XIV Международна научна конференция
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 10-12 септември 2026 г, Варна
XIV International Scientific Conference
„Civil Engineering Design and Construction“, Sept. 10 - 12, 2026, Varna, Bulgaria
ISSN 2683-071X (online) ISSN 2738-7879 (CD)

ИЗЧИСЛИТЕЛНИ МОДЕЛИ ЗА УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ЕЛЕМЕНТИ С КАРБОНБЕТОН

Симеон Бошнаков[1]

DESIGN OF STRENGTHENING OF CONCRETE ELEMENTS WITH CARBON CONCRETE

Simeon Boshnakov

Abstract:
Carbon concrete, also known as textile-reinforced concrete and textile concrete, is an innovative material that is increasingly used in the reinforcement of existing reinforced concrete structures. Therefore, computational models and design checks are being developed for the application of carbon concrete for the reinforcement of bending and shear elements, as well as different approaches and conditions for constructing the reinforcement system. The material is used in the reinforcement of reinforced concrete elements for bending, shear forces and torsion. Nowadays, there are quite a few structures reinforced with this material.

Keywords:
Strengthening, retrofitting, concrete structures, carbon, reinforced concrete, carbon concrete, design requirements.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Карбонбетонът или още известен, като текстилно-армиран бетон (текстилбетон), е иновативен материал, който намира все по-широко приложение в усилването на съществуващи стоманобетонни конструкции. Затова се развиват изчислителни модели и проектни проверки за прилагането на карбонбетона за усилването на елементи на огъване, усукване, осово натоварване и срязване, както и различни подходи и условия за конструиране на усилващата система. Материалът намира приложение в усилване на стоманобетонни елементи за огъване, напречни сили и усукване. В последните години се забелязва приложението на материала в някои пилотни проекти.

2. ХАРАКТЕРСИСТИКИ НА КАРБОНБЕТОНА

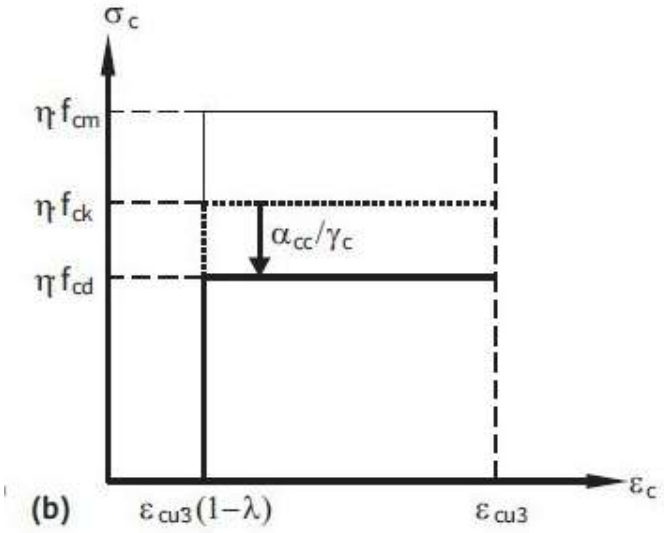
[1] Симеон Бошнаков, гл.ас./ д-р инж., катедра Масивни конструкции, строителен факултет, Университерт по Архитектура, Строителство и Геодезия, адрес: гр. София 1000, бул. Христо Смирненски№1, e-mail: s.boshnakov_fce@uacg.bg ;
Simeon Boshnakov, Chief. Assist. Prof. Dr.Eng., Department of Reinforced Concrete Structures Academic Degree/Title, Department, Faculty of Structural Engineering, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy-Sofia, Adress: Bulgaria Sofia 1000, Hristo Smirnenski 1, E-mail: s.boshnakov_fce@uacg.bg /

Карбонбетонът представлява бетонна матрица, в която се разполага въглеродна армировка, като армировката може да бъде организирана във вид на армировъчни мрежи или пръти. При усилването на стоманобетонни елементи с карбонбетон най-често армировката се организира във вид на външни мрежи, които се закрепят към съществуващото стоманобетонно сечение посредством адхезия или специални дюбели.

