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)

ИЗВОДИ ОТ ОБСЛЕДВАНЕТО НА ПРИЧИНИТЕ ЗА СРУТВАНЕТО НА МОСТА „КАРОЛА" В ДРЕЗДЕН

Иван Павлов[1], Дария Михалева[2]

CONCLUSIONS OF THE INVESTIGATION INTO THE CAUSES OF THE COLLAPSE OF THE CAROLA BRIDGE IN DRESDEN

Ivan Pavlov, Dariya Mihaleva

Abstract:
On 11 September 2024, the partial collapse of the Carola Bridge in Dresden shocked the engineering community. This was the first case in Germany of a prestressed concrete bridge failing during regular service. The investigation, led by Prof. Steffen Marx, established that the root cause was hydrogen-induced stress corrosion cracking of the high-strength prestressing steel. The process, which began during construction, progressed hidden for decades and could not be detected by conventional visual inspections. A temperature gradient on the night of the incident acted as the trigger for the final failure. The paper analyses the chain of errors, weaknesses in the regulatory framework, and the ineffectiveness of standard monitoring methods. Based on the findings, recommendations are formulated for introducing acoustic emission and structural health monitoring (SHM) systems, as well as for updating the assessment approaches for existing bridge structures.

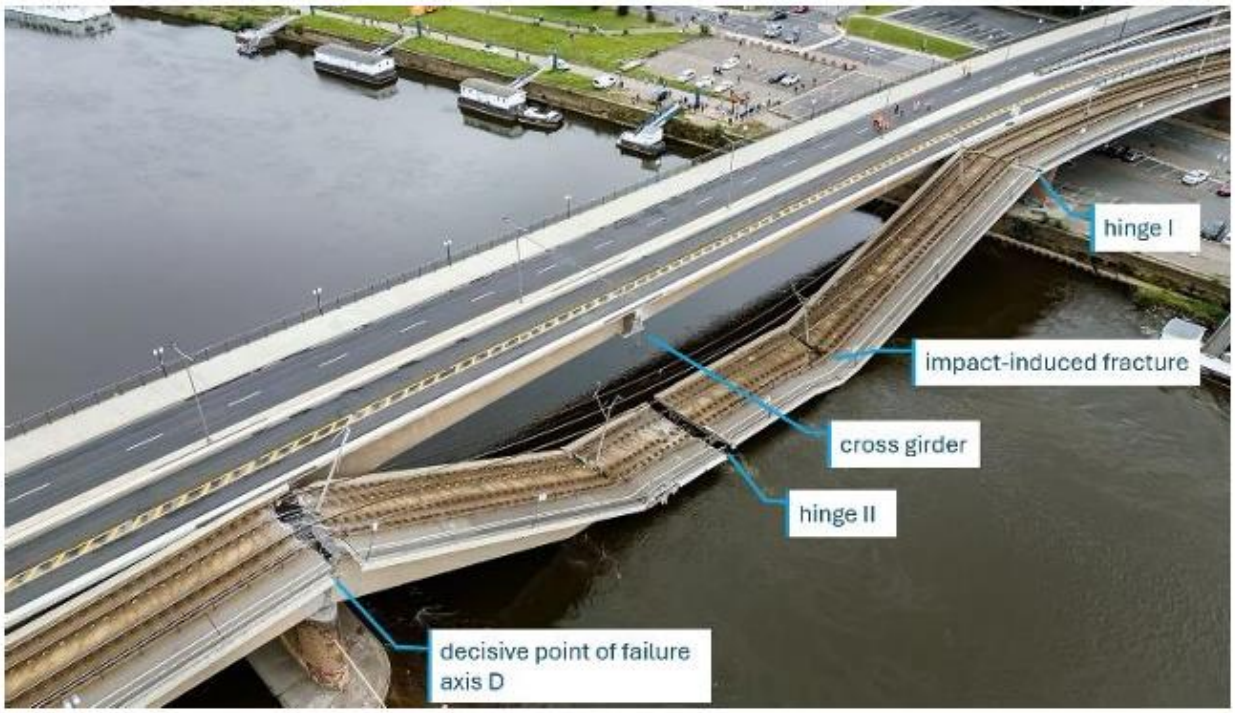
Keywords:
Carola Bridge, hydrogen-induced stress corrosion cracking, prestressed concrete, structural health, acoustic emission, monitoring, infrastructure, safety.

