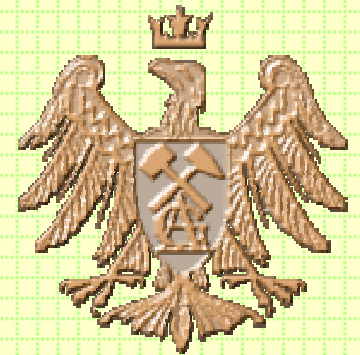


Shotcrete

Torkret



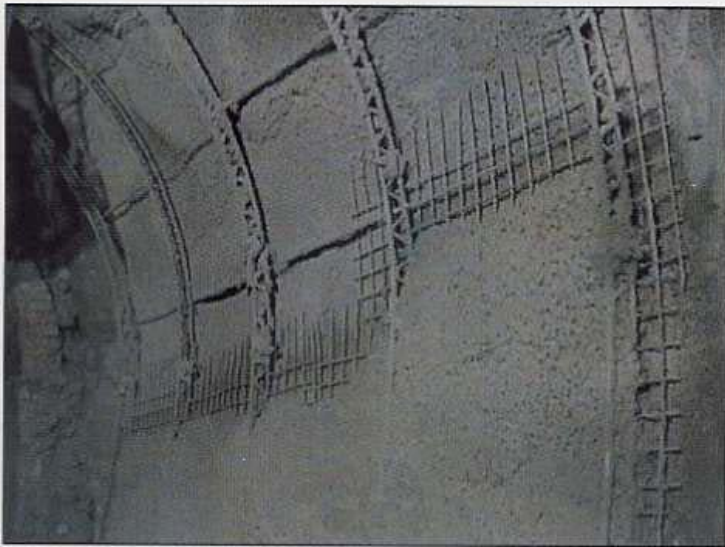
Torkret

- Torkret jest bardzo często wykorzystywany do obudowy wstępnej jak i ostatecznej budowli podziemnych. Szczególnie często wykorzystuje się go w budownictwie podziemnym. Jest on chętnie stosowany dla obudowy tuneli, garaży podziemnych czy wykopów.
- Torkret (shotcrete, sprayed concrete, gunita, spritzbeton) jest od kilkudziesięciu lat wykorzystywany w budownictwie podziemnym i tunelowaniu.
- Zasada działania torkretnicy została opracowana przez Amerykanina C.E. Akeleya w 1907 roku. W 1910 roku, po rozwinięciu i modernizacji konstrukcji została on opatentowana w USA przez Cement Gun Co. z Allentown, Pennsylvania.
- Pierwsza próba zastosowania torkretu w górnictwie miało miejsce w Brucetown Experimental Mine of the Pittsburgh Bureau of Mines w 1914 roku. Nie zakończyła się ona jednakże powodzeniem z powodu słabej przyczepności natryskiwanej mieszanki do ociosów.



Torkret

- Gwałtowny wzrost zainteresowania torkretem i torkretowaniem datuje się na lata pięćdziesiąte ubiegłego stulecia. Począwszy od tego czasu stosuje się go zarówno w Europie (Austria, Niemcy, Włochy, Szwecja) jak i w Ameryce Północnej. Do początku lat 60-tych stosowano tylko torkretowanie na sucho, potem zaczęto stosować także torkretowanie na mokro. Pierwsze próby dodawania mikrobrojenia do torkretu datują się na późne lata siedemdziesiąte, zaś upowszechnienie torkretu zbrojonego nastąpiło we wczesnych latach osiemdziesiątych.



Torkret - własności

- Generalnie torkret powinien odznaczać się szybkim wzrostem wytrzymałości początkowej, dobrą przyczepnością do górotworu oraz określoną wytrzymałością końcową.
- Norwegowie zalecają ograniczenie ilości przyśpieszaczy (np. szkła wodnego). Użycie szkła wodnego powoduje zmniejszenie się wytrzymałości torkretu na ściskania ale także zmniejsza odrzut. Jednakowoż badania laboratoryjne wykazały, że zbyt duża domieszka szkła wodnego może doprowadzić do intensyfikacji procesu powierzchniowego łuszczenia i rozwarstwiania się torkretu na skutek procesów zamarzania i rozmarzania. Zalecają oni także stosowanie możliwie niskiego współczynnika w/c.
- Mikrokrzemionka jest pucolaną, czyli materiałem, który wchodzi w reakcję z wodorotlenkiem wapnia powstającym podczas hydratacji cementu. Dodatek mikrokrzemionki w ilości od 8 do 13 % pozwala na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie torkretu dwu lub trzykrotnie. Inne korzyści wynikające z dodatku mikrokrzemionki to ograniczenie odrzutu oraz lepsze wiązania na kontakcie torkret-górotwór jak i torkret-torkret.

Torkret - własności

- Beton natryskowy zastosowano do obudowy wstępnej sztolni hydrotechnicznych w Świnnej Porębie. Tam wymagania odnośnie wytrzymałości na ściskanie torkretu były następujące – po 1h - 1MPa, po 5h - 5MPa, zaś po 28 dniach 20 MPa. W skład zastosowanego torkretu wchodził cement SG-45, z dodatkiem mikrokrzemionki i szkła wodnego. Uzyskane odrzuty zamykały się w granicach około 15 % na ociosach oraz 30 % w stropie (podobne wartości podają zresztą Austriacy Jodl i Kusterle, 1998). Badanie przeprowadzone w latach 1991-1993 wykazały, że wytrzymałości na ściskanie torkretu po odpowiednich okresach czasu były nawet wyższe od wymaganych.

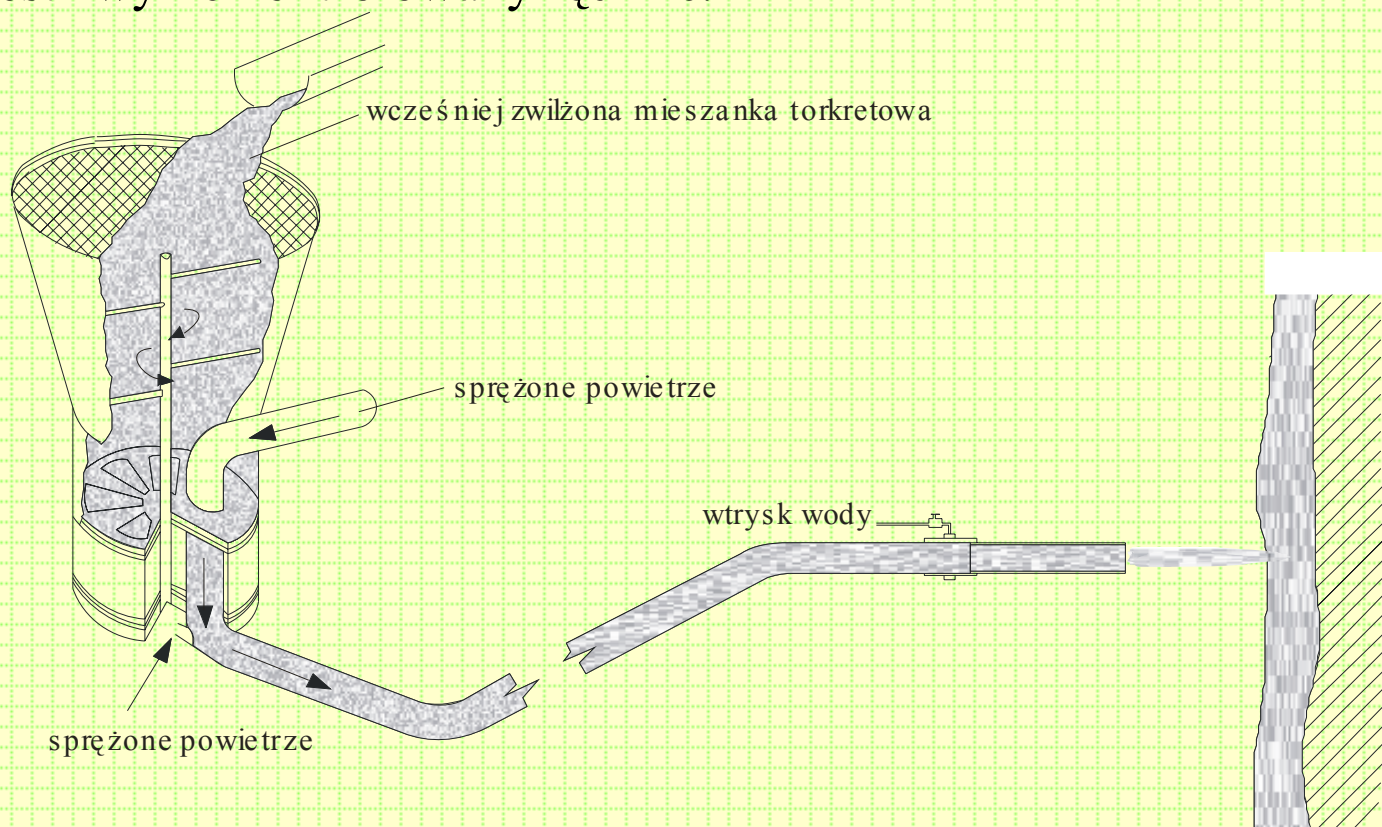
Okres badań	Wartość	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po czasie:			
		1 h	5 h	24 h	28 dni
1991	Minimalna	2.2	5.8	11.8	30.9
	Średnia	2.0	5.5	11.2	23.4
	Maksymalna	1.1	5.2	10.5	22.2
1992/93	Minimalna	1.7	7.4	11.1	28.9
	Średnia	1.4	5.9	10.0	22.3
	Maksymalna	1.2	5.2	8.9	21.1

Torkret - własności

- Williams et al. (1999) podają, że torkret stosowany do obudowy tunelu metra w Singapurze miał po 28 dniach wytrzymałość na ściskanie rzędu 35 MPa.
- Badania wytrzymałości na ściskanie torkretu powinny być przeprowadzane w warunkach polowych w warunkach atmosferycznych możliwie zbliżonych do rzeczywistych. Stąd też wydaje się, że najbardziej wiarygodne wyniki powinny dawać badania in situ – tzn. z zastosowaniem młotka Schmidta, penetrometru igłowego, czy też sondy Kaindla.
- John i Poscher (1993) podają, że torkret zastosowany do budowy tunelu w Schönrain po 28 dniach posiadał wytrzymałość na ściskanie w granicach od 28-48 MPa, zaś moduł Younga średnio około 30 GPa.
- Jodl i Kusterle (1998) podają, że w zależności od zastosowanych przyśpieszaczy mogą mieć wytrzymałość na ściskanie po jednej godzinie od 0.15 MPa do 0.9 MPa, zaś po 28 dniach od 20 MPa do 40 MPa.
- Przykładowo w pracy Karakusa i Fowella (2000), dla celów obliczeń numerycznych MES przyjęto, że torkret ma moduł Younga równy 5 GPa, a liczbę Poissona 0.17. Z kolei Shin i Potts (1998) przyjmują odpowiednio moduł Younga 8700 MPa i liczbę Poissona 0.2. Mashimo et al. (2000) przyjęli do obliczeń numerycznych moduł Younga równy 3.5 GPa.

