	Fiatal beton szilárdulási folyamata 1. rész: Nurse-Saul-féle modell, Papadakis-Bresson-féle modell	

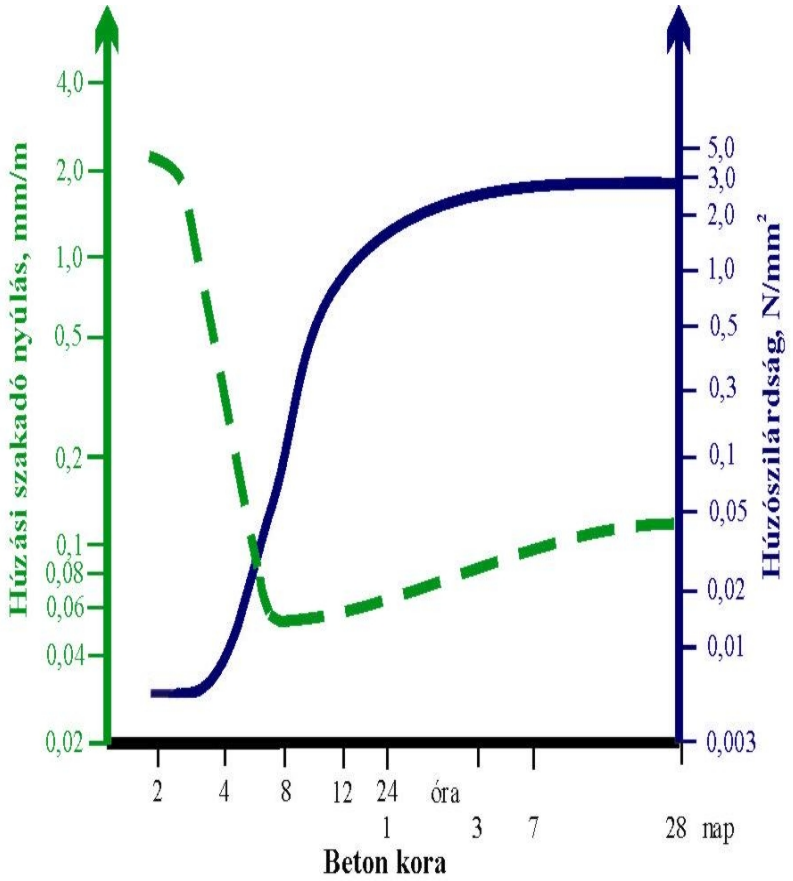
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. 1. Teil: Modell nach Nurse-Saul, Modell nach Papadakis-Bresson
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 1: Model for Nurse-Saul, Model for Papadakis-Bresson
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 1: Modèle pour Nurse-Saul, Modèle pour Papadakis-Bresson

1. BEVEZETÉS

A beton, illetve az előre gyártott beton elem korai repedés érzékenysége, kizsaluzhatósága, előfeszíthetősége, szállíthatósága stb. a *fiatal beton* szilárdulási (érési) tulajdonságaitól függ.

A fiatal beton szilárdulási folyamatát sok tényező, például a cement fajtája és mennyisége, a víz-cement tényező, a kiegészítő anyag és az adalékszer hatása, a tömörítés és az utókezelés módja és időtartama, a beton hidratációs (belső) hőmérséklete és a környezet (külső) hőmérséklete, a beton kora, voltaképpen a cementkő szilárdulása (hidratációja) és porozitása befolyásolja. Dolgozatunkban e tényezők közül első sorban az idő és a hőmérséklet hatását tárgyaljuk.

A beton kötési-szilárdulási állapota szerint meg szokták különböztetni a friss betont, azon belül a zöld betont és a fiatal betont, valamint a szilárd betont. *Zöld betonnak* a beépített és betömörített, de még kötés előtt lévő friss betont nevezik, amelynek „zöld szilárdsága” (mintegy 0,1-0,3 N/mm^2, legfeljebb 0,5 N/mm^2) nem a hidratáció, hanem a cementpép folyáshatárának és adhéziós erejének köszönhető. A zöld beton a hidratáció, a kötés és szilárdulás előrehaladtával éles határ nélkül, a víz hozzáadásától számított mintegy 6-12 óra között a képlékeny állapotból átmegy a *fiatal beton* viszkoelasztikus állapotába, amelyet nagy ernyedés (relaxáció) jellemez. A még közel képlékeny állapotú fiatal beton saját és gátolt alakváltozásból keletkező feszültségeinek nagy része az első napon még leépül, miközben azok az alakváltozások, amelyek a beton 48 órás kora után lépnek fel, csak nagyon lassan mérséklődő feszültségek forrásai. A fiatal beton megrepedése szempontjából a szakadó nyúlás mértéke a meghatározó. Ez eleinte igen nagy, de a beton dermedése után, a szilárdulás ütemétől függően, általában 6-16 órán belül minimumra esik (értéke mintegy 0,04-0,08 mm/m), majd egy hét alatt duplájára nő. Ahol a húzási szakadó nyúlás görbéjének minimuma, ott a beton – az idő függvényében ábrázolt – húzószilárdsági görbéjének inflexiós pontja van (*1. ábra*). Ettől az időponttól (vagy a *Vicat*-féle kötés kezdetétől) általában 14 napos korig (vagy rövidebb ideig, például 36 vagy 72 órás korig) nevezik a betont fiatal betonnak. A fiatal beton már megkötött és nem munkálható meg, átmenetet képez a friss és a szilárd beton között.

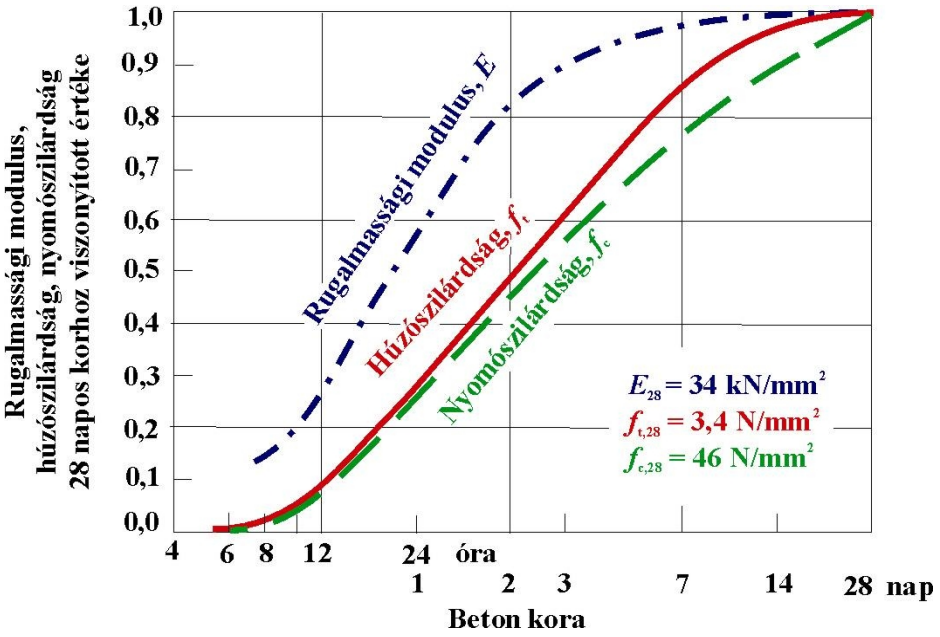


1. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai.

Forrás: vdz Zement-Taschenbuch (2008), *Zilch, K. – Diederichs, C. J. – Katzenbach, R.* (2001), *Schießl, P.* (2003), *Weigler, H. – Karl, S.* (1974)

A beton szilárdulása időben lejátszódó folyamat (*2. ábra*). A *20 °C hőmérsékleten szilárduló fiatal beton rugalmassági modulusa* már 24 órás korban elérheti a 28 napos korú beton rugalmassági modulusának mintegy 70 %-át, 2 napos korban pedig akár a 90 %-át. A rugalmassági modulus növekedésével az ernyedés – azaz az alakváltozási képesség, amelyben az ébredő feszültségek elenyésznek – egyre kisebb lesz. A beton *húzószilárdságának* fejlődése erősebben függ a cement fajtájától, 2 napos korban a 28 napos beton húzószilárdságának 50-65 %-át, 7 napos korban 80-85 %-át teheti ki. A nagyon lassan szilárduló cementek esetén 1-2 napos korban a még nagyon kis húzószilárdság és már nagyon nagy rugalmassági modulus következtében nagyon kicsi a nyúlási képesség, de később eléri a végértéket (0,1 mm/m). A beton *nyomószilárdsága* is jelentős mértékben függ a cement fajtájától. A nyomószilárdság a lassan, illetve a gyorsan szilárduló cementek esetén 3 napos korban a 28 napos beton nyomószilárdságának 35-55 %-át, 7 napos korban 60-75 %-át érheti el, mint az MSZ EN 206-1:2002 szabvány 12. táblázatából is kitűnik. (*Iványi Gy*., 2006.)

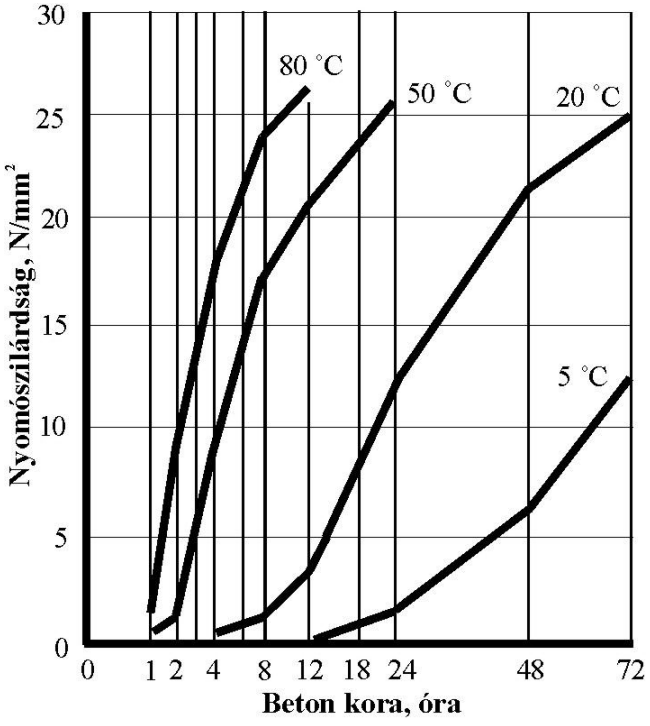
Az időfüggő alakváltozási tulajdonságok, mint a *kúszás és az ernyedés*, jelentős mértékben függenek a fiatal beton korától és az igénybevétel sebességétől, amely utóbbi a fiatal beton esetén lassúnak tekinthető. A fiatal beton ernyedési viszonyainak meghatározásához fontos a gátolt alakváltozásból eredő feszültségek leépülésének megismerése. Az ernyedési tényező, azaz a maradó feszültség és a számított, gátolt alakváltozásból eredő feszültség viszonyszáma, a kísérletek szerint, a terhelés hirtelen megjelenését követő 4-5 nap múlva 0,65-0,70. Ha a friss betont 1 napos korban hirtelen terhelik meg, vagy a terhet 2-4 napos korban lassan, több nap alatt hordják fel, akkor mind a két esetben 0,5 értéknél kisebb az ernyeedési tényező. A szilárdulás előre haladtával a beton ernyedési képessége erősen lecsökken. (*Iványi Gy*., 2006.)



2. ábra: A beton 28 napos korhoz viszonyított rugalmassági modulusának, húzó- és nyomószilárdságának növekedése az idő függvényében.