1. ВЪВЕДЕНИЕ И ХРОНОЛОГИЯ НА ИНЦИДЕНТА

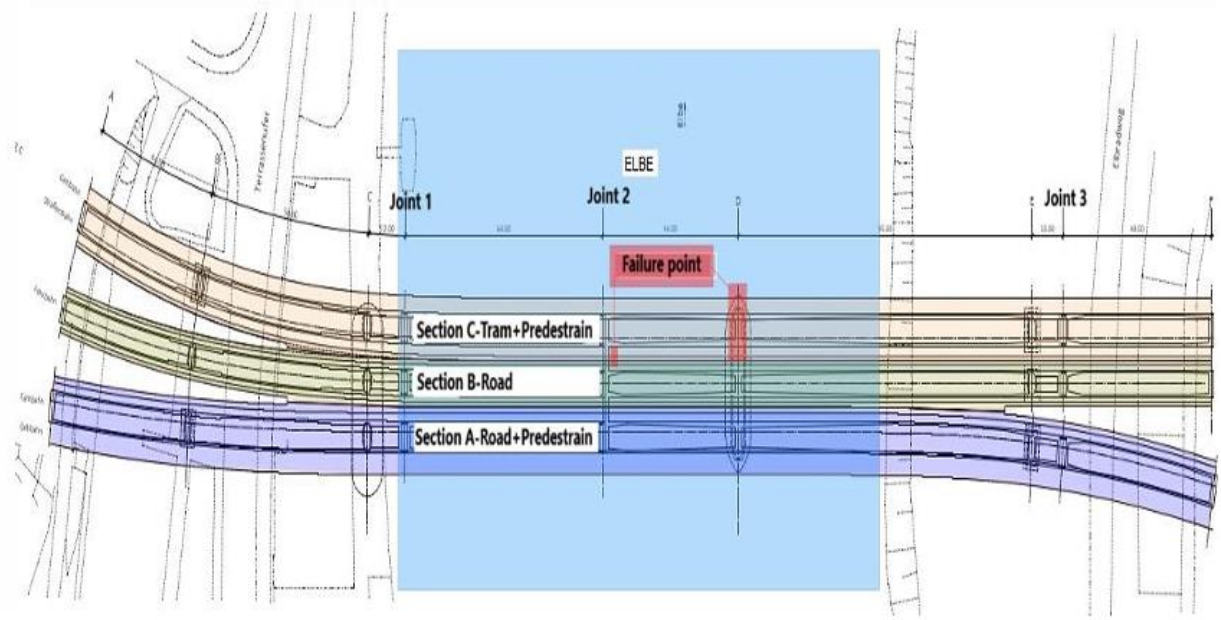
В ранните часове на 11 септември 2024 г. (около 03:00 ч. местно време) настъпва частично срутване на надлъжната греда С на моста „Карола" в Дрезден, преминаващ над река Елба. Срутването обхваща участък с дължина около 100 метра, който включва трасето за трамвай, обща пешеходна и велосипедна алея. Събитието е изненадващо – то се случва без никакви предварителни видими признаци и при липса на непосредствено действащо експлоатационно натоварване. Инцидентът предизвиква широк обществен

[1] Иван Павлов, доц. д-р инж., катедра Строителство на сгради и съоръжения, Архитектурен факултет, ВСУ „Черноризец Храбър“ - Варна, ivanpavlov@vfu.bg;
Ivan Pavlov, assoc. prof. PhD Eng., Construction of Buildings and Facilities Department, Faculty of Architecture, Varna Free University, ivanpavlov@vfu.bg
[2] Дария Михалева, доц. д-р инж., катедра Строителство на сгради и съоръжения, Архитектурен факултет, ВСУ „Черноризец Храбър“ - Варна, dariya.mihaleva@vfu.bg;
Dariya Mihaleva, assoc. prof. PhD Eng., Construction of Buildings and Facilities Department, Faculty of Architecture, Varna Free University, dariya.mihaleva@vfu.bg

отзвук и повдига критични въпроси относно безопасността на остаряващата мостова инфраструктура не само в Германия, но и в световен мащаб [2][6]. На Фигура 1 е показана снимка на моста скоро след срутването, а на Фигура 2 – схематичен план и напречно сечение с означение на срутената част. Този начален визуален материал дава ясна представа за мащаба на разрушението и за статическата независимост на трите надлъжни греди, което е от ключово значение за по-нататъшния анализ на причините и механизмите на отказа.



Фигура 1. Илюстрация на моста скоро след срутването [1]



Фигура 2. Схема на конструкцията и мястото на срутването [6]

