

COMPARATIVE ANALYSIS AND VARIATION OF THE GSI INDEX FROM SITE INVESTIGATION TO CONSTRUCTION: EXPERIENCE FROM THE ZHELEZNITSA TUNNEL

Aleksandar Hristov, Antonio Lakov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: aleksandarigp@gmail.com; tony_lakov@abv.bg

ABSTRACT. The Geological Strength Index (GSI) is a fundamental parameter in modern tunnel geotechnics, serving as a direct link between the visual geological characteristics of a rock mass and its mechanic properties through the Hoek-Brown failure criterion. In engineering practice, however, a major methodological challenge is that during the site investigation phase, the index is evaluated indirectly from one-dimensional borehole cores and from surface geological mapping, whereas during construction, it is determined from actual mapping of the tunnel face surface.

This paper analyses the variation of the GSI parameter during the construction of the Zheleznița Tunnel – the longest road tunnel in Bulgaria. Based on data processed during construction works in both the Left and Right tunnel tubes, the actual face-mapped GSI was compared with the values obtained during the geological investigation. A detailed analysis of the percentage distribution of rock mass types was conducted, based on factual data regarding the lengths of individual geotechnical blocks. Geometric, physical, and technological factors contributing to the observed discrepancies are discussed, highlighting the crucial importance of the amount of exploratory drilling for the reliable prediction of rock mass behaviour.

Key words: Zheleznița Tunnel, Geological Strength Index (GSI), determination of design parameters, comparison with face-mapped values.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ И ИЗМЕНЕНИЕ НА ИНДЕКСА GSI ОТ ЕТАПА НА ПРОУЧВАНЕТО ДО СТРОИТЕЛСТВОТО: ОПИТЪТ ОТ ТУНЕЛ „ЖЕЛЕЗНИЦА“

Александър Христов, Антонио Лаков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Геоложият индекс на якост (GSI) е фундаментален параметър в съвременната тунелна геотехника, служещ като директна връзка между визуалните геоложки характеристики на масива и неговите числени якостно-деформационни свойства по критерия на Хоук-Браун. В инженерната практика обаче съществува сериозен методологически проблем: по време на проучването индексът се оценява индиректно по едноизмерна сондажна ядка и от геоложка картировка на повърхността, докато по време на строителството той се определя чрез реално площно картиране на стената на забоя.

Настоящата статия анализира изменението на показателя GSI при изграждането на тунел „Железница“ – най-дългия пътен тунел в България. Въз основа на обработката на данните по време на СМР в Лявата и Дясната тунелни тръби е извършено сравнение за разпределението на реалния GSI сравнен с този от геоложкото проучване. Направен е детайлен анализ на процентното съотношение на типовете скален масив, базиран на фактическите данни за дължините на отделните геотехнически блокове. Разгледани са геометричните, физическите и технологичните причини за установените несъответствия, като се отчита на решаващото значение на количеството проучвателни сондажи за достоверното прогнозиране на поведението на масива.

Ключови думи: тунел. „Железница“, показател GSI, определяне на проектни стойности, сравнение с картирани стойности.

Въведение

Въведеният от Е. Хоук през 1994 г. Geological Strength Index (GSI) е основен метод оценка на структурната нарушеност на масив, основаващ се на визуална оценка на степента на напуканост и състоянието на пукнатините. Той е основен показател в якостния критерий на Хук-Браун (Хоук, 1994) за определяне на якостно-деформационните свойства на скалния масив, разглеждан като „квазиеднородна“ среда при геотехническото проектиране на крепежните тунелни конструкции. Като такъв, той се явява и основен показател по време на строителството за непрекъснато количествено класифициране на скалния масив с цел оценка на съответствието между проектните параметри за поведението на масива и на крепежите, както и адаптивно управление на геотехническия риск.

Основният методологически дефицит при прилагането на GSI се състои в подходите и възможностите за неговото определяне в отделните етапи на проучване и строителство:

- във фазата на предварителните и детайлните проучвания геологът е принуден да оценява индекса **индиректно**, интерпретирайки резултатите от полевите сондажни работи и структурно-геоложка картировка;

- във фазата на строителството оценката се извършва **директно** in-situ върху разкритата стена на забоя на тунелната изработка.

