



TĚŽKÉ BETONY A SPECIÁLNÍ STÍNÍCÍ BETONY | HEAVY CONCRETE AND SPECIAL SHIELDING CONCRETE

LEONARD HOBST, JAN JAŠEK, LUBOMÍR VÍTEK

Beton je výborným materiálem pro ochranu před účinky ionizujícího záření. Vlastnosti betonu lze vhodně modifikovat podle výběru použitého kameniva, jak proti záření gama, tak proti neutronovému záření. | Concrete is an excellent material for shielding against ionizing radiation. The properties of concrete against gamma and neutron radiation can be modified according to the aggregate used.

Pod pojmem těžké betony rozumíme betony, jejichž objemová hmotnost je větší než $\rho = 2\,600\text{ kg/m}^3$. Vysoké objemové hmotnosti betonu je dosaženo použitím vhodného těžkého kameniva. Taková těžká kameniva mohou být buď přírodní, nebo umělá.

Těžké betony se dají použít jako „zátěžové“ tam, kde je zapotřebí koncentrovat velkou hmotnost na malém objemu. Mohou to být např. protizávaží výtahů či zvedacích mostů, nebo závaží na traktorech, která mají nahradit běžně používanou litinu aj. Největší rozšíření a význam však těžké betony mají jako materiál pro stínění zdrojů ionizujícího záření – **stínící betony**. Právě u nich se projevují protikladné požadavky. Stínící betony by měly být homogenní, aby stejnoměrně zeslabovaly ionizující záření. Těžké složky betonu však mají tendenci k segregaci. Je proto třeba zvolit optimální technologický předpis pro každý typ kameniva a v průběhu výroby stínící konstrukce zvolit vhodnou metodu kontroly, která by zajistila předepsané objemové hmotnosti těžkého betonu.

Pokud mluvíme o „stínících betonech“, míníme tím obvykle stínění proti účinkům záření gama a vysokoenergetického fotonového záření cca do 20 MeV s vysokým dávkovým příkonem ionizujícího záření. Tato záření jsou vskutku zeslabována v závislosti od „měrné“ hmotnosti stínícího materiálu.

U jaderných reaktorů a u zdrojů brzdného záření vysokých energií se však kromě záření gama tvoří ještě neutronové záření, kde principy jeho zeslabování jsou rozdílné od principu zeslabování záření gama. Neutronové záření je zeslabováno na jádrech lehkých prvků a neúčinnější jsou právě jádra vodíku (H_2) a to právě ve formě, kdy jsou ve sloučenině s kyslíkem jako voda (H_2O). (Kromě vody to mohou být ještě další látky, kde je vodík vázán, jako plastické hmoty, např. PE, nebo parafín). Ve své podstatě i běžné betony včetně těžkých betonů obsahují do jisté míry vázanou vodu, a tak jsou i stínícími materiály proti neutronovému záření.

V některých případech je však vyžadováno, aby stínící vlastnosti betonu nepoklesly ani při vyšších teplotách (jaderné reaktory). V těchto případech je nutno do betonu přidávat speciální kamenivo, které obsahuje vázanou vodu i při vyšších teplotách. K takovým materiálům patří např. serpentinity.

Pro záchyt již pomalých neutronů je pak výhodné do betonů přidávat bór, jehož množství obsažené v betonu je nutno velmi přesně dávkovat.

KONSTRUKCE Z TĚŽKÉHO BETONU

Dosud nejrozšířenější konstrukce, kde se využívá těžkých betonů, jsou stínící konstrukce lineárních urychlovačů používaných jak v defektoskopii, tak při léčení onkologických onemocnění, **obr. 1**.

U těchto konstrukcí rozeznáváme obvykle dvě oblasti stínění. Tu oblast, kam dopadá účinný svazek záření, nazýváme **primární stínění**, **obr. 2**. Na zbývající část konstrukce dopadá odražené záření od předmětů v ozařovně a únikové záření z vlastního ozařovače a tuto oblast konstrukce nazýváme **sekundární stínění**. Dávkový příkon účinného svazku může být až 1 000krát větší než sekundární záření. Při návrhu stínících konstrukcí by proto vycházel velký nepoměr tloušťek mezi primárním a sekundárním stíněním, pokud by bylo zhotoveno ze stejného materiálu. V tomto případě je proto výhodné navrhnout primární stínění z těžkého betonu, a tím redukovat jeho tloušťku. Zvláště účelné je však těžké betony navrhovat při rekonstrukčních pracích, zejména při realizaci vestaveb, u kterých je možnost volby tloušťky stěny limitována stávajícím dispozičním řešením.