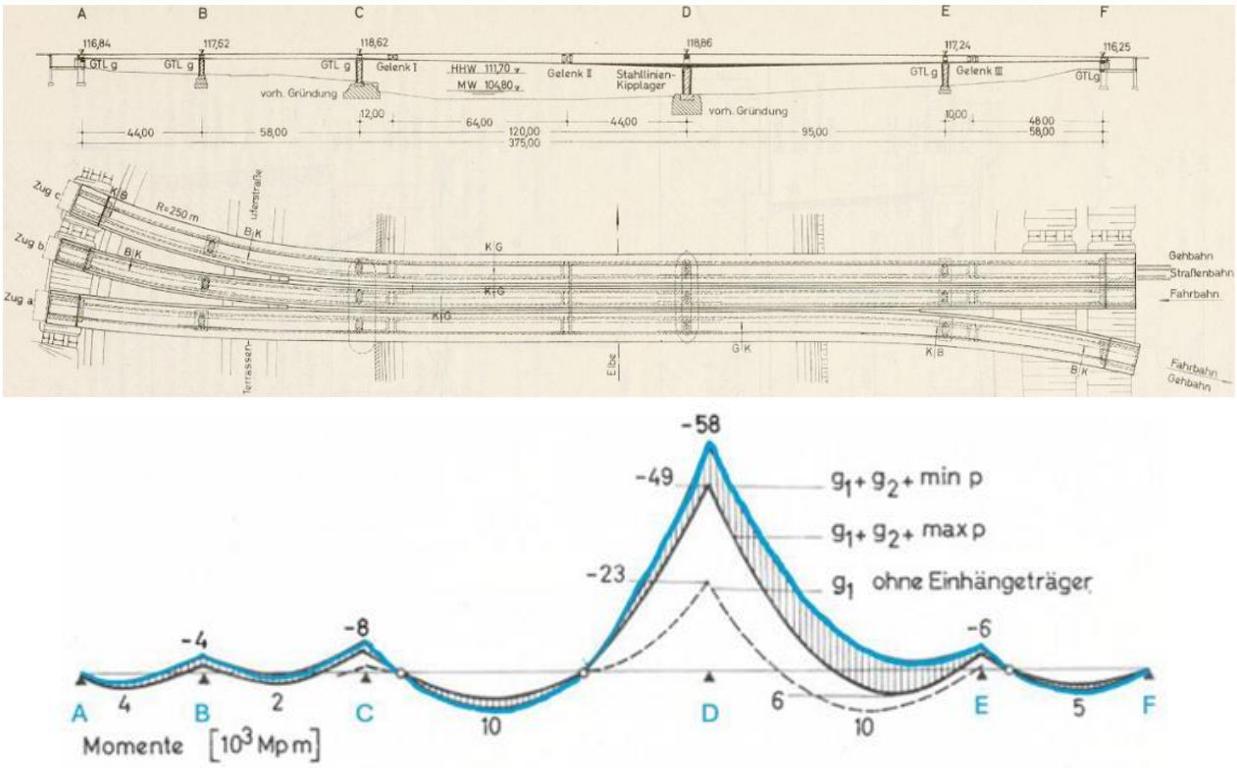
От представените изображения става ясно, че срутването засяга само една от трите надлъжни греди, което потвърждава тяхната статическа независимост и обяснява защо останалите две греди са останали непокътнати. Този факт е от съществено значение за разследването, тъй като насочва вниманието към специфичните особености на греда С – нейното предназначение за трамваен транспорт, разположението ѝ в най-западната част на моста и използваните при изграждането ѝ материали. Именно тези детайли поставят началото на задълбочения инженерен анализ, който впоследствие разкрива уникалния механизъм на скритата деградация, довела до фаталния инцидент.

2. КОНСТРУКТИВНИ ОСОБЕНОСТИ НА МОСТА

Мостът „Карола" представлява предварително напрегната бетонова кутия, завършена през 1971 г., която по онова време е мостът с най-голям отвор в Германската демократична република (ГДР). Конструкцията се състои от три надлъжни греди – А, В (за автомобилен транспорт) и С (за трамвай) – които са статически независими една от друга и имат обща ширина от 32 метра. В напречно направление, трите греди са разположени успоредно, като греда С е най-западна. Схемата на моста е тип „герберова греда" (cantilever arm with suspended span), което позволява големи дължини на отворите (максимален светъл отвор 120 m), но създава концентрация на отрицателни моменти над стълбовете, където конструкцията е най-натоварена. Тази конструктивна особеност е съществена за разбирането на механизма на разрушението, тъй като геометрията на моста и високото ниво на използване на напречното сечение (висок коефициент на пълнота) са предпоставка за значителни вътрешни напрежения [1][6]. На Фигура 3 е представен надлъжният разрез и статическата схема на моста, които илюстрират разположението на стълбовете и зоните на максимални моменти.

Таблица 1. Основни конструктивни параметри на моста „Карола" (към момента на построяването, 1971 г.) (съставена по данни от [1][6])

Параметър	Стойност
Година на завършване	1971 г.
Тип конструкция	Предварително напрегнат бетон (кутиеобразна греда)
Обща дължина	~375 m
Брой отвори	5 отвора (44 + 58 + 120 + 95 + 58 m)
Обща ширина	32 m (три надлъжни греди: A, B, C)
Максимален отвор (светъл)	120 m
Вид на трафика	Две платна за автомобилно движение (по две ленти във всяка посока) и едно трамвайно трасе с две релсови линии. Има странични зони за пешеходци и колоездачи.



