

**Einsatz von UHPC-Druckgehäusen zum Schutz vor extremen  
Umgebungsbedingungen der Tiefsee**

Use of UHPC pressure housings to protect against extreme environmental  
conditions of the deep sea

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

**DISSERTATION**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. SEBASTIAN WILHELM  
geboren am 15. August 1987 in Dresden

Gutachter:  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach  
Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus  
Dr.-Ing. Johannes Lemburg

Tag der Einreichung: 15.08.2017

Tag der Verteidigung: 05.12.2017

## Kurzfassung

Die Tiefseeforschung spielt eine wichtige Rolle, angetrieben von ökologischen und ökonomischen Aspekten. Bisher werden teure Gehäuse und Konstruktionen aus Titan verwendet, um den langfristigen Einsatz zu gewährleisten und um Korrosion zu vermeiden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Eignung von ultrahochfestem Beton für Unterwasser-Druckgehäuse und Konstruktionen untersucht, um eine kostengünstige und dauerhafte Alternative zu schaffen.

Die vorausgehende Literaturrecherche fasst die Ergebnisse zahlreicher experimenteller Studien zwischen 1960 und 1980 mit sphärischen und zylindrischen Gehäusen aus normalfestem Beton zusammen, die im Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, Kalifornien, durchgeführt wurden. Diese Studien zeigen, dass mit Epoxid beschichteter Normalbeton für druckfeste Strukturen in Tiefen bis ca. 900 m gut geeignet ist.

Für Tiefseeanwendungen sind Tiefen von 3000 bis zu 6000 m von großem Interesse. Die stetige Verbesserung der Druckfestigkeit und Qualität in den letzten Jahren hat zu ultrahochfesten Betonen (UHPCs) mit einer Festigkeit von bis zu 250 MPa und einer hohen Dichtigkeit aufgrund des minimalen Porenvolumens geführt. Die Untersuchung des zeitabhängigen Materialverhaltens, der Durchlässigkeit und der Dauerhaftigkeit von UHPC sowie die Entwicklung von Dichtungssystemen und Öffnungen für die Gehäuse waren Ziele des Testprogramms. Während des Forschungsvorhabens wurden unterschiedliche Geometrien entwickelt und stetig verbessert, um das Auftriebsverhalten zu optimieren.

Neben grundlegenden Untersuchungen zum Materialverhalten von UHPC, wie zeitabhängige Druckfestigkeit und E-Modul, Bruchdehnung, Größeneffekt, Einfluss von Wärmebehandlung und Salzwasserlagerung oder Porositätsmessungen wurden auch Studien zu Konstruktionsgrundsätzen durchgeführt, um wiederverschließbare Druckgehäuse für die Tiefsee bis 3000 m Einsattiefe zu entwickeln. Um das Versagen vorhersagen zu können, wurden die Materialeigenschaften von UHPC unter mehraxialer Beanspruchung bei verschiedenen Spannungsverhältnissen untersucht. Die Versuche wurden numerisch simuliert und das nichtlineare Materialgesetz multiPlas in ANSYS anhand der gewonnenen experimentellen Daten kalibriert.

Parallel zu experimentellen Druck- und Implosionsversuchen an Betondruckgehäusen mit Verformungsmessung im Inneren wurden auch numerische Parameterstudien am Zylinderelement durchgeführt, um den Einfluss der Materialparameter auf das Versagen zu ermitteln.

Während des Versuchsprogramms konnte gezeigt werden, dass Betondruckgehäuse mit 35 mm Wandstärke und 250 mm Außendurchmesser im Kurzzeitdruckversuch bis 60 MPa (6000 m Wassersäule) ohne Implosion belastbar sind.

Neben Kurzzeit-Druckversuchen wurde eine Tiefsee-Feldstudie mit einer Dauer von einem Jahr an der Arktis realisiert, um die Dauerhaftigkeit der Betongehäuse und den Einfluss der maritimen Umgebung auf UHPC zu untersuchen. Dabei stand die Untersuchung des Kriechens unter hoher Dauerlast, die Diffusionsdichtheit und der Einfluss der Calcit-Kompensationstiefe im Vordergrund.

Anhand der gewonnenen Daten wurden Bemessungsgleichungen und Bemessungsdiagramme auf Basis der Theorie der dickwandigen Schale (Lamé) entwickelt.

## Abstract

Deep-sea research plays an important role, driven by environmental and economic aspects. So far, expensive housings and constructions made of titanium are used to avoid corrosion in the maritime environment and to guarantee long-term deployment. The suitability of high-strength concrete for underwater pressure housings and constructions is examined to provide a low cost and durable alternative.

The literature research summarises results of numerous experimental studies between 1960 and 1980 with spherical and cylindrical hulls made of normal concrete, performed at the Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California. These studies show that epoxy coated normal concrete is well suited for pressure-resistant structures to depths of around 900 m. During the research project different geometries were developed and constantly improved in order to optimize the buoyancy behavior.

For deep-sea applications, depths of 3000 up to 6000 m are of great interest. The improvement of concrete strength and quality over the last years has resulted in ultra-high performance concretes (UHPCs) with strengths of up to 250 MPa and high impermeability due to a minimum of pore volume. Time-dependent behavior, permeability and durability as well as the development of sealing systems and openings were the objectives of the test program.

In addition to fundamental investigations on the material behavior of UHPC, such as time-dependent compressive strength and elastic modulus, fracture strain, size effect, influence of heat treatment and salt water storage or porosity measurements, studies on design principles have also been carried out to achieve the goal of reclosable pressure vessels for the deep sea up to 3000 m depth. In order to predict the failure, the material properties of UHPC were investigated under multiaxial load at different stress ratios. The experiments were numerically simulated and the non-linear material multiPlas was calibrated in ANSYS on the basis of the experimental data obtained.

In addition to experimental pressure and implosion tests on concrete pressure housings with deformation measurements inside, numerical parameter studies were also carried out on the cylinder element in order to determine the influence of the material parameters on the failure.

During the experiment it was shown that concrete pressure housings with 35 mm wall thickness and 250 mm outer diameter can be loaded in the short-term pressure test up to 60 MPa (6000 m Water column) without implosion.

In addition to short-term pressure tests, a deep-sea field study with a duration of one year was carried out on the Arctic to investigate the durability of the concrete housing and the influence of the maritime environment on UHPC. The focus was on the investigation of the creep under high static load, the permeability and the influence of the calcite-compensation-depth (CCD).

On the basis of the obtained data, design parameters and design diagrams were developed based on the theory of the thick-walled shell (Lamé).