

**ECONOMIC EFFICIENCY OF BALLASTLESS RAILWAY TRACK COMPARED
TO CONVENTIONAL BALLAST RAILWAY TRACK**

**ИКОНОМИЧЕСКА ЕФЕКТИВНОСТ НА БЕЗБАЛАСТОВ ЖЕЛЕЗЕН ПЪТ
СПРЯМО КОНВЕНЦИОНАЛЕН БАЛАСТОВ ЖЕЛЕЗЕН ПЪТ**

Tsvetan Blagoev¹

University of Architecture, Civil engineering and Geodesy

Цветан Благоев¹

Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия

***Abstract:** Nowadays, the modernization of railway networks around the world is on a huge scale. The ballasted railway track is still the most popular and preferred option due to its advantages and many years of experience with it. However, structural solutions with reinforced concrete slab and / or asphalt concrete layer are increasingly used, especially when it comes to the crossing of the railway over a bridge structure and / or tunnel. The ballastless track is designed in such a way that there is almost no maintenance work, as the reinforced concrete slab replaces the ballast prism and assumes its function to distribute the stresses generated by the rolling stock to the substructure. Slab track also proves to be quite suitable for better travel comfort on high-speed lines as well as on heavy rail transport. The advantages of almost no railway maintenance work are enormous, but this construction is more expensive than the conventional ballast track. In the present article the economic efficiency of the slab track system is analyzed, and the respective conclusions and recommendations are made.*

***Keywords:** Slab track, Ballastless track, Railway track, economic effectiveness, conventional ballasted track, life cycle cost.*

***Резюме:** В днешни дни модернизацията на железопътните линии по целия свят е в огромен мащаб. Все още баластовата конструкция на железния път е предпочитан вариант, поради своите предимства и многогодишния опит с тази система на горно строене на железния път. Въпреки това, все повече се разработват конструктивни решения със стоманобетонни и/или асфалтобетонни пластове. Основното прилагане на подобни конструкции се наблюдава по-често при преминаването на железния път при изкуствени съоръжения като мосовете и тунели, но вече има и доста жп отсечки в експлоатация, които са изцяло изградени от безбаластови конструкции на железния път. Безбаластовата конструкция е проектирана по такъв начин, че да не се нуждае от почти никаква поддръжка, тъй като стоманобетонната плоча замества*

¹ Tsvetan Blagoev, Chief Assistant Professor, Phd., Sofia, Hristo Smirnenski 1 Str., ceco_z@abv.bg

баластовата призма и изпълнява функцията да разпределя напреженията породени от подвижния състав към земната основа. Безбаластовите конструкции са подходящи, както за по-добър комфорт на пътуване при високосторостните линии, така и при тежкотоварните линии, но цената е значително по-висока от конвенционалната баластова конструкция. В настоящата публикация е анализирана икономическата ефективност от прилагането на безбаластов железен път.

