

Carbon concrete- the creative building material- its properties and performance indicators in strengthening the elements of structures

Zuhair Amer

Institute of Concrete Structures || Technical University Dresden || Germany

Abstract: Construction and restoration operations have developed rapidly since the beginning of this century. This development coincided with the trend of towards developing and discovering new building materials that meet the aspirations and needs of those interested across all engineering fields. One of the most important building materials currently being developed is carbon concrete, in which carbon is used for reinforcement instead of steel, which has been the material in use until today. Due to the many advantages of using carbon concrete whether in building new structures or in repairing, strengthening and consolidation of existing buildings, this innovative material will replace conventional reinforced concrete in the near future.

This study aims to shed light on carbon concrete and present the latest findings of scientific research on this material and its production and use techniques, whether in modern buildings under construction or in existing buildings for the purpose of repair and rehabilitation. It also aims in its experimental part to study the effects of reinforcement using carbon concrete on the behavior of implemented concrete elements (for example, column elements) by changing many parameters. This research paper presents the characteristics and components of carbon concrete, its manufacturing methods and areas of use, in addition to the advantages and disadvantages of the new carbon concrete through a brief overview in order to introduce this creative building material in the Arab sector and encourage its use as an alternative to reinforced concrete. However, there is still an urgent need for scientific research into the details of carbon concrete. Only then can standardized and complete concepts be presented for their practical use and, above all, the code version to be followed when utilizing them.

Keywords: Carbon Concrete, Carbon Textile Concrete, Carbon Textile Reinforcement.

الخرسانة الكربونية – مادة البناء الإبداعية – خصائصها ومؤشرات أدائها في تدعيم عناصر المنشآت

زهير عامر

معهد المنشآت الخرسانية || جامعة دريسدن التقنية || ألمانيا الاتحادية

المستخلص: تطورت عمليات البناء والترميم منذ بداية هذا القرن بشكل متسارع. ترافق هذا التطور مع اتجاه الباحثين لتطوير واكتشاف مواد بناء جديدة تلبي طموحات وحاجات المهتمين في كافة المجالات الهندسية. أحد أهم مواد البناء التي تم اكتشافها ويجري حالياً العمل على تطويرها هي الخرسانة الكربونية Carbon concrete، التي يستخدم فيها الكربون كتسليح عوضاً عن الفولاذ الذي تم استخدامه حتى اللحظة كتسليح. نظراً لميزات الخرسانة الكربونية الكثيرة عند استخدامها في تنفيذ المنشآت الجديدة أو في إصلاح وتقوية وتدعيم المباني القائمة، سوف تحل هذه المادة الإبداعية في المستقبل القريب مكان الخرسانة المسلحة التقليدية.

يهدف هذا البحث إلى تسليط الضوء على الخرسانة الكربونية وتقديم أحدث ما توصل إليه البحث العلمي حول هذه المادة وتقنيات إنتاجها واستخدامها سواء في المباني الحديثة قيد الإنشاء أو في المباني القائمة بغرض إصلاحها وإعادة تأهيلها. كما يهدف في شقه التجريبي إلى دراسة مؤثرات التدعيم باستخدام الخرسانة الكربونية على سلوك العناصر الخرسانية المنفذة (كمثال عناصر الأعمدة) من خلال تغيير العديد من البارامترات. تعرض ورقة البحث هذه، خصائص ومكونات الخرسانة الكربونية وطرائق تصنيعها ومجالات الاستخدام بالإضافة إلى مزايا وعيوب الخرسانة الكربونية الجديدة من خلال لمحة موجزة من أجل التعريف بمواد البناء الإبداعية هذه في الوسط العربي والتشجيع على استخدامها كبديل للخرسانة المسلحة. ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة ماسة للبحث العلمي في تفاصيل الخرسانة الكربونية. عندها فقط يمكن تقديم مفاهيم شاملة موحدة للاستخدام العملي لها، وقبل كل شيء، إصدار الكود اللازم إتباعه عند استخدامها.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الكربونية، خرسانة النسيج الكربوني، تسليح النسيج الكربوني

1. مقدمة وتعريف للخرسانة الكربونية.

تعتبر الخرسانة الكربونية Carbon concrete ، التي تم تطويرها مع الخرسانة النسيجية Textile concrete ، نوعاً جديداً من مواد البناء مع إمكانيات أداء مذهلة. لقد أظهرت العديد من التساؤلات والاستفسارات العملية أن هناك حاجة ماسة لتوفير المعلومات اللازمة حول الخرسانة المسلحة بالكربون. تتوفر بعض المنشورات الممتازة حول هذه المادة الجديدة، ولكن حالياً لا تتوفر أية معلومات بشكلها النهائي سواء باللغة الألمانية أو الإنكليزية، حيث لا توجد أية نورمات أو كودات خاصة بها. يعتمد مستخدم الخرسانة الكربونية حتى الآن على جمع المعلومات التي يحتاجها بنفسه، الأمر الذي يستلزم منه بذل الجهود الكبيرة والعمل الطويل الذي يستند في كثير من الأحيان على الدراسات التجريبية لاستنباط خواص المادة اللازمة في الدراسة والتطبيق.

تم بدء وتطوير الخرسانة الكربونية بشكل أساسي في جامعات دريسدن Dresden وأخن Aachen منذ منتصف التسعينيات وتم البحث في أساسياتها في إطار مجالين بحثيين خاصين لصالح مؤسسة الأبحاث الألمانية (DFG). الأول هو مجال البحث الخاص رقم 528^[59] ، الذي يهتم بموضوع إجراءات التدعيم للمنشآت الهندسية القائمة باستعمال الخرسانة المسلحة بالنسيج الكربوني بإدارة البروفيسور Prof. Manfred Curbach في جامعة دريسدن التقنية. والثاني مجال الأبحاث الخاصة رقم 532^[14] ، الذي يهتم بموضوع تشييد المنشآت الجديدة باستعمال الخرسانة الكربونية بإدارة البروفيسور Prof. Josef Hegger في جامعة آخن. كان الهدف المشترك للعلماء والباحثين في كلا الجامعتين هو استخدام المنسوجات المصنوعة من الألياف عالية الأداء (على سبيل المثال الياف الكربون) كتسليح للخرسانة للحصول على عناصر بناء صغيرة الأبعاد، خفيفة الوزن وعالية الأداء^[35] ، حيث شملت الأبحاث في جامعة آخن، استخدام الخرسانة الكربونية في تنفيذ المنشآت الجديدة، فيما شملت في جامعة دريسدن، استخدام الخرسانة الكربونية (خرسانة النسيج الكربوني) في ترميم وتقوية المنشآت القائمة. تم تطبيق وتنفيذ الخبرات العلمية المكتسبة من خلال الأبحاث المنجزة في العديد من المشاريع الهندسية. وكنيجة لهذا العمل المكثف تم إنشاء المركز الألماني للخرسانة النسيجية، Tudalit e. V. وTUDATEX GmbH وكذلك Carbo Con GmbH حيث بدأ بالفعل الاستخدام العملي لهذه المادة من خلال سلسلة عمليات متكاملة واستمر هذا العمل منذ 2014 في أكبر مشروع بحثي في ألمانيا في صناعة البناء "C³- Carbon Concrete Composite" يتم دعم مشروع C³ بأكثر من 45 مليون يورو كتمويل من الوزارة الفيدرالية للتعليم والبحث BMBF ضمن إطار مبادرة التمويل Zwanzig 20 الشراكة من أجل الابتكار، والذي يضم حالياً حوالي 150 عضواً^{[7]، [40]، [55]، [65]}. لقد كانت Tudalit eV شريكاً لـ C³- Carbon Concrete Composite eV لفترة طويلة من الزمن. حيث تطورت هذه التشاركية إلى اتحاد صناعي مشهور في ألمانيا في مجال النسيج والخرسانة الكربونية. وتم حتى الآن تنظيم 12 مؤتمراً علمياً حول الخرسانة الكربونية وتم تنفيذها جميعاً بنجاح. حيث تتم دعوة مئات المشاركين كل

عام إلى ألمانيا من أجل تبادل الآراء ومناقشة آخر ما توصل إليه البحث العلمي حول الخرسانة الكربونية. ففي عام 2020 وعلى مدى يومين تم عرض أكثر من 50 محاضرة حول استخدام الخرسانة الكربونية في الحياة العملية ونتائج البحث العلمي في إطار مواضيع مختلفة، مثل استعمال الخرسانة الكربونية في الأبنية الجديدة وأعمال الترميم والتدعيم للمنشآت القائمة، ليبقى الجميع على اطلاع حول أحدث التقنيات في تنفيذ الإنشاءات الخرسانية المصنوعة من تسليح الكربون [24].

2. هدف الدراسة وأهميتها

الهدف من هذا البحث هو عرض أحدث ما توصل إليه البحث العلمي وأحدث التقنيات حول الخرسانة الكربونية مع التركيز على أهمية استخدامها في إجراءات التدعيم والتقوية. كما يهدف في شقه التجريبي إلى دراسة مؤثرات التدعيم باستخدام الخرسانة الكربونية على سلوك العناصر الخرسانية المنفذة (كمثال عناصر الأعمدة) من خلال تغيير العديد من البارامترات. وسيتم أولاً تفسير خصائص المواد المكونة للخرسانة الكربونية وآلية تصنيعها. تنبع الأهمية العلمية للدراسة كونها تتناول مادة إنشائية حديثة النشوء ولا زالت غير معروفة أو مستخدمة في الوسط العربي، إضافة إلى أن هذه المادة ستحل مكان الخرسانة المسلحة التقليدية لمحاسنها الكثيرة. تجدر الإشارة إلى أن الخرسانة النسيج الكربوني مناسبة جداً لإنتاج عناصر إنشائية جديدة وكذلك لتقوية وتدعيم العناصر الإنشائية المنفذة سابقاً. تؤكد نتائج الدراسة التجريبية المجراة على مؤشرات الأداء العالية للخرسانة الكربونية وجدوى تقوية العناصر الإنشائية باستخدامها.

3. مكونات الخرسانة الكربونية وخصائصها

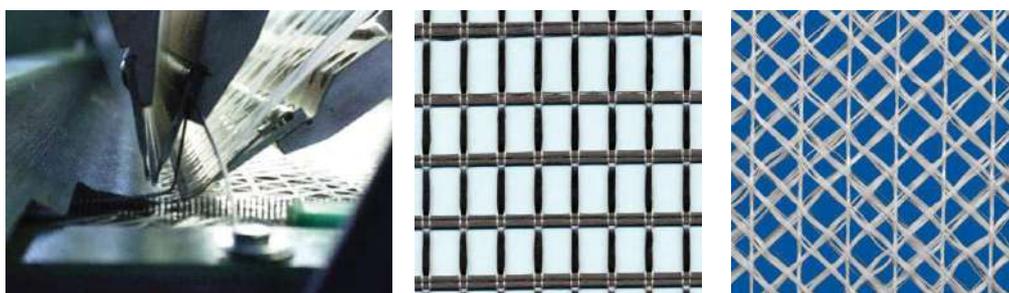
تتكون الخرسانة الكربونية من الخرسانة الناعمة والتسليح المصنوع من ألياف الكربون.

1.3 خصائص التسليح الكربوني

يتوفر التسليح الكربوني في أشكال مختلفة، قضباناً أو نسيج. عادة ما يتم إنتاج قضبان تسليح الكربون في عملية سحب ينتج عنها مقاطع عرضية مستديرة ذات أقطار مختلفة ويتم درفلة السطح من أجل تحقيق التماسك وتأمين نقل جيد للقوى بين التسليح والخرسانة، أنظر على سبيل المثال [25]، [57]. يتم إنتاج تسليح النسيج الكربوني الشبيه بالشبكة في عملية مشابهة لصناعة النسيج، بحيث تحمل أيضاً في كثير من الأحيان تسمية "نسيج التسليح"، أنظر على سبيل المثال [21]. يتم تصنيع النسيج الكربوني باستعمال خيوط مختلفة المقاطع وأبعاد متعددة لقطع النسيج وذلك تبعاً لغرض الاستخدام.

في صناعة المنسوجات الكربونية المستخدمة كتسليح، يتم دمج ما يصل إلى خمسين ألقاً من ألياف الكربون أو خيوط الكربون في خيط واحد. يبلغ قطر ألياف الكربون حوالي خمسة ميكرومتر، أي أرق بعشر مرات من شعرة الإنسان. يتم نسج الخيوط، بدورها، في آلة نسيج خاصة تعطي قطع من النسيج الكربوني بمقاسات مختلفة حسب الطلب (الشكل 1، على اليسار)، ومن ثم يضاف طلاء مثبت للحفاظ على شكل النسيج، عملية التشريب impregnation. ويمكن أيضاً ترتيب ومحاذاة الخيوط وفقاً لاتجاه قوى الشد المؤثرة [26]. يوجد في جامعة دريسدن في ألمانيا TU Dresden، على سبيل المثال، العديد من آلات النسيج التي يمكن من خلالها إنتاج كل من نسيج الزجاج (AR) والكربون (TRC) بشكل منفصل أو كمزيج بطبقة أو عدة طبقات وبأبعاد هندسية مختلفة، وذلك حسب الطلب، (الشكل 1 الوسط واليمين). ونظراً لأن الخيوط المنفصلة مرتبة في القماش وفق الاتجاه المطلوب ومثبتة ضد الإزاحة، فيمكن ترتيب ومحاذاة خيوط التسليح بنفس الطريقة مثل حديد التسليح في الخرسانة المسلحة وفقاً لمسار قوى الشد في

العنصر، بحيث تعمل على النحو الأمثل ضمن الخرسانة، أنظر على سبيل المثال [5] and [8]. من بين طرائق تصنيع المنسوجات العديدة، يكون منها فقط مناسباً للاستخدام في خرسانة النسيج الكربوني، تلك التي تملك فتحات ذات أبعاد كبيرة بما فيه الكفاية بين خيوط النسيج بحيث تغلفها الخرسانة جيداً ويتحقق التماسك بشكل موثوق، وبحيث يحقق ترتيب الخيوط وتثبيتها مقاومة كافية ضد الإزاحة أو فقدان استقرار النسيج. أثبتت التجارب إن أفضل شبكات النسيج الكربوني، تلك التي يكون فيها الحد الأدنى لأبعاد الفتحة بين الخيوط في كلا الاتجاهين مساوياً إلى ثلاثة أضعاف قطر الخيط أو ثلاثة أضعاف الحد الأقصى لقطر الحبيبات. لذلك تكون المسافة بين الخيوط عادة من 5 mm إلى 20 mm ، وذلك حسب كمية الألياف المطلوبة وقطر الخيط. تحتوي شبكة النسيج في الغالب على خيوط رئيسية وخيوط رابطة لها مرتبة بشكل عمودي عليها. وتبعاً للزاوية بين الخيوط الرئيسية وخيوط الربط، يمكن أن تختلف الخصائص الميكانيكية لتسليح النسيج الكربوني.



