

dr hab. inż. Adrian Róžański^{1*)}
 ORCID: 0000-0003-3150-6429
 mgr inż. Bartłomiej Bodak¹⁾
 ORCID: 0009-0003-0162-9492
 mgr inż. Mikołaj Masłowski¹⁾
 ORCID: 0009-0006-2656-7058
 mgr inż. Michał Pachnicz¹⁾
 ORCID: 0000-0002-7274-0580
 mgr inż. Grzegorz Lewandowski²⁾

Assessment of the local variability of mechanical parameters of rock material based on the construction of a road tunnel drilled in the Carpathian flysch

Ocena lokalnej zmienności parametrów mechanicznych materiału skalnego na przykładzie budowy tunelu drogowego drążonego we fliszu karpackim

DOI: 10.15199/33.2025.09.18

Abstract. The aim of the study was to analyze the local variability of the Carpathian flysch using computer microtomography and nanoindentation. Significant differences in the mechanical and physical properties of the material were demonstrated, confirming the need to assess the microstructure of the rock material for accurate estimation of the prevailing geological conditions. The presented approach to research ultimately improves the safety and efficiency of tunneling work.

Keywords: microtomography; nanoindentation; microstructure; Carpathian flysch.

Streszczenie. Celem badania była analiza lokalnej zmienności fliszu karpackiego za pomocą mikrotomografii komputerowej i nanoindentacji. Wykazano duże różnice we właściwościach mechanicznych i fizycznych badanego materiału, co potwierdza potrzebę oceny mikrostruktury materiału skalnego do prawidłowego oszacowania panujących warunków geologicznych. Przedstawione podejście do badań umożliwia poprawę bezpieczeństwa i efektywności prowadzenia prac podczas drążenia tunelu.

Słowa kluczowe: mikrotomografia; nanoindentacja; mikrostruktura; flisz karpacki.

In underground construction, accurate identification of ground conditions has a significant impact on structural safety and the optimization of excavation technologies, as it determines the appropriate tunnelling methods and minimizes the risk of failure. The accuracy of geological survey is particularly important when tunnelling through complex rock formations such as the Carpathian flysch. This type of rock mass, occurring in Poland in parts of the Carpathian Mountains, is characterized by high heterogeneity of geotechnical conditions [1]. The formation, composed of alternating layers of sedimentary rocks, has been strongly folded as a result of orogenic processes. The layered structure makes this rock mass highly heterogeneous, i.e., subject to significant variability of parameters. There are **different levels of heterogeneity** (observation scales) within a rock mass: (i) **the global scale**, where heterogeneity is determined by “features” whose characteristic dimensions are comparable to or larger than the characteristic dimension of the excavation (e.g., tunnel width); (ii) **the local scale**, where heterogeneity results from geological variability occurring over distances significantly smaller than the characteristic dimension of the

W budownictwie podziemnym bardzo duży wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji oraz optymalizację technologii drążenia ma dokładne rozpoznanie warunków podłoża, ponieważ od tego zależy dobór odpowiednich metod tunelowania i minimalizacja ryzyka awarii. Dokładność rozpoznania geologicznego jest szczególnie istotna w przypadku tunelowania w złożonych formacjach skalnych, takich jak flisz karpacki. Ten rodzaj masywu skalnego, występujący na terenie Polski w części łańcucha Karpat, charakteryzuje się dużą niejednorodnością warunków geotechnicznych [1]. Składająca się z ułożonych kolejno warstw skał osadowych formacja została także silnie sfałdowana w procesach górotwórczych. Układ warstwowy sprawia więc, że jest to górotwór bardzo niejednorodny, tj. o dużej zmienności parametrów. Istnieją **różne poziomy niejednorodności** (skale obserwacji) **masywu skalnego**: (i) **globalny**, gdzie o niejednorodności ośrodka decydują „objekty”, których charakterystyczny wymiar będzie porównywalny lub większy od charakterystycznego wymiaru (np. szerokości) wyrobiska; (ii) **lokalny**, gdzie niejednorodność górotworu determinowana jest zmiennością warunków geologicznych na odległościach wyraźnie mniejszych niż charakterystyczny wymiar drążonego wyrobiska. Innymi słowy, globalną niejednorodność należy utożsamiać ze zmiennością warunków geologicznych wynikającą np. z układu uskoków tektonicznych, obecności spękań w relatywnie dużym rozstawie, wyróżnienia w górotworze „rodzin” nieciąg-

¹⁾ Politechnika Wrocławska Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ Mirbud S.A.

^{*)} Correspondence address: adrian.rozanski@pwr.edu.pl



tunnel cross-section. In other words, global heterogeneity is associated with variability in geological conditions due to the presence of tectonic faults, widely spaced fractures, distinct sets of discontinuities, or changes in rock material properties over large distances. Local heterogeneity, on the other hand, results from variations in the properties of the rock material in close proximity – such as within a single rock block separated by discontinuities – where physical or mechanical properties may differ significantly. In the case of the Carpathian flysch under investigation, local variability may also be associated with bedding, where distinct material transitions occur over short distances. Both levels of heterogeneity affect the quality of tunnel excavation and the safety of construction works; however, incorrect identification of local variability can lead to erroneous design assumptions and, consequently, to unforeseen complications during tunnel advancement [2].

In tunnel construction projects, investigations are typically conducted to assess variability at the global scale. However, traditional methods based on boreholes and large-scale laboratory testing may prove insufficient when dealing with highly heterogeneous rock masses – such as the Carpathian flysch – both due to limited spatial resolution and restricted ability to obtain representative, unfractured samples.

This article focuses on the assessment of local variability using microstructural testing methods, namely X-ray micro-computed tomography and nanoindentation. A key advantage of these techniques is the ability to perform measurements even on small fragments of material, such as heavily fractured core samples or small pieces collected directly from the excavated rock mass. These methods enable the determination of geometric characteristics of the microstructure (e.g., density variability, expressed by the reconstructed attenuation coefficient γ_{rec}), as well as its mechanical parameters (i.e., indentation modulus E_{IT} and hardness H_{IT}), revealing the scale of heterogeneity that cannot be captured by conventional laboratory testing.