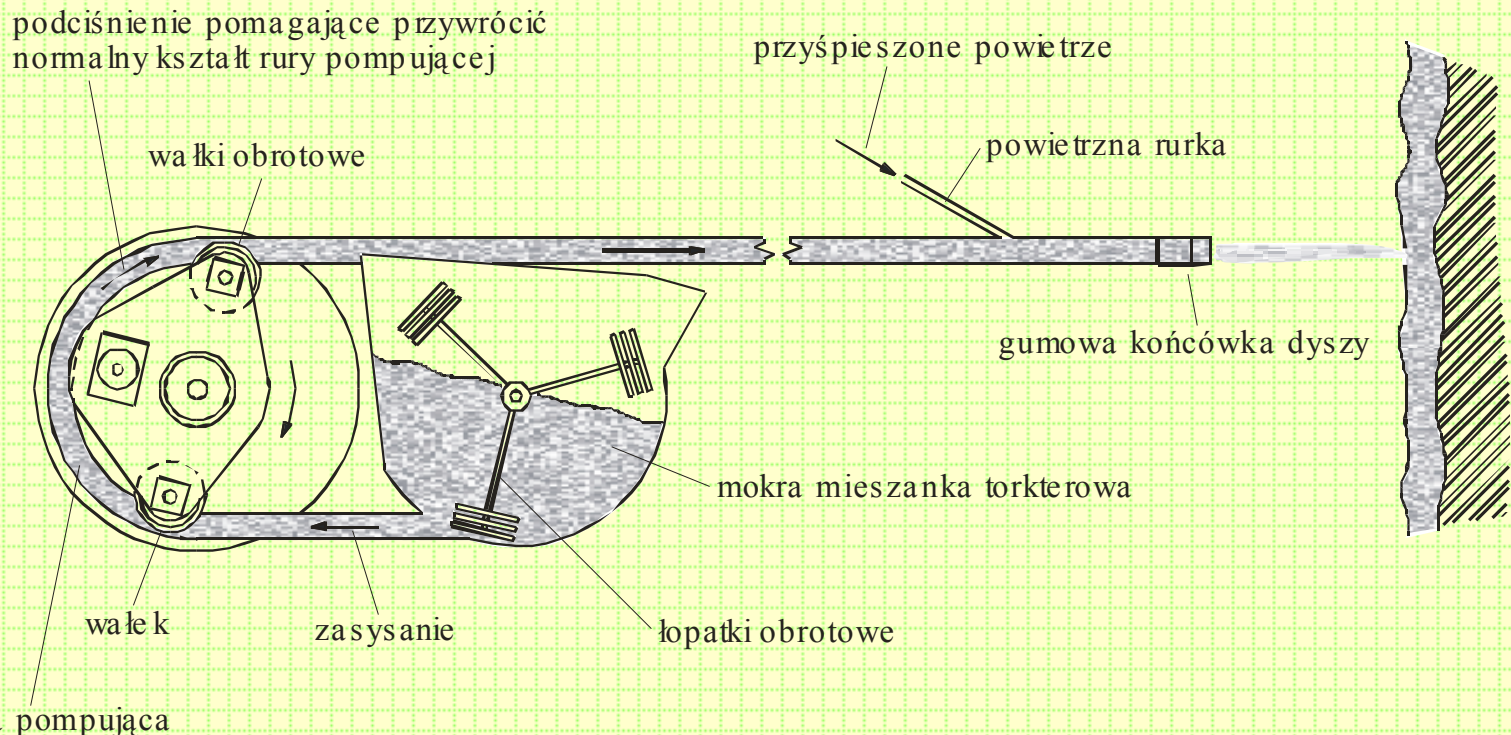
Torkretowanie na sucho

- Do lat 60-tych stosowano wyłącznie torkretowanie na sucho. Polega ono na dostarczaniu zwilżonej mieszanki torkretowej do mieszalnika, gdzie następuje jej wymieszanie ze sprężonym powietrzem. Woda jest dodawana w dyszy, czyli wymieszanie mieszanki następuje w ostatnim stadium jej transportu. Dopływ wody jest zwykle kontrolowany ręcznie.



Torkretowanie na mokro

- Torkretowanie na mokro polega na wymieszaniu w odpowiednich proporcjach cementu, wody i dodatków. Następnie gotowa mieszanka jest dostarczana do dyszy i natryskiwana na powierzchnię. Torkretowanie na mokro pozwala na pełną kontrolę składu i proporcji mieszanki. Początkowo problemy przy pompowaniu mieszanki torkretowej powodowały konieczność dodawania nieco większej ilości wody. Potem problem ten został rozwiązany za pomocą dodawania przyspieszaczy.



Torkretowanie na sucho i na mokro

Składy mieszanin torkretu wykonywanych na sucho i na mokro

Składnik	Na sucho		Na mokro	
	kg/m ³	% materiału suchego	kg/m ³	% materiału suchego
mikrokrzemionka	420	420	420	420
składnik mineralny	19	19	18.1	18.1
mikrobrojenie	50	50	40	40
przyspieszacz	2.2	2.2	1.7	1.7
superplastyfikator	1670	1670	1600	1600
upłynniacz	75.5	75.5	68.9	68.9
Czynnik napowietrzający	60	60	Jeżeli zachodzi potrzeba	
Woda	Kontrolowana przy dyszy		180	180
RAZEM	2213	2213	2213	2213



Torkretowanie na sucho i na mokro

- Produkt finalny torkretowania na sucho czy też na mokro jest podobny. Torkretowanie na sucho jest częściej używane w górnictwie podziemnym. Ograniczone wymiary wyrobisk skłaniają raczej ku minimalizacji wielkości sprzętu do torkretowania. Z kolei dla torkretownia przy budowie tuneli, szybów czy też wyrobisk wielkogabarytowych stosuje się raczej metodę na mokro.
- Trudno jest jednoznacznie powiedzieć, który z systemów torkretowania jest lepszy. Ono (1996) podaje, że w połowie lat 90-tych w Austrii i Kanadzie proporcje pomiędzy torkretowaniem na sucho i na mokro wynosiły jak 5 % do 95 %, podczas gdy w Japonii i Szwecji odpowiednio 80 % do 30 %. W Norwegii stosuje się prawie wyłącznie torkretowanie na mokro.
- Hoek (1993) stwierdza, że w przypadku torkretu sporządzanego metodą suchą stosunek w/c waha się a granicach od 0.3-0.4, zaś w przypadku metody mokrej od 0.4 do 0.5. Barton (1998), w wytycznych do *NMT* zaleca stosowanie torkretowania na mokro.
- Jak zauważają Hartwig i Nord (1998), w przeciągu ostatniego ćwierćwiecza nastąpił zdecydowany odwrót od torkretowania na sucho w stronę torkretowania na mokro. Pozwoliło to zwiększyć wydatek torkretu od 2 do 3 razy.



Torkretowanie na sucho i na mokro

Torkretowanie na sucho

Torkretowanie na mokro

Ilość wody jest dokładnie kontrolowana i stosunek w/c może być stały

Ręczna kontrola dopływu wody daje większe możliwości dopasowania się do zmiennych warunków

Lepsza gwarancja dobrego wymieszania wody z innymi składnikami

Lepiej pasuje do mieszanin z lekkich kruszyw, tam gdzie chce się uzyskać szybko dużą wytrzymałość torkretu

Dokładniejsze proporcje pomiędzy składnikami

Mniejsze nakłady na sprzęt

Zwykle daje mniejsze odbicie, co powoduje mniejsze straty mieszanki

Większa szybkość uderzenia, lepsza przyczepność

Mniejsze zapylenia i mniejsze straty cementu

Możliwość transportu na duże odległości

Można używać napowietrzaczy

Łatwiejsze natryskiwanie

Produkcja mieszanki na dużą skalę

Zdolność do produkcji torkretu o dużej wytrzymałości



Torkretowanie na sucho i na mokro

- Przed przystąpieniem do torkretowania należy dokładnie oczyścić powierzchnię oraz ją zwilżyć. Należy podkreślić, że powierzchnia nie powinna być mokra, lecz wilgotna. Zwilżania powierzchni nie stosuje się tylko w przypadku występowania na niej warstw skłonnych do pęcznienia. Wtedy ograniczyć się należy do jej oczyszczenia sprężonym powietrzem.
- Beton natryskowy nakładany metodą mokrą, z użyciem przyspieszacza, nie umożliwia otrzymania obudowy wodoszczelnej. Efekt ten można osiągnąć tylko przy użyciu metody suchej z dodatkiem mikrokrzemionki – wtedy taki torkret może być używany jako ostateczna obudowa wodoszczelne.
- Do najbardziej znanych firm zajmujących się produkcją sprzętu do torkretowania suchego i mokrego należą: Cifa SpA (www.cifa.com), GIA industri AB (www.gia.se), Jama Mining Equipment AB (www.jama.se), Meyco Equipment MBT AG (www.ugc.mbt.com), Normet Corporation (www.normet.fi), Ocmer Co. srl (www.ocmer.it), Putzmeister AG (www.putzmeister.de), RDH Mining Equipment (www.rdhltd.on.ca), Reed (www.reedpumps.com), Schwing GmbH (www.schwing.de), Shinhan Heavy Industries Co. Ltd. (www.shinhan-tunnel.com), Shotcrete Technologies Inc. (www.shotcretetechnologies.com), Sika AG Aliva Division (www.aliva.com).



Funkcje torkretu

- poprzez ściśle przyleganie do konturu wyrobiska powoduje występowanie w górotworze trójosiowego stanu naprężenia, który korzystnie wpływa na nośność górotworu,
- przeciwdziała nadmiernemu odprężaniu się górotworu,
- chroni odkryte powierzchnie przed wietrzeniem, wpływem wody i zabezpiecza załogę przed opadem drobnych odłamków skał,
- zapewnia wymagane gabaryty wyrobiska oraz "wygładza" jego profil co jest korzystne ze względów wentylacyjnych,
- poprzez swoją podatność aktywizuje górotwór w otoczeniu wyrobiska oraz daje się łatwo zrekonstruować poprzez wzmocnienie kotwiami lub narzucenie dodatkowej warstwy
- poprzez rysy i pęknięcia sygnalizuje miejsce i kierunek przebiegu zniszczenia obudowy oraz sygnalizuje niebezpieczeństwo utraty jej stateczności,
- pojawienie się mokrych plam sygnalizuje o rozwieraniu się szczelin oraz możliwej utracie stateczności wynikłej z osłabienia własności górotworu na skutek rozmakania,
- chroni obudowę ostateczną w czasie uzyskiwania przez nią nośności, a po jej instalacji współpracuje z nią.



Funkcje torkretu

- Dość intrygująco o funkcjach torkretu wypowiadają się Davik i Kompen (1998). Stwierdzają oni, że główną funkcją torkretu zbrojonego jest powstrzymanie przed opadem odłamków skał oraz podtrzymanie samonośności tunelu. Samo to stwierdzenie nie jest może przełomowe, ale znacznie ciekawsza jest jego podbudowa. Badacze norwescy stwierdzają, że przeprowadzone w warstwie torkretu pomiary naprężeń wykazały, że są one faktycznie równe zeru (*virtually zero*). To stwierdzenie musi budzić uzasadnione wątpliwości w aspekcie doświadczeń polskich ze Świnnej Poręby. Być może w mocnym i bardzo mocnym górotworze skandynawskim rzeczywiście pomierzone w torkrecie naprężenia były równe zeru, ale twierdzenia tego nie można rozszerzyć na flisz karpacki, czy też na jakikolwiek inny słaby górotwór. Taki punkt widzenia potwierdzają zresztą doświadczenia angielskie (Berg et al. 1998) i niemieckie (Glötzl R. 1996).
- Także badacze brazylijscy w swojej pracy (Negro et al. 1998) przytaczają wyniki pomiarów naprężeń w obudowie tunelu, którą stanowiła 20 cm warstwa torkretu. Maksymalne pomierzone naprężenia normalne w torkrecie były równe 12.11 MPa.
- W Polsce torkret stosowano także w górnictwie podziemnym jako powłoka na skorodowaną obudowę stalową (Surma, 2002). Stwierdzono, że narzucenie na łuki stalowe warstwy torkretu o odpowiedniej grubości może skutecznie wzmocnić obudowę oraz zapobiegać dalszej korozji.