Фигура 3. Надлъжен разрез и статическа схема със зоните на максимални моменти [1]

Геометрията на надлъжното и напречното армиране в зоната на стълб D (където стартира кинематичната верига на разрушението) разкрива екстремно натоварване на напречното сечение с метални елементи. Заложените в проекта армировки се разделят на две основни категории (Фигура 4):

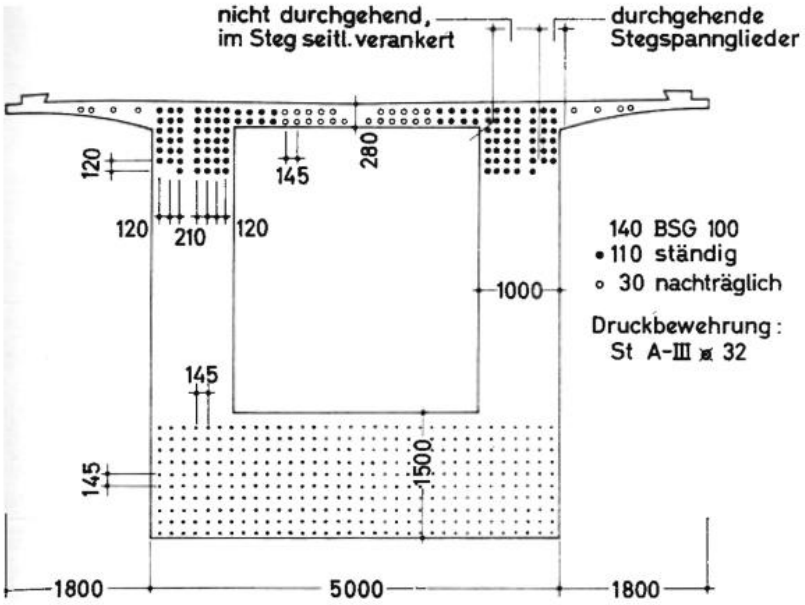
I. Пренапрегната (активна) армировка

- **Вид на напрягащите елементи:** Използвани са снопови напрегнати кабели тип **BSG 100** (*Bündelspannglieder 100*). Всеки отделен сноп е съставен от **24 броя високоякостни стоманени телове** с кръгло напречно сечение, произведени от заложена по проект студено изтеглена стомана тип „Хенигсдорф“ (*Hennigsdorf*), която впоследствие се оказва силно чувствителна към водородно индуцирано корозионно напукване (HISC).
- **Брой на кабелите в сечението:** Поради силно ограничената височина на профила над подпората, за поемане на огромните опорни моменти в горния пояс (пътната плоча) при стълб D са вкарани общо **140 броя напрегнати снопове** в кутиеобразното сечение. От тези снопове 110 броя са напрегнати преди бетониране, а 30 броя – след бетониране.
- **Разположение и закотвяне:** Поради критичната липса на пространство, сноповете са разположени в изключително гъста конфигурация. Част от тях преминават непрекъснато през опорната зона, докато други са закотвени в специално проектирани вътрешни уширения (пиластри) по стеблата на кутията, дънната или пътната плоча.

II. Обикновена (пасивна) стоманобетонна армировка

- **Надлъжна армировка в натисковата зона (долен пояс):** Тъй като горният пояс е подложен на тежък опън, в долния пояс (дънната плоча на кутията над стълб D) възникват огромни натискови напрежения. За тяхното поемане проектантите са заложили безпрецедентно мощна надлъжна натискова армировка с диаметър 32мм, разположена в **10 слоя**.
- **Процент на армиране:** Процентът на армиране с обикновена армировъчна стомана в натисковата зона на дънната плоча достига близо **4%**.

• **Напречна армировка (стремена):** Напречното армиране в тази зона също е специфично. Поради наличието на 10 слоя успоредни пръти подложени на силен натиск, вертикалните и хоризонталните стремена са проектирани на много гъста стъпка. Освен за поемане на срязващите сили, те имат критичната конструктивна функция да служат като **осигуровка срещу изкълчване** на притиснатите надлъжни арматурни пръти от пакета.



Фигура 4. Напречно сечение при стълб D [5]

От представените конструктивни данни става ясно, че мостът е проектиран с амбициозни за времето си параметри, но именно постоянно високите нива на напрегнатото състояние и недостатъчната устойчивост на материалите към водородна крехкост се оказват фатална комбинация. Тези особености поставят основата на скрития деградационен процес, който в продължение на десетилетия компрометира носимоспособността на критичните зони, без това да бъде забелязано при рутинните огледи. Анализът на конструкцията разкрива, че именно зоната над стълб D – където отрицателните моменти са най-големи – е била предопределена за бъдещ отказ, тъй като там напреженията в предварително напрегнатата стомана достигат своите максимални стойности, а всяко допълнително увреждане от корозия води до необратима загуба на носимоспособност.

3. ОБОБЩЕНИЕ НА ПЪРВОНАЧАЛНИТЕ ХИПОТЕЗИ ЗА ПРИЧИНИТЕ ЗА РАЗРУШЕНИЕТО И ПРИЧИНИТЕ ЗА ОТХВЪРЛЯНЕТО ИМ

След разрушението на 11 септември 2024 г. в публичното и експертното пространство са предложени и обсъдени множество хипотези относно потенциалните причини [2][4]. Официалното разследване, ръководено от проф. Щефен Маркс от Техническия университет в Дрезден и проведено от инженерната фирма MKP GmbH в сътрудничество с Федералния институт за изследване и изпитване на материали (BAM), систематично тества и отхвърли повечето от тях чрез комбинация от материално-технически изследвания, ретроспективни статически изчисления и анализ на цялата налична документация [1][2][3][5].