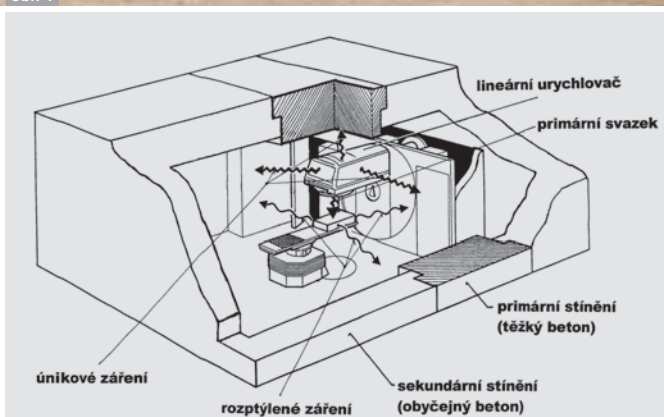
Podstata těžkého betonu je založena na použití kameniva o vysoké specifické hmotnosti jako jedné z jeho výrobních složek. Nejčastěji to bývá drcený baryt, mohou to však být i různé železné rudy nebo doplňkově litinová drť, popř. sekane kousky železa. Objemová hmotnost těžkého betonu závisí na množství těžkých látek v kamenivu a musí být pro každé naleziště pečlivě stanovena zvlášť. Obecně se dá tvrdit, že se vzrůstající měrnou hmotností kameniva prudce roste i jeho cena, která se projeví na výsledné ceně těžkého betonu. Orientační cena 1 m^3 těžkého betonu v závislosti na jeho konečné objemové hmotnosti je uvedena na **obr. 3**.

TYPY TĚŽKÝCH BETONŮ

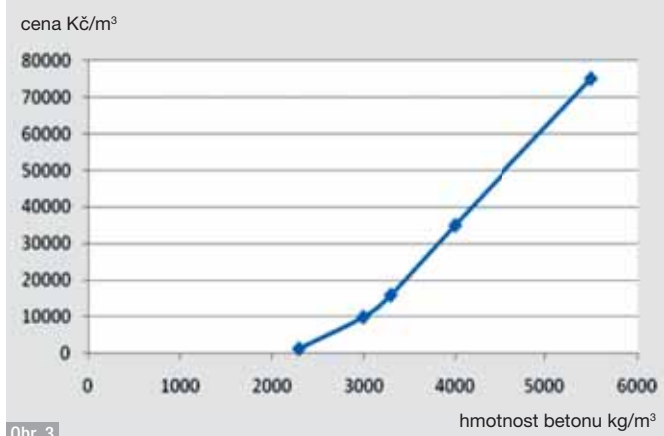
Podle převažujícího druhu použitého těžkého kameniva můžeme těžké betony rozdělit do následujících typů:



Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3

Barytový beton

Samotný barytový beton je vhodný především pro stínění rentgenových pracovišť, s rentgeny do energie 500 kV. Pro vyšší energie záření se směs barytového betonu doplňuje litinovou drtí pro zvýšení objemové hmotnosti, nebo se používá jiný druh kameniva.

Jako kamenivo se používá baryt (těživec) BaSO_4 , který je v kamenivu obsažen v různé koncentraci. Koncentrace BaSO_4 u kvalitního barytu dosahuje 75 %. V současné době jsou naleziště bohatá na koncentrovaný BaSO_4 ve střední Evropě poměrně vyčerpána. Baryt tříděný podle požadavků odběratele se těží v Rudňanech u Spišské Nové Vsi

(Slovenská republika). Pro rok 2012 činí cena barytového kameniva 130 EUR/t. Velmi čisté barytové kamenivo (90 % BaSO_4) je možné dovážet i z Číny. Měrná hmotnost kameniva dosahuje až 4 200 kg/m^3 . Cena je však vlivem dopravních nákladů vyšší než u slovenského kameniva. Beton zhotovený z barytu s velkou koncentrací BaSO_4 může mít průměrnou objemovou hmotnost až $\rho = 3\,500\text{ kg/m}^3$.

