Sugárvédő beton, sugárvédő nehézbeton

A sugárvédő beton tervezési élettartama 100 év. Az MSZ 4798:2016/4M:2023 magyar betonszabvány szerint a 100 év tervezési élettartamú műtárgyak, ún. monumentális építmények tervezése, készítése és ellenőrzése esetén a betonnyomószilárdság ~50%-os elfogadási valószínűséggel és S*tuden*t-tényezővel való értékelése, valamint a betonfedés követelménye *előírás*, azaz alkalmazása *kötelező*!

A sugárvédő beton az ionizáló sugárzás ellen hivatott védelmet nyújtani.

A betonnal gyengíthető ionizáló hatása a röntgensugaraknak, a radioaktív alfa-, béta- és gamma-sugaraknak, valamint a magreaktorokban fellépő neutronsugaraknak van. (*Balázs*, 2010)

A röntgensugárzás nagyobb része káros, és káros a sugárzást ért testek másodlagos (szekunder) sugárzása is, amelyek ellen ólomréteggel, vagy ezt helyettesítő egyéb anyagokkal (például vas, horgany, baritvakolat, beton stb.) szokás. A tapasztalatok szerint a szokványos adalékanyaggal készített, legalább 2400 kg/m^3 testsűrűségű beton 200 kV röntgencső-feszültségig, e felett a legalább 3000 kg/m^3 testsűrűségű nehézbeton 30 cm vastagságban elegendő a röntgensugárzás elleni védelemre. (*Balázs*, 2010)

Az alfa-sugarak és a béta-sugarak leárnyékolása általában mm nagyságrendű anyagvastagsággal megoldható. (*Balázs*, 2010)

A gamma-sugarak a röntgensugarakkal rokon tulajdonságúak, de energiájuk nagyobb, ezért az ellenük való védekezéshez vastagabb ólomfalra, vagy más, azt helyettesítő anyagra van szükség. A gamma-sugarak elleni védekezéshez nagy atomtömegű és nagy testsűrűségű anyagokat, például nehézbetont kell használni. (*Balázs*, 2010)

A neutronsugárzást vízréteggel lehet lassítani, de a másodlagos gamma-sugárzás miatt a neutronsugárzás elleni védelemül a nagy testsűrűségű és nagy hidrátvíz-tartalmú hidrátbetonok alkalmasak. (*Balázs*, 2010)

A sugárvédő nehéz- és hidrátbetonok fogalmairól a sugárvédő betonból tervezendő szerkezetekről, a sugárvédő betonokhoz felhasználható anyagokról, a sugárvédő betonok tervezési feltételeiről, összetételéről, készítéséről, minőségellenőrzéséről az egykori MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 12. fejezetében lehet olvasni.

Az MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 12. fejezete szerint:

- A *sugárvédő beton* az ionizáló sugárzások valamely fajtája ellen biológiai védelmet nyújtó betonfajta; megfelelően megválasztott összetételének a következtében elnyeli a röntgen-, a gamma- és/vagy a neutronsugarakat. A sugárvédő beton fajtái: nehézbeton, hidrátbeton és közönséges beton.
- A *nehézbeton* főleg nagy rendszámú elemekből áll; elsősorban a röntgen és a gamma sugarak ellen nyújt védelmet. Legfontosabb jellemzője a testsűrűség. Sugárvédő képessége a testsűrűség növekedésével nő.
- A *hidrátbeton* kis és nagy rendszámú elemeket egyaránt tartalmaz és a neutron sugárzás ellen nyújt védelmet. Legfontosabb jellemzője a kémiailag kötött víztartalom (hidrátvíz).
- A *nehéz adalékanyag* nagy rendszámú elemekből álló, legalább 3,5 t/m' testsűrűségű különleges adalékanyag.
- A *hidrátvíz-tartalmú adalékanyag* kémiailag kötött vizet nagyobb mennyiségben tartalmazó különleges adalékanyag
- A *bórtartalmú kiegészítőanyag* a lassú és a termikus neutronok befogására adagolt különleges anyag.