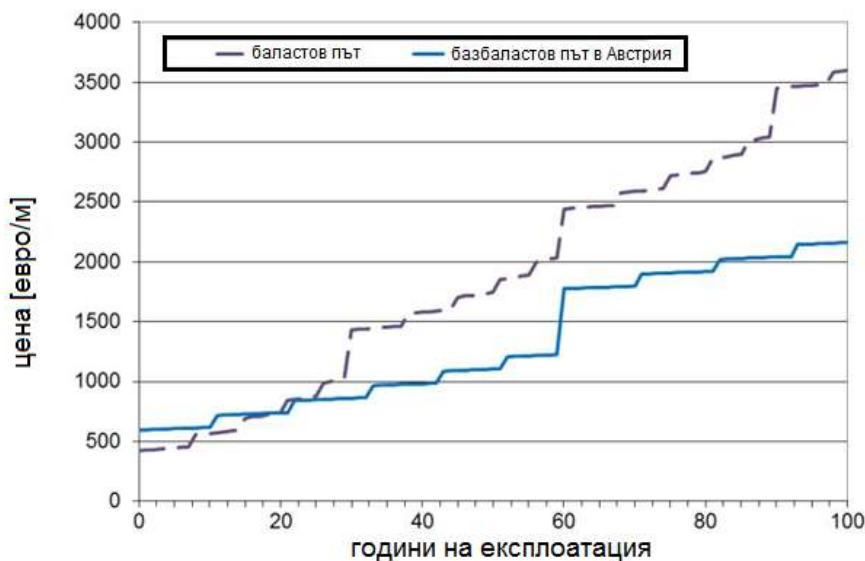
Ключови думи: *безбаластова конструкция, железен път, баластов железен път, икономическа ефективност, цена на жизнен цикъл на конструкцията*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните проучвания, направени през годините доказват, че безбаластовият железен път е рентабилен, в случай, че цената на изпълнението му не надвишава с повече от 30% цената за изпълнение на конвенционален баластов железен път. Системата Rheda е най-често прилаганата безбаластова конструкция в Европа и цената на този тип горно строете(ГС) е около 1.5 пъти по-висока от стандартния баластов тип горно строене. Въпреки това системата Rheda е широко разпорстранена поради дългогодишния опит с нея и доброто ѝ поведение през годините. [1][2] Независимо от по-високата цена на безбаластовата конструкция средно с 20÷50%, поради минималната необходимост от поддръжка, тя се явява по-ефективно решение, в сравнение с баластов железен път, в дългосрочен план. Някои проучвания в миналото са показали, че изчислените разходи за поддръжка на изградените баластови железни пътища в диапазон от 100 години за тунели и 40 години за ГС върху земни конструкции са значително по-големи от предвидените, което е довело до необходимостта от разработване на по-стабилна конструкция на горното строене в дългосрочен план. За високоскоростната линия Кьолн/Рейн-Майн, например, разходите за поддръжка са с 30% повече от изчислените преди изграждането на линията.

2. АНАЛИЗ НА ИЗПЪЛНЕНИ БЕЗБАЛАСТОВИ СИСТЕМИ ПО СВЕТА.

Същественото предимство на безбаластовите системи е, че те изпълняват своята функция адекватно, без недопустими отклонения, значително по-дълго време без съществена поддръжка в сравнение с конвенционалния баластов тип система. На фигура 1 са показани резултати от направени изследвания за австрийската железопътна мрежа, според които безбаластовият железен път е значително по-ефективен в дългосрочен план.



Фигура 1: Сравнение между баластов и безбаластов железен път в течение на времето в Австрия

Повечето съвременни безбаластови конструкции се изпълняват за цени 800÷1250€/м, като това е цената само за ГС. Въпреки че според проучванията и изпълнените обекти цената за път на монолитна основа се намалява с нарастване на построената дължина на линията, все още цената за тези конструкции е между 1,5÷2 пъти по-висока от тази на баластовия път.[1]

2.1. ОСОБЕНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗПЪЛНЕНИЕ НА БЕЗБАЛАСТОВ ЖЕЛЕЗЕН ПЪТ

Икономическото предимство на безбаластовите конструкции пред баластовите идва само от редуцираната необходимост от поддръжка. Системата Rheda, която е приложена за изграждане на трасето Bielefeld – Hamm в Германия, за подвижен състав със скорост от 200км/ч (1972г.) се експлоатира до момента с незначителни работи по поддръжка [2]. От друга страна поддръжката за баластовия железен път се подобрява и усъвършенства непрекъснато. Безбаластовият път също се нуждае от поддръжка и в много случаи тя се оказва значително трудоемка и скъпа в зависимост от характера на повредите. По-сериозен ремонт на безбаластова конструкция представлява изключително трудна задача, поради липсата на автоматизирани технически средства за рехабилитация и ремонт, което може да редуцира предимствата от по-малката поддръжка при стандартни условия. Така е станало и при високоскоростната линия между Берлин и ХанOVER, където слягане (пропадане) от 20мм ограничава скоростта на това място до 70км/ч. Ремонтните работи включили в себе си премахване на ГС и извършване на упътнителни процедури на дълбочина до 6м на земната основа (ЗО). Тези процедури били извършвани от специализирана механизация по време на нощните прозорци и самата процедура била много скъпа. Ако в бъдеще се окаже, че безбаластовата конструкция е ненадеждна от гледна точка на запазване на геометрията си в дългосрочен план, то икономическата ѝ ефективност в сравнение с баластовата конструкция би била нищожна или дори по-ниска. Ето защо, при проектиране на безбаластов железен път, от изключителна важност е да има достатъчно подробни данни за геологията по протежението на цялата линия, с цел да се проектират адекватно основните пластовете. Това е единственият начин, по който тази система може да