Limonitový beton

Limonit (hnědel) je směs oxidů a hydroxidů železitých ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), má nahnědlou barvu. Jednou z jeho hlavních složek je goethit. Limonit je konečným produktem zvětrávání železných rud. Obsah železa kolísá od 35 do 40 hmotnostních %. Beton zhotovený z limonitu dosahuje objemové hmotnosti $\rho = 3\,000\text{ kg/m}^3$.

Naleziště limonitu jsou ve Slovenském rudohoří, v Lotrinsku, na Kerčském poloostrově a ve Španělsku.

Hematitový beton

Hematit (krevel) je oxid železitý (Fe_2O_3), cihlově červené barvy. Je to vydatná železná ruda, obsahující až 70 hmotnostních % železa. Beton zhotovený z hematitu dosahuje objemové hmotnosti až 3 500 kg/m^3 .

Naleziště hematitu u nás jsou Horní Blatná, Hradiště u Kadaně, Míšek pod Brdy a Ejovice. Ve světě jsou rozsáhlá naleziště v Brazílii, Krivém Rogu na Ukrajině a v USA.

Magnetitový beton

Magnetit (magnetovec) je oxid železno-železitý (Fe_3O_4), je černé barvy. Je to nejbohatší železná ruda (obsahuje až 72 % železa). Jeho měrná hmotnost je až 5 200 kg/m^3 . Beton zhotovený z magnetitu dosahuje objemové hmotnosti 3 400 až 4 000 kg/m^3 .

Naleziště magnetitu u nás jsou ve Vlastějovicích nad Sázavou, v Malešově u Kutné Hory a v Přísečnici v Krušných horách. Ve světě jsou významná naleziště Itabira v Brazílii, Dielette ve Francii a Kirunowara ve Švédsku.

Ilmenitový beton

Ilmenit je oxid železnotitanitický ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) – titanová ruda, vytváří černé tabulky. Je o 12 až 15 % lehčí nežli jiné železné rudy. Beton zhotovený z ilmenitu dosahuje objemovou hmotnost $\rho = 3\,500\text{ kg/m}^3$.

K významným nalezištím ilmenitu patří Egersund v Norsku a Miass na Urale.

Ferofosforový beton

Ferofosfor (směs FeP , Fe_2P), vzniká jako vedlejší produkt při výrobě fosforu. Vzhledem ke své vysoké objemové hmotnosti lze dosáhnout objemové hmotnosti betonu až $\rho = 4\,800\text{ kg/m}^3$.

Železo-portlandský velmi těžký beton

Kamenivo tohoto betonu je nahrazeno litinovou drtí nebo sekaným železem. Sekané železo může být i vedlejším produktem při výrobě šroubů, fitinků a jiných výrobků ze železa. Tento beton se však vyrábí velmi těžko a těžko se zpracovává. Železo-portlandské betony dosahují objemové hmotnosti $\rho = 5\,000$ až 6 000 kg/m^3 .

Uranový beton

Ochuzený uran (DU – depleted uranium) se nachází ve velkém množství jako odpadní materiál ve státech, které se zabývají výrobou obohaceného paliva pro jaderné elektrárny. Jednou z možností jeho využití je použít vhodně upraveného oxidu uranu jako kameniva do betonu. Toto kamenivo se vyrábí v USA pod názvem DUAGG a má objemovou hmotnost $\rho = 8\,800 \text{ kg/m}^3$. Z něj vyrobený beton má název DUCRETE a dosahuje objemové hmotnosti $\rho = 6\,400 \text{ kg/m}^3$. Tento beton je v USA určen pro výrobu kontejnerů pro uskladnění vyhořelého paliva a vysoce radioaktivních odpadů v úložistiích.

Pozn.: Ochuzený uran je v naší zemi pokládán za štěpný materiál, který podléhá přísné evidenci a kontrole, a tak je malá pravděpodobnost, že by se přednosti DUCRETE mohly ověřit i v našich podmínkách.