Таблица 2. Обобщение на първоначалните хипотези за причините за разрушението и изводите от обследването

Хипотеза	Същност	Резултат от обследването
1. Хлориди от зимното поддържане	Агресивни хлориди (сол) от зимното поддържане на пътищата са проникнали в бетона и са причинили корозия на армировката.	Основната причина е водородно индуцирано корозионно напукване под напрежение, а не външни хлориди. Процесът се дължи на взаимодействие между специфичната стомана, влагата и напреженията [2][3].
2. Блуждаещи токове от трамвайната мрежа	Недостатъчно заземяване на трамвайната мрежа (600 V DC) е довело до протичане на блуждаещи токове през стоманената армировка.	Корозионните повреди са локализирани дълбоко във вътрешността на конструкцията и не съответстват на типичния модел от блуждаещи токове. Не е напълно изключена като второстепенен фактор, но не е първопричина [1][4].
3. Екстремен температурен градиент	Температурен спад над 20°C (от >30°C до <10°C) е причинил вътрешни напрежения, надвишили носимоспособността.	Температурният градиент не е самостоятелна причина, а **задействащ фактор (тригер)** – ускорява финалния отказ на вече компрометирана конструкция [2][5].
4. Умора на материала от ежедневно натоварване	Десетилетия натоварване от движението са довели до умора на стоманата.	Умората влошава първоначалното корозионно увреждане, но сама по себе си не би причинила внезапно срутване без значителна корозия [3][6].
5. Дефект в напречната греда	Отказ на свързващата напречна греда между отделните греди е довел до лавинообразно срутване.	Отказът на напречната греда е **последен етап** от веригата на разрушението, а не първопричина. Разрушението настъпва, когато този резервен път за преразпределение на натоварването се изчерпва [1][2].

В крайна сметка, след изчерпателно разследване, единствената хипотеза, която остава напълно непротиворечива и обяснява всички наблюдавани факти, е водородно индуцираното корозионно напукване под напрежение (Hydrogen-Induced Stress Corrosion Cracking) на предварително напрегнатата стомана от типа „Хенигсдорф" (Hennigsdorfer Spannstahl) [2][3][5]. Това заключение е резултат от последователното елиминиране на всички алтернативни сценарии и е подкрепено от множество независими лабораторни изследвания, които недвусмислено доказват наличието на характерните за този механизъм микроструктурни изменения в метала. По този начин разследването не само идентифицира точната причина, но и отхвърля всички други възможни обяснения, като дава категоричен отговор на въпроса защо е настъпило това безпрецедентно срутване.

4. ПРОВЕДЕНИ ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ МЕТОДИ И ГРАФИЧЕН МАТЕРИАЛ

Разследването на причините за срутването на моста „Карола" представлява едно от най-мащабните и всеобхватни инженерно-съдебни изследвания, провеждани някога в Германия. То обединява усилията на учени от Техническия университет в Дрезден, експерти от инженерната фирма MKP GmbH и специалисти от Федералния институт за изследване и изпитване на материали (BAM), като използва модерна апаратура и иновативни методи за анализ. Изследването е изключително задълбочено и използва широка гама от методи за анализ. То включва няколко основни етапа [1][2][4]:

1. Документален анализ: Пълен преглед на оригиналната строителна документация от 1969–1971 г. за точно възстановяване на конструкцията, материалите и строителните практики.

2. Изследване на място и вземане на проби: Детайлно документиране на състоянието на рухналата част и останалите греди, включително изрязване на бетонови ядки и стоманени проби от критичните зони.

3. Лабораторни изпитвания на материалите:

- Бетон: Определяне на якостни характеристики, модул на еластичност, анализ за наличие на агресивни агенти.
- Стомана: Изпитване на якост на опън, фрактография за установяване на типа разрушение и визуална оценка на степента на корозия.

4. Статически преизчисления: Извършване на цялостно статическо преизчисление на моста по съвременни методи за установяване на реалния резерв на носимоспособност.

5. Анализ на деформационното поведение: Специален анализ, показващ липсата на видими деформации преди срутването, което доказва невъзможността за предвиждане на инцидента с конвенционални методи.