Често пъти при наличие на сложни и променливи геоложки условия, както и при недостатъчни по съдържание и обем инженерногеоложки проучвания проектните оценки се различават съществено и най-често в неблагоприятна посока от реалните условия в масива и водят до мащабни т.н. „геоложки изненади“, свързани с необходимостта от оперативно препроектиране на крепежите по време на строителството и общо оскъпяване на проекта.

Методология за оценка на показателя GSI при етапа на проучване на тунел „Железница“

Тунел „Железница“ е с дължина 2 280 км, включващи тунел с две тръби с дължина 2 км. Инженерногеоложките условия на скалния масив, установени при проучването (Лаков и Стойнев, 2016) се характеризират с преобладаващо средноздрава до здрава скала от гнайси и амфиболити, преобладаващо умерена тектонска нарушеност с редуване на катаклазни и тектонизирани зони. В етапа на проучване оценката на показателя GSI е извършена чрез интерпретация на данните от сондажната ядка и от сеизмичния каротаж в сондажите.

По време на двете проучвателни кампании (2014 – 2015 г. и 2018 – 2019 г.) са прокарани общо 16 сондажа с общ метраж 949 л. м.

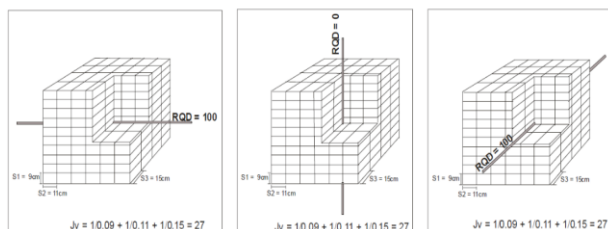
Показателят GSI е определян по модифицирана скала за GSI (Sönmez и Ulusay, 2002), където визуалното и експертно определяне на степента на блоковост на масива се определя чрез показателя SR (Structural Rating):

$$SR = -17,5 \ln(J_v) + 79,8$$

Определянето на показателя J_v (брой пукнатини в 1 m^3 от скалния масив) изисква познаване на системите пукнатини в масива и тяхната средна гъстота. Тъй като диференцирането на групите пукнатини по извадената ядка не е възможно, е използвана следната формула за връзка с показателя RQD (Palmstrom, 2009):

$$RQD = 110 - 2,5 J_v$$

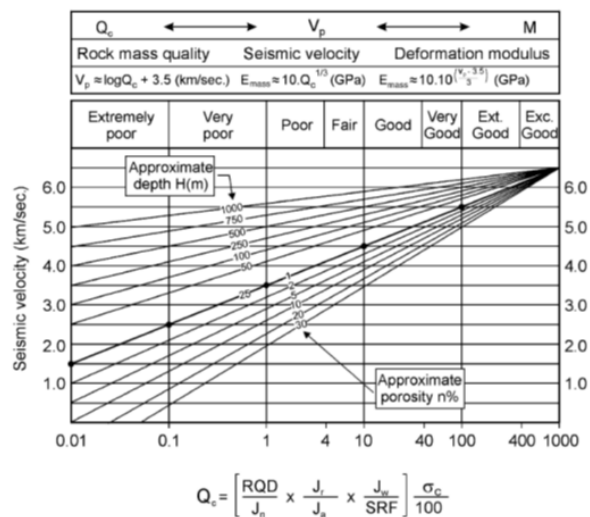
Тук основен проблем е представителността на показателя RQD за пространствената напуканост на масива, като при една и съща структурна нарушеност в зависимост от ориентацията на оста на сондажа спрямо пукнатинните групи в масива (фиг.1) могат да се получат значителни разлики в неговата стойност. Очевидно, ако сондажът е с направление, близко до наклона на затьване на пукнатинната група или тектонска зона, това може да „маскира“ структурната нарушеност и стойността на показателя RQD да нарастне до недоуверно високи стойности.