The aim of this paper is to highlight the potential of microstructural techniques as a complement to standard geotechnical site investigations, especially in the context of tunnel projects carried out in geologically complex and heterogeneous rock masses. There is no doubt that the method presented here is not yet widely used and may be considered an innovative approach. The analyses presented are based on actual test results obtained from rock samples collected during the construction of a road tunnel in Carpathian flysch formations in the Silesian Beskids.

Methodology

The material for analysis was collected in the form of core samples obtained from boreholes drilled during the construction of two tunnel tubes (TD2 2.1 and TD2 2.2), located along the S-1 expressway section between the towns of Przybędza and Milówka. Sampling locations were selected to enable comparison of rock material parameters in two configurations: (i) on opposite sides of the same selected

głości, zmienności parametrów materiału skalnego w relatywnie dużych odległościach itd. O lokalnej zmienności decyduje natomiast niejednorodność i zmienność właściwości w bliskiej lokalizacji, a więc należy ją utożsamiać ze zmiennością materiału skalnego, np. w obrębie bloku skalnego, wydobywanego nieciągłościami, którego właściwości fizyczne lub mechaniczne mogą się istotnie różnić. W przypadku analizowanego fliszu karpackiego lokalna zmienność może być także utożsamiana z uławiczeniem warstw, które charakteryzowane jest niewielkimi odległościami pomiędzy wyraźnie zaznaczonymi granicami odrębnych rodzajów materiału skalnego. O jakości drążenia wyrobiska i bezpieczeństwie prowadzenia prac podczas wykonywania tunelu decydują oba poziomy niejednorodności, przy czym niepoprawne zidentyfikowanie lokalnej zmienności może doprowadzić do błędnych założeń projektowych, a co za tym idzie nieprzewidywalnych komplikacji podczas drążenia tunelu [2].

W przypadku inwestycji tunelowych prowadzi się badania zmienności w skali globalnej. Tradycyjne metody bazujące na odwiertach i badaniach w skali makro bywają jednak niewystarczające w przypadku silnie niejednorodnego górotworu (jak flisz karpacki), zarówno ze względu na zbyt małą rozdzielczość przestrzenną, jak i ograniczoną możliwość pobrania reprezentatywnych, niespękanych próbek.

W artykule skupiono się na ocenie lokalnej zmienności, wykorzystując metody badań mikrostrukturalnych, tj. mikrotomografię komputerową oraz nanoindentację. Kluczową zaletą tych badań jest możliwość ich przeprowadzenia nawet w przypadku niewielkich fragmentów materiału, np. silnie spękanych rdzeni lub niewielkich fragmentów próbek pozyskanych z drążonego górotworu. Metody te pozwalają na określenie charakterystyki geometrycznej mikrostruktury (zróżnicowanie gęstości (γ_{rec}), a także jej parametrów mechanicznych (modułu sprężystości E_{IT} i twardości H_{IT}), ujawniając skalę heterogeniczności niemożliwą do uchwycenia przy użyciu klasycznych testów laboratoryjnych.

Celem artykułu jest wskazanie potencjału technik mikrostrukturalnych jako uzupełnienia standardowego rozpoznania geotechnicznego, szczególnie w kontekście inwestycji tunelowych realizowanych w niejednorodnych ośrodkach skalnych. Nie ulega wątpliwości, że prezentowana metoda nie jest dotychczas powszechnie stosowana i można ją traktować jako podejście nowatorskie. Przedstawione analizy bazują na rzeczywistych badaniach próbek pobranych z rejonu budowy tunelu drogowego w warunkach fliszu karpackiego w Beskidzie Śląskim.

Metoda badań

Materiał do analiz pozyskano w formie rdzeni z odwiertów wykonanych podczas budowy dwóch ciągów tunelu (TD2 2.1 i TD2 2.2), zlokalizowanych na odcinku drogi ekspresowej S-1 pomiędzy miejscowościami Przybędza i Milówka. Miejsca poboru próbek zostały dobrane tak, aby umożliwić porównanie parametrów materiału skalnego w dwóch wariantach: po przeciwnych stronach tego samego, wybranego przekroju tunelu lub wzdłuż osi tunelu na odległości krótszej niż ty-



tunnel cross-section, or (ii) along the tunnel axis at a distance shorter than a typical excavation cycle (Figure 1). The collected rock material was classified and grouped into 8 sample pairs (Table 1).

Sample preparation. Due to the high brittleness and susceptibility of the material to damage, all samples were prepared using procedures that minimized exposure to water. Samples intended for micro-computed tomography were cut into cuboids of approximately $3 \times 3 \times 15$ mm using a precision table saw, and then cleaned in an ultrasonic bath (Figure 2a). For nanoindentation testing, selected fragments of the rock material were embedded in acrylic/phenyl resin and subjected to a process of fine grinding and polishing until a flat, uniform test surface was obtained (Figure 2c).

Micro-computed tomography (micro-CT) is a non-destructive 3D imaging technique that enables reconstruction of the material's internal microstructure based on the attenuation of X-ray radiation within the scanned object. The principle of micro-CT operation is illustrated in Figure 2b. In the case of heterogeneous materials, X-ray attenuation is described by the extended form of Lambert–Beer's law [3]:

$$I = I_0 \exp(\sum_i -\mu_i x_i) \quad (1)$$

where: I_0 – initial intensity of the monochromatic X-ray beam; I – intensity after passing through the material; μ_i – linear attenuation coefficient of the i -th material component [1/m]; x_i – thickness of the i -th component layer [m].

This law accounts for the fact that the X-ray beam passes through multiple material phases (minerals, pore space, binder), each attenuating the radiation to a different extent. Since the value of μ_i depends primarily

on the cycle of drilling (Figure 1). The obtained rock material was classified and grouped into 8 sample pairs (Table 1).

Przygotowanie próbek. Ze względu na dużą kruchość i podatność materiału na uszkodzenia, próbki były przygotowywane z użyciem procedur ograniczających ich kontakt z wodą. Próbkę do mikrotomografii przycięto wstępnie do kształtu prostopadłościanów o wymiarach ok. $3 \times 3 \times 15$ mm z wykorzystaniem precyzyjnej piły stolikowej, a następnie oczyszczono w myjce ultradźwiękowej (rysunek 2a). Na potrzeby przeprowadzenia testów nanoindentacji fragmenty materiału skalnego zaimpregnowano żywicą akrylową/fenylową, a następnie poddano procesowi precyzyjnego szlifowania oraz polerowania, do momentu uzyskania płaskiej, jednorodnej powierzchni badania (rysunek 2c).