Speciální stínící betony

Kromě zdrojů záření gama se stále častěji jak v průmyslu, tak ve zdravotnictví setkáváme s požadavky na stínění buď jen neutronového zdroje záření (např. využívání kalifornia Cf 252 v brachyterapii), anebo na kombinaci neutronového záření a záření gama. Vyhovující stínící materiál proto musí obsahovat jak prvky s nízkým atomovým číslem Z pro odstínění neutronového záření, tak prvky s vysokým Z pro odstínění primárního záření gama ze zdroje a sekundárního záření ze zachytu neutronů. Jako účinný stínící prostředek proti tomuto kombinovanému záření se jeví vhodně modifikovaný beton specifického složení.

Nejnámější betony pro odstínění neutronového záření jsou betony serpentinitové a boritové.

Serpentinitový beton

Serpentinitové horniny obsahují azbest ($3 \text{ MgO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$), který je schopen dlouhodobě uchovávat svoji krystalizační vodu až do teploty $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Jako kamenivo lze však použít pouze takový serpentinit, který tvoří krátká vlákna. Kvalitní azbest s dlouhými vlákny nelze pro účely stínění používat, neboť neumožňuje dokonalé zpracování betonu. Serpentinitové kamenivo se používá v případech, kdy se předpokládá vnitřní teplota betonu vyšší než $95 \text{ }^\circ\text{C}$, což se vyskytuje především u jaderných reaktorů. Výhodnost aplikace serpentinitového betonu pro stínění před neutronovým zářením je tedy dána těmito charakteristikami:

- velkým obsahem vázané vody
- odolností proti vysokým teplotám

Objemová hmotnost serpentinitového betonu je $2\,100 \text{ kg/m}^3$, tedy menší než u klasického betonu, a proto i jeho stínící účinky proti záření gama jsou nižší. Stínící účinky proti neutronovému záření jsou však podstatně lepší než u klasického betonu. Proti kombinovaným zdrojům záření lze serpentinitový beton upravit přidáním těžkých frakcí kameniva nebo litinovou drtí.

Boritový beton

Beton z těžkého kameniva a kameniva s obsahem vodíku zeslabuje záření gama a rychlé neutrony. Je však nutno ještě dosáhnout zachytu tepelných neutronů bez následného vzniku vysokoenergetického sekundárního záření gama. K tomu je nutno do betonu přidat prvky, které mají velký absorpční průřez pro tepelné neutrony s následnou emisí pouze nízkoenergetického záření gama.

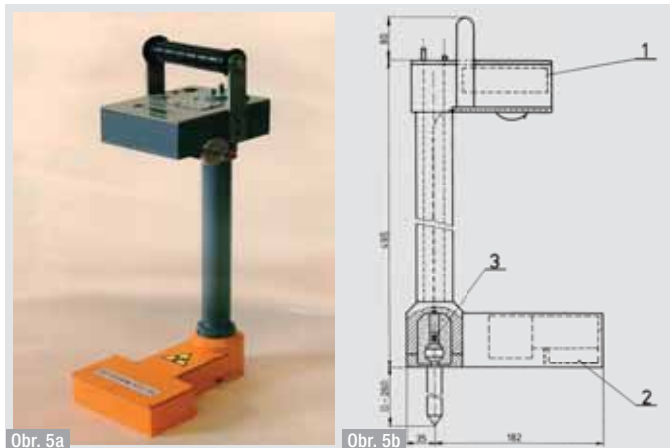
Vyhovujícím prvkem je izotop ^{10}B , který je obsažen v horninách, anebo se přidává jako umělá přísada (je ho obsaženo 19 % v přírodním bóru). Bór může být přidáván do obyčejného a těžkého betonu různými způsoby. Nejlépe je přidávat bór ve formě písku o velikosti zrna 0,5 až 2,5 mm. Doporučuje se podíl 0,9 až 1 % bóru vztaheno na hmotu betonu. S ohledem na stínící účinky není zvyšování obsahu bóru nad 1,5 % efektivní, navíc narůstají problémy s tuhnutím betonu.

VÝROBA, UKLÁDÁNÍ A ZPRACOVÁNÍ TĚŽKÝCH BETONŮ

Těžké betony mají obecně jiné reologické vlastnosti než „obyčejné betony“. Projevuje se to na celém postupu od jejich výroby až po proces zpracování.