Minden beton- vagy vasbetonszerkezetet, amelyet a biológiailag káros sugárzások valamelyik fajtája elleni védelem céljára készítenek, az adott célra alkalmas sugárvédő betonból kell tervezni. A sugárvédő betonból tervezendő szerkezetek a teljesség igénye nélkül a következők:

- *Reaktorok* sugárvédő szerkezetei: stabil reaktorok, mobil reaktorok.
- *Helyiségek* sugárvédő szerkezetei: röntgen besugárzók, izotópos besugárzók, gyorsítók (lineáris és ciklotron), amelyek lehetnek kutatási célúak, ipari alkalmazásra készített vagy mezőgazdaságban alkalmazott helyiségek, továbbá életvédelmi helyiségek (óvóhelyek).
- Különleges rendeltetésű *fülkék és fülkesorok*: gamma-fülkék, bontó és átrakó fülkék, ciklotron (besugárzó) fülkék, trezorok, különleges szállító csatornák és felvonók.
- *Hulladéktárolók*: szilárd hulladéktároló bunkerek, folyadék hulladéktároló tartályok.
- *Nyílászáró és határoló* sugárvédő szerkezetek: stabil nyíláshatárolók, mobil nyílászárók.

Az MSZ 4798:2016/4M:2023 szabvány szerint a sugárvédő nehézbetonok adalékanyaga és testsűrűségi osztálya a kiszárított állapotban mért testsűrűség alapján az *1. táblázat* szerinti.

1. táblázat: A 60 ºC hőmérsékleten kiszárított szilárd nehézbeton testsűrűségi osztályai és adalékanyagai (MSZ 4798:2016/4M:2023)

Nehézbetonok testsűrűségi osztályai					
D2,6	D3,1	D3,6	D4,1	D4,6	D5,6
A kiszárított állapotú szilárd nehézbeton testsűrűségének tartománya az MSZ EN 12390-7:2019 szerint vizsgálva, egyedi érték, kg/m^3					
> 2600 és ≤ 3100	> 3100 és ≤ 3600	> 3600 és ≤ 4100	> 4100 és ≤ 4600	> 4600 és ≤ 5600	> 5600 és ≤ 6600
Megjegyzés: A megszilárdult nehézbeton testsűrűségének előírása a tervező, a nehézbeton összetételének megtervezése a betontechnológus feladata.					
Ajánlott nehéz adalékanyag (és testsűrűsége, kg/dm^3), például					
Barit (4,0-4,3), Ilmenit (4,55-4,65), Magnetit (4,65-4,8), Hematit (4,7-4,9)		Magnetit (4,65-4,8), Hematit (4,7-4,9), Ferroszilícium (5,8-6,2), Ferrofoszfor (6,0-6,2), Fe-granulátum ≤ 8 mm (6,8-7,5)		Fe-granulátum ≤ 8 mm (6,8-7,5), Fe-homok 0,2-3,0 mm (7,5-7,6)	
A nehézbeton legalább 3000 kg/m^3 testsűrűségű nehéz adalékanyaggal készül.					

A sugárvédő betonok tervezésével például a tíz szabványból álló német DIN 25420 „Errichtung von Heißen Zellen aus Beton” szabványsorozat foglalkozik. A DIN 25413-1:2013 és DIN 25413-2:2013 szabvány szerint a sugárvédő nehézbeton testsűrűsége kiszárított állapotban legalább 2800 kg/m^3, bár sugárvédő beton 2600 kg/m^3-nél kisebb testsűrűségű betonból is készíthető. A sugárvédő nehézbeton nyomószilárdsági osztálya általában C20/25, C25/30 és C30/37 (*Zement-Merkblatt* B 10), illetve HC20/25, HC25/30 és HC30/37, ahol a HC nem szabványos betűjel a nehézbeton jelölésére.

A *DBV Merkblatt Strahlenschutzbeton* (1996) műszaki útmutatóban írják, hogy a sugárvédő betonok mindig a B II csoportba tartozó betonok (biztonsággal az Eurocode 2 szabvány szerinti mai legalább C25/30 nyomószilárdsági osztályú betonok, lásd *könyvünk 8.3. fejezetét*); ezeknek a betonoknak a sugárzás csillapítása speciális tulajdonságnak számít. Ezekre a betonokra speciális követelmények vonatkoznak a gyártás, a feldolgozás és a felügyelet tekintetében.

A nehéz adalékanyagokkal előállított sugárvédelmi betonok testsűrűsége általában > 2,80 kg/dm^3, de a szokványos (normál) betonokat is előnyösen használják sugárvédelemre, például a reaktorépítésben. A nehéz adalékanyagokkal készített betonok terhelő- (ballaszt-) és hangszigetelő betonként is használhatók.