Mikrotomografia komputerowa (micro-CT) to nieniszcząca technika obrazowania 3D, umożliwiająca odtworzenie mikrostruktury materiału na podstawie analizy pochłaniania promieniowania rentgenowskiego przez badany materiał. Schemat działania techniki mikrotomografii przedstawiono na rysunku 2b. W przypadku ośrodków niejednorodnych osłabienie promieniowania X opisuje się rozszerzoną postacią prawa Lamberta-Beera [3]:

$$I = I_0 \exp(\sum_i -\mu_i x_i) \quad (1)$$

gdzie: I_0 – początkowa intensywność monochromatycznej wiązki promieniowania; I – intensywność po przejściu przez materiał; μ_i – liniowy współczynnik pochłaniania i -tego składnika materiału [1/m]; x_i – grubość warstwy i -tego składnika [m].

Prawo to uwzględnia fakt, że wiązka przechodzi przez wiele faz materiałowych (minerały, przestrzeń porowa, spoiwo), z których każda tłumí promieniowanie w różnym stopniu. W związku z tym, że μ_i jest zależ-



Fig. 1. Representation of sampling sites for microstructural testing

Rys. 1. Oznaczenie miejsc poboru próbek do badań mikrostrukturalnych

Table 1. Summary of sample pairs selected for comparative analysis
Tabela 1. Zestawienie par prób wybranych do analizy porównawczej

Pair / Para	Sample #1 / Próbką #1	Sample #2 / Próbką #2	Legend / Legenda
1	90L	90P	clayey-marly shale / łupek ilasto-marglisty
2	122L	122P	silty-clayey shale / łupek mułowcowo-ilasty
3	369P	370L	clayey marl / margiel ilasty
4	370L	370P	clayey marl / margiel ilasty
5	370P	371L	fine-grained sandstone / piaskowiec drobnoziarnisty
6	389P	390P	fine-grained sandstone transitioning to siltstone / piaskowiec drobnoziarnisty przechodzący w mułowiec
7	466_1	466_2	fine-grained sandstone transitioning to siltstone / piaskowiec drobnoziarnisty przechodzący w mułowiec
8	466_1A	466_2A	fine-grained sandstone transitioning to siltstone / piaskowiec drobnoziarnisty przechodzący w mułowiec

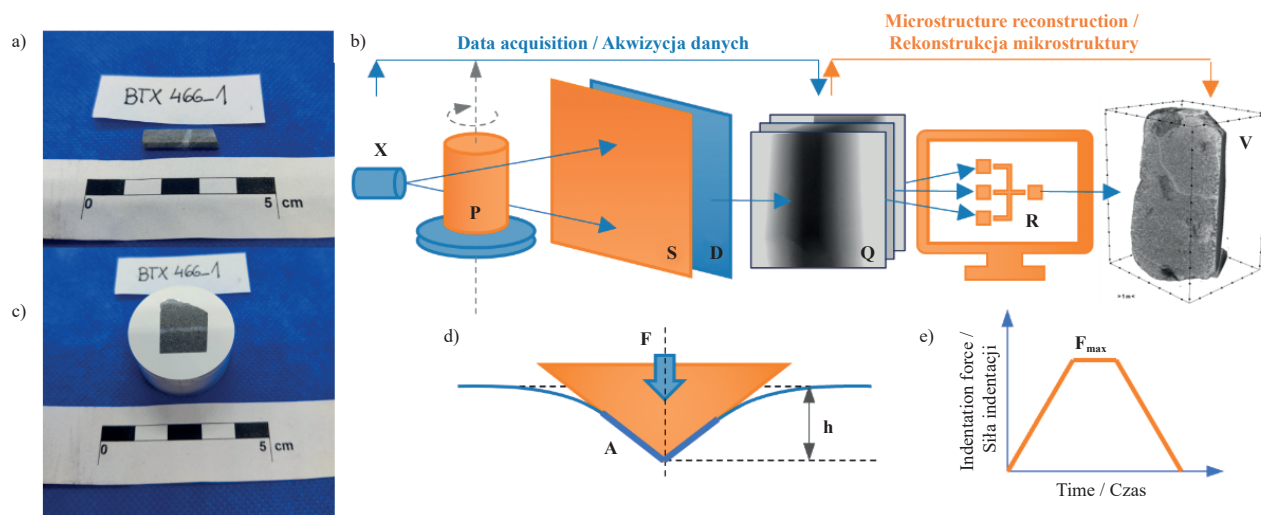


Fig. 2. Scheme of conducting microstructural examinations: a) sample prepared for examination in microtomography; b) computed microtomography (X – Radiation source, P – rotating sample, S – scintillator, D – detector, Q – series of projections, R – algorithm of mathematical image reconstruction, V – reconstructed 3D volume); c) sample prepared for nanoindentation examination; d) nanoindentation (F – indentation force, A – contact surface of indenter – substrate, h – cone penetration depth); e) the standard load increment function of the indentation test

Rys. 2. Schemat prowadzenia badań mikrostrukturalnych: a) próbka przygotowana do badania w mikrotomografii; b) mikrotomografia komputerowa (X – Źródło promieniowania, P – obracająca się próbka, S – scyntylator, D – detektor, Q – seria projekcji, R – algorytm matematycznej rekonstrukcji obrazu, V – zrekonstruowana objętość 3D); c) próbka przygotowana do badania nanoindentacji; d) nanoindentacja (F – siła indentacji, A – powierzchnia styku indenter-podłoże, h – głębokość penetracji stożka); e) standardowa funkcja przyrostu obciążenia w teście indentacji

on the density of a given component (as well as on its atomic number and atomic mass), the sum of the products $\mu_i x_i$, normalized over the total path length, reflects the effective density of the material along the beam path.