الشكل (1) إلى اليسار إنتاج النسيج بواسطة آلة نسيج؛ الوسط: نسيج في الغالب لمقاومة عزوم الانعطاف والقوة الناعمية (الكربون)؛ يميناً: نسيج لمقاومة قوة القص (زجاج AR) [8]

Fig. (1) Left Production of a textile fabric on a textile machine; Middle: fabric for predominantly bending or normal force loads (carbon); right: fabric for shear force reinforcement (AR glass) [8]

في معظم الاستخدامات، يطبق على النسيج طلاء خاص مصنوع من معلق مائي بوليمر Polymersuspension، يعتمد في الغالب على راتنجات الايبوكسي Epoxidharz أو الستايرين بوتادين Styrol- Butadien. يساهم الطلاء من ناحية في تفعيل الترابط بين الخيوط، بحيث تشارك جميع الخيوط في النسيج بالتساوي في نقل القوى والتي يمكن من خلالها زيادة قوة الانحناء ومقاومة الإزاحة بشكل مباشر. ومن ناحية أخرى، يتم تحقيق التماسك بين الخرسانة والألياف خاصة تلك الواقعة عند الحواف. بعد المعالجة والتصلب، يتم قطع النسيج بشكل يسهل عملية النقل والاستعمال. [8]

يوضح الجدول رقم (1) خصائص بعض أنواع تسليح النسيج الكربوني. [58]

الجدول (1) مثال لخصائص تسليح النسيج [58]

Table (1) Example for characteristics of a textile reinforcement [58]

Material / material		
Fasermaterial / Fiber material	Carbon / Carbon	
Tränkungsmaterial / Impregnation	Epoxidharz / Epoxy Resin	
Geometrie / geometry		
Form / Shape	Matte / Panel	
Abmessungen / Dimensions[m]	2.0 x 1.25	
	Längsrichtung / Longitudinal	Querrichtung / Transversal
Achsabstand Strang / Roving axis distance [mm]	12.7	16
Faserquerschnittsfläche Einzelstrang / Cross-section	1.81	0.45

Material / material		
of the yarn [mm ²]		
Bewehrungsquerschnittsfläche / Cross-section of the reinforcement [mm ² /m]	141.02	28.02
Kenndaten / specifications		
	Längsrichtung / Longitudinal	Querrichtung / Transversal
Garnzugfestigkeit / tensile strength of the roving [MPa]	> 4000	> 4000
Bruchspannung / Tensile strength [MPa]	3300	3350
E-Modul (Bewehrung) / Modulus of elasticity (reinforcement) [MPa]	> 220000	> 205000

2.3 خصائص الخرسانة الناعمة

يتوضع النسيج الكربوني المستخدم كتسليح ضمن خرسانة ناعمة خاصة لحماية وتثبيتته في الموقع المناسب . من الجوانب المهمة للماءمة الخرسانة مع المنسوجات هو حجم حبيباتها الأكبر . إذ يبلغ قطر أكبر حبة عادة مليمتر واحد، وهذا ما يتم تحديده استناداً إلى مقاسات نسيج التسليح من ناحية ومن ناحية أخرى إلى سماكة طبقة التقوية المرغوبة . الخرسانة الناعمة هي عبارة عن مونة إسمنتية ، وهذا هو السبب في أن الكودات المتعلقة بالخواص الميكانيكية للخرسانة المتصلبة وفقاً لـ [16] DIN EN 1015- 11 (المونة الإسمنتية وقوة الانضغاط والانحناء) أو بناءً على DIN EN 12390- 13 [17] (معامل المونة الخرسانة) يمكن تطبيقها أيضاً على العينات الموسورية (4x4x16 cm) والمصنعة من الخرسانة الناعمة . بناءً على نسب التركيب الجي لمواد الخلطة الإسمنتية ومقاومتها، تصنف الخرسانة الناعمة على أنها خرسانة عالية الأداء أو المقاومة . يوضح الجدول رقم (2) بعض الأمثلة على مكونات الخرسانة الناعمة. [9] أمثلة أخرى واردة أيضاً في [45].

جدول (2) أمثلة على الخلطات الخرسانية الناعمة القابلة للرش وخواص الخرسانة المتصلبة [9]

Table (2) Examples of sprayable fine concrete mixes and hardened concrete properties [9]

Mixture properties				
Component		M1	M2	M3
Aggregat Sand 0–1	[kg/m ³]	942.0	1122.4	1122.4
Cement CEM I 32, 5	[kg/m ³]	–	564.8	–
Cement CEM III/B 32, 5	[kg/m ³]	628.0	–	468.4
Mikrosilica (Suspension)	[kg/m ³]	100.5	56.6	56.6
Fly ash	[kg/m ³]	265.6	253.1	253.1
Water l/m ³	[l/m ³]	214.6	221.5	221.5
Superplasticizer FM30, BASF	[l/m ³]	10.5	12.0	–
Superplasticizer ACE30, BASF	[l/m ³]	–	–	3.8
Water- Binder value	[–]	0.33	0.36	0.42
Material properties, hardened concretes				
Compressive strength	[N/mm ²]	76	65	54
Flexural strength	[N/mm ²]	7.1	8.7	9.5

Mixture properties				
Modulus of elasticity	[N/mm ²]	28500	25600	-
Density	[kg/m ³]	2.17		

من أجل سهولة استخدام الخرسانة الناعمة حقلياً في مواقع التنفيذ، تم تطوير مزيج جاف للخلطة الخرسانية بالتعاون مع شركة^[30] Pagel Spezial- Beton GmbH (Essen) ، والتي يمكن نقلها وتسليمها جاهزة إلى موقع البناء في أكياس سعتها 25 kg . بعدها يتم الخلط باستعمال الماء فقط ووفقاً لإجراءات محددة بدقة من قبل الجهة المصنعة.^[9] انظر الجدول (3).

جدول (3) المواصفات الفنية للخرسانة الناعمة PAGEL TF10^[30]

Table (3) Technical data of the fine concrete PAGEL TF10^[30]

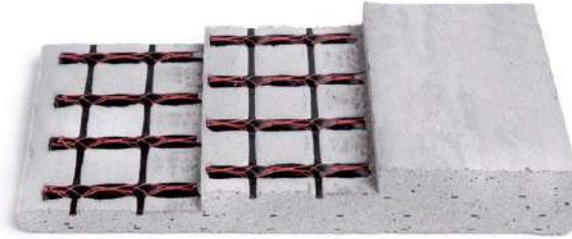
PAGEL [®] Spezial-Beton		Technical data sheet TF10	
TECHNICAL DATA			
TYPE			TF10
Grain size		mm	0-1
Layer thickness		mm	3-30
Amount of water	max.	%	14
Consumption (dry mortar) approx.		kg/(m ² · mm)	1.9
Fresh mortar raw density approx.		kg/m ³	2,150
Processing time approx.	+ 20 °C	min	60
Measure of extension DIN EN 13395-1	5 min	mm	170-210
Swelling	24 h	Vol.-%	≥ 0.1
Compressive strength*	1 d	N/mm ²	≥ 15
	7 d	N/mm ²	≥ 40
	28 d	N/mm ²	≥ 80
Bending tensile strength*	1 d	N/mm ²	≥ 3
	7 d	N/mm ²	≥ 6
	28 d	N/mm ²	≥ 8
E-Module (static)	28 d	N/mm ²	≥ 25,000
* Testing of bending tensile and compressive strength in accordance with DIN EN 196-1			
Note: All fresh and solid mortars are tested at 20 °C ± 2 °C, storage of the test specimen after 24 hours until the strength test in water at 20 °C ± 2 °C. Higher or lower temperatures result in deviating properties of fresh respectively solid mortars and test results. Depending on the temperature, the consistency can be adapted with a slight reduction of the mixing water.			
Storage:	12 months. Cool, dry, free from frost. Unopened in its original container.		
Delivery form:	25-kg bag, Euro pallet 1,000 kg		
Hazard class:	Non-hazardous material, observe information on packaging.		
GISCODE:	ZP1		
PAGEL PRODUCT COMPOSITION:			
Cement:	acc. to. DIN EN 197-1		
Aggregate:	acc. to. DIN EN 12620		
Additions:	acc. to. DIN EN 450, general building inspection approval (abZ), DIN EN 13263 (fly ash, microsilica, etc.)		

3.3 خصائص الخرسانة الكربونية

الأفكار الأساسية وراء ابتكار وتطوير الخرسانة الكربونية مأخوذة من خصائص الخرسانة المسلحة. الخرسانة الكربونية عبارة عن مادة بناء مركبة مماثلة للخرسانة المسلحة. وتتكون من مادتين هما الخرسانة والتسليح المصنوع من

ألياف الكربون على شكل نسيج أو قضبان. غالباً ما يشار إلى التسليح الذي يشبه النسيج بـ "النسيج الكربوني" والخرسانة المقواة بها كـ "خرسانة النسيج الكربوني". لقد تم استنباط وتطوير فكرة خرسانة النسيج الكربوني من الخرسانة المسلحة من أجل تصحيح عيوبها القليلة. فكما هو معروف يعود نجاح الخرسانة المسلحة إلى العمل المشترك الأمثل بين مادتي الخرسانة وال فولاذ، فكل منهما يشكل الخيار الأكثر اقتصادية في المهمة الموكلة إليه -الخرسانة لتحمل قوى الضغط وال فولاذ لامتصاص قوى الشد.

يعتبر مكون الخرسانة المسلحة مثالياً لأن الخرسانة تمتلك قيمة PH تقع في النطاق القلوي القوي بسبب محتوى الكلنكر البورتلاندي في الإسمنت، وهذا ما يحمي الفولاذ بشكل دائم من التآكل. من أجل المحافظة بشكل موثوق على وظيفة الحماية هذه على مدى عمر خدمة المنشأة، يلزم وجود غطاء خرساني بحد أدنى يتراوح بين 15 mm و 50 mm^[1]، مما يؤدي إلى زيادة أبعاد عناصر الخرسانة المسلحة من 50 mm إلى 100 mm فعندما لا تكون هناك حاجة إلى الكثير من الخرسانة لامتصاص قوى الضغط أو إذا كانت هناك مشكلة لأسباب تتعلق بالوزن، هنا يلزم البحث عن الحلول البديلة للتخفيف ما أمكن من الوزن الذاتي والحصول على عناصر نحيفة وأكثر رشاقة من حيث الأبعاد^[35]. وسيكون الأمر مثالياً إذا لم يكن من الضروري حماية التسليح من التآكل باستخدام طبقة سميكة من الخرسانة. ويمكن تحقيق ذلك من خلال استعمال التسليح الكربوني، الذي يؤدي غالباً إلى عناصر أكثر نحافة وأخف وزناً وأكثر قوة. بعض الأمثلة على ذلك موجودة في^[49]. بالمقارنة مع العناصر الخرسانية المسلحة، تكون عناصر الخرسانة النسيجية أصغر من حيث الأبعاد والحجم، انظر على سبيل المثال^[35] والشكل (2).



الشكل (2) تقوية نسيجية من طبقتين مصنوعة من غزول من خيوط الكربون طبقاً للمواصفة abZ^[15]

Fig. (2) 2- layer textile reinforcement made of carbon filament yarns according to abZ^[15]

ينتج عن الجمع بين الخرسانة الناعمة والتسليح من النسيج الكربوني مادة مركبة ذات قدرة تحمل عالية جداً مع خصائص استثمارية مميزة^[8].

على عكس الخرسانة المسلحة، التي يصنع فيها التسليح من الفولاذ، فإن التسليح في الخرسانة الكربونية يتكون من ألياف كربونية متصلة (خيوط) يتم تصنيعها على شكل نسيج أو قضبان. تملك مادة الكربون هذه مقاومة شد تبلغ حوالي 3000 N/mm² وأكثر؛ وبالتالي هذه المقاومة أعلى من مقاومة فولاذ التسليح المعتاد (حوالي 550 N/mm²)، إذن سنحتاج إلى كميات قليلة جداً من التسليح الكربوني مقارنة مع تسليح الفولاذ المعتاد. إضافة لذلك فالخرسانة المستخدمة هي خرسانة ناعمة ودقيقة الحبيبات. يبلغ أقصى حجم للحبيبات عادة R < 2 mm للاستخدام في خرسانة تقوية المباني ويبلغ أقصى حجم للحبيبات R ≤ 8 mm للاستخدام في العناصر الجديدة أو للتسليح على شكل قضبان^[41]،^[56]

الكربون هو اللبنة الأساسية لمتطلبات الحياة على سطح الأرض. حيث يمكن استخراجها من النباتات والحجارة وحتى من معظم فلزات الطبيعة. حالياً يستخدم النفط الخام في صناعة الكربون لأنه غير مكلف ومتوفر بكميات كبيرة

تضمن توفير الكميات المطلوبة. تتناول الأبحاث الحالية، من بين أمور أخرى، إنتاج الكربون أيضاً من اللجنين Lignins، مثل نفايات الخشب المتبقية من صناعة الورق. سيكون تصنيع الكربون منها ممكناً في غضون 5 سنوات قادمة.^[27] إضافة إلى ذلك، يقلل استبدال الخرسانة المسلحة العادية بالخرسانة الكربونية من متطلبات الطاقة وانبعثات ثاني أكسيد الكربون عند بناء وإصلاح المنشآت بحوالي 50% ويوفر إلى حد كبير الموارد المطلوبة من أجل صناعات أخرى، أنظر على سبيل المثال^[28].