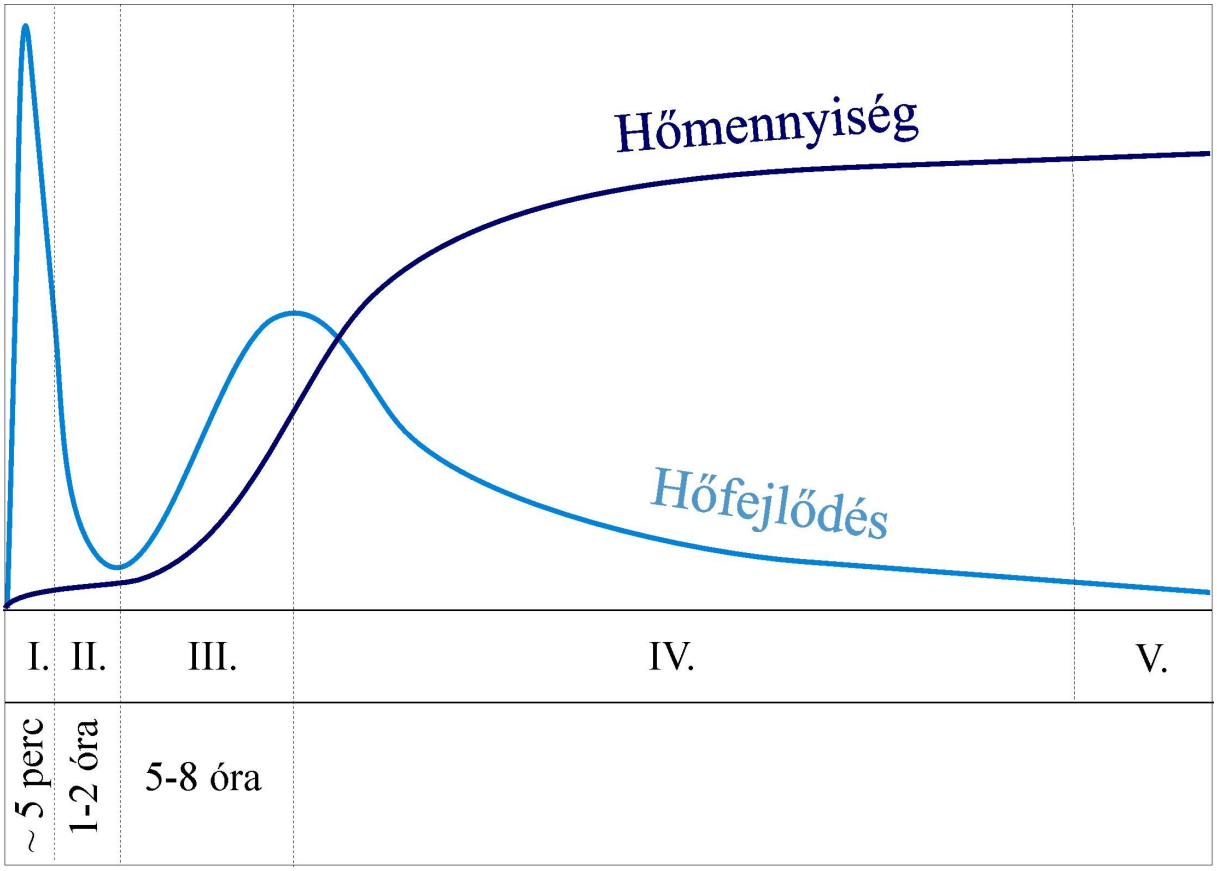
Forrás: *Weigler, H. – Karl, S.* (1974), *Iványi Gy.*, (2006), *Springenschmid, R.* (2007)

A beton kis hőmérsékleten lassabban, nagy hőmérsékleten gyorsabban szilárdul (*3. ábra*). A szilárdulást befolyásoló hőmérsékletnek két összetevője van, az egyik a beton hidratációs (belső) hőmérséklete (*4. ábra*), a másik a beton hőmérsékletére hatást gyakorló, a rövidhullámú (pl. napsugárzás) és a hosszúhullámú (pl. tárgyakról visszaverődő) hősugárzásból eredő környezeti (külső) hőmérséklet, amely a hidratációs hőfejlődés csillapodása után, lényegében a beton 48 órás korát követően, meghatározóvá válik. A környezeti hőmérsékletnek ezt a szilárdulást és alakváltozást befolyásoló hatását veszik figyelembe az érési, szilárdulási modellek, többnyire úgy, hogy a környezeti hőmérséklet hatását a 20 vagy 25 °C hőmérsékleten érlelt beton szilárdsági tulajdonságaira – mint összevetési alapra – vonatkoztatják. Dolgozatunkban a hőmérséklet alatt a beton környezeti hőmérsékletét értjük.



3. ábra: A hőmérséklet hatása a fiatal beton nyomószilárdságára, 350 kg/m³ CEM I 32,5 jelű cementtartalom és 0,5 víz-cement tényező esetén, *Wierig, H. J.* (1970) után.

Forrás: *Springenschmid, R.* (2007).



4. ábra: Hidratációs hőfejlődés folyamata
I. fázis: Lényegében a szabad kalciumoxid és a trikalcium-aluminát (felit) hidratációjának, valamint az ettringit, illetve a monoszulfát képződésnek a fázisa.
II. fázis: Az ettringit és a monoszulfát összefüggő burokként vonja be az aluminát (felit) és az aluminátferrit (celit) fázisokat, ezzel késleltetve ezek hidratációját, a hőfejlődés átmenetileg csökken. Alvó vagy nyugalmi periódusnak is nevezik.
III. fázis: A fázisokat bevonó burok átkristályosodás, ozmózis nyomás folytán áthatolhatóvá válik, a cement szemek reakcióképessége helyreáll, a hőfejlődés újra fokozódik és eléri maximumát.
IV. fázis: A hőfejlődés csökken és nullához tart. Kishőfejlesztésű cementek esetén ebben a fázisban csekély utómelegedés és harmadik, kis hőfejlődés csúcs lép fel.
V. fázis: A hidratáció gyakorlatilag befejeződik.
Forrás: *Madaleno, A. C. L.* (2002)

A sok befolyásoló tényező ellenére kidolgoztak olyan viszonylag egyszerű számítási módszereket (modelleket), amelyekkel a fiatal beton szilárdsági tulajdonságai (például a korai nyomószilárdság, húzószilárdság, rugalmassági modulus) *az idő és a hőmérséklet függvényében meghatározhatók*, és amelyek a beton szilárdulási folyamatát, érési állapotát leíró vagy becslő módszereknek (németül: Konzept der Betonreife, Konzept gewichteter Reife des Betons, Reifemodell; angolul: maturity method; franciául: méthode d'échéance) nevezhetők (*Zement-Taschenbuch*, 2008). Az irodalomban számos modell található (*Madaleno*, *A. C. L.,* 2002), dolgozatunkban ezek közül a legalapvetőbbeket tekintjük át.

2. NURSE-SAUL-FÉLE MODELL

A *Saul*-féle modell megfogalmazásának előzménye, hogy *R. W. Nurse* 1949-ben a beton szilárdulásának becslésére a hidratációs hőmérsékletből levezetett lineáris összefüggés alkalmazását javasolta. A *Nurse*-féle elképzelést *A. G. A. Saul* 1951-ben fejlesztette tovább, ezért *Saul* módszerét sokszor *Nurse-Saul*-féle modellnek nevezik.

A *Saul*-féle elmélet szerint a gőzölt beton korai nyomószilárdsága kizárólag az *R* érési fok-idő függvénye, és azt a hőmérséklet és a cement fajtája nem befolyásolja. A gőzölt beton *R* érési fok-idő száma nem más, mint a gőzölési idő-hőmérséklet diagram alatti terület nagysága, amelyet *Saul* a következő érési formulával (németül: Reifeformel von *Saul*) fejez ki:

$$R = \Sigma(T_i + 10)\cdot\Delta t_i \quad [\text{ºC·óra vagy ºC·nap}] \qquad (1)$$

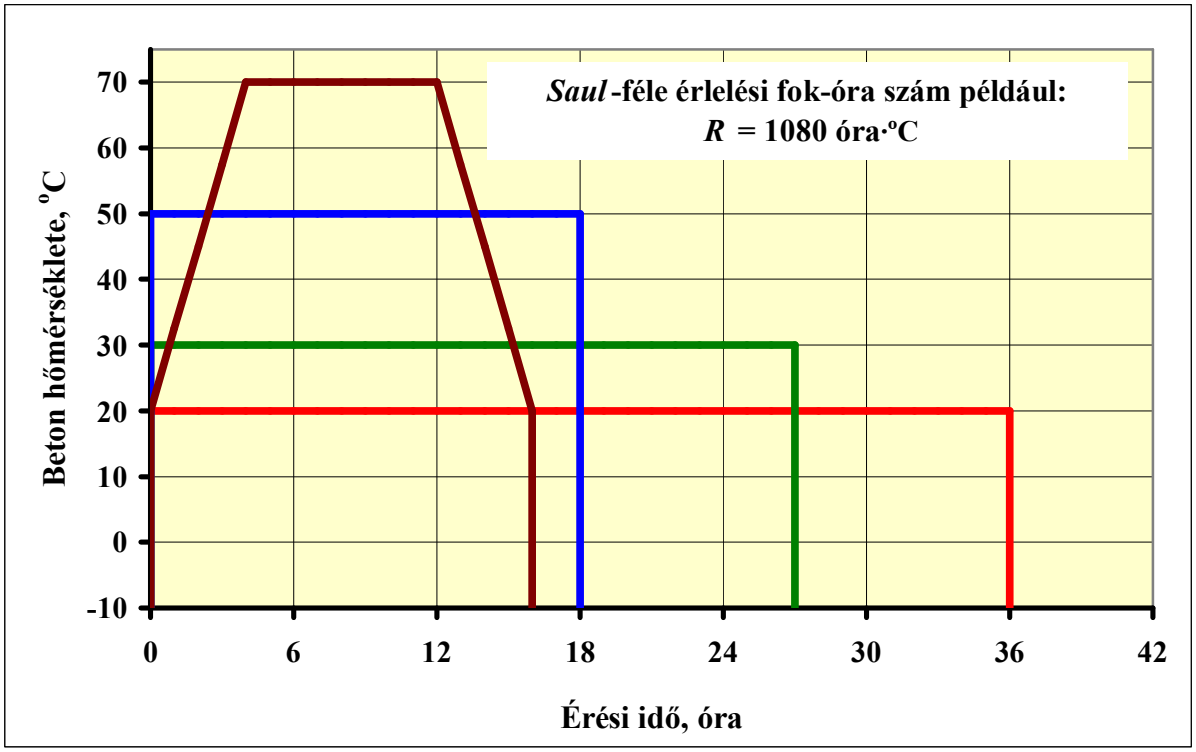
ahol:

- R a beton érését (hidratáció előrehaladtát) kifejező fok-idő (fok-óra vagy fok-nap) szám (németül: Reife), mint a gőzölt beton gőzölési idő-hőmérséklet diagramja alatti terület nagysága
- T_i az adott szilárdulási időtartam (intervallum) alatt változatlan betonhőmérséklet vagy átlag betonhőmérséklet, °C-ban kifejezve
- Δt_i a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan vagy átlagával jellemezhető (T_i), napban vagy órában kifejezve
- i a szilárdulási időtartam (intervallum) sorszáma, $i = 1, 2, 3 \ldots n$

A *Saul*-féle formulából kitűnik, hogy $T_i = -10$ ºC esetén az fok-idő szám $R_i = 0{,}0$ ºC·óra, tehát *A. G. A. Saul* feltételezi, hogy a beton hidratációja a $T_i = T_0 = -10$ ºC alsó hőmérsékleten megáll. Tapasztalatok szerint (+3 és -10) ºC hőmérséklet között a beton szilárdulása rendkívül lelassul, és -2 ºC hőmérséklet alatt a beton csak akkor szilárdul, ha már olyan szilárd, hogy a fagy nem károsítja (*Springenschmid* 2007).

Saul tételéből az következnek, hogy az azonos összetételű, különböző hőmérsékleten érlelt betonoknak azonos a szilárdsága, ha az *R* érési fok-idő számuk egyforma. Például a

- 36 órán át konstans 20 ºC hőmérsékleten szilárdult beton [$R = (20 + 10)\cdot 36 = 1080$ ºC·óra] nyomószilárdsága ugyan akkora, mint az ugyan olyan összetételű, de
- 27 órán át konstans 30 ºC hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (30 + 10)\cdot 27 = 1080$ ºC·óra], vagy a
- 18 órán át konstans 50 ºC hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (50 + 10)\cdot 18 = 1080$ ºC·óra], vagy a
- 4 óra alatt 20 ºC-ról 70 ºC hőmérsékletre felfűtött, 8 órán át konstans 70 ºC hőmérsékleten érlelt és 4 óra alatt 70 ºC-ról 20 ºC hőmérsékletre lehűtött betoné [$R = (20 + 50/2 + 10)\cdot 4 + (70 + 10)\cdot 8 + (20 + 50/2 + 10)\cdot 4 = 1080$ ºC·óra], mert az érési fok-óra számuk egyforma (*5. ábra*).



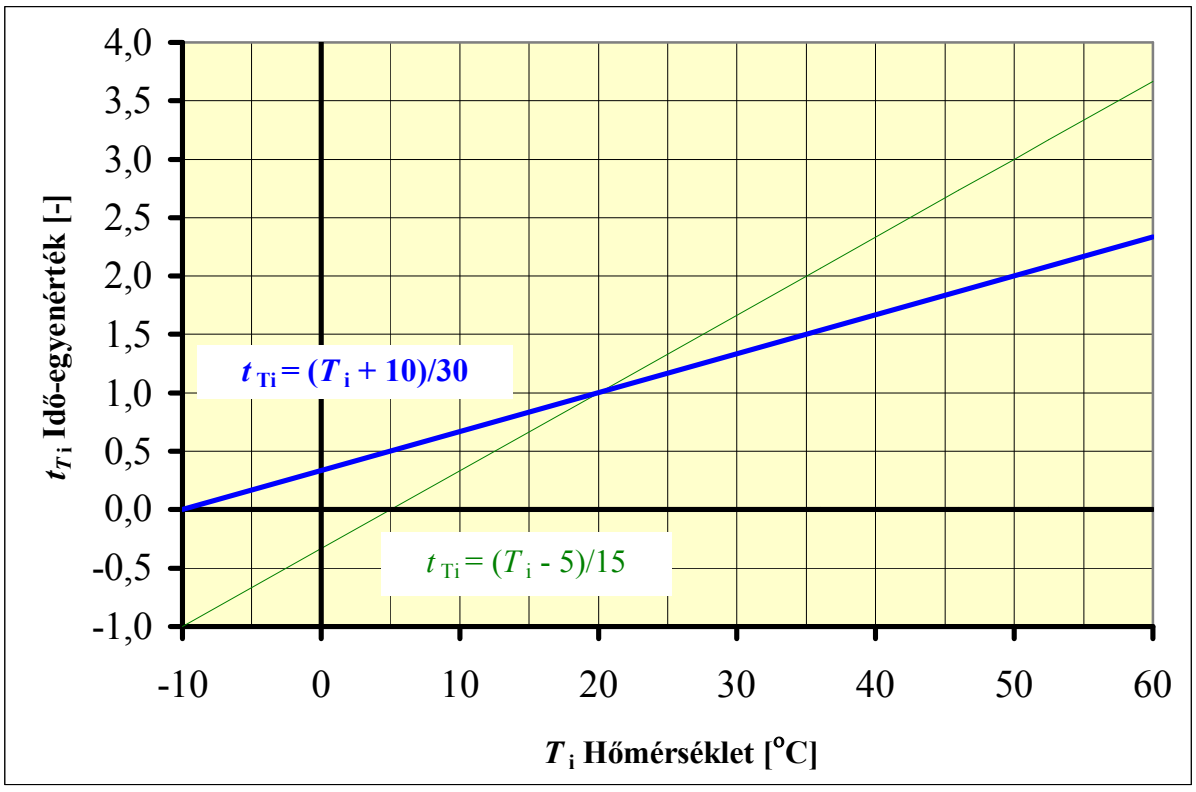
5. ábra: Azonos érési (érlelési) fok-óra számú betonok *Saul*-féle hőmérséklet-idő diagramja