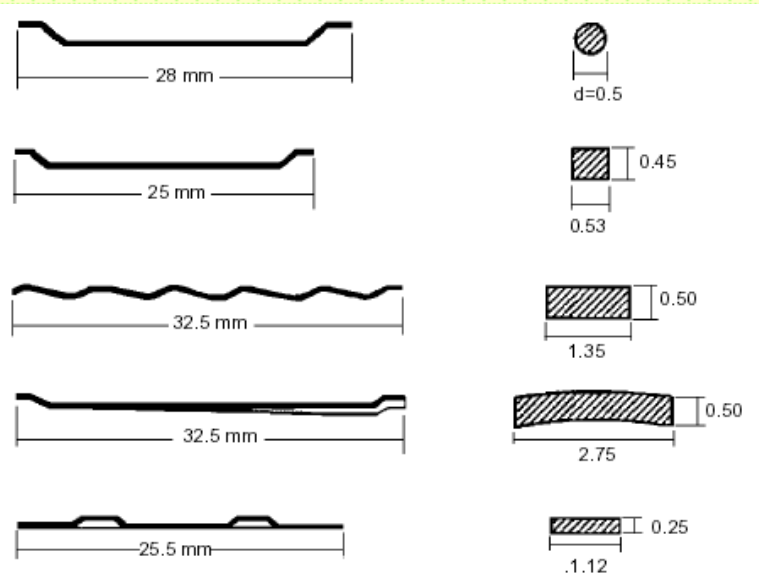


Torkret zbrojony

- Torkret zbrojony jest stosowany od późnych lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku i od tego czasu zyskuje sobie rosnącą popularność. Z powodzeniem zastępuje klasyczną konstrukcję torkretu wzmocnionego siatką stalową.
- Zastosowanie mikrobrojenia torkretu ma na celu poprawę jego zdolności do pochłaniania energii, wzrost podatności oraz poprawę jego parametrów wytrzymałościowych zarówno w stanie przed jak i po zniszczeniu. Można więc stwierdzić, że mikrobrojenie działa w skali mikro – przeciwdziałając propagacji mikrospeków i mikroszczelin, a także w skali makro – zbrojąc beton i zmieniając jego własności.
- Hoek (2000) podaje, że elementy do zbrojenia torkretu wykonane ze stali mogą mieć długość od 25 do 32.5 mm, przekrój kołowy (średnica 0.5 mm) lub prostokątny o wymiarach: wysokość od 0.25 – 0.5 mm, a szerokość od 0.53 do 2.75 mm.
- Do zbrojenia torkretu można używać elementów (włókien) stalowych jak i włókien polipropylenowych (Karwacki J.M. 1994).
- Badania parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych torkretu zbrojonego wykonuje się z reguły na beleczkach o wymiarach około 600 mm x 150 mm x 150 mm.

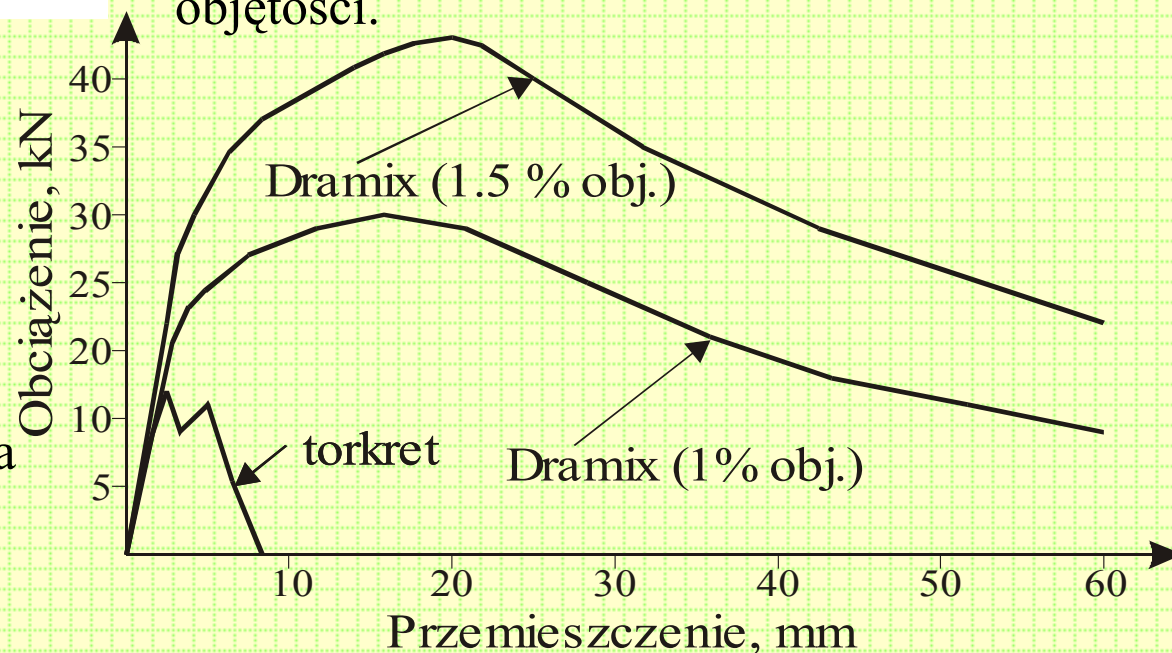


Torkretowanie na sucho i na mokro



Znacząco wzrosła także podatność torkretu. Broch et al. (1996) donoszą, że dla budowy podziemnych komór w Norwegii (Sture, Gjovik) używano zbrojenia torkretu w proporcjach około 50-60 kg na metr sześcienny betonu.

Hoek (2000) opisuje eksperymenty przeprowadzone przez Kompena, mające na celu badanie wpływu mikrozbroyenia na parametry wytrzymałościowe torkretu. Widać wyraźnie, że w zależności od wielkości procentowego dodatku zbrojenia Dramix maksymalne obciążenia wzrosło dwuipółkrotnie i ponad trzykrotnie dla domieszek zbrojenia w ilości 1 % i 1.5 % objętości.



Torkretowanie na sucho i na mokro

- Według standardów japońskich (Ortigao *et al.* 1998), dla oceny ekwiwalentnej wytrzymałości na zginanie torkretu (f_e - *equivalent flexural strength*), należy uformować belecзки o wymiarach 600mm x 150 mm x 150 mm. Beleczkę poddajemy oddziaływaniu centralnej siły osiowej aż do zniszczenia. Przykładowy wykres obciążenie-przemieszczenie jest pokazany na rysunku. Następnie ekwiwalentną wytrzymałość torkretu na zginanie obliczamy ze

wzoru:

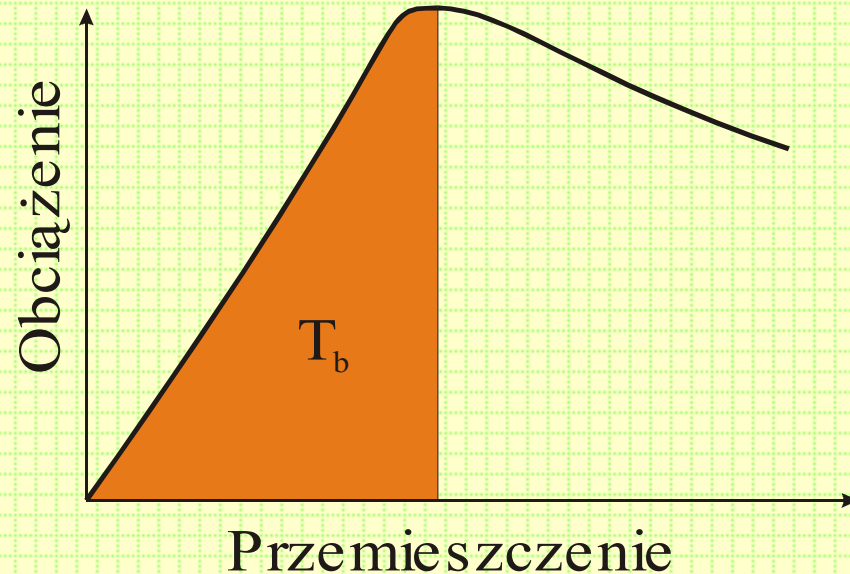
$$f_e = \frac{T_b}{\delta l_b} \frac{l}{bh^2}$$

T_b - pole powierzchni na wykresie

l - długość belecзки

δl_b - ugięcie odpowiadające 1/150 rozpiętości belecзки; dla standardowych belek przyjmuje wartość 300 mm,

b, h - szerokość i wysokość belecзки



Vandevelle (1998) podaje, że dla torkretu zbrojonego w proporcjach 40-50 kg/m³ ekwiwalentna wytrzymałość na zginanie jest porównywalna lub niewiele większa niż dla zwykłego torkretu.



Zastosowanie torkretu

- Torkretu nie nakłada się na suchą, zakurzoną powierzchnię. Z reguły, przed natryskiwaniem czyści się odsłoniętą powierzchnię strumieniem wody pod ciśnieniem. Wilgotna wierzchnia warstwa stanowi dobre podłoże i sprzyja dobrej przyczepności torkretu. Zwykle obrzutkę torkretem zaczyna się od dolnej krawędzi ociosu i przesuwa się wylot dyszy wolnymi okrężnymi ruchami do góry. Wylot dyszy powinien być oddalony od powierzchni o około 1.0 do 1.5 m.
- Jeżeli torkret jest narzucany na górotwór mocno zawodniony to należy zapewnić odpływ wody poprzez warstwę torkretu. Można to zrealizować za pomocą systemu rur odprowadzających lub zapewnić odpowiedni drenaż górotworu przed natryskiwaniem torkretu.
- W tunelach wykonywanych w górotworze plastycznym (*squeezing rock mass*) często praktykuje się dzielenie torkretu na segmenty poprzez pozostawianie wzdłużnych szczelin dylatacyjnych mających na celu upodatnienie konstrukcji (Schubert i Schubert, 1993; Barla, 1995; Kovari i Staus, 1996; Brandl, 2000; Kaiser *et al.* 2000; Wang & Huang, 2000). Należy jednak zaznaczyć, że taka obudowa będzie działała w pełni efektywnie tylko po zaciśnięciu szczelin (Feknous *et al.* 1996).