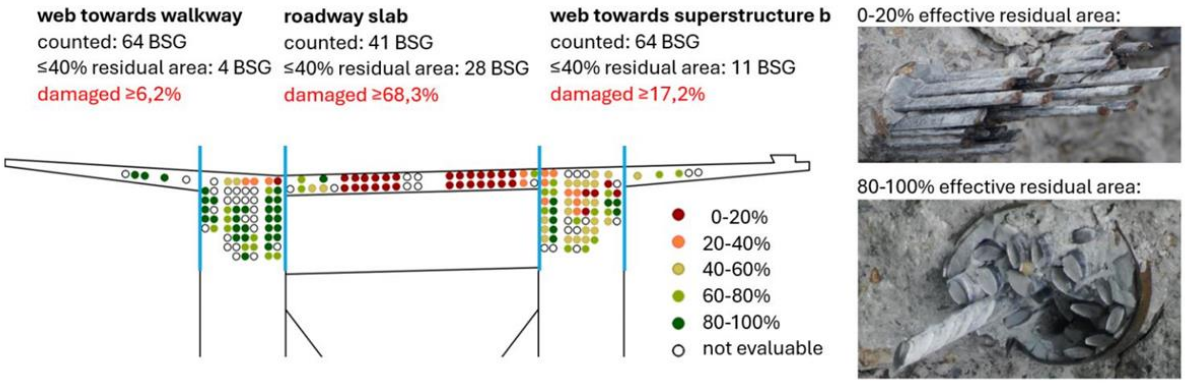
Комбинацията от тези пет метода позволява изграждането на пълна картина на събитията – от момента на построяването през 1971 г. до фаталния отказ през 2024 г. Особено ценен е документният анализ, който разкрива, че още по време на строителството са допуснати пропуски при осигуряването на херметичност на каналите за предварително напрегнатите въжета, което позволява проникването на влага и създава предпоставки за дългосрочна корозия. Без този интердисциплинарен подход, съчетаващ историческо проучване, теренни изследвания, лабораторни анализи и модерни изчислителни техники, истинската причина за срутването можеше да остане завинаги скрита.

5. ПЪРВОПРИЧИНА ЗА РАЗРУШЕНИЕТО, МЕХАНИЗЪМ НА ПРОГРЕСИВНОТО СРУТВАНЕ И ЗАКЛЮЧИТЕЛНИ ИЗВОДИ

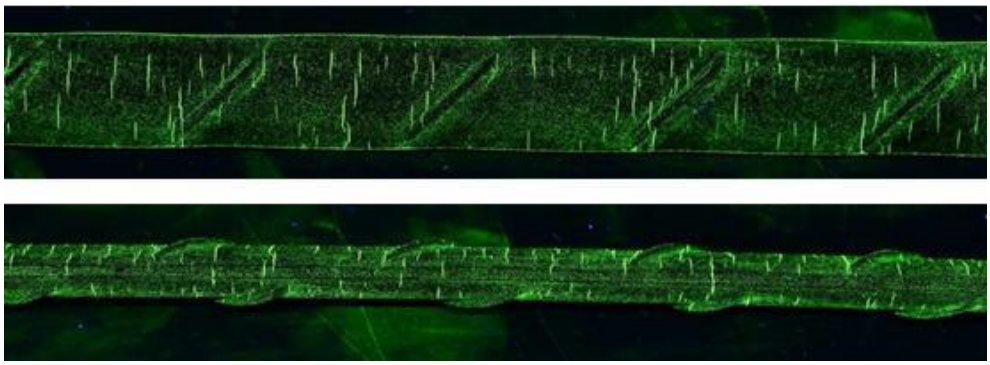
5.1. Първопричина: Водородно индуцирано корозионно напукване под напрежение

Основният виновник за внезапния отказ на греда С е установен като водородно индуцирано корозионно напукване под напрежение (hydrogen-induced stress corrosion cracking) на високоякостната стомана на предварително напрегнатите въжета, произведена в стоманолеярната „Хенигсдорф" (Hennigsdorfer Spannstahl) [2][3]. Този тип стомана, макар и с изключително високи якостни показатели, се оказва изключително чувствителна към водородна крехкост, особено при наличие на остатъчна влага и електролити в микропукнатините на защитния слой. Процесът на увреждане започва още по време на строителството на моста. Комбинация от лоши атмосферни условия и остатъчна влага довежда до контакт на стоманените елементи с вода. Присъствието на електролит (вода или кондензат) с ниско pH (<5) е критично, тъй като при тези условия катодната реакция на корозия генерира водород. Водородът, навлизайки в кристалната решетка на

високоякостната стомана, в комбинация с действащите напрежения от предварителното напрягане и експлоатационните натоварвания, инициира микропукнатини (вж. Фигура 6), което води до типично интеркристално напукване по границите на зърната, характерно за водородно индуцирано корозионно напукване под напрежение. Този процес е незабележим отвън, тъй като се развива във вътрешността на бетоновата конструкция и не корелира с видимите повърхностни увреждания [4]. На Фигура 5 са показани увредените предварително напрегнати въжета в зоната над стълб D, а на Фигура 6 – микроструктурата на водородно индуцираното напукване.