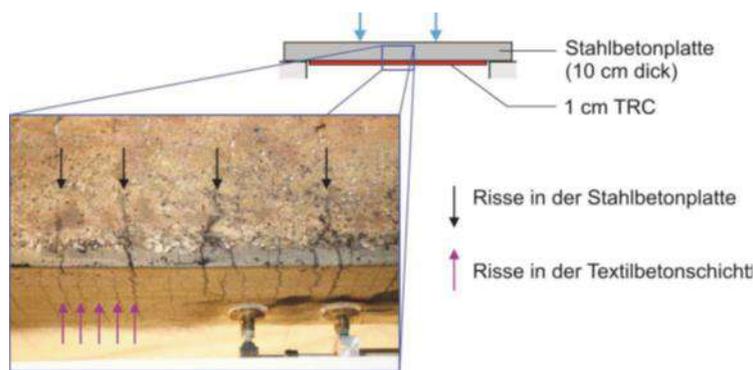
يعتمد زمن تصلب الخرسانة الكربونية على نوع الخرسانة المستخدمة وهو مشابه للأوقات المعروفة للخرسانة المسلحة. كقاعدة عامة، تصل مقاومة الخرسانة الكربونية إلى 70% من مقاومتها المميزة بعد حوالي 3 أيام. ويمكن تحديد الخصائص المميزة بعد 28 يوماً. وتستمر عملية التصلب بعد ذلك.

تستمر ديمومة الخرسانة الكربونية لزمن أطول بكثير منها في الخرسانة المسلحة. فبينما يتراوح العمر التصميمي للمنشآت الخرسانية المسلحة من 50 إلى 80 عاماً، يكون هذا العمر أكثر من 200 عام للمنشآت الخرسانية الكربونية.

من حيث الأداء، يتم تقييم الكربون والفولاذ حالياً تبعاً للجدوى الاقتصادية، فعلى الرغم من أن أسعار الكيلوغرام لكلا المادتين لا تشير إلى ذلك في البداية. يكلف الكيلوغرام الواحد من الفولاذ حوالي واحد يورو فقط، بينما الكيلوغرام الواحد من ألياف الكربون حوالي 16 يورو. ومع ذلك، فإن كثافة الكربون أقل بأربع مرات وقوته أعلى بست مرات. لذلك نحصل على معدل أداء قدرة 24 ضعف مقابل معدل سعر قدره 16 ضعف.^[29] هذا يفضل ويرجع مستقبلاً استخدام الكربون كتسليح عوضاً عن الفولاذ.

لا ينبغي أن ننسى أيضاً مقدار توفير الموارد والمواد عند استخدام الخرسانة الكربونية. فالبلاطات المستخدمة في الواجهات أو طبقات التقوية والتدعيم، على سبيل المثال، يبلغ سمكها حوالي 2 cm فقط في الخرسانة الكربونية وحوالي 8 cm في الخرسانة المسلحة. وهذا يعني أنه يجب إنتاج ونقل وتركيب وتثبيت مواد أقل بنسبة 75%. تتميز الخرسانة النسيجية (TRC) قبل كل شيء بخفتها وقدرتها العالية على التحمل. حيث يبلغ سمك الطبقة النموذجية لتدابير التقوية والتدعيم 1-3 cm، وفي حالات استثنائية بحد أقصى 5 cm. يعتبر تسليح النسيج الكربوني خفيفاً ومرناً، بحيث يمكن عند استخدامه أيضاً تنفيذ الأشكال المنحنية بسهولة أكبر من الخرسانة المسلحة العادية، أنظر على سبيل المثال^[50].

تعتبر الخرسانة النسيجية مناسبة لتقوية المنشآت القائمة ويمكن استخدامها أيضاً في بناء المنشآت الجديدة. عند استخدامها في عمليات التقوية والتدعيم، فبالإضافة إلى زيادة القدرة على التحمل، يكون لها أثر إيجابي كبير للحد من التشوهات. هنا تجدر الإشارة أيضاً إلى نمط التشققات المميز لخرسانة النسيج الكربوني. فعلى عكس الخرسانة المسلحة العادية، تحدث التشققات على مسافة أصغر بكثير مع عرض شق ضيق جداً. أنظر الشكل (3) و^[9].



الشكل (3) نمط التشقق للبلاطة الخرسانية المسلحة والمقواة بـ TRC بعد اختبار الانحناء بـ 4 نقاط استناد الذي أجراه Weiland & Curbach^[69]

Fig. (3) Crack pattern of a reinforced concrete slab reinforced with TRC after a 4- point bending test carried out by Weiland & Curbach^[69]

تشابه الخواص الميكانيكية لخرسانة النسيج الكربوني إلى حد كبير مع تلك الخاصة بالخرسانة المسلحة من حيث آليات التحمل والفسل المتماثلة. حيث يمر سلوك مادة الخرسانة الكربونية تحت تأثير الأحمال أيضاً بعدة مراحل وحالات. لا تتمتع خرسانة النسيج بخصائص مشابهة للخرسانة المسلحة فحسب، بل تتميز أيضاً بأداء رائع، ومن الممكن أن ينفذ منها عناصر حاملة رقيقة جداً، ولا يلزم وجود غطاء خرساني للحماية من التآكل، وأطوال إرساء التسليح قصيرة، ويتم توزيع الشقوق في العنصر بشكل منتظم، كما أن عرض الشقوق صغير للغاية، لأنه يتم تناقل قوى تماسك عالية جداً بين الخرسانة والتسليح^[8].

تم اختبار سلوك مادة الخرسانة الكربونية تحت تأثير درجات الحرارة العالية وعند التعرض للحريق وكذلك تم البحث في مدة مقاومة الحريق للعناصر المقواة بالخرسانة الكربونية في معهد المنشآت الخرسانية في جامعة دريسدن IMB at TU Dresden. بالنتيجة أظهر تحليل خصائص المواد للخرسانة الكربونية أن قوة الشد وقوة التماسك تنخفض بسرعة مع زيادة درجة الحرارة، لأن تقسية ألياف الكربون تضعف وتلين بشكل كبير عند تجاوز درجة حرارة التزجج Glass transition temperature . وعندما تتجاوز درجة الحرارة 600 درجة مئوية تقريباً، يفقد التسليح الكربوني قوته تماماً. الأمر الذي يتطلب، اتخاذ تدابير إضافية للحماية من الحرائق ولزيادة درجة جودة مقاومة العناصر للحريق .

4. طرائق إنتاج الخرسانة الكربونية

يمكن إنتاج خرسانة النسيج الكربوني بطرائق مختلفة. حيث يجري إنتاج الخرسانة الكربونية بشكل أساسي من خلال عملية الصب أو التصفيح Casting or lamination process ، ومن الممكن أيضاً من خلال عملية الطرد المركزي والضغط Spin and press ، أنظر على سبيل المثال^[48]. تستخدم طريقة الصب بشكل أساسي لإنتاج عناصر جديدة. حيث يتم ترتيب التسليح أولاً ضمن قوالب صب رأسية أو أفقية ويثبت بواسطة مبادعات. ثم يتم صب العنصر في خطوة واحدة. هذه الطريقة معروفة وتستخدم منذ بداية عملية تصنيع الخرسانة المسلحة، الشكل (4) على اليمين.



الشكل (4) تقوية قشرية سقف مدرج باستخدام عملية التصفيح (يسار، الصورة: Ulrich van Stipriaan، انظر على سبيل المثال ^{[52], [50], [45], [10]}) وتنفيذ جائر خرساني كربوني بطول 5 أمتار باستخدام طريقة الصب (يمين، ^[31])

Fig. (4) Reinforcement of a listed hyper shell using the lamination process (left, Photo: Ulrich van Stipriaan, see e.g. ^{[52], [50], [45], [10]}) and production of a 5 m long carbon concrete beam using the casting process (right, ^[31])

أما طريقة التصفيح أو التليس فتعتبر الأفضل عند تقوية العناصر والمنشآت، على سبيل المثال ^{[47], [51], [52]}. في البداية، يجب تنظيف سطح الخرسانة القديمة من البقايا المتكسرة والأوساخ، ومن ثم تخشين السطح وترطيبه مسبقاً. ثم تنفذ طبقة من الخرسانة الناعمة بسماك حوالي 3-5 mm على سطح العنصر الحالي. بعدها يتم وضع ورق الطبقة الأولى من تسليح النسيج في طبقة الخرسانة الناعمة. ثم تتكرر خطوات وضع الخرسانة والرص في تسليح النسيج حتى يتم الوصول إلى العدد المطلوب من طبقات التسليح. في النهاية تتشكل طبقة رقيقة من الخرسانة الناعمة، والتي يمكن صقلها أو تشكيلها حسب الرغبة. كما يمكن تطبيق الخرسانة الناعمة يدوياً أو عن طريق الرش. استخدام المبادعات لتأمين توضع التسليح في مكانه المطلوب وفق هذه الطريقة ليس ضرورياً غالباً. يظهر في الشكل (4) على اليسار مثال على أحد أعمال التقوية بطريقة التصفيح أو التليس. بعد الانتهاء من صقل سطح الخرسانة الناعمة المطبقة، تتم المعالجة اللاحقة للخرسانة الكربونية بنفس الطريقة التي تعالج فيها أعمال الخرسانة التقليدية. يتم شرح وتوصف عملية التقوية والتدعيم باستخدام تسليح النسيج الكربوني وفقاً لـ ^[15] abZ Z- 31.10- 182 وكما ورد في مجلد ^[64] TUDALIT- Planermappe ويتم التعامل مع متطلبات تنفيذ عملية التقوية والتدعيم بشكل مفصل في إطار البند 4.2 منه.

إن سهولة استخدام هذه المادة المبتكرة ليست مهمة فقط كونها خفيفة الوزن. فهي توفر الراحة التامة لعمال البناء أثناء تنفيذها حيث يمكن قص نسيج التسليح الكربوني وفق الأبعاد والشكل المطلوب باستخدام المقص وتطبيقها ببساطة يدوياً دون الحاجة لأي معدات ثقيلة. ويمكن تنفيذ وتطبيق الخرسانة الناعمة على سبيل المثال باستخدام مجرفة صغيرة أو ملعقة مستوية أو من خلال جهاز قاذف.

يتم تنفيذ طريقة الطرد المركزي بعملية مشابهة لما يحصل في الخرسانة المسلحة. حيث يتم ترتيب وتثبيت التسليح عادة في قالب اسطواني الشكل، والذي يتم ملؤه بعد ذلك بالخرسانة. بعدها ينتج عن عملية الطرد المركزي مقطع عرضي يشبه الأنبوب المفرغ.

تعد طريقة ضغط العناصر الخرسانية بتسليح الكربون حالياً طور البحث والتجريب ولا يتم استخدامها أو نادراً ما تستخدم في الحياة العملية. حيث تواجه عملية تنفيذ الخرسانة وتوضع التسليح في نفس الوقت تحدياً عند استخدام هذه الطريقة.

الهدف من التقوية والتدعيم ليس فقط زيادة قدرة التحمل، ولكن أيضاً لتقليل التشوهات بشكل كبير في حالة حد الاستثمار، وكذلك الحصول على تشققات صغيرة جداً وموزعة بشكل منتظم في المناطق المقواة. لقد تم التأكد من ملائمة الخرسانة النسيجية لتقوية عناصر الخرسانة المسلحة من خلال تنفيذ العديد من الدراسات والاختبارات لأنواع التدعيم التالية:

- تقوية وتدعيم منطقة الشد في عناصر البلاطات والجوائز لزيادة قدرة التحمل تجاه عزوم الانعطاف.
- تقوية التسليح المخصص لمقاومة قوى القص بهدف رفع كفاءة عناصر الجوائز على القص.
- تطويق مقاطع الأعمدة دائرية ومضلعة الشكل لزيادة طاقة تحملها لقوى الضغط الناظمية المركزية وغير المركزية.

- تقوية العناصر ذات المقاطع الدائرية والمضلعة الشكل والمعرضة لعزوم الفتل بغرض زيادة طاقة تحملها لعزوم الفتل.^[35]

في جميع حالات التدعيم السابقة، يتم تقوية عناصر الخرسانة المسلحة من خلال تطبيق النسيج الكربوني من طبقة واحدة وبحد أقصى حتى ثمانية طبقات وفقاً للحاجة.

المشكلة في معظم أشكال التقوية هي التثبيت الآمن لطبقة التقوية أو تأمين تناقل القوة عبر سطوح التماس بين العنصر المدعم وطبقة التقوية. ويعتبر ضمان التثبيت شرطاً أساسياً للحصول على تقوية فعالة للعناصر. بالإضافة إلى التقوية والتدعيم، تعتبر خرسانة النسيج الكربوني مثالية لإصلاح الشقوق والأسطح الخرسانية التالفة.

5. مجالات الاستخدام.