Zastosowanie torkretu

- Przy okazji budowy sztolni hydrotechnicznych w Świnnej Porębie torkret zastosowano także do zapobiegania procesom osuwiskowym skarpy z fliszu karpackiego (Łanocha, 1999). Cienką warstwę torkretu narzucono na skarpe w celu ochrony materiału skalnego przed obniżeniem parametrów wytrzymałościowych na skutek oddziaływania wód opadowych.
- Znacznie mniejsze zdolności do pochłaniania energii ma torkret i w zależności od grubości warstwy, np. 5 cm, 10 cm oraz 15 cm jest w stanie pochłonąć odpowiednio energie rzędu 4kJ/m^2 , 5.5kJ/m^2 i 9kJ/m^2 . Według badań kanadyjskich (Tannant *et al.*, 1996a,b) torkret zbrojony siatką stalową może pochłonąć znacznie większe ilości energii - od 15kJ/m^2 aż do 23kJ/m^2 (!). Warto również wspomnieć o badaniach porównawczych własności torkretu i torkretu zbrojonego szpilkami stalowymi prowadzonych w RPA (Kirsten i Labrum, 1990; Kirsten, 1992, Kirsten, 1998). Z doświadczeń tych wynika, że parametry wytrzymałościowe torkretu z siatką stalową oraz torkretu zbrojonego (3% objętości stanowiły szpilki stalowe typu Dramix, długości 30 mm, średnicy 0.5 mm) są porównywalne. Z pracy Ortleppa *et al.* (1999) wynika, że torkret zbrojony Dramixem (długość 40 mm, 2.5 % objętości) jest w stanie pochłonąć około 20kJ/m^2 , przy czym warto zauważyć, że badacze z RPA twierdzą, że ich procedury badawcze są znacznie bardziej rozsądne i zbliżone do rzeczywistości niż Kanadyjczyków.

Projektowanie parametrów torkretu

- Projektowanie parametrów torkretu jest zagadnieniem bardzo złożonym. Trudno jest znaleźć jednolitą procedurę określania parametrów torkretu. Podobnie jak w przypadku kotwi, istnieje szereg zestawów wskazówek formułowanych przez różnych autorów. Chyba najpełniejszy zestaw zaleceń można znaleźć w pracy Hoeka (2000). Na podstawie swojego bogatego doświadczenia wypracował on zestaw zaleceń dotyczących stosowania torkretu w zależności od rodzaju górotworu i jego zachowania, który zamieszczono w poniższej tabeli.

Typ górotworu	Zachowanie się górotworu	Wymagania odnośnie obudowy	Torkret
zwięzły, metamorficzny lub wylewny; niewielkie naprężenia pierwotne	brak jakichkolwiek oznak zniszczenia (łuszczenia, spękania etc.)	brak	Brak
zwięzły, osadowy; niewielkie naprężenia pierwotne	niektóre łupki ilaste i piaszczyste mogą lokalnie się odspajać na skutek działania zmiennej wilgotności	lokalnie dla zapobiegania odspojeniom	25 mm torkretu jak najszybciej po odsłonięciu



Projektowanie parametrów torkretu

Typ górotworu	Zachowanie się górotworu	Wymagania odnośnie obudowy	Torkret
zwięzły, metamorficzny lub wylewny; niewielkie naprężenia pierwotne	brak jakichkolwiek oznak zniszczenia (łuszczenia, spękania etc.)	brak	brak
zwięzły, osadowy; niewielkie naprężenia pierwotne	niektóre łupki ilaste i piaszczyste mogą lokalnie się odspajać na skutek działania zmiennej wilgotności	lokalnie dla zapobiegania odspojeniom	25 mm torkretu jak najszybciej po odsłonięciu
zwięzły górotwór, jeden szeroki uskók lub strefa osłabienia	słabe i zerodowane wypełnienie pomiędzy płaszczyznami uskoku może grozić lokalną utratą stateczności	obudowa w otoczeniu strefy osłabienia	usunąć słaby materiał i zastosować kotwienie wyprzedzające; można użyć siatki stalowej; wypełnić wybraną pustkę torkretem lub torkretem zbrojonym.

Projektowanie parametrów torkretu

Typ górotworu	Zachowanie się górotworu	Wymagania odnośnie obudowy	Torkret
zwięzły górotwór, jeden szeroki uskok lub strefa osłabienia	słabe i zerodowane wypełnienie pomiędzy płaszczyznami uskoku może grozić lokalną utratą stateczności	obudowa w otoczeniu strefy osłabienia	usunąć słaby materiał i zastosować kotwienie wyprzedzające; można użyć siatki stalowej; wypełnić wybraną pustkę torkretem lub torkretem zbrojonym
zwięzły górotwór metamorficzny lub wylewny; duże naprężenia pierwotne	lokalne odspojenia i złuszczenia	zabezpieczenie stropu przed opadem złuszczonych odłamków	50 mm torkretu na przykotwioną siatkę stalową lub 50 mm torkretu zbrojonego i zabudowa kotwi, a następnie druga 25 mm warstwa torkretu; narzucenie torkretu na ociosy tam gdzie jest potrzeba



Projektowanie parametrów torkretu

Typ górotworu	Zachowanie się górotworu	Wymagania odnośnie obudowy	Torkret
zwięzły górotwór osadowy; duże naprężenia pierwotne	lokalne odspojenia i złuszczenia; możliwe zaciskanie tunelu w łupkach oraz miękkich skałach	zabezpieczenie stropu przed opadem złuszczonych odłamków oraz kontrola zaciskania	75 mm torkretu zbrojonego, na następnie kotwie jako obudowa dodatkowa
matamorficzny lub wylewny górotwór blokowy; niewielkie naprężenia pierwotne	możliwość opadu bloków kluczowych do tunelu	stalowe kotwie sztywne lub kotwie linowe dla dużych bloków oraz zabezpieczenie powierzchni przed opadem małych bloków	50 mm torkretu zbrojonego na kontur tunelu z odsłoniętymi śladami szczelin.
górotwór osadowy, ciosy i spękania o dużej odległości; niewielkie naprężenia pierwotne	możliwość wypadnięcia lub wyslizgnięcia się bloków skalnych do wyrobiska	stalowe kotwie sztywne lub kotwie linowe dla dużych bloków oraz zabezpieczenie powierzchni przed opadem małych bloków	50 mm torkretu zbrojonego na kontur tunelu z odsłoniętymi śladami szczelin; szczególnie zabezpieczyć należy ślady ciosów



Projektowanie parametrów torkretu

Typ górotworu	Zachowanie się górotworu	Wymagania odnośnie obudowy	Torkret
metamorficzny lub wylewny górotwór spękany; duże naprężenia pierwotne	wypadanie lub poślizg bloków do wyrobiska, możliwość powstania strefy spękań wywołanych koncentracjami naprężeń	przykotwienie bloków skalnych, powstrzymanie przed opadem skał oraz wytworzenie na konturze trójosiowego stanu naprężenia	75 mm torkretu na przykotwioną siatkę stalową, lub 75 mm torkretu zbrojonego, a następnie instalacja kotwi oraz druga, 25 mm warstwę; w przypadku dużych koncentracji naprężeń grubość warstwy torkretu może być zwiększona.
spękany i uwarstwiony górotwór osadowy; duże naprężenia pierwotne	złuszczenia i odspojenia, silne zaciskanie górotworu	zapobieganie zniszczeniu górotworu	75 mm torkretu zbrojonego natychmiast po odsłonięciu; zabudowa kotwi i narzucenie drugiej 75 mm warstwy torkretu
silnie spękany górotwór wylewny lub metamorficzny; niewielkie naprężenia pierwotne	wypadanie małych bloków skalnych do wyrobiska	podtrzymanie bloków skalnych przed opadem	50 mm torkretu zbrojonego; zabudowa kotwi tak gdzie jest potrzeba

Projektowanie parametrów torkretu

Typ górotworu	Zachowanie się górotworu	Wymagania odnośnie obudowy	Torkret
spękany i uwarstwiony górotwór osadowy; niewielkie naprężenia pierwotne	rozwarstwianie się, odspajanie i opadanie warstw stropowych	powstrzymanie rozwarstwiania i odspajania się warstw	75 mm torkretu zbrojonego na ślady szczelin i konieczna zabudowa kotwi dla kontroli rozwarstwienia
silnie spękany górotwór wylewny lub metamorficzny; spękania z wypełnieniami	plastyczne zaciskanie górotworu w otoczeniu wyrobiska	powstrzymanie zniszczenia i zaciskania górotworu	100 mm torkretu zbrojonego natychmiast po odsłonięciu ; zabudowa kotwi i natryśnięcie dodatkowych 50 mm torkretu tam gdzie potrzeba
silnie spękany górotwór osadowy; szczeliny wypełnione materiałem gliniastym, duże naprężenia pierwotne	plastyczne zaciskanie górotworu w otoczeniu wyrobiska; pęcznienie materiały wypełniającego szczeliny	powstrzymanie zniszczenia i zaciskania górotworu	50 mm torkretu zbrojonego natychmiast po odsłonięciu, lekkie odrzwia stalowe z rozporami i druga warstwa torkretu; może zachodzić konieczność kotwienia lub mikropalowania wyprzedzającego i pozostawienia szczelin dyktacyjnych w torkrecie

Projektowanie parametrów torkretu

Typ górotworu	Zachowanie się górotworu	Wymagania odnośnie obudowy	Torkret
niewielkie zagrożenie tapaniami w zwięzłym górotworze; duże naprężenia pierwotne	łuszczenie, rozwarstwianie, pęknięcie i możliwość występowania zjawisk dynamicznych o niewielkim zasięgu	podtrzymanie strefy spękań i zapobieganie jej propagacji	50 do 100 mm torkretu na powierzchnię osłoniętą przykotwioną siatką stalową lub sznurowaną linami.

Projektowanie parametrów torkretu

Zasady określania miąższości torkretu według różnych autorów

Autor	Uwagi	Zasady	
Albert (1965)	wskazówki dla górotworu szwedzkiego	natychmiastowe natryskiwanie na spękany górotwór tuż po strzelaniu	grubość 30-80 mm
		grubość torkretu w przypadku obwałów stropu lub widocznych odspojień	grubość 100-150 mm
Kobler (1966)	na bazie doświadczeń z tuneli	obciążenia pionowe	grubość 150 mm w stropie
		obciążenia pionowe i poziome	grubość 150 mm w stropie i 50 do 100 mm w ociosach
Heuer (1974)	na bazie doświadczeń z tymczasowych obudów tuneli	RQD > 75 %	50 mm w stropie
		RQD od 50 % do 75 %	70-80 mm w stropie i 2 cm w ociosach
		RQD od 25 % do 50 %	80-100 mm w stropie, 70-80 mm w ociosach
		RQD < 25 %	jak wyżej i dodatkowo 20-30 mm



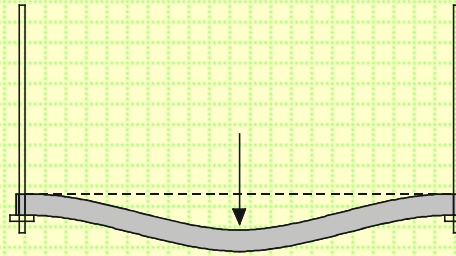
Projektowanie parametrów torkretu

- Z reguły grubość narzucanej warstwy torkretu waha się od kilku centymetrów do około 25 cm. Czasem jednak można spotkać doniesienia o grubszej warstwie torkretu – 30 cm (Stivens, 1991), 35 cm (Genshofer, 2000), czy nawet do 45 cm (Williams et al. 1999).
- Petersen i Nelson (1993) donoszą także o zastosowaniu warstwy torkretu o grubości 46 cm w rejonie portali tunelu Lafayette.
- Austriacy (Jodl i Kusterle, 1998) zalecają grubości warstw torkretu pomiędzy 10 i 40 cm.
- Chyba rekordową grubość torkretu zastosowano dla budowy sztucznego stropu dla odzyskania zatopionej w tunelu New Yeong-chuen na Tajwanie maszyny TBM (Shen et al. 2000). Zastosowano tam kilka kolejno natryskiwanych warstw o łącznej grubości 85 cm.
- Według zaleceń norweskich (Davik i Kompen, 1998) grubość warstwy torkretu zbrojonego nie może być mniejsza niż 6 cm.

