

Thesen der Dissertation
Modellierung bleibender Verformungen des Asphalts mit einem hypoplastischen Stoffgesetz der Bodenmechanik
von Dipl.-Ing. Gajári György

Temperaturbedingung

Die Erscheinung der Spurbildung kann nur bei hohen Temperaturen ($\geq 35 - 40^\circ C$) auftreten. Das Modell und die Untersuchungsergebnisse gelten nur für die genannten Temperaturen.

Modellbildung

1. Die Spurbildung der Asphaltstraße ist mit dem Phänomen der „zyklischen Mobilität“ der fluidhaltigen granularen Stoffe unter zyklischer Belastung erklärbar.
2. Das erweiterte hypoplastische Stoffgesetz aus Karlsruhe, ergänzt mit dem Porenfluiddruck und der Viskosität des Bitumens, ist zur numerischen Simulation des volumetrischen Verhaltens, der zyklischen Mobilität und der akkumulierten Verformungen des teilgesättigten Walzasphaltes geeignet. Die zustandsunabhängigen hypoplastischen Stoffparameter können am Korngerüst unter Laborbedingungen bestimmt werden.

Überprüfung der Modellbildung

3. Monotone triaxiale Kompressionsversuche beweisen, dass die Stoffeigenschaften des Walzasphaltes, wie die Steifigkeit, der Reibungswinkel und die Dilatanz, vom mittleren effektiven Druck (Barotropie) und von der Dichte (Pyknotropie) des Korngerüstes abhängen.
4. Zyklische Einzelscherversuche an einem Walzasphalt mit normalem Straßenbaubitumen beweisen die druckabhängige Steifigkeit und die erhöhte Steifigkeit im Bereich der kleinen Dehnungen nicht nur für hohe, sondern auch für mittlere Temperaturen.

Folgen

5. Mit dem Gyratorverdichter unter zyklischem Scheren hergestellte Probekörper unterschiedlichen Bitumengehalts beweisen die Existenz des optimalen Bitumengehalts, bei welchem der Hohlraumgehalt des Korngerüstes ein Minimum hat, d.h., der Asphalt am besten verdichtet werden kann.
6. Im Asphalt über dem optimalen Bitumengehalt entstehen im Spurbildungstest größere Spurtiefen als im Asphalt mit dem Bindemittelgehalt bis zum Optimum.
7. Während des Verdichtungsvorganges mit dem Gyrator ist durch Messung der Porenfluidüberdruck im Mörtel nachweisbar, wenn der Asphalt Bitumen über dem optimalen Wert enthält.
8. Wenn dies so ist, zeigt die Messung bei hoher Temperatur mit dem zyklischen Einzelschengerät trotz Verdichtung die Verringerung der Schubsteifigkeit. Durch numerische Simulation ist das Versuchsergebnis mit dem Porenfluidüberdruck im Einklang mit der Theorie des gewählten physikalischen Modells erklärbar.

9. Die zyklische Mobilität ist unter den Bedingungen der realen wie der numerischen, kraftgeregelten zyklischen triaxialen Kompression herstellbar, wenn der Asphalt eine hohe Temperatur hat, Bitumen über dem Optimum enthält und wenn der durchschnittliche Druckanteil des Spannungszustands groß genug ist.
10. Bei der mit hoher Temperatur durchgeführten kraftgeregelten triaxialen Kompression liegt die akkumulierte deviatorische Dehnung um eine Größenordnung höher, wenn der Bitumengehalt des Asphalts über dem Optimum liegt und wenn der durchschnittliche Druckanteil des Spannungszustands groß genug ist. Das Ergebnis der numerischen triaxialen Kompression steht im Einklang damit.

Viskositätseinfluß

11. Die realen triaxialen Kompressionsversuche hoher Temperatur und auch die numerischen zeigen, dass die Steifigkeit in der kraftgeregelten Kompression viel stärker von der Belastungsfrequenz abhängt als die in der weggeregelten. Beim kraftgeregelten Versuch wird die Steifigkeit neben der Viskosität auch durch die Größe der Dehnungsamplitude und unter Umständen noch durch die zyklische Mobilität beeinflusst.