تعود أولى الاستخدامات المعروفة للتقوية بالألياف الزجاجية في المنشآت إلى تسعينيات القرن الماضي. حيث استخدمت، إضافة إلى أماكن أخرى، في كندا واليابان. حيث تم استخدام تقوية من الألياف الزجاجية على شكل قضبان في أجزاء من منشآت الجسور.^[2] كذلك تم في الولايات المتحدة الأمريكية استخدام تقوية من الألياف الكربونية على شكل قضبان في منشآت الجسور خلال السنوات العشر الماضية^[18] أما في ألمانيا، فتركزت الاستخدامات حتى الآن على التقوية بواسطة القماش أو النسيج المصنوع من الكربون. فيما يلي، يمكن تصنيف مجالات استخدام الخرسانة الكربونية إلى: الاستخدام في تشييد المباني الجديدة، وصيانة / تقوية وتدعيم المنشآت القائمة.

1.5 الاستخدام في المباني الجديدة

معظم استخدامات الخرسانة الكربونية في المباني الجديدة تنحصر في الواجهات والتكسية والجدران، أنظر على سبيل المثال^[32]، أو أيضاً^[43]، تتوفر موافقات وتشريعات مسبقة لاستخدام هذا النوع من الخرسانة الكربونية في ألمانيا، على سبيل المثال^[32]. تشكل البلاطات الخرسانية على شكل ألواح والمنفذة من التسليح المصنوع من الكربون TRC و/أو الزجاج AR والتي يتراوح سمكها عادة من 10 mm إلى 30 mm فقط، حلاً بديلاً أو مكملاً للخرسانة المسلحة والتي يتم تنفيذها عادةً بسماكة تزيد على 70 mm حيث تم تسليح الألواح أو البلاطات الكبيرة، التي تصل أبعادها إلى 3×5 m، بشكل أساسي بالتسليح الكربوني. بالإضافة إلى منطقة الواجهات، تُستخدم الألواح الخرسانية أيضاً لتكسية الهياكل الأخرى. كمثال على ذلك يمكن ذكر واجهة مختبر Alfred Hütter في جامعة دريسدن TU Dresden حيث تم تنفيذ إكساءات الواجهات بالألواح المصنوعة من خرسانة النسيج الكربوني، أنظر الشكل (5)، أعلى اليمين.

كما تم بناء أحد الجسور في منطقة Albstadt-Ebingen، والذي استخدم فيه للمرة الأولى التسليح الكربوني حصرياً. يبلغ عرض الجسر 3 أمتار وامتداده 15 متراً ووزنه 14 طناً تقريباً. ويبلغ سمك بلاطة الطريق 9 cm وسمك

العوارض أسفل البلاطة 7 cm. يمكن عبور الجسر بمركبة يصل وزنها إلى 10 أطنان، الشكل (5) أعلى إلى اليسار.^[33] أمثلة أخرى على الجسور المخصصة للمشاة وراكبي الدراجات يمكن الاطلاع عليها أيضاً في^{[11]. [12]. [36]. [23].} أو وعادة ما تنفذ مثل هذه الجسور، من أجزاء مسبقة الصنع.



الشكل (5) أمثلة على استخدام الخرسانة الكربونية في المباني الجديدة؛ أعلى اليسار: جسر صغير مصنوع من الخرسانة الكربونية في Albstadt- Ebingen، أعلى اليمين: واجهة من الخرسانة الكربونية في TU Dresden، الصورة Ulrich van Stipriaan، أدناه: مجسم أول مبنى في العالم مصنوع من الخرسانة الكربونية، صورة Iurii (IMB) Vakaliuk (TU، دريسدن)

Fig. (5) Examples of the use of carbon concrete in new buildings; top left: trough bridge made of carbon concrete in Albstadt- Ebingen, top right: textile concrete facade at the TU Dresden, photo Ulrich van Stipriaan, below: visualization of the world's first building made of carbon concrete, photo Iurii Vakaliuk (IMB, TU Dresden)

مُنحت رخصة بناء لأول مبنى في العالم سينفذ من الخرسانة الكربونية في عام 2020. كانت هذه خطوة مهمة نحو تشييد أول مبنى مصنوع بالكامل من الخرسانة الكربونية. وبدأت حالياً أعمال البناء. سيتم بناء مبنى أسمه "CUBE" في شارع أينشتاين Einsteinstraße في مدينة دريسدن في ألمانيا، وهو غير مألوف في نمط بنائه ويعد سابقة في مجال البصريات: مبنى تجريبي بمساحة 220 متراً مربعاً سيكون أيضاً بمثابة منصة اختبار وله شكل سقف منحنى مجدول معمارياً، ومصنوع بالكامل من الخرسانة الكربونية، الشكل (5) ، أدناه. عنصرا ملتويان مرتبان بشكل متماثل مقابل بعضهما البعض وفي نفس الوقت يشكلان جانب وأعلى المنشأة ويمثلان نطاق استخدام غير عادي لنمط بناء الخرسانة الكربونية.^[66] يظهر الجزء الصندوقي المنفذ ضمن المبنى، أنه من الممكن تنفيذ هياكل المباني التقليدية أيضاً باستخدام الخرسانة الكربونية وفقاً لأحدث ما توصلت إليه التكنولوجيا.^[20] بناء الـ "CUBE" هو ثمرة لمعظم النتائج التي تم تحقيقها في مشروع C3 منذ عام 2014.

يشارك في تنفيذ مشروع البناء هذا شركات مشهورة مثل:

AIB GmbH, Assmann Beraten & Planen GmbH, Betonwerk Oschatz GmbH, Hoch- und Tiefbau GmbH & Co. KG Sebnitz sowie texton e. V., HTWK Leipzig und TU Dresden.

2.5 الصيانة والتقوية والتدعيم

يتم استخدام الخرسانة الكربونية على نطاق واسع في مجال الصيانة / التقوية والتدعيم، عندما يلزم زيادة قدرة التحمل العناصر الحاملة وفي نفس الوقت أن تكون سماكة التقوية أقل ما يمكن، بحيث يترتب على ذلك أقل زيادة ممكنة في وزن العنصر المدعم مع الحفاظ على حجم المبنى كما كان قبل التدعيم، على سبيل المثال^[4]،^[19] كما يتم استخدام الخرسانة الكربونية في مجال صيانة وحماية المعالم الأثرية، حيث يجب الحفاظ على مظهر المبنى كما في السابق، مع زيادة القدرة على التحمل.

تعتبر منسوجات التسليح الكربوني مناسبة بشكل خاص لتقوية الهياكل المنحنية، مثل القشريات أو القباب، نظراً لمرونتها الكبيرة وسهولة استخدامها وتشكيلها مقارنة بفضولاد التسليح التقليدي^[50].

تم استخدام الخرسانة الكربونية منذ 15 عاماً لتجديد وتقوية العديد من المنشآت القشرية والقباب ذات الطابع التاريخي. مثال على هذه الأعمال، تقوية وتدعيم السقف الأسطواني في مدينة تسفيكاو Zwickau في ألمانيا، والذي تم بنائه عام 1903،^[42]،^[53]،^[54] في كل من الهياكل الخرسانية المسلحة، التي يبلغ سمكها 8 cm فقط، تمت زيادة قدرة التحمل الحالية إلى المستوى المطلوب بإضافة طبقات من الخرسانة الكربونية بسماكة 1 cm إلى 2 cm تقريباً. من خلال تنفيذ طبقات التقوية الرقيقة جداً، أمكن تحقيق متطلبات حماية النصب التذكاري مع الحفاظ على المظهر الأصلي له، الشكل (6).



الشكل (6) أمثلة على استخدام الخرسانة الكربونية في التقوية^[53]؛ إلى اليسار: غمس ورص القماش الكربوني في الطبقة الخرسانية الناعمة، إلى اليمين: سقف أسطواني لمحمية من الأثار بعد انتهاء عملية التجديد

Fig. (6) Examples of the use of carbon concrete in reinforcement^[53]; left: embedding the carbon fabric in the fine concrete layer, right: monument-protected barrel roof after the renovation

تستخدم الخرسانة الكربونية أيضاً في أعمال التقوية الكلاسيكية للبلطات المنفذة من الخرسانة المسلحة العادية. علاوة على ذلك، تم صيانة وتجديد صومعتين تخزين باستخدام الخرسانة الكربونية. الصومعة الأولى أسطوانية الشكل منفذة من الخرسانة المسلحة بسعة 20 ألف طن من السكر، وقطرها الخارجي حوالي 30 متراً وارتفاعها حوالي 45 متراً، وظهرت داخل الصومعة العديد من الشقوق مع عرض شقوق كبير. تعرضت الصومعة الثانية بسعة 80 ألف طن من السكر إلى أضرار من الداخل بسبب الحريق. تم صيانة وتجديد أسطح كلا الصومعتين بطبقة خرسانية كربونية^[34]،^[50].

في عملية صيانة وتجديد جسور الطرق، تم استخدام الخرسانة الكربونية لصيانة جسر وحيد الفتحة في ألمانيا في عام 2012 وجسر متعدد الفتحات في عام 2014،^[44] تم في كلا الجسرين من الخرسانة المسلحة إضافة طبقة خرسانية كربونية غلفت العناصر الحاملة بشكل مباشر. في عام 2020، تم بنجاح تدعيم جسر طريق خرساني سابق الإجهاد لأول مرة باستخدام الخرسانة الكربونية،^[60]،^[61]،^[62] كذلك تسمح المزايا المتعددة للخرسانة الكربونية بترميم وتحديث الجسور الصغيرة المخصصة للمشاة وراكبي الدراجات، على سبيل المثال^[3].

6. مزايا وعيوب للخرسانة الكربونية.

تمتلك المنسوجات والخرسانة الكربونية مزايا كبيرة تجعلها مفضلة على الخرسانة المسلحة التقليدية، نذكر

منها:

- الهياكل الخرسانية النسيجية نحيفة وخفيفة وعالية الأداء وموفرة للمواد.
- التسليح الكربوني لا يصدأ. وهذا يتيح بشكل ملحوظ، عمر خدمة أطول للمنشآت الخرسانية.
- نظراً لأن التسليح الكربوني لا يحتاج إلى الحماية من التآكل مثل حديد التسليح، يمكن تقليل الغطاء الخرساني، الذي يبلغ سمكه عدة سنتيمترات بالخرسانة المسلحة، إلى بضعة ملليمترات في الخرسانة الكربونية.
- من الممكن إنشاء هياكل رشيقة ورقيقة وتوفير المواد بنسبة تزيد على 50%.
- تبلغ سماكة بلاطات الواجبات المصنوعة من الخرسانة الكربونية 2-3 cm، بينما تبلغ تلك السماكة عند استخدام الخرسانة المسلحة 7-8 cm.
- يبلغ سمك طبقات تقوية الهياكل المصنوعة من الخرسانة المسلحة حوالي 7 cm بينما يبلغ سمك الطبقات المصنوعة من الخرسانة الكربونية فقط 1-2 cm. يعد هذا مفيداً عند تجديد وصيانة المباني الأثرية التي يجب أن يكون لها بعد التجديد مظهر مشابه كما كان قبل التجديد.
- بالمقارنة مع حديد التسليح، فإن الكربون أخف أربع مرات (كثافة 1.8 g/cm^3 بدلاً من 7.8 g/cm^3 ومقاومته أكبر خمس إلى ستة أضعاف (حوالي 3000 N/mm^2 بدلاً من 500 N/mm^2) لذلك، فإن الكربون أكثر كفاءة من حديد التسليح بأكثر من 20 مرة.
- يتطلب استخدام الخرسانة الكربونية مواد أقل، الأمر الذي يجب أخذه في الحسبان عند مقارنة الأسعار.
- تقليل وقت التنفيذ وبالتالي تقليل وقت الإخلاء أثناء التجديد والتقوية.
- تتيح مرونة نسيج التسليح الكربوني حرية إبداعية إضافية للمهندسين المعماريين والمصممين لتنفيذ الفكرة وملائمة الوظيفة الاستثمارية.
- تملك الخرسانة النسيجية الكربوني سلوك تصدع موحد مع عرض شقوق صغير جداً. وهذا يجعلها أكثر كتامة من الخرسانة المسلحة العادية.
- بعد انتهاء العمر التصميمي، يمكن فصل الكربون والخرسانة ومن ثم إعادة تدوير الخرسانة في وسائل إعادة تدوير الخرسانة والكربون في وسائل إعادة تدوير الكربون^[36]،^[38].
- أحد العيوب القليلة هو الافتقار إلى حد كبير للأتمتة في تصنيع عناصر الخرسانة الكربونية. في مصانع المسبق الصنع على سبيل المثال، غالباً ما يتم قطع التسليح يدوياً، ولا يكاد يوجد أي روبوتات (مثل روبوتات اللحام المستخدمة في الخرسانة المسلحة). عيب آخر للخرسانة الكربونية هو نقص الخبرة في إعادة التدوير. حتى إذا كان من الممكن بالفعل فصل الكربون والخرسانة وإعادة تدويرهما، فإن صناعة البناء (كما هو الحال في الصناعات

الأخرى) تفتقر إلى حد كبير إلى المنتجات التي سُنستخدام فيها ألياف الكربون المعاد تدويرها. سيكون هذا محور البحث في السنوات القادمة^[38].

7. البحث التجريبي.

1.7 مقدمة

لم يتم اختبار مؤثرات التدعيم على العناصر الخرسانية المسلحة المنفذة، خاصة عناصر الأعمدة، بشكل كافي حتى الآن. في ابحاث سابقة تم اختبار تأثير التطويق العرضي لمقاطع الأعمدة باستخدام خرسانة النسيج الكربوني وتم تطوير نماذج حسابية تحاكي نتائج الدراسات التجريبية لتفسير تأثير التطويق العرضي في زيادة طاقة تحمل الأعمدة،^[46]

في إطار المشروعين C3- V1.2 و C3- V2.7^[13]، تم إجراء المزيد من الاختبارات على أعمدة ذات أبعاد حقيقية ومقواة بالخرسانة النسيجية. كان الهدف الرئيسي من الاختبارات دراسة تأثير بعض البارامترات الإضافية على فعالية التدعيم باستخدام الخرسانة الكربونية، وإثبات إمكانية تطبيق النماذج الحسابية على العناصر المقواة بالخرسانة الكربونية.