Ha $\Delta t_i = 1$ napon át a hőmérséklet $T_{20ºC} = 20$ ºC, akkor a 20 ºC hőmérséklethez tartozó fok-idő szám $R_{20ºC} = (20 + 10)\cdot 1 = 30$ ºC·nap. Képezzük egy adott T_i betonhőmérséklethez tartozó R_{Ti} fok-idő szám és a $T_{20ºC} = 20$ ºC betonhőmérséklethez tartozó $R_{20ºC}$ fok-idő szám hányadosát, ha a szilárdulási időtartam $\Delta t_i = 1$ nap:

$$t_{T_i} = \frac{R_{T_i}}{R_{20^\circ C}} = \frac{T_i + 10}{30} \qquad [nevezetlen\ \ szám] \qquad (2)$$

A (2) szerinti hányados azt fejezi ki, hogy egységnyi időtartamot, például 1 napot tekintve, egy adott T_i hőmérséklethez tartozó R_{Ti} fok-nap szám hányszorosa a $T_{20ºC} = 20$ ºC hőmérséklethez tartozó $R_{20ºC} = 30$ fok-nap számnak, más szóval, hogy a szóban forgó T_i hőmérsékletű, *i*-edik nap a kémiai reakció (például a beton szilárdulása) szempontjából hány 20 ºC hőmérsékletű nappal ér fel. Ezt a $\boldsymbol{t_{Ti}}$ hányadost „érési képlet”-nek (németül: Reifeformel) nevezik, aminél talán kifejezőbb az **idő-egyenérték** megnevezés.

A *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés képe a T_i-t_{Ti} koordináta rendszerben ábrázolva egy $y = a\cdot x + b$ alakú egyenes, amelynek paraméterei: a = 1/30 és b = 10/30. A 20 ºC hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{Ti} = t_{20ºC} = 1{,}0$, a $T_i = T_0 = -10$ ºC alsó hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{Ti} = t_{-10ºC} = 0{,}0$ (*6. ábra*). A következőkben látni fogjuk, hogy a $T_i = T_0 = 5$ °C alsó hőmérséklettel jellemzett *Saul*-féle függvényt a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban akár ma is használhatjuk, ezért a *6. ábrán* ennek egyenesét is feltüntettük.



6. ábra: A *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés, ha $T_i = T_0 = -10$ °C (és ha $T_i = T_0 = +5$ °C)

A i-edik tényleges szilárdulási időtartamot (Δt_i) az idő-egyenértékkel (t_{Ti}) megszorozva az ***i*-edik hatékony időtartamot** (németül: *wirksames Betonalter*) kapjuk:

$$\Delta t_{T_i} = t_{T_i} \cdot \Delta t_i = \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{3}$$

Ha a hatékony időtartamokat a kémiai reakció kezdetétől (például a beton elkészítésétől) a vizsgált időpontig, tehát i = 1-től n-ig összegezzük, akkor megkapjuk, hogy a vizsgált időpontig eltelt tényleges időtartam a kémiai reakció (a beton szilárdulása) szempontjából mekkora t_T **helyettesítő időtartamnak** (németül: *tatsächliches Betonalter*) felel meg, amelyet a *Saul*-féle összefüggés a következőképpen fejez ki:

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_{T_i} = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{4}$$

A (4) összefüggés – 1978. évi CEB-FIP Model Code ajánlásra hivatkozással – megjelent *Szalai K.* (1982) tanulmányának 2.9. fejezetében a fentihez képest azzal a különbséggel, hogy a hatékony időtartamok összegét ($\Sigma\Delta t_{Ti}$) gyorsan szilárduló, ún. rapid cementek esetén kettővel, gyorsan szilárduló nagyszilárdságú cementek esetén hárommal szorozták. Az így kapott t helyettesítő időtartamot a beton képzett korának nevezték, amelyhez tartozó R_t nyomószilárdságból a 28 napos korú beton R_{28} nyomószilárdságát az

$$R_{28} = \frac{R_t}{\gamma_t} = \frac{R_t}{0{,}83 \cdot \sqrt{lg\, t}} \tag{5}$$

összefüggésből számították ki. A t = 1, 7 és 14 napos korú mesterségesen szilárdított beton esetén az (5) alatti összefüggésbe a $\gamma_t = 0{,}83 \cdot \sqrt{\lg t}$ kifejezés helyett $\gamma_1 = 0{,}45$; $\gamma_7 = 0{,}80$; $\gamma_{14} = 0{,}90$ tapasztalati értéket helyettesítettek.

Az *egykori DIN 4227-1:1988 szabványban* (ma helyette a DIN 1045-1:2008 szabvány van érvényben) a *kúszási tényező* (8.3. fejezet) és a *zsugorodás* (8.4. fejezet) $t < \infty$ időponthoz tartozó értékét a *Saul*-féle összefüggésből származtatott helyettesítő időtartam (t_T) figyelembevételével számították ki. A DIN 4227-1:1988 szabvány 8.6. fejezetében a fentiektől eltérően a helyettesítő időtartam (t_T) összefüggését nevezték „wirksames Betonalter”-nek (*Beton-Kalender* 1991, Teil II, pp. 263.).

A *Bunke, N.* szerkesztésében megjelent *DAfStb Heft 422.* kiadvány (1991) 4.2.2 fejezetében a t_T helyettesítő időtartamot a vizsgálati idő ($\Sigma\Delta t_i$) százalékban fejezték ki (németül relative Reife, jele *rel R*):

$$\text{rel } t_T{}^{\%} = \frac{\sum (T_i + 10) \cdot \Delta t_i}{30 \cdot \sum \Delta t_i} \cdot 100 \quad [nevezetlen\ szám] \tag{6}$$

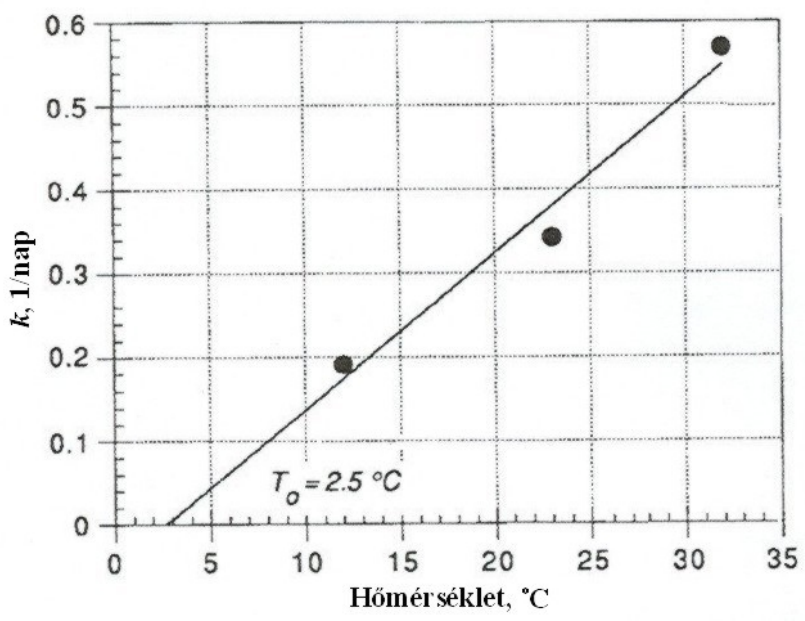
ahol:

T_i a beton napi átlaghőmérséklete, ºC-ban kifejezve
Δt_i a napok száma, amelyeken a beton napi átlaghőmérséklete T_i

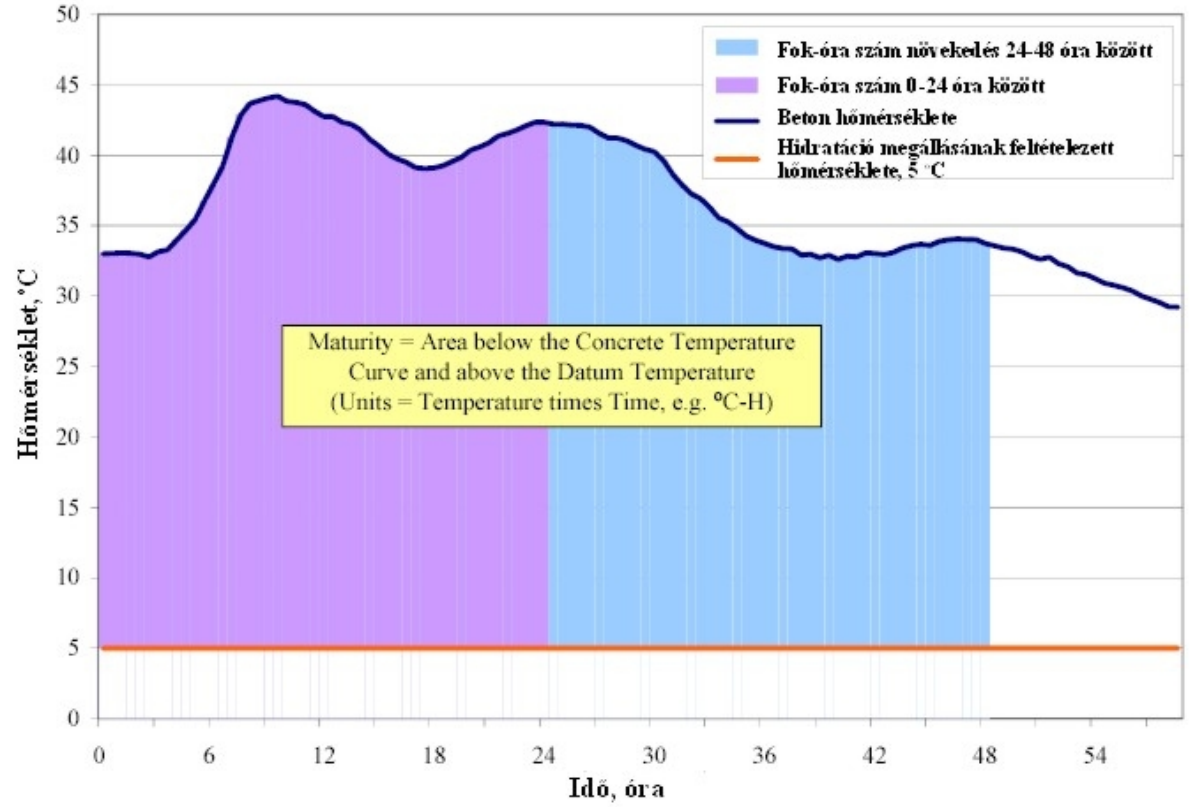
A *Nurse-Saul*-féle elmélet hiányosságai ellenére sem veszítette el időszerűségét, így például az *Iványi György* által szerkesztett *DAfStb Heft 555.* előírás magyarázat (*Iványi Gy.*, 2006) a vízzáró beton építmények irányelvével kapcsolatban a gátolt alakváltozás (németül: Zwang) szempontjából tárgyalja.

Az *ASTM (American Society for Testing and Materials)* Amerikai Anyagvizsgáló Társaság 1987-ben adta ki először az ASTM C 1074-87 szabványt, amellyel a beton érési, szilárdulási állapotának becslését ipari körülmények között is szabályozott módon lehetővé tette (*Report IPRF*, 2006). Az ASTM C 1074-87 szabványban és a ma érvényes változatában (ASTM C 1074-04) két módszert írnak le, ezek egyike a *Nurse-Saul*-féle módszer néven tárgyalt *Saul*-féle, másika a később ismertetésre kerülő *Arrhenius*-féle módszer.

Az ASTM C 1074-04 szabványban és az újabb amerikai irodalomban az eredeti *Saul*- és a később bemutatandó *de Vree*-féle felfogástól (T_0 = -10 °C) eltérő T_0 hőmérsékleteket jelölnek meg a *Saul*-féle fok-óra szám diagram alatti terület alsó határvonalaként (angolul: *datum temperature*), feltételezve, hogy ezen a hőmérsékleten már nincs hidratáció. Ennek megfelelően az ASTM C 1074-04 szabvány 6.2 fejezete a *Nurse-Saul*-féle összefüggést a T_0 értékének megadása nélkül, az (l) szerintitől kissé eltérő $R = \Sigma(T_i + T_0)\cdot\Delta t_i$ alakban mutatja be. A T_0 hőmérséklet jelentőségét a szabvány A1.2 melléklete (Annex A1.2) és X1.2 függeléke (Appendix X1.2) tárgyalja. Az ASTM C 1074-04 szabvány az A1.2 mellékletben a T_0 = 2,5 °C alsó hőmérsékletre közöl diagramot (*7. ábra*), amerikai irodalmi példaként pedig a T_0 = 5 °C alsó hőmérséklet alkalmazására mutatjuk be a *8. ábrát* (*Report IPRF*, 2006).