2.1. Характеристики на бетонната матрица

За създаването на карбонбетона се използва бетонна смес, която се нарича финбетон, тъй като се характеризира с максимална едрина на добавъчния материал по-малка от 1mm. Това се дължи на факта, че бетоните са дефинирани като материали с минимална едрина на добвавъчен материал от 4mm, съгласно изискванията на [16], [15] за едрината на добавъчните материали. Поради това финбетона може да се разгледа, като строителен разтвор.

В [7] е дадена примерна работна диаграма фиг.1 на бетона за определяне на деформациите спрямо напреженията. При проектирането на карбонбетона се използват същите стойности на якост, както при обикновеният стоманобетон f_{cm} и $f_{nmm.}$

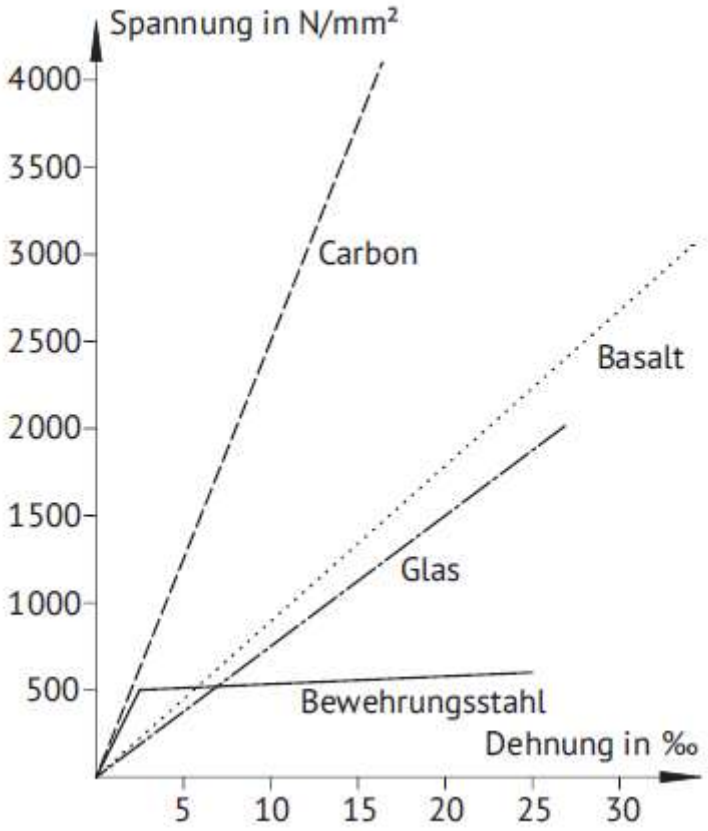


Фигура 1. Диаграма напрежения-деформации в бетона [17]

2.2. Армировка

За армиране на усилващият слой при усилване на стоманобетонни елементи могат да се използват различни армировъчни материали, за които са правени разлинчни изследвания. Армировъчният материал може да бъде въглерод, базалт, или AR- стъкло. На фиг. 2 е направено сравнение на диаграмите напрежения-деформации (σ-ε) на различните армировъчни материали. От фиг. 2 се вижда, че въглеродната армировка показва най-голяма коравина и най-висока якост. Това я прави изключително ефективна при усулването на стоманобетонни елементи, тъй като с най-малка дебелина на усилващият слой се постига най-голяма ефективност.

Вследствие на добрите показатели на въглеродната армировка при усилване на стоманобетонни елементи, доброто ѝ поведение при проведените лабораторни и натурни експерименти е разработено техническо допускане за прилагането и в Германия при усилване на стоманобетонни елементи [24], [25], което е съобразено с действащите инструкции и регламенти за усилване на стоманобетонни елементи с външно прилепени армировки [26], [27], [28], [29].



Фигура 2. Диаграма напрежения -деформации в различни армировки [17]

В таблица 1 е направено сравнение на якостните характеристики на армировката от AR-стъкло и въглерод. От което се виждат значително по-високите якостни характеристики на въглеродната армировка.