изпълни работата, за която е проектирана и да служи за целия експлоатационен срок без съществени ремонти.

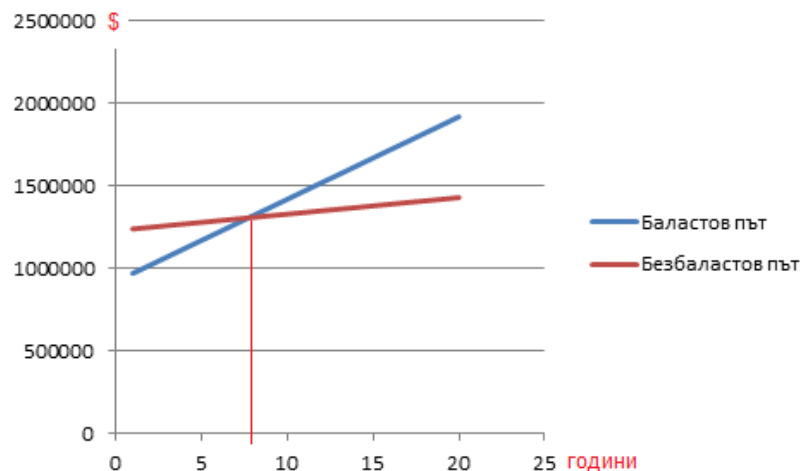
Единственият 100% сигурен случай, при който безбаластовата конструкция е по-икономически ефективна спрямо баластовата, е при тунелите и мостовете, тъй като там няма необходимост от допълнителни обработки на долното строене, защото те осигуряват необходимата коравина за основата на безбаластовия железен път. При земни конструкции баластовият път се оказва по-подходящ и по-икономически ефективен избор, поради факта, че в много случаи ценовият фактор за безбаластовите системи е $2 \div 2,5(3)$ пъти по-голям от този при баластов железен път [1]. Това се дължи не само на по-голямата цена за ГС, но и поради по-високите изисквания за ЗО при безбаластовите конструкции, което води до повишаване на цената на долното строене(ДС) (допълнителни пластове с висококачествени материали и уплътняване $D_{пр}=1.0$).

Според проучване направено през 2007 от Steenberg, Metrikine и Esveld се стига до извода, че с увеличаване на широчината и/или прилагане ексцентрично на армировката в бетонния носещ пласт, може да се избегне значително количество от работата за подобряване на ЗО. Повишаването на коравината на плочата в много случаи премахва необходимостта от значителни почвени подобрения, когато безбаластовата конструкция е изградена върху земна конструкция. Този способ прави безбаластовия железен път върху земна конструкция конкурентноспособен на баластовия.

3. ИКОНОМИЧЕСКО СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ БЕЗБАЛАСТОВ И БАЛАСТОВ ЖЕЛЕЗЕН ПЪТ

Според [6] разходите за изграждането на системата Shinkansen са 18% по-високи при изкоп и 24% по-високи при насип спрямо цената на конвенционалната баластова система. Разходите за труд при поддръжка се очаква да бъдат 30% по-ниски от тези, които се изискват за баластов железен път, къто допустимите максимални слягания трябва да бъдат до 30мм. От дългогодишната експлоатация е установено, че цялостното поведение на системата е задоволително, с изключение на някои малки пукнатини поради алкали-силициевата реакция на цименто-асфалтовия пласт и някои изкорубвания на плочата в тунелите. Разходите за поддръжка са 0.18 до 0.30 пъти от тези при баластовата система, а средния разход за изграждането на Shinkansen е 1.3 пъти повече. При това положение разходите между двата типа конструкции се изравнят между 8^{та} и 12^{та} година.

