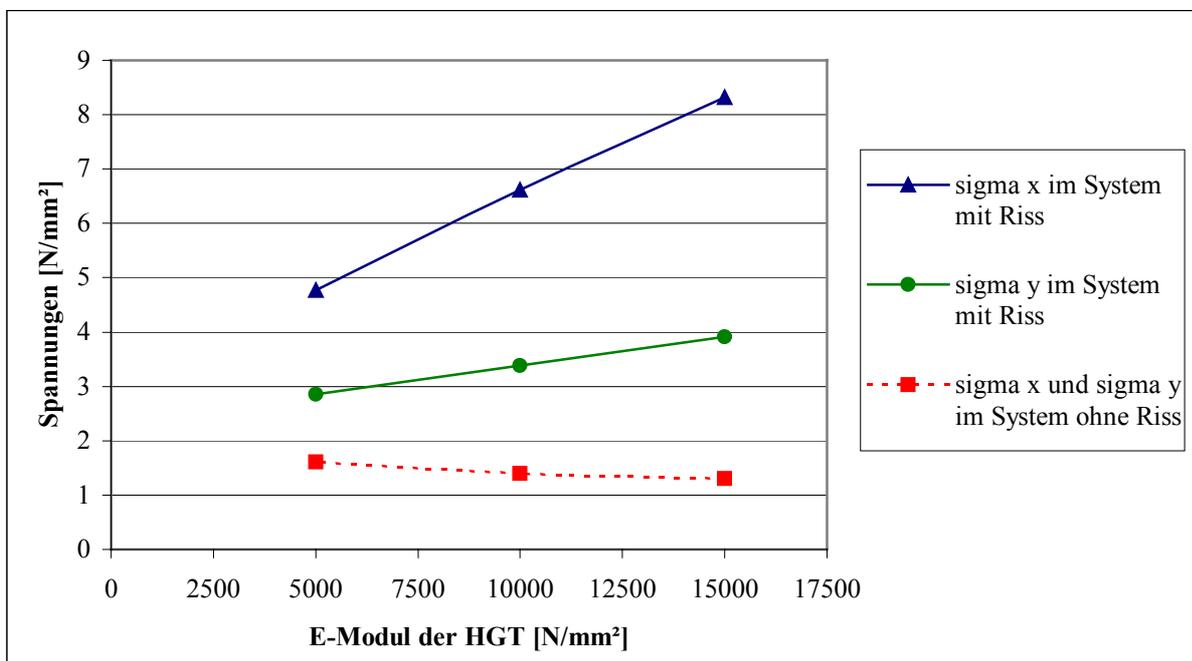
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt unter Temperaturbelastung**



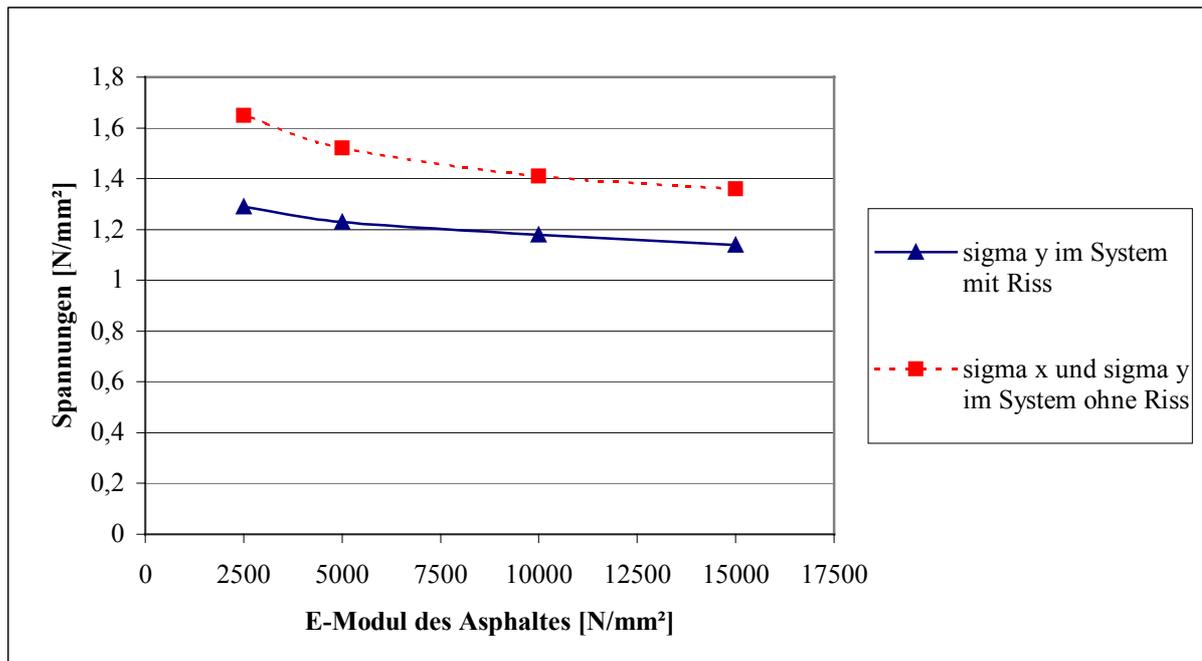
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT für Asphaltstärken von 12 cm bis 26 cm ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter Temperaturbelastung**



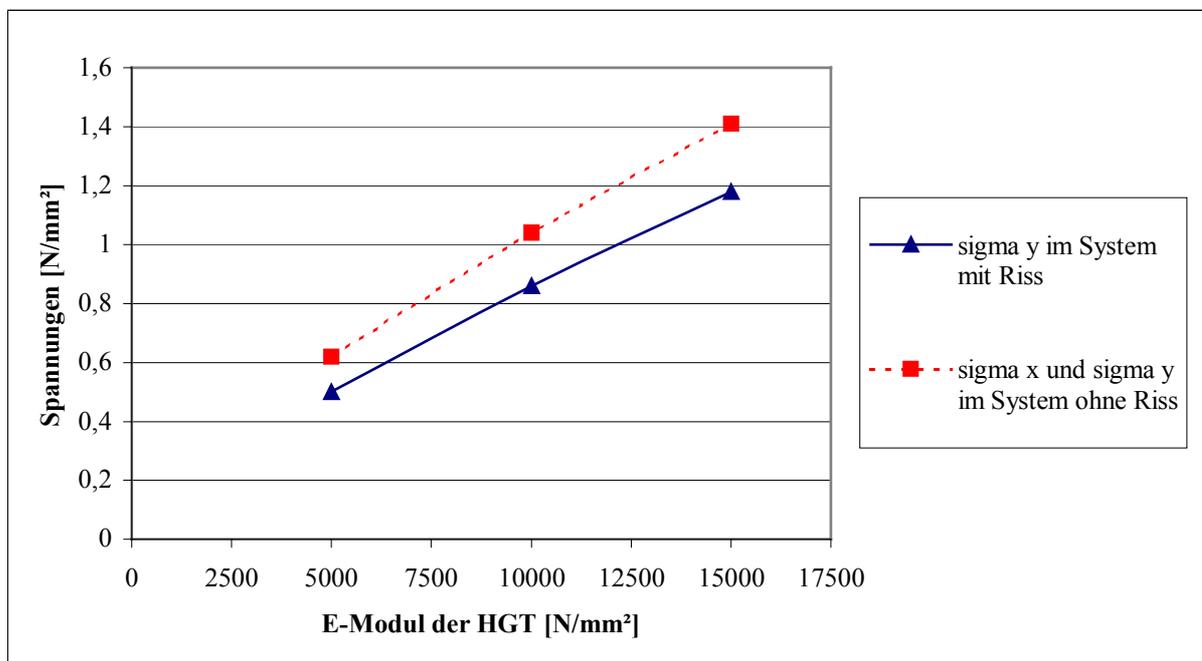
**Spannungen an der Unterseite des Asphaltes am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter gleichzeitiger Verkehrs- und Temperaturbelastung**



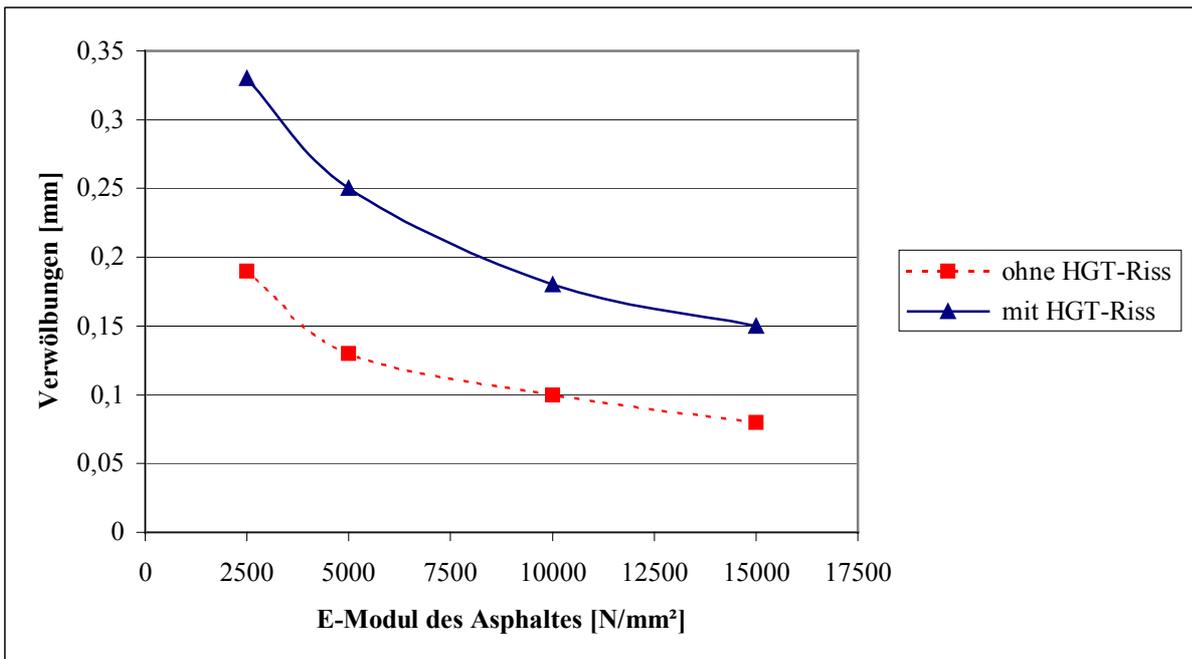
**Spannungen an der Unterseite des Asphaltes am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter gleichzeitiger Verkehrs- und Temperaturbelastung**



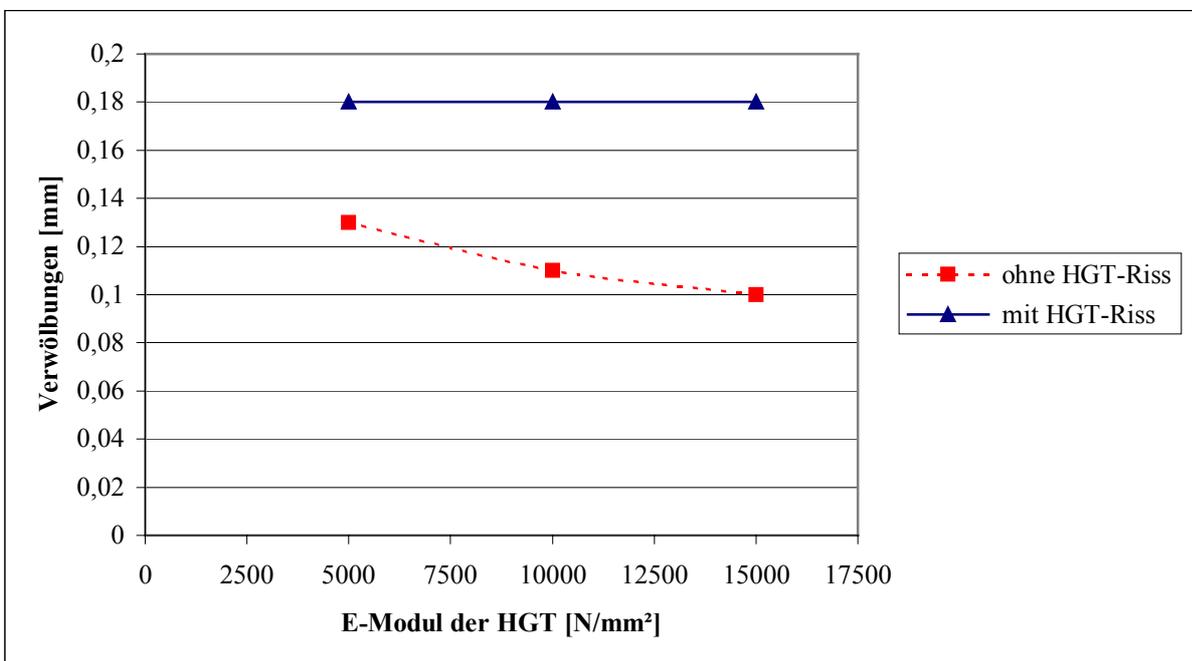
**Spannungen an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphalt unter gleichzeitiger Verkehrs- und Temperaturbelastung**



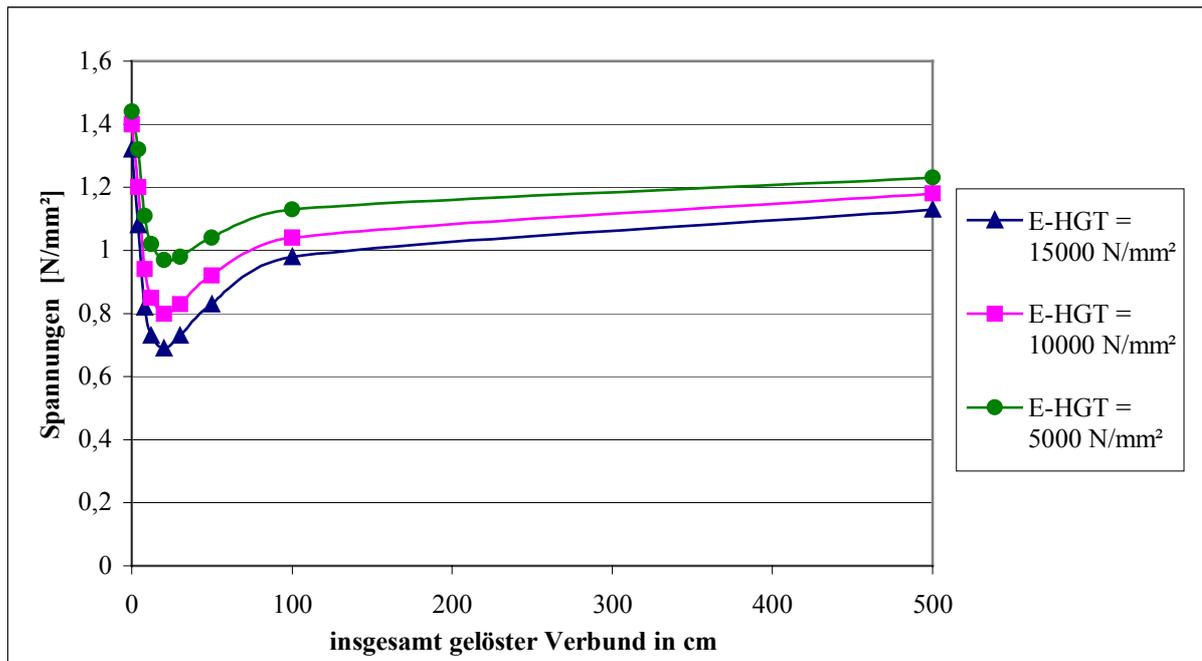
**Spannungen an der Unterseite der HGT am System 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter gleichzeitiger Verkehrs- und Temperaturbelastung**



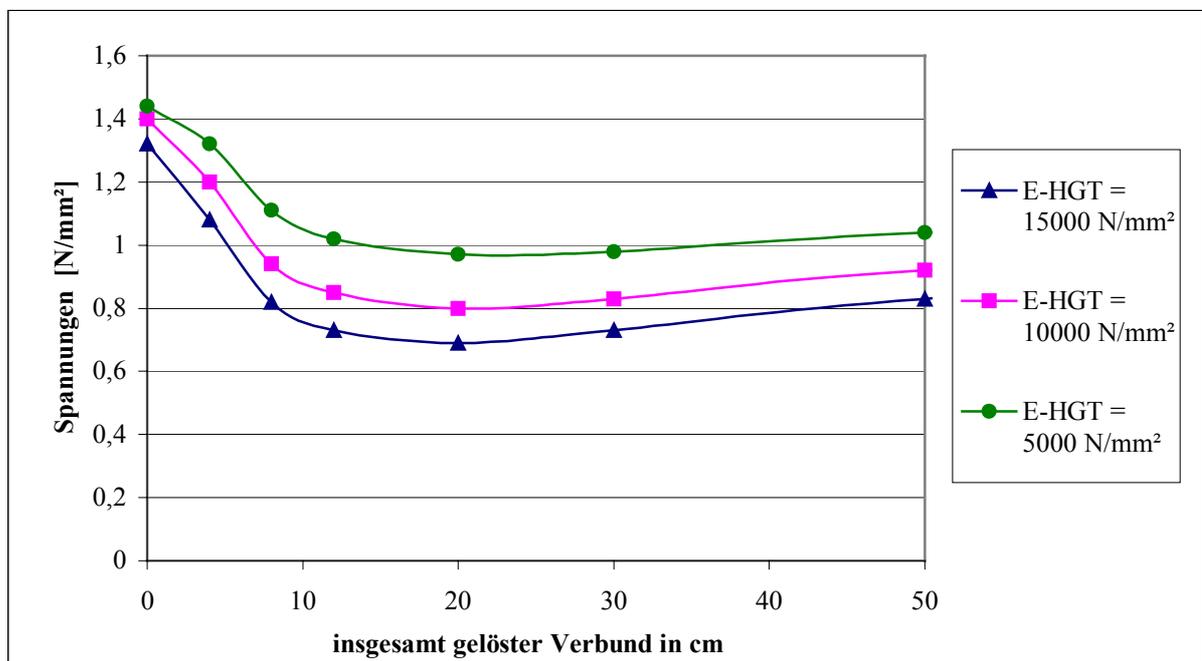
**Einsenkungen an OK Fahrbahn zwischen Plattenmitte und -rand (Verwölbungen)**  
 am System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT  
 in Abhängigkeit vom E-Modul des Asphaltes unter **Verkehrs- und Temperaturbelastung**



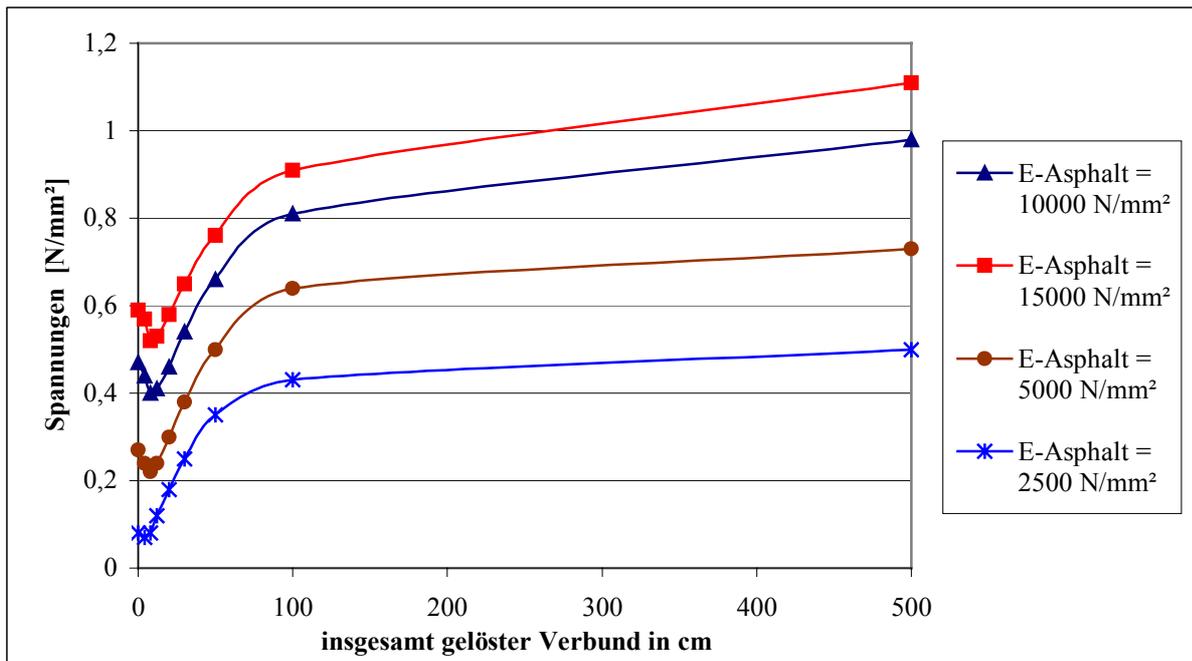
**Einsenkungen an OK Fahrbahn zwischen Plattenmitte und -rand (Verwölbungen)**  
 am System **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT, ohne und mit Riss in der HGT  
 in Abhängigkeit vom E-Modul der HGT unter **Verkehrs- und Temperaturbelastung**



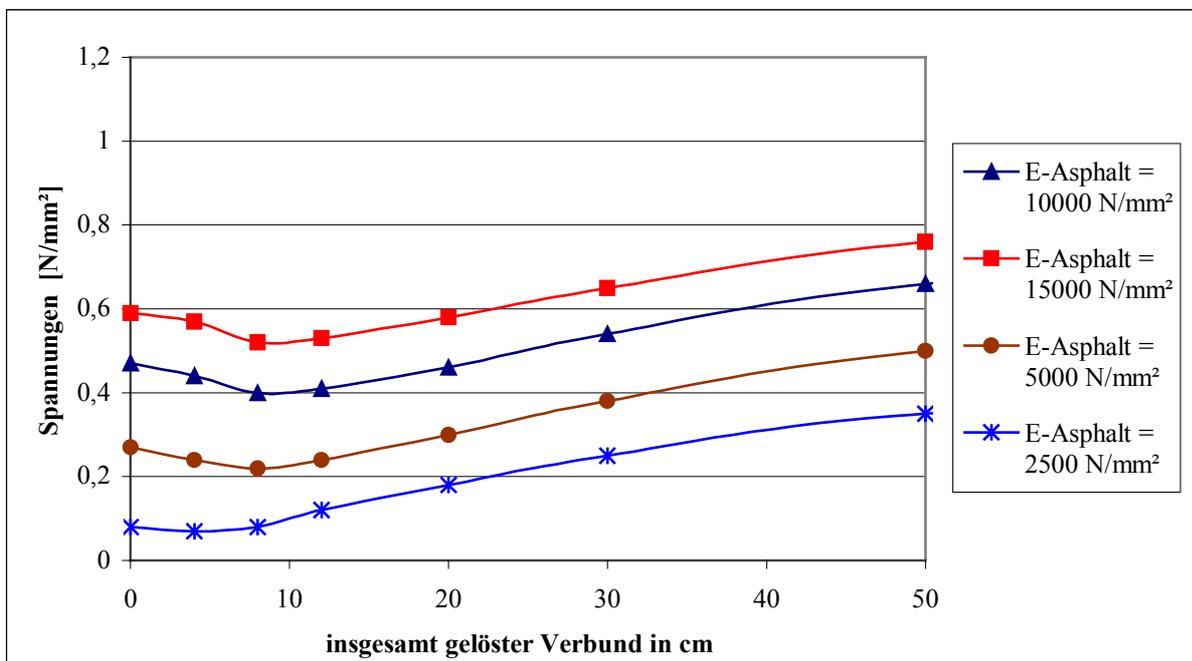
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



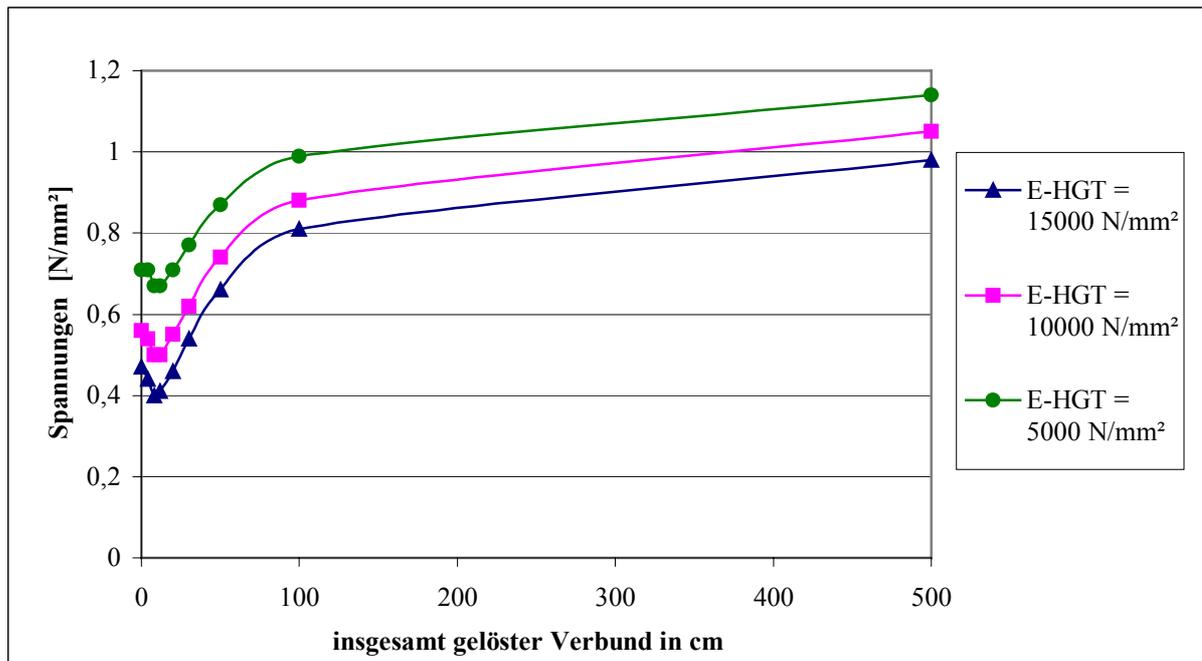
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



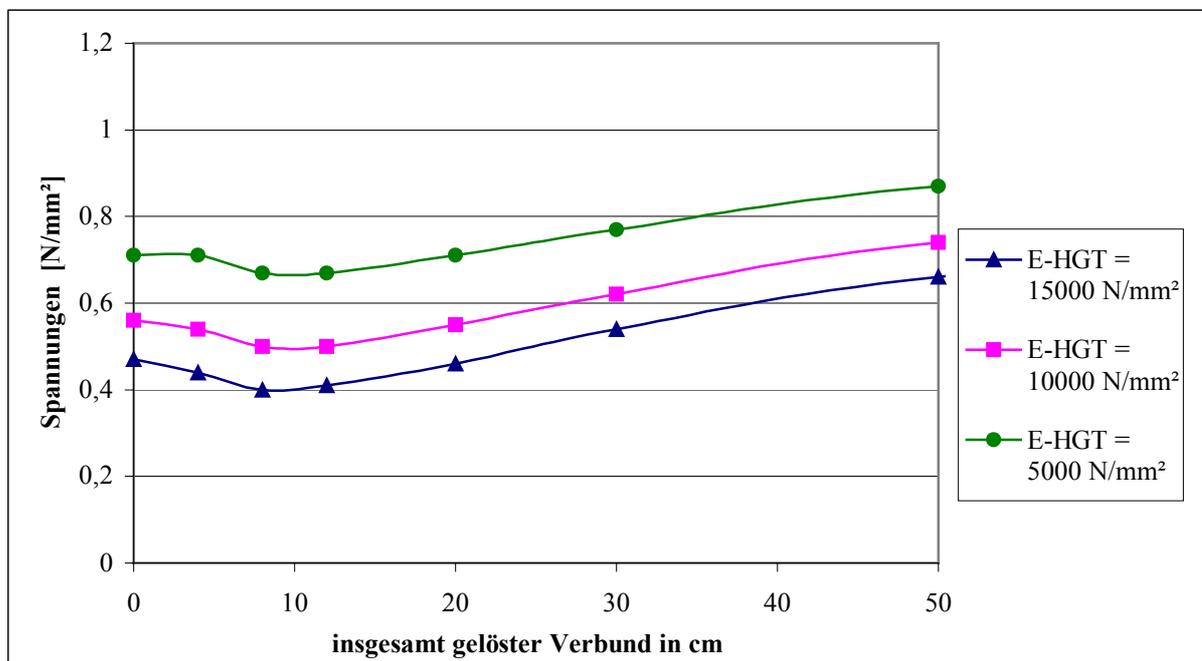
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,**  
 für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



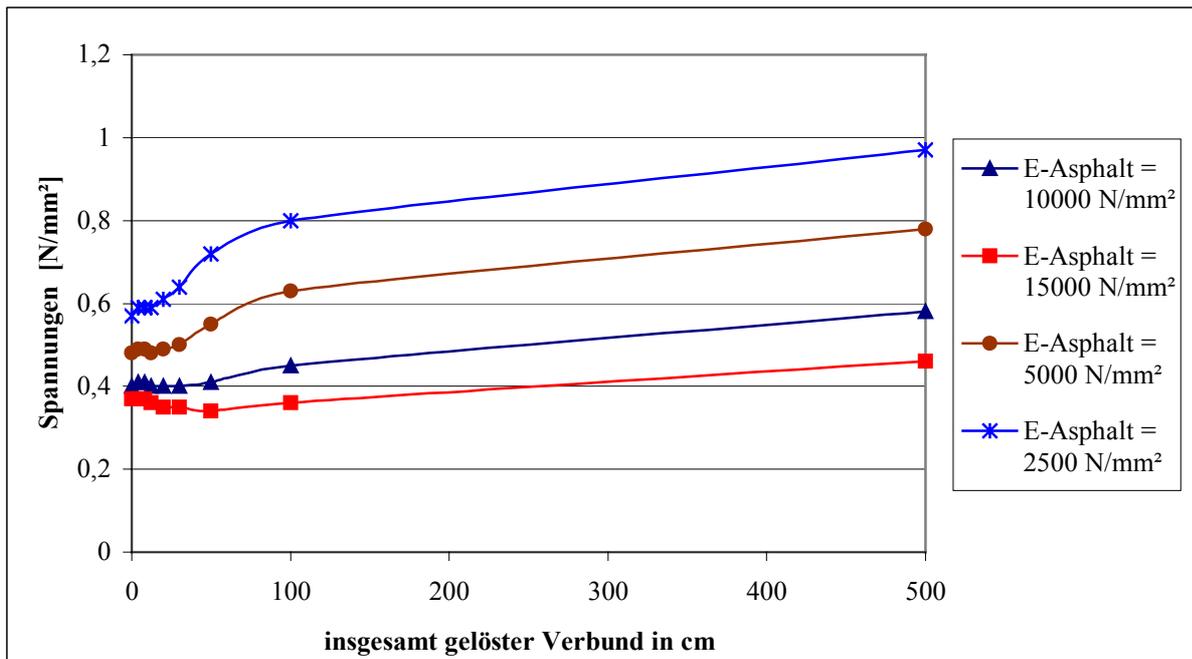
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,**  
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



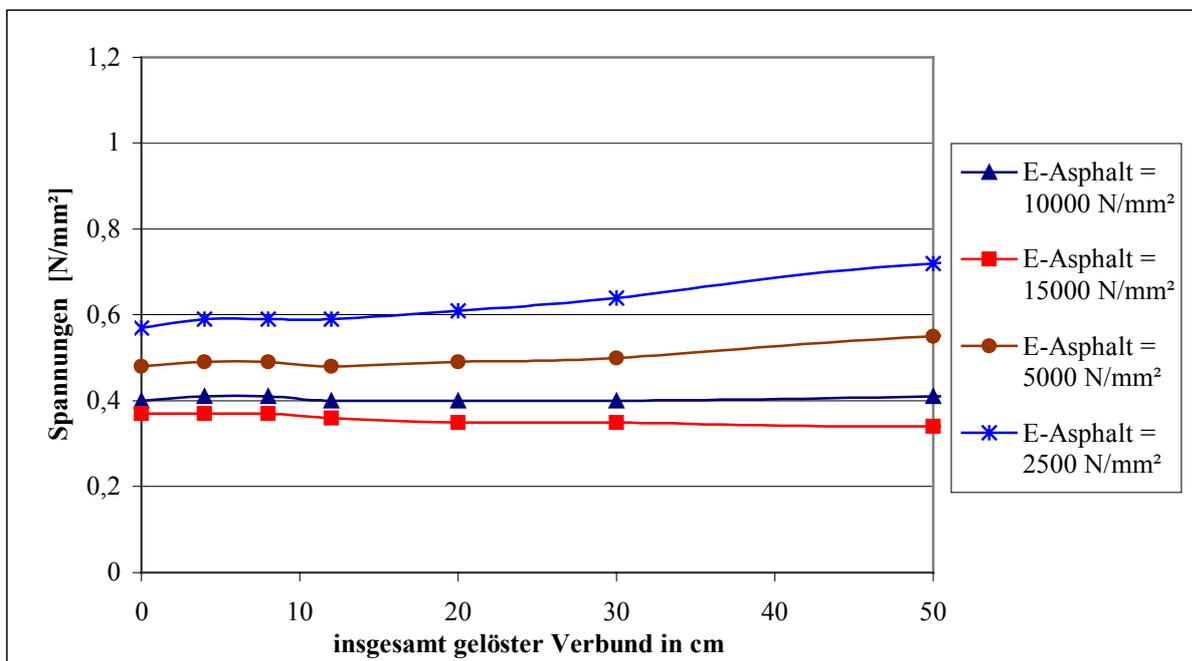
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