Таблица 1. Характеристики на армировка от AR-стъкло и въглеродни влакна [18]

Влкна	**Диаметър [μm]**	**Плътност [g/cm³]**	**Якост на опън [N/mm²]**	**Удължение при скъсване [‰]**	**Е-модул [N/mm²]**
AR- Стъкло	9 до 24	2,68	1300-2000	20 до 43	21 000 до 74 000
въглерод	5 до 10	1,8	2 000 до 6 000	3,5 до 2,1	180 000 – 650 000

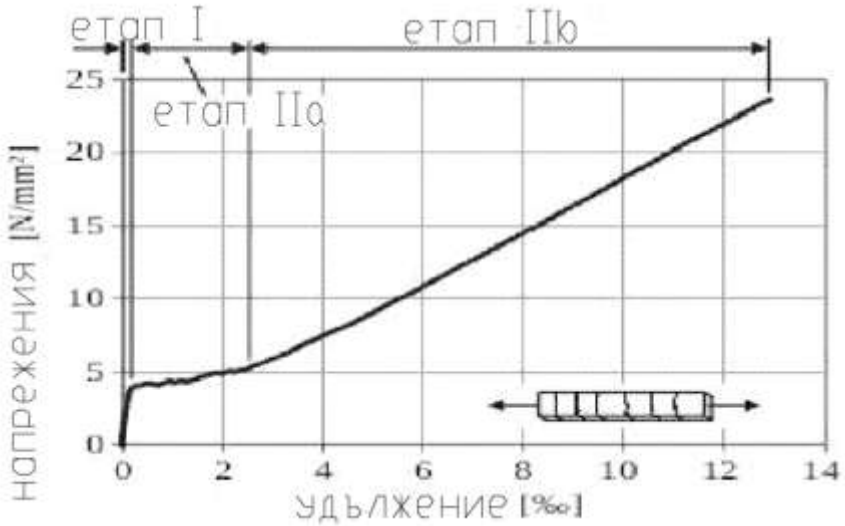
3. СВОЙСТВА НА КАРБОНБЕТОНА

Карбонбетонът е материл, който е съставен от въглеродна армировъчна мрежа, която е поставена в матрица от финбетон, като общата дебелина при усилването на стоманобетонни елементи е от няколко милиметра до няколко сантиметра [15[, [16], [18].

Карбонбетонът се характеризира с три линейна идеализирана работна диаграма фиг.3 [16]. В първият етап карбонбетона е ненапукан и неговото поведение прилича на обикновеният стоманобетон до момента на достигане на опънната якост на бетона. При

достигане на опънната якост на бетона се навлиза в етапа на образуване на пукнатини IIa. В този етап линията напрежения- деформации (σ-ε) се качва с изключително малък наклон. След завършването на образуването на всички пукнатини и тяхното разтваряне се преминава към етап IIb. В този етап пукнатините се разширяват свободно, като напреженията и деформациите изцяло се поемат от опънната въглеродна армировка. Кривата напрежения-деформации (σ-ε) се доближава по вид до кривата на въглерода поради липсата на съдействие на бетона.

От описаният начин на поведение се вижда крехкият характер на разрушаване, който се потвърждава от фиг.3.



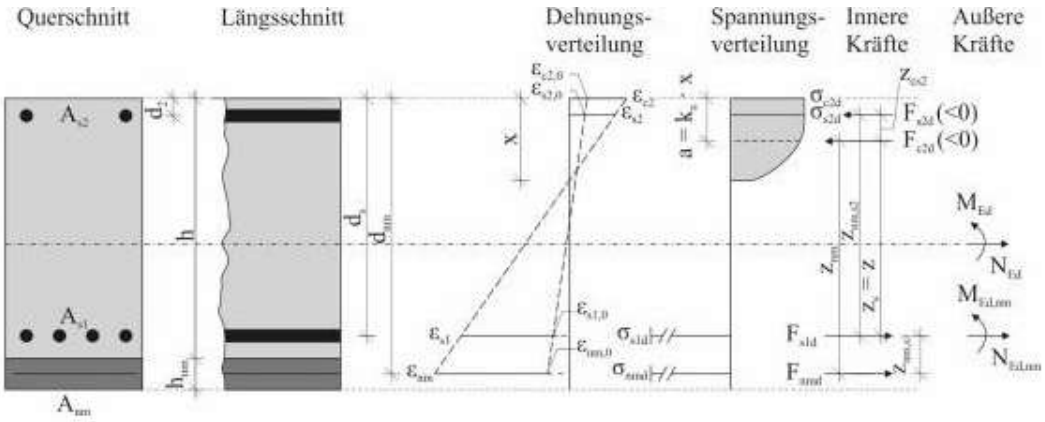
Фигура 3. Напрежения деформации за карбонбетон при изследване на опън [16]