Фигура 5. Увредени предварително напрегнати въжета в зоната над стълб D [4]



Фигура 6. Микроструктура на водородно индуцирано напукване във високоякостна стомана [2]

Тази корозия води до прогресивно и скрито намаляване на носещото сечение на отделните стоманени телове. Установено е, че според оценката на МКР над 68% от предварително напрегнатите въжета в срутената секция са били тежко увредени до степен на пълно разрушаване [1]. Това означава, че дълго преди самото срутване конструкцията е загубила по-голямата част от своята предварително напрягаща способност, като останалите здрави телове са били принудени да поемат натоварвания, далеч надвишаващи проектно предвидените. По този начин се създава ситуация на скрит, но непрекъснато нарастващ риск, който не може да бъде открит чрез никакви конвенционални методи за инспекция, прилагани по онова време.

5.2. Механизъм на прогресивното срутване

Комбинацията от постепенна загуба на носимоспособност (от корозия) и специфични климатични условия непосредствено преди инцидента е ключът към разбирането на точния механизъм на срутване.

- **Загуба на носимоспособност:** В продължение на десетилетия, корозионното напукване под напрежение води до непрекъснато и тихо скъсване на отделни телове от предварително напрегнатите въжета в зоната на гредата над стълб D. Това явление остава скрито за инспекциите поради липсата на видими деформации – изключително високото армиране на зоната на опън в това сечение означава, че дори при отказ на отделни телове, общата деформация на бетона е незначителна и незабележима [3][4].
- **Температурният тригер:** Дните преди 11 септември в Дрезден са необичайно горещи. В нощта на срутването обаче настъпва рязко захлаждане. Това води до значителна вертикална температурна разлика в конструкцията – горната част на моста бързо се охлажда и скъсява, докато долната част, нагрявана от сравнително топлата вода на река Елба, остава по-топла. Този температурен градиент генерира допълнителни вътрешни напрежения [2][5].
- **Крайният отказ:** След като значителен брой телове в зоната над стълб D вече са били скъсани поради корозия, термично индуцираните движения довеждат до допълнително пренапрежение на останалите здрави елементи. Върхът на голямото конзолно рамо се издига нагоре, променяйки напрегнатото състояние на конструкцията. В крайна сметка конзолата е претоварена, скъсва се, и греда С се срутва в реката [1][6].

Фигура 7. Снимка на повредите в сечението над опора D [1]

Този механизъм обяснява защо срутването настъпва внезапно и без предупреждение – той е резултат от дългогодишна скрита деградация, която достига своята критична точка едва когато външните условия (температурният градиент) съвпадат по неблагоприятен начин. Именно това стечение на обстоятелствата превръща един бавен, незабележим процес в катастрофално събитие за секунди, което не оставя време за реакция.

5.3. Заключителни изводи

Срутването на моста „Карола" представлява повратен момент в мостовото инженерство. Основните изводи от анализа на причините за катастрофата са [1][2][4][6]:

1. Уязвимост на високоякостната стомана: Съществуващите мостове, изградени с високоякостна стомана, предразположена към корозионно напукване под напрежение, крият значителен риск от внезапно и непредвидимо разрушаване, което не може да бъде открито с конвенционални методи.

2. Необходимост от преразглеждане на нормативната уредба: Този инцидент демонстрира спешната нужда от преразглеждане на насоките за оценка и мониторинг на съществуващите предварително напрегнати бетонови мостове, особено тези с подобни конструктивни характеристики и строителни грешки.

3. Въвеждане на съвременен мониторинг: Разчитането само на визуални инспекции е недостатъчно. За критични съоръжения трябва да се въведат системи за непрекъснат мониторинг, базирани на акустична емисия.

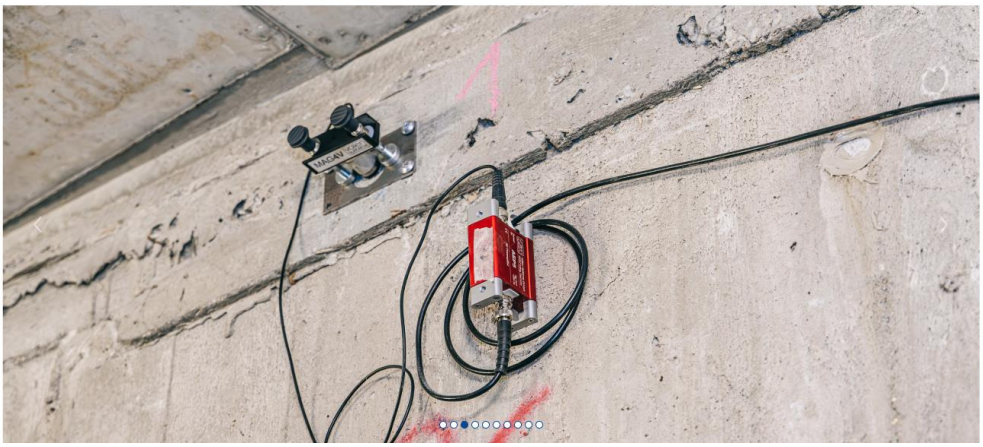
4. Необратимост на щетите: Поради естеството на корозионните процеси и щетите, причинени от самото срутване, мостът „Карола" е достигнал края на своята носимоспособност. Останалите греди (А и В) не могат да бъдат върнати в експлоатация и подлежат на пълно разрушаване, последвано от изграждане на нова конструкция.