Praxis - Laborpraxis

12. Im Gegensatz zu bisherigen Empfehlungen und Normen eignen sich zyklische triaxiale Kompressionsversuche nur mit entsprechend hohem hydrostatischen Druckanteil zur Untersuchung des Widerstandes eines Asphalts gegen bleibende Verformung. Zur Planung des Spannungszustandes ist das hypoplastische Stoffgesetz gut geeignet.
13. Auf der Basis des erweiterten hypoplastischen Stoffgesetzes kann ein Verfahren zur numerischen Prognose der Spurbildung für praktische Zwecke entwickelt werden. Dabei sollte der Einfluß einzelner hypoplastischen Stoffparameter auf das Endergebnis, wie die der dichtesten Lagerung unter hochzyklischer Belastung und die Möglichkeiten der besseren Erfassung des Viskositätseinflusses, noch untersucht werden.
14. Beim Entwurf und bei der Produktion von Asphaltmischungen, welche gegen die Spurbildung widerstandsfähig sein sollen, ist der vorgestellte optimale Bitumengehalt, ermittelt durch Verdichtung mit zyklischem Scheren im Gyrator, zur Vermeidung des Porenfluidüberdruckes zu berücksichtigen.
15. Beim Entwurf und bei der Produktion von Asphaltmischungen, welche gegen die Spurbildung widerstandsfähig sein sollen, ist der Hohlraumgehalt in der dichtesten Lagerung durch die Kornverteilung so einzustellen, dass der optimale Bitumengehalt nicht zu niedrig ist. Damit ist zu erreichen, dass die Wasserempfindlichkeit, die Alterung und die Ermüdung des Asphaltes nicht negativ beeinflusst werden.

Kurzfassung der Dissertation
Modellierung bleibender Verformungen des Asphalts mit einem hypoplastischen Stoffgesetz der Bodenmechanik
von Dipl.-Ing. Gajári György

Die Arbeit dient der numerischen Simulation der Spurbildung in Asphaltstraßen und der Herstellung widerstandsfähiger Asphaltmischungen. Zur Modellbildung musste die physikalisch-mechanische Ursache der bleibenden Verformungen bei hohen Temperaturen geklärt werden. Im Gegensatz zu bisher existierenden Stoffmodellen ist in dieser Arbeit das Verhalten teilgesättigter granularer Stoffe unter zyklischer Belastung als die Grundlage der Untersuchung gewählt worden. Diese zeigen bei entsprechend hoher Sättigung der Hohlräume des mineralischen Korngerüsts unter zyklischer Scherbeanspruchung und bei gleichzeitigem Druck das Phänomen der „zyklischen Mobilität“. Die Erklärung dafür ist die Verdichtungsneigung des Korngerüsts und die Inkompressibilität des Porenfluids, wodurch Porenüberdrücke entstehen. Zyklische Mobilität bedeutet den Abfall der Steifigkeit. Durch die Zunahme der Dehnungsamplituden infolge zyklischer Scherbelastung und der Irreversibilität des granularen Materials verursacht dieses Verhalten die erhöhte Spurbildungsneigung.

Die richtige Modellwahl konnte durch systematische experimentelle Ergebnisse belegt werden. Die monotonen triaxialen Kompressionsversuche beweisen die Barotropie und Pyknotropie der Steifigkeit, der Festigkeit und der Dilatanz des mineralischen Korngerüsts. Durch Kompression unter zyklischem Scheren wird die Existenz eines optimalen Bitumengehalts bewiesen, bei welchem die höchste Dichte des Korngerüsts erreicht werden kann. Bei Mischungen über dem optimalen Bindemittelgehalt wird der Porenfluidüberdruck durch Druckmessungen im Mörtel nachgewiesen.

Für den Strassenbauasphalt ist erstmalig zur numerischen Simulation das aus Karlsruhe stammende, mit der „intergranularen Dehnung“ erweiterte hypoplastische Stoffgesetz herangezogen worden. Den Schwerpunkt der Arbeit bildet die Bestimmung der hypoplastischen Stoffparameter und die Überprüfung des gewählten Stoffgesetzes durch Nachrechnung von zyklischen Einfachscherversuchen und Triaxialversuchen.