Obr. 4



Obr. 5a

Obr. 5b

Obr. 1 Pohled na dokončenou stavbu stínící konstrukce lineárního urychlovače (LU) | Fig. 1 View to the completed shielding construction of a linear accelerator

Obr. 2 Oblasti primárního a sekundárního stínění LU | Fig. 2 Areas of primary and secondary shielding of the linear accelerator

Obr. 3 Graf nárůstu ceny těžkého betonu v závislosti od jeho objemové hmotnosti | Fig. 3 Graph of increase of the price of heavy concrete depending on its volume weight

Obr. 4 Průběh výstavby stínící konstrukce LU | Fig. 4 Process of construction of the shielding structure of the linear accelerator

Obr. 5 a) Radiční hutnoměr VUT-IX, b) schéma radičního hutnoměru, 1 – vyhodnocovací elektronika, 2 – GM – detektory záření, 3 – zdroj záření (Cs 137, A = 300 MBq) | Fig. 5 The VUT model IX radiation density gauge, b) the radiation density gauge – description, 1 – electronics, 2 – GM – detectors, 3 – radiation source (Cs 137, A = 300 MBq)

Výroba těžkého betonu může být zajištěna v centrálních betonárnách, ale dávkování na jednotlivé záměsi musí být nižší, aby nebyla betonárna přetěžována. Stejně při přepravě těžkého betonu autodomíchávači musí být brán zřetel na jeho větší objemovou hmotnost a dbát na to, aby autodomíchávače přepravovaly povolené zatížení. Betony do objemové hmotnosti cca 3 200 kg/m³ jsou s obtížemi čerpatelné, **obr. 4**.

V některých případech je výhodné vyrábět těžký beton přímo na staveništi v mobilních betonárnách a dopravovat čerstvý beton bádii. Zde pak občas dochází k problémům při vyprazdňování badií, a proto jsou k nim často připevňovány příložné vibrátory, které po zapnutí usnadňují jejich vyprazdňování.

Hutnění těžkých betonů se provádí nejčastěji vysokofrekvenčními ponornými vibrátory, po vrstvách cca 400 mm betonu. Obsluha vibrátorů musí být vyškolená tak, aby při zpracování čerstvého betonu nedocházelo k rozměšování a segregaci těžkého kameniva.



Obr. 6

KONTROLA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI TĚŽKÝCH BETONŮ

Bezpečnost konstrukcí se zdroji ionizujícího záření závisí především na homogenitě stínícího materiálu. Na kontrolu homogenity stínících konstrukcí byl kladen důraz již od dob výstavby naší první jaderné elektrárny A-1 v Jaslovských Bohunicích (nyní Slovenská republika).

Pro stanovení homogenity stínících betonů lze využít různých metod. Jako příklad lze uvést systematický a průběžný odběr vzorků a jejich vyhodnocení v laboratoři, nebo ultrazuková kontrola na hotové konstrukci. Většina těchto metod však neumožňuje okamžitou reakci na chybný postup při betonáži. Jako optimální se ukázalo využití přístrojů, založených na měření zeslabení záření gama po průchodu zkoušeným materiálem – radiometrických přístrojů.

Tyto přístroje vyrábí řada firem po celém světě a dají se využít nejen na kontrolu homogenity čerstvého betonu, ale i v ostatních odvětvích národního hospodářství (zhuštění zemin



Obr. 7

Při výstavbě stínících konstrukcí je častý požadavek, aby betonáž stínících stěn probíhala „na jeden zátah“ **bez pracovních spár**. Betonáž tedy probíhá bez přestávky i více než 24 h a v tomto případě je nutno dopředu počítat s možnými výpadky techniky jak mísící, tak přepravním. Pokud je beton čerpán, je dobré mít na stavbě zajištěnou náhradní čerpací techniku, kdykoliv připravenou k okamžitému použití. I při dopravě betonu bádii je dobré mít připraven náhradní jeřáb. Toto doporučení vychází z dlouholetých zkušeností, kdy právě rezervní připravená technika umožnila bezchybný průběh betonáže. Je však zřejmé, že tato zabezpečovací opatření opět prodražují již tak drahou výrobu těžkého betonu.

u zemních hrází, kontrola účinnosti podbíjecích mechanismů pro šterková lože kolejí aj.).