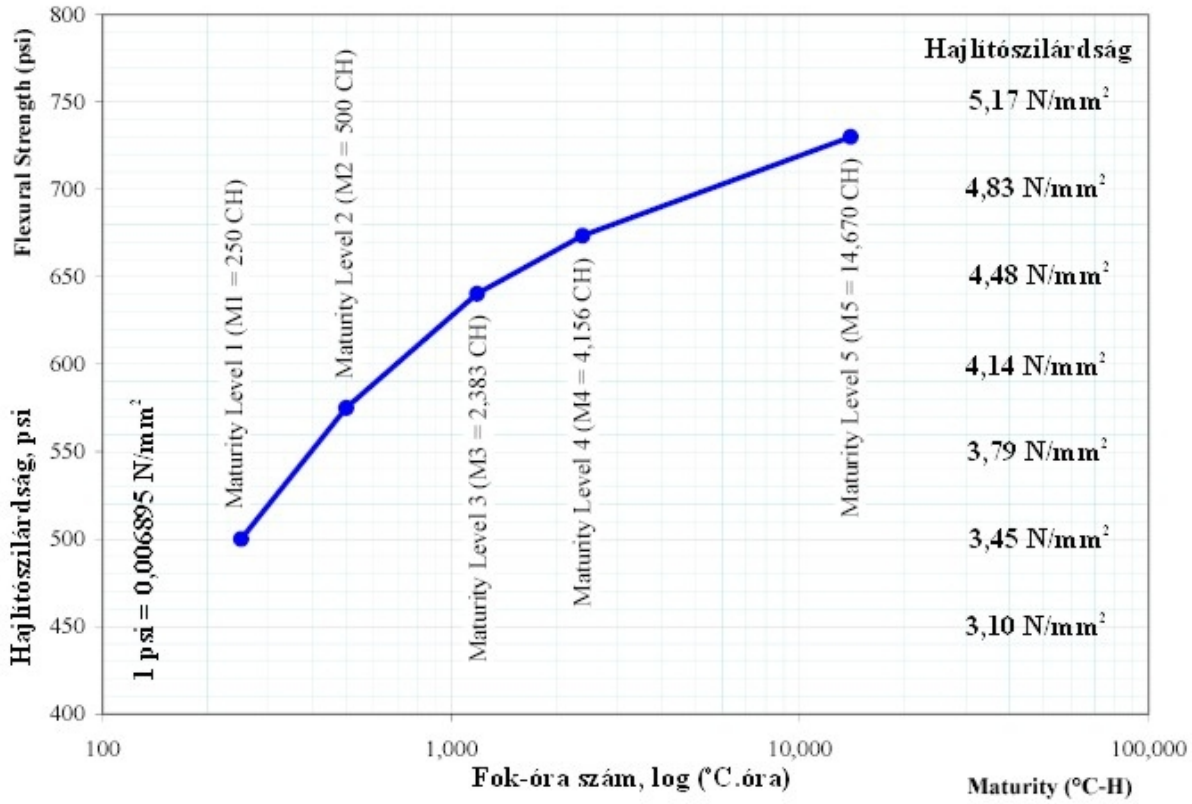


7. ábra: A *Saul*-féle fok-óra szám diagram alatti terület értelmezése az ASTM C 1074-04 szabvány szerint, annak feltételezésével, hogy T_0 = 2,5 °C hőmérséklet alatt nincs hidratáció.



8. ábra: Irodalmi példa a *Saul*-féle fok-óra szám diagram alatti terület értelmezésére, annak feltételezésével, hogy T_0 = 5 °C hőmérséklet alatt nincs hidratáció. Forrás: *Report IPRF*, 2006.

Az *ASTM C 1074-04* szabvány az eredetihez (ASTM C 1074-87) képest bizonyos változtatásokkal van érvényben, például a szilárdulási folyamat vizsgálatát a nyomószilárdságon kívül 2004-ben, az új 8.7 szakasszal a hajlító-húzószilárdságra is kiterjesztették (*9. ábra*).



9. ábra: Összefüggés a *Saul*-féle fok-óra szám és a hajlítószilárdság között. Forrás: *Report IPRF*, 2006

3. PAPADAKIS-BRESSON-FÉLE MODELL

A *Saul*-féle tétel a beton szilárdulási hőmérséklete és nyomószilárdsága közötti összefüggést nagyon leegyszerűsíti. Nem veszi figyelembe, hogy a beton érését kifejező fok-idő szám nagyobb hőmérsékleten hatványozottan növekszik, vagy, hogy a különböző cementféleségeknek különböző hatása van az érési fok-idő számra, pedig például a tiszta portlandcement (CEM I) nyomószilárdságának növekedése nagyobb hőmérsékleten lassabb, mint a kohósalak és egyéb tartalmú portlandcementé (CEM II) vagy a kohósalakcementé (CEM III), és kisebb hőmérsékleten épp fordítva, gyorsabb. Holland cementgyári kísérletek - amelyeket különböző fajtájú és szilárdsági osztályú cementekkel végeztek – eredménye szerint (*Vree – Tegelaar*, 1998) azonos érési fok-óra szám esetén a beton nyomószilárdsága nem azonos, hanem a hőmérséklet növekedésével növekszik (*17. ábra*).

A francia *CERIS* kutatóintézetben (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, Betonipari Tanulmányok és Kutatások Központja, Franciaország, Épernon) *Papadakis, M.* és *Bresson, J.* 1973-ban alakította ki betonérés (szilárdság) becslési módszerét, amellyel – a cement hőérzékenységét figyelembe vevő tényező bevezetése által – a *Saul*-féle eljárást továbbfejlesztette. A bevezetett *Papadakis – Bresson*-féle tényező módosító hatása a nagyobb hőmérsékletek esetén nagyobb, ezért a módszert „súlyozott érés”-nek (hollandul: gewogen rijpheid, angolul: weighted maturity; németül: gewichtete Reife; franciául: maturité pondéré, és a jele *cal R*) nevezték, amelynél magyarul talán kifejezőbb a „cementfüggő” érés megnevezés.

A *10. ábrán* látni, hogy *Papadakis* és *Bresson* az érési idő – diagram alatti területet az abszcissza-tengellyel párhuzamosan 20 °C hőmérséklettől felfele 10 °C hőmérséklet terjedelmű részekre osztotta, és a kapott s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6 nagyságú területeket n = 0, 1, 2, 3, 4, 5 sorszámmal látta el. Bevezették az „A” tényezőt, amely a cement tulajdonságaitól függő állandó szám, amelynek az n sorszám a hatvány kitevője. Minden n-edik s_{n+1} nagyságú területet az „A^n” tényezővel megszorozták. A 20 °C hőmérséklet alatti s_1 terület szorzója

A^0 = 1,0; a (20 – 30) °C közötti s_2 területé $A^1 = A$; és így tovább. Az $s_{n+1} \cdot A^n$ szorzatokat összeadva kapták a „súlyozott” (cementfüggő) érési fok-óra számot:

$$F_{mp} = \sum_{n=0}^{i} s_{n+1} \cdot A^n \quad \left[{}^{o}C \cdot óra \right] \tag{7}$$

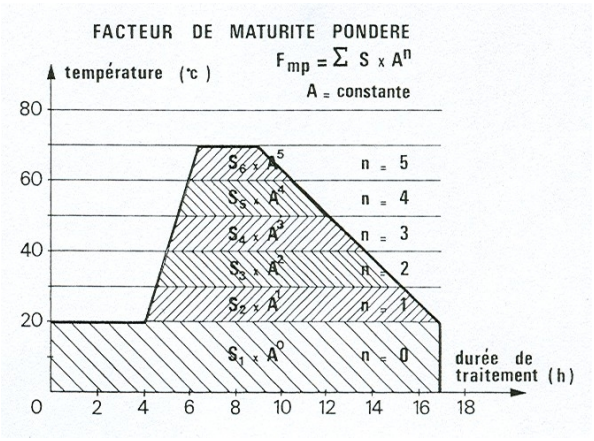
A (7) szerinti *Papadakis-Bresson*-féle összefüggés a *DAfStb Heft 422.* kiadvány (*Bunke, N.,* 1991) 4.2.2 fejezetében is megtalálható.

Papadakis és *Bresson* a relatív nyomószilárdságot (R/R_{28}) a fok-idő számhoz tartozó nyomószilárdságnak (R) és a 20 °C hőmérsékleten tárolt 28 napos próbatestek nyomószilárdságának (R_{28}) hányadosaként fejezte ki a cementfüggő érési fok-idő szám függvényében (*11. - 15. ábra*).

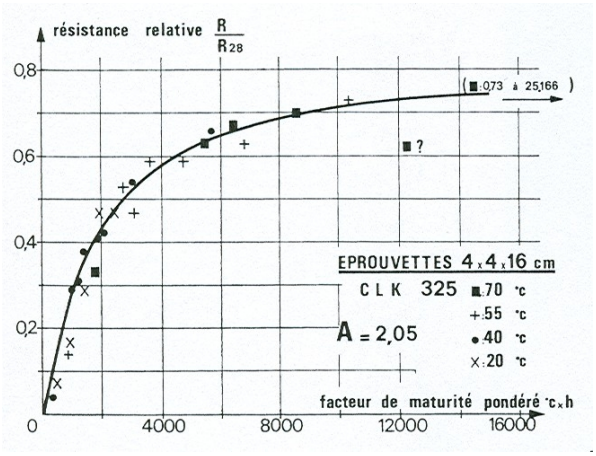
A *11. és 12. ábrán* összesen hat különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramját tüntettük fel, a lineáris beosztású abszcisszán az érési fok-óra szám, az ordinátán a viszonyított nyomószilárdság szerepel. Ezek közül a cementek közül kiválasztottak két cementet, egy mai CEM III kohósalakcementnek megfelelőt (CLK 325 a *13. ábrán*) és egy mai CEM II –V pernyeportlandcementnek megfelelőt (CPAC 325 a *14. ábrán*), és ezek érési diagramját lineáris beosztású, de már a cementfüggő érési fok-óra szám abszcisszájú koordináta-rendszerben (*13. - 14.* ábra), majd közös ábrán, logaritmikus beosztású, cementfüggő érési fok-óra szám abszcisszájú koordináta-rendszerben ábrázolták (*15. ábra*). A szemi-logaritmikus koordináta-rendszerben a *13.* és a *14. ábrán* a görbe futású érési függvények alakja egyenes lett. A cementfüggő „*A*” tényező értéke a *13.* és a *14. ábrán* látható.

A *13. - 15. ábrák* szerint a vizsgált kohósalakcement és pernyeportlandcement 28 napos nyomószilárdságának felét (R/R_{28} = 0,5) 3000 ^{o}C·óra érési fok-óra szám mellett el lehet érni. A *Papadakis – Bresson*-féle 3000 ^{o}C·óra érési fok-óra számú cementek *16. ábrán* feltüntetett érési diagram változatai közül a technológiailag legkedvezőbbet lehet alkalmazni.

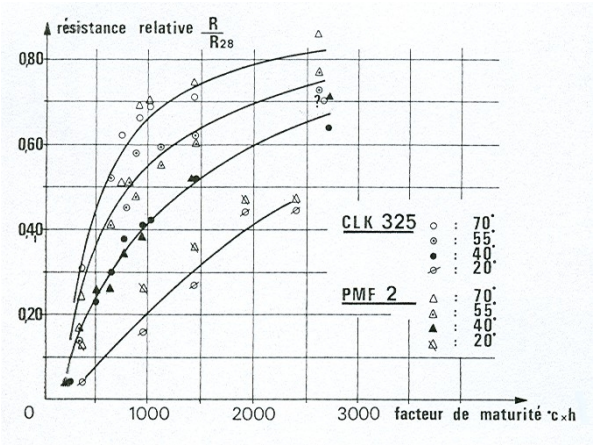
A *Papadakis – Bresson*-féle módszer hátránya, hogy csak 20 °C hőmérséklet felett használható, 20 °C hőmérséklet alatt minden cement egyforma hőérzékenységűnek tűnik, ami nem felel meg a valóságnak, hiszen például kis hőmérsékleten a CEM III/B típusú kohósalakcement szilárdulása lassabb, mint a CEM I tiszta portlandcementé.