A sugárcsillapításhoz szükséges betontervezési adatokat, mint a testsűrűséget, a kötött víztartalmat és a kémiai összetételt, a beton összetevőinek kiválasztásához és a beton összetételének megtervezéséhez meg kell adni a sugárvédő beton betontechnológusa számára.

Elvileg minden MSZ EN 197-1:2011 szerinti cement alkalmas sugárvédő beton készítéséhez, mégis előnyben kell részesíti azokat a cementeket, amelyek pozitív hatással vannak a sugárvédő szerkezetek repedésmentességére és a friss beton bedolgozhatóságára.

A sugárvédő beton adalékanyaga természetes nehéz adalékanyag (barit, magnetit, hematit, ilmenit), mesterséges nehéz adalékanyag (nehéz salak, ferrofoszfor, ferroszilícium, vasdara, acélhomok), kristályvíz tartalmú adalékanyag (limonit, szerpentin) vagy bórtartalmú (kolemanit, bórfritt, bórkalcit, bórpor, bórkarbid) adalékanyag lehet. A sugárvédő beton adalékanyagainak testsűrűsége – a szerpentin és a bórtartalmú adalékanyagok kivételével – legalább 3000 kg/m^3, nyomószilárdsága általában legalább 80 N/mm^2; szemmegoszlási görbéje kövesse a *Fuller*-görbét (*Fuller*-parabolát), amelynek ordináta-értékeit az adalékanyagok eltérő testsűrűsége miatt mindig térfogatszázalékban kell kifejezni.

A természetes eredetű nehéz adalékanyaggal készített beton adott konzisztenciához szükséges víztartalma általában nem tér el jelentősen az ugyanolyan konzisztenciájú normál adalékanyagú beton szükséges víztartalmától. A mesterséges vastartalmú adalékanyagok általában akkor is csökkentik a vízigényt, ha a finomszemek (0/2 mm) aránya nem túl nagy. Ezzel szemben a bórtartalmú adalékanyagok növelik a vízigényt.

A betontervezés során az adalékanyagok felületi nedvességtartalmát mindig figyelembe kell venni. Annak ellenére, hogy a normál és nehéz adalékanyagok térfogatszázalékban kifejezett felületi nedvességtartalma azonos, a nehéz adalékanyag tömegszázalékban kifejezett felületi nedvességtartalma - a nehéz adalékanyag nagyobb testsűrűsége miatt – kisebb, mint a normál adalékanyag tömegszázalékban kifejezett felületi nedvességtartalma. Ezért az adalékanyag teljes felületi nedvességtartalmát az adalékanyag frakciók felületi nedvességtartalmának összegeként kell kiszámítani.

Különböző testsűrűségű adalékanyagokból készült nehézbeton könnyen szétosztályozódik, ha a konzisztenciája túl lágy és/vagy a habarcs mennyisége túl nagy.

Mivel az adalékszerek és a nehéz adalékanyagok közötti reakciók nem zárhatók ki, ezért kiterjesztett alkalmassági vizsgálatokat kell végezni (az adalékszer nélküli és az adalékszeres beton kötésének és szilárdulásának összehasonlító ellenőrzése). Az eddigi tapasztalatok szerint a folyósító adalékszerek és a kötéskésleltető adalékszerek a természetes nehéz adalékanyagokkal készített betonok tulajdonságait nem károsítja.

A betonnak a neutronsugárzás ellen védő kristályvíz-tartalma az adalékanyag kristályvíz-tartalmából és a cementkőben megkötött vízből (w_{zemgeb}) tevődik össze.

„Normál” éghajlati viszonyok között a limonit adalékanyag kristályvíz-tartalma 10-12 tömeg%, a szerpentin adalékanyag kristályvíz-tartalma 11-13 tömeg%. Az adalékanyag kristályvíz-tartalma izzítással határozható meg.

A limonittal készült sugárvédő betonok mintegy 150 °C üzemi hőmérsékletig és a szerpentin felhasználásával készült sugárvédő betonok mintegy 350 °C üzemi hőmérsékletig kellően nagy kristályvíz-tartalommal rendelkeznek. A szerpentin általában előnyösebben viselkedik, mint a limonit. A nehéz adalékanyagok kémiai hatásokkal szembeni ellenállását meg vizsgálni.