Radiační hutnoměry VUT

Již od 60. let 20. století se tehdejší Ústřední středisko radiacní defektoskopie VUT v Brně zaměřovalo na konstrukci vpichovacích radiometrických přístrojů – hutnoměrů, které se jeví jako optimální pro kontrolu zhuštění čerstvých betonových směsí. Byla zhotovena celá řada prototypů, které byly na základě zkušeností z měření „in situ“ průběžně inovovány. Cílem těchto inovací bylo především snížit hmotnost radiacních hutnoměrů a zvýšit komfort obsluhy. Dříve používaný

stínící materiál, olovo Pb ($\rho = 11\,360\text{ kg/m}^3$), byl nahrazen ochuzeným uranem U238 ($\rho = 19\,200\text{ kg/m}^3$), který je relativně levný a dostupný, poněvadž je využíván odpad vznikající při výrobě paliva pro jaderné reaktory. Při stejných stínících účincích činí hmotnost stínění z uranu cca 1/4 hmotnosti stínění z olova. V tomto případě 0,75 kg oproti 3 kg u dřívějších modelů. Celkově se podařilo snížit hmotnost radiačních hutnoměrů z původních 13,5 na 5 kg.

Vývoj kontinuálně pokračoval i na Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně, kde se dospělo k poslednímu modelu Radiačnímu hutnoměru VUT – IX (obr. 5). Konstrukčně se tento radiační hutnoměr skládá ze dvou dílů, vzájemně propojených duralovou trubkou. Ve spodním díle je umístěn kryt se zářičem, akumulátorové baterie a detektory záření. V horním díle je umístěna vyhodnocovací elektronika a čelní ovládací panel se všemi ovládacími a komunikačními prvky.

Toto uspořádání respektuje ergonomická hlediska práce,

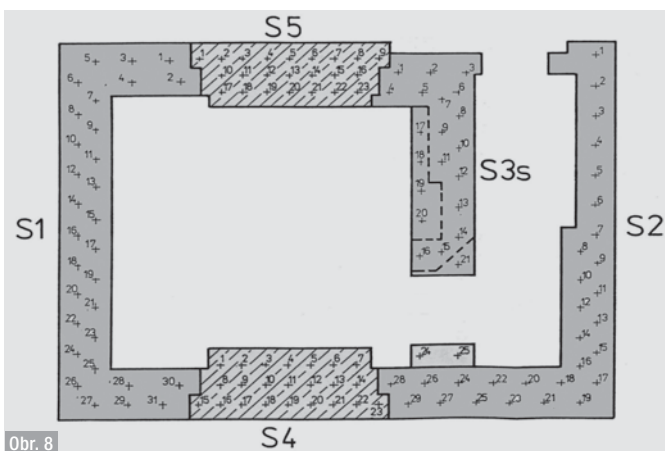
Praktické použití radiačních hutnoměrů při kontrole stínění

Nestejně vlastnosti jednotlivých složek betonové směsi, nestejně výroby a složení betonové směsi, stejně jako doprava, ukládání a zhutňování by mohly při případném souběhu těchto vlivů způsobit zhoršenou kvalitu betonu, a tím snížit jeho stínící účinek. Úkolem průběžné kontroly je proto stav zhutněné betonové směsi zjistit a sjednat případnou nápravu. Proto probíhá radiometrická kontrola objemové hmotnosti pomocí radiačního hutnoměru ihned po uložení betonové směsi a jejím zhutnění.

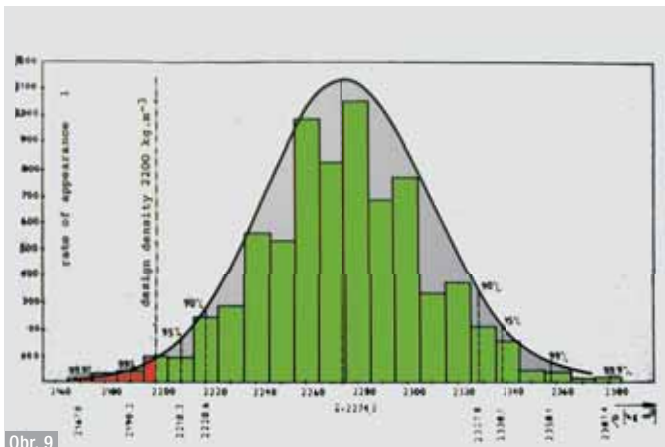
Kontrola objemové hmotnosti čerstvé betonové směsi se uskutečňuje ve dvou fázích:

- betonová směs je kontrolována ve zkušební nádobě z každého domíchávače, **obr. 6**,
- uložená a zpracovaná betonová směs je kontrolována přímo v bedně, **obr. 7**.