In einer selbstentwickelten Torsionszelle wird durch unmittelbare Messung gezeigt, dass der Bitumengehalt über dem Optimum die Schubsteifigkeit verringert. Die Triaxialversuche beweisen die Möglichkeit des Eintretens der zyklischen Mobilität und dadurch die extreme Neigung zur Spurbildung. Diese Messungen beweisen die praktische Bedeutung des optimalen Bitumengehaltes. Das positive Ergebnis der Überprüfung des genannten Stoffgesetzes liefert die theoretische Unterstützung der experimentellen Ergebnisse.

Diese können als Grundlage einer neuen Perspektive in der rechnerischen Prognose sowie beim Entwurf und bei der Herstellung von Asphaltmischungen dienen.

Theses of the dissertation
Modelling of lasting deformations of asphalt with a hypoplastic constitutive law of soil mechanics
by Dipl.-Ing. Gajári György

Temperature conditions

The phenomenon of rutting can only appear at high temperatures (≥ 35 - 40°C). The model and the results apply only for those temperatures.

Modelling

1. Rutting of asphalt roads can be explained with the “cyclic mobility” of fluid-containing granular materials under cyclic loading.
2. The extended hypoplastic constitutive law from Karlsruhe, amended by the pore fluid pressure and the viscosity of the bitumen, is suited for the numerical simulation of the volumetric behaviour, the cyclic mobility and the accumulated deformation of the partly saturated rolled asphalt. The state independent material parameters can be determined on the mineral skeleton under laboratory conditions

Verification of the modelling

3. Monotonic triaxial compression tests prove that the material properties of rolled asphalt like stiffness, angle of friction and the dilatancy depend on the average effective pressure (barotropy) and the density (pyknotropy) of the mineral skeleton.
4. Cyclic simple shear tests on road asphalt with conventional road construction bitumen prove the pressure dependent stiffness and the increased stiffness in the range of small strains not only for high but also for medium temperatures.

Consequences

5. Various samples with varying bitumen concentrations that were produced in a gyrator compactor prove the existence of optimal bitumen concentration. For this concentration the pore volume of the mineral skeleton has a minimum i.e. the asphalt can be compacted best.
6. Asphalt with bitumen concentration higher than the optimum sustains deeper ruts than others with bitumen concentrations up to the optimum.
7. During the compaction process with the gyrator the excess pore fluid pressure in the grout can be demonstrated through measurement when the asphalt contains bitumen above the optimal level.
8. When that is the case the measurement in the simple shear device at high temperature shows a decrease in shear stiffness despite a compaction. The experimental results of the excess pore fluid pressure can be explained by numerical simulation in accordance with the chosen physical model.

9. The cyclic mobility can be produced under the conditions of the real and the numerical force-controlled cyclic triaxial compression when the asphalt has a high temperature, bitumen above the optimal level and when the average pressure content in the state of stress is large enough.
10. For the force-controlled triaxial compression at high temperature the accumulated deviatoric strain is one order of magnitude larger if the bitumen concentration is above the optimum and when the average pressure content in the state of stress is large enough. The results of the numerical triaxial compression are in accordance with this.

Influence of viscosity

11. The real triaxial compression tests at high temperature as well as the numerical results show a much larger dependency of the stiffness on the loading frequency when the compression is force-controlled as opposed to when it's position-controlled. In addition to the viscosity, the stiffness in the force-controlled tests is also influenced by the magnitude of the strain amplitude and possibly the cyclic mobility.

Practice – laboratory practice

12. In contrast to current recommendations and norms, triaxial compression tests are only suited for the assessment of the resistance of the asphalt against lasting deformations when the hydrostatic pressure content is large enough. The hypoplastic constitutive law is suited for planning the state of stress.
13. On the basis of the extended hypoplastic constitutive law, a numerical predictive method for rut formation for practical applications can be developed. Thereby the influence of individual hypoplastic material parameters on the final result like the densest packing under highly cyclic loading and possibilities for better capturing the influence of viscosity should be examined.
14. During the design and the production of asphalt mixtures that are required to be resistant against rutting the introduced optimal bitumen concentration needs to be considered to avoid excess pore fluid pressure. The optimal bitumen concentration can be determined by means of compaction under cyclic shearing in the gyrator.
15. During the design and the production of asphalt mixtures that are required to be resistant against rutting, the pore volume content in the state of densest packing is to be adjusted in such a way that the optimal bitumen concentration is not too low. The purpose of this is to not negatively influence the water sensitivity as well as the ageing and fatigue behaviour of the asphalt.