В САЩ изграждането на 4клас баластов железен път е приблизително 970 000\$/миля, а за 9клас безбаластов железен път – 1 240 000 \$/миля. Годишните разходи за поддръжка на баластовия коловоз за тежкотоварен трафик, включвайки влаковите закъснения и пренасочванията е изчислено на средно 50 000\$/миля без да се отчита цената за подмяната на траверси и други елементи от ГС. Същите разходи при случая с път на монолитна основа са 5 пъти по-малки – 10 000\$/миля годишно[2]. Имайки предвид изложеното по-горе става ясно, че за по-малко от 8 години безбаластовият покрива разликата в цените за изграждане, и след това има положителен икономически баланс в сравнителен план - Фигура 2. [2]

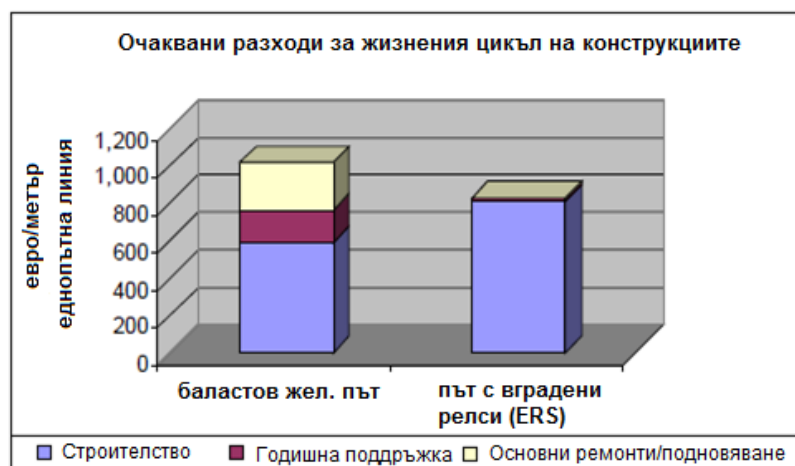


Фигура 2: Сравнение на икономически баланс между баластов и безбаластов железен път в САЩ

Цената за изграждане на системите Rheda и Zublin са 950€/м и 800€/м, а цената за баластов железен път е около 510€/м (2006,[2],[7]). Цените за безбаластов железен път във Франция също са около 2 пъти по-високи от тези за баластов. Разходите за поддръжката на безбаластовите системи в Германия и Япония са приблизително 10÷30% от тези, които се изискват при баластов път.

3.1. АНАЛИЗ НА РАЗХОДИТЕ ЗА ЖИЗНЕНИЯ ЦИКЪЛ НА КОНСТРУКЦИИТЕ

В проучване, направено от Zoeteman & Esveld е създаден модел за анализ на разходите за жизнения цикъл (LCCA) на безбаластова конструкция с вградени релси (ERS), като са взети предвид разходите за труд, вида ЗО, интензивността на трафика, начинът и времето за поддръжка на пътя и допълнителните възможни рискове. [9] Авторите се спират на сравнение между баластов железен път и система изградена от непрекъснато подпрени релси (Embedded Rail System - ERS). От фиг.3 е видно, че независимо от 40% по-високата цена за изграждане на безбаластовия път, той е с 20% по-малък разход за жизнения си цикъл в сравнение с баластовия железен път, използван в Холандия.



Фигура 3: Сравнение на разходите за жизнения цикъл на баластов железен път и железен път с вградени релси (ERS)

В таблица 1 са представени резултатите от статия публикувана през 2008г. от Kondapalli & Billow за PCA (Portland Cement Association)[8]. В нея са дадени сумите на икономическите предимства за път на монолитна основа в сравнителен план с баластов железен път, като е направен анализ между тежкотоварен трафик и комбинация между товарен и високоскоростен трафик. За трите варианта на сравнение, показани в таблица 1 се доказва, че печалбата от изпозването на безбаластова конструкция е между 7 и 11%.