استكمالاً للتجارب والأبحاث السابقة تم تنفيذ 14 عينة اختبار في جامعة دريسدن في عام 2019، لدراسة العديد من المتغيرات على فعالية التدعيم. تمت مناقشة نتائج الاختبار على العينات وإجراء التحقيقات التجريبية وتم اقتراح النماذج الحسابية التي تحاكي نتائجها الحسابية بشكل جيد نتائج التجربة. استند حساب طاقة تحمل الأعمدة باستخدام النماذج الحسابية المقترحة على خصائص المواد التي تم الحصول عليها من نتائج التجارب المرافقة للبرنامج التجريبي الأساسي.

2.7 وصف البرنامج التجريبي

شملت العينات المختبرة على أعمدة خرسانية مقواة بالنسيج الكربوني، إضافة إلى الأعمدة الخرسانية المسلحة الغير مقواة والتي كانت بمثابة عينات مرجعية من أجل المقارنة. وتم إجراء الاختبارات في مختبر أوتو مور Otto-Mohr-Laboratorium التابع لجامعة دريسدن.

شملت البارامترات المختبرة على تأثير أبعاد العمود وشكله وعلى تأثير نوع تسليح طبقة التقوية وشكله وكذلك تأثير استدارة زوايا الأعمدة. يعرض الجدول (4) معلومات حول الأعمدة المختبرة، إضافة إلى البارامترات المدروسة.

الجدول (4) وصف الأعمدة المختبرة^[13]

Table (4) Description of the tested columns^[13]

رمز العمود	شكل المقطع العرضي وأبعاده [m]	حالة التدعيم غير مدعم / مدعم	شكل تسليح النسيج الكربوني	استدارة زاوية العمود [mm]
1_1	0.2 × 0.2	مدعم	L-زوايا شكل	R20
1_2	0.2 × 0.2	غير مدعم	-	
2_1	0.3 × 0.3			
2_2	0.3 × 0.3	مدعم	L-زوايا شكل	
2_3	0.3 × 0.3		A-قفص شكل	

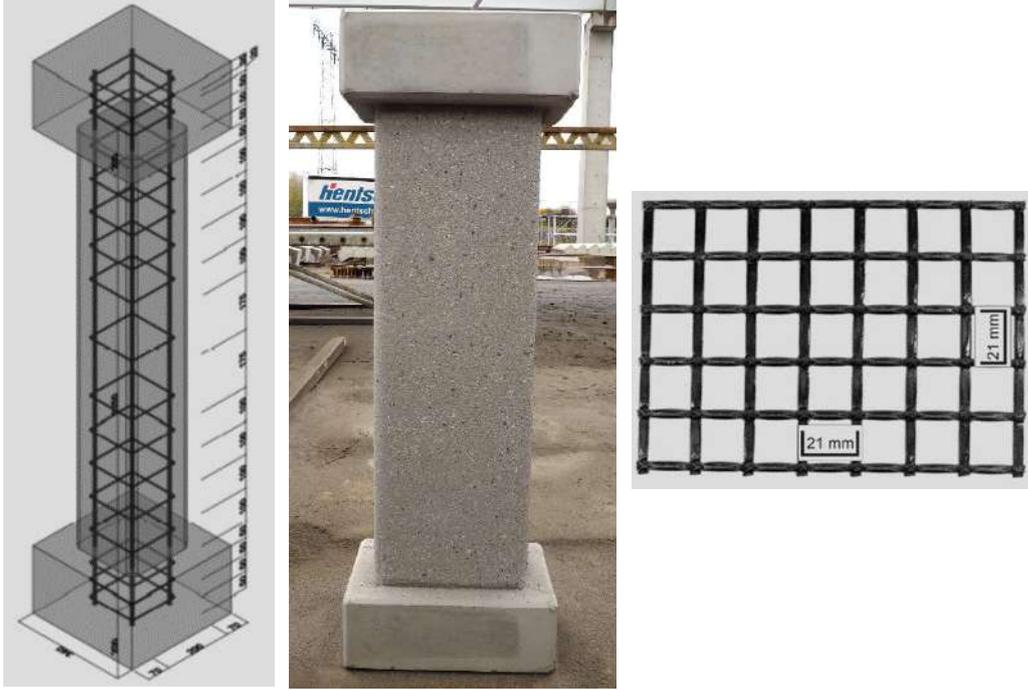
رمز العمود	شكل المقطع العرضي وأبعاده [m]	حالة التدعيم غير مدعم / مدعم	شكل تسليح النسيج الكربوني	استدارة زاوية العمود [mm]
2_4	0.3 × 0.3		B-قفص شكل	
3_1	0.4 × 0.4		-لزوايا شكل	
3_2	0.4 × 0.4	غير مدعم	-	
4	0.37 × 0.25			
5	0.41 × 0.21			
6_1	0.3 × 0.3	مدعم	-لزوايا شكل	R60
6_2	0.3 × 0.3			R40
7_1_2	D 0.34	غير مدعم	-	
7_1_3	D 0.34	مدعم	شكل دائري	

3.7 العينات التجريبية

1- المواصفات والأبعاد

كما هو واضح من الجدول (4) تم تنفيذ أعمدة ذات مقاطع عرضية مختلفة الشكل والأبعاد وبطول كلي ثابت قدره $L=1.65$ m لجميع العينات. تم تنفيذ رأس وقاعدة لكل عمود تزيد أبعادها بمقدار 7cm اعتباراً من طرف العمود وبارتفاع 20 cm. تم استخدام فولاذ ماركة B500A للتسليح الطولي والعرضي في العمود. وكان التسليح الطولي في جميع الأعمدة المضلعة $4\Phi 12$ وفي الأعمدة الدائرية $6\Phi 12$ ، أما التسليح العرضي فكان $\Phi 6/80$ mm في الثلثين العلوي والسفلي لكافة الأعمدة و $\Phi 6/110$ mm في الثلث الوسطي. وبلغت سماكة التغطية الخرسانية 24 mm. أما الخرسانة المستخدمة في جميع الأعمدة فكانت من ماركة C35/45 وفق الكود الأوروبي.^[15] يوضح الشكل (7) شكل العمود المختبر وشكل توضع التسليح الطولي والعرضي فيه.

تسليح النسيج الكربوني المستخدم في التقوية من إنتاج شركة solidian من ماركة GRID Q85/85، انظر الجدول رقم^[55] (1) أما الخرسانة الناعمة المستخدمة في أعمال التقوية فهي من ماركة Pagel^[29]، انظر الجدول (3).



الشكل (7) وصف الأعمدة المختبرة؛ إلى اليسار: رسم تخطيطي لتسليح العمود، في الوسط: شكل الأعمدة النهائية قبل التقوية، إلى اليمين: تسليح النسيج الكربوني GRID Q85/85^[13]

Bild (7) Reinforced concrete column; left: diagram of the column reinforcement, middle: finished columns before reinforcement, right: Carbon Textile Reinforcement GRID Q85/85^[13]

2- التصنيع والنقل:

تم إنتاج العينات الخرسانية المسلحة في شركة Hentzschke في نوفمبر 2019 وفقاً لمخططات التسليح المقدمة. كما تم إنتاج عينات اختبار مرافقة لتحديد مقاومة الانضغاط والانحناء بالتوازي مع عينات الأعمدة. بعد تصلب العينات تم ضربها بالرمل (انظر الشكل 8) من أجل تحقيق خشونة السطح الكافية وبالتالي تأمين الترابط الجيد بين طبقة التقوية والجسم الأساسي للعمود.

بعدها تم نقل العينات إلى دريسدن، حيث استكملت أعمال التقوية في مخبر أوتو مور Otto-Mohr-Laboratorium في ديسمبر 2019. تم ترطيب السطح مسبقاً من أجل تأمين ترابط أفضل بين الخرسانة القديمة وطبقة التقوية. ثم وضع طبقة من الخرسانة الناعمة بسمك 5 mm على السطح الخارجي للعمود. إضيف بعدها التسليح الكربوني وتم الضغط قليلاً عليه في هذه الطبقة. أخيراً تم وضع طبقة خرسانية ناعمة ثانية بسمك 5 mm. بعد تمليس السطح تماماً، تمت حفظ الأعمدة بقطعة قماش مبللة ورقائق بلاستيكية للتخفيف من آثار التقصص. كانت سماكة طبقة التقوية بالكامل متضمنة طبقة تسليح النسيج الكربوني 10 mm. يمكن رؤية تسلسل العمل في الشكل (8).



الشكل (8) إنتاج تقوية العمود؛ من الأعلى إلى الأسفل: عمود قابل للدوران لأعمال التقوية، ضغط التسليح الكربوني، تطبيق الطبقة الثانية من الخرسانة الناعمة^[13]

Fig. (8) Production of the column reinforcement; From top to bottom: rotatable support for the reinforcement work, pressing in the carbon reinforcement, applying the second fine concrete layer^[13]

3- عينات الاختبار الروتينية والمرافقة:

إضافة إلى أعمال الخرسانة العادية في الأعمدة، تم صنع 3 أسطوانات خرسانية من كل دفعة صب لتحديد المقاومة ومعامل المرونة ومنحنى الإجهاد والانفعال. بالإضافة إلى ذلك، تم صنع 3 عينات موشورية من نفس خرسانة الأعمدة ليتم اختبارها في وقت اختبار الأعمدة. وكانت أبعاد العينات الموشورية 40x40x160 mm، حيث تم معالجة عينات الاختبار لاحقاً وتخزينها في الهواء، لتستخدم هذه العينات في تحديد مقاومة الانحناء. وبعدها يتم فحص القطع الموشورية النصفية لمقاومة الانضغاط.

فيما يخص الخرسانة الناعمة لطبقة التقوية، تم استخدام نفس مزيج الخرسانة الجافة من شركة Pagel في نفس الوقت الذي تمت فيه أعمال التقوية، تم عمل 6 عينات موشورية، ليتم تحديد قوة الشد على الانحناء ثم مقاومة الانضغاط عليها.

كذلك تم إخضاع حديد التسليح المستخدم في الأعمدة بأقطار 6 mm و 12 mm لاختبار مقاومة الشد في مختبر Otto- Mohr لتحديد معامل المرونة. يمكن الاطلاع على اختبارات النماذج الروتينية المرافقة على المواد في الجدول (5).

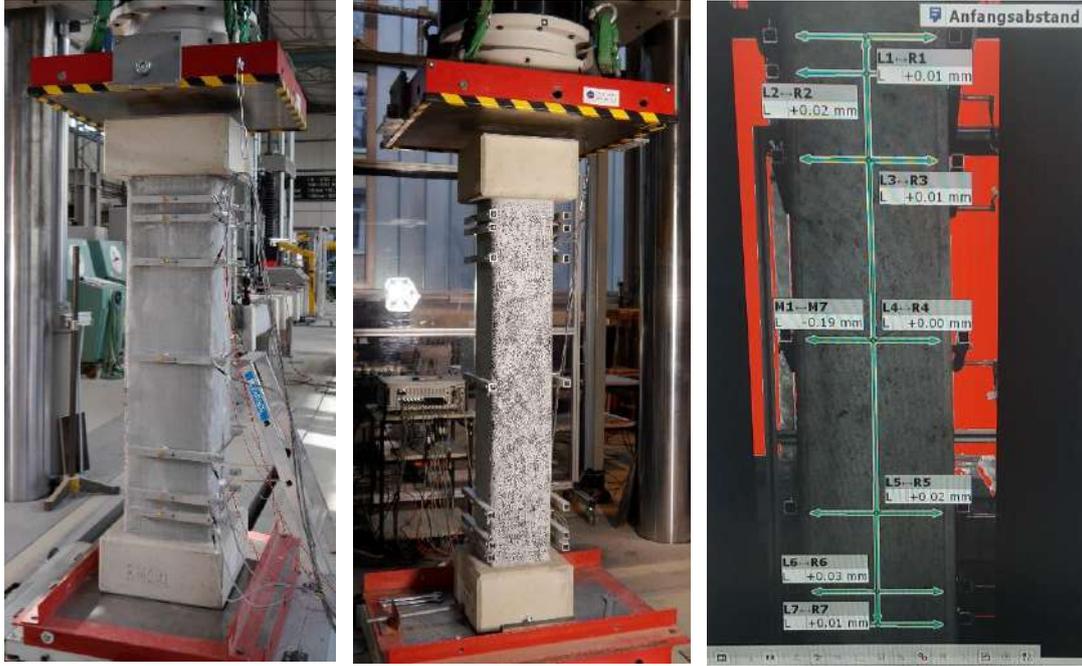
الجدول (5) قائمة بجميع الاختبارات الروتينية والمرافقة^[13]

Table (5) List of all routine and accompanying tests^[13]

عدد العينات	التجارب والخصائص المطلوب تحديدها	عينات الاختبار الروتينية
3/6	مقاومة انحناء / مقاومة انضغاط	موشورية 40 × 40 × 160 mm
42	منحني التشوه- الإجهاد ; معامل المرونة; مقاومة الضغط	أسطوانية d = 150 mm, h = 300mm
10	منحني التشوه- الإجهاد;	∅ 6 mm; l = 120 mm
10	معامل المرونة; مقاومة الشد	∅ 12 mm; l = 120 mm
8/16	مقاومة انحناء / مقاومة انضغاط	موشورية 40 × 40 × 160 mm

4.7 إجراء التجربة، منصة الاختبار وتكنولوجيا القياس

في الأشهر من فبراير إلى مايو 2020، تم اختبار جميع الأعمدة الخرسانية المسلحة في مختبر أوتو مور التابع لجامعة دريسدن في ظروف المناخ الداخلي حتى أو قبل فترة وجيزة من الانتهاء. جميع الاختبارات التي تم إجراؤها كانت اختبارات ضغط باتجاه محور العمود. كان عمر طبقة التقوية المطبقة خلال تنفيذ التجربة 28 يوماً على الأقل. تم تطبيق الحمل على جميع الأعمدة بطريقة التحكم بالانتقالات. وبلغت سرعة تطبيق الحمل في الاختبار 0,01 mm/s. تم إجراء الاختبارات في آلة اختبار MN 10 في مختبر Otto Mohr. وتم تطبيق القوة الناظمية على الأعمدة بشكل رأسي ومنتظم على المقطع العرضي بأكمله عبر أسطوانة هيدروليكية. يمكن رؤية الهيكل الأساسي للتجربة في الشكل (9). تم تثبيت 7 أجهزة (IWA) لقياس التشوه العرضي خلال تطبيق الحمولة و 7 أجهزة (DMS) لتسجيل التشوه في الاتجاه الطولي للعمود، الشكل (9) إلى اليسار. وتم مراقبة توسع التشققات وأيضاً قياس التشوهات من خلال الصور الفوتوغرافية، الشكل (9) في الوسط وإلى اليمين. تم اختيار مكان ترتيب معدات القياس بطريقة دقيقة حيث كان من المتوقع حصول التشوهات والتشققات الكبيرة.