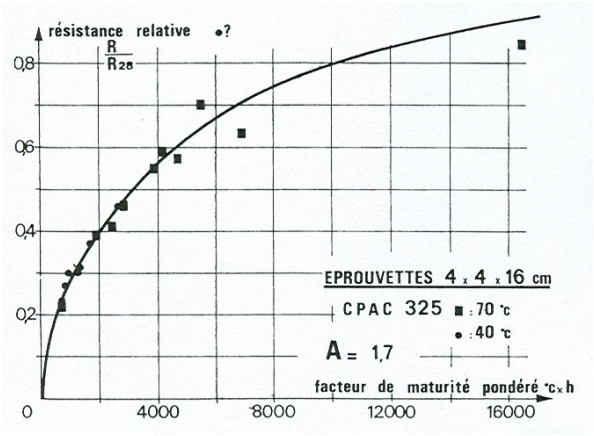
10. ábra: A „súlyozott” (cementfüggő) érési fok-óra szám meghatározása *Papadakis – Bresson* szerint



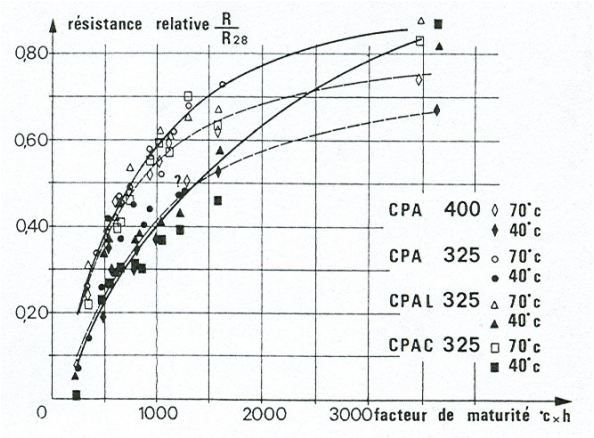
13. ábra: Kohósalakcement próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja



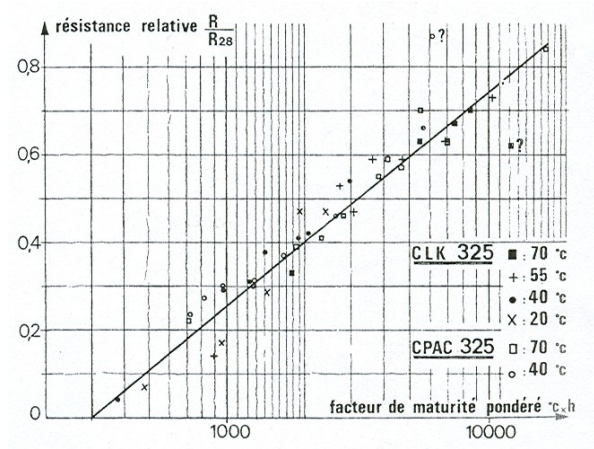
11. ábra: Két különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramja



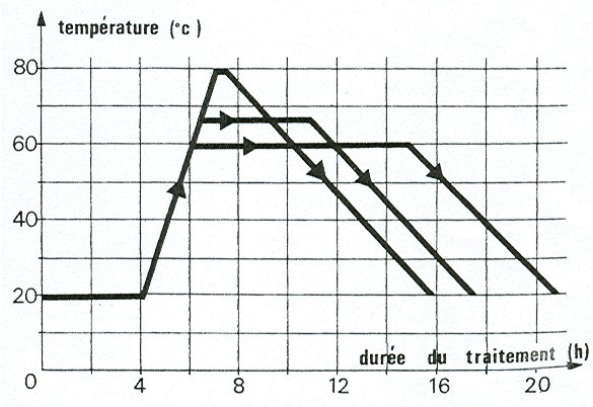
14. ábra: Pernyeportlandcement próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja



12. ábra: Négy különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramja



15. ábra: Kohósalakcement és pernyeportlandcement próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja szemi-logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázolva



16. ábra: *Papadakis – Bresson*-féle 3000 ^{o}C·óra fok-óra számú betonok érési diagram változatai

A *10. - 16. ábra* forrása: *Papadakis, M. – Bresson, J.* 1973.

Magyarázat a *10. - 16. ábrához*:

Facteur de maturité = érési fok-óra szám
Facteur de maturité pondéré = „súlyozott” érési fok-óra szám; cementfüggő érési fok-óra szám
Durée de traitement = érési időtartam
Résistance relative = viszonyított nyomószilárdság
Température = hőmérséklet
Eprouvettes = Vizsgálati próbatest mérete
CPA (Ciment Portland Artificiel) = tiszta portlandcement, mai megfelelője: CEM I
CPAL (Ciment Portland Artificiel au Laitier) = kohósalakportlandcement, mai megfelelője: CEM II -S
CPAC (Ciment Portland Artificiel aux Cendres) = pernyeportlandcement, mai megfelelője: CEM II -V
CLK = (Ciment de Laitier de Haut-Fourneaux au Clinker) = kohósalakcement, mai megfelelője: CEM III
PMF-2 (Ciment Pouzzolano-Métallurgique) = kompzitcement, mai megfelelője: CEM V
A cement betűjele után álló szám a cement nyomószilárdsága 28 napos korban, bar-ban kifejezve (1 bar = 0,1 N/mm^2)
A *10. – 14. ábra*, valamint a *16. ábra* abszcissza-tengelye lineáris, a *15. ábra* abszcissza-tengelye logaritmikus beosztású

FELHASZNÁLT IRODALOM

ASTM C 1074-04 „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”, 2004; A szabvány korábbi változata 1993-ban, illetve 1998-ban jelent meg „Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method” címmel

Beton-Kalender 1991: Schriftleitung J. Eibl, Karlsruhe, Teil II, pp. 263, Jahrgang 80., Ernst & Sohn, Berlin, 1991.

Bunke, N. (szerkesztette): „Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweis als Ergänzung zu DIN 1048”, DAfStb, Heft 422, Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1991

DIN 4227:1988 „Spannbeton – Teil 1: Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung”

Papadakis, M. – Bresson, J.: „Contribution à l’ètude du facteur de maturité des liants hydrauliques application à l’industrie du béton manufacturé”, Revue des Matériaux, Ciments – Betons, Nr. 678, 3/1973, pp. 18-22.

Report IPRF-01-G-002-03-6 „Using Maturity Testing for Airfield Concrete Pavement Construction and Repair”, An Research Report IPRF – Innovative Pavement Research Foundation – Airport Concrete Pavement Technology Program. Skokie (USA, Illinois) 2006.

Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, Magazine of Concrete Research, 1951, No. 6., pp. 127-140.

Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons”, beton, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

„Zement-Taschenbuch” vdz. Verein Deutscher Zementwerke e.V. 51. Ausgabe. Verlag Bau+Technik GmbH., Düsseldorf, 2008., 5.4.1. fejezet, pp. 329-332.

A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.

A cikk rövidített változata megjelent a	BETON szakmai havilap	2010. december havi számának 6-8. oldalán

Vissza a Noteszlapok abc-ben tartalomjegyzékhez

Vissza a Noteszlapok tematikusan tartalomjegyzékhez

Vissza a Fogalmak könyvtár tartalomjegyzékéhez

Tovább a „Fiatal beton szilárdulási folyamata” című dolgozat 2. részére

	Fiatal beton szilárdulási folyamata **2. rész: De Vree-féle modell**	

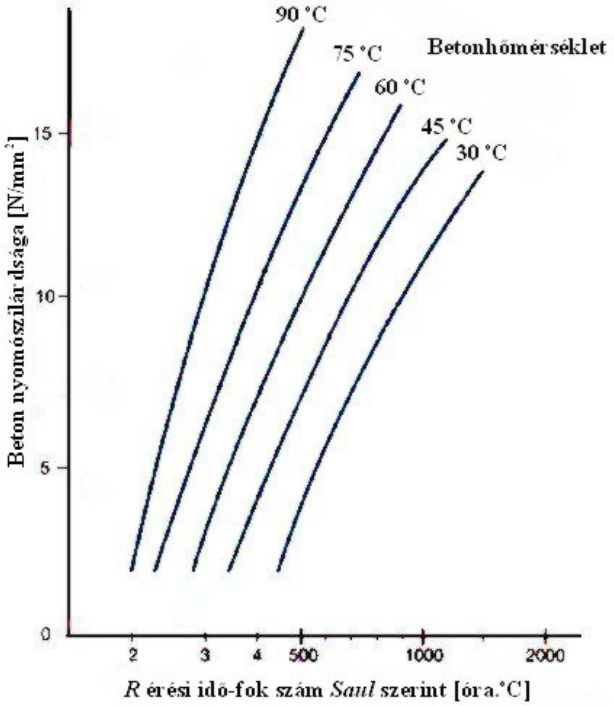
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 2.: Modell nach de Vree
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 2: Model for de Vree
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 2: Modèle pour de Vree

Fogalom-tár

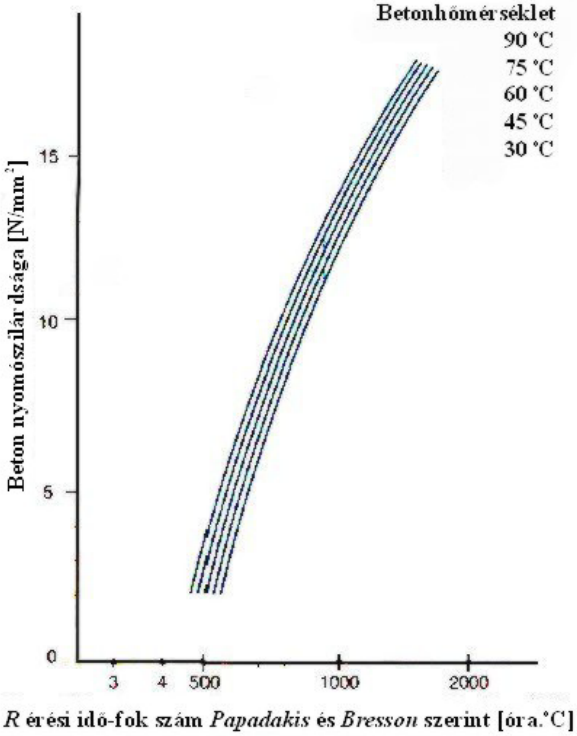
Dr. Kausay Tibor
http://www.betonopus.hu

A holland *R. de Vree* (1998) úgy alakította át a *Papadakis – Bresson*-féle módszert (1973) {◄}, hogy az 20 °C hőmérséklet alatt is használható legyen. Noha a *de Vree*-féle és a *Papadakis – Bresson*-féle módszer nagyon hasonló, a kettő nem cserélhető fel, mert az érési fok-idő szám értékére a két módszer szerint számolva más eredmény adódik.

De Vree és *Tegelaar* (1998) holland kísérleti eredményeket – a *Saul*-féle módszer (1951) {◄} kritikájaként – dolgozott fel a *Saul*-féle módszerrel (*1. ábra*), majd azokat átszámolta és ábrázolta a *Papadakis – Bresson*-féle módszer szerint is *(2. ábra*), és az utóbbi esetben a cementfüggő érési fok-idő szám függvényében valamennyi érési hőfok esetén közel azonos szilárdságokat kapott.



1. ábra: Érési fok-idő szám – beton nyomószilárdság összefüggés. Holland kísérleti eredmények a *Saul*-féle módszerrel feldolgozva. A *Saul*-tétel kritikája



2. ábra: Cementfüggő érési fok-idő szám – beton nyomószilárdság összefüggés. Holland kísérleti eredmények a *Papadakis – Bresson*-féle módszerrel feldolgozva

Megjegyzés: Az *1.* és a *2. ábrán* az abszcissza-tengely logaritmikus beosztású.
Forrás: *De Vree – Tegelaar*, 1998.

A *Papadakis – Bresson*-féle modell korlátainak feloldására *de Vree* bevezetett egy új cement hőérzékenységet kifejező *C* tényezőt (németül: Wichtungsfaktor für die Zementart) és a „javított cementfüggő” (korrigált) érési fok-óra szám (németül: gewichtete Reife) fogalmát:

$R_{\text{de Vree}} = \Sigma r_i \cdot \Delta t_i$ [°C·óra]

ahol:

$R_{\text{de Vree}}$	a beton érését (a hidratáció előrehaladtát) kifejező „javított cementfüggő” fok-óra szám *de Vree* szerint
r_i	az adott szilárdulási időtartam (óra) alatt változatlan „javított cementfüggő” betonhőmérséklet, ºC-ban kifejezve, amely a cement hőérzékenységét kifejező *de Vree*-féle *C* tényező függvénye
Δt_i	a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan (T_i), órában kifejezve
i	a szilárdulási időtartam (intervallum) sorszáma, i = 1, 2, 3…n