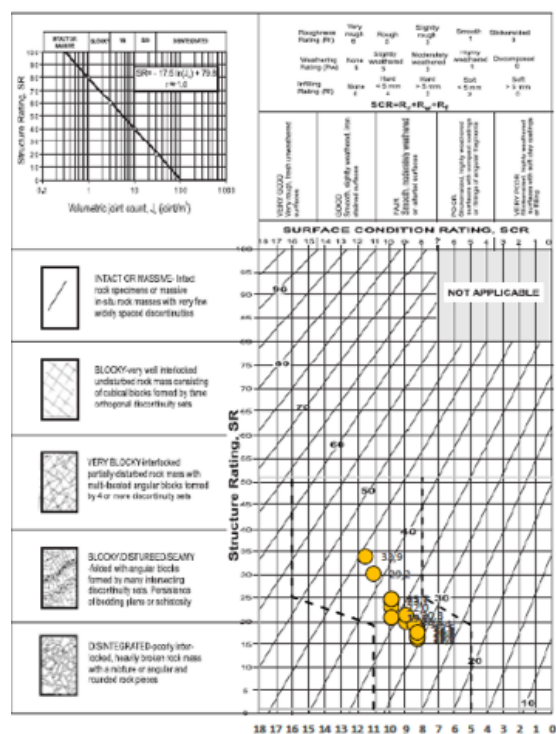
Фиг.1. Влияние на посоката на сондиране при определяне на показателя RQD в условията на идентична напуканост (Palmstrom, 2005)

На базата на данните от сеизмичния картаж в сондажите се определя зависимостта между показателя Q и скоростта на надлъжните сеизмични вълни Barton (2002), и отчитаща порестостта на скалата (n) и едноосовата якост на натиск на скалната матрица (σ_c) (фиг. 2). За определяне на показателя GSI са използвани основната корелационна зависимост между показателите Q и RMR_{89} (Bieniawski, 1976) $RMR = 9 \ln Q + 44$ и горната формула $GSI = RMR - 5$.

Този подход има предимството, че обхваща по-голям обем от масива около сондажа. Макар че получената по този метод средна стойност за масива за зоната на тунела е близка до определената по Sönmez и Ulusay (2002), диапазонът на изменение стойностите на показателя GSI е в обхвата от 12 до 64, чиито граници са значително по-широки от установените (от 25,6 до 44,6) и показват значително по-голямо разнообразие в структурната нарушеност на масива, т.е. практически е еднаква с определената в Идеиния проект средна стойност 37,8. Вариациите са значителни и неравномерно разпределени, както по оста на тунела, така и в дълбочина по отделните сондажи.



Фиг. 2. Зависимост между показателя Q и скоростта на надлъжните сеизмични вълни по Barton (2002)



Фиг. 3. Модифицирана скала по Sonmez и Ulusay (2002) с определени стойности на GSI по сондажи

Типове скален масив

На базата на установените стойности на показателите на скалата и структурната нарушеност на масива, за условията на тунела са приети следните 4 типа скален масив:

Тип А. Скален масив с ниска якост и висока степен на структурна нарушеност. Този тип се приема, че характеризира слабите и силно напукани тектонизирани зони при покритие до 50 м, както и участъци от тунела попадащи на малки дълбочини до 20-30 м от терена.

Тип В. Средно здрав и средно структурно нарушен скален масив. Този тип се приема, че характеризира преобладаващо средно здравите и умерено напукани

катаклизми зони в масива при покритие до 85 м, както и участъци от тунела попадащи на дълбочини около 40-60 м от терена, попадащи извън тектонските и катаклизми зони.

Тип С. Относително здрав и по-слабо структурно нарушен скален масив. Той характеризира частите от масива с относително по-висока якост и по-слаба степен на напуканост, които не са съществено засегнати от тектонски процеси, както и участъците от тунела попадащи на значителни дълбочини (над 80-100 м) от терена.

Тип А (t). Материали от тектонските зони, изградени от милонитизирани до практически глинизирани скали при покритие до 50 м. При покритие над 50 м отчитането на конкретните геотехнически показатели и определянето на вида на крепежната конструкция да се изпълнява по време на строителството от авторския надзор съвместно от геолог и проектант.