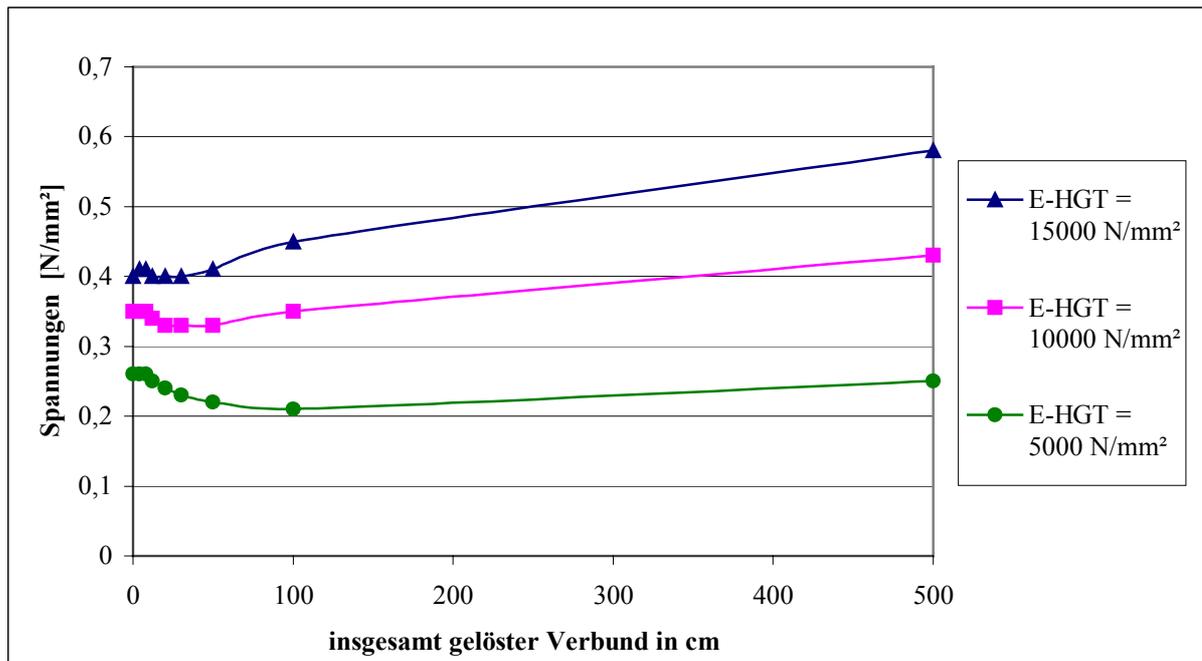
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt

in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung

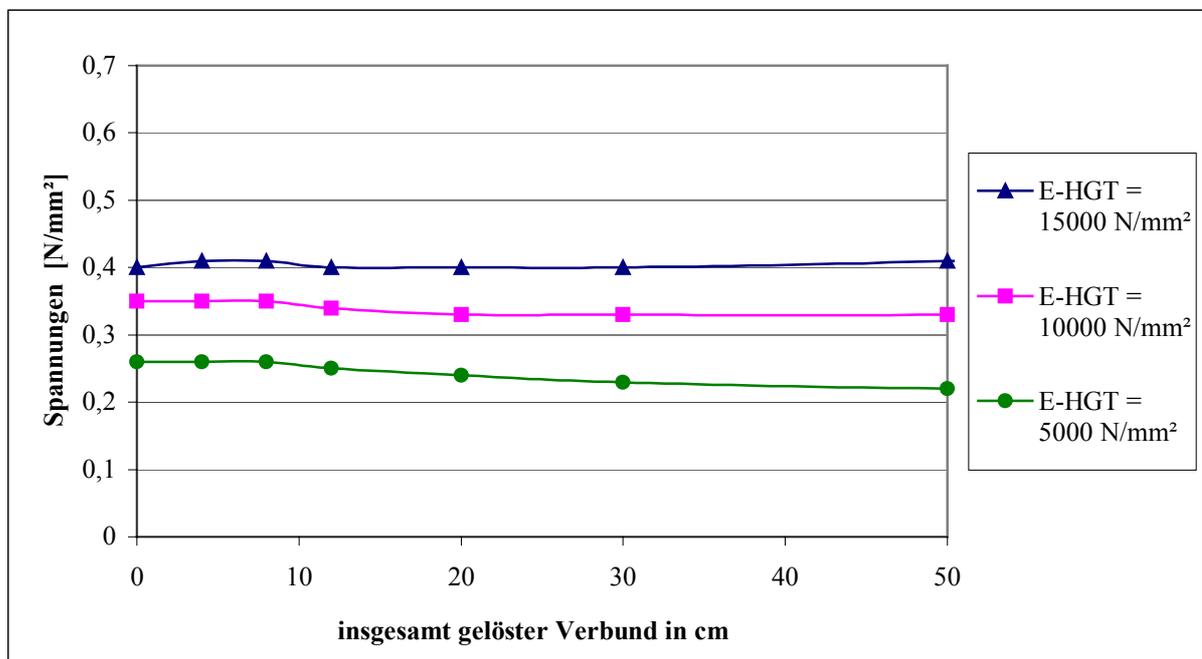


**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

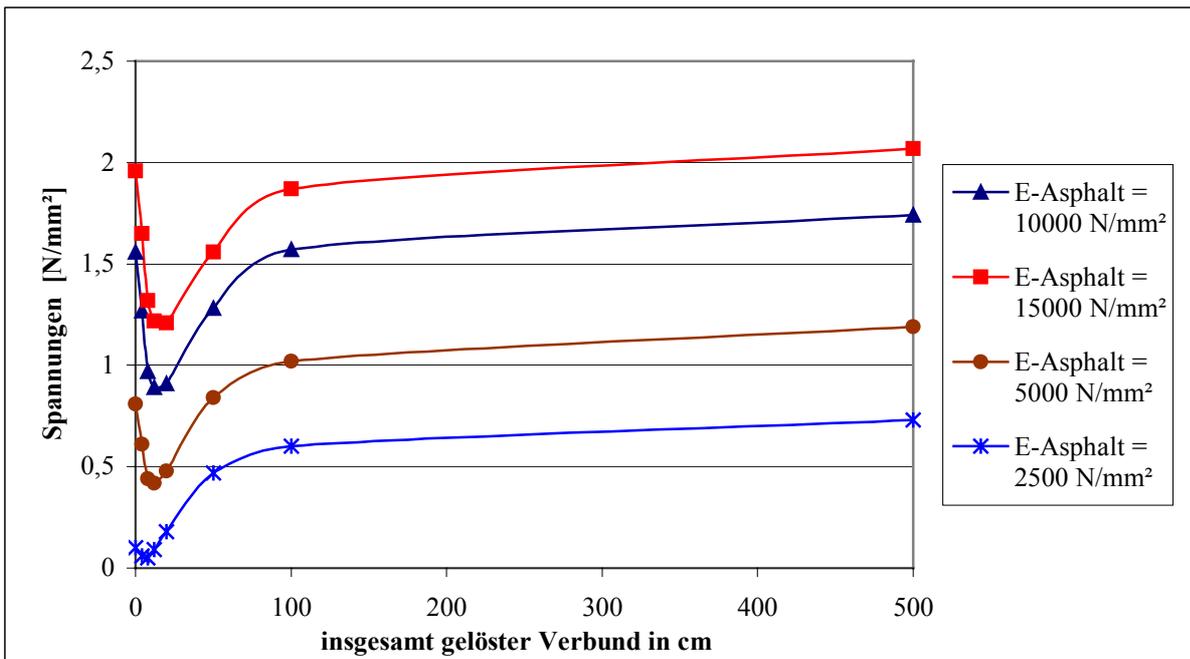
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



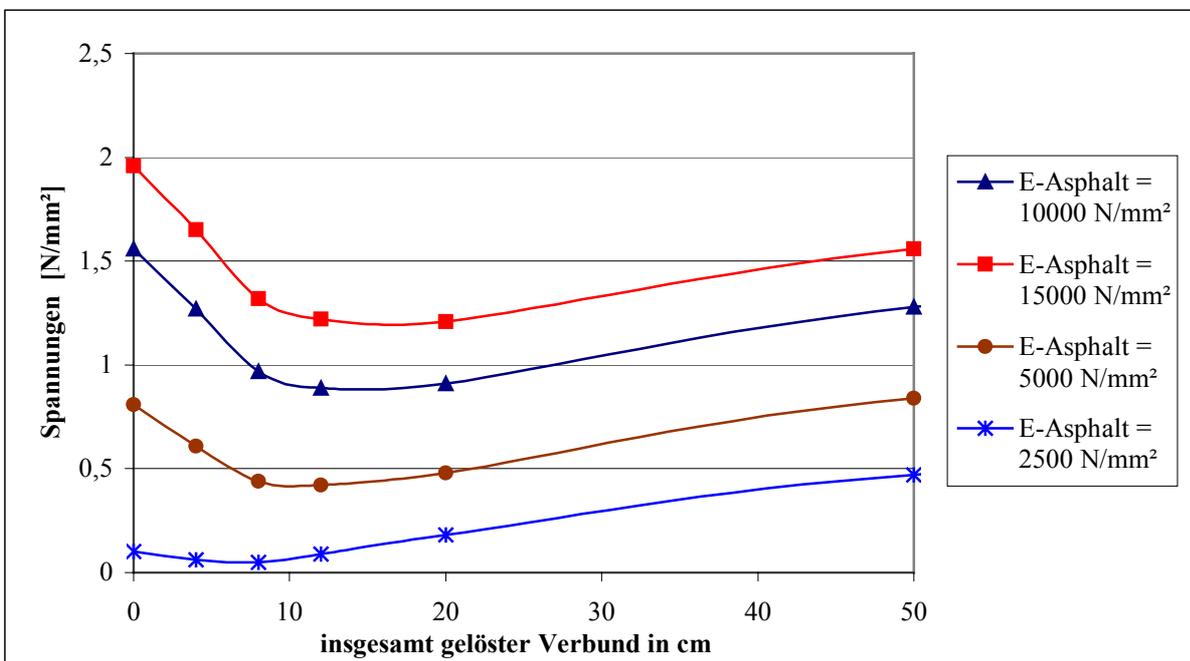
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**  
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



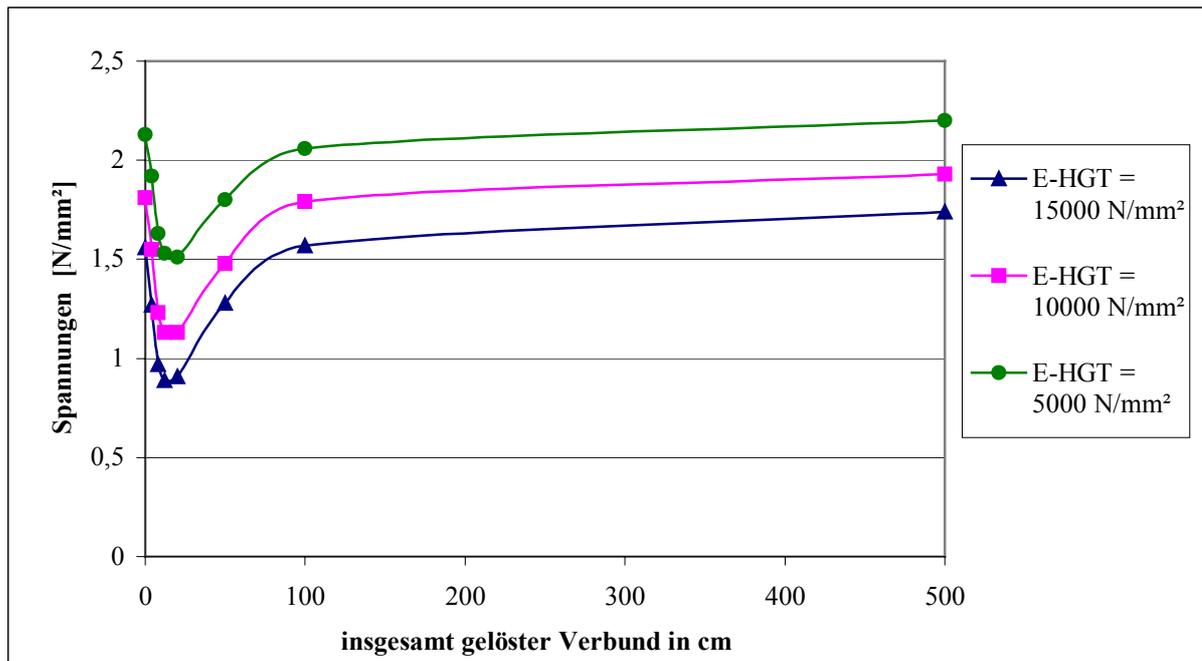
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



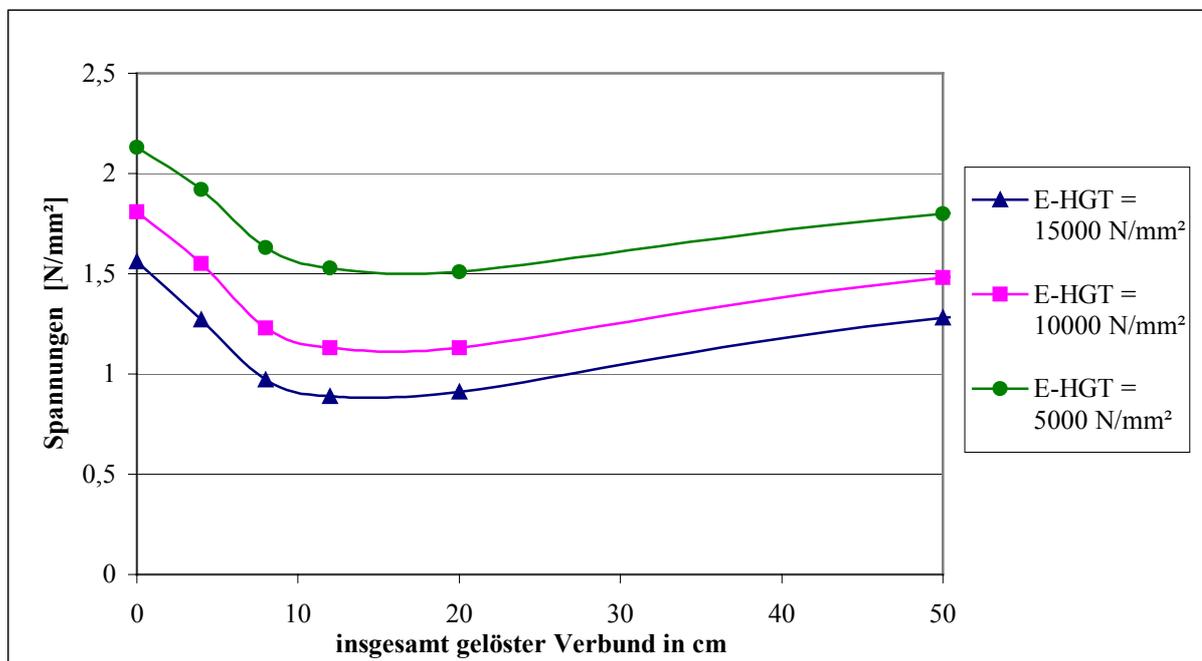
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung



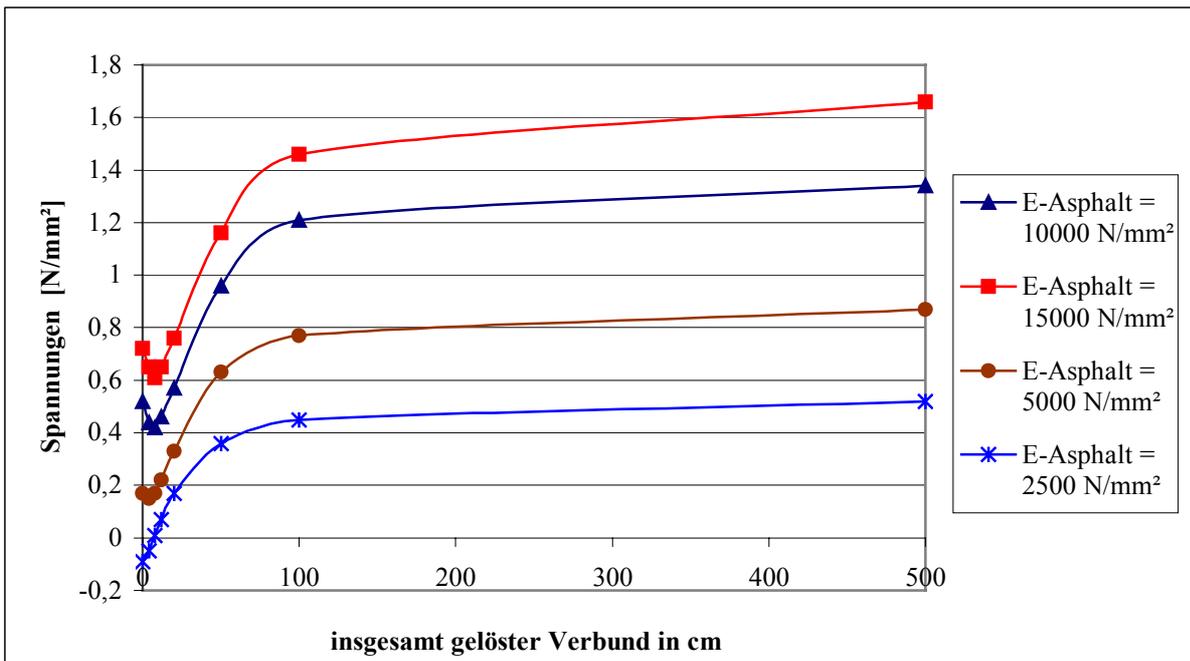
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



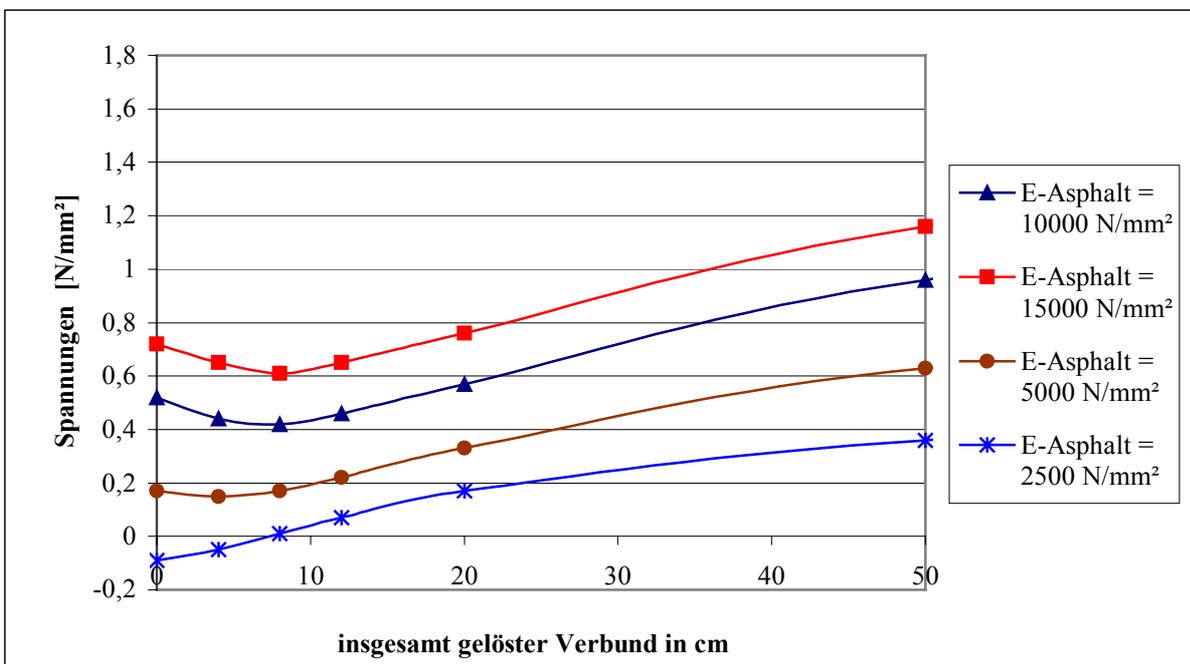
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



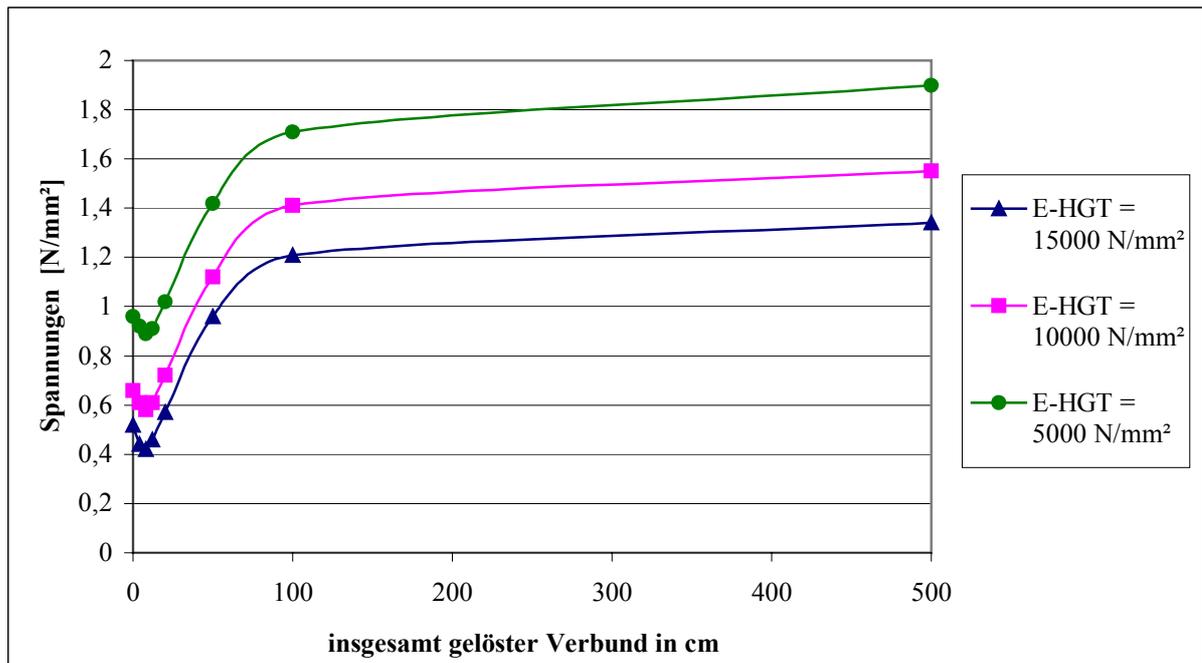
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



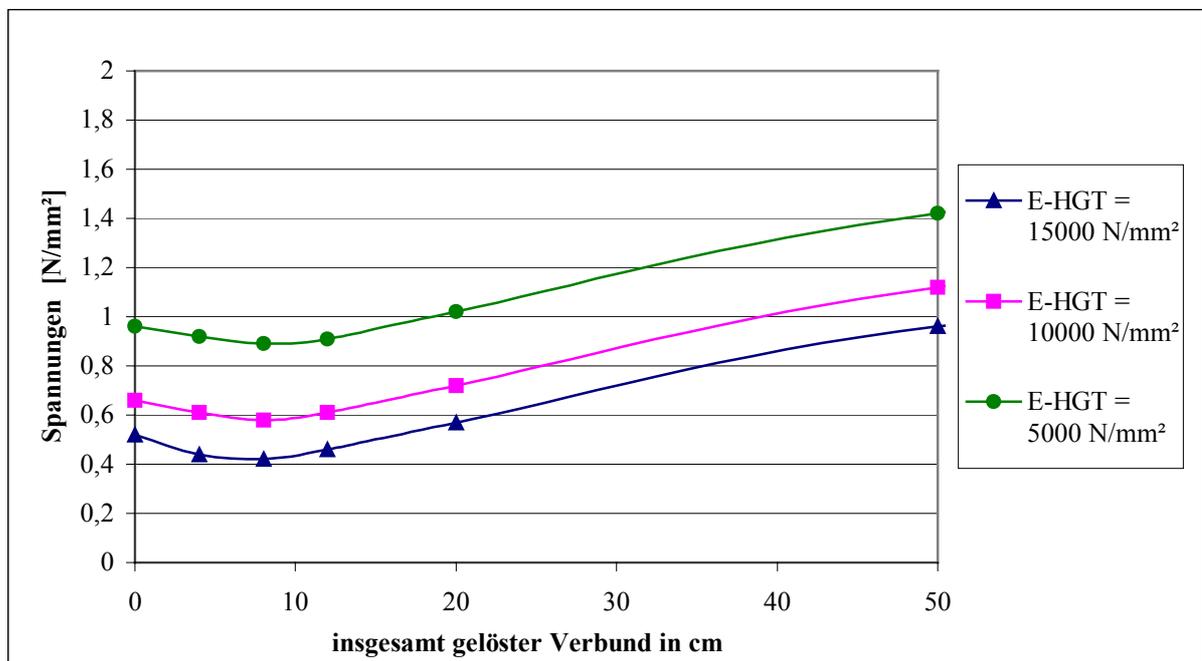
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung



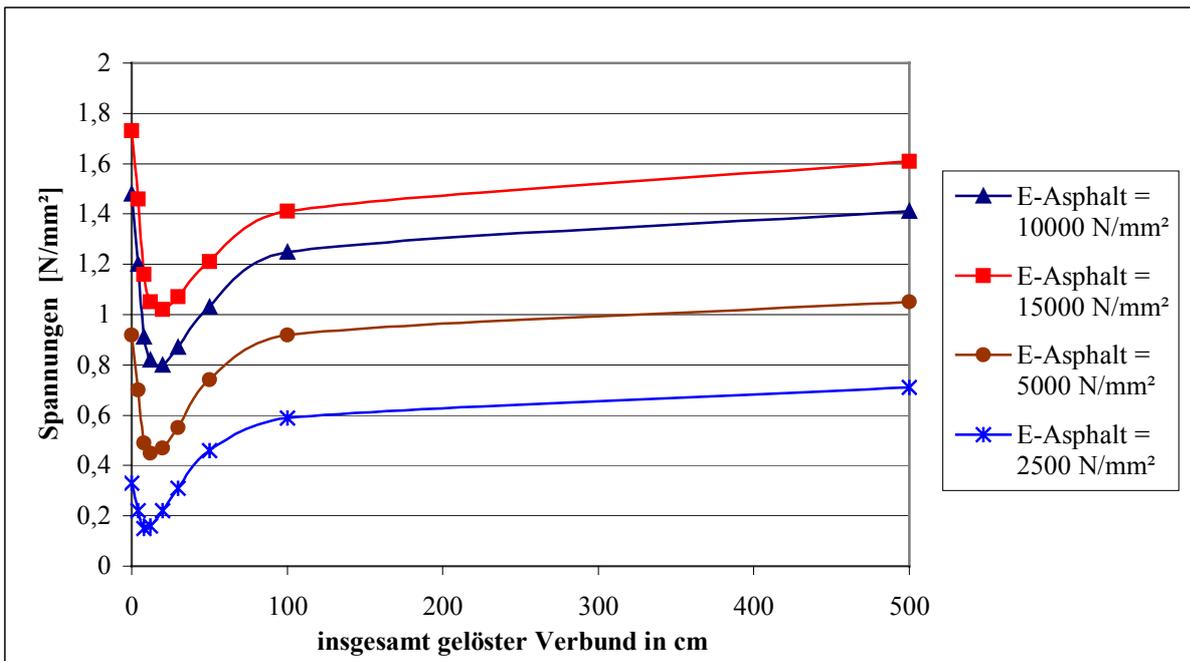
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



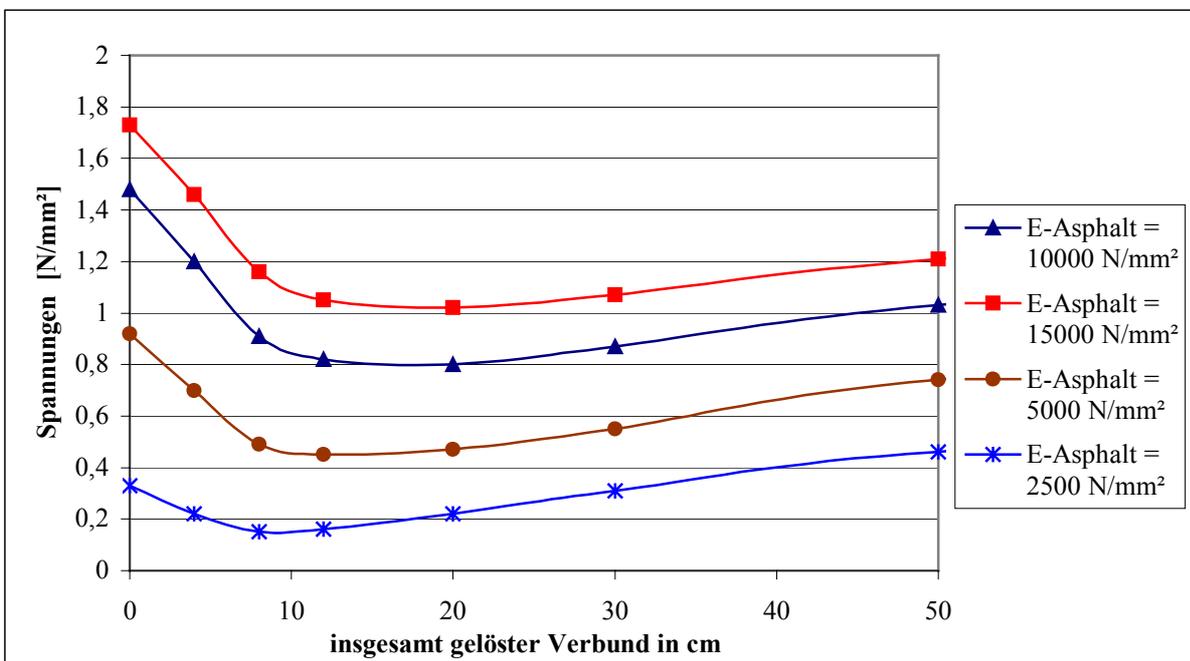
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



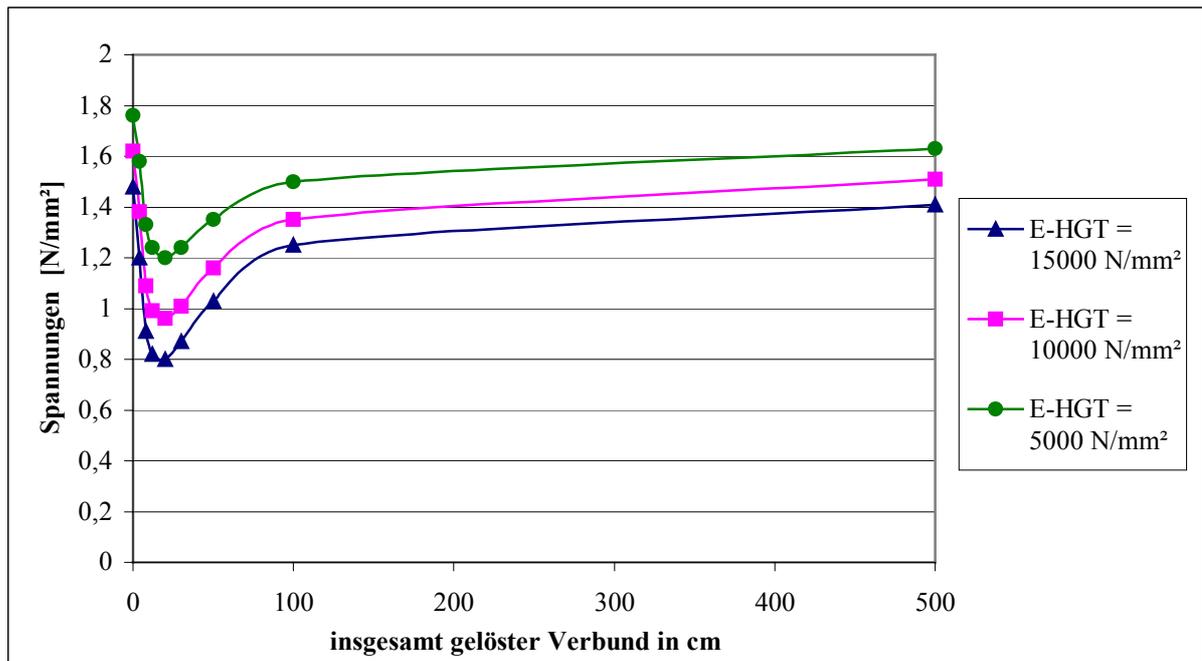
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