الشكل (9) اختبارات العمود؛ إلى اليسار: الإعداد التجريبي الأساسي، اليمين: ترتيب أجهزة القياس^[13]
Fig. (9) Column tests; left: basic experimental setup, right: arrangement of the sensors^[13]

5.7 نتائج الاختبارات

1- العينات الروتينية والمرافقة:

من خلال التجارب على العينات المرافقة، تم تحقيق مقاومة الخرسانة المطلوبة C 35/45، حيث بلغت مقاومة الانضغاط للخرسانة 97.7 N/mm^2 بعد فترة تخزين بلغت 93 يوماً. وبلغت قوة الانحناء 5.6 N/mm^2 . يبين الجدول (6) القيم المقاسة للخرسانة الأساسية لكل عمود.

الجدول (6) القيم المميزة لخرسانة الأعمدة (القيم المتوسطة من 42 اختباراً)^[13]

Table (6) Characteristic values of the base body concrete (mean values from 42 tests)^[13]

رمز العمود	الإجهادات الأعظمية $\sigma_{\max} [\text{N/mm}^2]$	التشوهات الأعظمية $\epsilon_{\max} [\%]$	معامل المرونة $E_{cm} [\text{N/mm}^2]$
1_1	49.3	-2.7	29.688
1_2	51.0	-2.6	29.568
2_1	52.5	-2.7	29.931
2_2	49.6	-2.3	32.460
2_3	53.5	-2.7	31.789
2_4	52.1	-2.6	30.493
3_1	54.1	-2.8	28.383
3_2	54.6	-3.0	30.527
4	46.3	-2.9	25.636
5	59.4	-3.1	31.369
6_1	46.9	-2.6	28.183
6_2	48.8	-2.7	29.444

رمز العمود	الإجهادات الأعظمية	التشوهات الأعظمية	معامل المرونة
	σ_{max} [N/mm ²]	ϵ_{max} [‰]	E_{cm} [N/mm ²]
7_1_2	56.4	- 2.6	34.656
7_1_3	59.6	- 2.8	32.752
القيمة الوسطية	52.3	- 2.7	30.349

الجدول (7) يلخص أيضاً خصائص فولاذ التسليح الطولي والعرضي الناتجة من التجارب.

الجدول (7) القيم المميزة لحديد التسليح (القيم المتوسطة من 10 اختبارات)^[13]

Table (7) Characteristic values of the steel reinforcement (mean values from 10 tests)^[13]

عينة الاختبار المراقبة	الخصائص		القيمة
Ø 6 mm; l = 120 mm	حد المرونة	R_{eH} [N/mm ²]	563.3
	حد الانقطاع	R_m [N/mm ²]	613.1
	معامل المرونة	E_{sm} [N/mm ²]	180.294
Ø 12 mm; l = 120 mm	حد المرونة	R_{eH} [N/mm ²]	-
	حد الانقطاع	R_m [N/mm ²]	613.5
	معامل المرونة	E_{sm} [N/mm ²]	176.253

تم إجراء فحص خصائص الخرسانة الناعمة كجزء من ضمان الجودة وللتحقق أن العمل قد تم على درجة

جيدة خلال عملية التقوية بأكملها. يظهر الجدول (8) حدوث تغيير طفيف في خصائص الخرسانة تبعاً لعمرها.

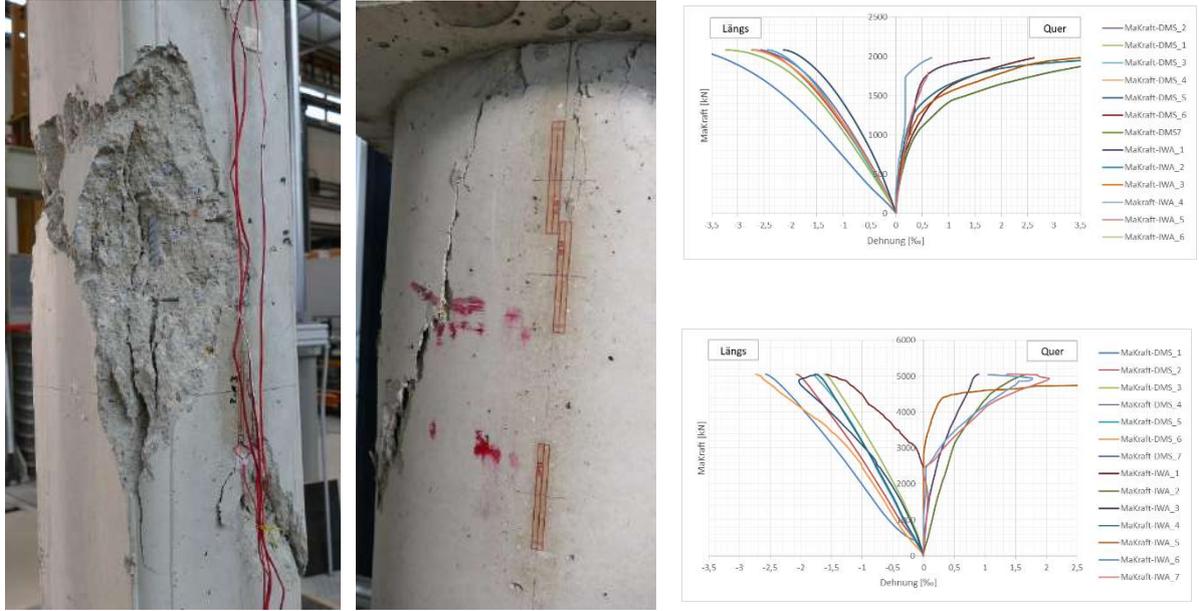
الجدول (8) خصائص الخرسانة الناعمة من الاختبارات الروتينية والمرافقة^[13]

Table (8) Characteristic values of fine concrete from routine and accompanying tests^[13]

أبعاد عينة الاختبار	عمر العينة	الخصائص		القيمة
موشورية 40 × 40 × 160 mm ³	يوم 163	مقاومة الشد على الانحناء	R_f [N/mm ²]	7.05
		مقاومة الضغط	R_c [N/mm ²]	76.1
موشورية 40 × 40 × 160 mm ³	يوم 176	مقاومة الشد على الانحناء	R_f [N/mm ²]	8.51
		مقاومة الضغط	R_c [N/mm ²]	85.5

2- اختبار عناصر العينات المرجعية (أعمدة غير مدعمة)

كما هو وارد في الجدول (4)، تم اختبار أربعة أعمدة غير مدعمة كعينات مرجعية ذات مقاطع هندسية مختلفة. تظهر منحنيات التشوه- القوة المسجلة سلوكاً نموذجياً للأعمدة الخرسانية المسلحة. في الأعمدة الأربعة جميعاً، حدث تصدع في المنطقة العلوية والسفلية من الأعمدة في اتجاه الحمل. بملاحظة منحنيات التشوه- القوة الموضحة في الشكل (10)، تحصل تشوهات انضغاط طولية منتظمة في بداية الاختبارات، بينما يزيد التشوه العرضي ببطء شديد في البداية. مع زيادة القوة، يأخذ التمدد العرضي مساراً مسطحاً. قبل نهاية الاختبار بفترة وجيزة، يحافظ التمدد العرضي على مساره الأفقي باستمرار أو يقترب من قيمته عند قوة قصوى معينة. استمر تحميل الأعمدة الأربعة حتى الانهيار. حيث تجلى الانهيار في تقشر الخرسانة أو ظهور شقوق طولية واسعة. يوضح الشكل (10) مثلاً للتشظي الخرساني النموذجي في الأعمدة غير المدعمة.



الشكل (10) أشكال انهيار الأعمدة المرجعية؛ يسار: العمود 1_2، وسط: العمود 7_1_2

منحنيات التشوه - القوة، أعلى يمين: العمود 1_2، أسفل يمين: العمود 7_1_2^[13]

Figure (10) breakdown images of the reference columns; Left: Column 1_2, Middle: Column 7_1_2
Deformation- force curves, top right: column 1_2, bottom right: column 7_1_2^[13]

3- اختبار عناصر العينات المدعمة (أعمدة مدعمة)

من أجل الحصول على مقارنة مباشرة بين الأعمدة المدعمة وغير المدعمة، تتم مقارنة حمولة الانهيار لجميع الأعمدة، انظر الجدول (9). تم قياس القوة القصوى للأعمدة المدعمة لحظة الانهيار أو قبل وقت قصير من نهاية الاختبار. الأعمدة المدعمة مميزة بخط داكن.

الجدول (9) الحد الأقصى لقوة الآلة المطبقة

Table (9) Maximum machine force applied

رمز العمود	الحد الأقصى للقوة المطبقة F_{max} [kN]	رمز العمود	الحد الأقصى للقوة المطبقة F_{max} [kN]
1_1	2639.1	3_2	8888.0
1_2	2084.2	4	4799.5
2_1	4621.6	5	5807.2
2_2	4999.2	6_1	5318.5
2_3	5644.7	6_2	5132.7
2_4	5852.6	7_1_2	5057.0
3_1	8441.1	7_1_3	4671.5

تشابه أنماط انهيار الأعمدة المدعمة مع تلك الموجودة في الأعمدة غير المدعمة. كما يتضح من الشكل (11)، تتقشر الخرسانة من العمود مرة أخرى أو تظهر تشققات على طول اتجاه التحميل. وحدث تقشر لطبقة التسليح بشكل متشابه في جميع عينات الاختبار. كما يتضح أيضًا في الشكل (11)، كان هناك انتفاخ في طبقة

التقوية بسبب الحمل. وحصل الانهيار في عينات الاختبار المدعمة بشكل مفاجئ، دون ملاحظة أي إشعار مسبق لحصول الانهيار.



الشكل (11) أنماط انهيار الأعمدة المدعمة؛ يسار: العمود 1_1، يمين: العمود 7_1_3 [13]

Fig. (11) Failure patterns of reinforced columns; left: column 1_1, right: column 7_1_3 [13]

لم يمكن تحميل جميع الأعمدة حتى كامل قدرتها على التحمل. والسبب في ذلك تقشر طبقة التسليح قبل الوصول إلى قدرة التحمل الكاملة. رغم قدرة العمود على الاستمرارية في التحمل، لم يعد من الممكن اختبار تأثير طبقة التقوية. لذلك تم وقف التجارب عند هذا الحد. يوضح الجدول (10) الأعمدة التي تم اختبارها حتى الانهيار وأنها فقط حتى تقشر طبقة التقوية. تم إنهاء الاختبارات على الأعمدة 3_1 و 7_1_3 قبل الأوان. في كلتا الحالتين، حصل تقشر في طبقة الخرسانة الكربونية.

من أجل تقييم تأثير التقوية، يجب أن تؤخذ في الحسبان البارامترات المتعلقة بالأبعاد الهندسية. فاستناداً إلى الأبعاد الهندسية، يمكن إجراء مقارنة مباشرة بين عينات الاختبار 1_1 و 1_2 و 2_1 إلى 2_4 و 3_1 و 3_2 وكذلك 7_1_2 و 7_1_3. بينما تسمح عينات الاختبار الأربعة المتبقية بتقديم بيانات حول تأثيرات البارامترات الأخرى (انظر الجدول 10).

كما يتضح من الجدول (9)، فإن الزيادة في الحمل على الأعمدة 1_1 و 2_2 هي 600-700 كيلو نيوتن مقارنة بالأعمدة الغير مدعمة 1_2 و 2_1. بناءً على ذلك، يمكن القول أن تقوية الأعمدة بالخرسانة الكربونية لها تأثير إيجابي على قدرة تحمل الأعمدة. في الأعمدة المدعمة 3_1 و 7_1_3، انخفضت القوة القصوى للآلة بحوالي 400 كيلو نيوتن مقارنة بالأعمدة غير المدعمة 3_2 و 7_1_2. يعد هذا الانخفاض على الرغم من التقوية غير مبرر، مما يلزم تفسير مصدر الخطأ الذي لا يمكن إهماله. لكن تجدر الإشارة هنا إلى أنه تم إنهاء الاختبارات قبل انهيار الأعمدة تماماً، بسبب رصد انهيار في طبقة التقوية. إذاً إيقاف التجربة قبل الوصول إلى حالة الانهيار الفعلي، يفسر سبب الانخفاض. تغير أشكال تسليح النسيج المستخدمة في الأعمدة 2_3 و 2_4، أدت إلى زيادة في الحمل بحوالي 1000-1200 كيلو نيوتن مقارنة بالعمود غير المدعم 2_1. عادة تحتفظ الشركة المصنعة بالحق في تحديد الخصائص الدقيقة لأشكال تسليح النسيج. ونتيجة لذلك، لم يتم إجراء اختبار مفصل على أشكال النسيج المختلفة، حيث كان متاحاً فقط استخدام الشكلين المتوفرين.