A teljesen hidratált száraz cementkőben kémiailag és fizikailag kötött víztartalom hozzávetőleges fajlagos mennyisége a mindennapi (normál) környezetben („Wohnklima”) lévő betonban a

$$w_{\text{zemgeb}} = 0{,}2 \times z + 30 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

képlettel számítható ki, ahol z = a beton cement-tartalma és 30 a fizikailag kötött nedvesség mennyisége, mind a kettő kg/m^3 mértékegységben.

A z cement-tartalom szorzója, ha a víz-cement tényező 0,5 vagy annál kisebb ($x \leq 0{,}5$), akkor:

- kiszáradástól védett betonelem vagy tömegbeton esetén 3 hónapos korban: 0,19-0,21;
- CEM I portlandcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,16-0,18;
- CEM III kohósalakcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,14-0,16.

Ha pedig a víz-cement tényező nagyobb, mint 0,5 ($x > 0{,}5$), akkor:

- kiszáradástól védett betonelem vagy tömegbeton esetén 3 hónapos korban: 0,21-0,0,23;
- CEM I portlandcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,17-0,19;
- CEM III kohósalakcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,15-0,17.

Teljesen hidratált állapotban az általános felhasználású cementek (MSZ EN 197-1:2011) keverővíznek a cement tömegére vonatkoztatott körülbelül 20%-át kötik meg. Bár az aluminátban gazdag cementek (timföldcement) kémiai vízmegkötő képessége valamivel nagyobb, ez az előny nem használható fel a reaktorszerkezet tömegbeton elemeinél, mert az alumínium-oxid-cement gyors kötése során nagy mennyiségű hidratációs hő szabadul fel (*Walz* et al., 1962).

A megfelelően nagy testsűrűségű ($\rho_{\text{szilárd beton}}$) szilárd sugárvédő beton friss állapotban beállítandó testsűrűségét ($\rho_{\text{friss beton}}$) a következő képlettel becsülhetjük meg:

$$\rho_{\text{friss beton}} = \rho_{\text{szilárd beton}} + t \times s + w_{\text{v}} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \text{ ahol:}$$

t = a *Student*-tényező;

s = a szilárd beton testsűrűségének szórása, amelynek közelítő értéke $s \approx 0{,}01 \times \rho_{\text{szilárd beton}}$ kg/m^3;

w_{v} = a vízveszteség kg/m^3 mértékegységben.

A sugárvédő betonok nyomószilárdsági osztálya általában: C20/25 – C25/30.

A nehézbeton zsaluzatát és állványzatát a friss beton tervezett, szokásosnál nagyobb testsűrűségére kell méretezni.

A védőhüvelyekben lévő horgonyrudak (Ankerstäbe) alkalmazása hátrányos, mert a horgonyrudak eltávolítása után meglévő nyílásokat nehéz habarccsal megbízhatóan lezárni. Ezért a betonban bennmaradó horgonyrudakat és/vagy távtartókat célszerű használni. (*DBV Merkblatt Strahlenschutzbeton*, 1996)

A különböző cementekből és adalékanyagként különböző kőanyagokból készült betonok eltérő sugárzásállóságot mutatnak. A beton térfogata a radioaktív sugárzás okozta kristályrács-zavarok hatására meredeken növekedhet. A beton sugárzásállóságát alapvetően az adalékanyag sugárzási ellenállása határozza meg, ezért adalékanyagként különösen sugárzásálló adalékanyagot kell alkalmazni. (*Grübl* et al., 2001)

Az atomreaktorok nyomástartó edényeiben a betont érő sugárterhelés a reaktor belsejétől kb. 45 cm távolságig olyan szintre emelkedhet, hogy a beton szilárdságának és merevségének csökkenésével kell számolni. A München II kutatóreaktor (FRM II) építése során a körülvevő falak, medencék és födémek nehézbetonból készültek minden olyan területen, ahol radioaktív

sugárzásra számítottak. A várható kibocsátás intenzitásától függően három különböző térfogatsűrűségű betont használtak. Az egyik betonfajta testsűrűsége 3500 kg/m^3 volt. Ehhez hematit adalékanyagot használtak. A 4500 kg/m^3 testsűrűségű betonhoz a hematiton kívül acélgranulátumot is kevertek. A 6000 kg/m^3 testsűrűségű betonokba acélgolyókat vibráltak, majd a hézagokba cementpépet injektáltak. A nagy szegregációs (szétosztályozódási) hajlam miatt földnedves betonokat (steife Betone) alkalmaztak. (*Grübl* et al., 2001)