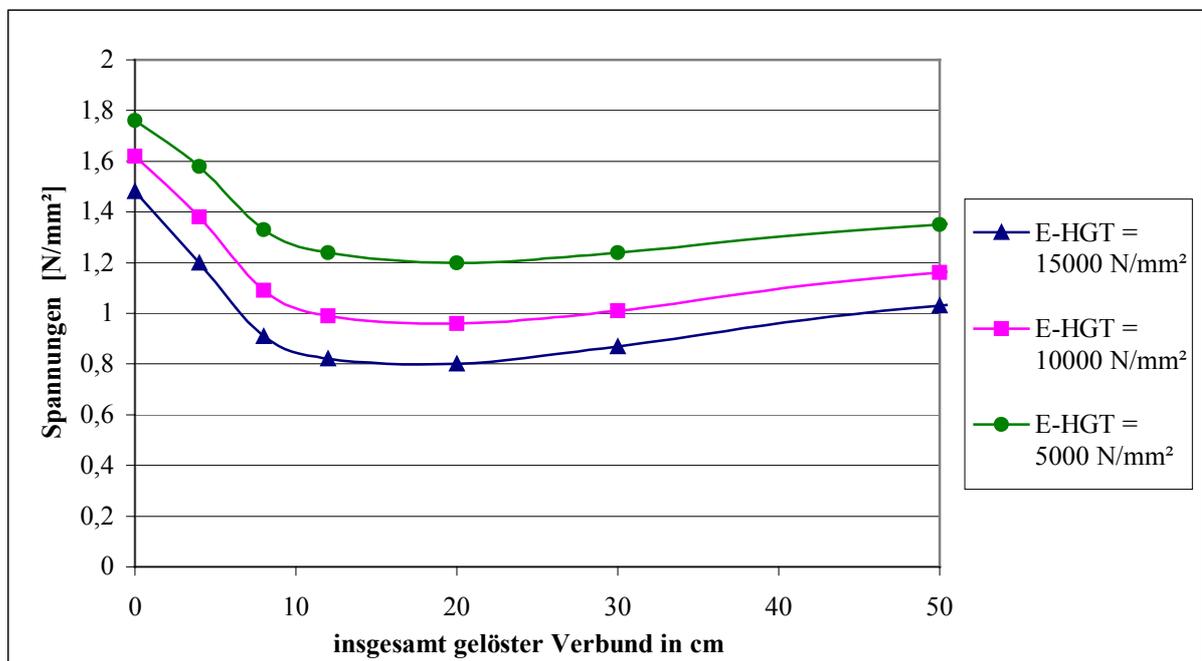
$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung



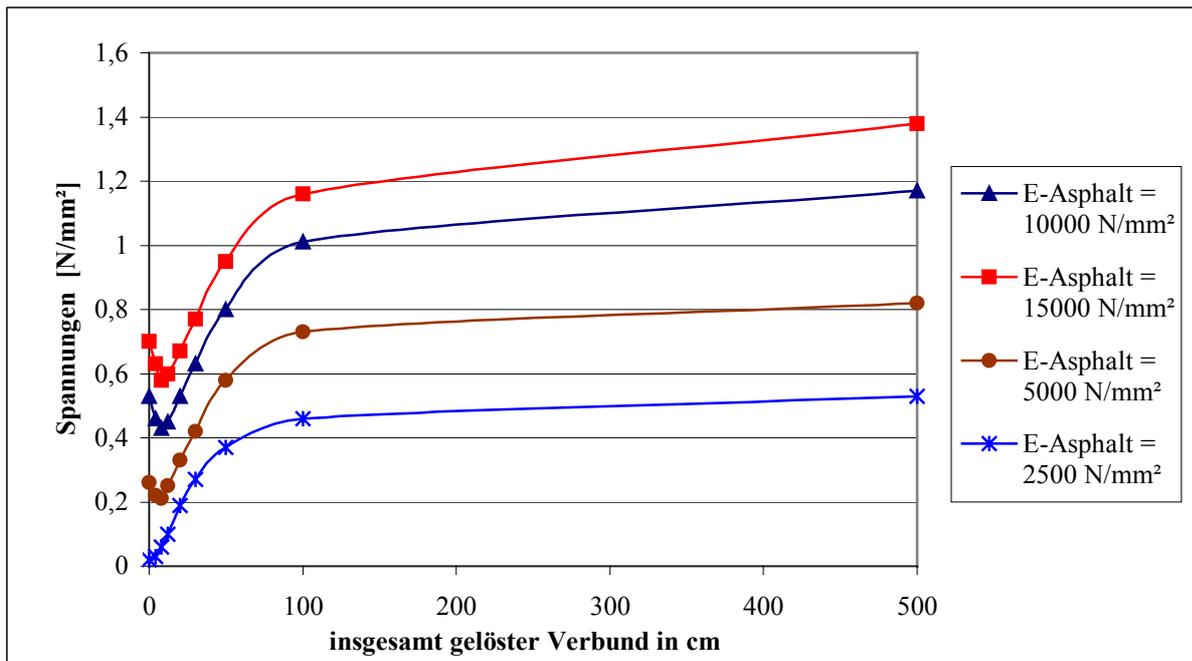
$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



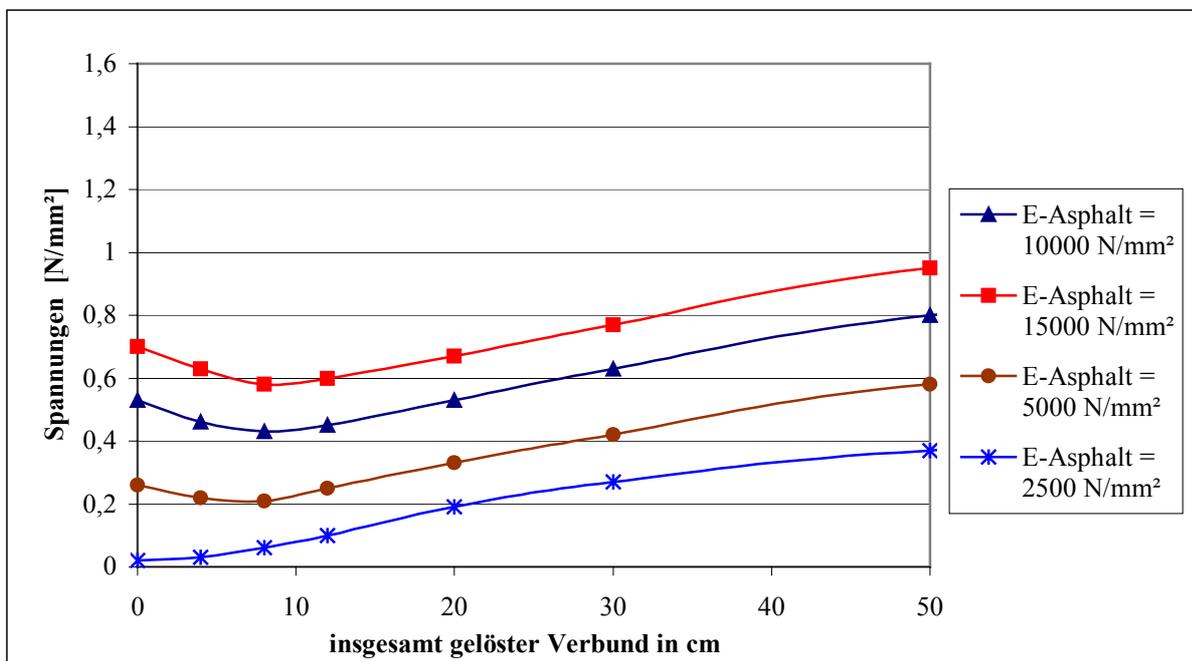
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



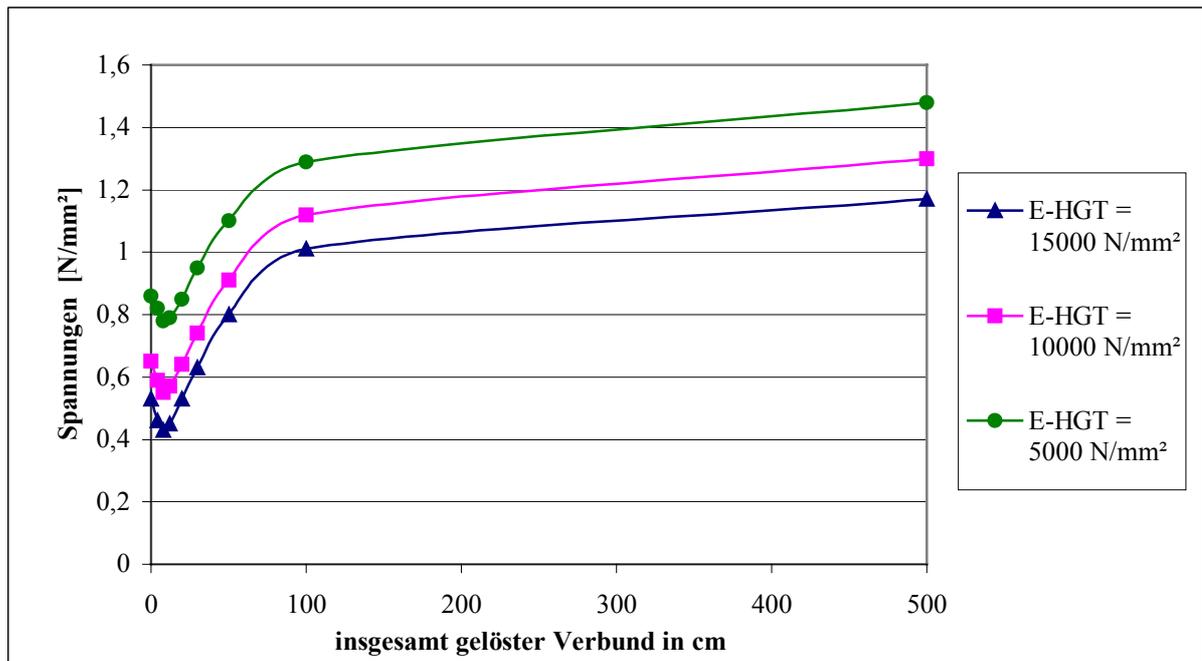
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



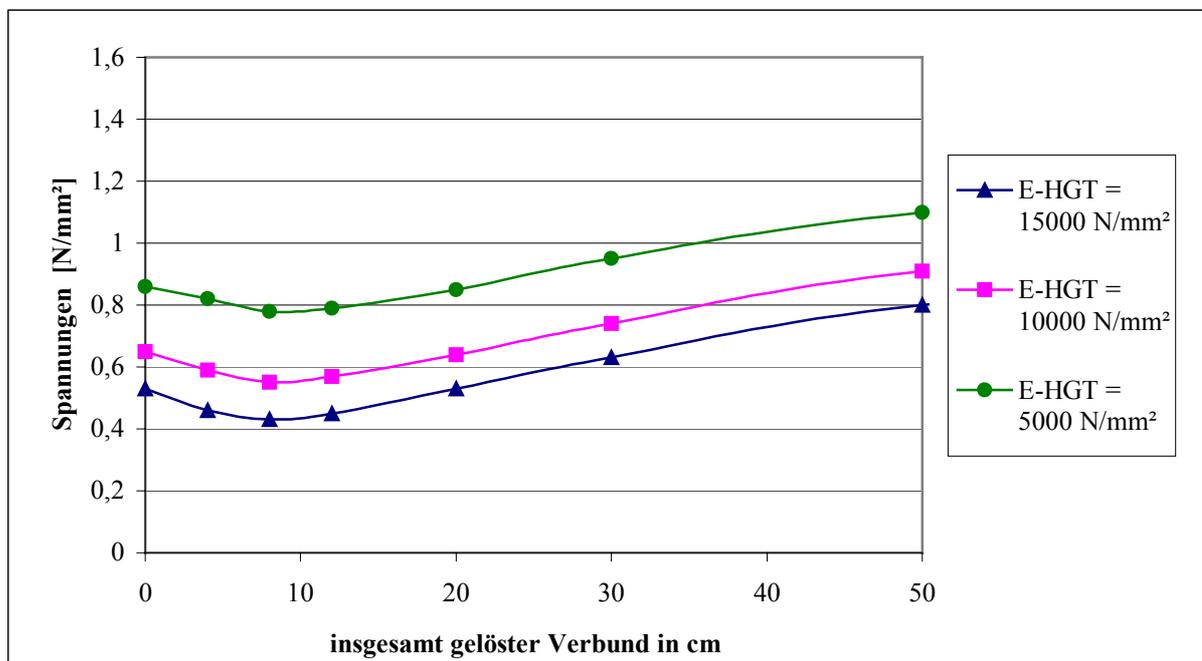
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



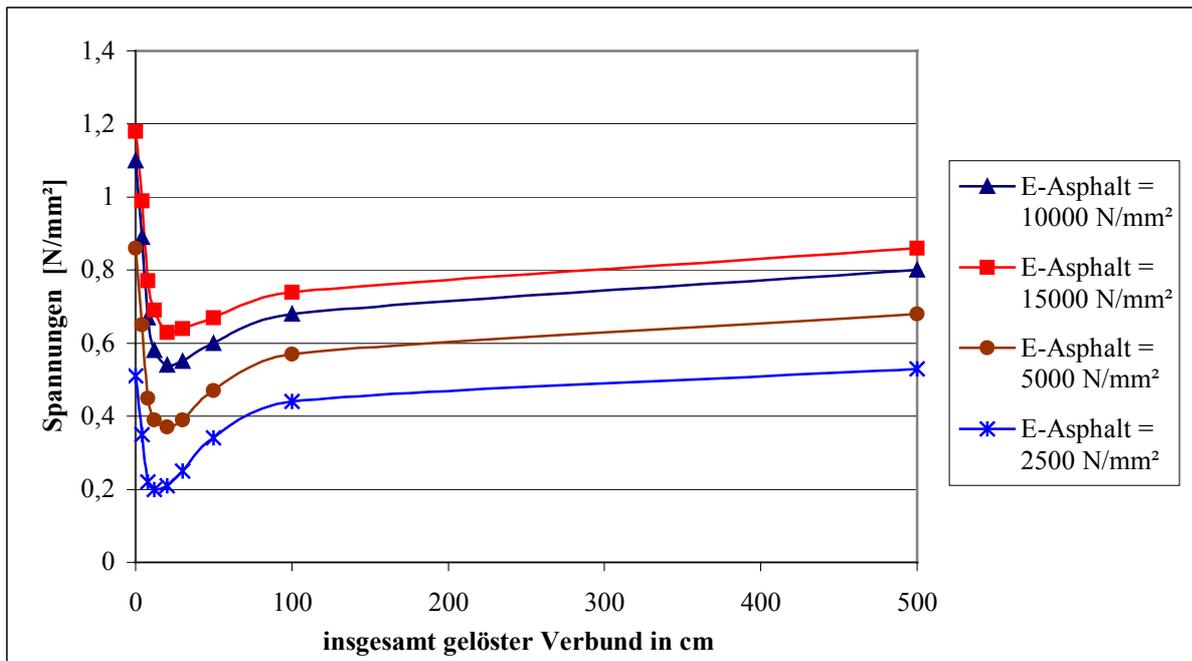
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



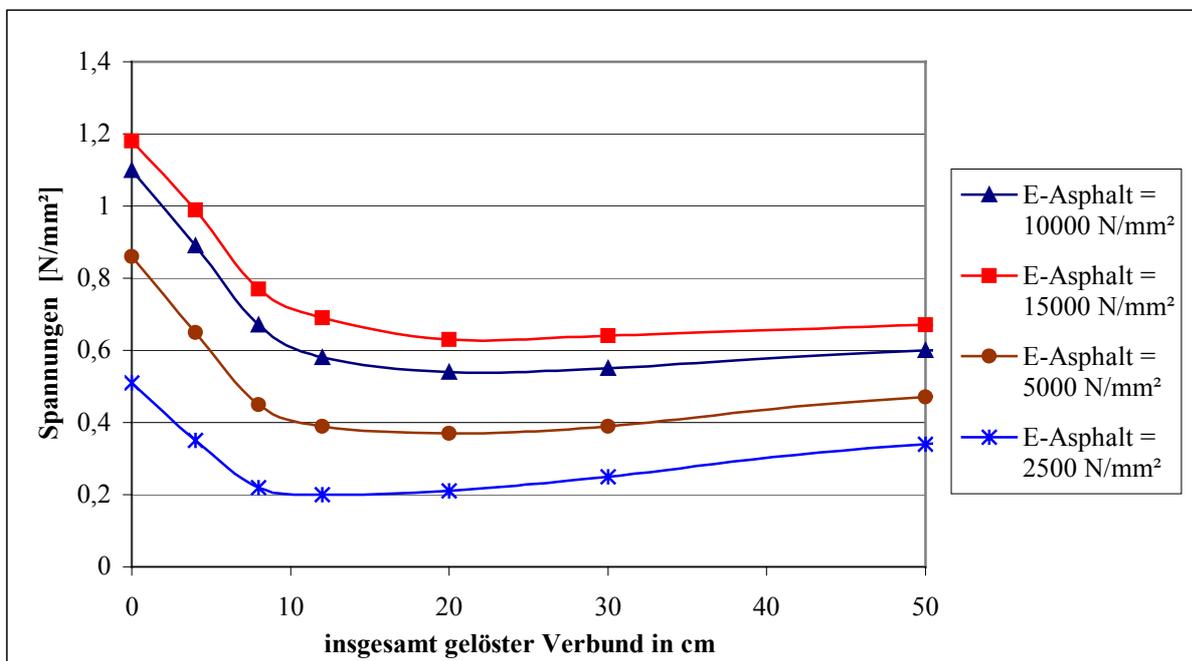
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



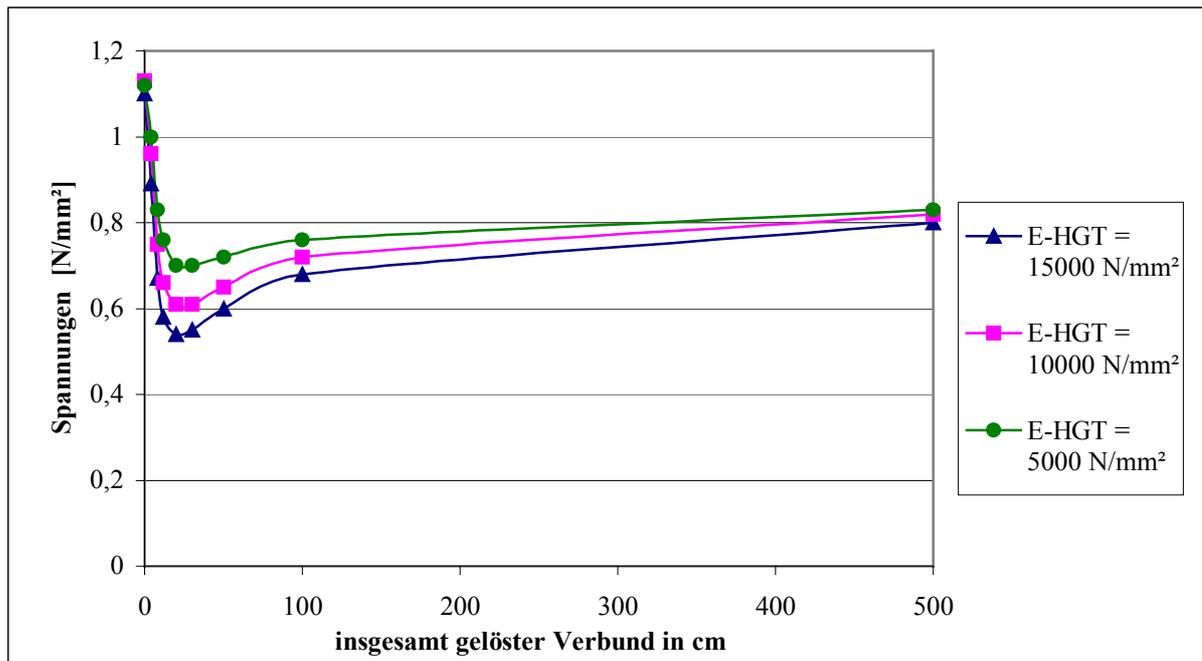
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



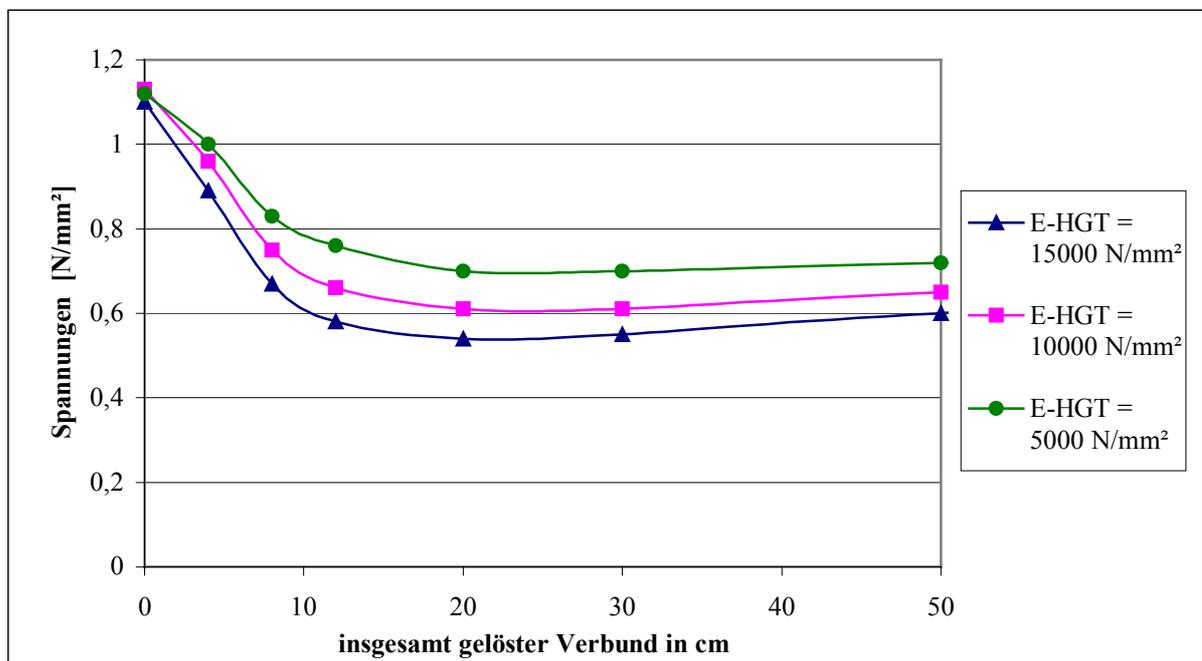
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter Verkehrsbelastung



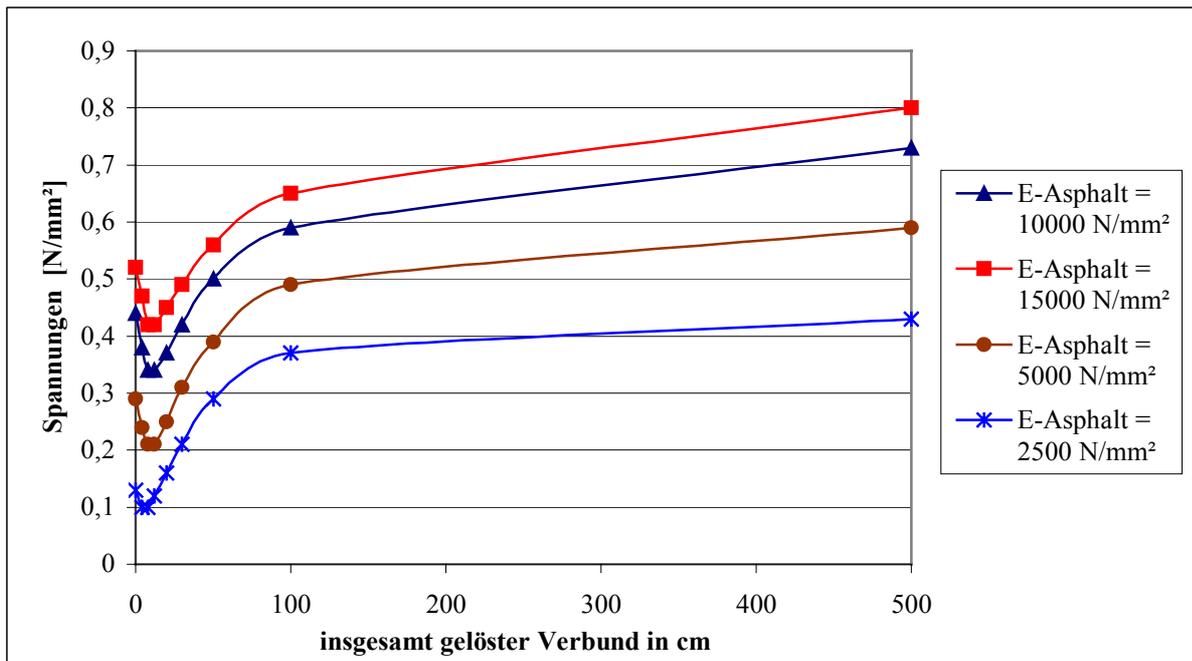
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



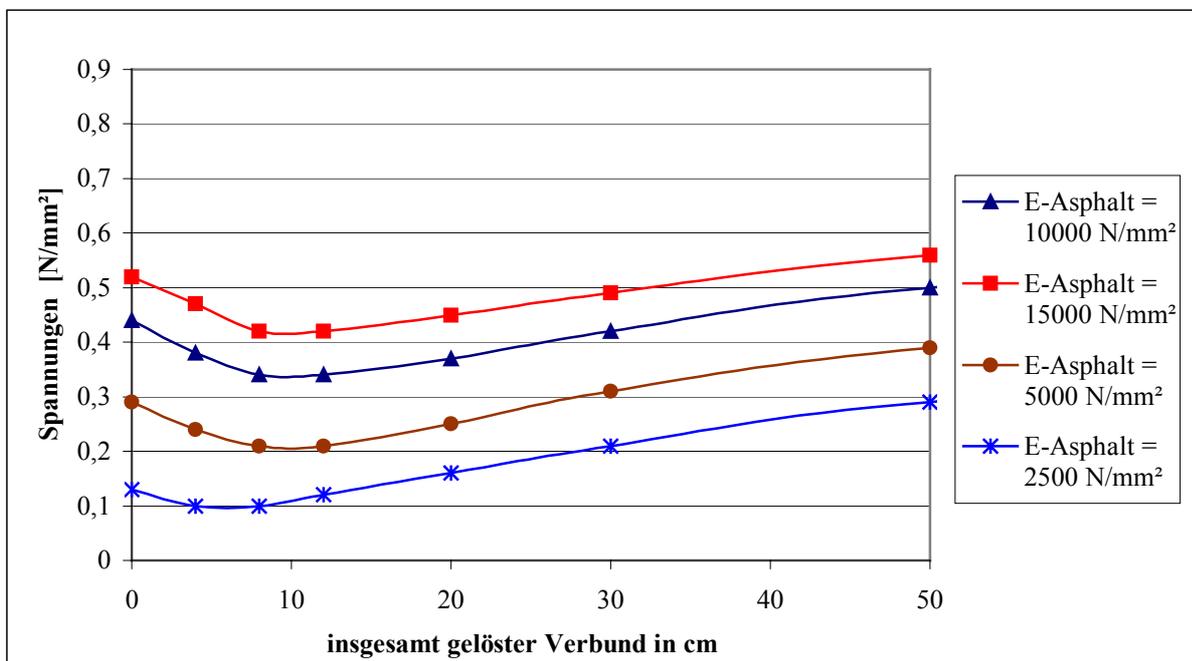
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



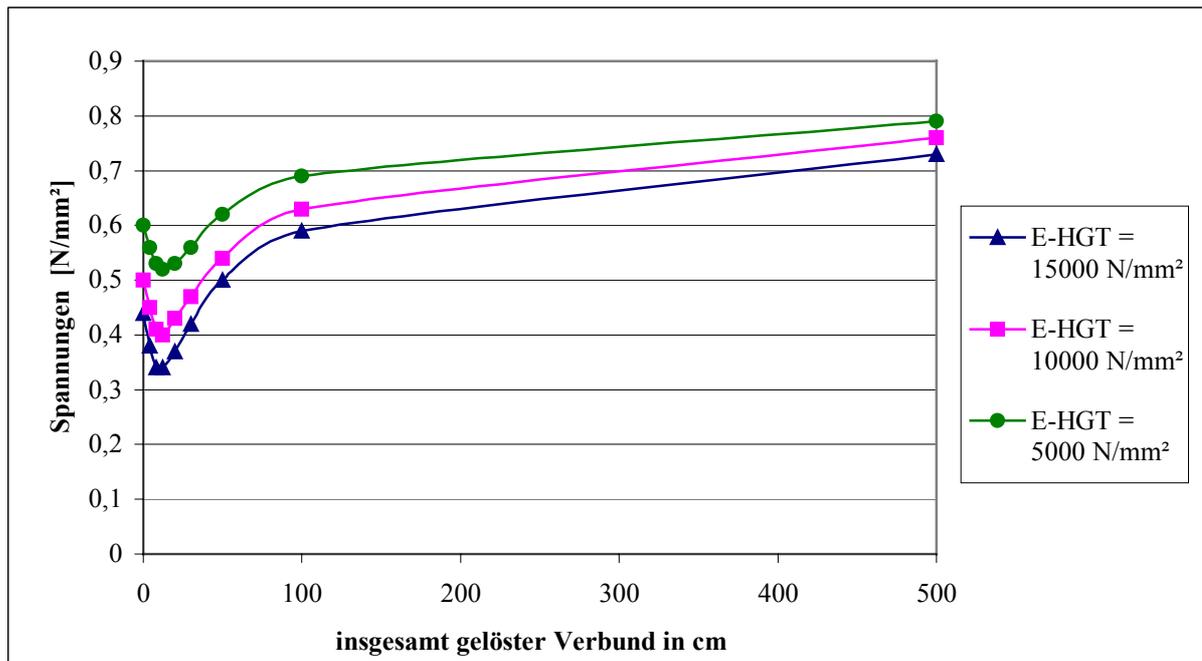
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



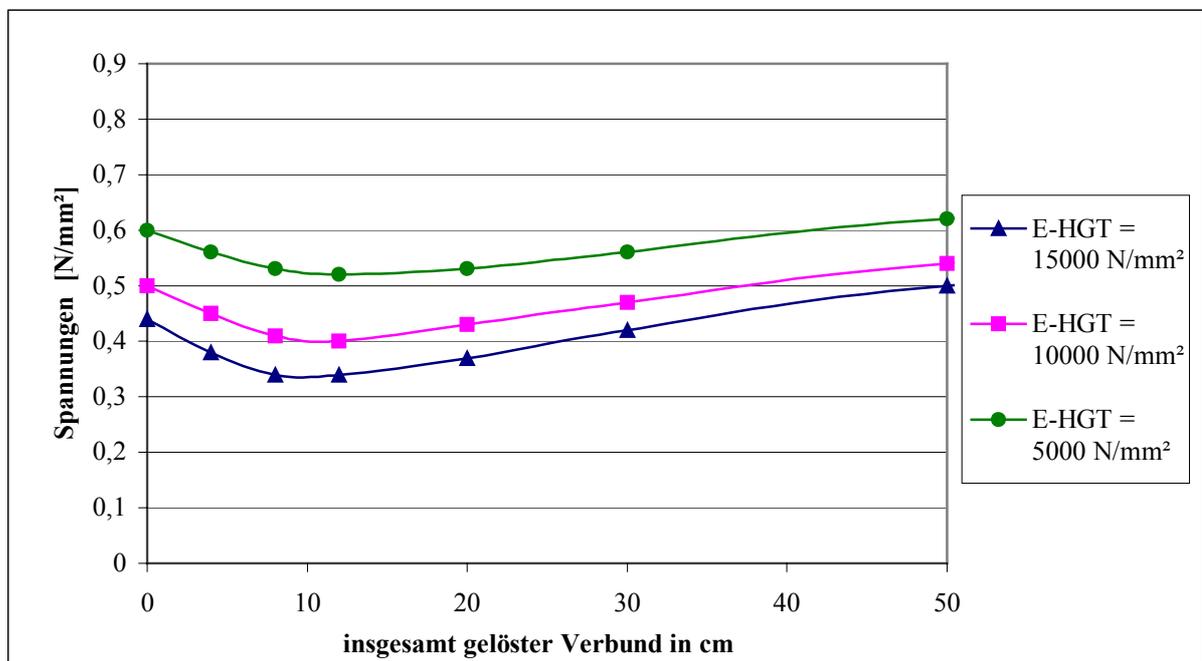
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