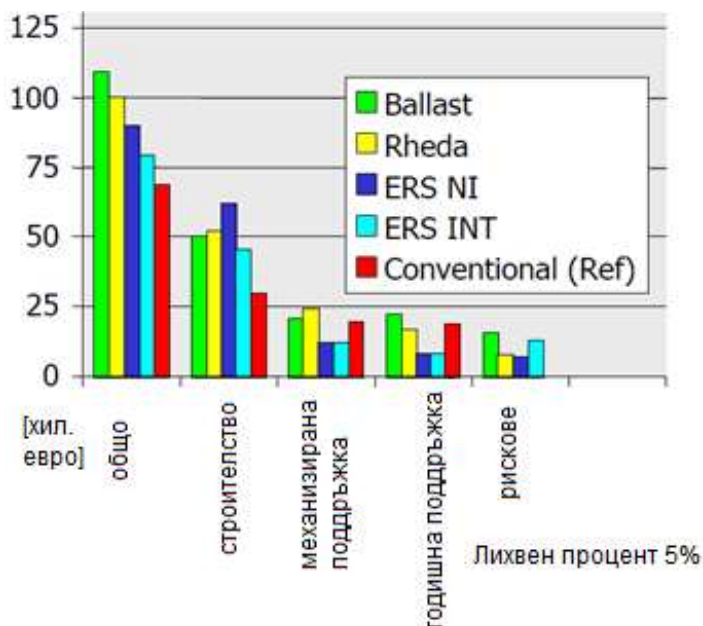
Таблица 1: Сравнение за ефективността на безбаластова конструкция спрямо баластов железен път в 3 сценария [2]

Категория	Голямо количество товари		Умерено количество товари+ 200км/ч пътнически трафик		Умерено количество товари+ 320км/ч високоскоростен пътнически трафик	
	Баластов	Безбаластов	Баластов	Безбаластов	Баластов	Безбаластов
Изграждане на пътя	1166000	1292000	1166000	1292000	1166000	1292000
Поддръжка на пътя	8057000	6926000	4551000	3894000	4880000	4057000
Разходи за експлоатация	13836000	13269000	6969000	6595000	7021000	6304000
Разходи за дерайлиране	137000	7000	69000	3000	42000	2000
Обща настояща стойност	23196000	21494000	12755000	11784000	13109000	11655000
Нетна печалба от безбаластовата конструкция	1702000 \$ - 7% спестяване		971000 \$ - 8% спестяване		1454000 \$ - 11% спестяване	

На фиг.4 са представени резултатите от анализ за жизнения цикъл на 3 безбаластови конструкции и 2 типа баластови конструкции, направен от Coenraad Esveld [5]. В разходите, които са представени на графиката са включени само цените за ГС [€/m]

Табл.2: Цени за различните видове ГС на железния път, прилагани в Холандия

Система:	Цена за изграждане:	Поддръжка:
Безбаластов път ERS,NI	1270€/m	100€/год
Безбаластов път ERS,NI, Conventional	860€/m	70€/год
Безбаластов път ERS,INT	910€/m	80€/год
Безбаластов път Rheda	1100€/m	90€/год
Баластов железен път за в.с.	1000€/m	110€/год