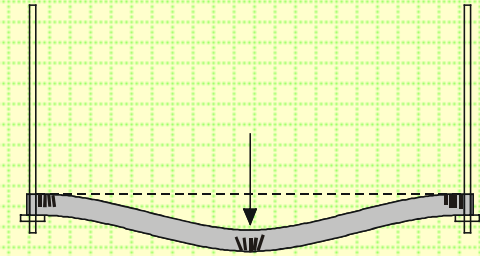


Mechanizm zniszczenia torkretu

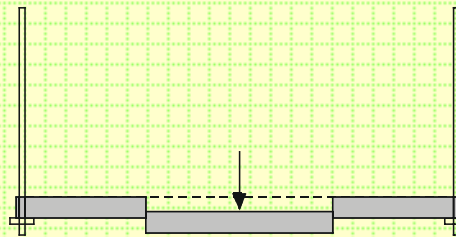
- Dla prawidłowego projektowania parametrów w torkretu niezwykle istotna jest wiedza o możliwych mechanizmach jego zniszczenia. W pracy Barreta i McCreatha (1995) przedstawiono sześć możliwych mechanizmów zniszczenia warstwy torkretu. Mechanizmy te mogą zachodzić przy założeniu, że torkret jest zastosowany razem z kotwiami.



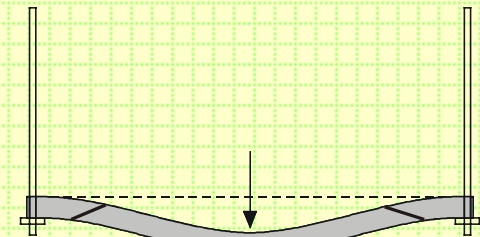
Zniszczenie przez odspojenie



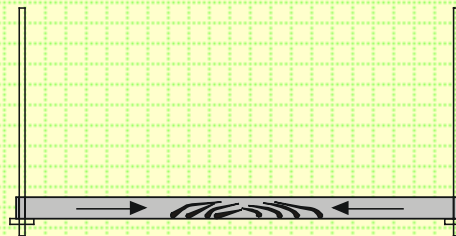
Zniszczenie przez zginanie



Zniszczenie przez ścinanie



Zniszczenie przez ścinanie i rozciąganie



Zniszczenie przez ściskanie



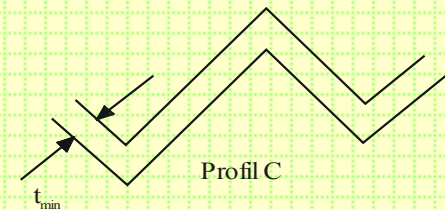
Zniszczenie przez rozciąganie

Zastosowanie torkretu

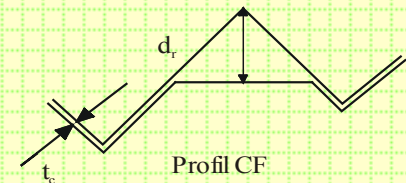
Przy projektowaniu grubości warstwy torkretu warto także wrócić uwagę na nieregularności powierzchni konturu wyrobiska:

- Typ 1 to powłoka o minimalnej grubości (RE – *rock excavation*) – cienka, równomierna warstwa torkretu.
- Typ 2 to powłoka o minimalnej grubości wraz z częściowym wypełnieniem nierówności powierzchni (CF – *coated and filled surface*)
- Typ 3 to całkowite wypełnienie nierówności (F – *fill*) dla otrzymania w miarę gładkiej powierzchni.
- Typ 4 to całkowite wypełnienie nierówności i uzyskanie (CF – *coverd and filled surface*) pokrycia konturu minimalnej grubości torkretu.
- Typ 5 to całkowite wypełnienie nierówności oraz uzyskanie pożądanego, gładkiego profilu wyrobiska (SE – *specified excavation geometry*).

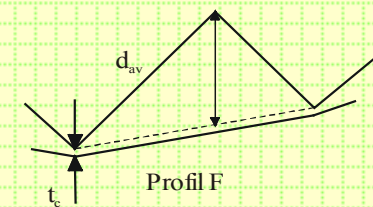
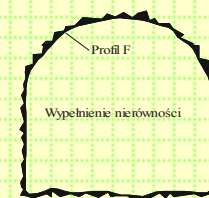
Typ 1 - Powłoka



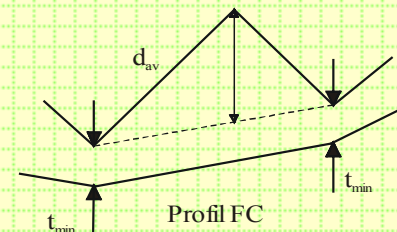
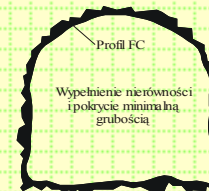
Typ 2 - Powłoka i wypełnienie



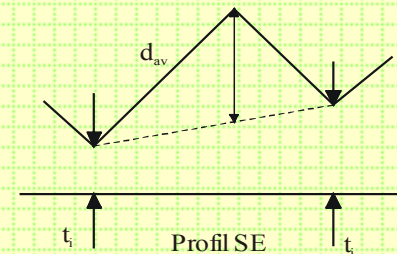
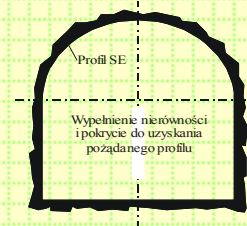
Typ 3 - Wypełnienie



Typ 4 - Wypełnienie i pokrycie



Typ 5 - Specyficzny profil dla wyrobisk



Numeryczne modelowanie torkretu

- Na ogół torkret jest numerycznie modelowany za pomocą elementów belkowych. Z reguły dla określenia parametrów torkretu wystarczy moduł Younga oraz grubość warstwy (FLAC, 2000; Chryssanthakis et al. 1997).
- W różnych publikacjach można znaleźć próby opracowania modeli konstytutywnych dla torkretu. Przykładowo w pracy Swobody i Moussa (1992) przedstawiono elementy belkowe dla modelowania torkretu, które uwzględniają jego sprężysto-lepko-plastyczne zachowanie. Podobne próby podjęto także w pracach Aydana et al. (1992), Sezaki et al. (1992) oraz Eberhardsteiner et al. (1994). W pracy Chryssanthakisa et al. (1997) przyjęto dla torkretu moduł Younga 15 GPa i liczbę Poissona 0.15.
- Oreste i Pelia (1997) i Pelia et al. (1998) podają ogólny wzór na określanie czasowo-zależnego modułu Younga w postaci:

$$E(t) = E_{28} \left(1 - e^{-\beta t}\right)$$

E_{28} - moduł Younga torkretu po 28 dniach

β - stała czasowa

$$E_{28} = 28000 \text{ MPa}; \beta = 0.0187$$

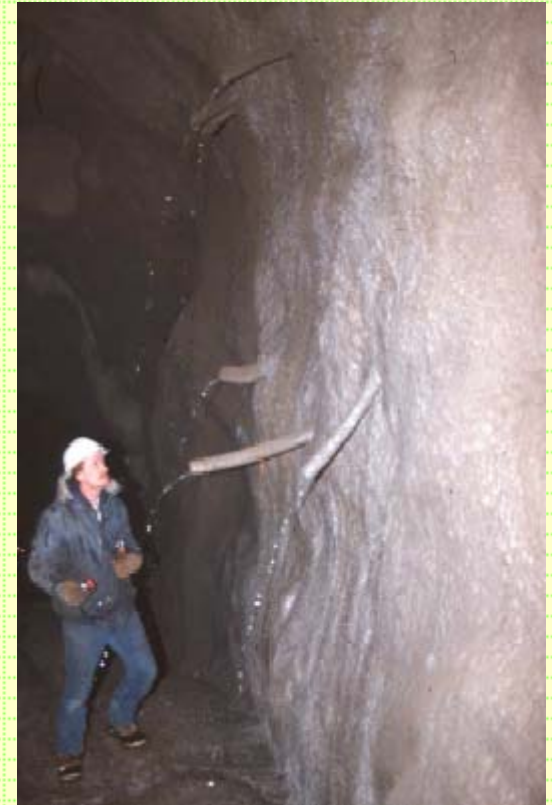


Zastosowanie torkretu

- Z kolei Sezaki et al. (1992) podają inne wartości stałych w zależnościach na moduł Younga i liczbę Poissona w funkcji czasu:

$$E(t) = 5000(1 - e^{-0.42t})$$

$$\nu(t) = 0.18 + 0.32e^{-5.6t}$$



Modelowanie numeryczne torkretu

- Dla określenia oddziaływania torkretu, jako elementu obudowy tunelu, na górotwór przeprowadzono obliczenia numeryczne z zastosowaniem programu Metody Różnic Skończonych FLAC v. 4.0. Elementy belkowe w programie FLAC są dwuwymiarowe i posiadają trzy stopnie swobody (przemieszczenie w kierunku osi x, przemieszczenie w kierunku osi y oraz rotację) w każdym węźle. Elementy belkowe mogą być łączone między sobą oraz z innymi elementami. Są one używane do modelowania elementów o ograniczonej wytrzymałości na zginanie. Mogą one być używane do modelowania różnych typów obudowy – począwszy od zastrzałów, a skończywszy na betonie lub torkrecie.
- Dla analizy mechanizmów współpracy torkretu z górotworem rozpatrzono problem obudowy owalnego tunelu o wysokości 10.35 m i szerokości 8.12 m, którego strop zlokalizowany jest na głębokości 25 m.
- Problem rozpatrzono w płaskim stanie odkształcenia. Na wszystkich krawędziach tarczy przyjęto warunki przemieszczeniowe. Na obu bocznych założono zerowe przemieszczenia poziome, zaś na dolnej zerowe przemieszczenia pionowe. Tarczę obliczeniową obciążono ciężarem własnym wynikającym z grawitacji. Ze względu na symetrię zagadnienia w obliczeniach uwzględniono tylko połowę tarczy, która miała wysokość 100 m i szerokość 60 m.