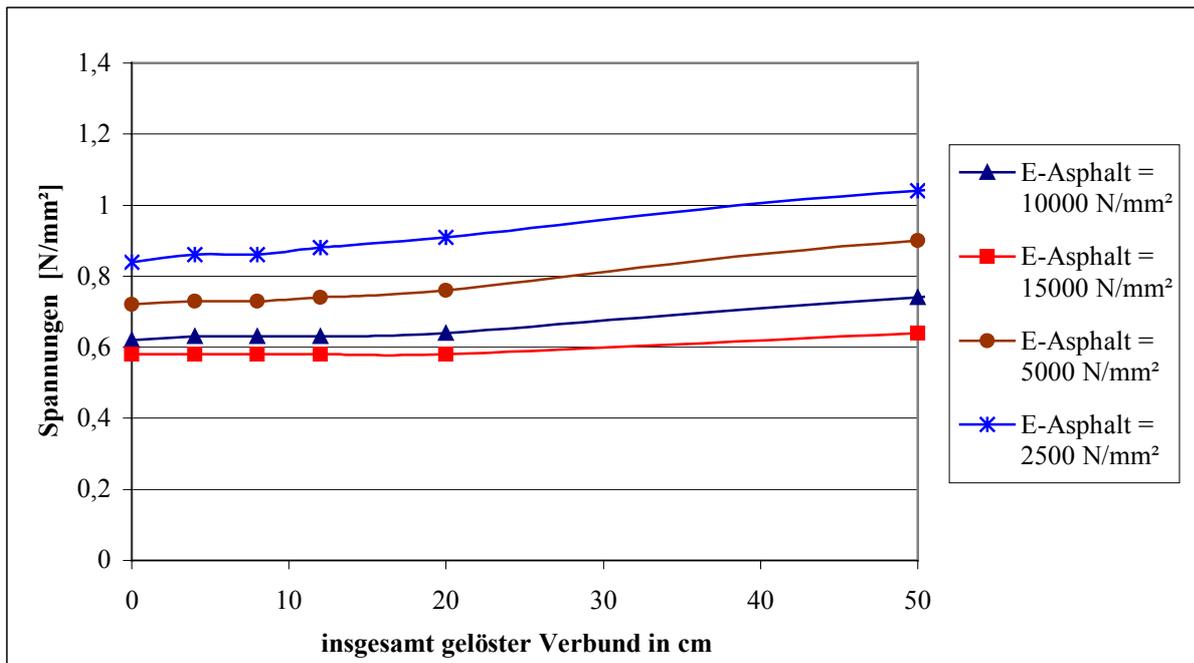
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



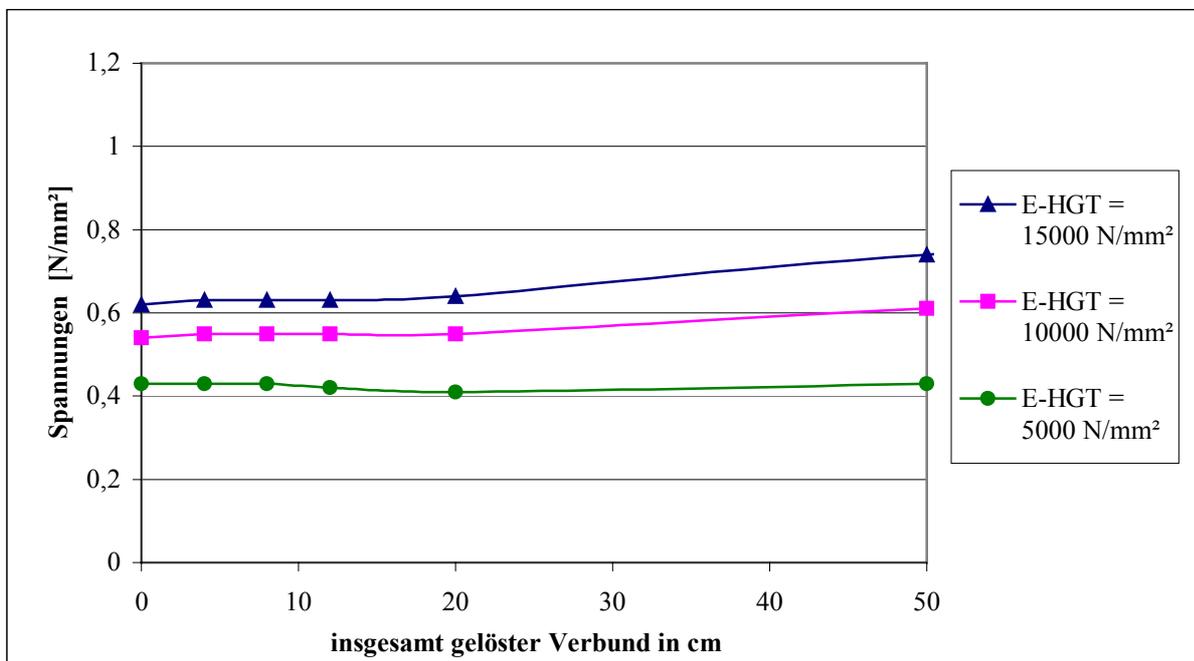
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



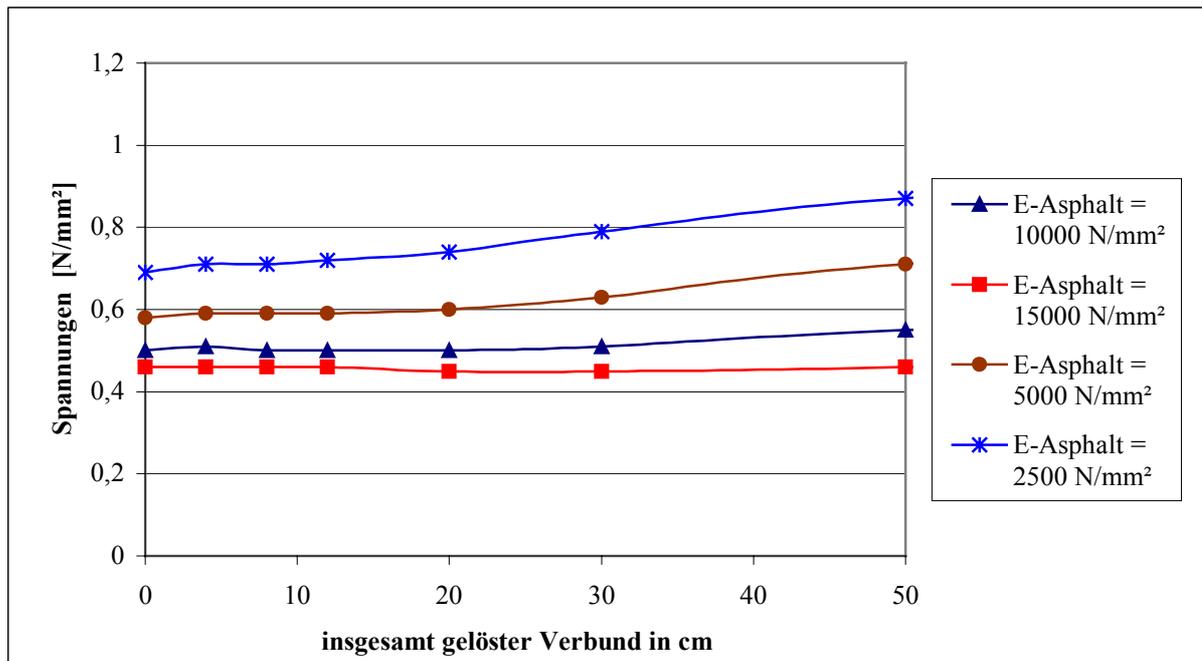
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphaltes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



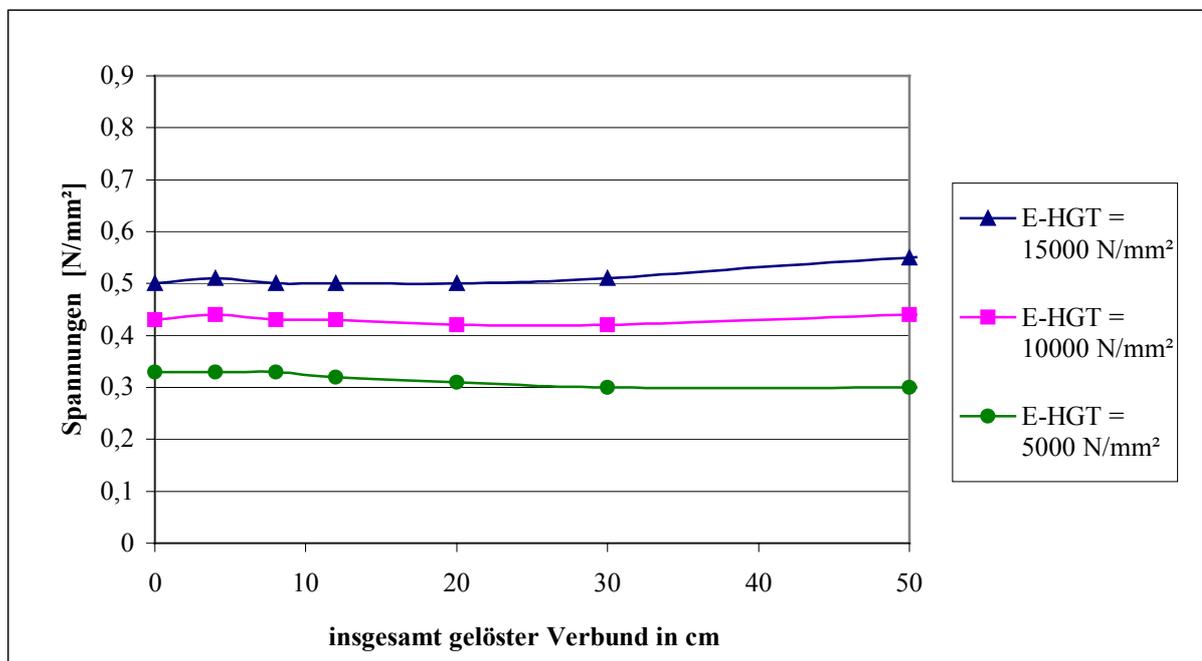
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,  
für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



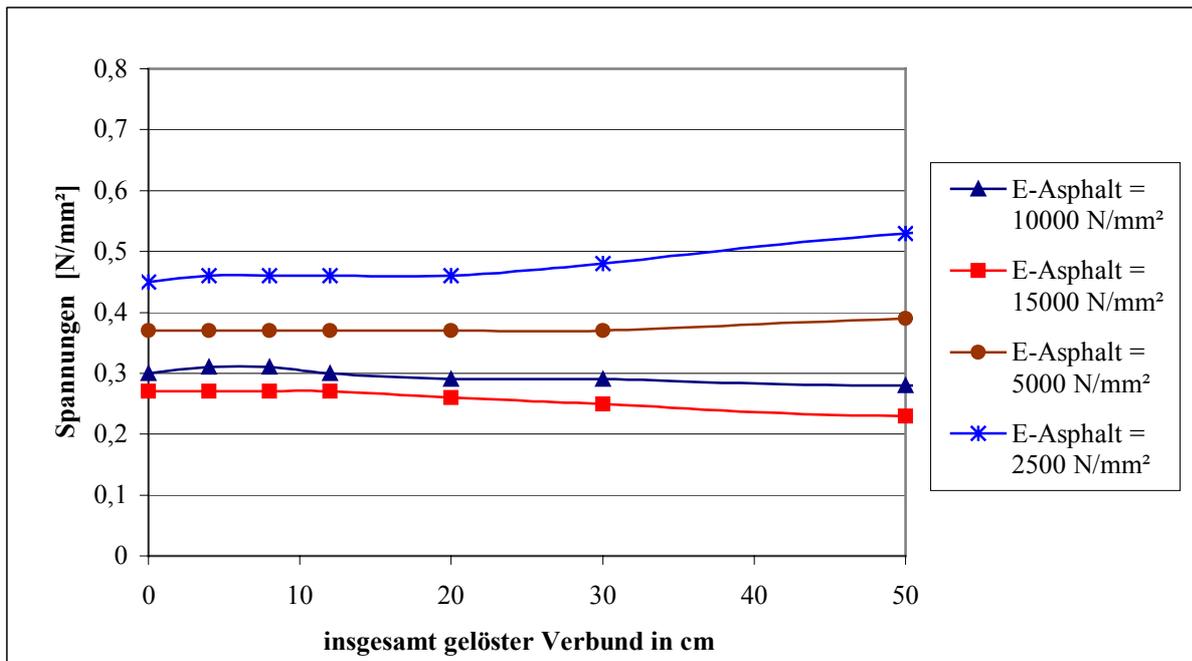
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,  
für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



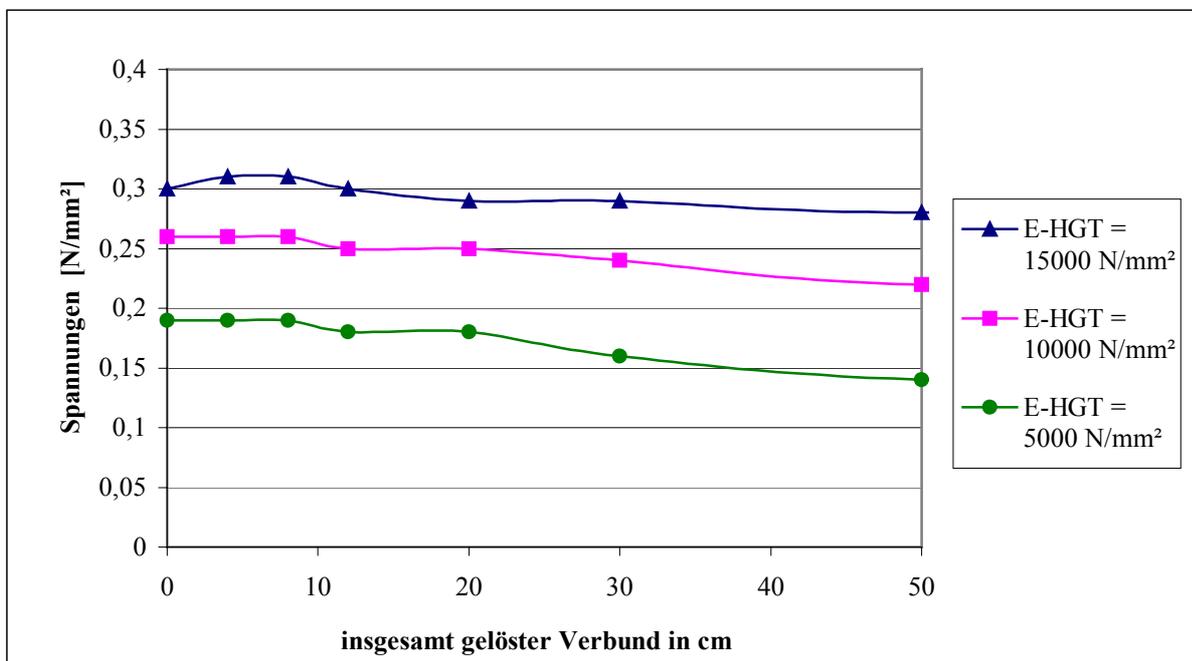
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



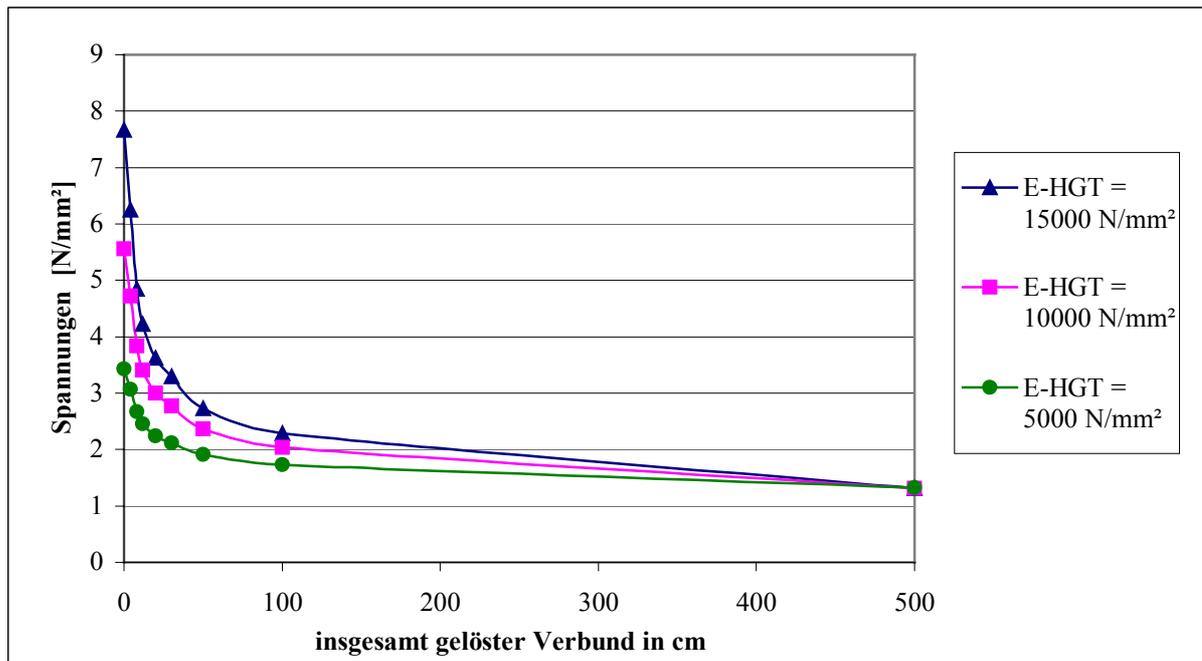
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



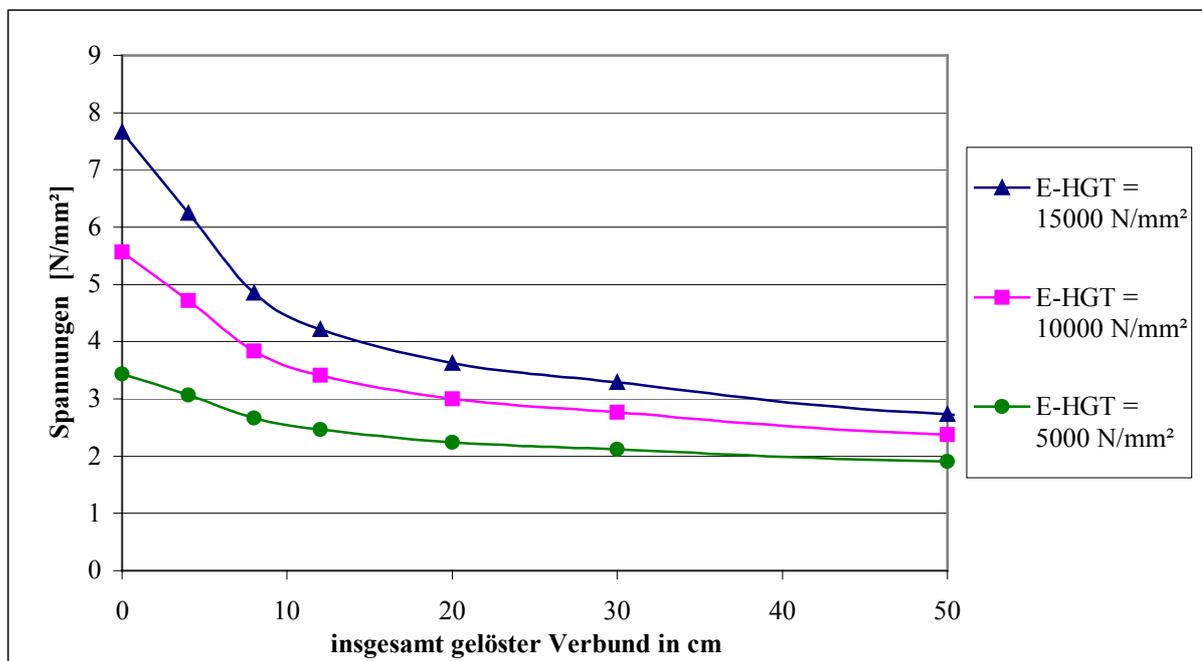
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



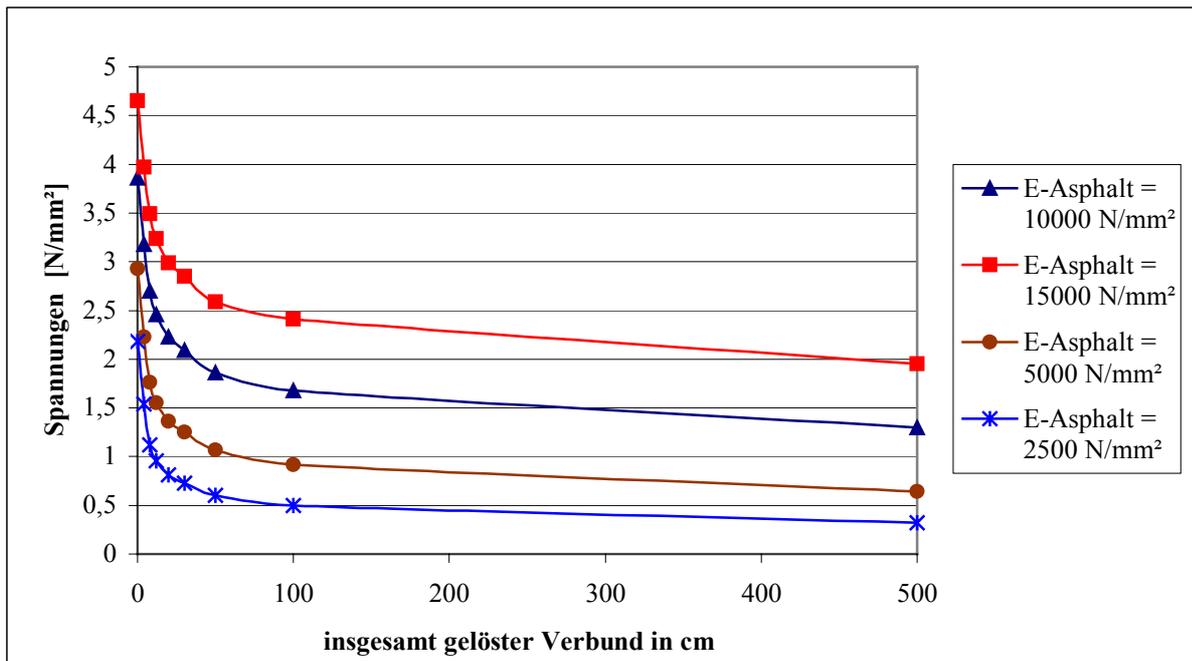
$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Verkehrsbelastung**



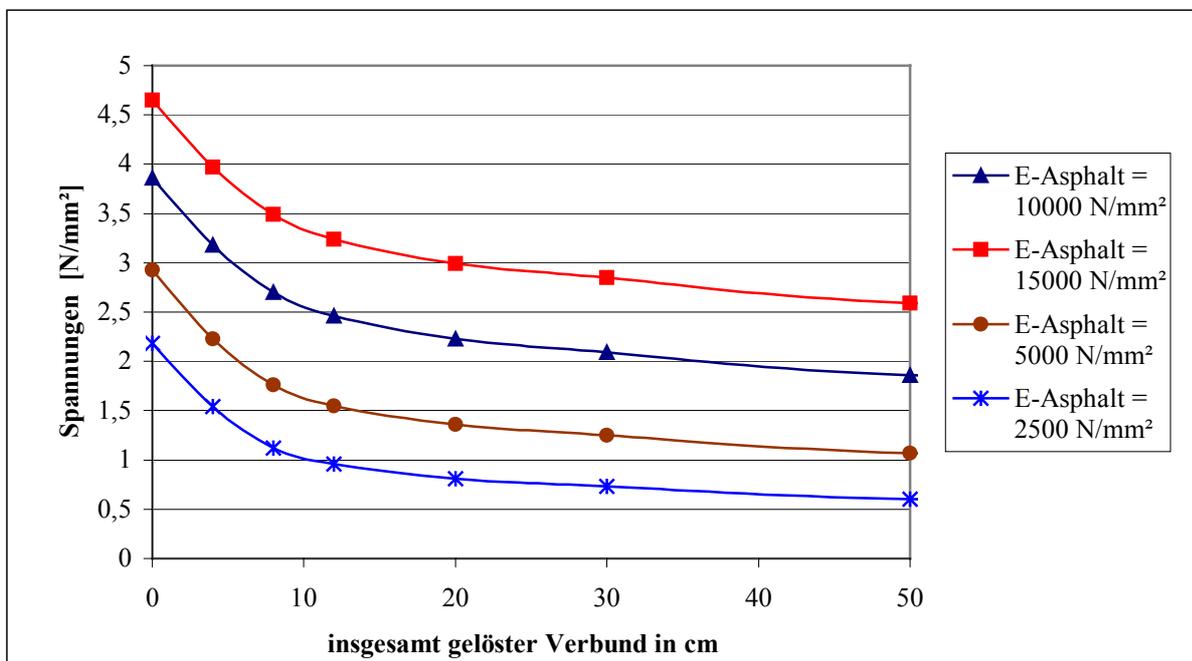
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Temperaturbelastung**



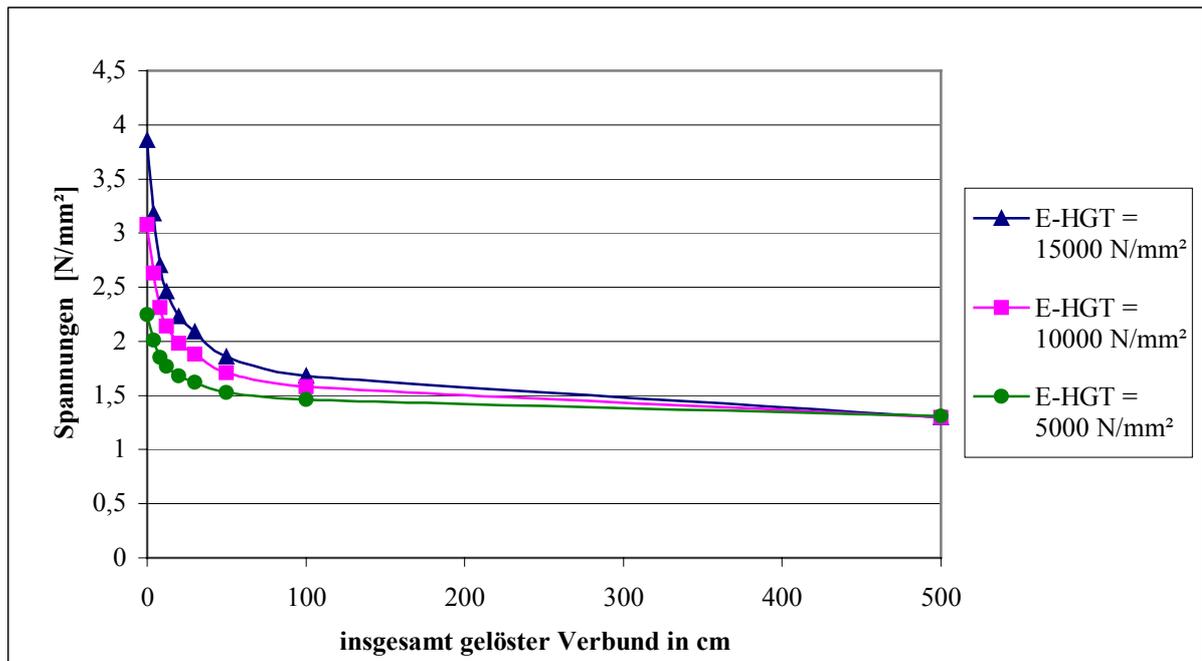
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



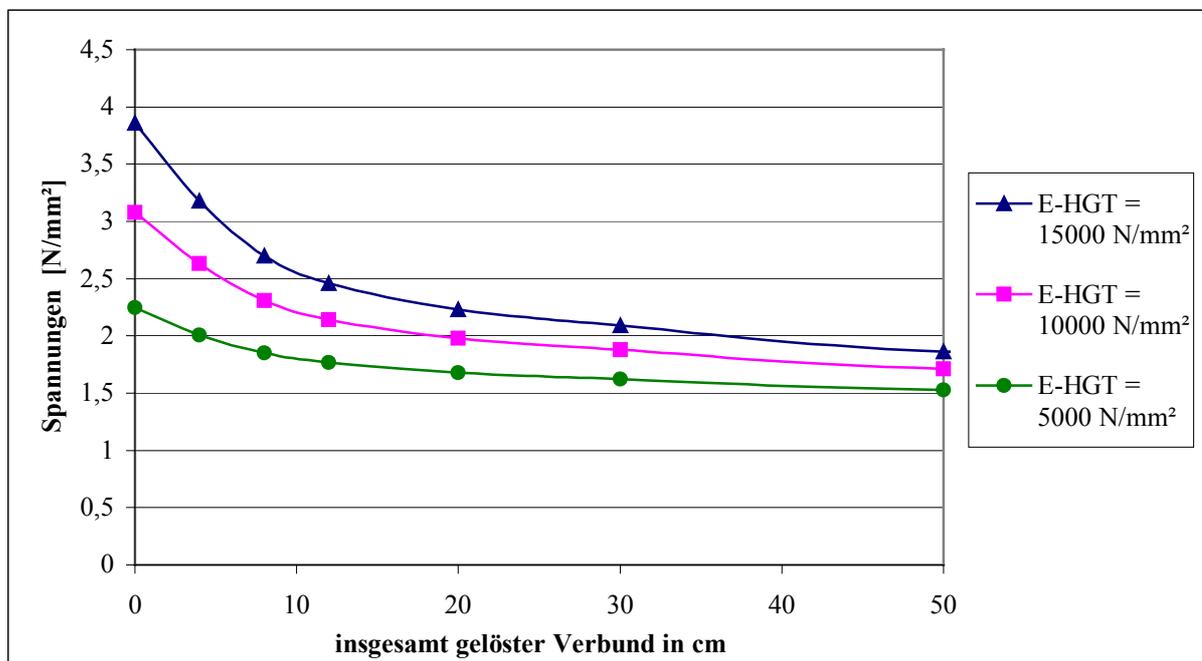
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Temperaturbelastung**



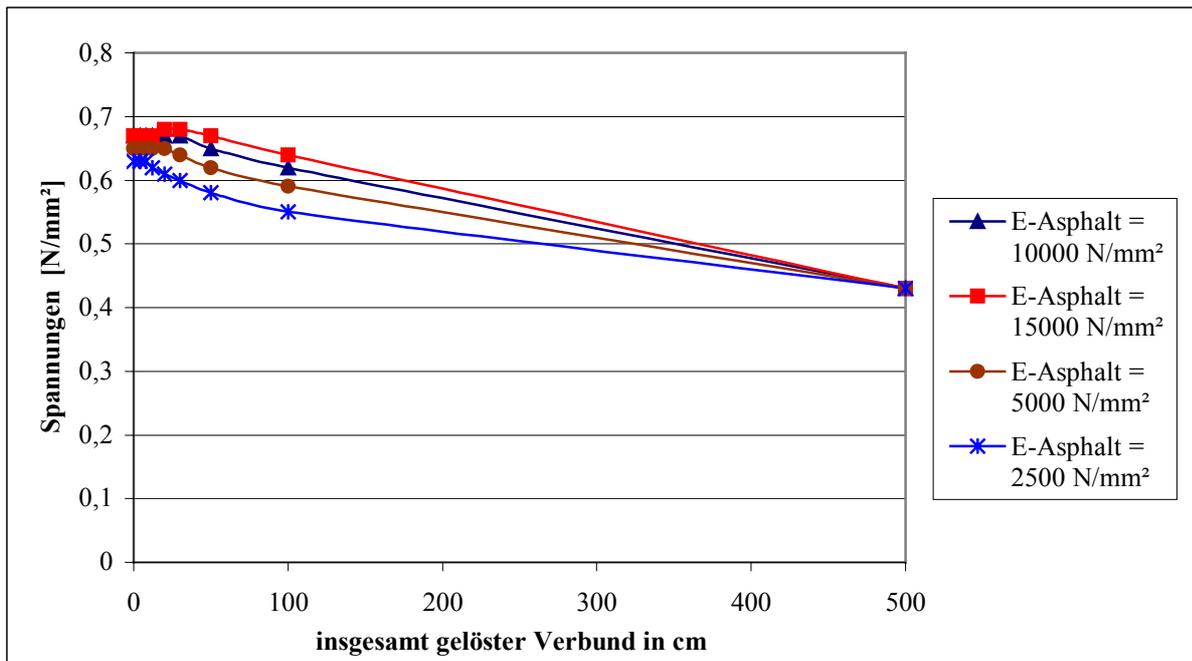
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Temperaturbelastung**