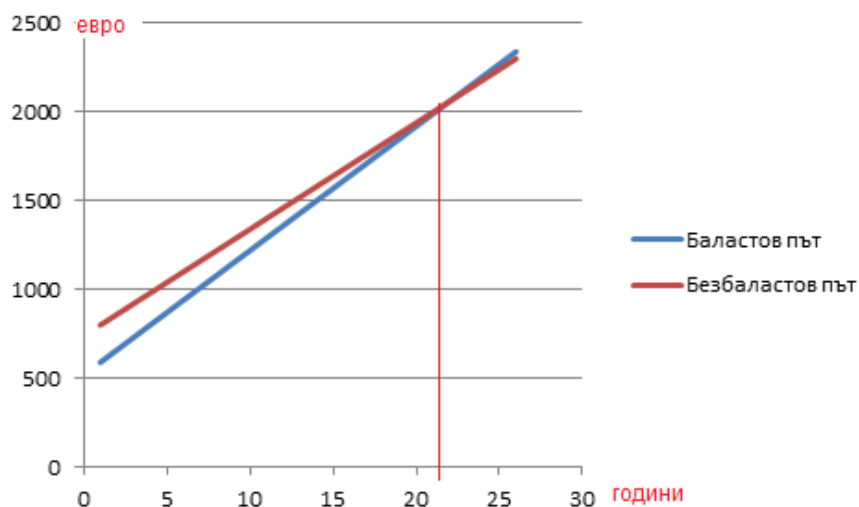


Фигура 4: Сравнение на 5 вида железен път в различни параметри [5]

За конвенционална железопътна конструкция, включваща плоча или траверси, релси и скрепления, средните цени за изпълнение на 1м’ и годишните разходи за поддръжка според Esveld[5] са следните.

- Баластова конструкция – 590 €/м (изпълнение) - 70€/ година (поддръжка),
- Безбаластова с непрекъснато опиране ERS (оптимизирана) - 860€/м (изпълнение) - 60€/ година (поддръжка).

На фиг. 5 е представена диаграмата на жизнения цикъл на конструкцията, без да е отчетена необходимостта от подновяванията и капиталните ремонти на конвенционалния железен път.

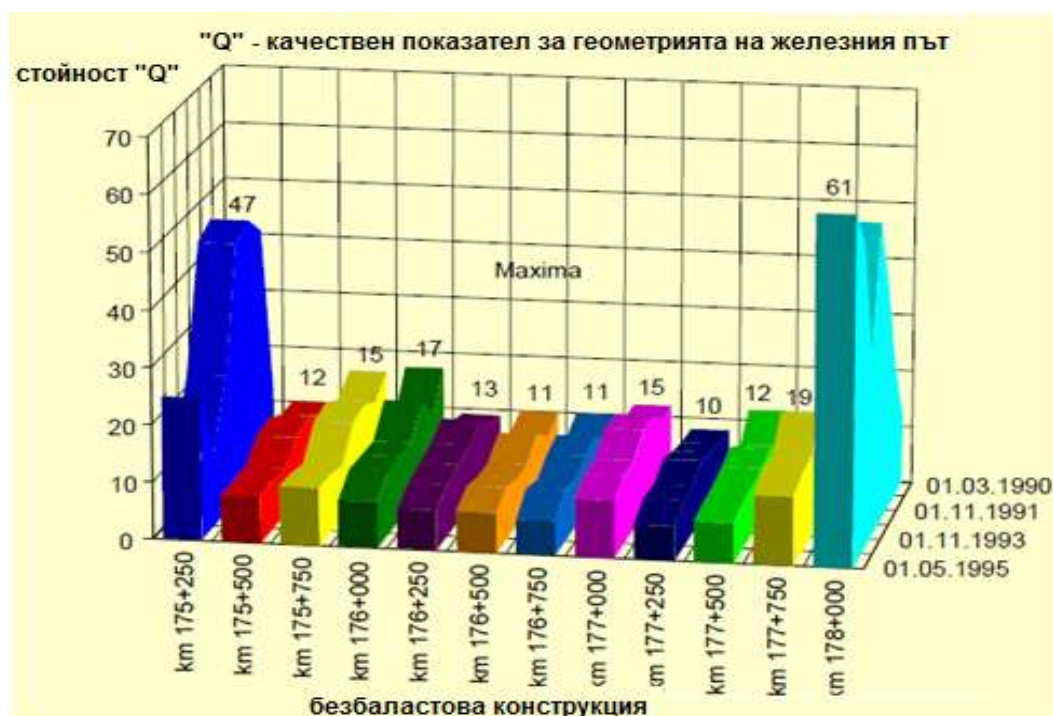


Фигура 5: Графика във времето за разходите за изграждане и поддръжка на баластов и безбаластов железен път с цени дадени в [5]