Диференциацията е извършена основно на базата на изменението на якостта на натиск σ_c и показателите GSI и

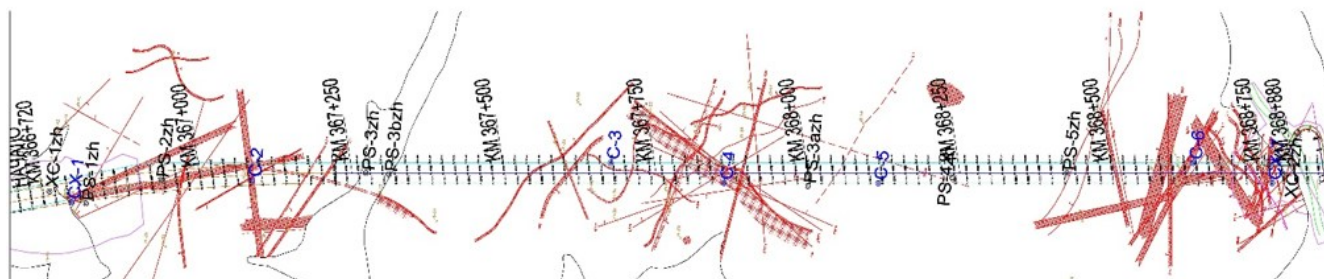
RQD като останалите са преизчислени по установените по-горе зависимости или корелирани в съответствие с общите закономерности на изменението им в масива. Техните основни геотехнически показатели са представени в следващата Таблица 1.

Анализ на разпределението на GSI с типовете скален масив по време на проучването и строителството

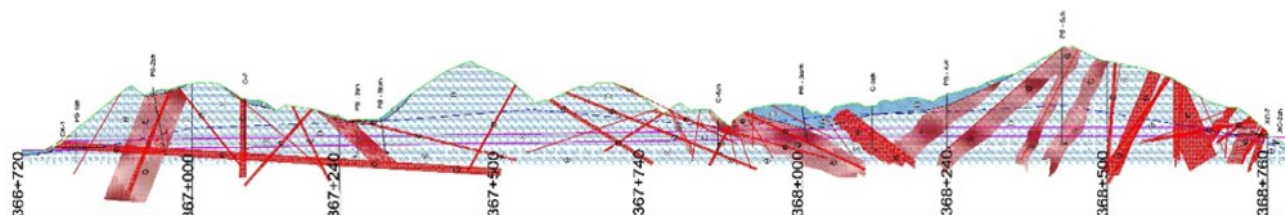
На базата на събраните данни от ексекутивното документиране на забоите от двете тунелни тръби са съставени разпределения за реално проявения индекс GSI по време на строителството, съвместно с данните от геоложките проучвания, както и разпределението на типовете скален масив по осите на двете тунелни тръби, представени на фигурите 6 и 7.

Таблица 1. Основни геотехнически показатели на типовете скален масив

Свойства на масива	Тип А	Тип В	Тип С	Тип А (t)
σ_c , МПа (обхват)	1,0-5,0	5,0-25,0	25,0-50,0	<1,0
GSI (обхват)	10-30	30-45	45-60	10-20
GSI (средна стойност)	25	37	55	15
RQD (средна стойност), %	10	25	35	0