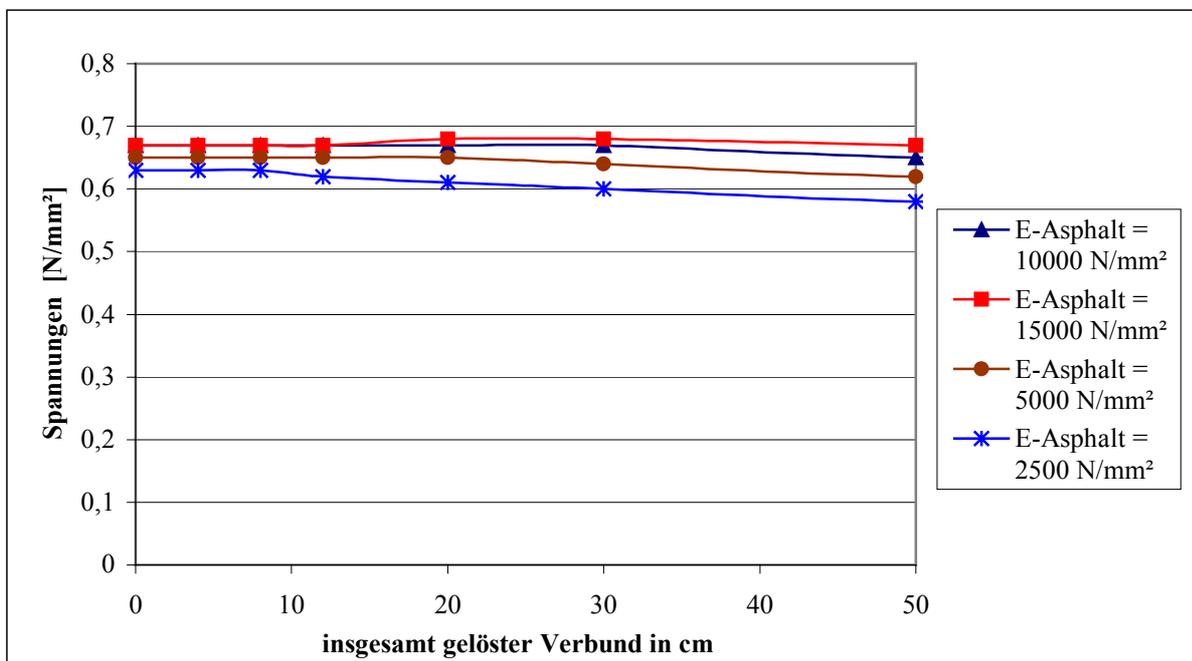
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

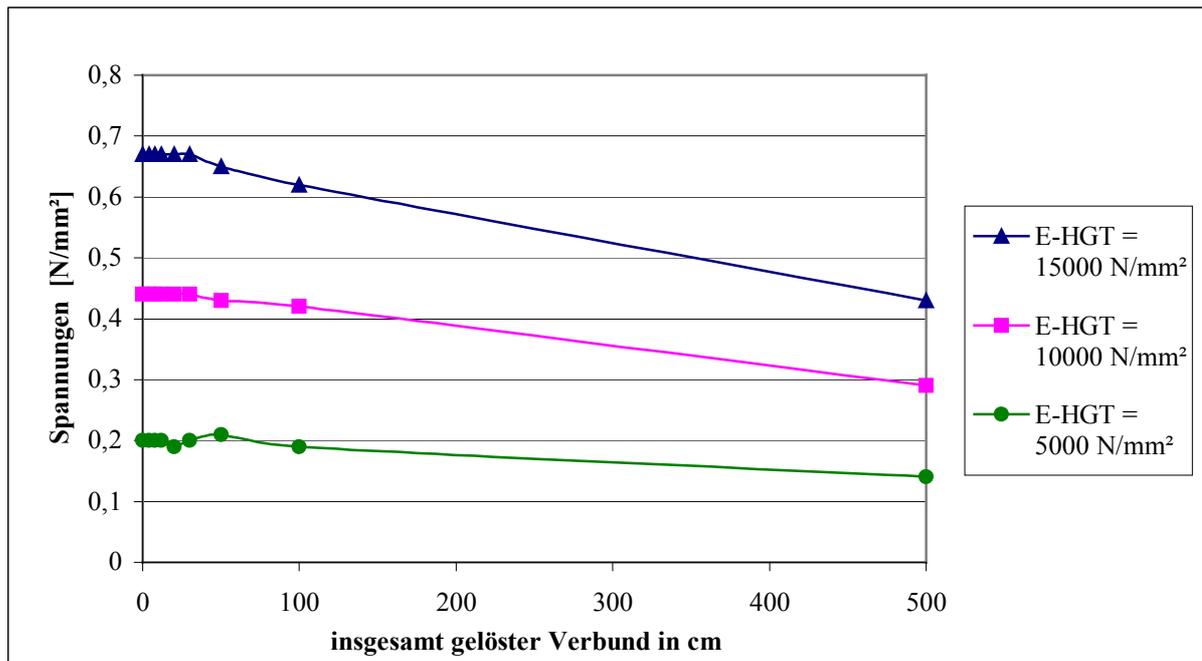
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt

in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Temperaturbelastung**

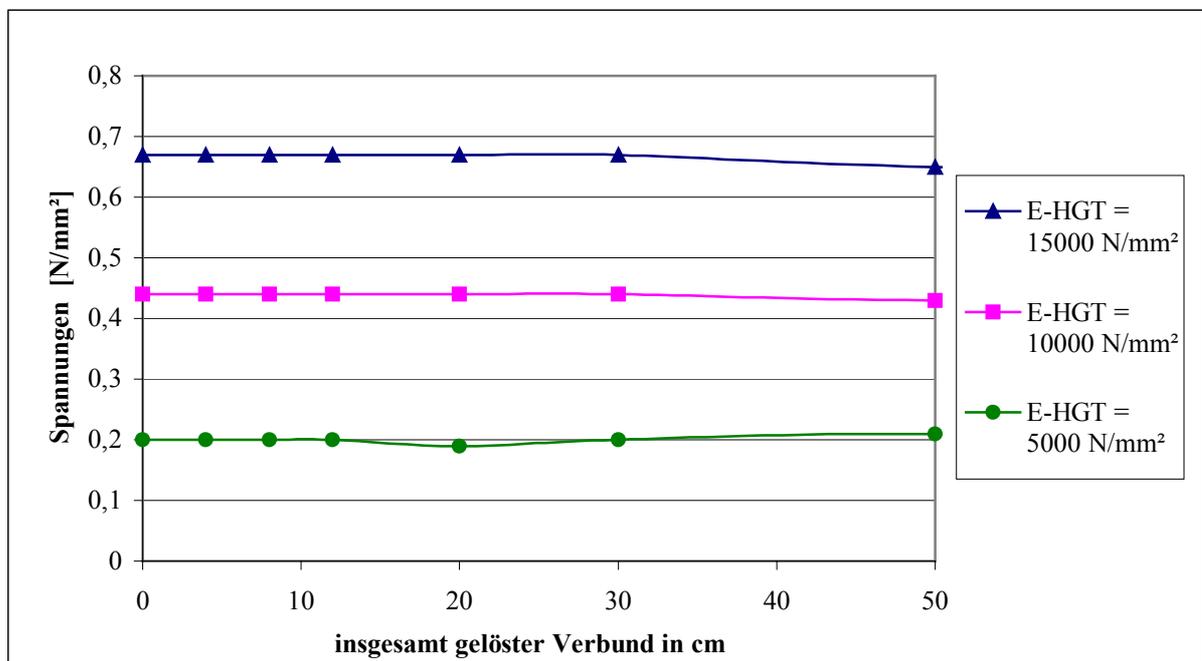


**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

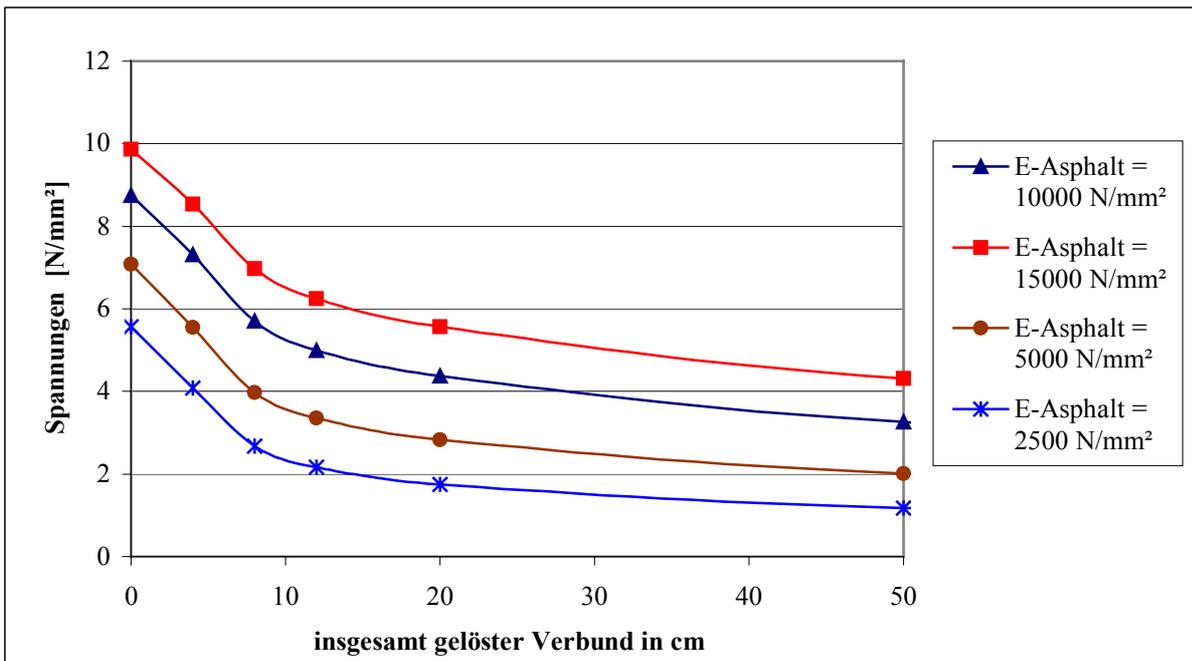
Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



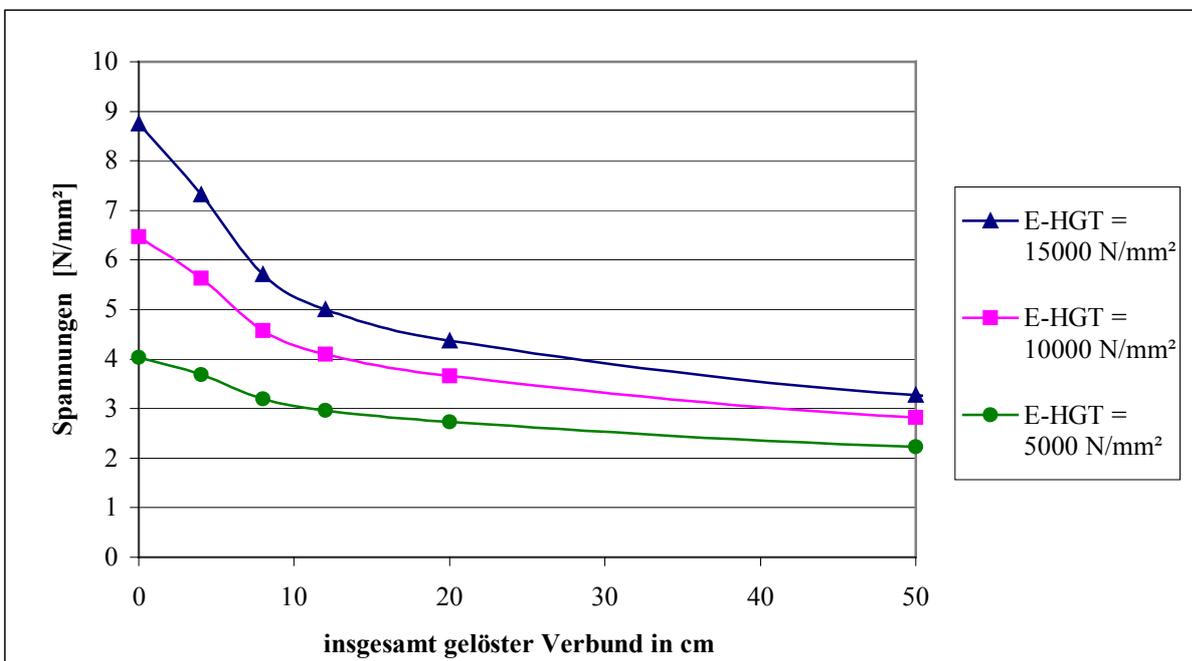
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**  
 für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung unter **Temperaturbelastung**



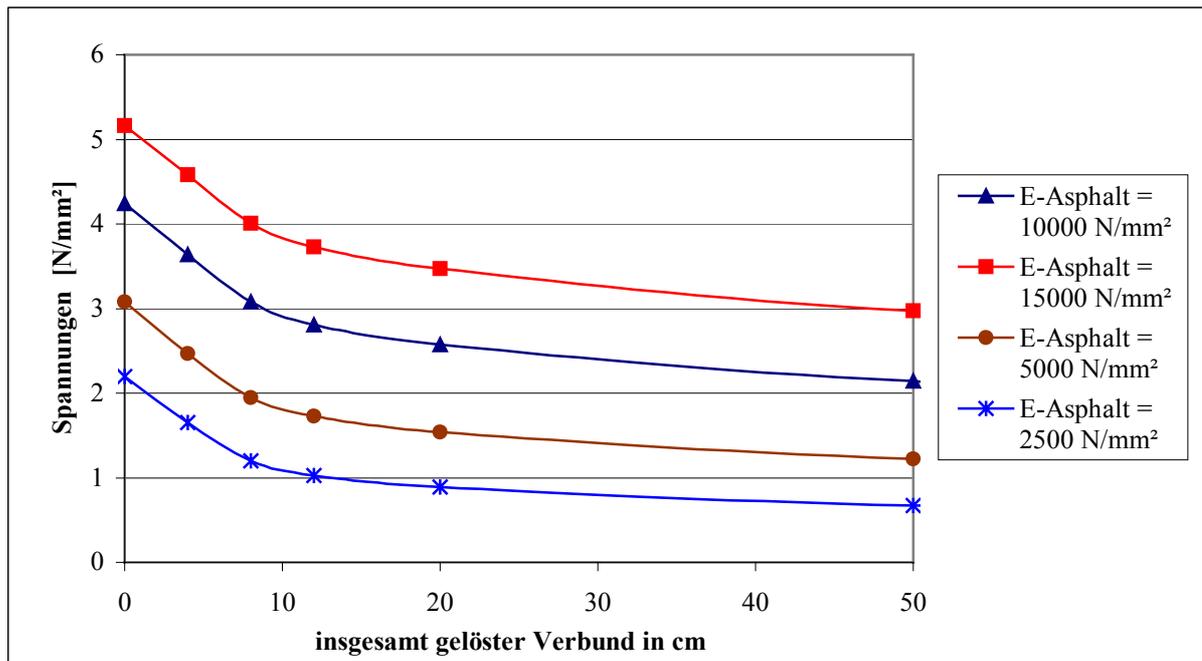
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**  
 Detailausschnitt 0 bis 50 cm insgesamt gelöster Verbund



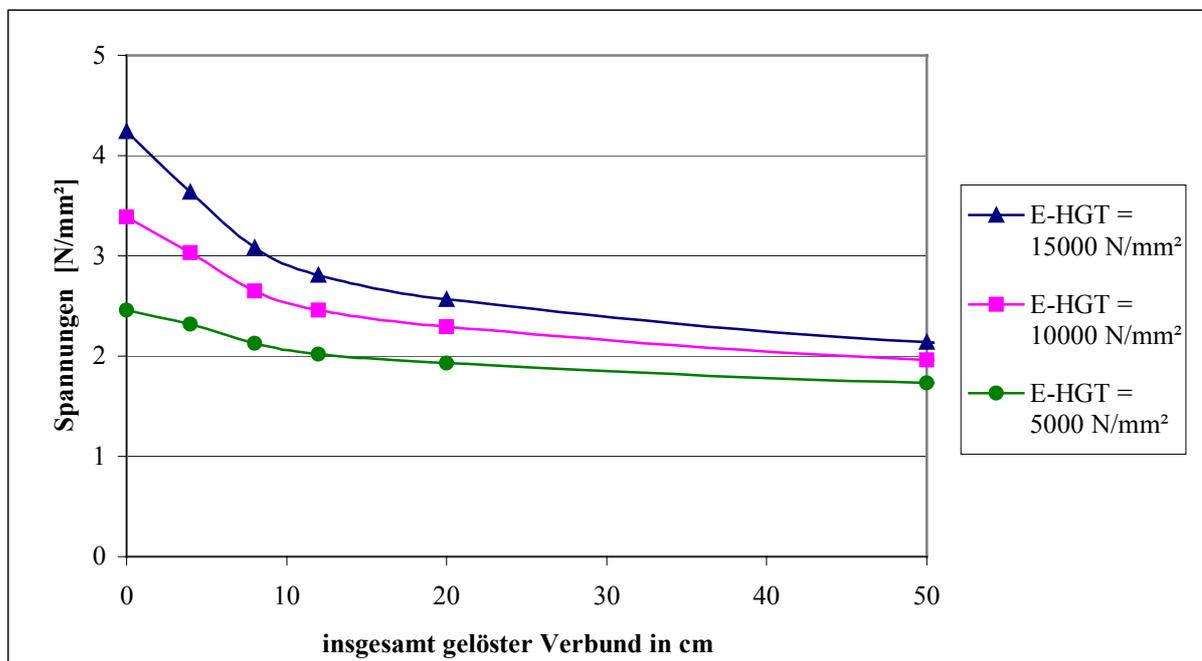
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



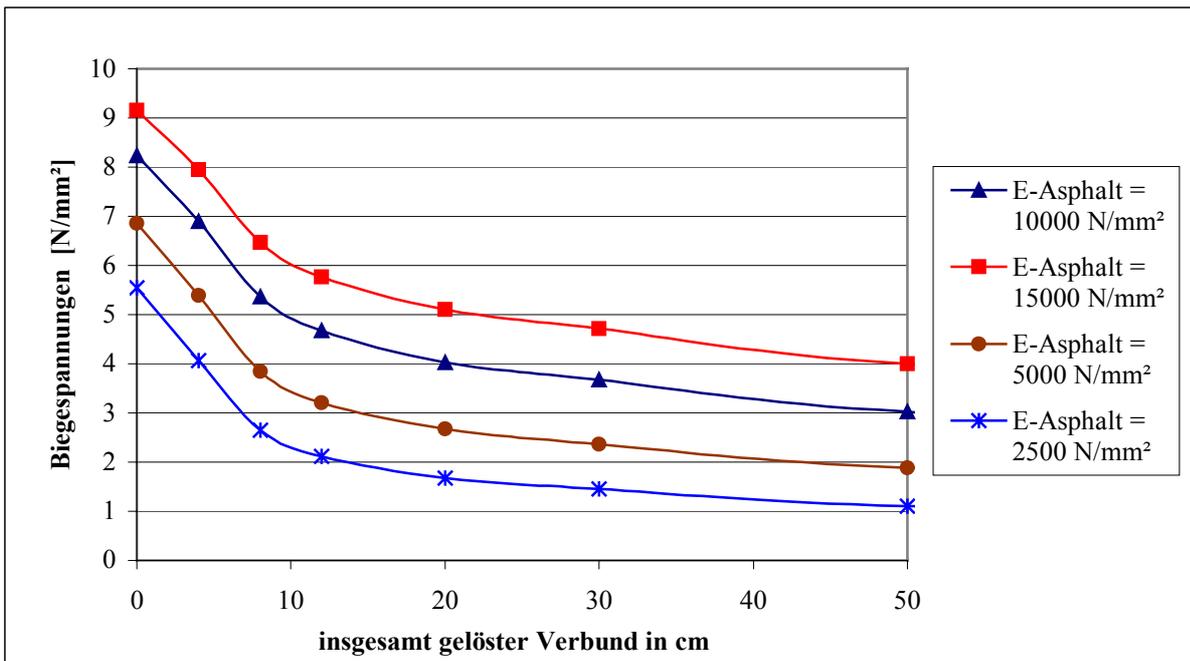
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



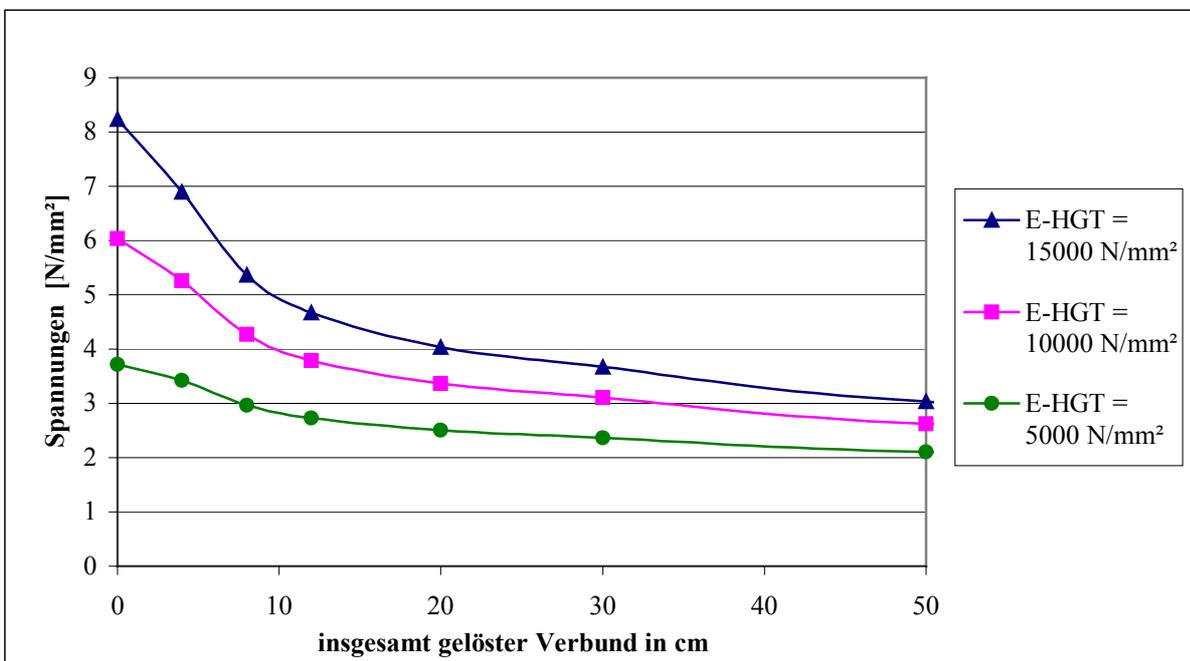
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



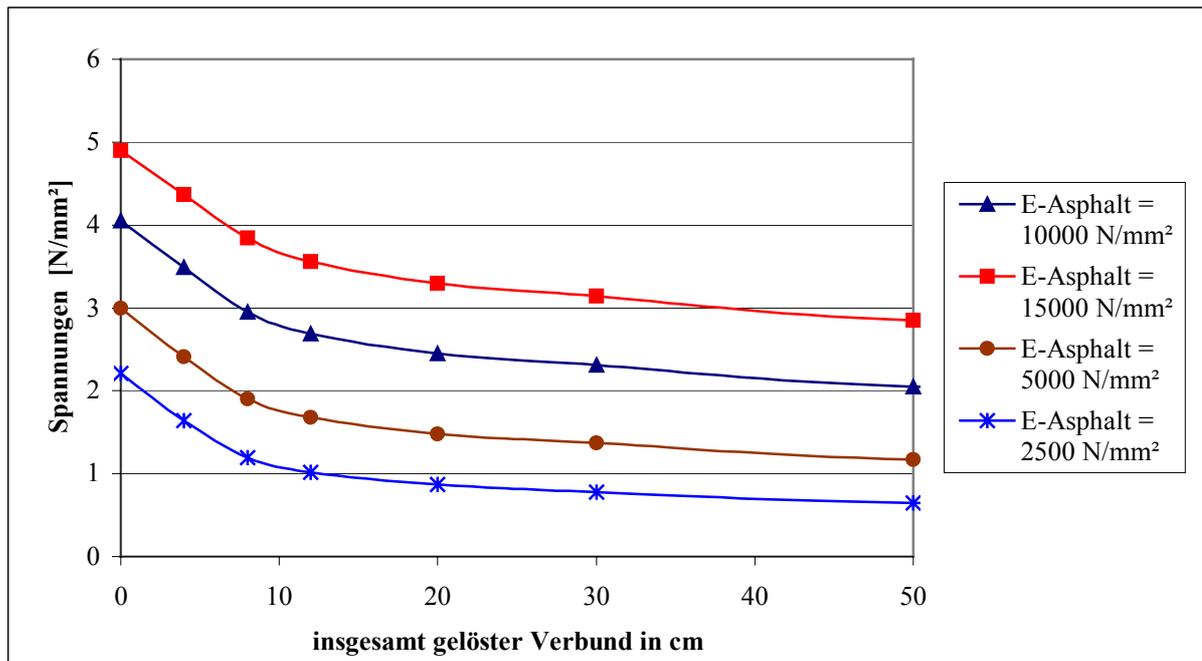
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



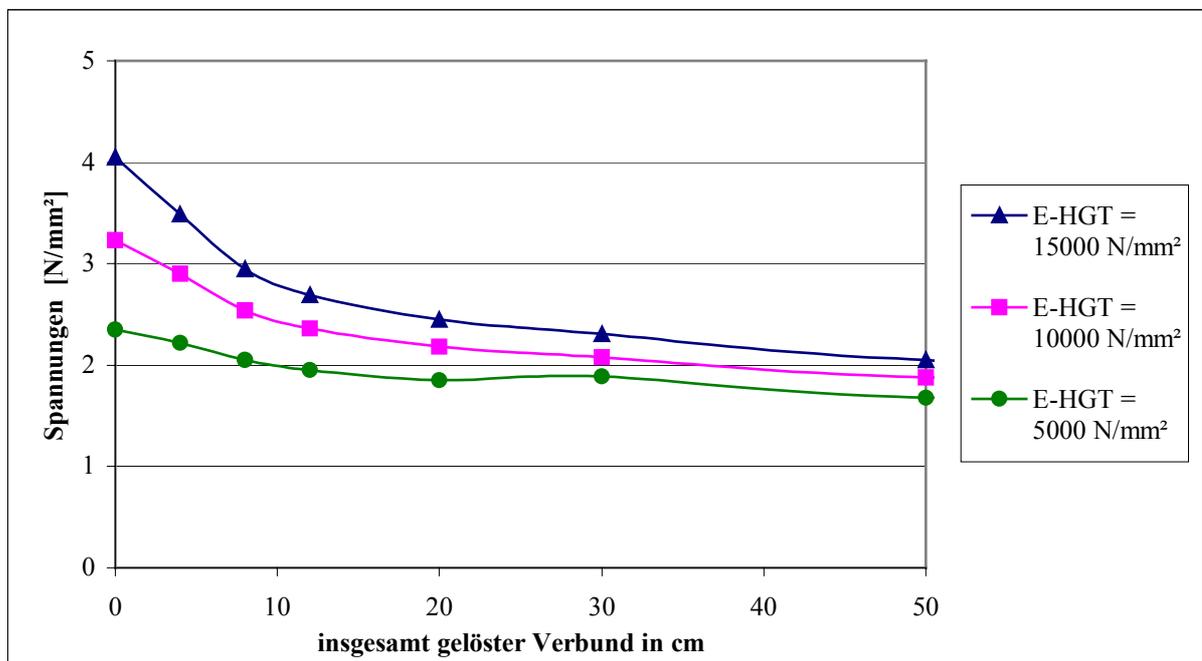
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



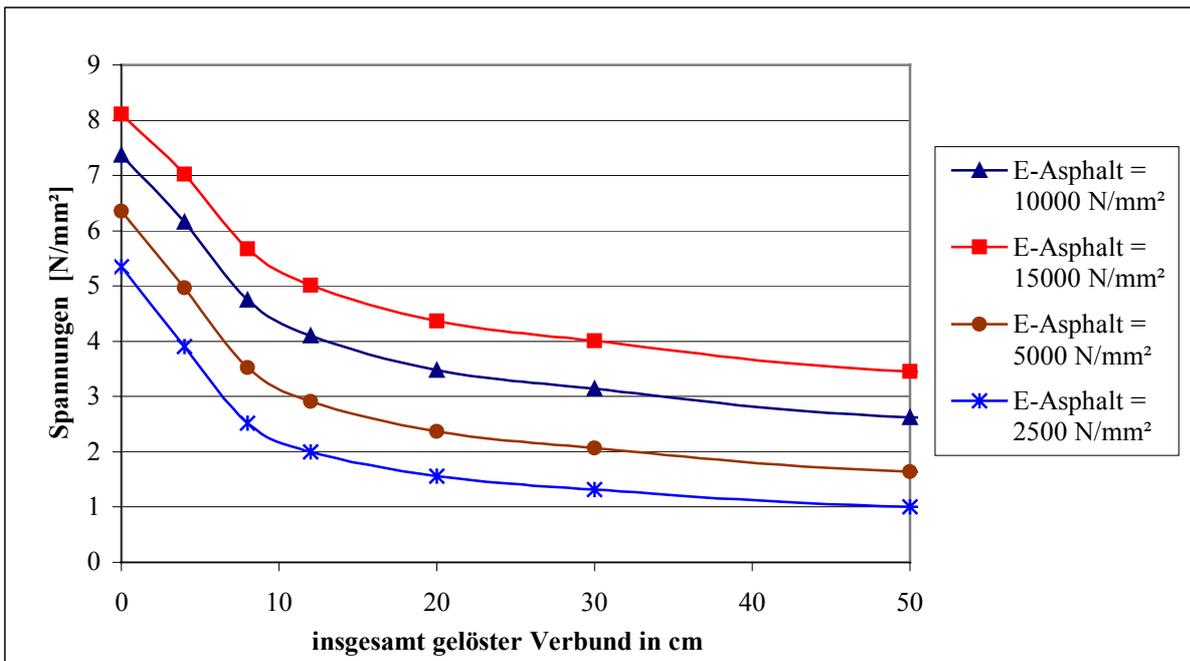
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



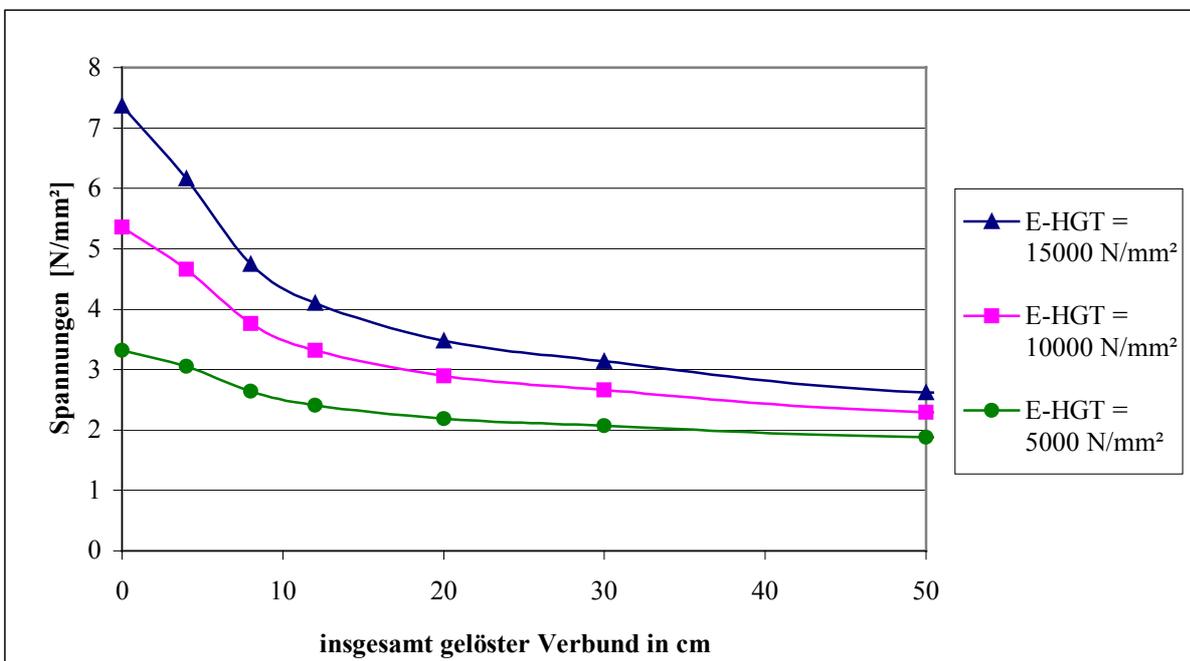
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