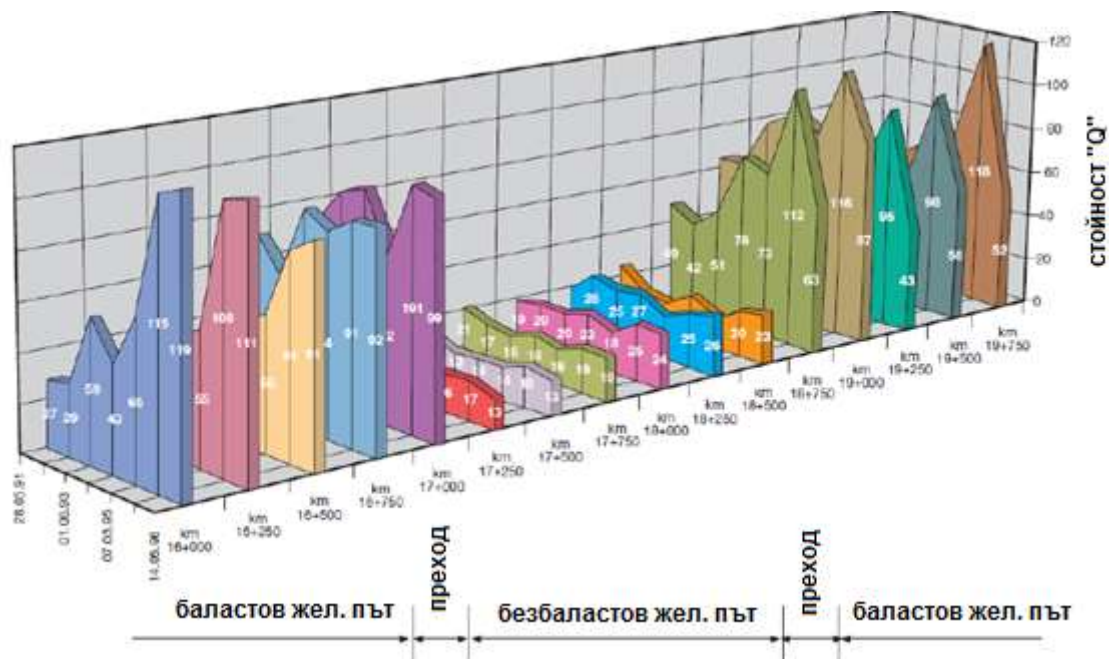
3.2. ПОКАЗАТЕЛИ ЗА КАЧЕСТВОТО НА ГС НА ЖЕЛЕЗНИЯ ПЪТ ПО ВРЕМЕ НА ЕКСПОАТАЦИЯ

Опитът с поддръжката на безбаластови конструкции започва през 1972г., когато се реализира пилотният проект на системата Rheda. Имайки предвид тази система, работите по поддръжката се изразяват в подмяна на синтетичните релсови подложки и превантивното шлайфане на релсовите глави. Шлайфането на главите на релсите е важно условие за гладка повърхност на търкалане и намаляне на шумовото замърсяване. Разходите за поддръжка при гореспоменатата система са приблизително 10% от цената за поддръжка при стандартен баластов коловоз, а за сметка на това геометрията се запазва много по-дълго в добро състояние.[3]

Състоянието на геометрията на железния път се оценява с т.нар. стойност ‘Q’, която се явява качествен коефициент, който се дава от геометричните записи направени с пътеизмерителните дрезини. На фигура 6 и фигура 7 са представени стойностите на показателя ‘Q’ за период от 5 години на участъци с безбаластов железен път в мрежата на Дойче Бан. Тази стойност има отношение в измерването на геометрията в: надлъжен разрез, напречен разрез, направление и устойчивост срещу измятане на коловоза. Колкото по-ниска е стойността ‘Q’, толкова по-добра е геометрията на железния път. Максимално допустимата стойност ‘Q’ е 100, и когато бъде достигната, коловозът следва да бъде приведен отново в проектно положение. Както се вижда на фигурите по-долу безбаластовите конструкции запазват добро качество на положението на коловоза без необходимост от поддръжка. Това показва, че поведението на този тип системи е много по-добро при високоскоростни жп линии. Поради минималната поддръжка и голяма устойчивост на коловоза, те са по-ефективен избор в дългосрочен план.[2],[3]