Тези изводи имат международно значение и поставят под съмнение адекватността на съществуващите практики за оценка на остатъчния живот на мостове, строени през 60-те и 70-те години на миналия век. Те подчертават спешната необходимост от създаване на единни европейски стандарти за диагностика на скрити корозионни процеси и за задължително внедряване на системи за непрекъснато наблюдение на критичните съоръжения, за да се предотвратят бъдещи трагедии. Случаят ясно показва, че досегашните подходи, основани на периодични визуални проверки, са напълно остарели и не могат да гарантират безопасността на съвременната инфраструктура.

6. КРИТИЧЕН ИЗВОД: НЕЕФЕКТИВНОСТ НА КОНВЕНЦИОНАЛНИЯ МОНИТОРИНГ

Един от най-важните изводи от разследването е, че редовните визуални инспекции и стандартните неразрушителни методи са били напълно неефективни за откриване на този тип скрита корозия. Експертният доклад заключава, че не е имало небрежност от страна на отговорните лица, тъй като мостът е бил инспектиран в съответствие с всички приложими стандарти и препоръки [2][4].

Проблемът е във физиката на процеса: зоната на опън над стълба е изключително силно армирана, за да поеме огромните отрицателни моменти. Това означава, че дори при скъсване на отделни телове, увеличението на деформацията (напукването) в бетона е толкова малко, че остава под границата на забележимост. Следователно, разрушението настъпва внезапно, без видимо предупреждение, което е в пълно противоречие с традиционното разбиране за появата на „пукнатини преди счупване“ (crack-before-failure) [3][5].



Фигура 8. Система за акустичен мониторинг, инсталирана върху останалите греди [5]

Единственият метод, който се оказва потенциално ефективен за ранно откриване на този тип процеси, е акустичната емисия. Чрез нея може да се регистрира характерният звук от скъсване на отделни стоманени телове вътре в конструкцията. На Фигура 8 е показана системата за акустичен мониторинг, инсталирана върху останалите греди.

Това сравнение е може би най-убедителното доказателство за провала на съществуващите методи за инспекция. Докато външният вид на бетона не буди никакво съмнение, вътрешната армировка се оказва напълно компрометирана. Това противоречие подчертава не само ограниченията на визуалния оглед, но и цялостната недостатъчност на нормативната уредба, която допуска подобни съоръжения да се експлоатират десетилетия наред без адекватен контрол върху скритите процеси, протичащи в стоманобетонните елементи.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Fiedler M., G. Schacht, R. Ritter, S. Marx, S. Scheerer, L. Clages, G. Ebell, D. Czeschka, C. Voigt, The Collapse of the Carola Bridge - Forensic Engineering and Palliative Monitoring, TU Graz, 2025. https://openlib.tugraz.at/download.php?id=68ac3f6c42598&location=browse

[2] Schacht G., S. Marx, S. Scheerer, M. Fiedler, R. Ritter, L. Clages, C. Voigt, D. Czeschka, G. Ebell, G. Marzahn, Einsturz der Carolabrücke in Dresden Teil 2: Untersuchungen zu den Einsturzursachen und die Folgen, Beton- und Stahlbetonbau, vol. 120, no. 10, pp. 837-846, Aug. 2025. https://fis.tu-dresden.de/portal/en/publications/einsturz-der-carolabrucke-in-dresden-teil-2

[3] Marzahn G., Carolabrücke in Dresden – Erkenntnisse und Schlussfolgerungen, Medienpool der TUM, 2025. https://mediatum.ub.tum.de/doc/1798870/sxxiaxz9hr26canpiknyofnmf.mbs29.01.pdf

[4] Landeshauptstadt Dresden, Gutachten zum Einsturz der Carolabrücke: TU Dresden, Abschlussbericht, Mar. 2025. https://www.dresden.de/media/pdf/Strassenbau/Gutachten-Carolabruecke.pdf

[5] Marx S., S. Scheerer, G. Schacht, M. Fiedler, R. Ritter, L. Clages, C. Voigt, D. Czeschka, G. Ebell, G. Marzahn. Einsturz der Carolabrücke in Dresden Teil 1: Vom ambitionierten Entwurf bis zum tragischen Teileinsturz. Beton- und Stahlbetonbau / TU Dresden Institut für Massivbau, 2025. Available at: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/ressourcen/dateien/veranstaltungen/dbbs/34_dbbs/DBBS34-Beitrag-Carolabruecke.pdf

[6] GmbH, Vorläufige Erkenntnisse zur Ursache und Hergang des Teileinsturzes der Carolabrücke, Dec. 2024. https://www.neustadt-ticker.de/wp-content/uploads/2024/12/2024-12-11-Carolabruecke-Zusammenfassung-Ergebnisse.pdf