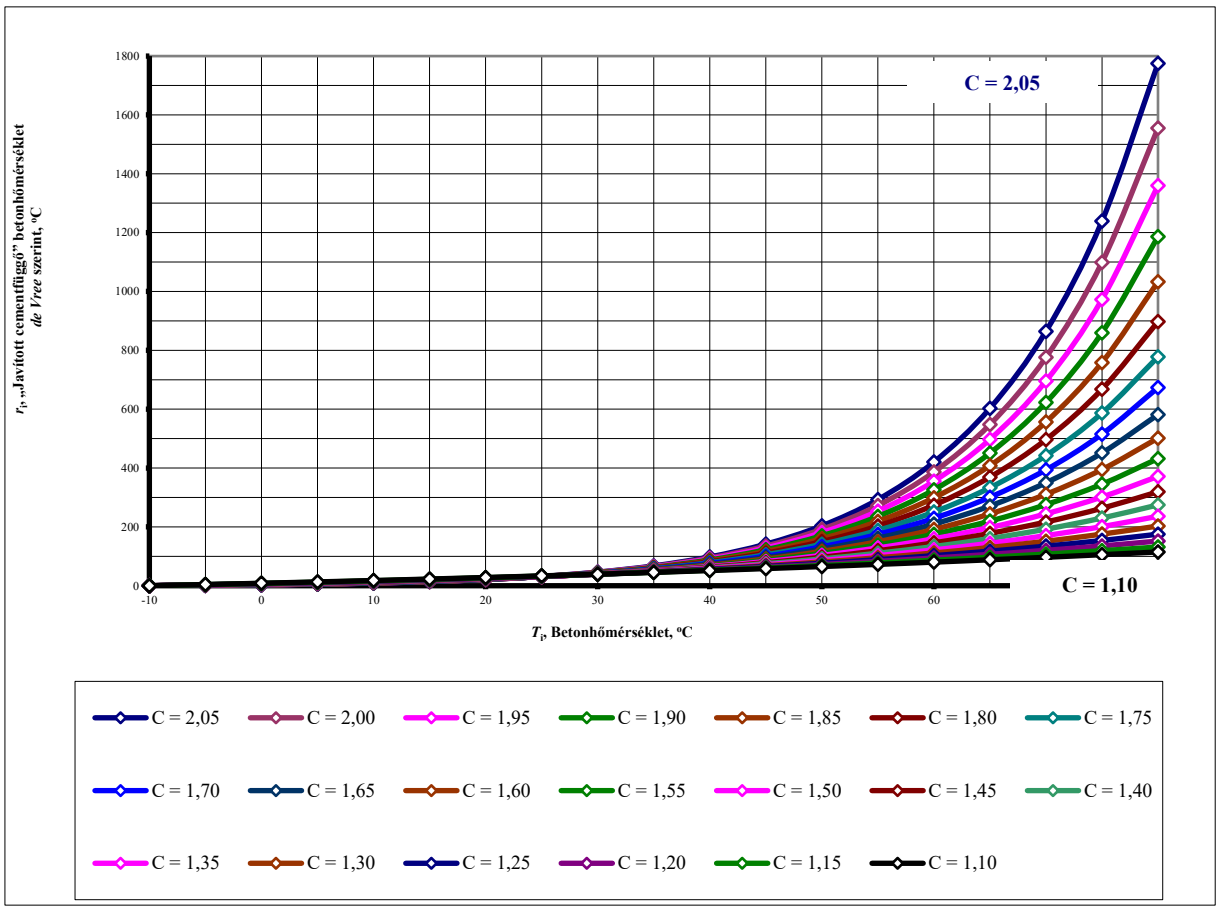
Az 1 óra szilárdulási időtartam alatt változatlan „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérséklet *de Vree* szerint:

$$r_i = \int_{-10\ ^oC}^{T_i} \left(C^{(0,1\cdot T_i - 1,245)}\right) dT = \frac{10}{\ln C} \cdot \left(C^{(0,1\cdot T_i - 1,245)} - C^{-2,245}\right) \qquad [^oC]$$

ahol:

T_i	a beton átlaghőmérséklete a szilárdulási időtartam (1 óra) alatt, ºC-ban kifejezve
C	a cement hőérzékenységét kifejező *de Vree*-féle tényező

A *de Vree*-féle r_i „javított cementfüggő” betonhőmérséklet a T_i = -10 °C hőmérsékleten a *C* tényező bármely értéke esetén nulla értéket vesz fel, tehát *R. de Vree – A. G. A. Saullal* megegyezően – feltételezi, hogy -10 ºC hőmérsékleten a beton hidratációja megáll, azaz ha T_i = -10 ºC, akkor r_i = 0,0 (*3. ábra*).



3. ábra: „Javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérséklet *de Vree* szerint (r_i) a betonhőmérséklet (T_i) és a cement hőérzékenységét kifejező C tényező függvényében, a (8) összefüggés alapján

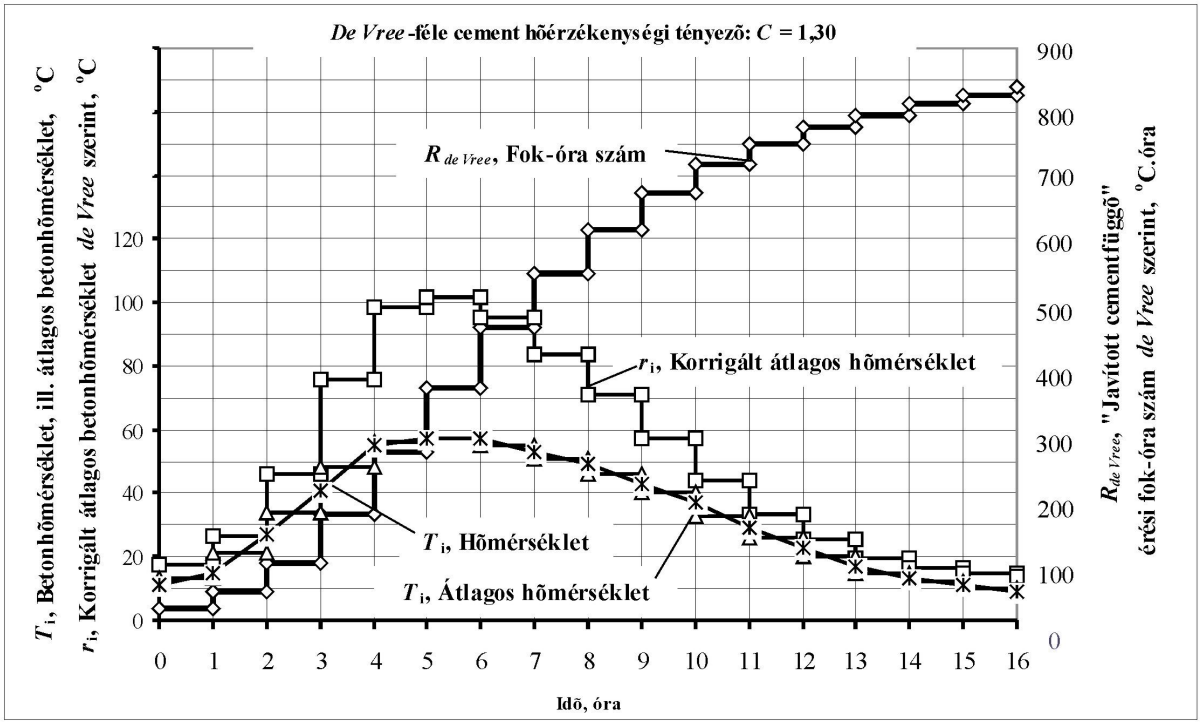
A *de Vree*-féle C tényezőt minden cementre külön kell meghatározni, mert az a cement összetételének, illetve klinker-tartalmának függvénye.

A *de Vree*-féle modell a fiatal beton szilárdulási folyamatának kifejezésére, például az előfeszítés, a kizsaluzás, az emelés, az utókezelési időtartam meghatározására előnyösen alkalmazható.

Az *1. táblázatban* számpélda található a *de Vree*-féle fok-óra szám ($R_{de\ Vree}$) meghatározására. A vizsgált időtartam 16 óra, amelyre a beton változó hőmérsékletét óránkénti átlagával (T_i) adtuk meg. Az átlagos „javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérsékletet a beton átlaghőmérsékletéből az r_i összefüggés felhasználásával számítottuk ki minden órára (az *1. táblázatban* soronként), annak feltételezésével, hogy a cement hőérzékenységét kifejező tényező értéke C = 1,30. Az óránkénti r_i hőmérsékleteket összegezve megkaptuk a *de Vree-féle* „javított cementfüggő" (korrigált) érési fok-óra számot, amely példánk esetén a vizsgált 16 órás időtartam végén $R_{de\ Vree}$ = 839,74 °C·óra. Az *1. táblázatbeli* számpéldát grafikusan a *4. ábrán* rajzoltuk meg.

1. táblázat: Számpélda a *de Vree*-féle fok-óra szám számítására, ha a cement hőérzékenységi tényező értéke $C = 1{,}30$ (lásd a *4. ábrát*)

t_i, Idő, óra	T_i, Beton-hőmérséklet, °C	$T_{i,}$ Átlagos beton-hőmérséklet, °C	$r_{i,}$ Korrigált átlagos beton-hőmérséklet, °C, ha $C = 1{,}30$	$R_{\text{de Vree}}$, *de Vree*-féle fok-óra szám, °C·óra
0	11	13	17,52	17,52
1	15	21	26,55	44,07
2	27	34	45,94	90,01
3	41	48	75,72	165,72
4	55	56	98,34	264,06
5	57	57	101,51	365,58
6	57	55	95,24	460,82
7	53	51	83,65	544,47
8	49	46	70,76	615,23
9	43	40	57,38	672,61
10	37	33	44,20	716,81
11	29	26	33,24	750,04
12	23	20	25,32	775,36
13	17	15	19,60	794,96
14	13	12	16,52	811,48
15	11	10	14,59	826,07
16	9	9	13,67	839,74



4. ábra: Számpélda (lásd az *1. táblázatot*) a *de Vree*-féle fok-óra szám számítására, ha a cement hőérzékenységi tényezőjének értéke $C = 1{,}30$

De Vree alapvetően követte *Saul* felfogását, amely szerint a beton átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) arányos a betonérési fok-óra szám (R) logaritmusával, illetve módosította annyiban, hogy arányos a *korrigált* betonérési fok-óra szám ($R_{de\ Vree}$) logaritmusával, vagy ami ugyanazt jelenti, – mert LN $R_{de\ Vree}$ = 2,302585·LOG $R_{de\ Vree}$ – természetes alapú logaritmusával:

$$f_{cm} = a\cdot(\mathrm{LN}\ R_{de\ Vree}) + b$$

A természetes alapú logaritmus beosztású abszcissza-tengely felett ábrázolt regressziós f_{cm} = f(LN $R_{de\ Vree}$) függvény egyes alakú, és $R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagramnak (németül: Eichgraphik) nevezzük, de nevezik főképp Hollandiában – a C tényező számítási módszere után – *Cemij*-féle diagramnak is {►}. A betonérési diagramot általában a beton gyártója készíti el egy olyan betonszilárdsági tartományra, amely a beton alkalmazása során előfordul, de elkészítheti a cementgyár is különböző nyomószilárdsági osztályú „etalon” betonok esetére a saját cementjeivel.

A szabályozott *de Vree*-féle betonérési fok, illetve szilárdság becslési módszer leírását a holland NEN 5970:2001 szabvány tartalmazza. A hollandok 1984-ben a beton érési folyamatának vizsgálatára korszerű, több típusból álló, négy mérőhelyes elektronikus műszer sorozatot (MC 900 rijpheids – computer) fejlesztettek ki, amelynek használatát a betontechnológia legkülönbözőbb területein a kizsaluzás, az utókezelés befejezése, a feszítés, a terhelés, a vágás, fúrás, megmunkálás, az emelés megfelelő időpontjának meghatározásához stb. ajánlják (Iken – Lackner – Zimmer – Wöhnl, 2003).

Felhasznált irodalom

- NEN 5970:2001„Bepaling van de druksterkte-ontwikkeling van jong beton op basis van de gewogen rijpheid”, holland szabvány
- Iken, H.-W. – Lackner, R. R. – Zimmer, U. P. – Wöhnl, U.: „Handbuch der Betonprüfung. Anleitungen und Beispiele”, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2003.
- Papadakis, M. – Bresson, J.: „Contribution à l’ètude du facteur de maturité des liants hydrauliques application à l’industrie du béton manufacturé”, Revue des Matériaux, Ciments – Betons, Nr. 678, 3/1973, pp. 18-22.
- Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, Magazine of Concrete Research, 1951, No. 6., pp. 127-140.
- Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons”, beton, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

Jelmagyarázat:
{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.
{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.

A cikk rövidített változata megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. január havi számának 20-21. oldalán

Fiatal beton szilárdulási folyamata 3. rész: CEMIJ[1]-féle módszer a de Vree-féle tényező számítására

Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 3: CEMIJ-Methode für Berechnung des de Vree-Faktors
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part3: CEMIJ method for calculating the de Vree-factor
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 3: Cemij méthode de calcul du facteur de de Vree

Fogalom-tár

Dr. Kausay Tibor
http://www.betonopus.hu

Valamely adott cementhez tartozó tényleges *de Vree*-féle *C* tényező {◄} meghatározása habarcs vagy beton próbatestek szilárdulási folyamatának mérésén alapul. A méréshez azonos összetételű, de különböző hőmérsékleteken tárolt próbatest sorozatokat kell készíteni. Valamely sorozat mintáinak nyomószilárdságát különböző időpontokban meg kell határozni. A minta legalább három próbatestből álljon, egy nyomószilárdság adat tehát legalább három azonos hőmérsékleten tárolt, egy időpontban vizsgált próbatest nyomószilárdságának átlaga.

A *de Vree*-féle *C* tényező számítására kidolgozott *CEMIJ*-féle módszert a DAfStb Heft 422. kiadvány (*Bunke, N.,* 1991) 4.2.3 fejezetében is ismertetik, és annak alkalmazását *T. Vermeersch* (2005) Belgiumban készített diplomamunkája alapján számpéldán mutatjuk be.

A kísérleti beton 400 kg/m^3 adagolású CEM III/A 52,5 N LA jelű belga kohósalak-cementtel, $x = v/c = 188/400 = 0{,}47$ víz-cement tényezővel, a cement-adagolásra vett 0,3 tömeg% polikarboxilát alapú szuper-folyósító adalékszerrel, 4/7 mm szemnagyságú mészkő zúzottkő és 0/2 mm szemnagyságú kvarchomok adalékanyaggal készült. A beton próbakocka sorozatokat 30 °C, 20 °C, 15 °C és 10 °C hőmérsékleten, 80 % relatív páratartalmú klímaszekrényben tárolták. A három-három próbakockából álló minták nyomószilárdságát fiatal korban öt különböző időpontban és 28 napos korban vizsgálták. A számpélda kiindulási adatai az *1. táblázatban* szerepelnek.