V případě, že průměrná objemová hmotnost v měřeném



Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10

protože jak při ovládání, tak při čtení hodnot není zapotřebí se k hutnoměru sklánět. Hutnoměr má výměnné pažnice a umožňuje měřit dle potřeby v hloubkách: 0 (geometrie příložná), 100, 150, 200 a 250 mm.

Základem elektroniky hutnoměru je mikroprocesorová vyhodnocovací jednotka. Použitý software zaručuje vysoký uživatelský komfort. Až 900 naměřených hodnot objemové hmotnosti (včetně zadané hloubky měření a doby měření) se ukládá do vnitřní paměti hutnoměru pro pozdější kontrolu nebo pro přenesení do nadřazeného počítače ke zpracování dat.

Obr. 6 Kontrola hutnosti těžkého betonu před jeho uložení do bedně

| **Fig. 6** Checking density of heavy concrete before its placing into a framework

Obr. 7 Kontrola hutnosti betonu v průběhu výstavby stínění | **Fig. 7** Checking

density of concrete during the building of shielding construction

Obr. 8 Půdorysné schéma stínící konstrukce s vyznačenými místy kontroly

| **Fig. 8** Ground plan of the shielding construction with checkpoints

Obr. 9 Statistické vyhodnocení naměřených dat | **Fig. 9** Statistical evaluation of measured dataObr. 10 Dostínění stínící konstrukce ocelovými pláty | **Fig. 10** Additional (extra) shielding of the structure with steel plates

místě by byla nižší než projektovaná objemová hmotnost, bylo by toto místo ještě znovu ztuhněno ponornými vibrátory, popř. by byla okamžitě přijata opatření na zlepšení kvality vyráběného betonu. Kontrola na opraveném místě pak musí být vždy znovu opakována. Souborem uvedených opatření je obvykle dosaženo objemové hmotnosti vyšší, než požadoval projekt.

Naměřené hodnoty objemové hmotnosti betonové směsi ve zkušební nádobě a v bednění v průběhu betonáže se přímo na místě zapisují do připravených půdorysných schémat objektu, **obr. 8**. Zápisy slouží k vyhodnocení, které se provádí po skončení radiometrické kontroly, na pracovišti VUT v Brně.

Jako příklad lze uvést kontrolu objemové hmotnosti ukládané betonové směsi na stavbě biologického stínění radioterapeutického objektu v areálu nemocnice v Novém Jičíně. Celkem zde bylo proměřeno 238 autodomíchávačů a 1 003 kontrolních bodů ve stěnách a stropu konstrukce.

Výsledky měření byly počítačově zpracovány. Program byl sestaven pro výpočet Gaussova normálního rozložení hodnot. Z celého souboru měření bylo provedeno statistické vyhodnocení pro jednotlivé vrstvy a nakonec pro celé stěny a stropy. Vypočtené hodnoty byly přehledně sestaveny do tabulek. Z naměřených hodnot byly dále vypočteny souřadnice Gaussova rozložení, jako je šikmost, špičatost a souřadnice inflexních bodů.

Na základě znalosti směrné objemové hmotnosti ρ_0 a směrodatné odchylky s lze vypočítat zaručenou objemovou hmotnost stínícího betonu ρ_g . Ta se rovná směrné objemové hmotnosti ρ_0 snížené o 1,64násobek směrodatné odchylky s . Zaručená objemová hmotnost ρ_g , použitá jako vstupní hodnota při výpočtech a při hodnocení je objemová hmotnost, které není s 95% pravděpodobností dosaženo pouze v 5 % měření, **obr. 9**. Tato hodnota je podle doporučení „Statistické metody hodnocení betonu“ rozhodující. Její hodnota **nesmí** být nižší než projektovaná minimální objemová hmotnost. Tento požadavek byl v celém rozsahu výstavby stínících betonů u stěn a u stropů splněn.

CO DĚLAT, KDYŽ PŘEDEPSANÉ HODNOTY OBJEMOVÉ HMTNOSTI BETONU NENÍ DOSAŽENO?

K jednomu z nejzávažnějších případů nedodržení objemové hmotnosti betonu došlo na stavbě lineárního urychlovače, kde byla předepsána minimální objemová hmotnost obvyčejného betonu $2\ 200\ \text{kg/m}^3$ a minimální objemová hmotnost barytového betonu $2\ 950\ \text{kg/m}^3$.