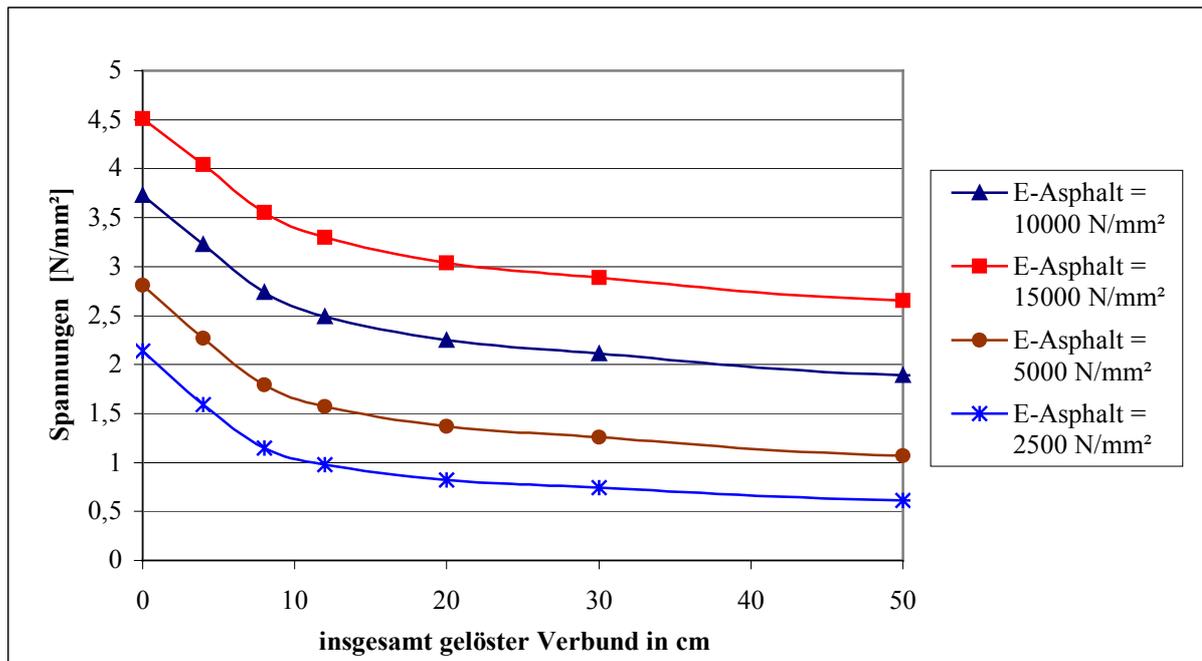
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



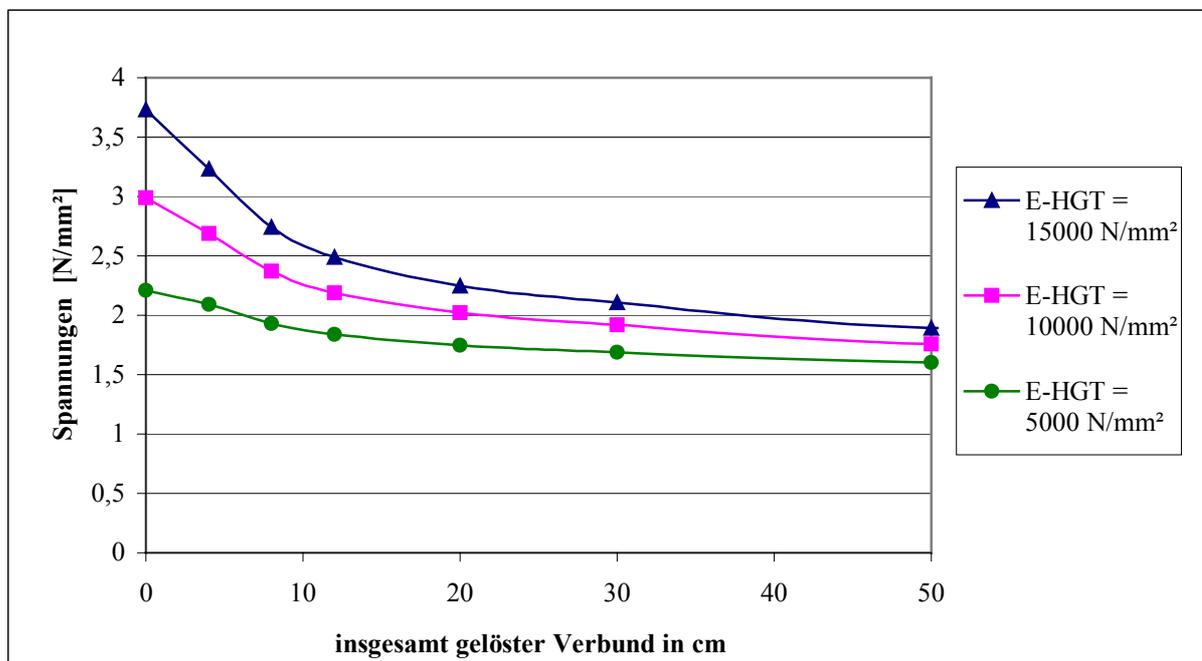
$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



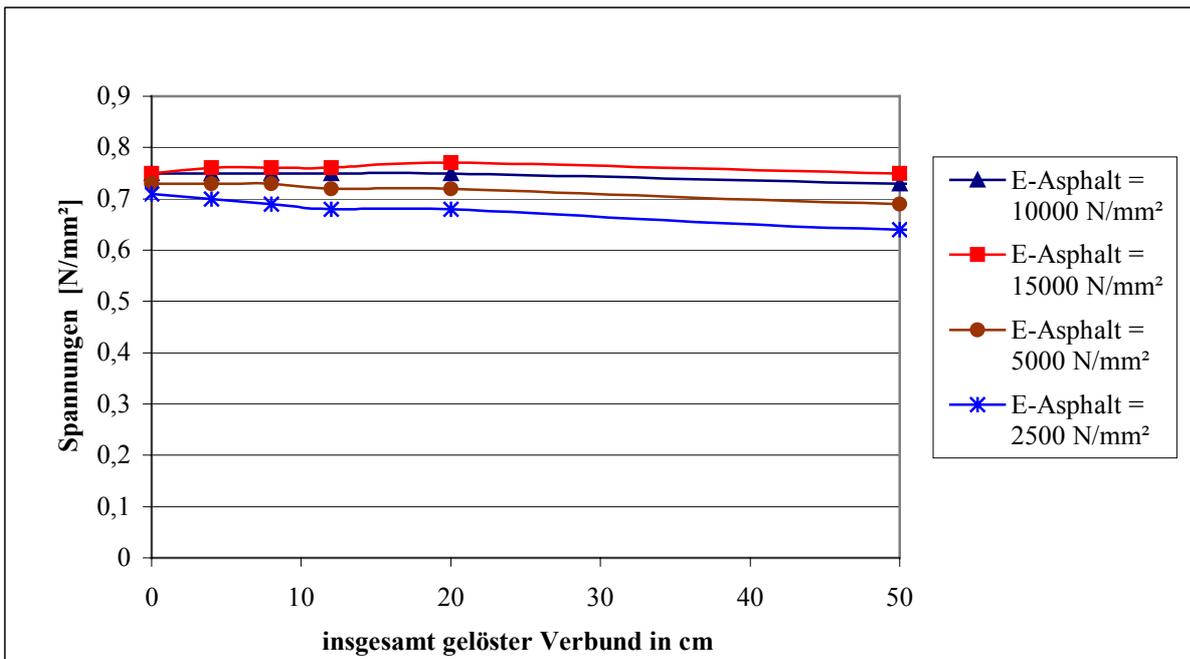
$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



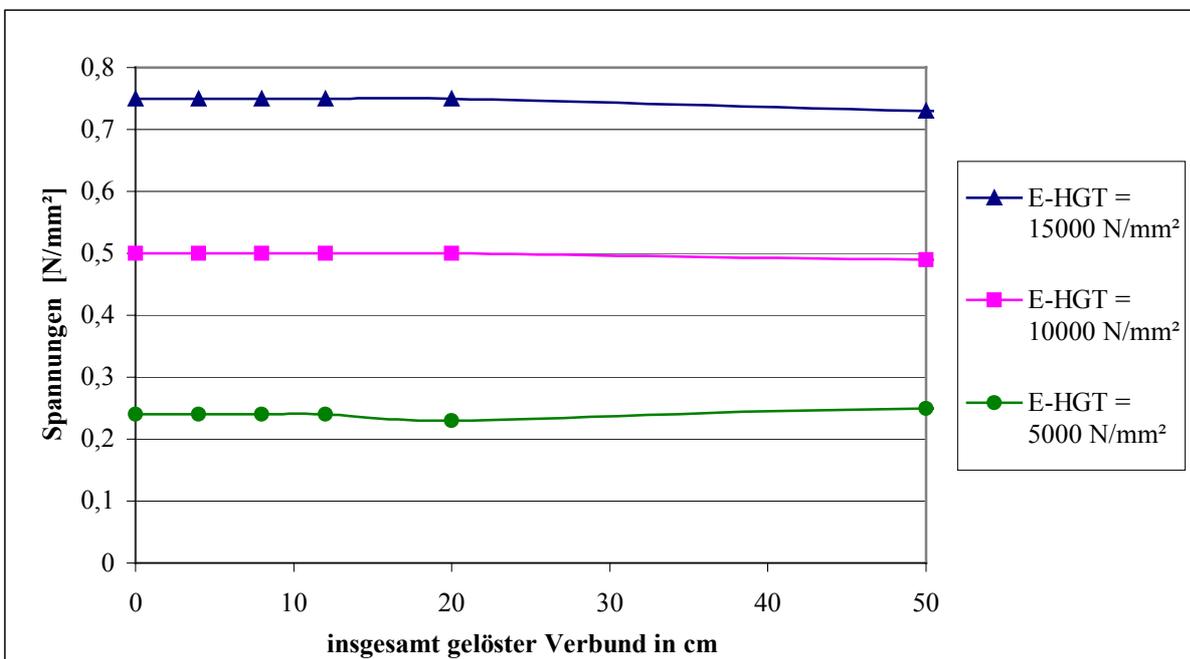
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **12 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt

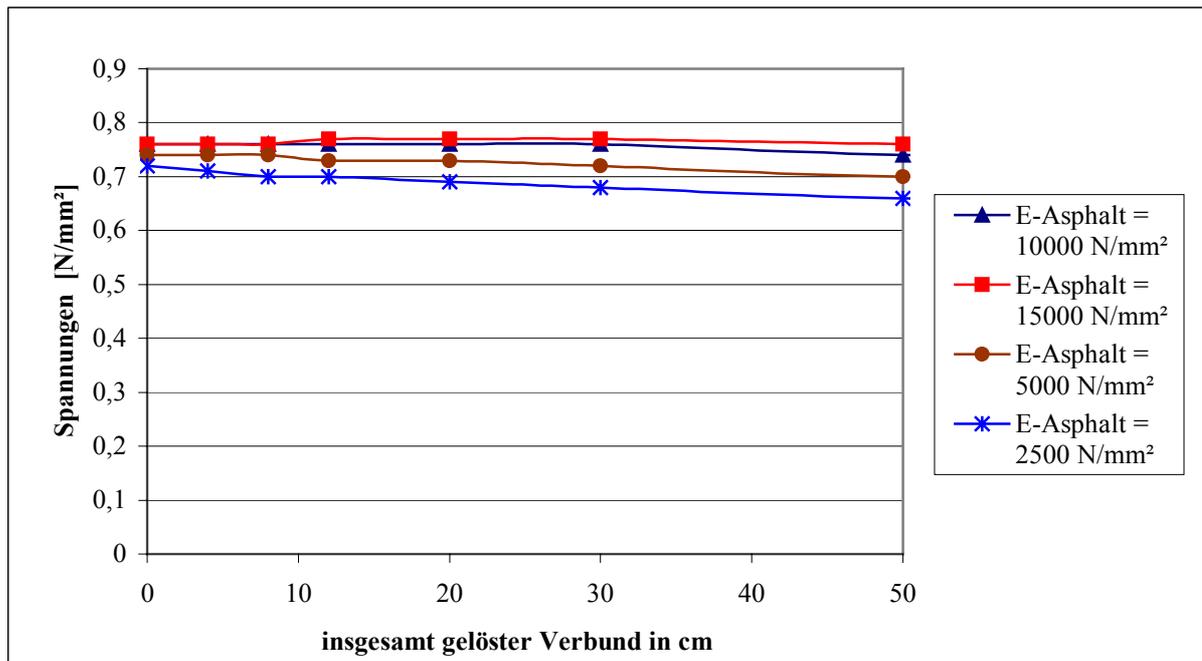
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **12 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT

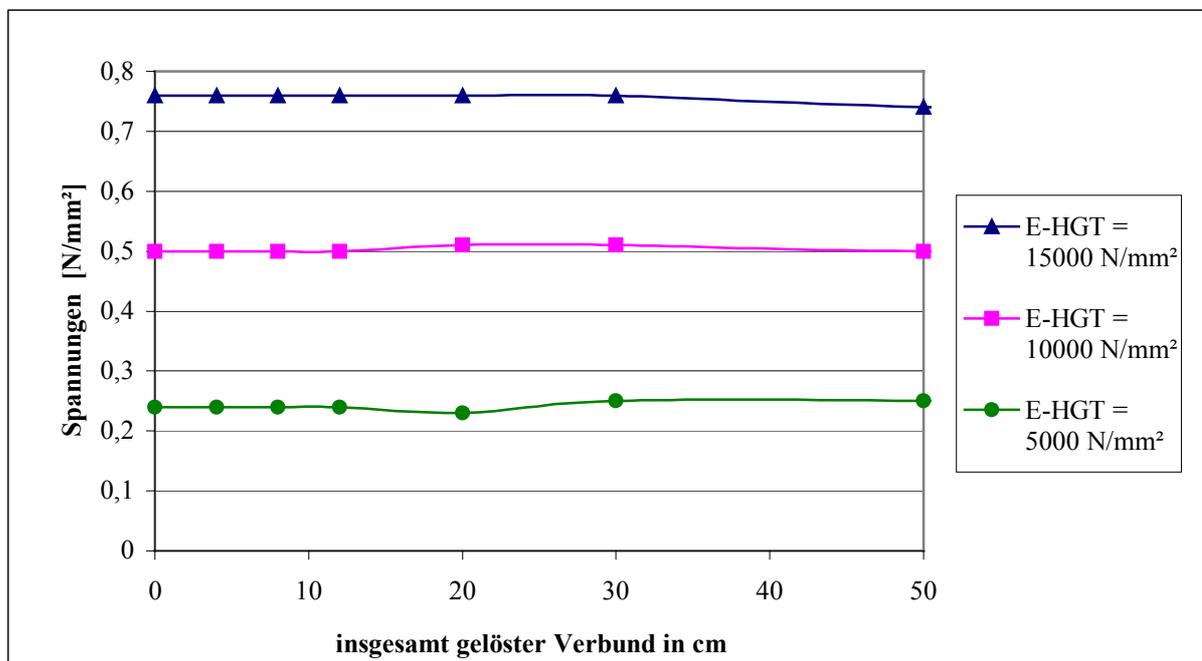
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes

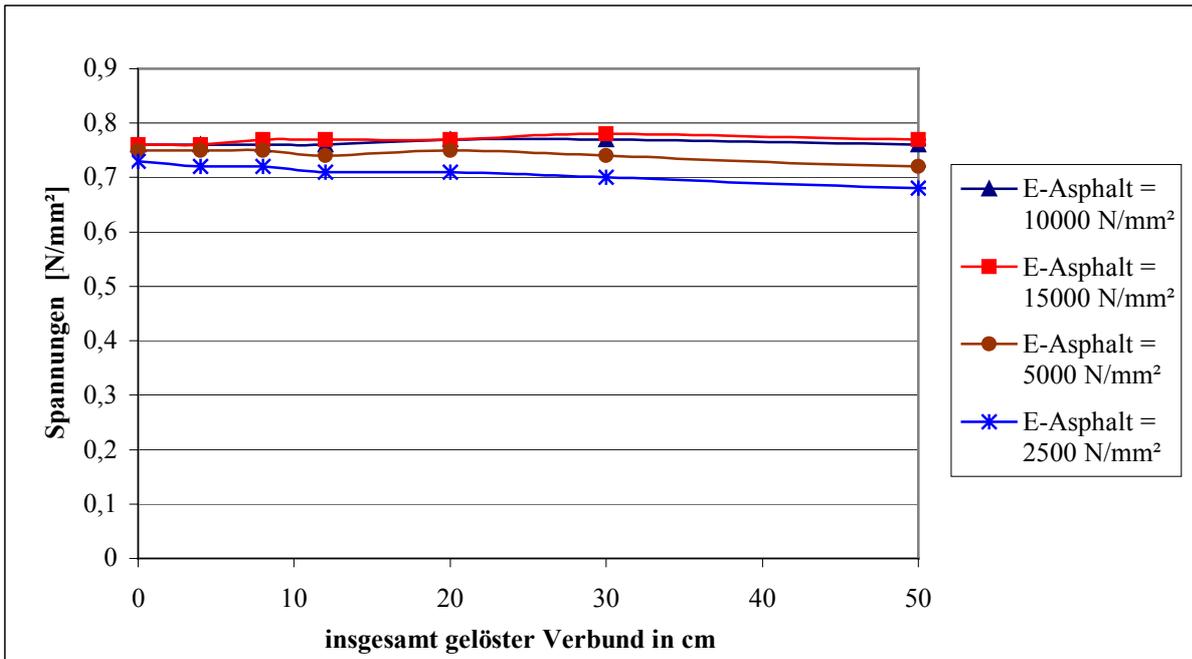
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT

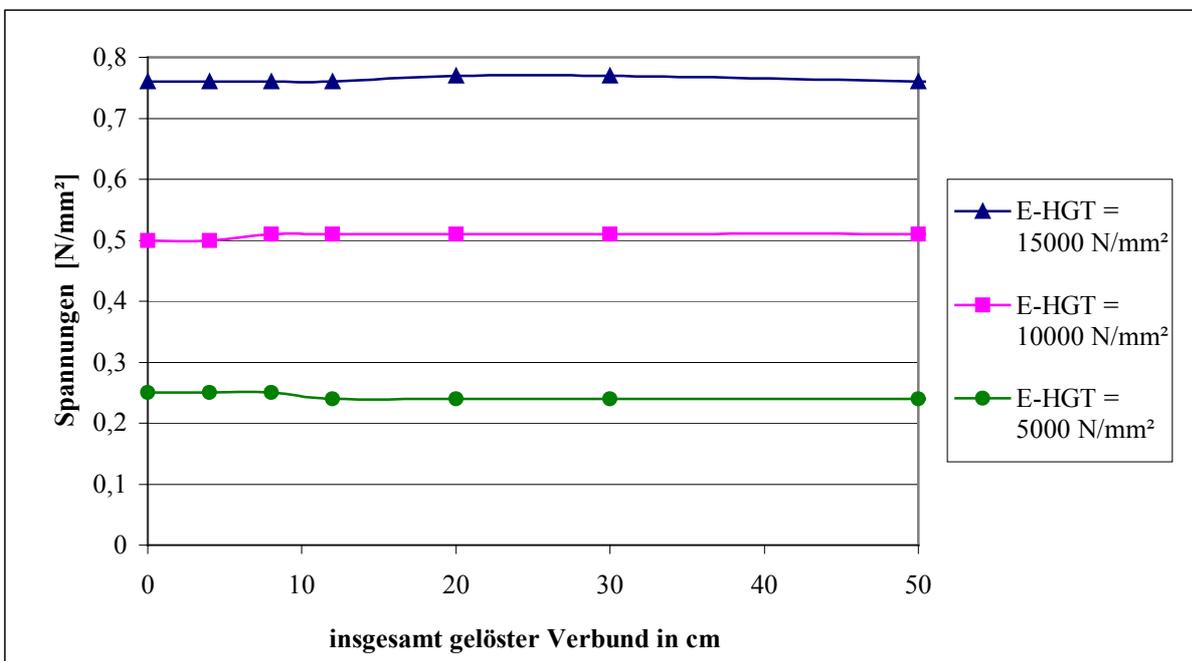
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphaltes

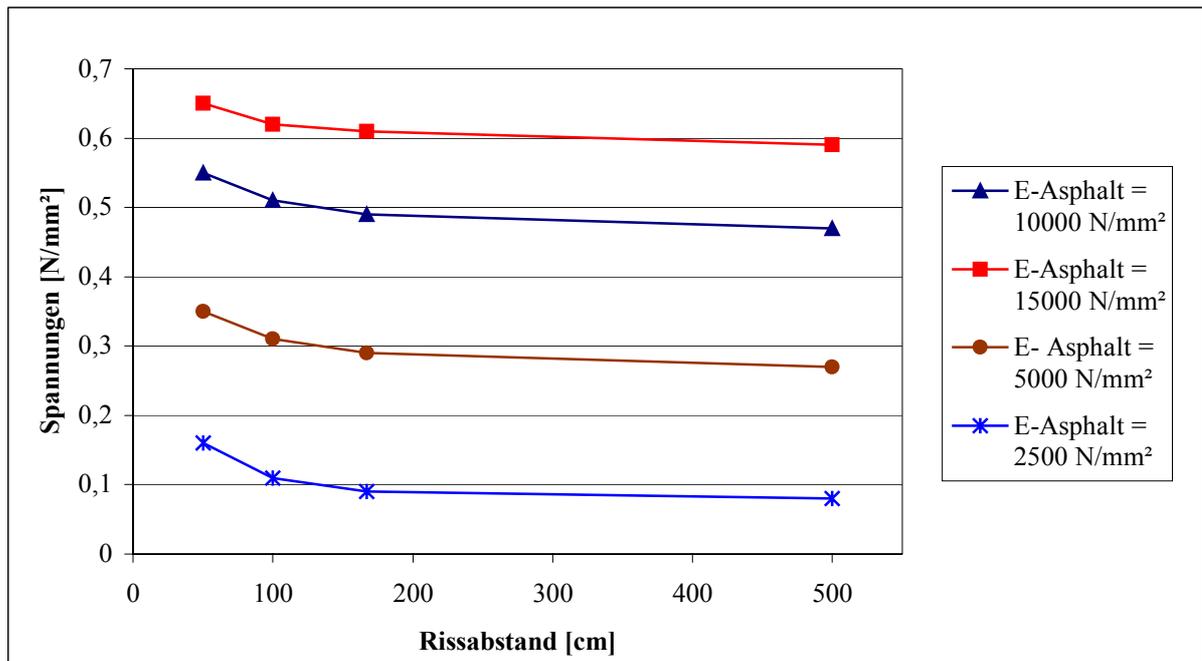
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



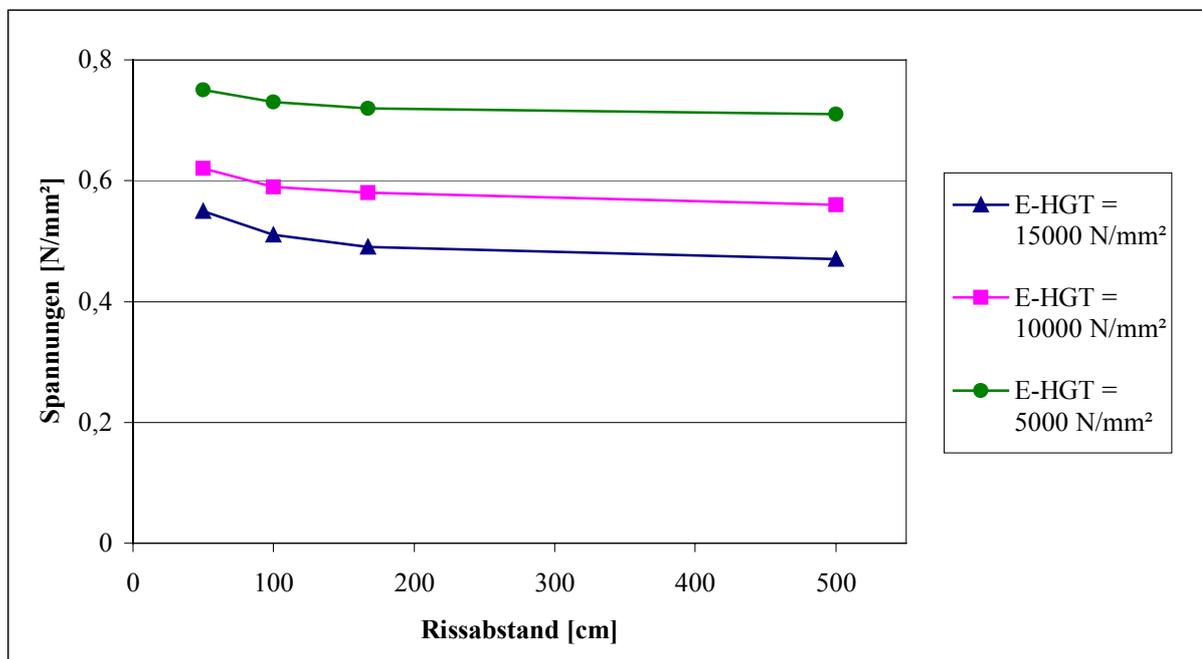
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT

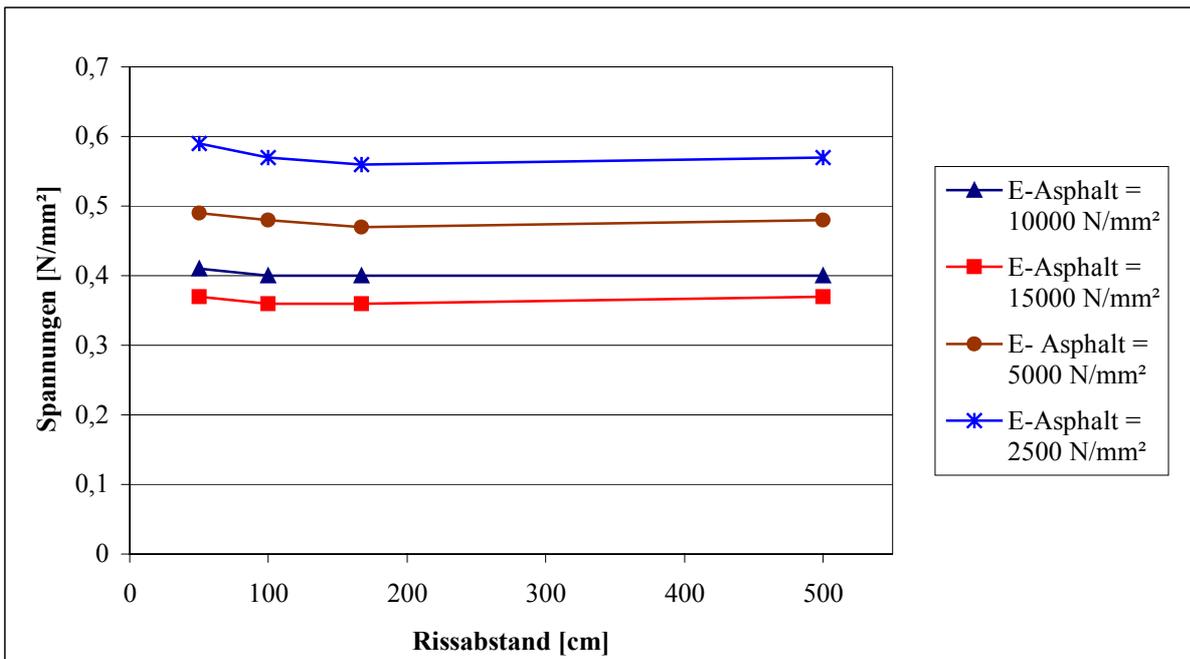
in Abhängigkeit von der Verbundlösung (0 bis 50 cm) unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit vom Rissabstand  $R$  unter **Verkehrsbelastung**



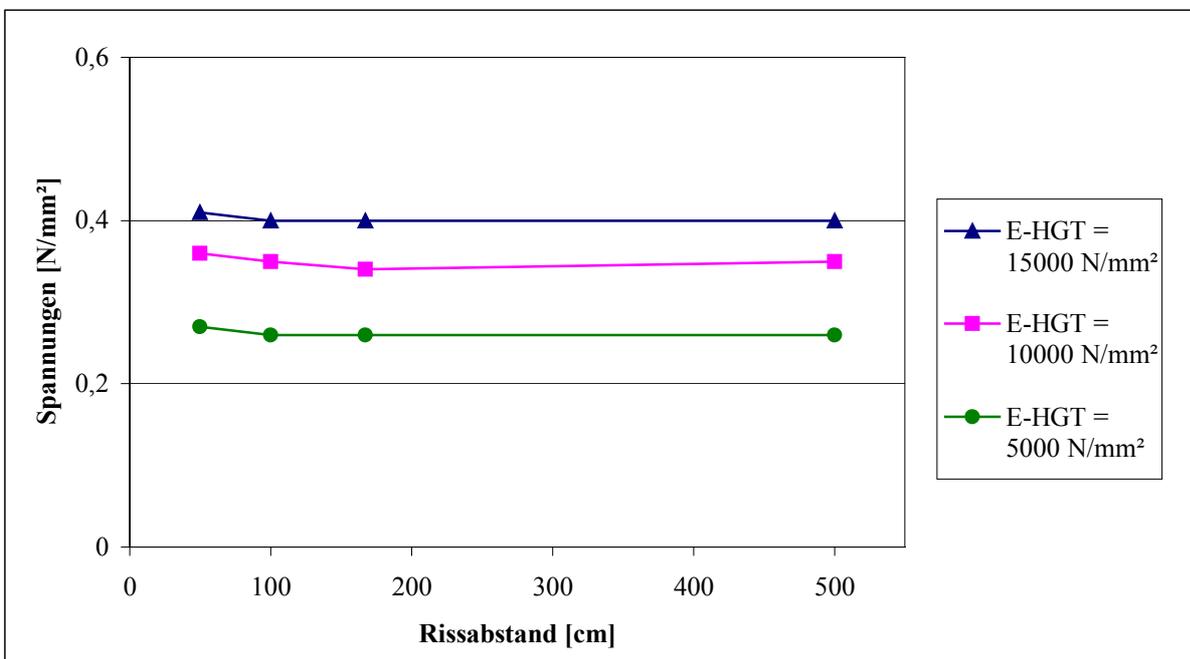
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand  $R$  unter **Verkehrsbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt

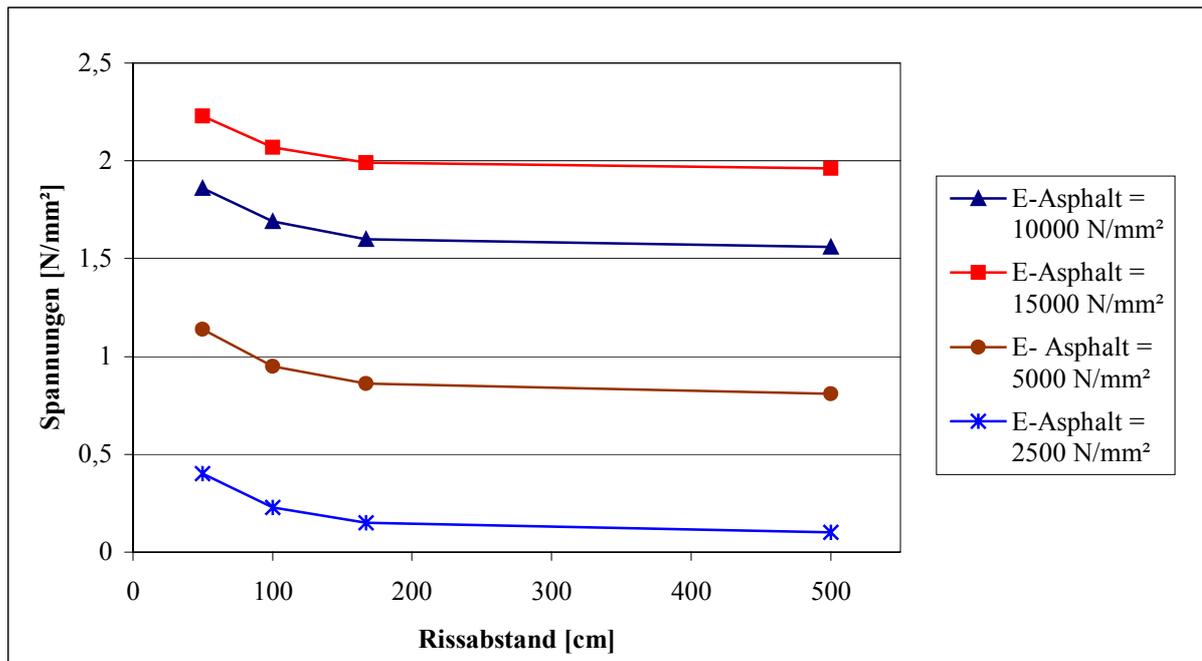
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



