

Zur Beurteilung der Oberflächen- und Materialdegradation zyklisch beanspruchter und vorgespannter Trockenfugen zwischen Betonfertigteilen

Evaluation of the surface and material degradation of cyclically stressed and prestressed dry joints between precast concrete elements

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur Erlangung der
Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) eingereichte

DISSERTATION

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) David Schaarschmidt

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Holger Flederer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Feix

eingereicht am: 07. August 2023
verteidigt am: 13. Dezember 2023

Kurzfassung

Im Jahr 2021 befanden sich knapp 40.000 Brückenbauwerke im Netz der Bundesfernstraßen. Mit 86 % der Gesamtbauwerksfläche wurden Stahlbeton- beziehungsweise Spannbetonbrücken am häufigsten ausgeführt. Ein hoher Prozentsatz dieser Bauwerke entstand im Zeitraum von 1960 bis 1980. Die avisierte Nutzungsdauer dieser Brücken von 100 Jahren wird oftmals nicht erreicht, sodass die tragenden Strukturen im Schnitt nach 75 Jahren ersetzt werden müssen. Erste größere Reparaturen sind bereits nach 40 Jahren notwendig. Diese Faktoren führen dazu, dass die Baulastträger kurz- und mittelfristig eine Vielzahl an Ersatzneubauten zu bewältigen haben. Jede Baumaßnahme im Zuge der Verkehrsinfrastruktur, insbesondere an essenziellen Strukturen wie Bücken, bedeutet einen Eingriff in den Verkehr und ist oft gleichbedeutend mit langen Stauzeiten.

Mit dem Ziel, die Bauzeit zu verkürzen, gewinnt die Fertigteilbauweise an Bedeutung. Dabei kann ihr volles Potenzial entfaltet werden, wenn gänzlich auf Ortbeton verzichtet und der Vorfertigungsgrad auf annähernd 100 % maximiert wird. Das bietet neben der Bauzeitreduzierung auch die Vorteile einer hohen Fertigungsqualität, einem geringeren Material- und Personalaufwand auf der Baustelle sowie flexibleren Tragstrukturen. Eine Möglichkeit, um Bauteile kraftschlüssig und dennoch reversibel zu fügen, ist das trockene Verspannen mittels verbundlosen Spanngliedern. Die Drucknormalkraft aktiviert die Oberflächenreibung in den Kontaktfugen und verhindert das Auseinandergleiten der Module. Aufgrund der hohen Skalierbarkeit in der Fertigung durch immer wiederkehrende Bauteilgeometrien sind neben Brücken auch Windenergieanlagen ein relevanter Markt.

Beide Bauwerksgruppen unterliegen vorwiegend nichtruhenden Belastungen, welche ermüdungsrelevante Beanspruchungen im Kontaktbereich zwischen einzelnen Betonfertigteilen hervorrufen. Es ist notwendig, die Beanspruchungscharakteristika sowie deren Auswirkungen auf die Kontaktoberflächen und die Betonmatrix im Fugennahbereich zu erforschen. Nur so können dauerhafte, ermüdungsresistente und sichere Bauwerke errichtet werden. Eine Betrachtung der Kontaktflächen ausschließlich auf der Bauteilebene ist unzureichend. Vielmehr spielen alle Gestaltabweichungen von der Bauteil- bis zur Mikroebene eine Rolle.

Im Rahmen der Dissertation werden zunächst die kontaktmechanischen Grundlagen eruiert und auf den Beton übertragen. Gleichzeitig werden existierende Werkstoffmodelle recherchiert, um die nichtlinearen Eigenschaften des Kompositwerkstoffes zu beschreiben, die eigenen Versuche numerisch zu begleiten sowie deren Aussagekraft zu erweitern. Neben den phänomenologischen Daten steht die hochauflösende Kontaktflächendigitalisierung im Mittelpunkt der Untersuchungen. Durch vergleichende Betrachtungen vor und nach den Ermüdungsversuchen können Aussagen zur Oberflächen- und Materialdegradation getroffen werden. Weiterhin werden die digitalen Zwillinge einer randomisierten Finite-Elemente-Analyse zugeführt.

Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass zyklische Belastungen sowohl einen Einfluss auf den Coulombschen Haftreibungskoeffizienten als auch die Kontaktsteifigkeit haben. Beide Parameter nehmen mit steigender Lastwechselzahl zu. Darüber hinaus weisen selbst sehr glatte Betonoberflächen eine relevante Welligkeit auf, die einen vollflächigen Kontakt verhindert. Daraus ergibt sich eine ungleichmäßige Kraftübertragung, die in der Bemessung zu berücksichtigen ist.

Abstract

Almost 40.000 bridges were located in the German highway network in 2021. Reinforced and prestressed concrete bridges were the most common type accounting for 86 % of the total construction area. A significant portion of these structures were constructed between 1960 and 1980. The expected service life of these bridges of 100 years is often not achieved so that the load-bearing structures have to be replaced after an average of 75 years. The first major repairs are necessary after only 40 years. As a result of these factors the authorities have to deal with a large number of new replacements in the short and medium term. Every construction site in course of infrastructure, especially at essential structures like bridges, means an disruption of traffic and is often connected to long traffic jams.

With the aim of shortening construction time, prefabricated constructions are gaining in importance. Their full potential can be realized if in-situ concrete is not used at all so that the degree of prefabrication is close to 100 %. In addition to reducing construction time this also offers the advantages of high production quality, lower material and labor costs on the construction site and more flexible structures. One way of joining components in a load-bearing, but reversible, manner is dry clamping with non-bonded tendons. The normal compressive force activates the surface friction in the contact joints and prevents the modules from sliding apart. Due to the high scalability in production of repeating geometries wind turbines and bridges are a relevant market.

Both groups of structures are subject to predominantly non-resting loads, which cause fatigue-relevant stresses in the contact area between precast concrete elements. It is necessary to investigate the stress characteristics and their effects on the contact surfaces and the concrete matrix in the joint vicinity. In this way durable, fatigue-resistant and safe structures can be built. A consideration of the contact surfaces exclusively at the component level is insufficient. Rather, all shape deviations from the component to the micro level play a role.

Within the scope of the dissertation, the contact mechanics fundamentals are first determined and transferred to concrete. Simultaneously, existing material models are being researched to describe the non-linear properties of the composite material, to numerically complement the experiments and to extend their validity. In addition to the phenomenological data, the investigations are focused on high-resolution contact surface digitization. By conducting comparative observations before and after the fatigue tests, it is possible to make statements regarding surface and material degradation. Furthermore, the digital twins undergo randomized finite element analysis.

My own investigations reveal that cyclic loading affects both Coulomb's coefficient of static friction and the contact stiffness. Both parameters increase with an increasing number of load cycles. Additionally, even very smooth concrete surfaces exhibit relevant waviness, which prevent full-surface contact. This leads to an uneven force transfer that needs to be considered in the design.