Theses of the dissertation
Modelling of lasting deformations of asphalt with a hypoplastic constitutive law of soil mechanics
by Dipl.-Ing. Gajári György

Temperature conditions

The phenomenon of rutting can only appear at high temperatures ($\geq 35-40^\circ\text{C}$). The model and the results apply only for those temperatures.

Modelling

1. Rutting of asphalt roads can be explained with the “cyclic mobility” of fluid-containing granular materials under cyclic loading.
2. The extended hypoplastic constitutive law from Karlsruhe, amended by the pore fluid pressure and the viscosity of the bitumen, is suited for the numerical simulation of the volumetric behaviour, the cyclic mobility and the accumulated deformation of the partly saturated rolled asphalt. The state independent material parameters can be determined on the mineral skeleton under laboratory conditions

Verification of the modelling

3. Monotonic triaxial compression tests prove that the material properties of rolled asphalt like stiffness, angle of friction and the dilatancy depend on the average effective pressure (barotropy) and the density (pyknotropy) of the mineral skeleton.
4. Cyclic simple shear tests on road asphalt with conventional road construction bitumen prove the pressure dependent stiffness and the increased stiffness in the range of small strains not only for high but also for medium temperatures.

Consequences

5. Various samples with varying bitumen concentrations that were produced in a gyrator compactor prove the existence of optimal bitumen concentration. For this concentration the pore volume of the mineral skeleton has a minimum i.e. the asphalt can be compacted best.
6. Asphalt with bitumen concentration higher than the optimum sustains deeper ruts than others with bitumen concentrations up to the optimum.
7. During the compaction process with the gyrator the excess pore fluid pressure in the grout can be demonstrated through measurement when the asphalt contains bitumen above the optimal level.
8. When that is the case the measurement in the simple shear device at high temperature shows a decrease in shear stiffness despite a compaction. The experimental results of the excess pore fluid pressure can be explained by numerical simulation in accordance with the chosen physical model.

9. The cyclic mobility can be produced under the conditions of the real and the numerical force-controlled cyclic triaxial compression when the asphalt has a high temperature, bitumen above the optimal level and when the average pressure content in the state of stress is large enough.
10. For the force-controlled triaxial compression at high temperature the accumulated deviatoric strain is one order of magnitude larger if the bitumen concentration is above the optimum and when the average pressure content in the state of stress is large enough. The results of the numerical triaxial compression are in accordance with this.

Influence of viscosity

11. The real triaxial compression tests at high temperature as well as the numerical results show a much larger dependency of the stiffness on the loading frequency when the compression is force-controlled as opposed to when it's position-controlled. In addition to the viscosity, the stiffness in the force-controlled tests is also influenced by the magnitude of the strain amplitude and possibly the cyclic mobility.

Practice – laboratory practice

12. In contrast to current recommendations and norms, triaxial compression tests are only suited for the assessment of the resistance of the asphalt against lasting deformations when the hydrostatic pressure content is large enough. The hypoplastic constitutive law is suited for planning the state of stress.
13. On the basis of the extended hypoplastic constitutive law, a numerical predictive method for rut formation for practical applications can be developed. Thereby the influence of individual hypoplastic material parameters on the final result like the densest packing under highly cyclic loading and possibilities for better capturing the influence of viscosity should be examined.
14. During the design and the production of asphalt mixtures that are required to be resistant against rutting the introduced optimal bitumen concentration needs to be considered to avoid excess pore fluid pressure. The optimal bitumen concentration can be determined by means of compaction under cyclic shearing in the gyrator.
15. During the design and the production of asphalt mixtures that are required to be resistant against rutting, the pore volume content in the state of densest packing is to be adjusted in such a way that the optimal bitumen concentration is not too low. The purpose of this is to not negatively influence the water sensitivity as well as the ageing and fatigue behaviour of the asphalt.