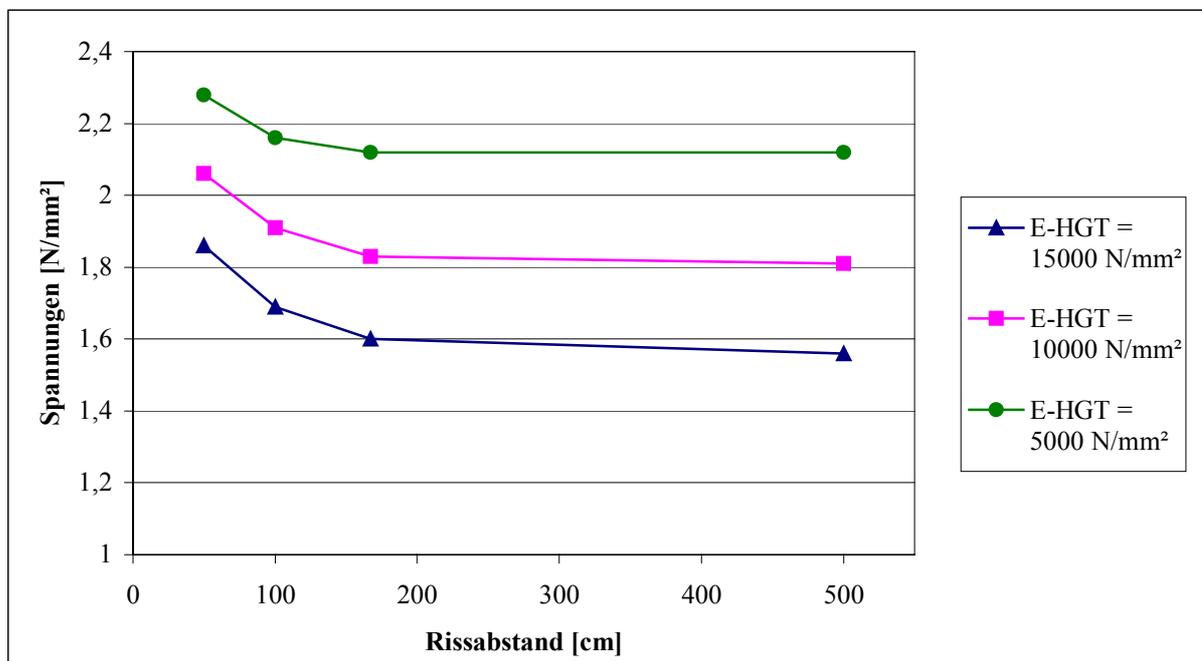
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT

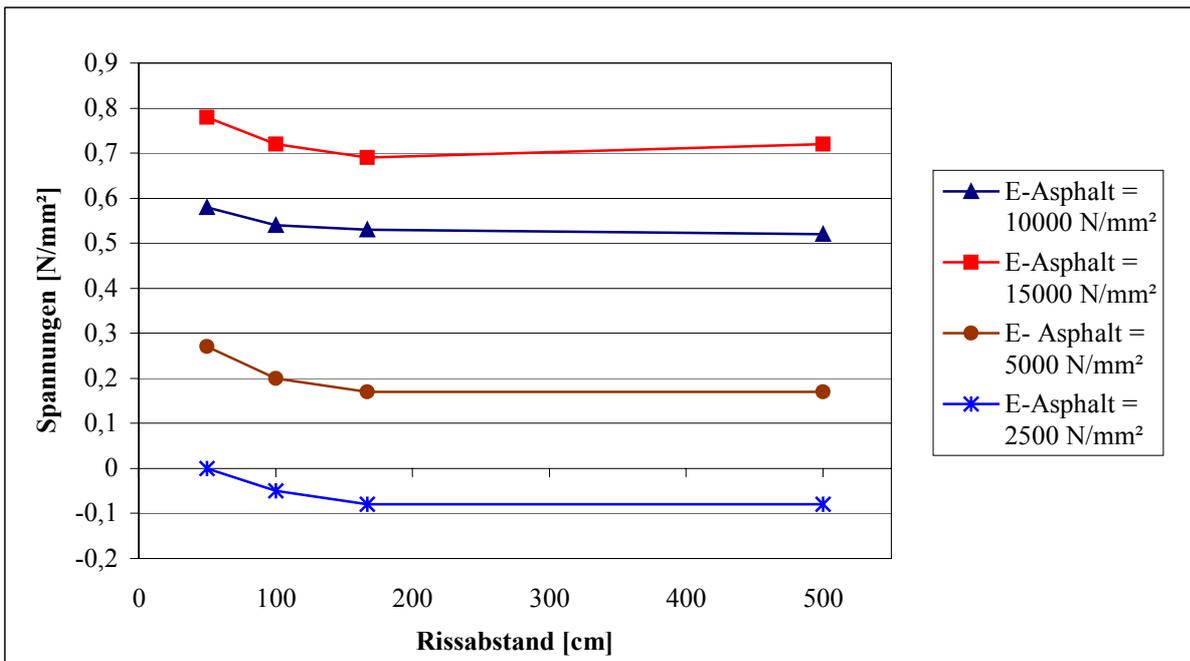
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



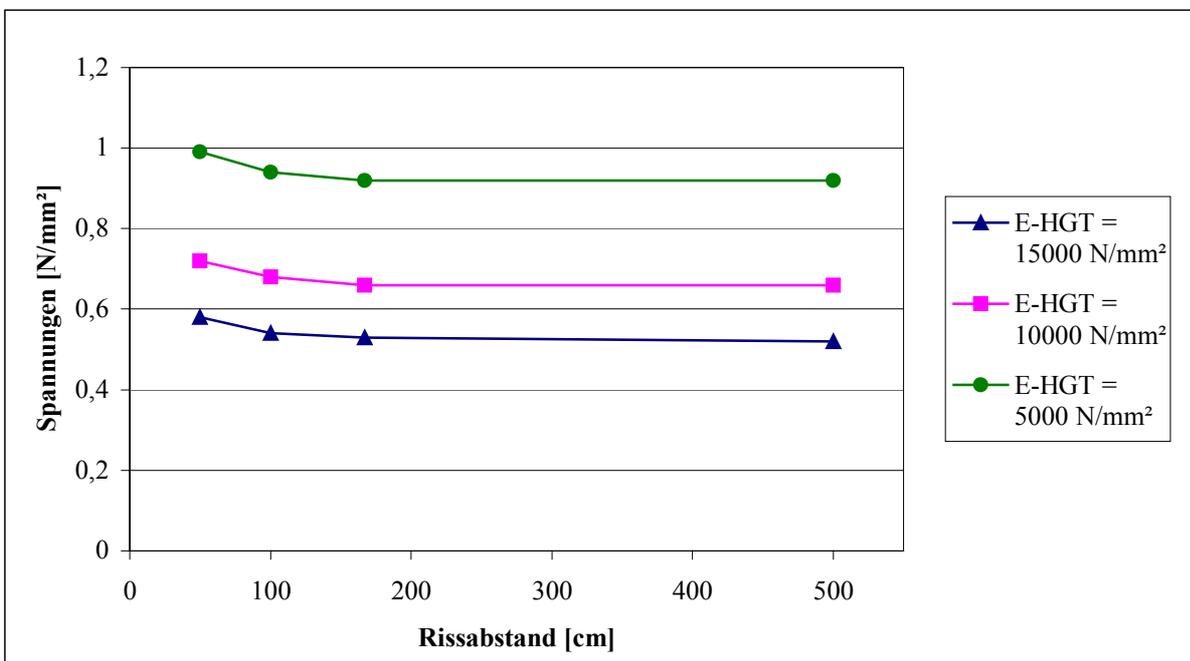
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



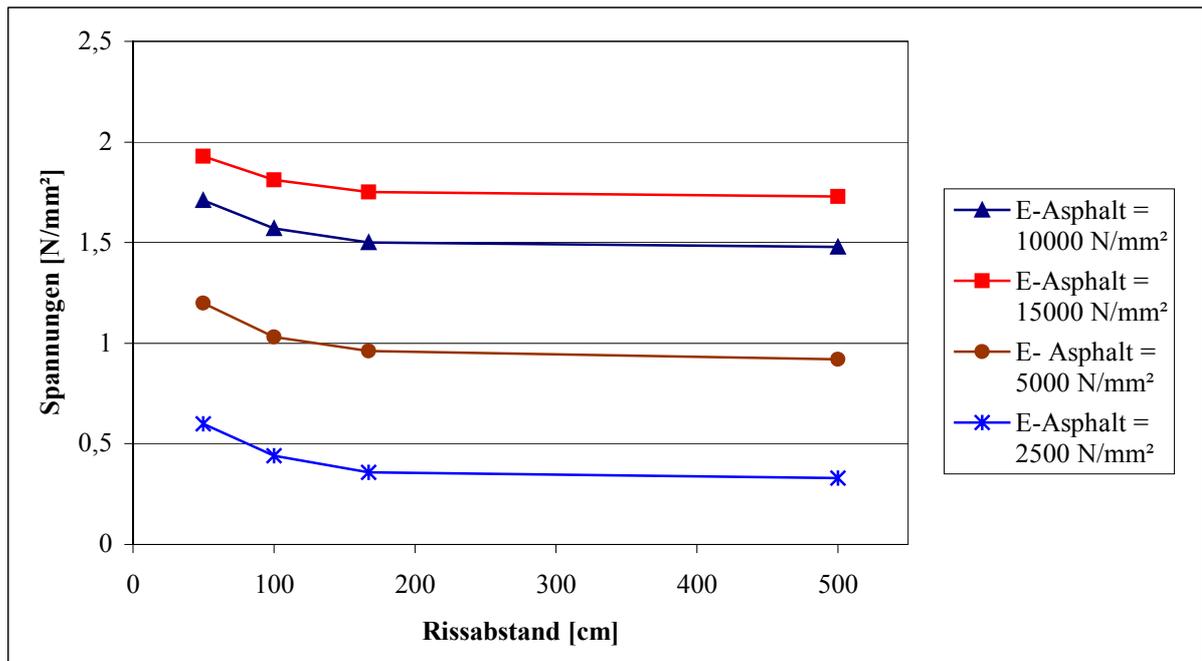
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



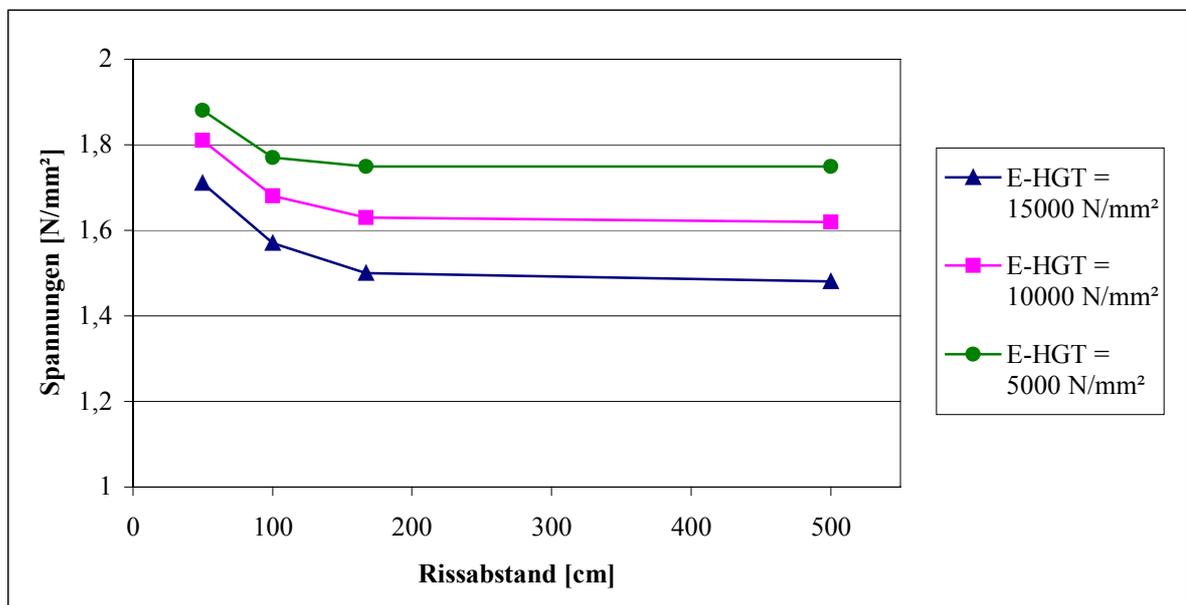
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



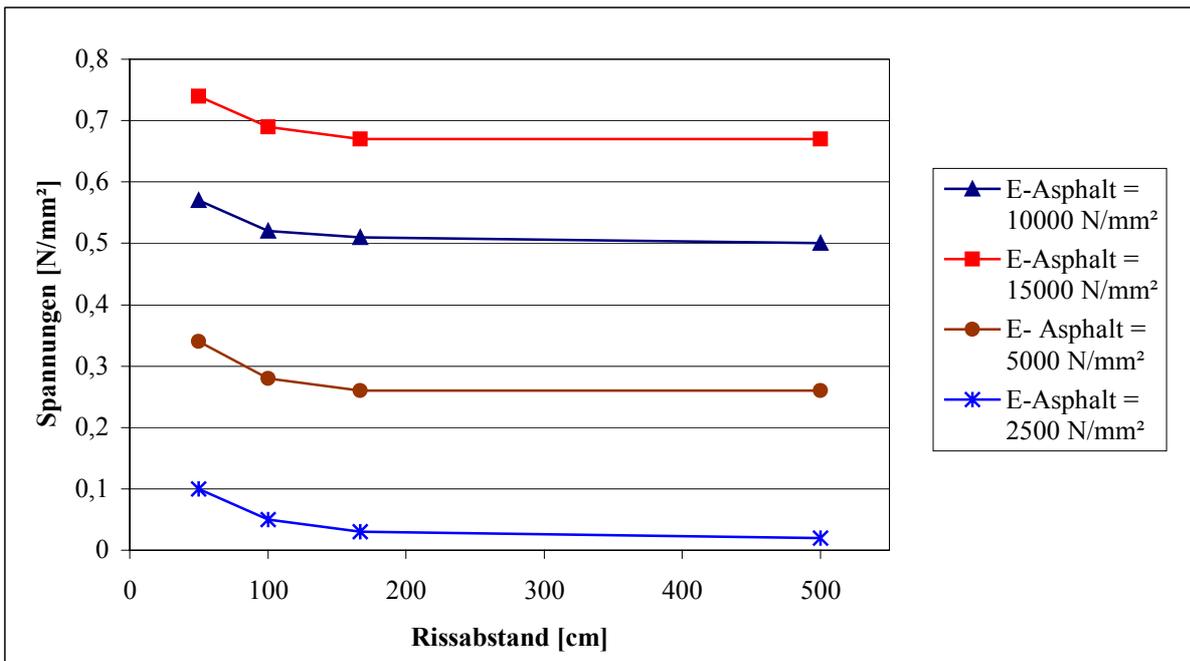
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



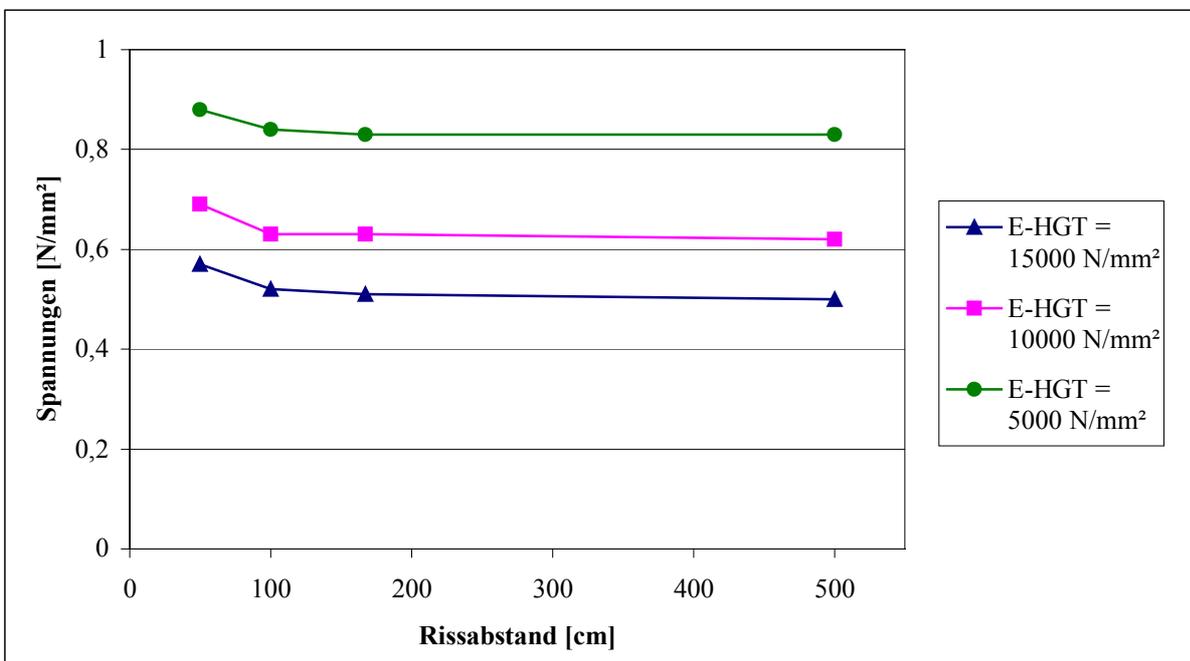
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



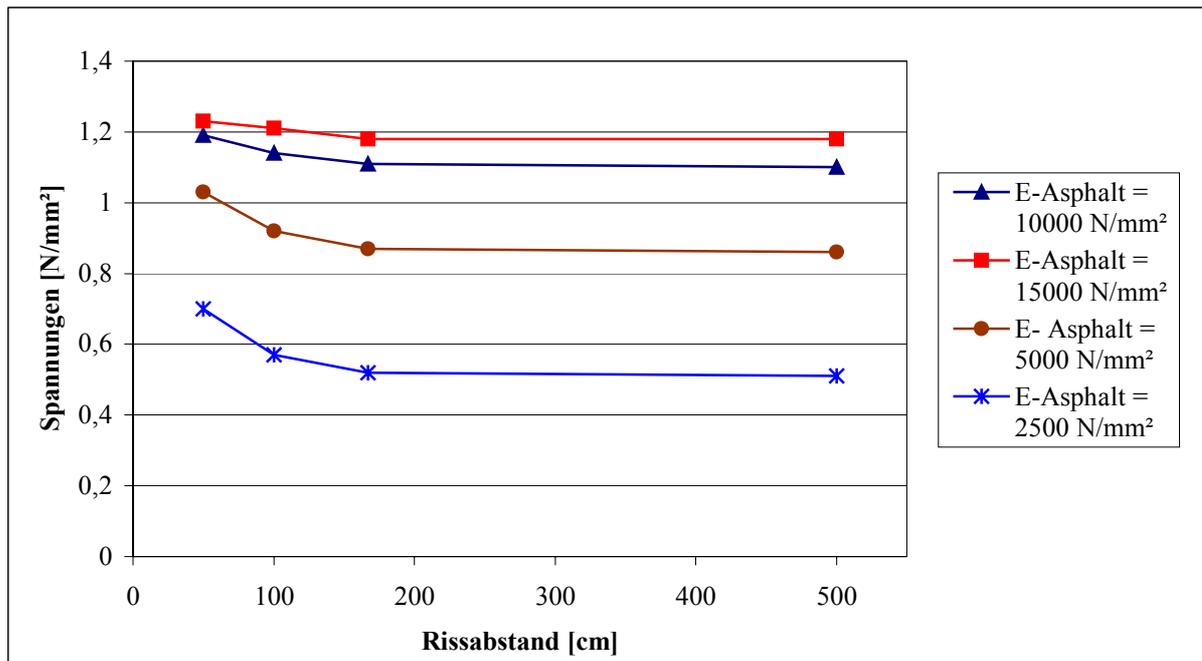
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



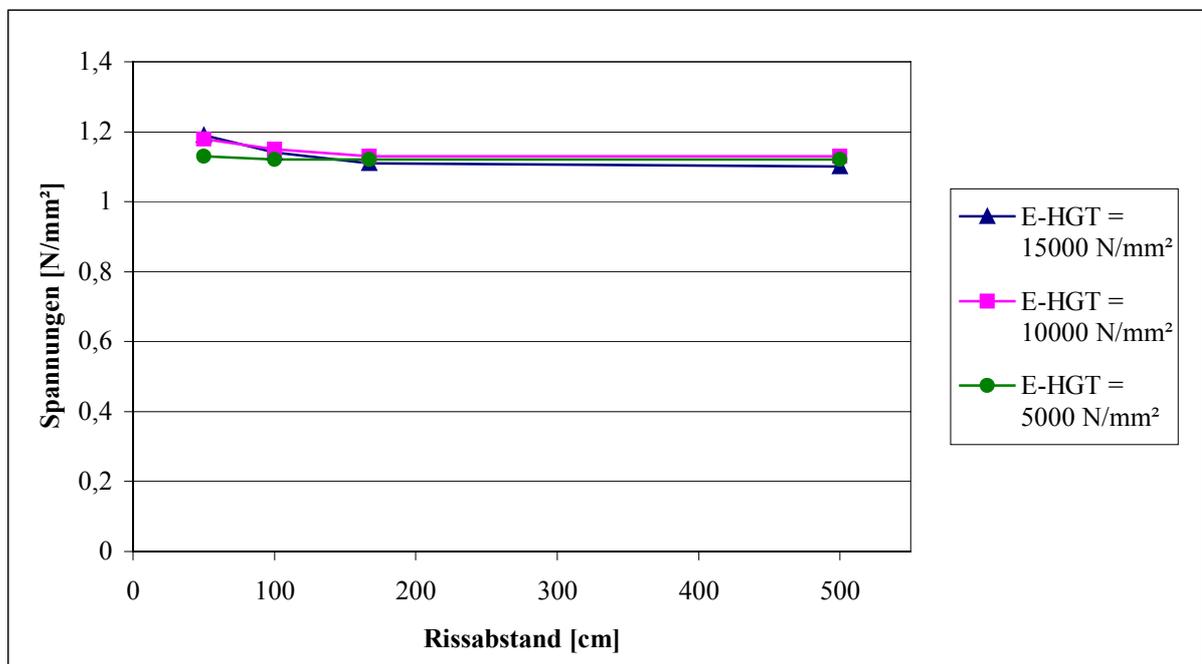
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



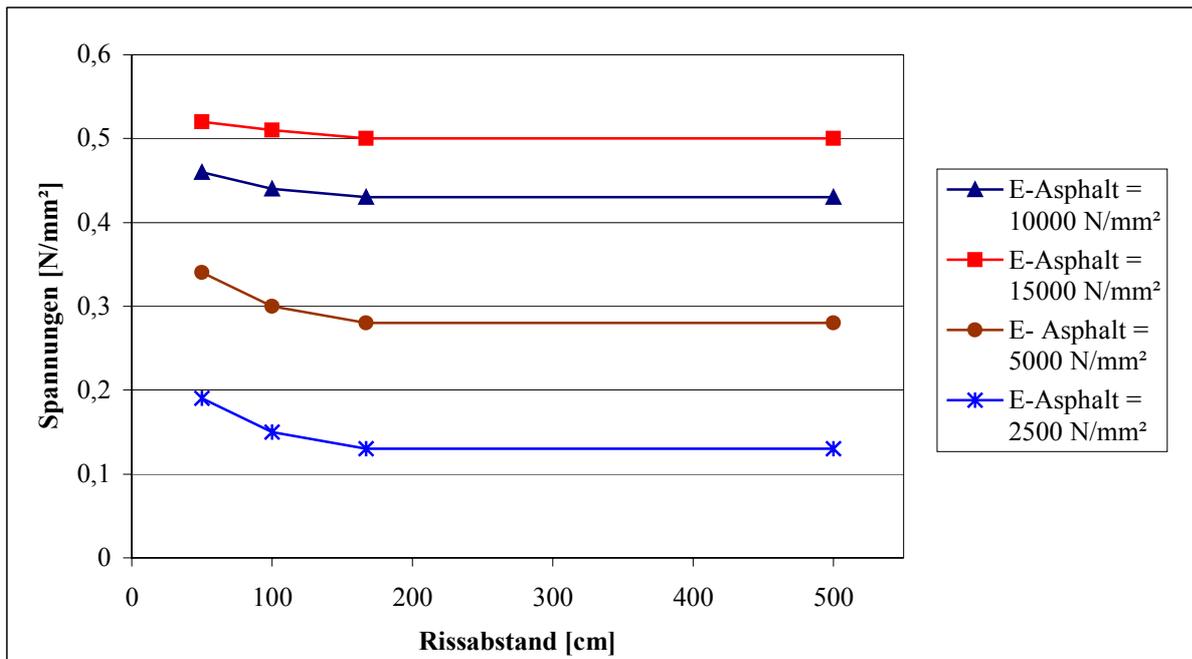
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



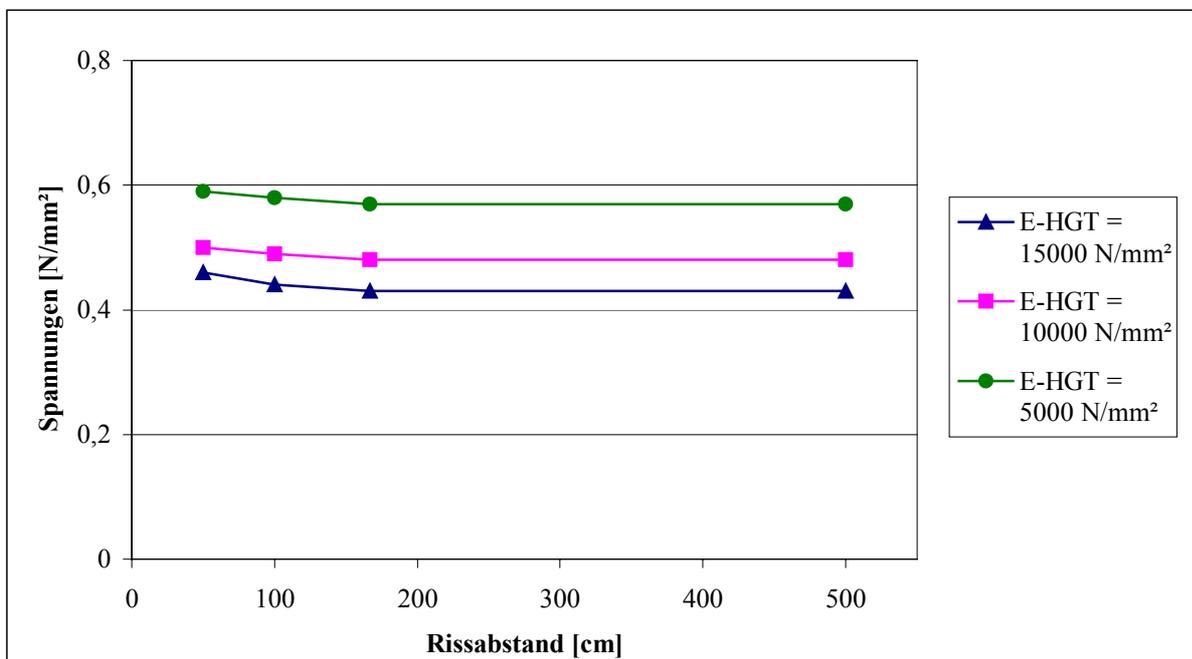
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



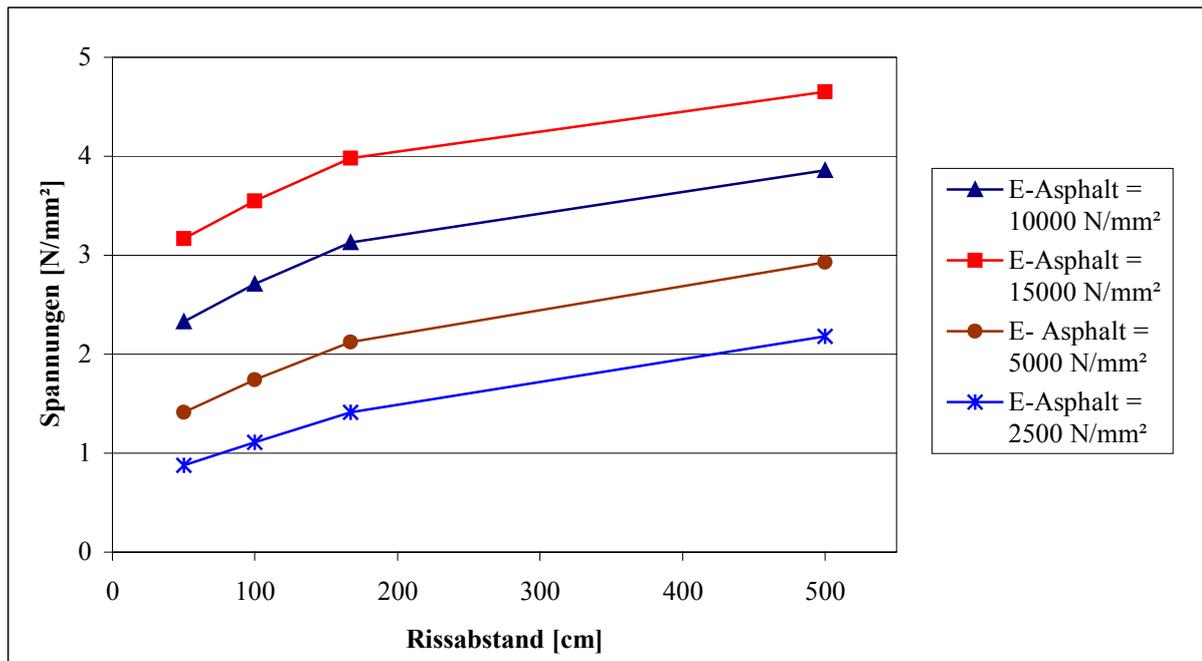
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



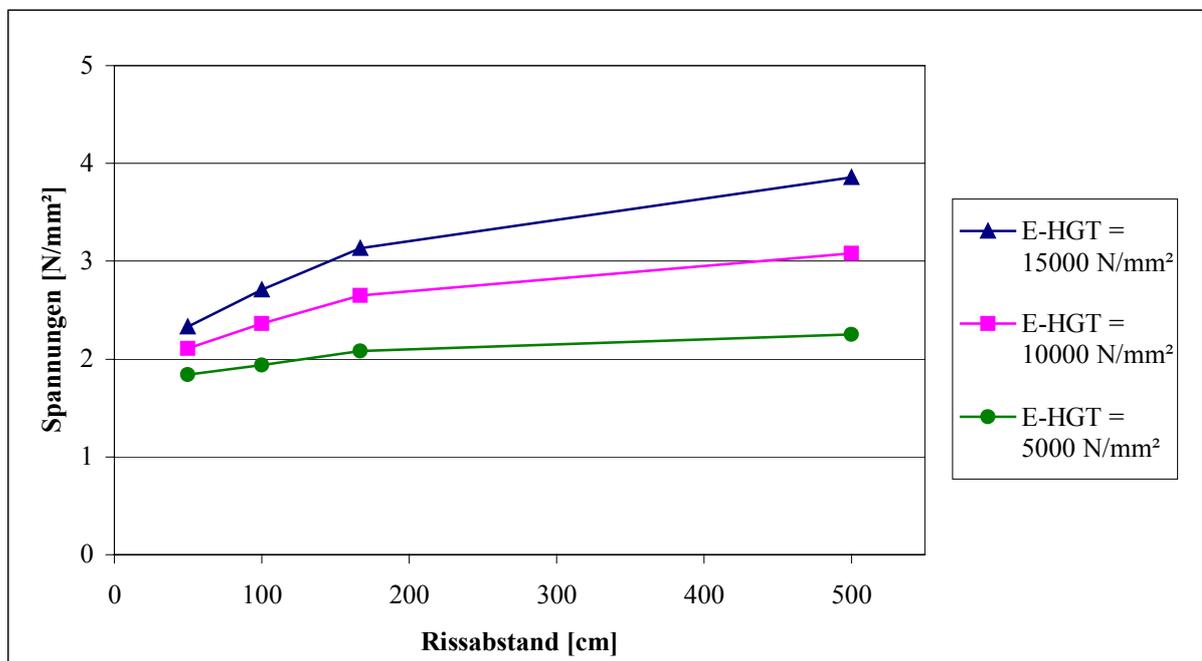
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



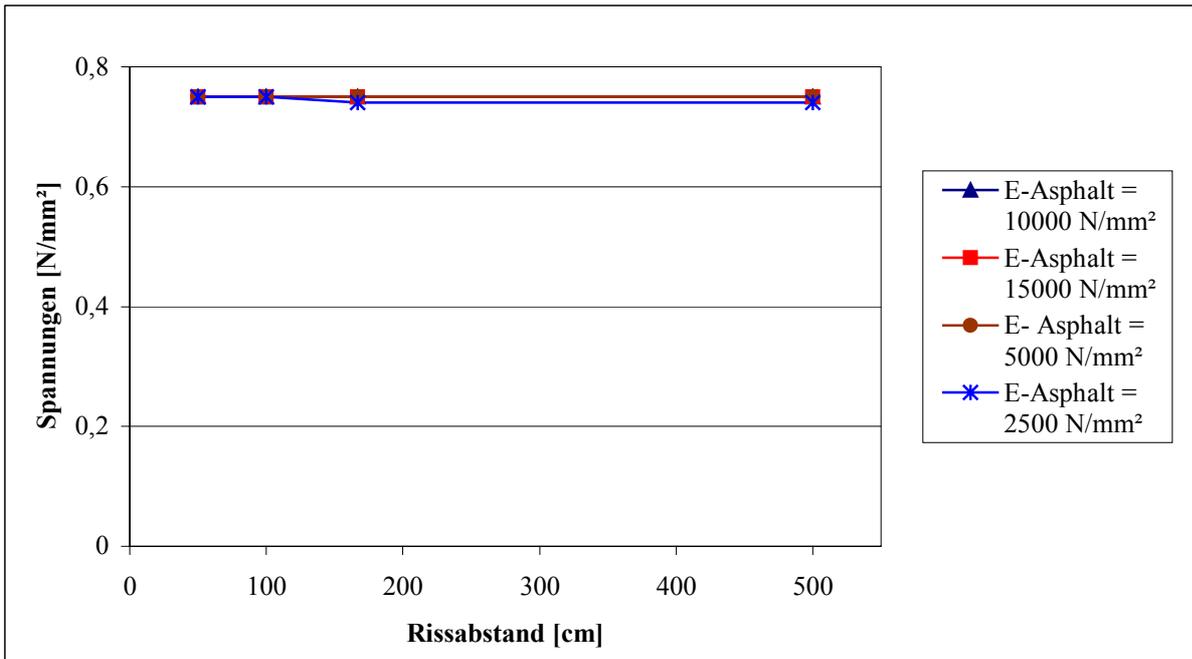
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Verkehrsbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