Two systems were used for data acquisition: Bruker SkyScan 1172 (11 Mpix detector) and GE Phoenix v|tome|x s (1 Mpix detector). Scanning was carried out at a tube voltage of 100 kV, with an angular step of 0.28° – 0.36° , and spatial resolutions in range of 4.8 – $13 \mu\text{m}/\text{pixel}$. The reconstruction was performed using the Feldkamp algorithm [4] implemented in NRecon and datos|x software packages. For each sample, a representative region of interest (ROI) was selected, within which the spatial distribution of the reconstructed X-ray attenuation coefficient, denoted as γ_{rec} , was analyzed. This parameter, being a function of local material density, was treated as an indicator of the internal uniformity of the sample. Higher values of γ_{rec} correspond to higher local density of the rock mass. In the statistical analysis, the following measures were determined for each ROI: mean value $\overline{\gamma_{\text{rec}}}$, interpreted as the average local density of the rock material, and standard deviation σ_γ , used as a measure of structural variation (heterogeneity) within the sample.

Nanoindentation is a method used to determine the mechanical properties of materials at the microscale. It involves the controlled penetration of a diamond indenter into a properly prepared cross-section of the tested sample, with simultaneous recording of the applied force and the depth of indenter displacement. By fitting a theoretical loading – unloading curve to the experimental data, it is possible to determine material properties such as the indentation modulus (E_{IT}) and hardness (H_{IT}). The schematic of the nanoindentation test is shown in Figure 2d.

ne głównie od gęstości danego składnika (choć także od jego liczby oraz masy atomowej), suma iloczynów $\mu_i x_i$, odniesiona do całkowitej drogi wiązki, odzwierciedla efektywną gęstość materiału wzdłuż tej drogi.

Do akwizycji danych wykorzystano dwa systemy: Bruker SkyScan 1172 (detektor 11 Mpix) oraz GE Phoenix v|tome|x s (detektor 1 Mpix). Skanowanie prowadzono przy napięciu 100 kV, kroku kątowym $0,28$ – $0,36^\circ$ oraz rozdzielczości $4,8$ – $13 \mu\text{m}/\text{piksel}$. Rekonstrukcję przeprowadzano z użyciem algorytmu Feldkampa [4] w oprogramowaniu NRecon i datos|x. Dla każdej próbki wyodrębniono region reprezentatywny (ROI), w obrębie którego prowadzono analizę rozkładu przestrzennego zrekonstruowanego współczynnika pochłaniania promieniowania rentgenowskiego, oznaczonego jako γ_{rec} . Parametr ten, będący funkcją lokalnej gęstości, uznany został za wskaźnik jednorodności wewnętrznej materiału. Im większa wartość γ_{rec} , tym większa gęstość ośrodka. W analizie statystycznej w przypadku każdego ROI wyznaczono ponadto wartość średnią $\overline{\gamma_{\text{rec}}}$, interpretowaną jako uśredniona gęstość lokalna materiału skalnego oraz odchylenie standardowe σ_γ , stanowiące miarę zróżnicowania strukturalnego (heterogeniczności) wewnątrz próbki.

Nanoindentacja jest metodą stosowaną do wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów w skali mikro. Polega ona na kontrolowanym wciskaniu wglębnika diamentowego w odpowiednio przygotowany przekrój badanej próbki, z jednoczesnym rejestrowaniem siły wciskania i głębokości penetracji wglębnika. Dzięki „wpisaniu” modelowej krzywej obciążenie-odciążenie w tę uzyskiwaną z badań możliwa jest wyznaczanie parametrów mechanicznych materiału, takich jak moduł sprężystości (E_{IT}) oraz twardość (H_{IT}). Schemat badania nanoindentacji przedstawiono na rysunku 2d.



In this study, the CSM Instruments NHT2 system equipped with a Berkovich indenter was used. All tests were carried out in accordance with the Grid Indentation Technique (GIT) [5, 6], which involves performing hardness measurements on a regular grid (in this case, 15×15 indentations with $150 \mu\text{m}$ spacing). This approach made it possible to capture the local fluctuations of mechanical parameters within a single sample and to compare results between samples collected at small distances (on the order of several dozen centimeters), corresponding to the typical excavation advance in the analyzed tunnel. At each point of the grid, an indentation test was conducted following the standard procedure (Figure 2e) using the parameters listed in Table 2.

From the recorded load – displacement (P – h) curve, two key mechanical parameters were determined. Hardness (H_{IT}), defined as the average stress under the indenter at maximum load, and the indentation modulus (E_{IT}), calculated from the slope of the unloading curve S , in accordance with the Sneddon solution [7], including a geometric correction factor for the Berkovich tip.

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (2)$$

$$E_{IT} = \frac{S}{2.068} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

where: $F_{\max}$ – maximum load during the indentation test; A – effective contact area between the indenter and the material (a function of penetration depth); S – slope of the unloading curve.

For each sample, the results of 225 individual indentations were subjected to statistical analysis, in which basic distribution measures were determined: the mean values (μ_E , μ_H), representing the typical stiffness and hardness of the material in a given sample, and the standard deviations (σ_E , σ_H), which served as indicators of the uniformity of mechanical properties.

Microstructural Test Results and Discussion

The results for selected pairs of rock samples (BTX 122L-BTX 122P and BTX 389-BTX 390) are presented in graphical form, while the calculated statistical descriptors of the microstructure are summarized in Table 3. The micro-CT results are shown as grayscale images of selected microstructure cross-sections (where grayscale intensity corresponds to local values of the attenuation coefficient γ_{rec}), as well as probability density plots $\rho(\gamma_{\text{rec}})$ of that coefficient (Figure 3).

The results obtained using nanoindentation are presented in two formats (Figure 4): as maps of the surface distribution of the indentation modulus (E_{IT}) and hardness (H_{IT}), and

W badaniach zastosowano system CSM Instruments NHT2 wyposażony we wgłębnik Berkovicha. Badania były prowadzone każdorazowo zgodnie z metodą Grid Indentation Technique (GIT) [5, 6], polegającą na wykonaniu pomiarów twardości w regularnej siatce pomiarowej (w tym przypadku 15×15 testów w rozstawie co $150 \mu\text{m}$). Dzięki temu możliwe było uchwycenie fluktuacji parametrów w obrębie próbki oraz porównanie ich między próbkami pobranymi w niewielkich odległościach (rzędu kilkudziesięciu centymetrów), co odpowiada skali typowego postępu czoła wyrobiska analizowanego tunelu. W każdym punkcie ustalonej siatki przeprowadzono test indentacji wg standardowej procedury (rysunek 2e) o parametrach przedstawionych w tabeli 2.