Фиг. 4. Ситуация на тунел „Железница“



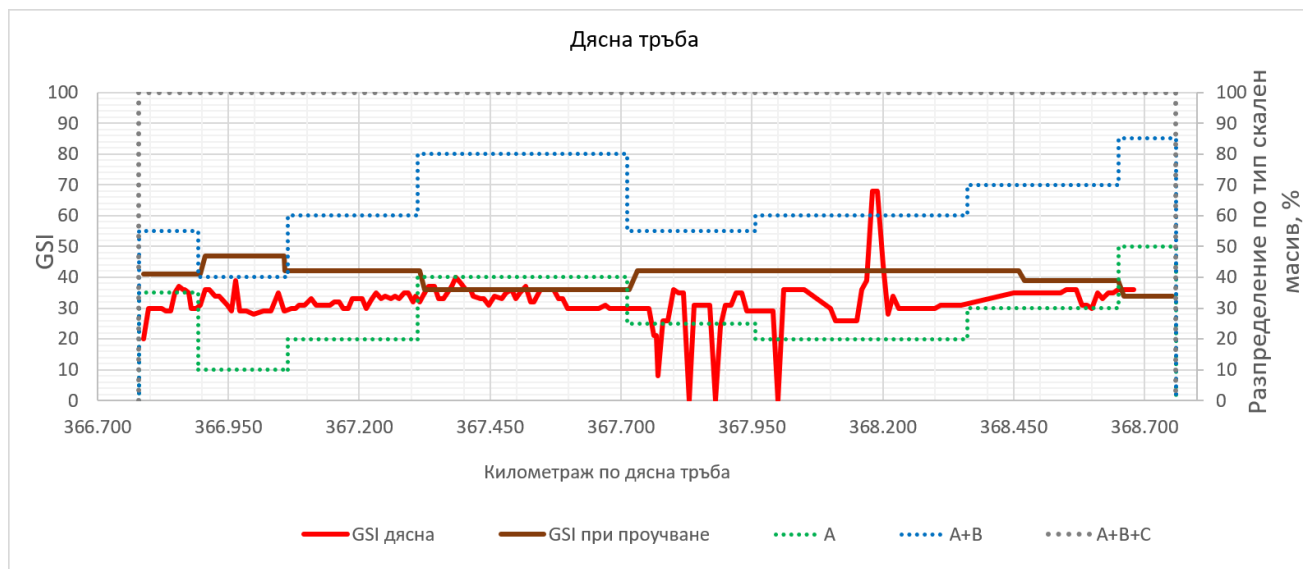
Фиг. 5. Надлъжен инженерногеоложки разрез по оста на тунел „Железница“

Анализът на данните по **дясна тунелна тръба** (фиг.6), която демонстрира изразена динамика с екстремни отклонения в централната част на тунела, показва:

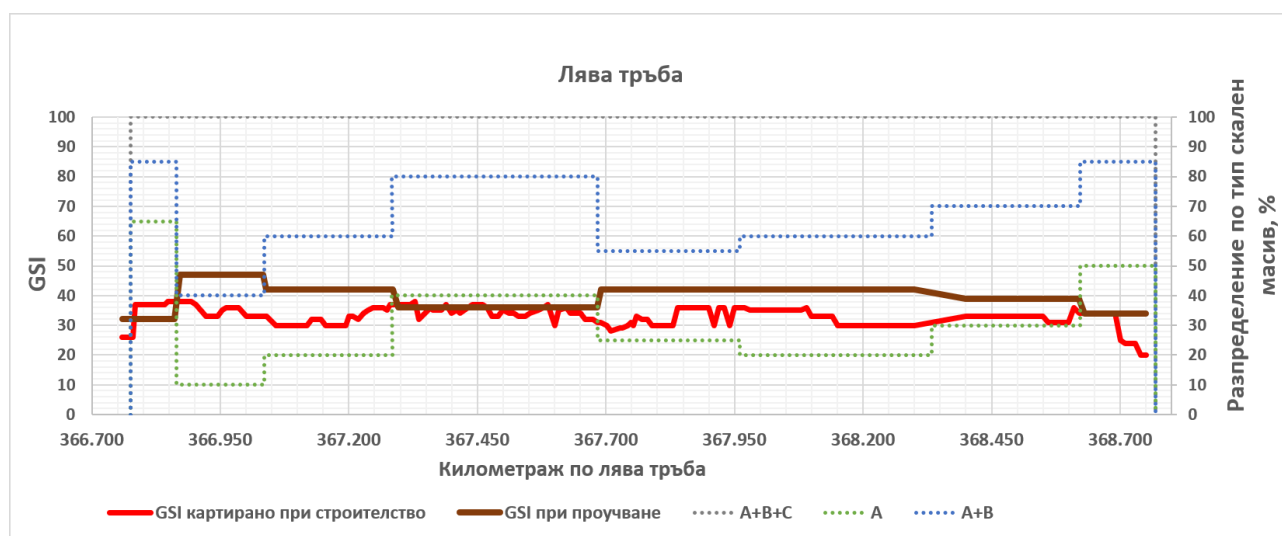
Участък от км 366+759 до км 366+950. Участъкът е проучен с два сондажа на км 366+810 км 366+930. Проектът предвижда високо равномерно наличие на масиви Тип А (50%) и Тип С (45%), поради което интегралната стойност на GSI е сравнително висока стойност (GSI = 41). Непосредствено след порталния участък документираните при строителството стойности (червената линия) регистрират значителен спад като варират в ниския