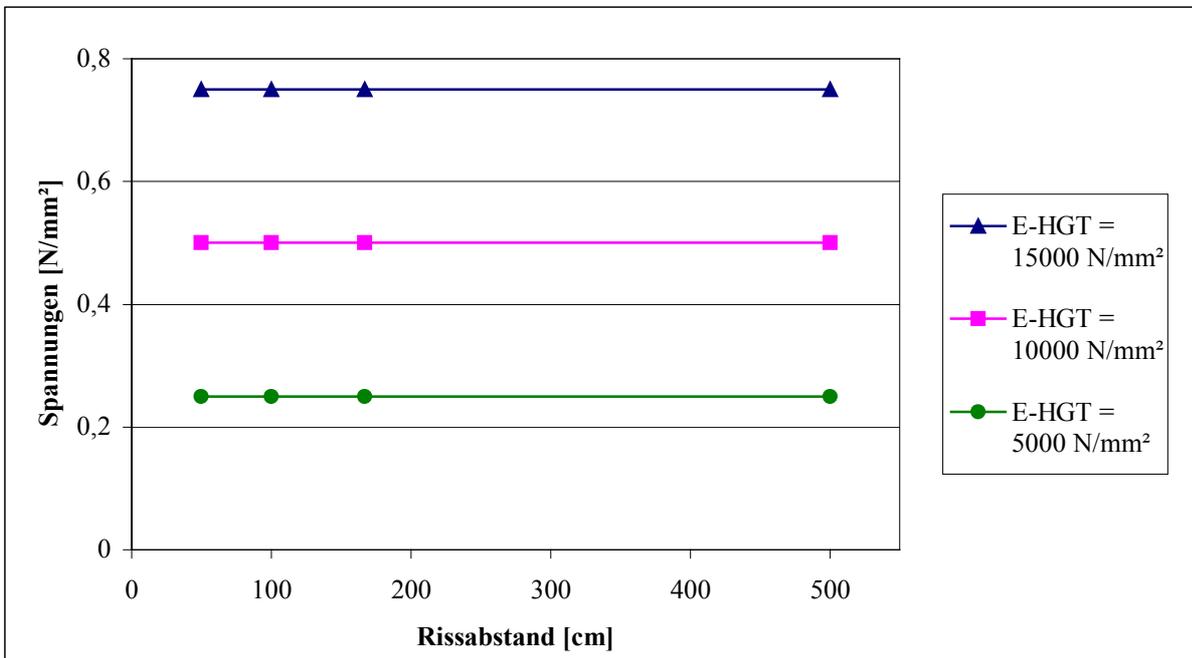
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 20 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt

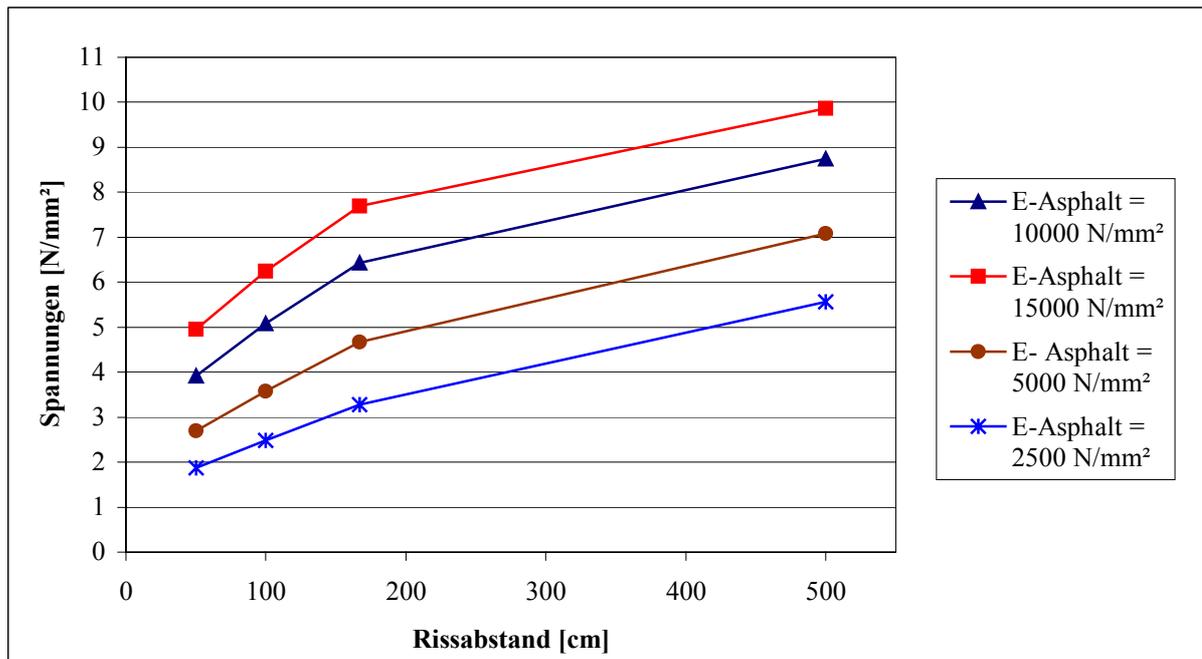
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



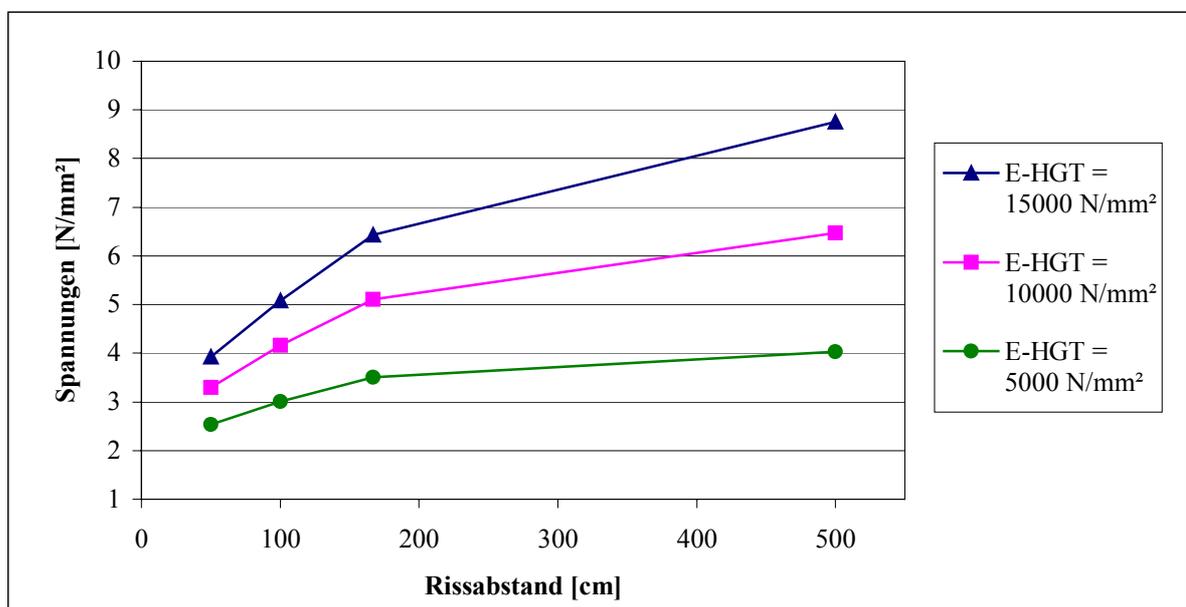
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite der HGT am Riss,**

für **20 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT

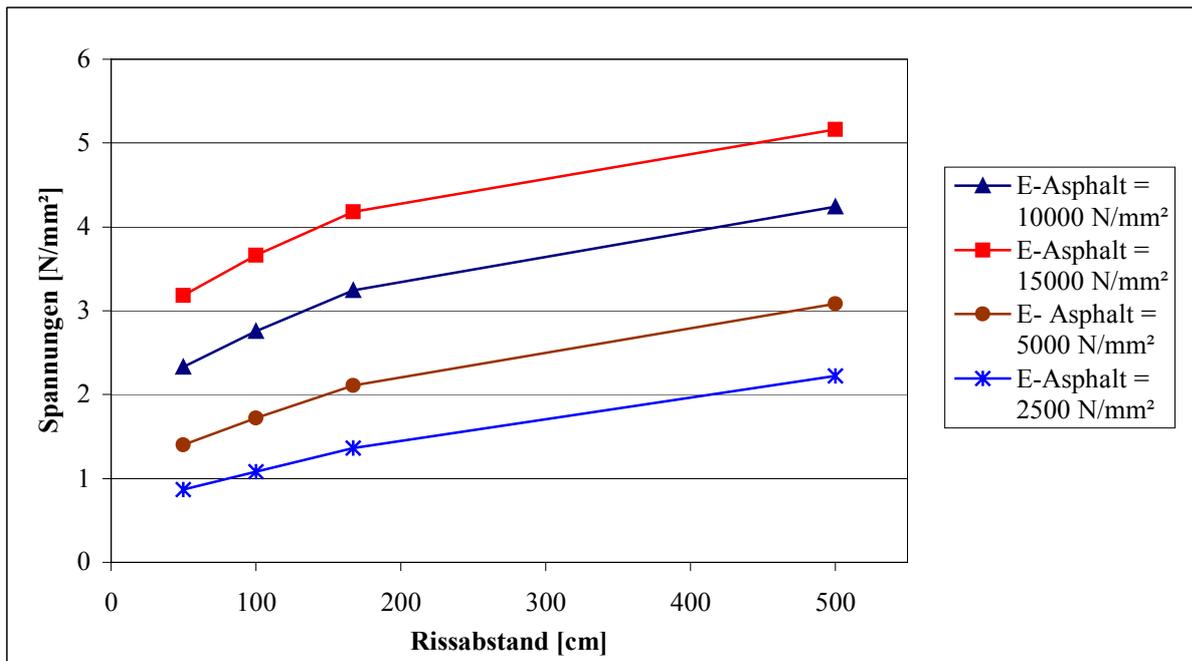
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



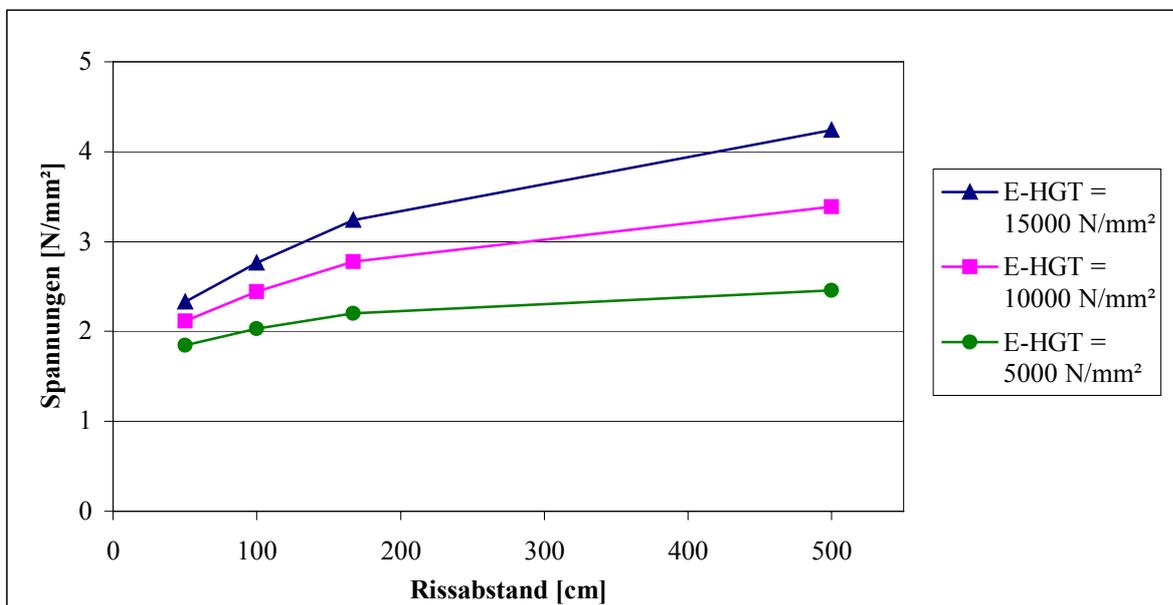
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für **12 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



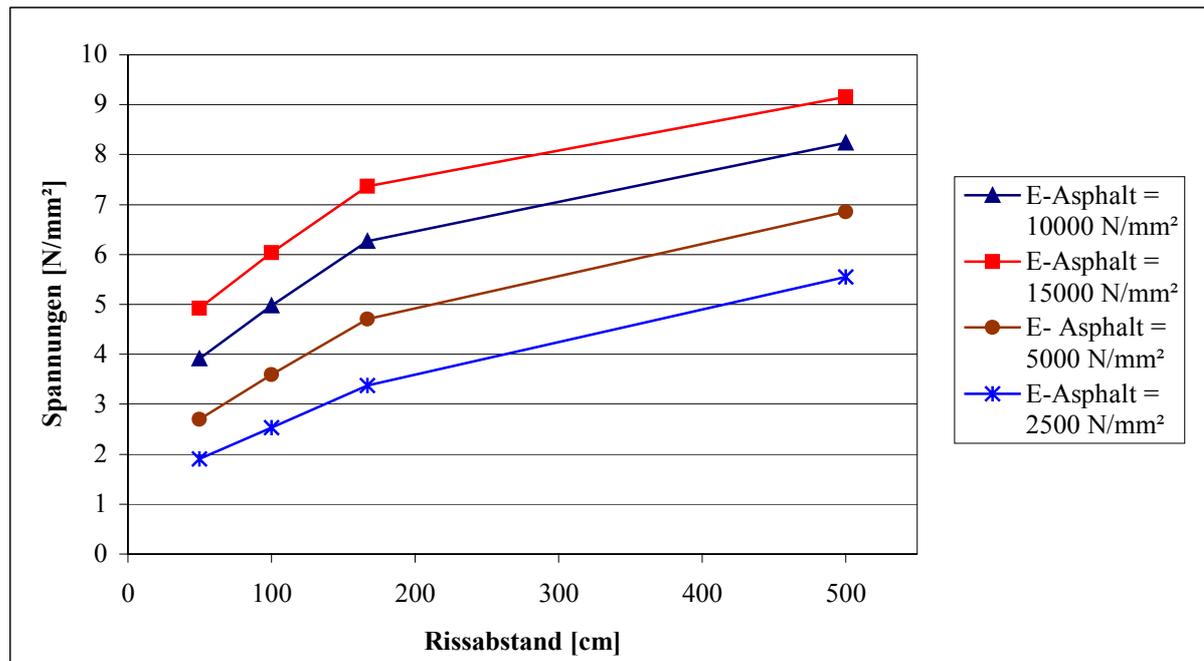
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für **12 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



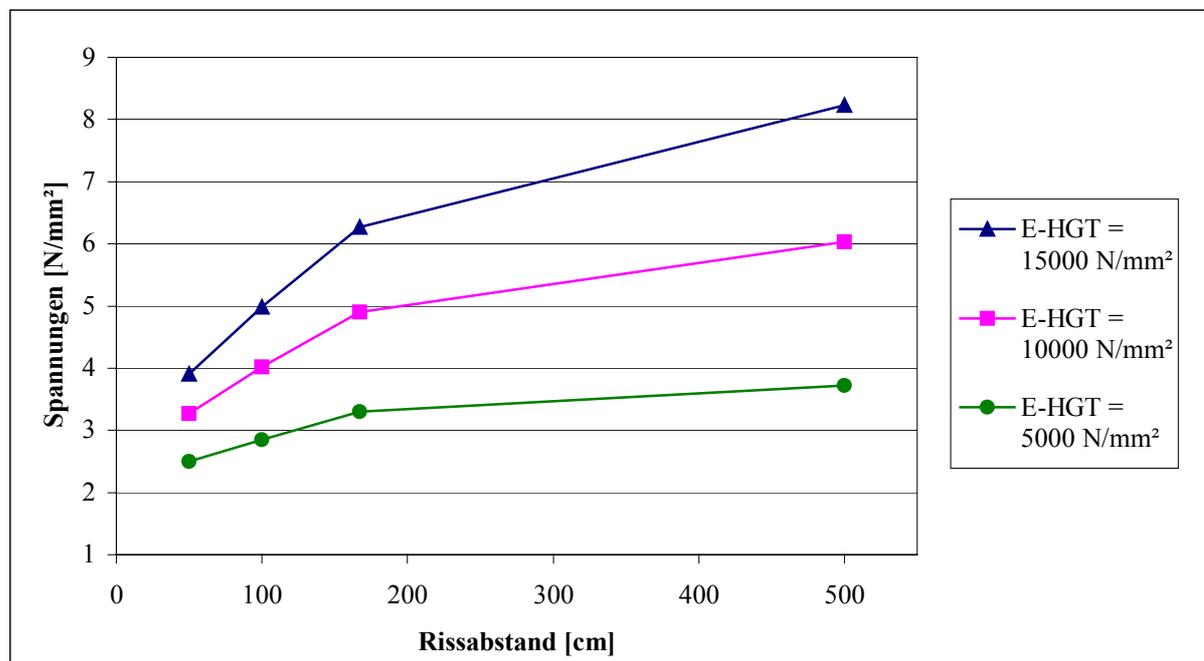
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



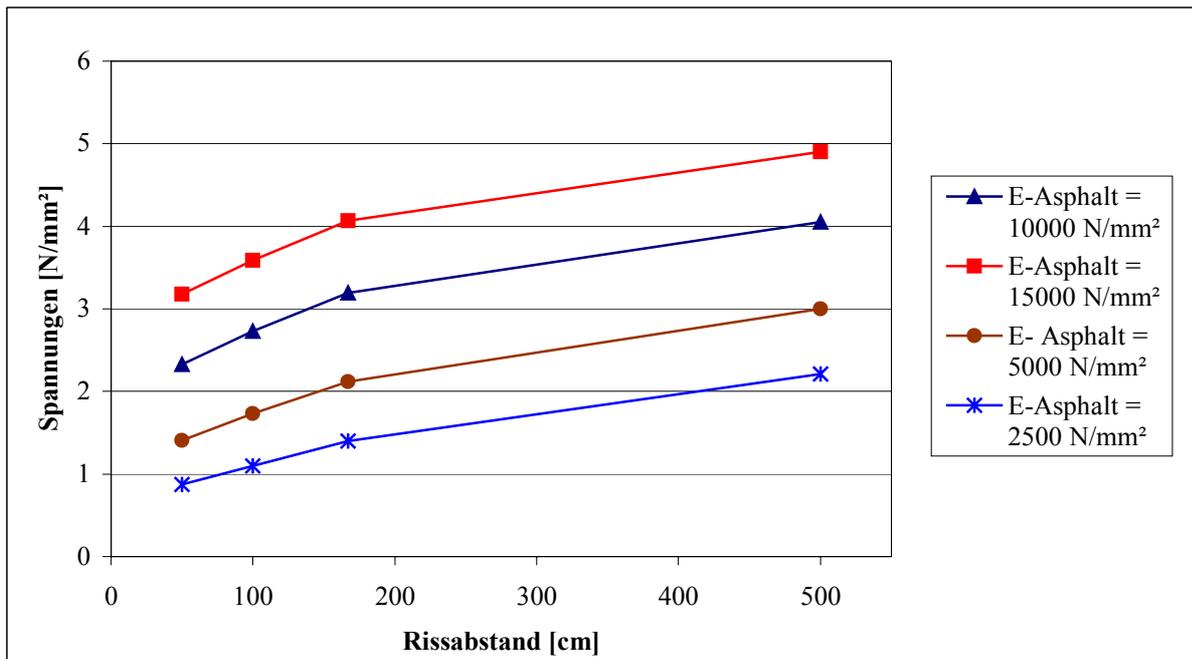
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 12 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



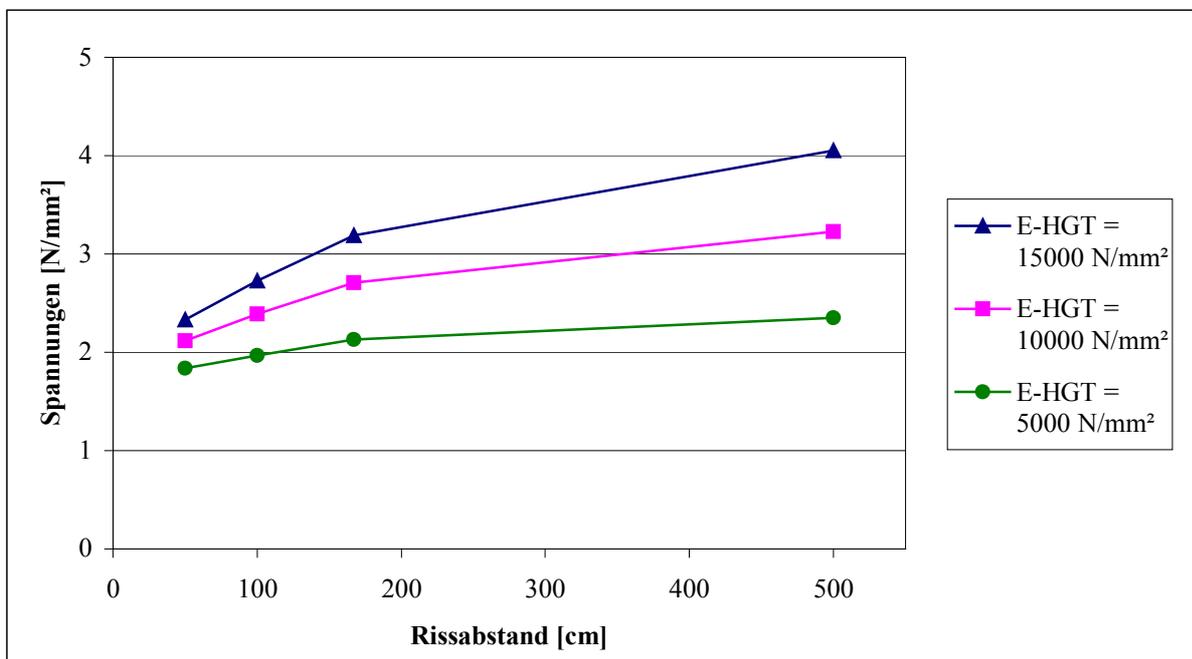
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



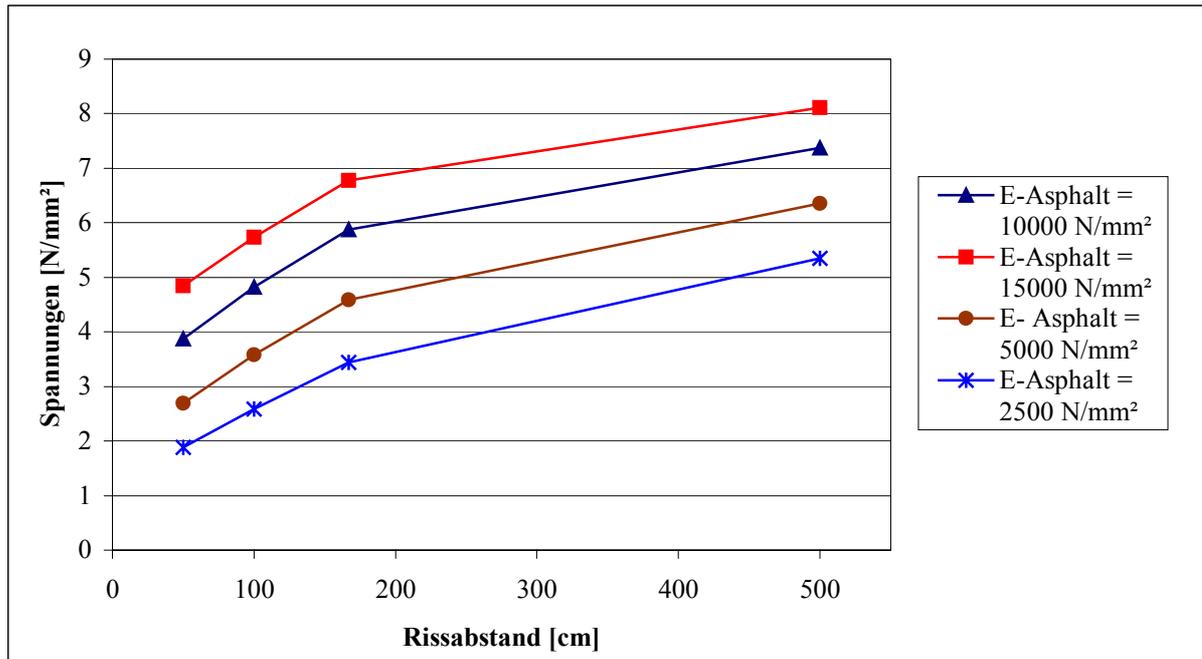
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



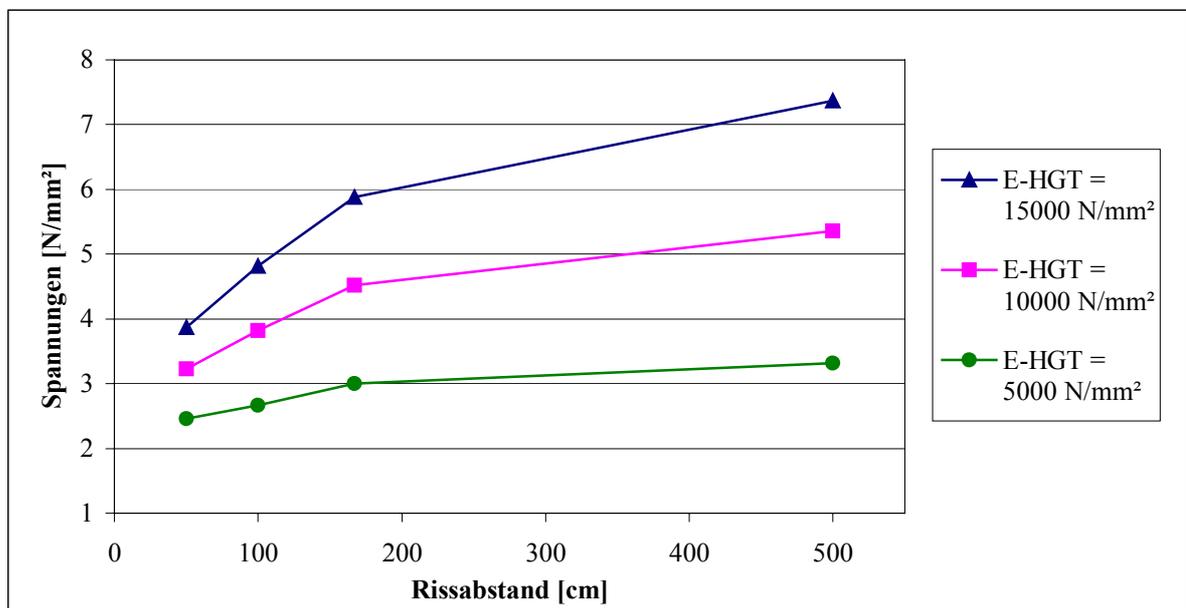
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



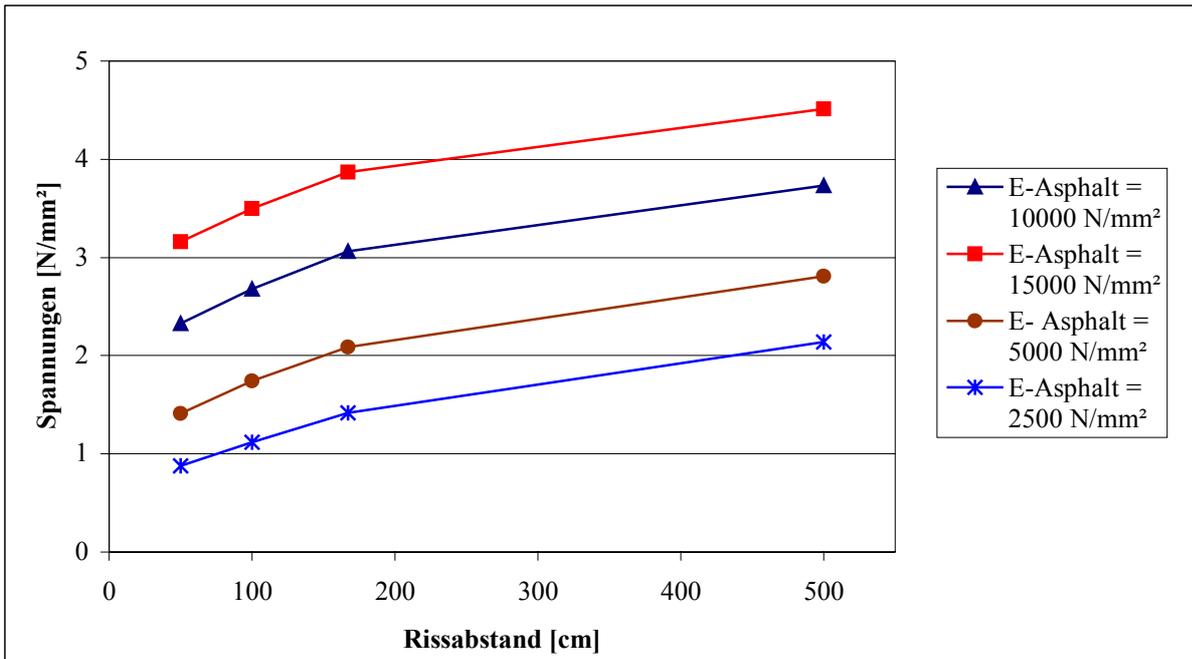
**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für 16 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



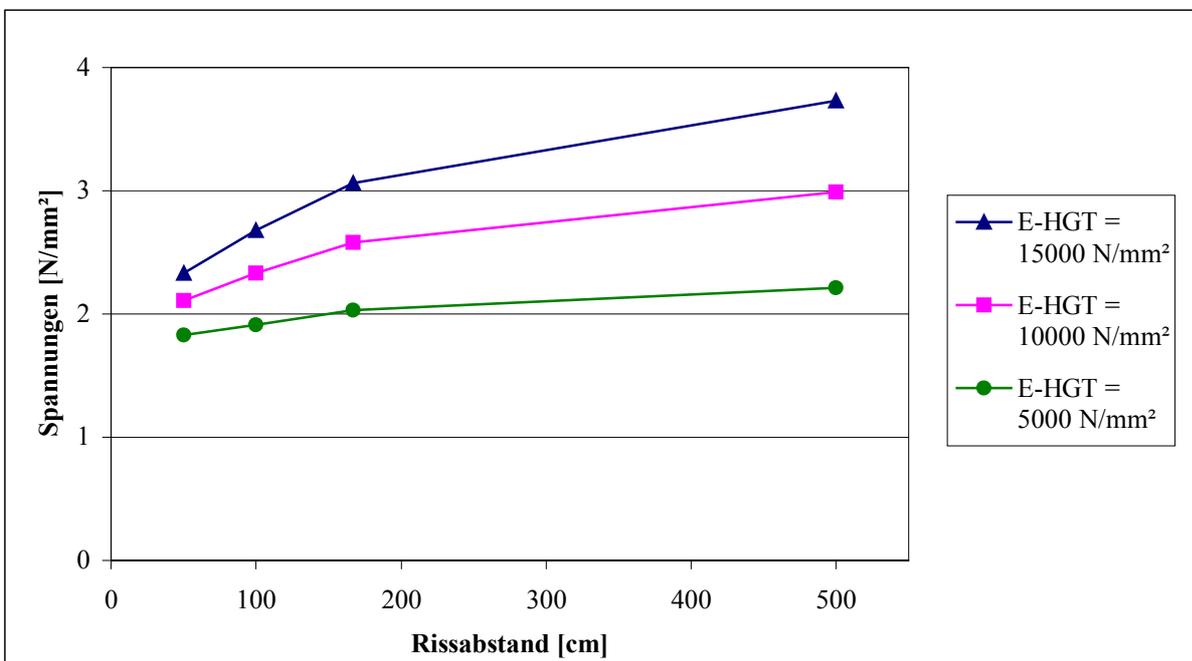
**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalt  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_x$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalt über dem Riss,**  
für 26 cm Asphalt auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln des Asphalttes  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**



**$\sigma_y$ -Spannungen an der Unterseite des Asphalttes über dem Riss,**  
 für **26 cm Asphalt** auf 15 cm HGT für verschiedene E-Moduln der HGT  
 in Abhängigkeit vom Rissabstand R unter **Temperaturbelastung**