[1] A *CEMIJ* (Cement Industrie IJmuiden) az *ENCI* (Eerste Nederlandse Cement Industrie) holland cementművek ijmuideni (Hollandia) cementgyárának a neve. Az ENCI a Heidelbergi Cement Csoport (*HeidelbergCement Group*) tagja.

1. táblázat: Számpélda alapadatai a *C* tényező számítására *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

„A” kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 30 °C		„B” kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 20 °C	
Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2	Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2
9,17	6,1	16,00	6,2
10,90	9,5	17,83	7,6
12,00	12,3	19,83	9,5
13,17	14,1	21,67	11,5
14,30	16,0	25,50	14,6
672 (28 nap) *	54,0	672 (28 nap) *	54,8
„C” kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 15 °C		„D” kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 10 °C	
Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2	Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2
20,00	5,6	26,50	5,0
23,00	6,6	31,67	6,5
27,67	9,1	36,83	8,1
31,83	12,2	41,67	9,9
37,00	15,7	46,67	11,5
672 (28 nap) *	63,6	672 (28 nap) *	62,4
* A fiatal beton szilárdulási folyamatának értékelésébe a 28 napos korú beton vizsgálati eredményeit nem vontuk be.			

A kísérlet a fiatal korú betonra 4·5 = 20 idő-nyomószilárdság mérési értékpárt eredményezett.

A számítás során különböző *C* tényezők feltételezése mellett, mind a 20 mérési értékpár felhasználásával logaritmikus (természetes alapú logaritmus beosztású vízszintes tengely felett egyenes alakú) összefüggést keresünk a *de Vree*-féle fok-óra szám ($R_{de\ Vree}$) és a nyomószilárdság (f_{cm}) között, és kiszámítjuk az összefüggés korrelációs együtthatójának négyzetét. A feladat megoldását az a $C_{optimális}$ tényező adja, amelyikhez a legnagyobb r^2 korrelációs együttható négyzet tartozik.

A *C* tényező számításának lépései a következők:

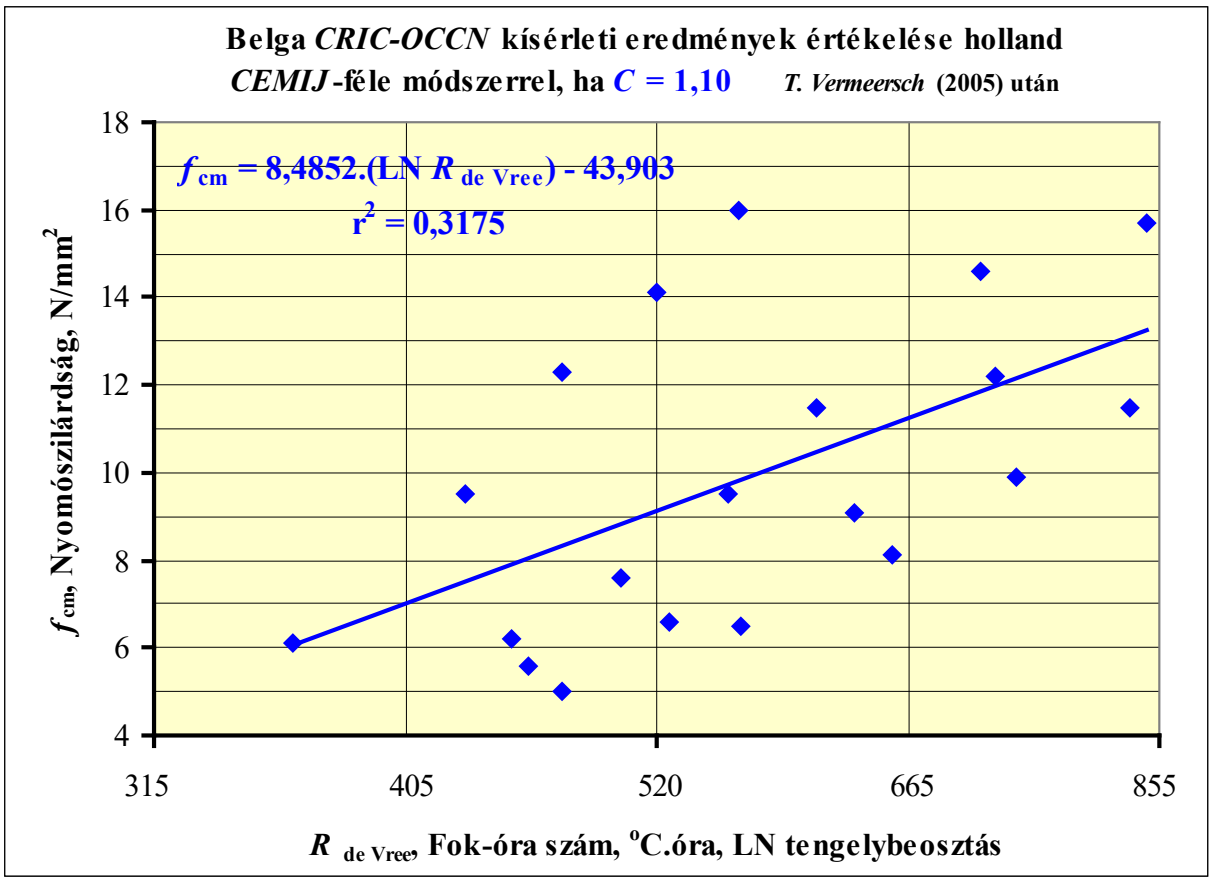
1. Fel kell venni a *C* tényező valamely értékét, például először legyen C = 1,10.
2. A felvett *C* tényező felhasználásával minden T_i átlagos betonhőmérsékletre meg kell határozni a *de Vree*-féle „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérsékletet (r_i). Például C = 1,10, T_i = 30 °C esetén r_i = 39,31 °C.
3. A *de Vree*-féle „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérsékletet (r_i) megszorozva a Δt_i érési (szilárdulási) idővel, megkapjuk a teljes érési időhosszra vonatkozó *de Vree*-féle „javított cementfüggő” (korrigált) érési fok-óra számot ($R_{de\ Vree}$). A számítást valamennyi Δt_i érési (szilárdulási) időre el kell végezni. Például, ha C = 1,10, T_i = 30 °C és Δt_i = 9,17 óra, akkor $R_{de\ Vree} = r_i \cdot \Delta t_i = 39{,}31 \cdot 9{,}17 = 360{,}47$ °C·óra.
4. Kiszámítjuk a meghatározott *de Vree-féle* „javított cementfüggő” (korrigált) érési fok-óra számok ($R_{de\ Vree}$) természetes alapú logaritmusát (LN $R_{de\ Vree}$), amelyhez mint független változóhoz (x_i) hozzárendeljük függő változóként (y_i) a nyomószilárdság átlagértékét (f_{cm}).

Például C = 1,10, T_i = 30 °C, Δt_i = 9,17 óra, illetve $R_{de\ Vree}$ = 360,47 °C·óra esetén x_i = LN $R_{de\ Vree}$ = 5,887 és $y_i = f_{cm}$ = 6,1 N/mm^2.

5. A példa esetén 20 darab LN $R_{de\ Vree}$ – f_{cm} értékpárral rendelkezünk (*1. táblázat*), amelyeknek az adott C tényezőhöz tartozó értékeit grafikusan a természetes alapú logaritmikus beosztású abszcissza-tengellyel és a lineáris beosztású ordináta-tengellyel rendelkező koordináta rendszerben ábrázolhatjuk.
6. Következő feladatunk a felvett C tényezőhöz tartozó 20 darab LN $R_{de\ Vree}$ – f_{cm} értékpárra rajzolt regressziós egyenes „*a”* regressziós együtthatójának, „*b”* regressziós y-tengelymetszetének, valamint az ezekkel kapott regressziós egyenes korrelációs együtthatója négyzetének (r^2) meghatározása.
   A korrelációs együttható r^2 négyzete az $R_{de\ Vree}$ mért fok-óra számhoz (mint x_i értékhez) tartozó mért $f_{cm,i,mért}$ nyomószilárdság (mint y_i érték) és a regressziós függvényből számított $f_{cm,i,számított}$ nyomószilárdság (mint Y_i) érték közötti kapcsolat szorosságát fejezi ki:

$$r^2 = \frac{\left(\sum (y_i - \overline{y}) \cdot (Y_i - \overline{Y})\right)^2}{\sum (y_i - \overline{y})^2 \cdot \sum (Y_i - \overline{Y})^2}$$

   A kapcsolat annál szorosabb, minél inkább az 1,0-hez tart a korrelációs együttható négyzetének (r^2) az értéke.
   Megjegyzés: A korrelációs együttható r betűjele véletlenül ugyanaz, mint a *de Vree*-féle „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérséklet r_i betűjele, de a nemzetközi irodalomban így használják, ezért nem változtattuk meg.
   A példa esetén a felvett C = 1,10 tényezőhöz tartozó regressziós egyenes egyenlete:
   f_{cm} = 8,4852·(LN $R_{de\ Vree}$) – 43,903
   és a korrelációs együttható négyzete r^2 = 0,3175, amelyet az *1. ábrán* ($R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagram) tüntettünk fel.



1. ábra: Példa szerinti összefüggés az $R_{de\ Vree}$-féle fok-óra szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága között ($R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagram), ha a cement hőérzékenységi tényező értéke C = 1,10

7. Az 1. – 7. lépéseket újabb C tényezőkkel megismételve, az f_{cm} = f (LN $R_{de\ Vree}$) regressziós függvény és a hozzá tartozó korrelációs együttható négyzet meghatározását minél több felvett C tényező esetére el kell végezni. Példánk esetén a felvett C tényezőkhöz a *2. táblázatban* ($y_r2_{,i}$) adatként feltüntetett r^2 korrelációs együttható négyzeteket kaptuk.

2. táblázat: A felvett *C* tényezőkhöz tartozó r^2 korrelációs együttható négyzetek a példa esetén. Lásd a *2. ábrát*. *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

C tényező	$R_{\text{de Vree}} - f_{\text{cm}}$ regressziós függvény korrelációs együtthatójának négyzete (r^2), (lásd a *3. ábrát*). A $C - r_{f\text{cm}}^2$ koordinátarendszerben (lásd a *2. ábrát*)		C tényező	$R_{\text{de Vree}} - f_{\text{cm}}$ regressziós függvény korrelációs együtthatójának négyzete (r^2), (lásd a *3. ábrát*). A $C - r_{f\text{cm}}^2$ koordinátarendszerben (lásd a *2. ábrát*)	
	adat ($y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)	függvény érték ($Y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)		adat ($y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)	függvény érték ($Y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)
1,10	0,3175	0,3180	1,65	0,9404	0,9384
1,15	0,3819	0,3746	**C_{opt}: 1,66**	**0,9404**	**0,9389**
1,20	0,4536	0,4475	1,67	0,9401	0,9389
1,25	0,5308	0,5284	1,70	0,9365	0,9366
1,30	0,6105	0,6110	1,75	0,9236	0,9250
1,35	0,6890	0,6899	1,80	0,9041	0,9056
1,40	0,7619	0,7613	1,85	0,8801	0,8807
1,45	0,8252	0,8222	1,90	0,8534	0,8525
1,50	0,8757	0,8708	1,95	0,8254	0,8236
1,55	0,9116	0,9064	2,00	0,7970	0,7962
1,60	0,9327	0,9287	2,05	0,7690	0,7725

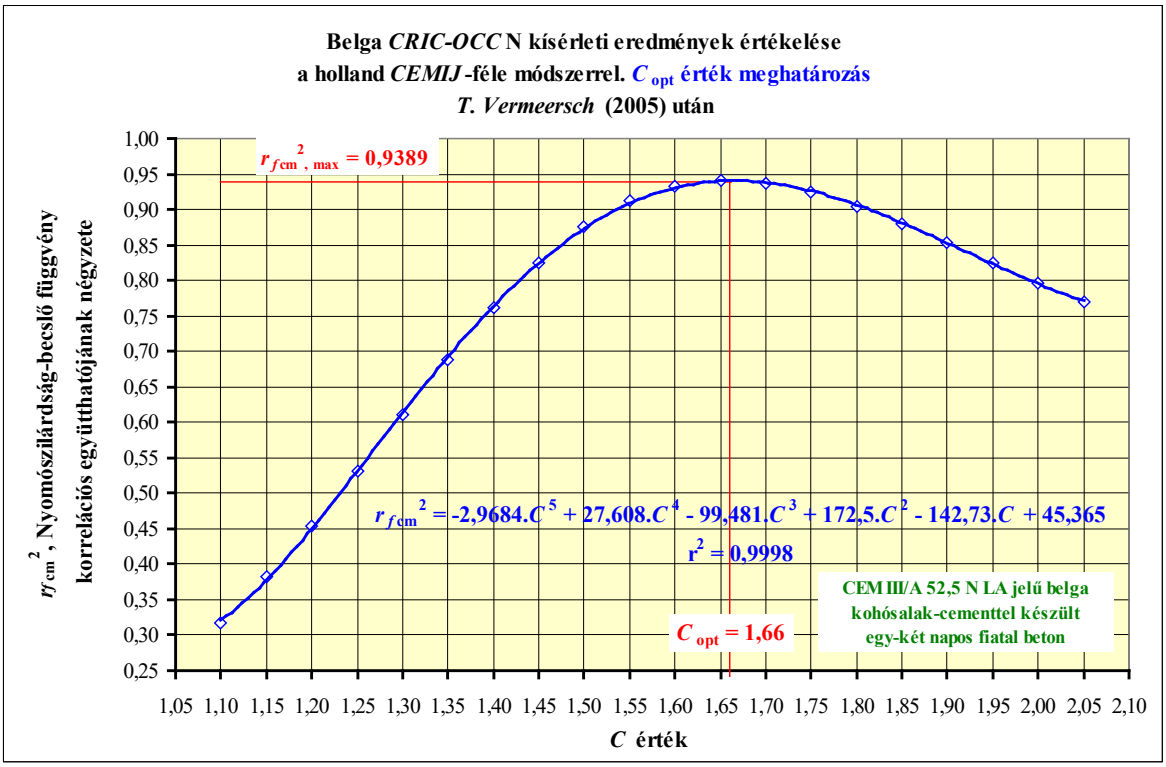
8. A meghatározott *C*-r^2 értékpárokat – a *2. táblázat* jelölésével C-$y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$ adatpontokat – (példánk esetén 22 darab) a *2. ábrán* lineáris koordinátarendszerben ábrázoltuk, és az ábrázolópontokra jól illeszkedő ötödfokú polinom alakú regressziós görbét fektettünk, amelynek egyenlete:

$$r_{f\text{cm}}^2 = -2{,}9684 \cdot C^5 + 27{,}608 \cdot C^4 - 99{,}481 \cdot C^3 + 172{,}5 \cdot C^2 - 142{,}73 \cdot C + 45{,}365$$

és korrelációs együtthatójának négyzete: $r^2 = 0{,}9998$.