Na podstawie rejestrowanej krzywej siła – zagłębienie (P – h) wyznaczano dwa podstawowe parametry mechaniczne. Twardość (H_{IT}), zdefiniowaną jako średnie naprężenie działające pod wgłębnikiem przy maksymalnym obciążeniu oraz moduł indentacji (E_{IT}), obliczany na podstawie nachylenia krzywej odciążania S , zgodnie z rozwiązaniem Sneddon [7], uwzględniającym korektę geometryczną dla końcówki Berkovicha.

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (2)$$

$$E_{IT} = \frac{S}{2,068} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

gdzie: $F_{\max}$ – maksymalna wartość obciążenia podczas testu indentacji; A – efektywna powierzchnia kontaktu wgłębnika z materiałem (funkcja głębokości); S – nachylenie krzywej odciążania.

W przypadku każdej próbki wyniki 225 punktowych pomiarów poddano analizie statystycznej, w której wyznaczono podstawowe miary rozkładu, tj. wartości średnie (μ_E , μ_H), reprezentujące typową sztywność i twardość materiału w danej próbce oraz odchylenia standardowe (σ_E , σ_H), które posłużyły jako wskaźniki jednorodności właściwości mechanicznych.

Wyniki badań mikrostrukturalnych i ich dyskusja

Wyniki badań wybranych par próbek materiału skalnego (BTX 122L-BTX 122P, BTX 389-BTX 390) przedstawiono w formie graficznej, natomiast wyznaczone miary statystyczne mikrostruktury podsumowano w tabeli 3. Wyniki mikrotomografii zaprezentowano w postaci obrazów wybranych przekrojów mikrostruktury (skala szarości odpowiada lokalnym wartościom współczynnika pochłaniania γ_{rec}) oraz wykresów gęstości prawdopodobieństwa $\rho(\gamma_{\text{rec}})$ tego współczynnika (rysunek 3).

Wyniki badań uzyskane metodą nanoindentacji zaprezentowano w dwóch formach (rysunek 4): jako mapy powierzchniowego rozkładu modułu indentacji (E_{IT}) i twardości

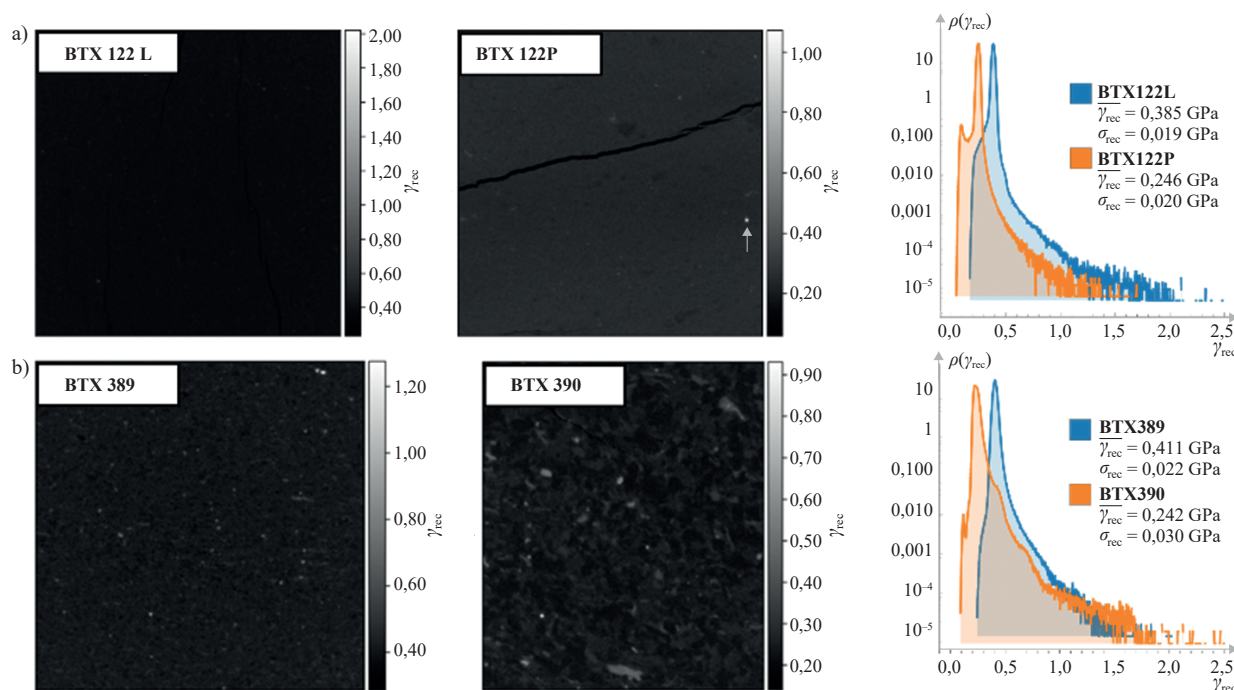
Table 2. Parameters for a single test in a GIT procedure
Tabela 2. Parametry pojedynczego testu w procedurze GIT

Testing procedure / Procedura badawcza	Max depth – load driven / Maksymalne zagłębienie z przyrostem siły
Sampling rate / Częstotliwość próbkowania [Hz]	50.0
Maximum penetration depth / Maksymalna głębokość indentacji [nm]	2000.00
Load rate / Prędkość przyrostu obciążenia [mN/min]	5000.00
Unload rate / Prędkość odciążania [mN/min]	5000.00
Pause / Pauza [s]	3.0

Table 3. Determined statistical measures of microstructure

Tabela 3. Wyznaczone miary statystyczne mikrostruktury

Pain / Para	Sample/ Próbką	$\overline{\gamma_{rec}}$ [–]	γ_{rec} [–]	μ_E [GPa]	σ_E [GPa]	μ_H [GPa]	σ_H [GPa]	$\Delta\mu\gamma_{rec}$ [%]	$\Delta\mu E_{IT}$ [%]	$\Delta\mu H_{IT}$ [%]
1	TM90L	0.514	0.024	12.31	2.77	0.37	0.42	25	38	21
	TM90P	0.383	0.027	19.88	4.12	0.47	0.62			
2	BTX122L	0.385	0.019	26.12	4.92	0.57	0.53	36	28	33
	BTX122P	0.246	0.020	18.75	10.03	0.85	1.58			
3	BTX369	0.149	0.010	31.01	4.27	0.89	0.39	11	41	82
	BTX370L	0.148	0.026	52.39	13.99	4.94	3.33			
4	BTX370L	0.148	0.026	52.39	13.99	4.94	3.33	15	44	86
	BTX370P	0.126	0.011	29.39	6.94	0.69	0.28			
5	BTX370P	0.126	0.011	29.39	6.94	0.69	0.28	9	31	83
	BTX371L	0.138	0.027	42.36	16.64	3.96	3.03			
6	BTX389	0.411	0.022	24.07	4.47	0.79	0.38	41	53	81
	BTX390	0.242	0.030	51.6	14.46	4.16	2.92			
7	BTX466_1	0.133	0.024	63.66	14.42	4.42	3.67	16	79	89
	BTX466_2	0.142	0.018	13.65	5.18	0.48	0.26			
8	ARC466	0.133	0.025	53.3	15.72	4.95	3.25	6	74	90
	BTX466_2	0.142	0.018	13.65	5.18	0.48	0.26			