4. ВЪЗМОНЖНОСТИ ЗА УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ЕЛЕМЕНТИ С КАРБОНБЕТОН

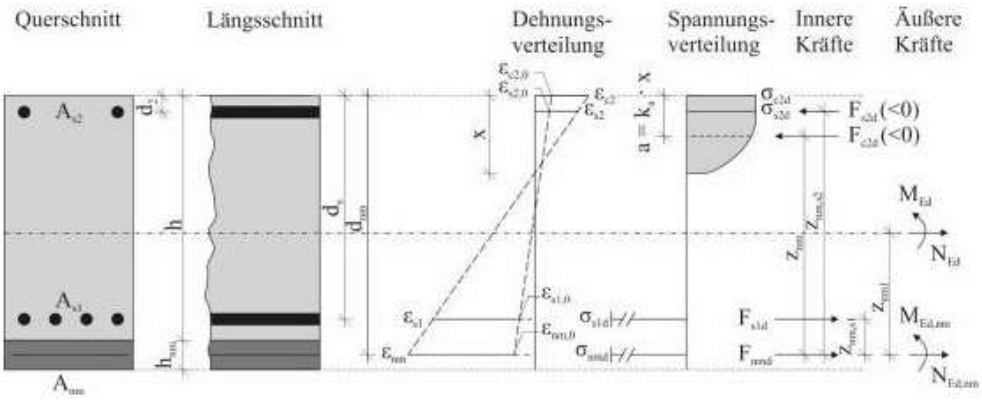
При карбонбетона, който се армира с въглеродни нишки и AR- стъклени нишки етап III, който е характерен за бетона липсва, което показва характера за крехко разрушаване на карбонбетона фиг.3. Към момента има разработени различни приложения за усилване на стоманобетонни елементи с карбонбетон, като основно се прилагат за усилване на огъване.

4.1. **Усилване на огъване**

Усилването на стоманобетонии елементи на огъване е изследвано още с първите проведени научни-изследователски експерименти. Съответно от тях са разработени първите инженерни изчислителни модели за усилване на стоманобетонни елементи с карбонбетон, като съответно са потвърдени от множеството проведени експерименти, натурни експерименти и приложението им в пилотни проекти, при което се отчита реалното поведение на конструкцията в реална среда.



Фигура 4. Напречно сечение усилено с карбонбетон, разпределени напрежения и деформации, с редуцирани външни и вътрешни усилия за центъра на тежестта на долната армировка [20]



Фигура 5. Напречно сечение усилено с карбонбетон разпределени напрежения и деформации, с редуцирани външни и вътрешни усилия за центъра на тежестта на усилващата карбонна армировка [20]

Като се зададат и решат равновесните условия за фиг.5 за сили и моменти и се получават следните уравнения [20]:

$$N_{Ed} = N_{Rd} = F_{s1d} + F_{s2d} + F_{nmd} + F_{c2d} \quad (1)$$

$$M_{ednm} = M_{rd} \quad (2)$$

Където:

- F_{s1d} – опънно усилие в първи ред армировка;
- F_{s2d} - натискова армировка;
- F_{c2d} - натисково усилие в бетона;
- F_{nmd} – усилие във въглеродната армировка;

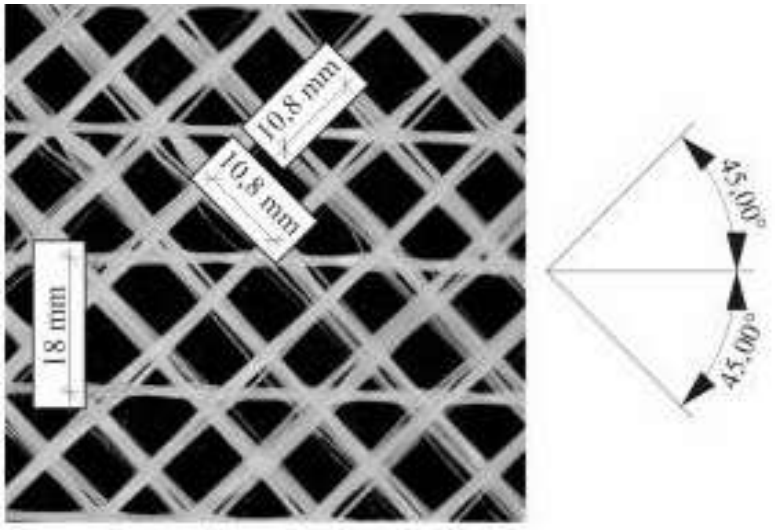
В [20] са предложени модели за итеративно определяне на количеството на необходимата армировка в сечението в зависимост от външните усилия, подобно на разработените проектно изчислителни модели на огъване в DIN EN 1992-1-1 [21], но трябва да бъдат валидни следните предпоставки:

- Сеченията не депланират
- Деформациите в армировката и бетона са еднакви в околността (няма нарушение на сцеплението)
- Не се отчита опънната якост на бетона
- Разпределението на напреженията в натисковата зона е взето съгласно [21]
- Напреженията в металната армировка са определени съгласно [21]
- Напреженията във въглеродната армировка се определят съгласно работните диаграми от [20]
- Въглеродната армировка не трябва да поема натискови напрежения [20]

4.2. Усилване за напречни сили

Поведението на елементи, които са натоварени със срязващи сили се изследва от повече от 100 години и все още не е докрай изяснено. Вследствие на образуващите се пукнатини в бетона при натоварването на дадено сечение са разработени различни изчислителни модели. Въпреки множеството изследвания все още няма разработен механичен модел, който точно да обяснява явлението.

В рамките на изследователските проекти са проведени множество експерименти лабораторни, както и теоретични и числени за покачване на носимоспособността на елементи усилени за напречни сили, както за плочи, плочогреди и греди. При експерименталните изследвания са използвани армировъчни мрежи с наклон под 45^0 спрямо надлъжната ос на съответните елементи фиг. 6.



Фигура 6. Усилване за напречни сили с AR- стъкло в рамките на изследователски проект [20]

В [20] са предложени два изчислителни модела на Brückner и Escrig [20], [4].

Вследствие развитието на прътовият модел и добрите експериментални резултати носимоспособността за усилване на срязване с карбонбетон може да се определи по следната формула.

$$V_{Rd,nm} = \frac{A_{w,nm}}{s_{w,nm}} . f_{nmd} . b_{w,nm} . sin \propto \quad (3)$$

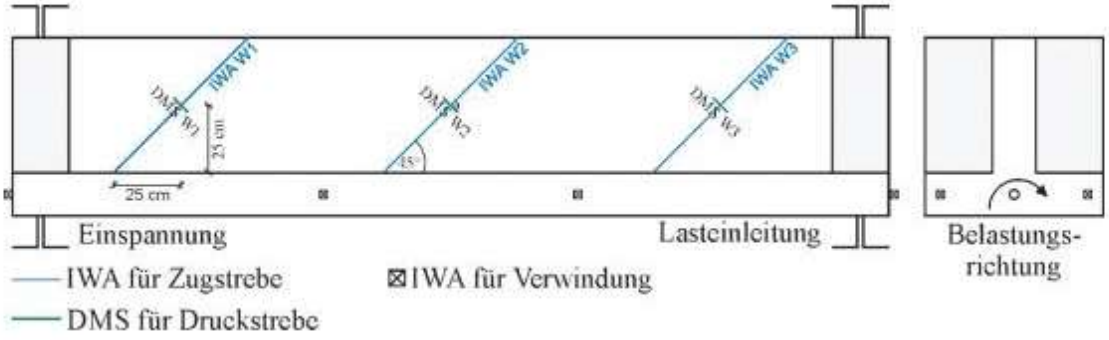
- $V_{Rd,nm}$ – носимоспособност на срязване на текстилната армировка

- $\frac{A_{w,nm}}{s_{w,nm}}$ площ на текстилната армировка за единица дължина
- f_{nmd} изчислителна якост на опън на текстилната армировка
- α ъгъл между оста на армировката и оста на усилваният елемент

4.3. Усилване на усукване с карбонбетон

При провеждането на изследователските експерименти са направени експерименти за усилване на стоманобетонни елементи на усукване с въглеродна армировка и армировка от AR-стъкло [14], [17]. Армировката за усилването на съответните елементи се организира във вид на армировъчни мрежи, които сключват ъгъл от 45^0 или 90^0 с хоризонта и съответно има и усилващи пръстени на места за изравняване на деформациите.