диапазон от 28–37, показвайки, че масивът е далеч по-напукан и по-слаб от предвиденото.

Участък км 366+950 до км 367+050. В участъка няма прокарани сондажи като разпределението на типовете скален масив е извършено на база данните то картировката. Проектният модел предполага рязко подобрение на свойствата, като участието на слабия Тип А пада до 10% и 60% наличие на масив Тип С, а интегралната стойност нараства до GSI = 47. Установените на забоя стойности, обаче, устойчиво се редуцират под границата на средно здравия масив и се задържат около GSI = 28-30.



Фиг. 6. Разпределение за картираните стойности на показателя GSI по време на строителството съвместно с проектното разпределение на типовете скален масив в % по дясна тръба.



Фиг. 7. Разпределение за картираните стойности на показателя GSI по време на строителството съвместно с проектното разпределение на типовете скален масив в % по лява тръба

Участък от км 367+300 до км 367+600. В този централен участък има два проучвателни сондажа. Проектът предвижда наличие на масиви Тип А и Тип В от 40% всеки, при интегрална стойност на $GSI = 36$. Документираните стойности при строителството следват устойчиво този тренд, варирайки в тесния обхват на $GSI = 34-37$. Тук имаме почти пълно припокриване на прогнозния модел с установеното при строителството.

Участък от км 367+700 до км 368+000. В този участък има два проучвателни сондажа, но това е геотехнически най-проблемният участък от дясната тръба. Докато проектът предвижда стабилна среда с преобладаващо участие на Тип В (35%) и С (45%) с проектна стойност на $GSI = 42$, в три от зоните отчетените при строителството стойности на GSI падат рязко до критичните стойности между 0 и 10. Те съответстват на пресичането на издържани тектонски зони, представени от тектонска глина и милонити (Тип А(t)), които не са „уцелени“ със сондажните изработки и са останали напълно „невидими“ при проучването. Трябва

да се отбележи, че по данни от картировката на терена, такава зона е установена за съседния участък след км 386+000, но в дълбочина тя е с изместена ориентация и/или интензивност.

Около км 368+180 се регистрира единствената по рода си „позитивна“ геоложка изненада по цялото трасе. В зона, където проектът предвижда средни свойства с $GSI = 42$, в забоя се разкрива изключително масивен, слабо напукан гнайсов блок, при който стойността на показателя GSI достига абсолютен максимум от 68 (масив Тип С). Тази аномалия обаче е локална и бързо затихва.

Участък от км 368+450 до км 368+880. В този участък има направени четири проучвателни сондажа. Проектът предвижда нарастване наличието на масив Тип А до 50% и спад на интегралната стойност на GSI до 34. Установените при строителството стойности се движат близо до тази прогноза - $GSI = 30 - 36$, но показват повишена напуканост при южния портален участък.

При лявата тунелна тръба (с обхват от км 366+759 до км 368+720.0) разпределението показва сходен геометричен характер (фиг. 7). Регистрираните при строителството стойности на GSI се групират устойчиво в обхвата $GSI = 30 - 35$, което в участъка от км 367+220 до км 367+700 практически съвпада с проектите прогнози. В останалите участъци те показват системно изместване надолу, спрямо проектните стойности, съответстващи общо долната граница на масив Тип В.