**Fig. 3. Microtomography imaging results in the form of selected planar cross-sections and γ_{rec} distributions within the selected ROI for: a) BTX122L- BTX122P; b) BTX389-BTX390 pair**

Rys. 3. Wyniki obrazowania w mikrotomografii w postaci wybranych przekrojów płaskich oraz rozkłady γ_{rec} w obrębie wybranego ROI w przypadku: a) pary BTX122L-BTX122P; b) pary BTX389-BTX390

as histograms of the statistical distributions of these values. For each sample pair, the percentage difference between the minimum and maximum mean values of the reconstructed attenuation coefficient ($\overline{\gamma_{rec}}$), indentation modulus (μE_{IT}), and hardness (μH_{IT}) was calculated. These percentage differences were determined using the following formula:

(H_{IT}) oraz jako histogramy rozkładów statystycznych tych wartości. W przypadku każdej z par obliczono procentową różnicę pomiędzy minimalnymi i maksymalnymi wartościami średnimi parametrów zrekonstruowanego współczynnika pochłaniania ($\overline{\gamma_{rec}}$), modułu indentacji (μE_{IT}) i twardości (μH_{IT}). Wartości procentowe różnic wyznaczono zgodnie z wzorem:

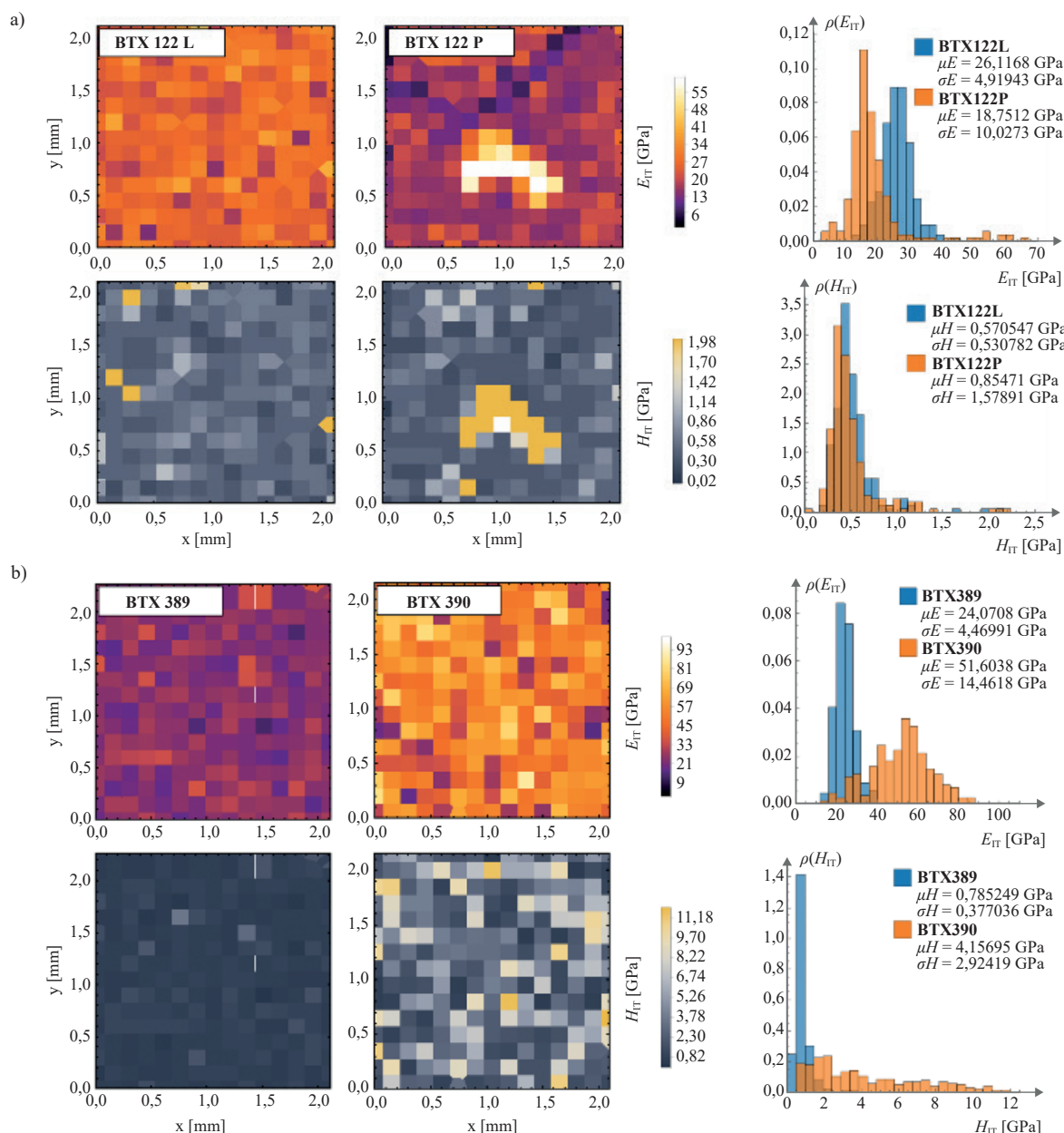


Fig. 4. Results of nanoindentation in the form of maps of surface distribution of E_{IT} , H_{IT} , together with corresponding histograms of measured values for: a) BTX122L-BTX122P; b) BTX389-BTX390 pair