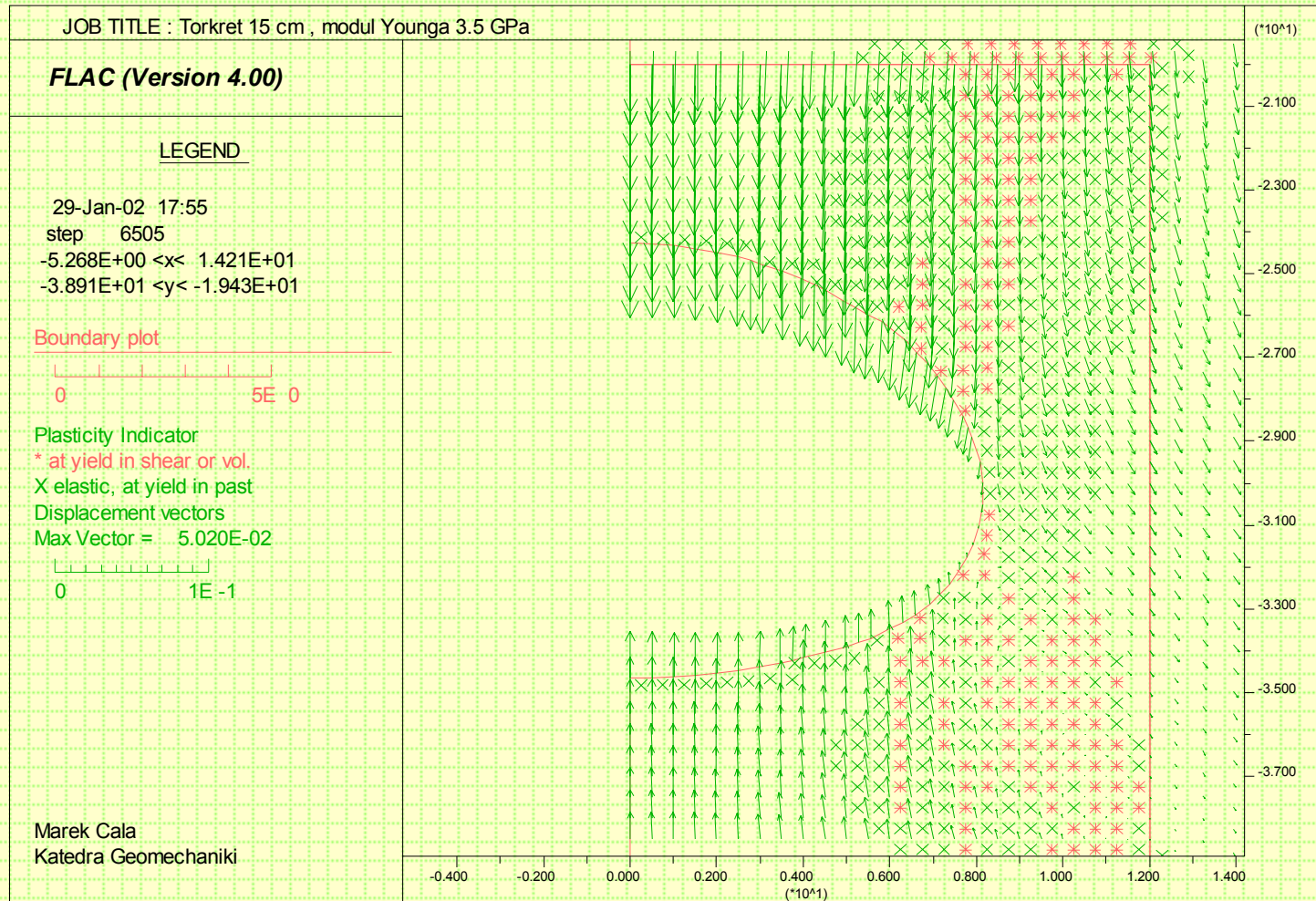
Modelowanie numeryczne torkretu

Parametr	Wartość
Wymiary tarczy	100 m x 60 m
Warunki brzegowe	Mieszane, przemieszczeniowe
model ośrodka	sprężysto-plast. C-M
Parametry ośrodka	
Gęstość objętościowa, kg/m ³	2500
Moduł Younga, MPa	3000
Liczba Poissona	0.25
Kohezja, MPa	0.7
Kąt tarcia wewnętrznego, stopnie	30
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	0.7
Parametry torkretu	
Grubość warstwy, cm	5, 10, 15, 20, 25, 30
Moduł Younga torkretu, MPa	3500, 5000, 8700
Liczba Poissona torkretu	0.25
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, MPa	30



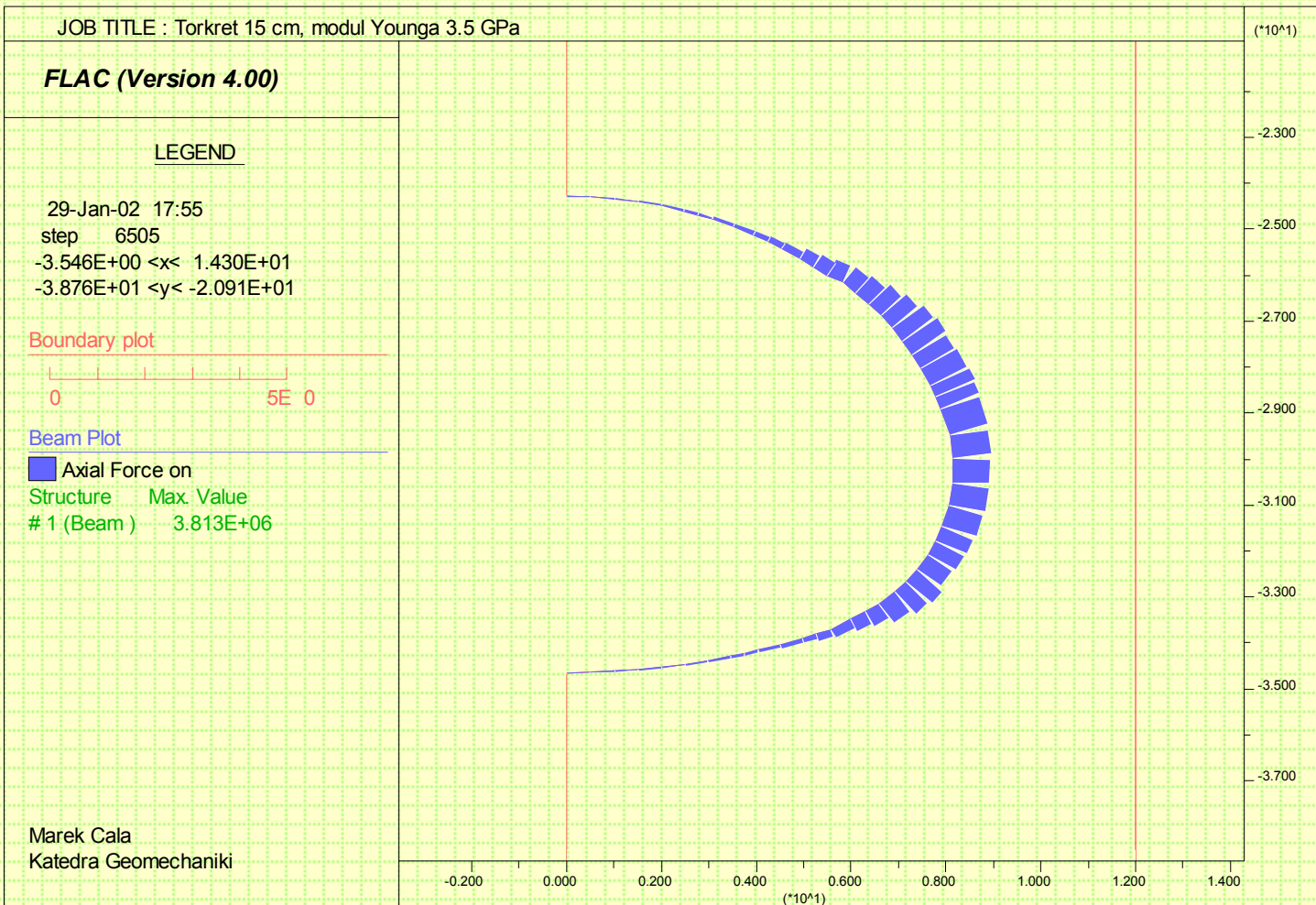
Modelowanie numeryczne torkretu

Wektory przemieszczeń i strefy uplastycznienia wokół tunelu, grubość torkretu 15 cm, moduł Younga 3.5 GPa