بواسطة الأعمدة 6_1 و 6_2 تم اختبار تأثير نصف قطر انحناء الحواف. وبواسطة الأعمدة 2_1 و 2_2 أمكن إجراء مقارنة مباشرة استناداً إلى الأبعاد الهندسية والتسليح. وفقاً للجدول (9)، تزيد القوة القصوى للأعمدة 6_1 و 6_2 ما بين 500 و 700 كيلو نيوتن مقارنة بالعمود الغير مدعم 2_1. إضافة إلى ذلك وبملاحظة الحمولة المقاسة للأعمدة المدعمة 2_2 و 6_1 و 6_2، يمكن القول أن طاقة تحمل العمود تزداد مع زيادة نصف قطر الاستدارة. في حالة الأعمدة 4 و 5، جرى اختبار تأثير نسبة بعدي العمود على قدرة التحمل. وتبلغ هذه النسبة في العمود 4 قيمة 1:1.5 حيث مساحة المقطع العرضي لنواة العمود 640 cm^2 ، بينما تبلغ هذه النسبة في العمود 5 قيمة 1:2 حيث مساحة المقطع العرضي لنواة العمود 576 cm^2 . بالمقارنة مع العمود غير المدعم 2_1 (مساحة المقطع العرضي لنواة العمود 625 cm^2)، فإن العمود 4 له قدرة تحمل عالية مماثلة. العمود 5 لديه قدرة تحمل 5807 كيلو نيوتن. هذا يعني أن قدرة التحمل أكبر من تلك الخاصة بالعمود المدعم 2_2 (مساحة المقطع العرضي لنواة العمود 625 cm^2). هذا ما يستلزم أيضاً أخذ تغير نسبة بعدي العمود في الحسبان. بالإضافة إلى قياس قدرة التحمل، تم قياس التشوهات الطولية والعرضية أثناء الاختبارات باستخدام مقاييس التشوه DMS ومقاييس التمدد IWA. تم تثبيت هذه المقاييس مباشرة على سطح الخرسانة. لذلك أمكن إجراء القياسات فقط عند سطح العينات. من خلال تطبيق طبقة التقوية، لم يعد من الممكن قياس تشوهات خرسانة العمود الأساسي C35/45 مباشرة. لم يكن من الممكن تجريبياً تركيب مقاييس التشوه في طبقة التقوية. كما يتضح في الشكل (7)، فإن قياس التشوهات العرضية يخضع لتقلبات شديدة، حيث أصبح مكان تركيب المقاييس مفصلاً عن جسم العمود نتيجة زيادة الحمل. وهذا ما يفسر التقلبات القوية في مخططات القوة والتشوه.

6.7 إعادة حساب الأعمدة

1- منهجية الحساب

اعتمد حساب طاقة تحمل الأعمدة المدعمة بخرسانة النسيج الكربوني على النموذج الحسابي وفق [46] و [39]. النموذج الحسابي وفق [46] يأخذ في الحسبان تطويق الأعمدة بطبقة تقوية من خرسانة النسيج الكربوني. بينما يمكن إعادة حساب الأعمدة غير المدعمة باستخدام نموذج الحساب وفقاً ل [39]. من خلال مقارنة طاقة تحمل الأعمدة المحسوبة نظرياً بالقوة المقاسة الفعلية، تم اختيار النموذج الحسابي الأكثر ملائمة للنتائج التجريبية.

2- النتائج

في الجدول التالي (10) تم مقارنة طاقة تحمل الأعمدة المقاسة والمحسوبة. كما يتضح من الجدول (10)، تظهر فروقات مقبولة بين القيم المحسوبة والمقاسة. والشكل (12) يبين النسبة المئوية لهذه الفروقات، والتي لا تتجاوز قيمة 10% باستثناء الأعمدة 6_1, 3_1 و 7_1.

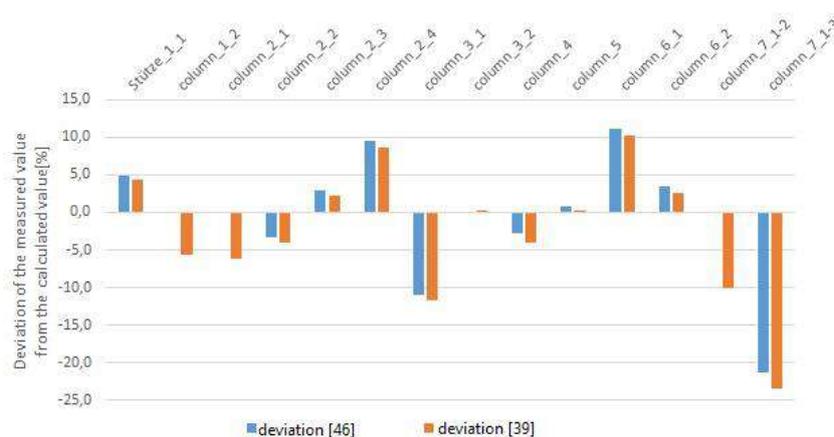
الجدول (10) مقارنة الأحمال المقاسة والمحسوبة [13]

Table (10) Comparison of the measured and calculated loads [13]

رمز العمود	الحمولات المقاسة [kN]	الحمولات المحسوبة وفق [5] بال [kN]	الحمولات المحسوبة وفق [4] و [5] بال [kN]
1_1	2639	2517.0	2527.8*
1_2	2084	-	2209.2
2_1	4621	-	4923.5
2_2	4999	5170.2	5209.3*

رمز العمود	الحمولات المقاسة [kN]	الحمولات المحسوبة وفق [5] بال [kN]	الحمولات المحسوبة وفق [4] و [5] بال [kN]
2_3	5644	5486	5526*
2_4	5852	5348	5388*
3_1	8441**	9488	9559*
3_2	8888	-	8884
4	4799	4935	4999*
5	5807	5759	5793*
6_1	5318	4787	4826*
6_2	5132	4961	5000*
7_1_2	5057	-	5617
7_1_3	4671**	5929	6095*

* طاقة تحمل العمود تأخذ في الحسبان تأثير التسليح العرضي العادي (الأساور)
** إيقاف التجربة قبل الوصول إلى الحمولة القصوى، تقشر طبقة تقوية الخرسانة الكربونية



الشكل (12) النسبة المئوية للانحراف بين الحمل المقاس والمحسوب^[13]

Fig. (12) Percentage deviation of the measured and calculated load^[13]

الجدول (11) يعطي فكرة واضحة عن تأثير البارامترات المدروسة في التدعيم على طاقة تحمل الأعمدة. كما هو متوقع، هناك زيادة في طاقة تحمل الأعمدة المدعمة على تلك في الأعمدة غير المدعمة. ويمكن تفسير انخفاض طاقة تحمل العمودين 3_1 و 7_1_3 مقارنة بالأعمدة غير المدعمة بسبب تقشر طبقة التقوية وإيقاف التجربة قبل نهايتها. نظراً لملامسة طبقة التقوية رأس وقاعدة العمود، تسبب ذلك في انتقال القوة الناظرية المطبقة مباشرة إلى طبقة التقوية بالاتجاه الطولي وبالتالي أدى ذلك لانفصالها عن جسم العمود وتقشرها. يمكن تحقيق زيادة أكبر في طاقة تحمل العمود بعرض 30×30 cm باستخدام أقفاص التسليح A و B. تتمثل ميزة أقفاص التسليح، كما أوضحنا سابقاً، في أن التسليح الكربوني تم تسليمه جاهزاً للتركيب، وبالتالي لم تكن هناك حاجة إلى خطوات معالجة أخرى مثل طيها. كما أدت زيادة الاستدارة في زوايا الأعمدة إلى زيادة طفيفة في طاقة التحمل. يبدو أيضاً أن نسبة بعدي العمود لها تأثير على طاقة التحمل. فمع نسبة تبلغ 1:2، تم تحقيق زيادة في الحمل بنسبة 16%. ومع نسبة بعدي

العمود 5:1، لم يلاحظ تحقيق أي زيادة في الحمل. لا يمكن تحديد ما إذا كان عدم تحقيق الزيادة في الحمل بسبب نسبة بعدي العمود أو بسبب انتفاخ وتقشر طبقة الخرسانة الكربونية نظراً لقلّة عدد الاختبارات. الجدول (11) مقارنة تأثير بارامترات العمود على طاقة التحمل^[13]

Table (11) Comparison of the influence of the column parameters on the bearing capacity^[13]

تأثير البارامترات	العمود المرجعي	عمود المقارنة	نسبة زيادة الحمل [%]
التدعيم	1_1	1_2	+26
	2_1	2_2	+8
	3_2	3_1	-5 *
	7_1_2	7_1_3	-8 *
شكل نسيج التسليح	2_2	2_3 2_4	+13 +17
نسبة بعدي العمود		4 5	-4 +16
استدارة الزوايا		6_1 6_2	+6 +3
* بسبب إيقاف التجربة قبل نهايتها			

8. ملخص وتوصيات.

تم في ورقة البحث هذه، عرض خصائص ومكونات الخرسانة الكربونية وطرائق تصنيعها ومجالات الاستخدام بالإضافة إلى مزايا وعيوب الخرسانة الكربونية الجديدة من خلال لمحة موجزة من أجل التعريف بمواد البناء الإبداعية هذه في الوسط العربي. باختصار، يمكن القول إن الخرسانة الكربونية لها إمكانيات هائلة عند استخدامها سواء في الأبنية المنوي تنفيذها، أو في تجديد وصيانة وزيادة قدرة تحمل المنشآت القائمة. حيث تؤكد الاستخدامات المتعددة لها في عمليات البناء والتطوير هذه النتيجة.

بينت التجارب المنفذة على الأعمدة المقواة بالخرسانة الكربونية جدوى عملية التدعيم وتلخصت النتائج بما يلي:

- كما هو متوقع ازدادت طاقة تحمل الأعمدة المدعمة عن مثيلاتها الغير مدعمة.
- تتغير طاقة تحمل الأعمدة المدعمة بتغير شكل التسليح، حيث سجلت زيادة لهذه الطاقة في الأعمدة المدعمة بنسيج على شكل أقفاص A, B على مثيلاتها المدعمة بنسيج على شكل L.
- تتغير طاقة تحمل الأعمدة المدعمة بتغير شكل المقطع العرضي للعمود، نظراً لتغير شكل ومساحة المقطع الخرساني الذي سيخضع نتيجة التطويق لوضعية إجهادية وفق ثلاث محاور.
- تزداد طاقة تحمل الأعمدة المدعمة بزيادة قطر استدارة زاوية العمود، والسبب في ذلك يعود لتغير شكل ومساحة المقطع الخرساني الذي سيخضع نتيجة التطويق لوضعية إجهادية وفق ثلاث محاور.
- ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة ماسة للبحث العلمي في تفاصيل الخرسانة الكربونية. عندها فقط يمكن تقديم مفاهيم شاملة موحدة للاستخدام العملي لها، وقيل كل شيء، إصدار الكود اللازم اتباعه عند استخدامها. لا سيما في مجال الأحمال غير الساكنة أو الديناميكية، لا تزال نتائج المعرفة العلمية المهمة محدودة أو شبه مفقودة. هذه المعرفة مطلوبة، على سبيل المثال، لأعمال التقوية في منشآت الجسور. لكن النتائج الواعدة متاحة بالفعل في هذا الشأن، انظر على سبيل المثال^[6]،^[54]،^[65] كذلك لا تزال هناك حاجة كبيرة للبحث فيما يتعلق بسلوك التماسك للخرسانة الكربونية

- تحت تأثير درجات الحرارة العالية المتغيرة. وتجري حالياً الدراسات التجريبية في هذا الشأن. من المهم أيضاً تزويد المستخدم بنظام متناغم الأداء بين تسليح الكربون والخلطة الخرسانية. فيما يخص الجانب التجريبي يوصي الباحث:
- زيادة عدد العينات التجريبية لتلافي الخلل في حال استبعاد نتائج أي عينة.
 - ضرورة عمل فاصل بين طبقة خرسانة التدعيم وأعلى وأسفل العمود. حتى لا ينتقل الحمل المؤثر مباشرة لطبقة التقوية.
 - التعمق في دراسة تأثير بعدي العمود وشكل التسليح على عينات إضافية.
- في منشورات منفصلة لاحقة، سيتم وصف وتقديم العديد من تدابير التقوية والتدعيم التي تم تنفيذها باستخدام الخرسانة الكربونية وسيتم نشر التقارير العلمية حول العمل البحثي الذي تم إجراؤه بشأن ضمان الجودة وإنجاز المعايير والمواصفات والكودات وتصاريح الاستخدام ذات الصلة.

رسالة شكر

تم تنفيذ هذا العمل خلال إقامتي البحثية كباحث في معهد المنشآت الخرسانية في جامعة دريسدن التقنية Institute of concrete structures في السنوات 2019- 2021.

يشكر المؤلف مؤسسة Alexander von Humboldt على تمويل مشروع البحث. كما أتوجه بالشكر الجزيل أيضاً إلى جميع العاملين في معهد المنشآت الخرسانية تحت إشراف البروفيسور مانفريد كورباخ Prof. Manfred Curbach، الذي قدم كل الدعم ولعب دوراً نشطاً للغاية في إعداد هذا العمل.

المراجع العلمية.