Rys. 4. Wyniki nanoindentacji w postaci map rozkładu powierzchniowego E_{IT} , H_{IT} , wraz z odpowiadającymi im histogramami pomierzonych wartości w przypadku: a) pary BTX122L-BTX122P; b) pary BTX389-BTX390

$$\Delta\mu = \left(1 - \frac{\min(\mu_1, \mu_2)}{\max(\mu_1, \mu_2)} \right) 100\% \quad (4)$$

The percentage differences for all sample pairs, in terms of both mechanical and physical parameters, are summarized in Table 3. The reconstructed X-ray attenuation coefficient γ_{rec} , which indirectly reflects the local material density, showed significant differences in many sample pairs. The mean values of γ_{rec} ranged from 0.126 to 0.514, with standard deviations up to 0.030, indicating a high degree of structural variation in some samples. For example, the TM90L-TM90P pair exhibited a difference in mean γ_{rec} values of approximately 25%, BTX122L-BTX122P reached 36%, and

$$\Delta\mu = \left(1 - \frac{\min(\mu_1, \mu_2)}{\max(\mu_1, \mu_2)} \right) 100\% \quad (4)$$

Wyniki procentowych różnic w przypadku wszystkich par próbek w ujęciu parametrów mechanicznych i fizycznych zestawiono w tabeli 3. Zrekonstruowany współczynnik pochłaniania γ_{rec} , pośrednio obrazujący lokalną gęstość materiału, wykazał istotne różnice w wielu parach. Wartości średnie γ_{rec} mieściły się w zakresie 0,126–0,514, przy odchyleniach standardowych do 0,030, co świadczy o dużym zróżnicowaniu strukturalnym niektórych próbek. Para TM90L-TM90P wykazała różnicę średnich wartości γ_{rec} rzędu 25%, para BTX122L-BTX122P – aż 36%, natomiast największą zmien-



the highest variation was observed in the BTX389-BTX390 pair (41%). The histograms of γ_{rec} values differed in both the location of the mean and the distribution shape. In many pairs, a distinct shift in histogram peaks was observed between samples, along with differences in data spread around the mean value: some samples showed low standard deviation (indicating low local variability), while others exhibited high standard deviation, reflecting a heterogeneous microstructure.

The GIT-based nanoindentation allowed statistically representative distributions of both hardness and indentation modulus to be obtained for each sample. Within individual pairs, the differences in mean values were substantial – reaching up to 79% for E_{IT} in the BTX466_1 – BTX466_2 pair and 90% for H_{IT} in the ARC466 – BTX466_2 pair. A strong correlation between E_{IT} and H_{IT} variability was observed: samples with high hardness generally exhibited a high indentation modulus and low standard deviation, which may indicate greater mechanical homogeneity.

The obtained results confirm the presence of significant local variability in the physical and mechanical parameters of the flysch rocks within the analyzed rock mass. The range of fluctuations – reaching several dozen percent within a single tunnel cross-section – clearly indicates the need to employ methods with high spatial resolution to reliably assess the material properties. As mentioned in the introduction, the samples used in the study were collected during the construction of a real tunnel project along the S-1 expressway. During excavation, the contractor encountered occurrences of unexpected removal of excess rock mass beyond the designed tunnel outline, commonly referred to as overbreaks. These pose a major challenge in tunnel construction and may lead to delays and substantial increases in construction costs. The extent of overbreak is measured as the cross-sectional area of excavated material beyond the designed tunnel geometry. Since we had access to measured overbreak areas for individual tunnel sections, we investigated the potential relationship between these values and the variability of parameters obtained from microstructural testing. Interestingly, in tunnel section TH149 (samples TM90L and TM90P), where the measured overbreak was 2.748 m² – nearly half the average for the entire tunnel tube – only relatively low variability in microstructural parameters was observed (e.g., the difference in hardness was only 21%). In contrast, in section ARC466 (samples BTX466_1, BTX466_2, and ARC466), where the overbreak measured 7.026 m², significantly exceeding the average value, the differences in microstructural parameters were very high (up to 90% for hardness). We believe that, in order to fully verify the correlation between microstructural variability and increased overbreak area, a larger number of measurements covering various tunnel sections is required. Nevertheless, the relationship observed in this study is undoubtedly of interest and may serve as a premise for extending rock mass characterization to include local-scale parameter variability. It is also worth emphasizing that while global heterogeneity is the primary factor causing unforeseen difficulties during

ność zaobserwowano w parze BTX389-BTX390 (41%). Histogramy wartości γ_{rec} wykazywały zróżnicowanie zarówno pod względem wartości średnich, jak i kształtu. W wielu parach obserwowano wyraźne przesunięcie pików histogramów pomiędzy próbkami w obrębie tej samej pary oraz zróżnicowanie rozproszenia danych wokół wartości średniej – część próbek cechowała się małym odchyleniem standardowym (niewielka zmienność lokalna), podczas gdy inne wykazywały wysokie odchylenie standardowe (mikrostruktura heterogeniczna).

Nanoindentacja w układzie siatki GIT umożliwiła pozyskanie rozkładów twardości i modułu indentacji w przypadku każdej próbki w sposób statystycznie reprezentatywny. W obrębie poszczególnych par różnice wartości średnich były znaczne, sięgając nawet 79% w przypadku E_{IT} pary BTX466_1 – BTX466_2 oraz 90% w przypadku H_{IT} pary ARC466 – BTX466_2. Zauważono silną korelację między zmiennością E_{IT} i H_{IT} – próbki o dużej twardości wykazywały zazwyczaj również duży moduł indentacji i małe odchylenia standardowe, co może świadczyć o większej jednorodności mechanicznej.