Podle objemových hmotností betonových kalibračních vzorků, zhotovených v laboratoři dle předepsaných receptur, bylo možno očekávat, že betonáž proběhne bez větších potíží. Při průběžné kontrole objemové hmotnosti dodávaných betonových směsí „in situ“, **obr. 7**, však bylo zjištěno, že jsou z hlediska dodržení stínících vlastností konstrukce nevyhovující. (Více než 5 % naměřených hodnot bylo pod stanovenou minimální hranicí.) Důvodem byl špatný technický stav betonárny a z něho vyplývající nedodržování technologického předpisu výroby betonu. Jednalo se o velmi vážnou závadu a situaci bylo nutno operativně řešit.

Pozastavení výstavby, stejně jako i změna dodavatelské betonárny nebyly z hlediska dodržení plánu výstavby možné. Nalezené řešení představovalo stanovení nové minimální objemové hmotnosti těžkého betonu z původních $2\ 950$ na $2\ 700\ \text{kg/m}^3$, která pak byla směrodatná pro výrobu betonu i pro měření, a podle toho byl upraven projekt.

Úprava projektu spočívala v tom, že snížená plošná hmotnost stínících stěn byla doplněna přídatnou vrstvou z ocelových desek, které byly na konstrukci připevněny po skončení betonáže a odbednění stěn, **obr. 10**. Skladba a tloušťky nových stínících konstrukcí byly s novými minimálními hodnotami objemových hmotností přepočítány v upraveném projektu tak, aby byly zachovány původně navržené stínící účinky jednotlivých stěn a stropů (tloušťka přídatného stínění se pohybovala od 10 do 30 mm). Stavba mohla být dokončena v dohodnutém termínu a požadované kvalitě. Toto řešení bylo pro všechny zúčastněné ekonomicky nejpříjemnější.

ZÁVĚR

Těžké betony se v současnosti používají nejvíce jako součást stínících konstrukcí ozařovačů jak v průmyslu, tak v lékařství. Z ekonomického hlediska, stavíme-li stínící konstrukce na „zelené louce“, je vhodné v co největším měřítku používat obvyčejné betony a tloušťku stínící konstrukce vypočítat s ohledem na objemovou hmotnost betonu, který zvládá vyrábět místní betonárna. Obvykle se pak u části „primárního stínění“ používá jako konstrukčního materiálu těžkého betonu, aby byla snížena celková tloušťka konstrukce. Záleží však vždy na projektantovi, aby zvolil vhodnou proporcii mezi stíněním z prostého a stíněním z těžkého betonu, a to jak z bezpečnostního, tak i ekonomického hlediska.

Literatura:

- [1] *Hobst L.*: Úvod do problematiky návrhu a výroby těžkých betonů. Sborník příspěvků konference „Speciální betony“ (Vlastnosti-Technologie-Aplikace), Otrokovice, březen 2002, str. 184–191, ISBN 80-86604-004
- [2] *Vítek L., Anton O.*: Těžké betony jako stínění proti účinkům záření vysokých energií při výstavbě onkologických pracovišť. Sborník příspěvků konference „Speciální betony“ (Vlastnosti-Technologie-Aplikace), Otrokovice, březen 2002, str. 192–195, ISBN 80-86604-004
- [3] *Hobst L., Vítek L.*: Betony pro konstrukce stínění zdrojů ionizujícího záření, Beton TKS 6/2003, str. 18–20
- [4] *Jašek J.*: Speciální betony – ochrana proti ionizujícímu záření, Beton TKS 6/2009, str. 44–47

Článek vznikl v rámci Výzkumného záměru MSM 0021630519 a projektu FAST/ÚSI-S-12-1.

Prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.

tel.: 541 147 836, e-mail: hobst.l@fce.vutbr.cz

Ing. Lubomír Vítek, Ph.D.

tel.: 541 147 825, e-mail: vitek.l@fce.vutbr.cz

oba: Ústav stavebního zkušebnictví

FAST VUT v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno

Ing. Jan Jašek

Qualiform Slovakia, s. r. o., Pasienskova 9D, 821 06 Bratislava

tel.: +420 602 724 792, email: jasek@qualiform.sk