Springenschmid (2007) szerint a jelentősen eltérő sűrűségű anyagokból álló sugárvédő friss betonok nagyon hajlamosak a szedimentációra (ülepedésre), ezért azokat földnedves konzisztenciával kell keverni. A nagy testsűrűségű finom és durva adalékanyagokkal készített betonok szivattyúzhatók. A beton készítése során figyelembe veendő a keverőüzemekkel szemben támasztott magas követelmény, a mixerek megszokottnál lényegesen kisebb töltési mennyisége, a teherhordó szerkezeti elemek szilárdsági és alakváltozási jellemzőinek kedvezőtlen változása nagyobb hőmérsékleten és nagyon erős sugárzás hatására.

Meiswinkel és szerzőtársai tanulmányában (*Meiswinkel* et al. in Beton-Kalender 2011. 1. kötet) olvasható, hogy míg az EN 206 és DIN 1045-2 szabvány szerint a száraz állapotú nehézbeton testsűrűsége nagyobb, mint 2,6 kg/dm^3, addig a DIN 25413-1:2013 és DIN 25413-2:2013 szabvány meghatározása szerint a nehéz adalékanyagokkal készített sugárvédő beton testsűrűsége száraz állapotban általában meghaladja a 2,8 kg/dm^3 értéket.

A nehézbeton építéshelyi bedolgozása a szokványos (normál) beton bedolgozásánál sokkal nehezebb. A nehéz adalékanyagok többnyire szögletes szemalakja és nagy testsűrűsége miatt a beton áramlási tulajdonságai a szokványos betonénál rosszabbak. (*Meiswinkel* et al., 2011)

Nehézbetonra, mint sugárvédelmi betonra gyakran az atomreaktorok nyomástartó edényének közvetlen közelében a biopajzs (Bioschild) részeként van szükség. Németországban a nehézbetont sugárvédelmi betonként már az 1960-as években, az első kísérleti-kutató nukleáris létesítmény építésénél használták, ahol annak idején öntöttvas-granulátummal 5,6 kg/dm^3 nehézbeton-testsűrűséget értek el. Napjainkban a nehézbeton adalékanyaga egyebek között a jobb bedolgozhatóság miatt magnetit, szerpentin, hematit vagy barit, esetenként vasgranulátum. Így például 340 kg/m^3 cementtartalommal (CEM III/B 32,5), 170 kg/m^3 víztartalommal, 1410 kg/m^3 0-6 mm szemnagyságú hematittal, 1680 kg/m^3 6-25 mm szemnagyságú hematittal és 150 kg/m^3 0-8 mm szemnagyságú homokkal 3,6 kg/dm^3 testsűrűségű nehézbeton gyártható. A 0-8 mm-es homok helyett 890 kg/m^3 0-8 mm szemnagyságú hematit, valamint 1920 kg/m^3 6-25 mm szemnagyságú hematit és 1350 kg/m^3 vasgranulátum alkalmazásával mintegy 4,5 kg/dm^3 térfogatsűrűségű nehézbetont tudunk készíteni. (*Meiswinkel* et al., 2011)

A fenn hivatkozott irodalmon kívül a sugárzással, sugárvédő betonokkal részletesebben foglalkozik például:

- *Paks II.:* „Atomenergetikai alapismertek”, (é.n.); http://www.paks2.hu/hu/Atomenergia/IsmeretetoAlap/Lapok/default.aspx;
- Országos Atomenergia Hivatal: „Új atomerőművi nukleáris környezetben lévő beton- és vasbetonszerkezetek”. N3a.29. sz- útmutató. Verzió szám: 1. 2021. november (https://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/ACA1C323EB58E62DC1257BE9002CD900/$File/N3a29_végleges.pdf)
- *Dr. Kovács Károly* „Nukleáris alkalmazású vasbetonok” című tanulmánya (2019);
- az MSZ 62-3:2017 „Az ionizáló sugárzás elleni védelem. 3. rész: A neutronsugárzás elleni védelem”
- *Lohaus* et al., 2011;
- *Ardenne* et al., 2005;
- MSZ 62-1:1989 „Ionizáló sugárzás elleni védelem. Általános előírások”. Visszavont szabvány