Uzyskane wyniki potwierdzają bardzo dużą lokalną zmienność parametrów fizycznych i mechanicznych skał fliszowych w obrębie analizowanego masywu. Zakres fluktuacji, sięgający kilkudziesięciu procent w obrębie pojedynczego przekroju tunelu, jednoznacznie wskazuje na konieczność stosowania metod o dużej rozdzielczości przestrzennej w celu wiarygodnej oceny materiału. Jak wspomniano we wstępie, próbki do badań pochodziły z rzeczywistej inwestycji tunelowej w ciągu drogi ekspresowej S-1. Podczas jej realizacji wykonawca spotykał się ze zjawiskami nieprzewidywanego usuwania nadmiarowej objętości urobku, względem projektowanego obrysu tunelu, zwanymi nadwyłomami. Są one dużym utrudnieniem w realizacji tuneli i mogą prowadzić do przedłużenia się prac i istotnego zwiększenia nakładów finansowych. Skala nadwyłomów jest mierzona jako pole przekroju usuniętego materiału skalnego ponad projektowaną geometrię tunelu. W związku z tym, że dysponowaliśmy zestawieniem powierzchni nadwyłomów w kolejnych przekrojach, sprawdziliśmy istnienie zależności pomiędzy ich wartościami a zróżnicowaniem parametrów w badaniach w skali mikro. Co ciekawe, w odcinku tunelu (nr odcinka TH149, próbki TM90L i TM90P) o powierzchni nadwyłomu 2,748 m², tj. niemal dwukrotnie mniejszej od średniej w przypadku całego ciągu, zaobserwowano również relatywnie niewielką (w porównaniu z innymi parami próbek) zmienność parametrów, np. twardość różniła się zaledwie o 21%. Z kolei w odcinku ARC466 (próbki BTX466_1, BTX 466_2 i ARC466), gdzie zmierzony nadwyłom (7,026 m²) znacznie przekraczał wartość średnią w tym ciągu tunelu, różnice pomiędzy wyznaczonymi parametrami mikrostruktury były bardzo duże (w przypadku twardości sięgały aż 90%). Uważamy, że w celu pełnego określenia korelacji pomiędzy zróżnicowaniem parametrów uzyskanym w badaniach mikrostrukturalnych a zwiększoną powierzchnią nadwyłomów niezbędne jest wykonanie znacznie większej liczby pomiarów dotyczących zróżnicowanych przekrojów. Zaobserwowana przez nas zależność jest niewątpliwie ciekawą obserwacją i może być traktowana jako przesłanka do prowadzenia rozpoznania właściwości skalnych w szerszym zakresie, tj. z uwzględnieniem



tunnelling, the locally observed variability in physical and mechanical parameters, as identified in laboratory tests, may also significantly contribute to the deterioration of excavation conditions.

Summary

The obtained results indicate that microstructural investigations are a valuable complement to classical macroscopic testing. The standard approach used in geotechnical-engineering documentation (pol. DGI) – based on classification systems such as RMR and GSI – does not account for microscale variability of the rock material, as the assessment of rock mass quality is primarily based on structural recognition and identification of global discontinuities. In our opinion, local fluctuations in rock material parameters may have an equally significant impact on tunnelling conditions, leading to unpredictable technological problems and the need for additional stabilization measures. Therefore, we propose that for future tunnel projects located in Carpathian flysch formations, it is advisable to consider conducting a more extensive geological investigation than currently required within the DGI submitted at the tender stage. We believe that supplementing the documentation with results obtained using microstructural methods – such as X-ray micro-computed tomography and nanoindentation – would enable a more complete assessment of the rock mass quality. This approach may significantly improve the reliability of geological condition predictions and allow for more efficient planning of excavation technologies, thereby minimizing the risk of overbreak and delays in project execution.

Received: 07.04.2025

Revised: 30.06.2025

Published: 19.09.2025

lokalnej zmienności parametrów. Warto również podkreślić, że choć globalna zmienność jest głównym czynnikiem powodującym nieprzewidziane utrudnienia podczas tunelowania, to także stwierdzona w badaniach laboratoryjnych duża zmienność lokalna parametrów mechanicznych i fizycznych może przyczynić się do pogorszenia warunków drążenia tunelu.

Podsumowanie

Otrzymane wyniki wskazują, że badania mikrostrukturalne są wartościowym uzupełnieniem klasycznych badań makroskopowych. Standardowe podejście stosowane w dokumentacjach geologiczno-inżynierskich (DGI), bazujące na systemach klasyfikacyjnych, takich jak RMR i GSI, nie uwzględnia zmienności materiału skalnego w skali mikro, a analiza jakości masywu bazuje głównie na rozpoznaniu strukturalnym i identyfikacji globalnych nieciągłości. Naszym zdaniem lokalne fluktuacje parametrów materiału skalnego mogą mieć równie istotny wpływ na warunki tunelowania, prowadząc do nieprzewidywalnych problemów technologicznych i konieczności stosowania dodatkowych środków stabilizujących. W związku z tym postuluje się, że w przypadku planowanych w przyszłości budów tuneli, zlokalizowanych we fliszu karpackim, należy rozważyć konieczność przeprowadzenia rozpoznania geologicznego szerszego niż standardowe, w ramach DGI przedkładanej na etapie przetargu. Naszym zdaniem uzupełnienie dokumentacji o wyniki uzyskane za pomocą metod mikrostrukturalnych, takich jak mikrotomografia komputerowa i nanoindentacja pozwoli na pełniejszą ocenę jakości skał tworzących górotwór. Takie podejście może znacznie poprawić jakość predykcji warunków geologicznych i umożliwić efektywniejsze planowanie technologii drążenia, minimalizując ryzyko nadwyłomów i wydłużenia czasu realizacji inwestycji.

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.04.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.06.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

- [1] Tajduś K, Tajduś A, Cała M. Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie i budowa tuneli. 2012.
- [2] Chen F, Wang L, Zhang W. Reliability assessment on stability of tunnelling perpendicularly beneath an existing tunnel considering spatial variabilities of rock mass properties. *Tunn Undergr Space Technol.* 2019; doi:10.1016/j.tust.2019.03.013.
- [3] Beer A. Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten. *Ann Phys.* 1852; doi:10.1002/andp.18521620505.
- [4] Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW. Practical cone-beam algorithm. *JOSA A.* 1984; doi:10.1364/JOSA.A.1.000612.
- [5] Constantinides G, Chandran KR, Ulm FJ, Van Vliet KJ. Grid indentation analysis of composite microstructure and mechanics: Principles and validation. *Mater Sci Eng A.* 2006;430:189–202.
- [6] Ulm FJ, Vandamme M, Bobko C, Alberto Ortega J, Tai K, Ortiz C. Statistical indentation techniques for hydrated nanocomposites: concrete, bone, and shale. *J Am Ceram Soc.* 2007;90:2677–2692.
- [7] Sneddon IN. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. *Int J Eng Sci.* 1965; doi: 10.1016/0020-7225(65)90019-4.