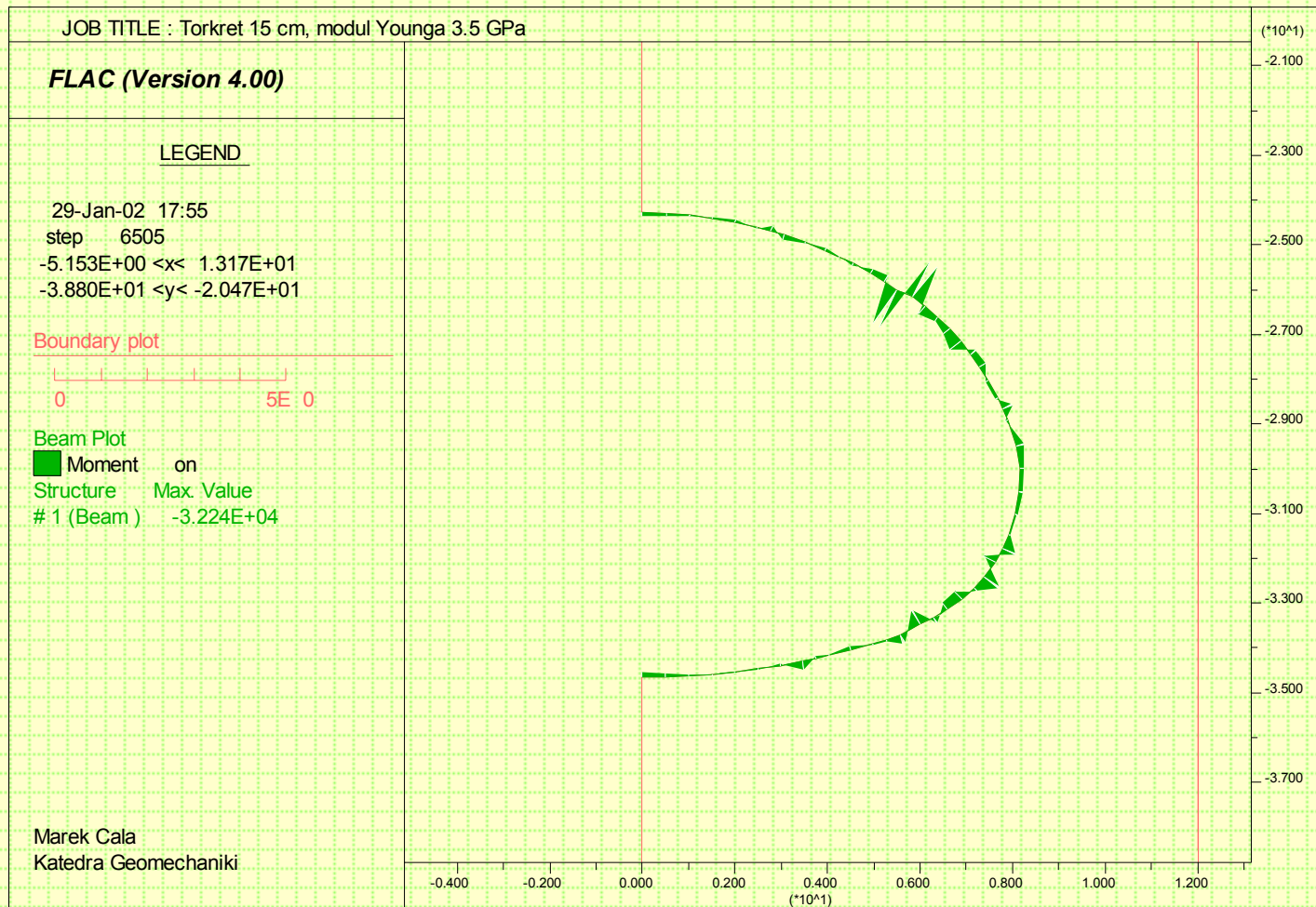
Modelowanie numeryczne torkretu

Siły osiowe w elementach belkowych grubość torkretu 15 cm, moduł Younga 3.5 GPa



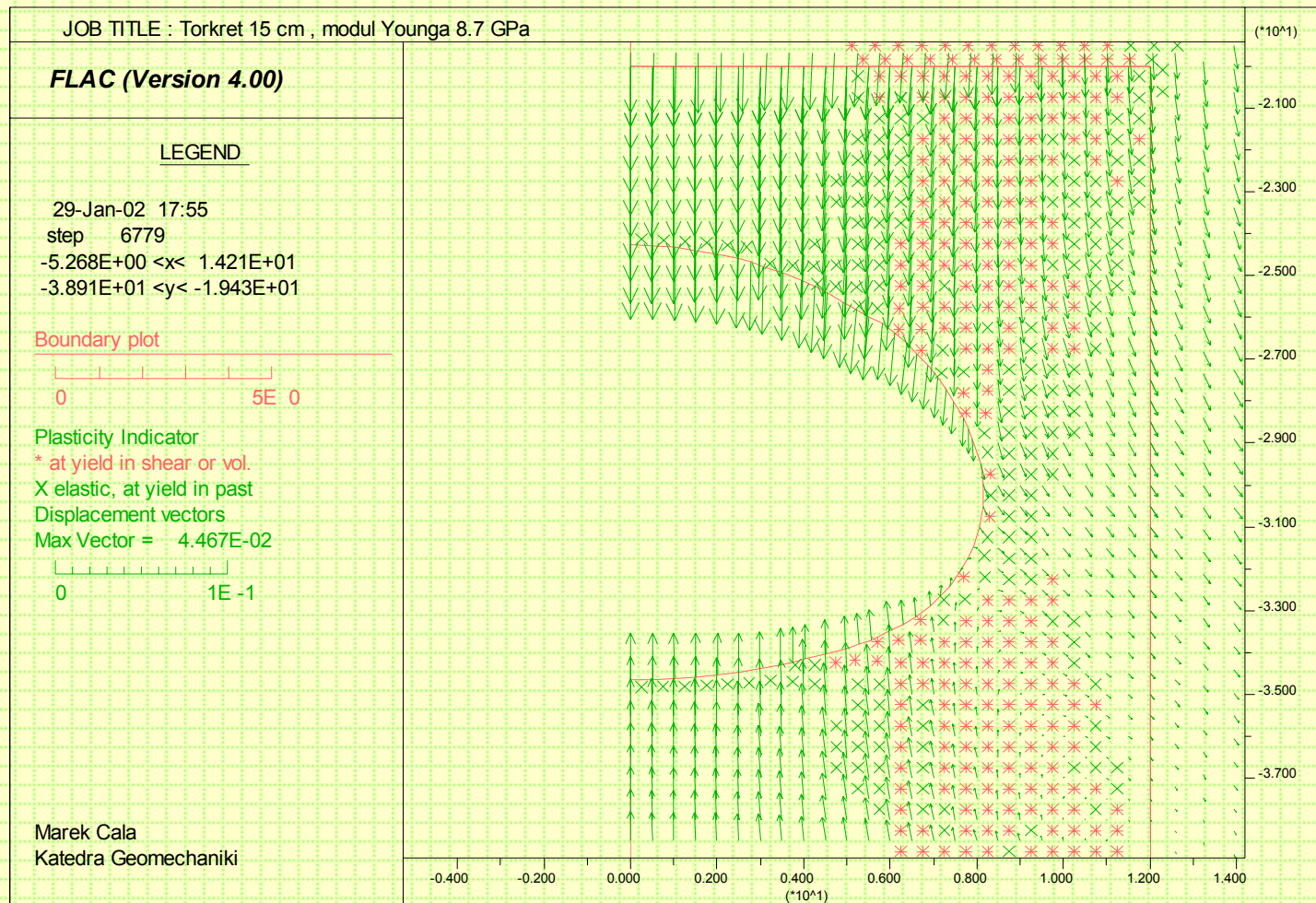
Modelowanie numeryczne torkretu

Momenty gnące w elementach belkowych grubość torkretu 15 cm, moduł Younga 3.5 GPa



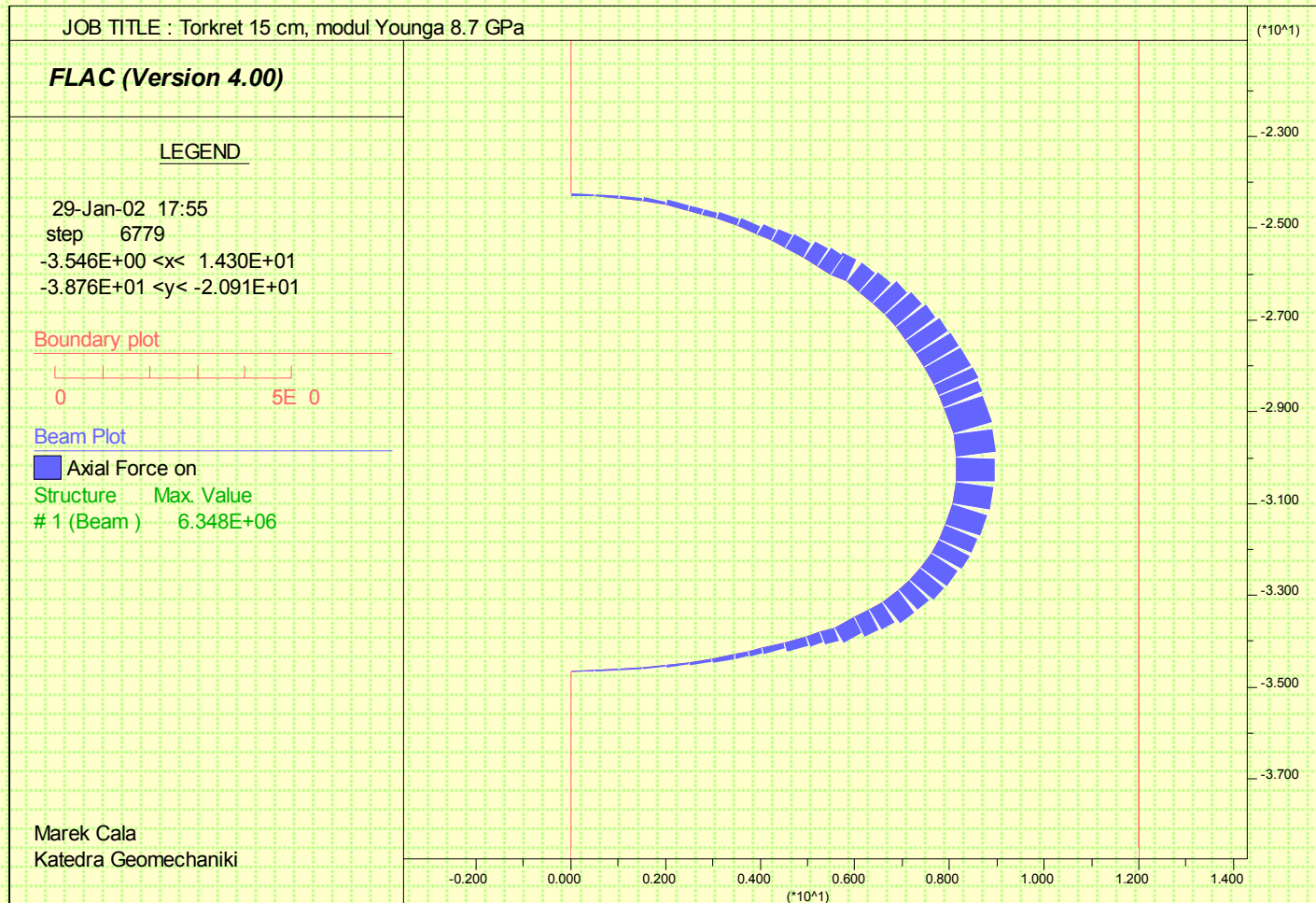
Modelowanie numeryczne torkretu

Wektory przemieszczeń i strefy uplastycznienia wokół tunelu, grubość torkretu 15 cm, moduł Younga 8.7 GPa