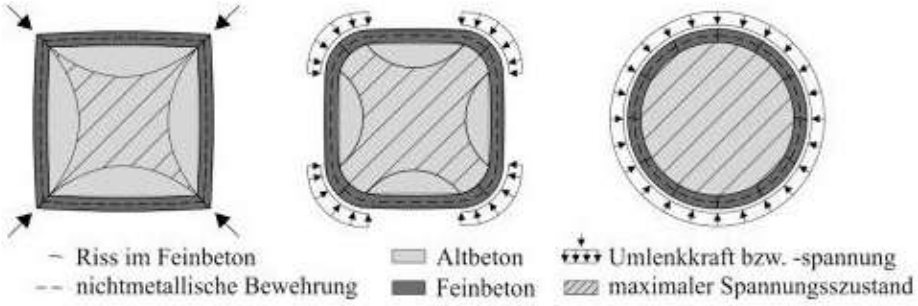
На фиг. 7. е показан примерен изчислителен модел на база на проведени експерименти с разположени датчици по посока на натисковите и опънните диагонали [14]. Въпреки проведените множество експерименти и изследвания все още няма единен утвърден изчислителен модел на усилване на стоманобетонни елементи с карбонбетон за усукване.



Фигура 7. Примерен прътов изчислителен модел на база проведени експерименти [14]

4.4. Усилване за осова сила

Усилването за осова сила се прилага, когато има загуба на част от напречното сечение, увеличен експлоатационен товар реално или вследствие на промяна в експлоатационното нормативно натоварване. В основният случай се увеличава самото напречно сечение чрез обвиване на съответният елемент, като в бетонната матрица от финбетон от въглеродната армировка се конструират допълнителни стремена, ако са необходими. Също така при сеизмични въздействия по този начин в стоманобетонни елементи поемащи сеизмични сили е възможно създаването на ограничен бетон.



Фигура 8. Усилване за напречни сечения за осови сили чрез кожуси от карбонбетон .[20]

5. ПРИЛОЖЕНИЕ В СТАНДАРТИТЕ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ

В новото поколение на Еврокод 2 [19], [20], [21], [22] са дадени части в които се дава възможност за приложението на въглеродна армировка в бетонни конструкции, отделно е създадено и приложение за усилване на стоманобетонни конструкции с FRP. Въпреки това не е коментирана възможността за усилване на съществуващи стоманобетонни конструкции с карбонбетон.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С развитието на технологиите и строителните материали се развиват и стандартите за проектиране, както и отделните изчислителни модели. Въпреки това липсата на конкретен международен стандарт за прилагане на карбонбетона, като усилващ материал създава някои трудности при неговото прилагане при усилване на съществуващи конструкции. В бъдещите стандарти би могло да се дадат повече нормативни изисквания за неговото прилагане.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Abdaker A., P. Offermann, F. Jesse, M. Curbach, Vorhersagen über die erwartenden Festigkeiten von AR-glasbewehrtem Beton. In (Hrsg.): Tagungsband zum 12. Internationalen Textil- Symposium. Frankfurt am Main, 2003.

[2] Abdaker A., Charakterisierung und Modellierung der Eigenschaften von Ar-Glaslamentgarnen für die Betonbewehrung. Dresden, Insitut für Textil- und Bekleidungstechnik, TU Dresden, Dissertation, 2004.

[3] Bösche A., Möglichkeiten zur Steigerung der Biegetragfähigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen durch den Einsatz textiler Bewehrung- Ansatz für den Bemessungsmodell. Dissertation Technische Universität Dresden, 2007.

[4] Brückner A., Querkraftverstärkung von Bauteilen mit textilbewehrtem Beton. Technische Universität Dresden,2001.

[5] Curbach M., F. Jesse, Basic Tensile Tests on Textile Reinforced Concrete. In: Proceedings of the Techtextil Symposium, Frankfurt Germany Lecture No. 513 (1999).

[6] Curbach M., F. Jesse, Beton im Textilbeton. Die Entwicklung. In: Ingenieurbaustoffe-konstruktive Wege in die Zukunft Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Harald Schorm (2001)

[7] Curbach M., F. Jesse, Dehnkörper aus textilbewehrtem Beton – Phänomene, Deutung, Schlussfolferungen. In: Hegger, J. (Hrsg.): Textilbeton – 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532, Februar 2001 in Aachen. Mies – van – der – Rohe -Str. 1: Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 2001, s. 125-136

[8] FIB bulletin 14. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, International federation for concrete.