Фигура 6: Записи на стойността “Q” в мрежата на Дойче Бан [3]



Фигура 7: Записи на стойността “Q” в мрежата на Дойче Бан [2],[4]

4. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Анализът на жизнения цикъл на разгледаните конструкции ясно изтъква предимствата на пътя на монолитна основа. Тук не са отчетени някои положителни ефекти като високото ниво на достъпност и надеждността на железния път, намаленото собствено тегло за мостовете и намалената конструктивна височина на ГС (особено важно при преминаване през тунели).

Също така прилагането на път на монолитна основа позволява там, където има стари стоманени мостове (при рехабилитация на дадена жп отсечка), те да бъдат приведени към съвременните експлоатационни изисквания, посредством изпълнение на стоманобетонна плоча, която да работи като комбинирана стомано-стоманобетонна, обединена за съвместна работа с елементите на мостовото съоръжение. Тази плоча ще служи за основа на ГС на безбаластовия железен път. По този начин се повишава носимоспособността на съоръженията и те стават годни за експлоатация при подновяване на жп линията, изпълнявайки съвременните изисквания за високоскоростни жп линии. Икономическите ползи от тези мероприятия са огромни, поради липсата на необходимост за подмяна на старите стоманени мостове.

Построените участъци с път на монолитна основа в Германия показват, че тези конструкции изискват значително по-ниска степен на поддръжка. Дълготрайното поддържане на доброто качество на геометрията на железния път през изследвания период не само гарантира минимални работи по поддръжката, но и подобрен комфорт на пътуване, както и по-добра достъпност до коловоза.

Следва да се отчете и факта, че след 15-20 години няма да бъдат необходими капитални ремонти, които биха били неизбежни при конвенционалния баластов железен път, което допълнително увеличава ефективността на пътя на монолитна основа.

Важно е да отбележим, обаче, че, за да може тази конструкция (когато е изпълнена върхо земно платно) да изпълнява функциите си адекватно във времето, ЗО трябва да се изследва достатъчно подробно, за да може да бъдат отчетени слабите места по трасето. Чрез мероприятия по заздравяване и/или увеличаване огъвната коравина на стоманобетонна плоча на ГС, следва да се подсигури устойчивостта на геометрията на железния път във времето, като не се допуснат недопустими слягания.

REFERENCES / ИЗПОЛЗВАНИ ИЗТОЧНИЦИ

- [1] Lichtberger B. Track compendium, First edition. Eurail Press. 2005.
- [2] Georgios Michas, Slab Track Systems for High-Speed Railways
- [3] Modern railway track – Coenrad Esveld – Digital edition 2014, version 3.1
- [4] REQUIREMENTS OF TOMORROW'S RAIL TRANSPORT INFRASTRUCTURE, Dr. Kostantinos Giannakos
- [5] SLAB TRACK: A Competitive Solution, Coenraad Esveld
- [6] SLAB TRACK FOR THE NEXT 100 YEARS, David N. Bilow, P.E., S.E. and Gene M. Randich, P.E., Portland Cement Association, Skokie, IL
- [7] Railway Management and Engineering, V.A. PROFILLIDIS,
https://books.google.co.uk/books?id=MumsYYDF2xAC&printsec=frontcover&hl=bg&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [8] Life Cycle Benefit of Concrete Slab Track, Sunil K. Kondapalli & David N. Bilow
- [9] Evaluating Track Structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach, Arjen ZOETEMAN, Coenraad ESVELD, Delft University of Technology