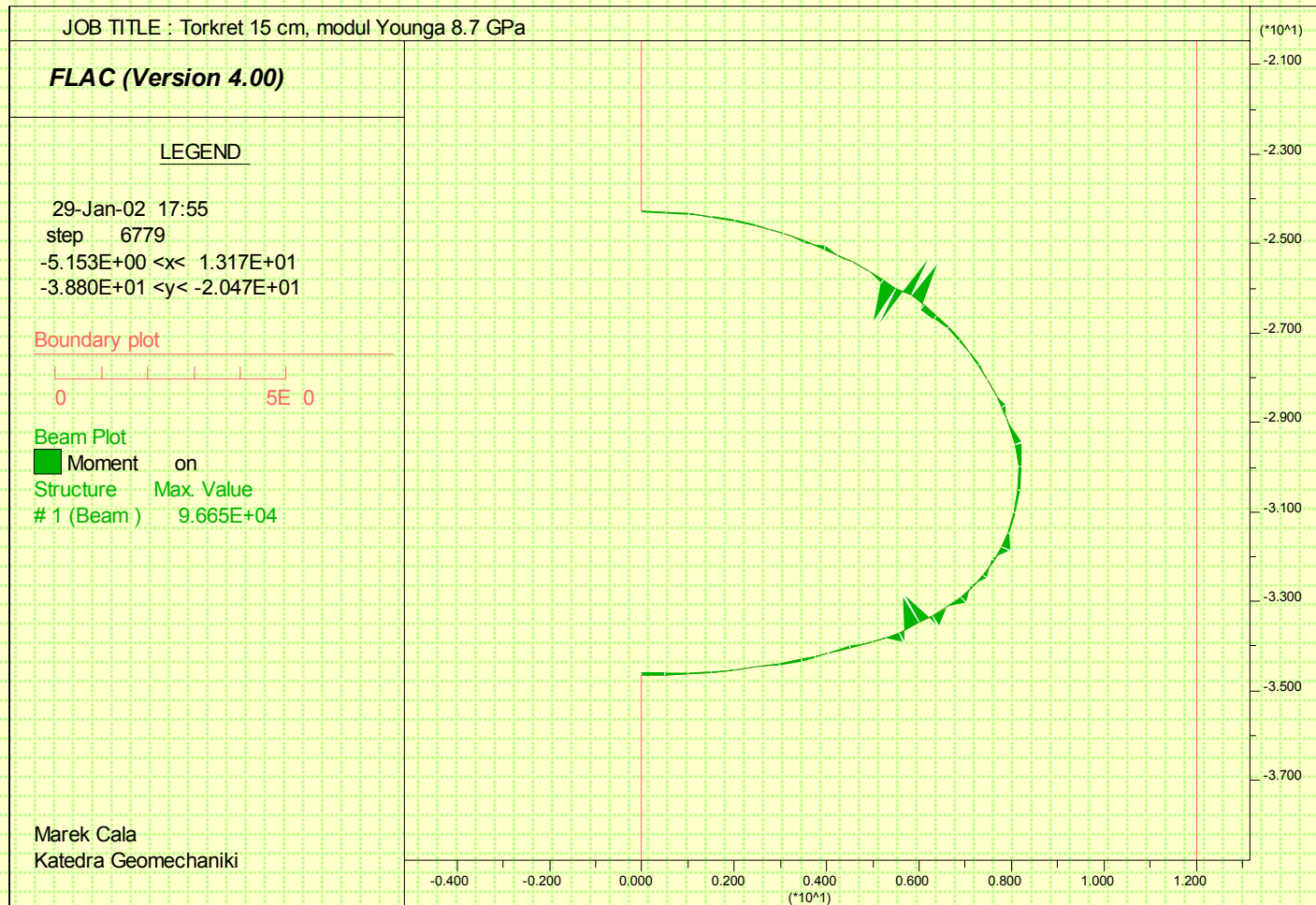
Modelowanie numeryczne torkretu

Siły osiowe w elementach belkowych grubość torkretu 15 cm, moduł Younga 8.7 GPa



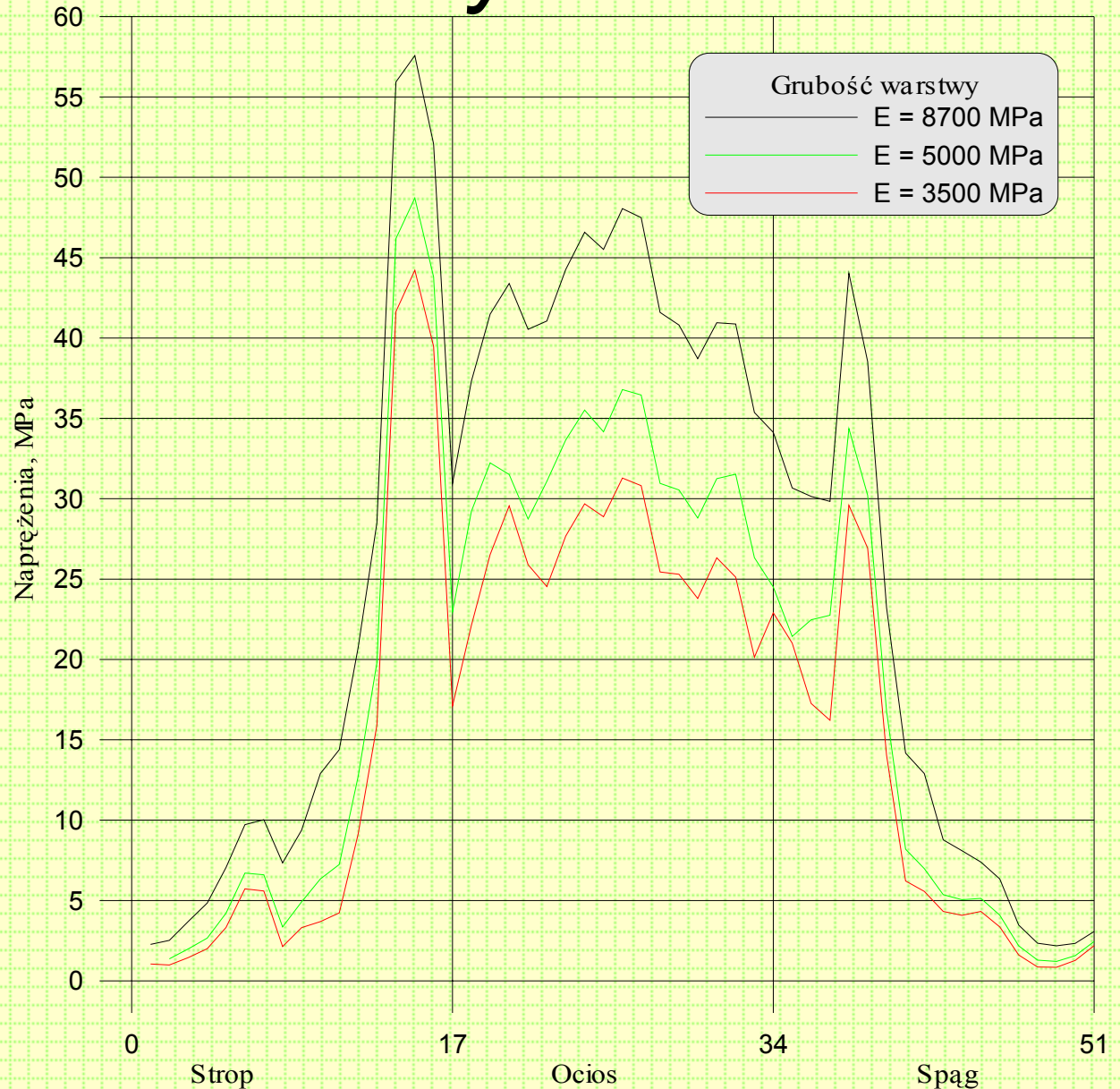
Modelowanie numeryczne torkretu

Momenty gnące w elementach belkowych grubość torkretu 15 cm, moduł Younga 8.7 GPa
8.7 GPa



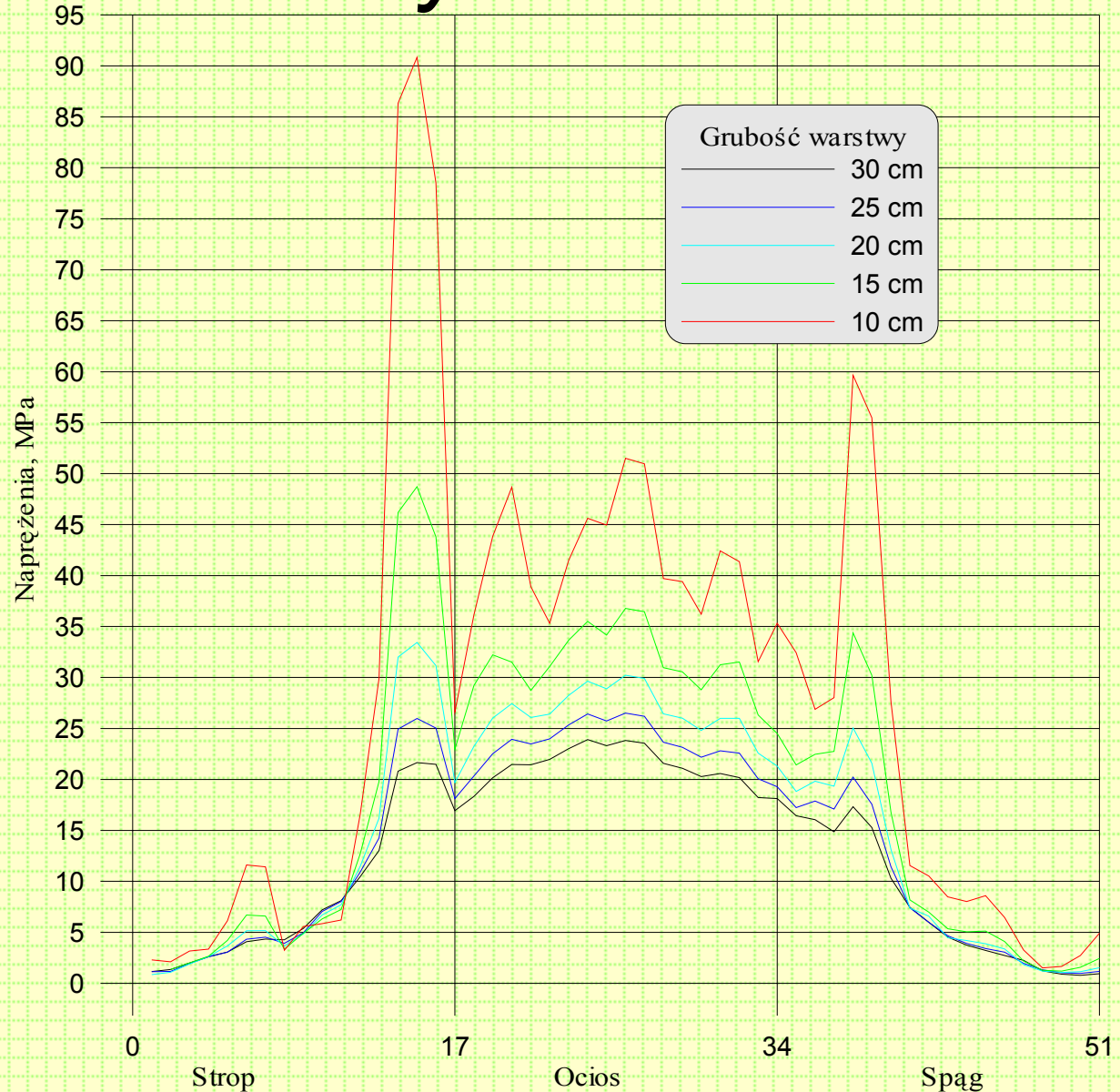
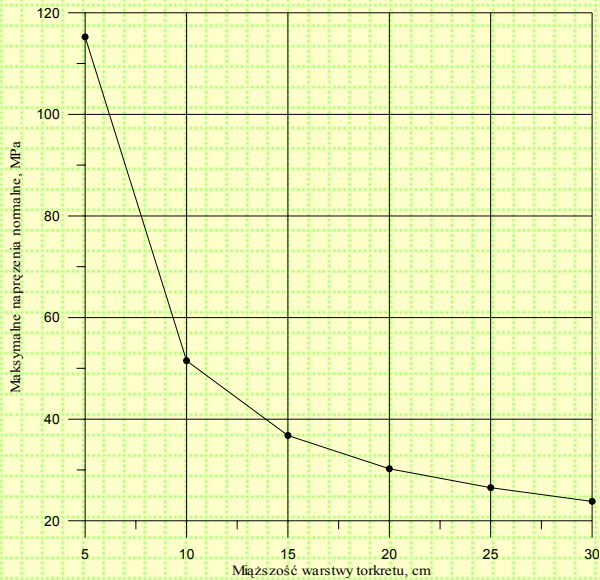
Modelowanie numeryczne torkretu

Dla lepszego zobrazowania wyników obliczeń wszystkich analizowanych w zagadnieniu pierwszym modeli na rysunku przedstawiono naprężenia sumaryczne (wynikające z uwzględnienia osiowych sił ściskających i momentów gnących) w funkcji modułu Younga.



Modelowanie numeryczne torkretu

Na rysunku przedstawiono naprężenia sumaryczne w funkcji grubości torkretu.



Modelowanie numeryczne torkretu

- W miarę wzrostu modułu Younga torkretu rosną wartości normalnych naprężeń ściskających w elementach belkowych. Dla modułu Younga równego 3.5 GPa maksymalne naprężenia ściskające wyniosły 31.3 MPa, dla modułu Younga 5 GPa, 36.8 MPa, zaś dla modułu Younga 8.7 GPa 48 MPa.
- W miarę wzrostu grubości torkretu maleją wartości naprężeń ściskających w elementach belkowych. Może to być pewnym wyznacznikiem dla celów projektowych. Załóżmy przykładowo, że wytrzymałość na ściskanie torkretu jest równa 30 MPa. W takim razie należałoby zastosować warstwę torkretu o grubości około 25 cm dla zapewnienia stateczności tunelu.
- Największy gradient spadku naprężeń występuje dla grubości 5 i 10 cm. Maksymalne naprężenia spadają od 115 MPa do 51.5 MPa. Dalej, w miarę zwiększania grubości torkretu gradient spadku naprężeń istotnie się zmniejsza. Można więc przypuszczać, że dla każdej analizowanej sytuacji istnieje pewna optymalna grubość warstwy torkretu zapewniająca stateczność wyrobiska.
- Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy przyjęciu kilku założeń upraszczających. Nie brano pod uwagę zależności parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych torkretu od czasu. Założono, że elementy belkowe symulujące torkret mają stały moduł Younga.



Torkret - podsumowanie

- Na podstawie analizy literatury światowej, przedstawionych powyżej rozważań oraz obliczeń numerycznych można stwierdzić, że torkret ma ogromną przyszłość jako jeden z podstawowych typów obudowy dla górnictwa i budownictwa podziemnego. Davik i Kompen (1998) stwierdzają, że podczas stosowania torkretu w Norwegii w latach 1980-1998, koszty zmniejszyły się o około 35 %, pomimo znacznej poprawy jakości torkretu oraz urządzeń do jego natryskiwania.
- Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwalają stwierdzić, że elementy belkowe dość dobrze mogą symulować współpracę torkretu z górotworem otaczającym budowlę podziemną bądź tunel. Na podstawie analizy naprężeń normalnych występujących w elementach belkowych symulujących torkret można określić podstawowe parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe torkretu.