- [1] Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1- 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992- 1- 1:2004 + AC:2010
- [2] Bentur, A.; Ben- Bassat, M.; Schneider, D.: Durability of Glass- Fiber Reinforced Cements with different Alkali- Resistant Glass Fibers. In: *Journal of the American Ceramic Society*. Band 68, Nr. 4, 1985, S. 203–208.
- [3] Bielak, J.; Rempel, S.; Felber, M.; Durst, H- J.; Will, N.: Sanierung des Rheinstegs bei Albbruck mit Carbonbeton, *Beton- und Stahlbetonbau*, Nr. 5. (2021).
- [4] Bournas, D.: Strengthening of existing structures: Selected case studies, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering, Triantafillou*, 2016, Pages 389- 411.
- [5] Brameshuber, W.: Manufacturing methods for textile- reinforced concrete, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering, Triantafillou*, 2016, Pages 45- 59
- [6] Brückner, A.; Wellner, S.; Ortlepp, R.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Plattenbalken mit Querkraftverstärkung aus Textilbeton unter nicht vorwiegend ruhender Belastung. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 3, S. 169- 178- DOI: 10.1002/best.201200075
- [7] Curbach, M.; Cherif, C.; Offermann, P.: Sparsam, schonend, schön – Das Faszinierende Material Carbonbeton. In: *Technik in Bayern*. Februar 2017.

- [8] Curbach, M.; Jesse, F.: Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton, *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), Heft 1- S. 9–16.
- [9] Curbach, M.; Ortlepp, R.; Scheerer, S.; Frenzel, M.: Verstärken mit Textilbeton – Weg von der Vision zur Anwendung, Oktober 2011.
- [10] Curbach, M.; Hauptenbuchner, B.; Ortlepp, R.; Weiland, S.: Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), Nr. 6, S. 353–361 – doi: 10.1002/best.200700551.
- [11] Curbach, M.; Graf, W.; Jesse, D.; Sickert, J. U.; Weiland, S.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton-Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007) 6, S. 342–352.
- [12] Curbach, M.; Michler, H.; Weiland, S.; Jesse, D. Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! *BetonWerk International* 11 (2008) 5, S. 62–72.
- [13] Curbach, M.; Amer, Z.; Baumgärtel, E.: Anlage zur Großbauteilversuche– Längskraftversuche von bestehenden Stützen mit Verstärkung von Carbonbeton, Ergebnisbericht März 2021, IMB- TU Dresden unveröffentlicht.
- [14] DFG- GEPRIS- SFB 532: Textilbewehrter Beton- Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie. Abgerufen am März 2021.
- [15] Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z- 31.10- 182: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton). *Deutsches Institut für Bautechnik Berlin*, November 2016.
- [16] DIN EN 1015- 11:2020- 01: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel; Deutsche Fassung EN 1015- 11:2019
- [17] DIN EN 12390- 13:2014- 06: Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390- 13:2013
- [18] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund- Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften. 2., völlig überarbeitete Auflage. *Hanse*, München 2006.
- [19] Erhard, E.; Weiland, S.; Lorenz, E.; Schladitz, F.; Beckmann, B.; Curbach, M.: Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015) S1, S. 74- 82- DOI: 10.1002/best.201400124
- [20] Frenzel, M.; Zschau, N.: Precast components with carbon reinforced concrete – "BOX" prototype. *CPI – Concrete Plant International* (2020) 5, S. 146–157
- [21] Gries, T.; Raina, M.; Quadflieg, T.; Stolyarov, O.: Manufacturing of textiles for civil engineering applications, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Triantafillou, 2016, Pages 3- 24.
- [22] Hegger, J.; Kulas, C.; Horstmann, M.: Slender Façade Structure made of Textile Reinforced Concrete. In: Zingoni, Alphose (Hrsg.): *Advances and Trends in Structural Engineering*, Mechanics and Computation

(4th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC) Kapstadt 2010). London: Taylor & Francis Group, 2010.

[23] Hegger, J.; Kulas C.; Raupach M.; Büttner T.: Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) 2, S. 72–80 – doi: 10.1002/best.201000082

[24] <https://www.carbon-textilbetontage.de/tagungsband/> (15.03.2021)

[25] <https://carbon-deutschland.de/pultrusion-carbon-cfk/> (01.07.2021)

[26] <https://www.bauen-neu-denken.de/faq/>, 01.04.2021.

[27] <https://www.bauen-neu-denken.de/faq/#s03>, 25.03.2021.

[28] <https://www.bauen-neu-denken.de/was-ist-carbonbeton/>, 04.04.2021.

[29] https://www.dafstb.de/application/jahrestagungen/2017/C3_Praesentation-kurz.pdf, 27.03.2021.

[30] <https://www.pagel.com/en/products/concrete-repair/tf10-tudalit-fine-grain-concrete/>, 26.03.2021

[31] https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Schaubetonieren_Oschatz20160805_Opterra_GmbH036.jpg, 30.04.2021.

[32] <https://www.heringinternational.com/en/products-services/architectural-concrete/material-concepts/textile-reinforced-concrete/classic/>, (03.05.2021)

[33] https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:20151127_Br%C3%BCcke_Albstadt-Ebingen_solidian01.jpg, 24.04.2021.

[34] https://www.pagel.com/all/pdf/references/gb/tf10_zuckersilo_9_nordzucker_gmbh_gb.pdf, 03.05.2021.

[35] Jesse, F.; Curbach, M.: Verstärken mit Textilbeton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.- D. (Hrsg.): *Beton- Kalender 2010. Teil I*, Berlin: Ernst & Sohn, 2009, S. 457–565.

[36] Jesse, D.; Jesse, F.: *Textile Reinforced Concrete for Lightweight Segmental Bridges with Post-Tensioning*. In: 3rd International fib Congress, 29.05.–02.06.2010 in Washington, D.C. (US), 2010.

[37] Kortmann, J.; Kopf, F.; Hillemann, L.; Jehle, P.: Recycling von Carbonbeton – Aufbereitung im großtechnischen Maßstab gelungen! In: *Bauingenieur*. 11/2018, Jahresausgabe 2018/2019 des VDI-Fachbereichs Bautechnik, ISSN 0005- 6650, S. 38–44, 2019.

- [38] Kortmann, J.; Kopf, F.: *C³- V1.5 Abbruch, Rückbau und Recycling von C³- Bauteilen*. In: C³ – Carbon Concrete Composite e.V. und TUDALIT e.V. (Hrsg.): Tagungsband zu den 10. Carbon- und Textilbetontagen, 25. und 26. September 2018, S. 84–85, 2018.
- [39] Krause, H.-J.: *Zum Tragverhalten und zur Bemessung nachträglich verstärkter Stahlbetonstützen unter zentrischer Belastung, Diss., RWTH Aachen, (1993)*.
- [40] Lieboldt, M.; Tietze, M.; Schladitz, F.: C³- Projekt – Erfolgreiche Partnerschaft für Innovation im Bauwesen. *Bauingenieur 93*(2018), S. 265–273
- [41] Lieboldt, M.: Feinbetonmatrix für Textilbeton; Anforderungen – baupraktische Adaption – Eigenschaften. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 110*. Heft S1, 2015, S. 22–28.
- [42] Lorenz, E.; Schladitz, F.; Jesse, F.; Curbach, M.: Strengthening of a Barrel Shell with Textile Reinforced Concrete – Part II: Practical Experience. In: *Aldea, C.- M. (Hrsg.): Proceedings of the ACI 2010 Spring Convention*. Chicago, 2010
- [43] Mechtcherine, V.; Schneider, K.; Brameshuber, W.: Mineral- based matrices for textile- reinforced concrete, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering, Triantafillou*, 2016, Pages 25- 43
- [44] Mehlhorn, G.: *Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, Springer Berlin Heidelberg*, 2010
- [45] Mobasher, B.: Textile Fiber Composites: Testing and Mechanical Behavior, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering, Triantafillou*, 2016, Pages 101- 150
- [46] Ortlepp, R.: *Aspekte der Sanierung und Verstärkung von Betonbauteilen. Habilitationsschrift, TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, 2014 (Jahr der Verteidigung, erschienen 2015 in Curbach, M. et al. (Hrsg): Schriftenreihe konstruktiver Ingenieurbau kid, Heft 38, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden)*.
- [47] Ortlepp, R.; Weiland S.; Curbach, M.: *Restoration of a hyper concrete shell using carbon- fibre textile reinforcement concrete*. In: Limbachiya, M. C.; Kew, H. Y. (Hrsg.): Proc. of the Int. Conf. Excellence in Concrete Construction through Innovation, 09.–10.09.2008 at Kingston University (UK), London: Taylor and Francis Group (CRC Press/Balkema), 2009, S. 357–364
- [48] Papanicolaou, C. G.: Applications of textile- reinforced concrete in the precast industry, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering, Triantafillou*, 2016, Pages 227- 244
- [49] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J., Beul, P.: Filigrane Bauwerke aus Textilbeton Leistungsfähigkeit und Anwendungspotenzial des innovativen Verbundwerkstoffs, *Beton- und Stahlbetonbau 110* (2015), Heft S1, S. 83–93.
- [50] Scheerer, S.; Chudoba, R.; Garibaldi, M. P.; Curbach, M.: Shells made of Textile Reinforced Concrete – Applications in Germany. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures J.IASS 58* (2017) 1, S. 79–93 – DOI: 10.20898/j.iass.2017.191.846

- [51] Scheerer, S.; Zobel, R.; Müller, E.; Senckpiel- Peters, T.; Schmidt, A.; Curbach, M.: Flexural strengthening of RC structures with TRC- Experimental Observations, Design Approach and Application. Applied Sciences, Special Issue "Textile Reinforced Cement Composites: *New Insights in Structural and Material Engineering*" 9(2019) 7, 1322, 18 S. – DOI: 10.3390/app9071322
- [52] Scheerer, S.; Schütze, E.; Curbach, M.: *Strengthening and Repair with Carbon Concrete Composites- the First General Building Approval in Germany*. In: Mechtcherine, V.; Slowik, V.; Kabele, P. (Hrsg.): Proc. of SHCC4- Int. Conf. on Strain- Hardening Cement- Based Composites. 18.- 20.9.2017 in Dresden, RILEM Book series 15, Dordrecht: Springer, 2018, S. 743- 751
- [53] Schladitz, F.; Lorenz, E.; Jesse, F.; Curbach M.: Verstärkung einer denkmal- geschützten Tonnenschale mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 104(2009) 7, S. 432–437 – doi:10.1002/best.200908241.
- [54] Schladitz, F.; Hoffmann, A.; Graf, W.; Lorenz, E.; Jesse, F.: Strengthening of a Barrel Shell with Textile Reinforced Concrete – Part I: Dimensioning and Design. In: *Aldea, C.- M. (Hrsg.): Proceedings of the ACI 2010 Spring Convention*. Chicago, 2010
- [55] Schladitz, F.; Curbach, M.: *Carbon Concrete Composite*. In: Holschemacher, K. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Tagung Betonbauteile- Neue Herausforderungen im Betonbau; Hintergründe, Auslegungen, Neue Tendenzen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2017, S. 121- 138
- [56] Schneider, K.; Butler, M.; Mechtcherine, V.: Carbon Concrete Composites C3- Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft. *Beton- und Stahlbetonbau* 112(2017), Heft 12, S. 784 –794.
- [57] Schumann, A.: Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbon- stäben in Betonmatrices, *Dissertation*, Tu- Dresden, 2020.
- [58] Solidian GmbH: Bewehrungsdatenblätter auf Firmenhomepage. www.solidian.de/ (25.08.2019).
- [59] Sonderforschungsbereich 528. In: TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau. Abgerufen am März 2021.
- [60] Steinbock, O.; Pelke, E.; Ost, O.: Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken, Teil 1: Grundlagen und Hintergründe zum Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau* 116(2021) 2, S. 101–108 – DOI: 10.1002/best.202000094
- [61] Steinbock, O.; Bösche, T.; Schumann, A.: Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken, Teil 2: Carbonbeton im Brückenbau und Informationen zur Zustimmung im Einzelfall für das Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau* 116(2021) 2, S. 109–117 – DOI: 10.1002/best.202000106
- [62] Steinbock, O.; Teworte, F.; Neis, B.: Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken, Teil 3: Planung und Umsetzung der Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton am Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau* 116(2021) 2, S. 118–126 – DOI: 10.1002/best.202000107

- [63] Triantafillou, T.: Strengthening of existing concrete structures: Concepts and structural behavior, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Triantafillou, 2016, Pages 303- 322.
- [64] TUDALIT (Hrsg.)G: *Die Planermappe – Verstärken mit Textilbeton nach abZ Z- 31.10-182*:<http://tudalit.de/wp-content/uploads/2018/05/Planermappe.pdf>, 03.05.2021
- [65] Übersicht der C³- Partner – Carbon Concrete Composite e.V. Abgerufen am März 2021 (deutsch).
- [66] Vakaliuk, I.; Frenzel, M.; Curbach, M.: Application of parametric design tools for the roof of the C³ technology demonstration house – CUBE. In: Lázaro, C.; Bletzinger, K.- U.; Oñate, E. (Hrsg.): Form and Force – *Proceedings of the IASS Annual Symp. 2019 / Structural Membranes 2019*, 07.–10.10.2019 in Barcelona (Spain), 2019, S. 1077–1084
- [67] Wagner, J.; Curbach, M.: Bond Fatigue of TRC with Epoxy Impregnated Carbon Textiles. Applied Sciences, Special Issue "Textile Reinforced Cement Composites: New Insights in Structural and Material Engineering" 9 (2019) 10, 1980, 21 S.- DOI: 10.3390/app9101980
- [68] Wagner, J.; Curbach, M.: Tensile Load Bearing and Bond Behaviour of Carbon Reinforced Concrete under Cyclic Loading. In: Foster, F.; Gilbert, R.; Mendis, P.; Al- Mahaidi, R.; Millar, D. (Hrsg.): Proc. of 5th Int. fib Congress. 7.- 11.10.2018 in Melbourne (Australien), 2018, 14 S. (published digitally)
- [69] Weiland, S.; Curbach, M.: *Interaktion gemischter Bewehrungen bei der Verstärkung von Stahlbeton mit textilbewehrtem Beton*. In: Curbach, M.; Jesse, F. (Hrsg.): Textile Reinforced Structures: Proc. of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 03.–05.06.2009, TU Dresden: SFB 528, 2009, S. 553–564 – urn:nbn:de:bsz:14- ds- 1244051366655- 25294.