Анализ на причините за изменението на показателя GSI

Разминаването и изменението на GSI не е събитие от случаен характер, а се дължи на три, като цяло обективни фактора:

- косвено определяне на показателя GSI посредством поредица от емпирични корелационни зависимости, при които може да се получи едностранно натрупване на неопределености;
- структурно разуплътняване на масива в зоната на забоя, изразяващо се в отваряне затворените и формиране на нови пукнатини вследствие на разтоварването на естествените геостатични и тектонски напрежения в масива, както и вследствие на взривните изкопни работи, водещи до неговото отслабване;
- силно усложнени условия на планинския терен, изразяващи се в труднодостъпни залесени участъци с липса на разкрития за повърхностна картировка на тектонски зони и затруднен достъп за сондиране.

Основен подход за преодоляване на неблагоприятния ефект върху представителността и достоверността на инженерногеоложките проучвания е извършване на достатъчни по вид и обем проучвателни работи. В световната практика е възприето, че при отношение на дължините на сондажите спрямо дължината на тунела до 15, рискът от преразход над 10% спрямо проектната/строителната стойност на строителството е неприемливо висок. За условията на Тунел „Железница“ това отношение е 0,42 като съгласно обобщаващия доклад на Асоциация „Прозрачност без граници“ (2024), договорната стойност за строителството на тунелната част е надвишена с 15,7%.

Заклучение и препоръки

1. Тунел „Железница“ се характеризира със сложна и неравномерно развита структурна нарушеност на масива, която наред с методологичните недостатъци на приложимите методи на проучване и трудните условия за достъп са основни причини за установените различия между проектните стойности на показателя GSI и определените при картиране на забоя по време на строителството. Като цяло, в преобладаващата част на тунела проектните стойности са по-високи от картираните. Това е довело до необходимостта от модифициране на проектните крепежни конструкции по време на строителството, което е довело и до надвишаване на неговата стойност.

2. Спазването на утвърдения международен подход за минимални видове и обеми проучвателни работи ще

доведе до съществено подобряване качеството на проектите и икономическата ефективност на изпълнението им.

3. При ограничени договорни, финансови и организационни възможности за извършване на такива проучвания е препоръчително оценките за показателите на масива да бъдат занижени до приемливи консервативни стойности.

Установеният при настоящия анализ обхват на изменение на стойностите на показателя $GSI = 30 \div 35$ е подходящ да се използва като референтна база при проектиране на подземни съоръжения в сходни структурно нарушени масиви и разломни зони.

Литература

- Асоциация „Прозрачност без граници“. (2024). Мониторингов доклад за изпълнението на обект: Автомагистрала „Струма“ - Лот 3.1.2, Тунел „Железница“. София.
- Лаков, А., Стойнев, С. (2016). Геотехнически условия на тунел „Железница“ от АМ „Струма“. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, 59(1), 209–214.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2), 4–16.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 185–216.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering. In Z. T. Bieniawski (Ed.), *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering Vol. 1*, pp. 97–106. A. A. Balkema.
- Carter, T. G. (2014). GSI – Geotechnical baseline reports and risk allocation for underground works. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(3), 921–945.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2), 4–16.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2000). GSI: A story of an evolving rock mass classification from 1994 to 2000. *Tunnels and Tunneling International*, 32(7), 41–45.
- Marinos, P., & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(2), 85–92.
- Morelli, G. L. (2015). Determination of the Geological Strength Index (GSI) from drill core logs. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(1), 110–116.
- Palmström, A. (2005). Measurements of fracturing. Part 2: The volumetric joint count (Jv). *Tunnels and Underground Space Technology*, 20(4), 320–330.
- Palmström, A. (2009). Combining the RQD and the Jv indices to obtain more reliable measurements of rock mass fracturing. *Tunnels and Underground Space Technology*, 24(4), 497–501.
- Sönmez, H., & Ulusay, R. (1999). Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(6), 743–760.
- Sönmez, H., & Ulusay, R. (2002). A discussion on the Geological Strength Index (GSI) and a new quantitative attempt for the estimate of rock mass properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(5), 493–503.