[9] Jesse Fr., Tragverhalten von Filamentgarmen in zementgebundener Matrix. Dissertation Technische Universität Dresden, 2009.

[10] Koeckritz U., In- Situ Polymerbeschichtung zur Strukturstabilisierung von einer nähgewirkter Gelege, Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, Dissertation, 2007.

[11] Offermann P., U. Koeckritz, A. Abdkade ,T. Engler, M. Waldmann, Anforderungsgerechte Bewehrungsstrukturen für den Einsatz im Betonbau. In: Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on textile reinforced structures (CTRS2), 2003 s. 15-28

[12] Ortlepp R., A. Brückner, E. Lorenz, Verbundversagenmechanismus im Verankerungsbereich von textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschichten. Curbach M. und Jesse F.: Textilbeton- Theorie und Praxis. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS 4) und zur 1. Anwendungsertagung, Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009
[13] Sauerborn T., T. Hampel, Das Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungssystem bei Verstärkungen mit Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 110 (2015), Supplement “Verstärken mit Textilbeton”, Januar 2015.
[14] Schladitz Fr., Torsionverhalten von textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Technische Universität Dresden, 2011.
[15] Бошнаков, С. Възстановяване и усилване на стоманобетонни елементи и конструкции на мостове. Дисертация УАСГ, 2017 София
[16] Jesse D., Tragverhalten von textilbewehrtem Beton unter zweiaxialer Zugbeanspruchung. Dissertation Technische Universität Dresden 2009.
[17] Curbach, M., J. Hegger, Fr. Schladitz, M. Thietze, M. Lieboldt. Handbuch Carbonbeton. Einsatz nichtmetalischer Bewehrung Ernst and Sohn 2023
[18] Rampel S., Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung.Dissertation von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation.2018
[19] Карадех Л., Оценка на скоростите на овъгляване по EN 1995-1-2 чрез сравнението им с нелинейния модул на скоростта на овъгляване по NDS (САЩ). Международна научно-приложна конференция -УАСГ, София 2012
[20] Curbach, M., J. Hegger, Fr. Schladitz, M. Thietze, M. Lieboldt. Handbuch Carbonbeton. Einsatz nichtmetalischer Bewehrung Ernst and Sohn 2023
[21] DIN EN 1992-1-1: 2011 Eurocode 2: 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
[22] BS EN 1992 -1-1:2023. Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures.
[23] DIN EN 206-1:2024 -09 Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Tiel 1: Eigenschaften, Anforderungen, werkseigene Produktionskontrolle und Bewertungskriterien für einzelne Werte.
[24] DIBt Zulassungsnummer Z: 31.10-182(2014). Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (textilbewehrte Beton).
[25] Zulassung Z-31.10-190: Verfahren zur Rissbreitenreduzierung in Betonkonstruktionen mit oberflächennah eingelegten Carbontextilien.Geltungsdauer 2015-2020. Quintung Zementol GmbH.
[26] DAfStb (2011): Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung – Sachstandbericht DAfStb – Heft 591. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Beuth – Verlag, Berlin.
[27] DAfStb (2011): Praxisgerechte Bemessungsansätze für das wirtschaftliche Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung – Verbundtragfähigkeit unter statischer Belastung, DAfStb – Heft 592. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbetone. V., Beuth – Verlag, Berlin.
[28] DAfStb (2013). Erläuterungen und Beispiele zur DAfStb- Richtlinie “Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung” DAfStb – Heft 595. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Beuth – Verlag, Berlin.
[29] DAfStb – Richtlinie (2022). Betonbauteile mit nichtmetalischer Bewehrung. Berlin. Deutscher Ausschuss für Stahlbetone. V., Beuth – Verlag, Berlin. (2022)

[30] ACI 440.2R-17 (2017) Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI) Committee 440.
[31] Federation internationale du beton (fib) (2019). Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Technical Report. Bulletin – No. 90.
[32] CNR (2014). CNR-Construction: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Advisory Committee on Technical Recommendations 2013, Release 2014. CNR Construction expert en batiments et genie-civil, Frankreich.