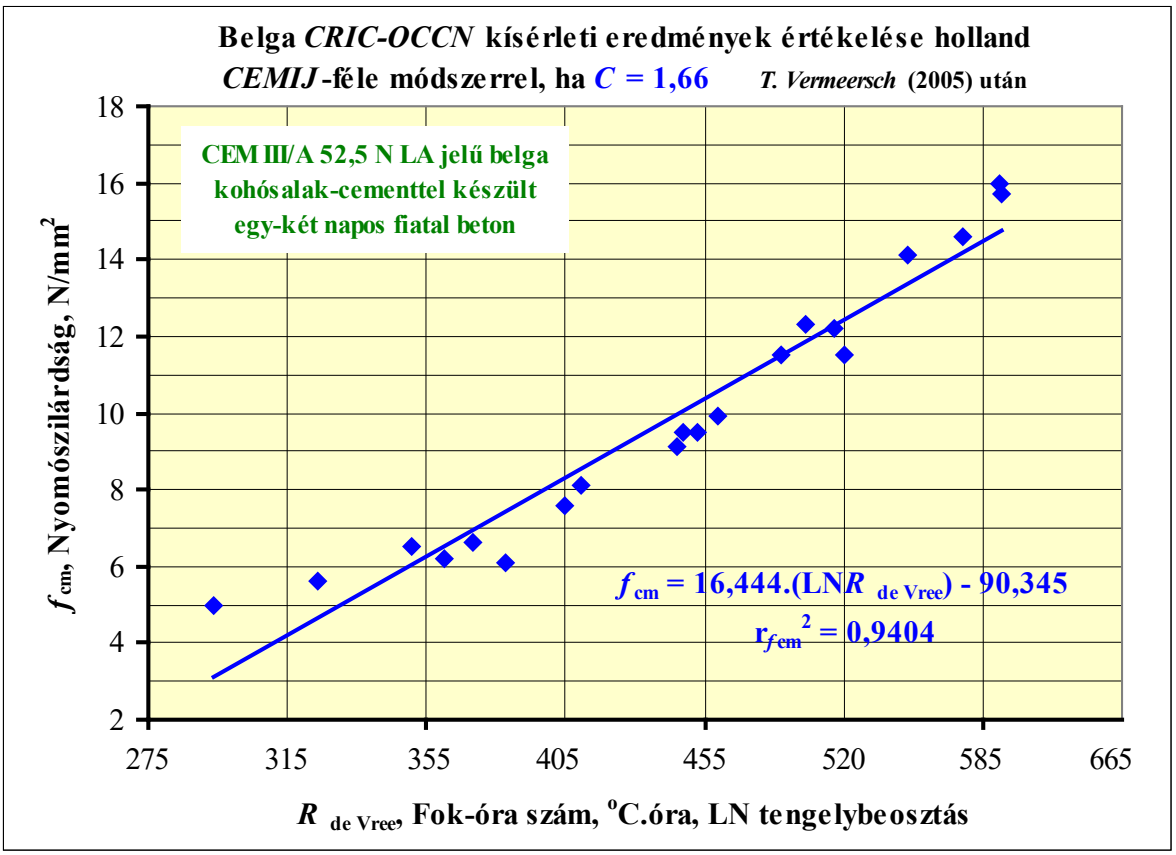
A regressziós ötödfokú polinom *C* abszcissza értékekhez tartozó $r_{f\text{cm}}^2$ ordináta értékeit a *2. táblázatban* $Y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$ függvény értékként jelöltük.

Megállapíthatjuk, hogy a regressziós ötödfokú polinom a legnagyobb, $Y_{\text{r}}2_{,\text{max}} = r_{f\text{cm}}^2{}_{,\text{max}}$ értéket ($r_{f\text{cm}}^2{}_{,\text{max}} = 0{,}9389$) a $C_{\text{opt}} = 1{,}66$ helyen veszi fel; és ezen a helyen van az $R_{\text{de Vree}}$-féle fok-óra szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága közötti összefüggések regressziós egyenese korrelációs együtthatója négyzetének – mint a *2. ábra* adatpontjának – is a legnagyobb értéke ($y_{\text{r}}2_{,\text{max}} = r_{f\text{cm}}^2{}_{,\text{max}} = 0{,}9404$). Lásd a *2. táblázatot* és a *3. ábrát*.



2. ábra: A példa szerinti C_{opt} érték meghatározása. *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

9. A példa esetén tehát a beton átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) akkor becsülhető meg a legmegbízhatóbban a *de Vree*-féle fok-óra számból ($R_{de\ Vree}$), ha a számítást a C = 1,66 értékű C tényezővel végezzük. A C = 1,66 tényezőhöz tartozó, a példa esetén érvényes $R_{de\ Vree} - f_{cm}$ nyomószilárdság becslő függvény a *3. ábrán* látható.



3. ábra: A C = 1,66 tényezőhöz tartozó, a példa esetén érvényes $R_{de\ Vree}$ – f_{cm} nyomószilárdság becslő függvény, mint a példa megoldása. *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

Felhasznált irodalom

- Bunke, N. (szerkesztette): „Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweis als Ergänzung zu DIN 1048”, DAfStb, Heft 422, Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1991.
- Iken, H.-W. – Lackner, R. R. – Zimmer, U. P. – Wöhnl, U.: „Handbuch der Betonprüfung. Anleitungen und Beispiele”, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2003.
- Vermeersch, T.: Semi-automatische bepaling van de ontkistingssterkte toegepast op het productieproces van Prefadim Belgium NV. Diplomamunka. Katholieke Hogeschool Brugge – Oostende, 2005.
- Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons”, beton, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

Jelmagyarázat:
{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.
{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.

A cikk rövidített változata megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. február havi számának 19-21. oldalán

Fiatal beton szilárdulási folyamata 4. rész: Arrhenius-féle modell

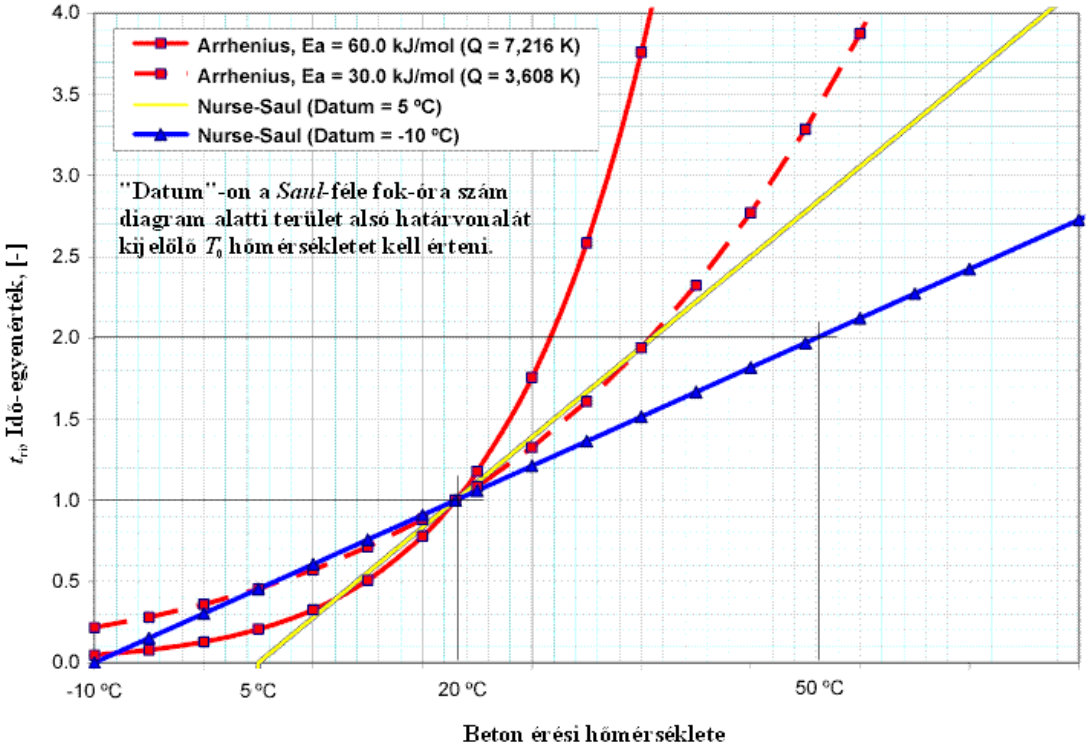
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 4: Modell nach Arrhenius
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 4: Model for Arrhenius
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 4: Modèle pour Arrhenius

Fogalom-tár

Dr. Kausay Tibor
http://www.betonopus.hu

Svante Arrhenius (1859-1927) svéd kémiai Nobel-díjas (1903) fizikus és kémikus 1888-ban dolgozta ki a tételét, amelyet beton érési-szilárdulási becslő modellként először 1977-ben *P. Freiesleben Hansen* és *E. J. Pedersen* alkalmazott. Míg a *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés {◄} alakja lineáris, addig az *Arrhenius*-féle összefüggés exponenciális görbét eredményez (*1. ábra*).

Az *1. ábrán* a különböző feltételeknek megfelelő *Saul*- és *Arrhenius*-féle idő-egyenérték függvények elhelyezkedését vethetjük össze. Az *1. ábra* szerint a T_0 = 5 °C alsó hőmérséklettel (Datum = 5 °C) jellemzett *Nurse-Saul*-féle függvény a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban jó közelítését adja az *MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2)* szabványban is szereplő E_a = 30,0 kJ/mol jellemzőjű *Arrhenius*-féle függvénynek.



1. ábra: Különböző feltételeknek megfelelő *Saul*- és *Arrhenius*-féle idő-egyenérték függvények összevetése. Forrás: *Report IPRF*, 2006.

Az *Arrhenius*-féle tétel a kémiai kinetikában a reakció-sebességi együttható (k) értékét adja meg az anyaghőmérséklet (T) függvényében:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R_u \cdot \Delta T}} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R_u}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} = A \cdot e^{\frac{E}{R_u}\cdot\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)} \qquad (1)$$

ahol:

A preexponenciális tényező (frekvencia faktor)

E_a aktiválási energia, J/mol

amely $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 ºC) esetén $E_a = 33500$ J/mol

$T < 293{,}15$ K (< 20 ºC) esetén $E_a = 33500 + 1470 \cdot (T_0 - T)$ J/mol

vagy a cementfajta függvényében:

CEM I esetén: $E_A = 25000\text{-}45000$ J/mol

CEM III esetén: $E_A = 50000\text{-}75000$ J/mol

R_u univerzális gázállandó (8,3142 J/mol·K)

E_a/R_u = 33500/8,3142 = 4029 K ~ 4000 K, ha $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 ºC)

E_a/R_u = (33500 + 1470·20)/8,3142 = 7565 K, ha $T = 273{,}15$ K (0,0 ºC)

T_0 az anyag referencia-hőmérséklete (293,15 K = 20 ºC), kelvinben kifejezve

T az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan anyaghőmérséklet vagy átlagos anyaghőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), (273,15 K + T_i = 0,0 ºC + T_i), kelvinben kifejezve

T_i az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan anyaghőmérséklet vagy átlagos anyaghőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), ºC-ban kifejezve

Az (1) szerinti *Arrhenius*-féle összefüggés megtalálható ASTM C 1074-04 szabvány 6.3 fejezetében, és az E_a/R állandót a szabvány A1.3 melléklete (Annex A1.3), valamint X1.3 függeléke (Appendix X1.3) értelmezi.

Ha a vizsgálati anyag hőmérséklete (itt már nevezhetjük betonhőmérsékletnek) $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 ºC), akkor az *Arrhenius*-féle formula a CEB-FIP Model Code 1990 szerint a következő alakot ölti:

$$k = A \cdot e^{\frac{E}{R}\cdot\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)} = A \cdot e^{4000\cdot\left(\frac{1}{293{,}15}-\frac{1}{273{,}15+T_i}\right)} = A \cdot e^{\left(13{,}65-\frac{4000}{273{,}15+T_i}\right)} \qquad (2)$$

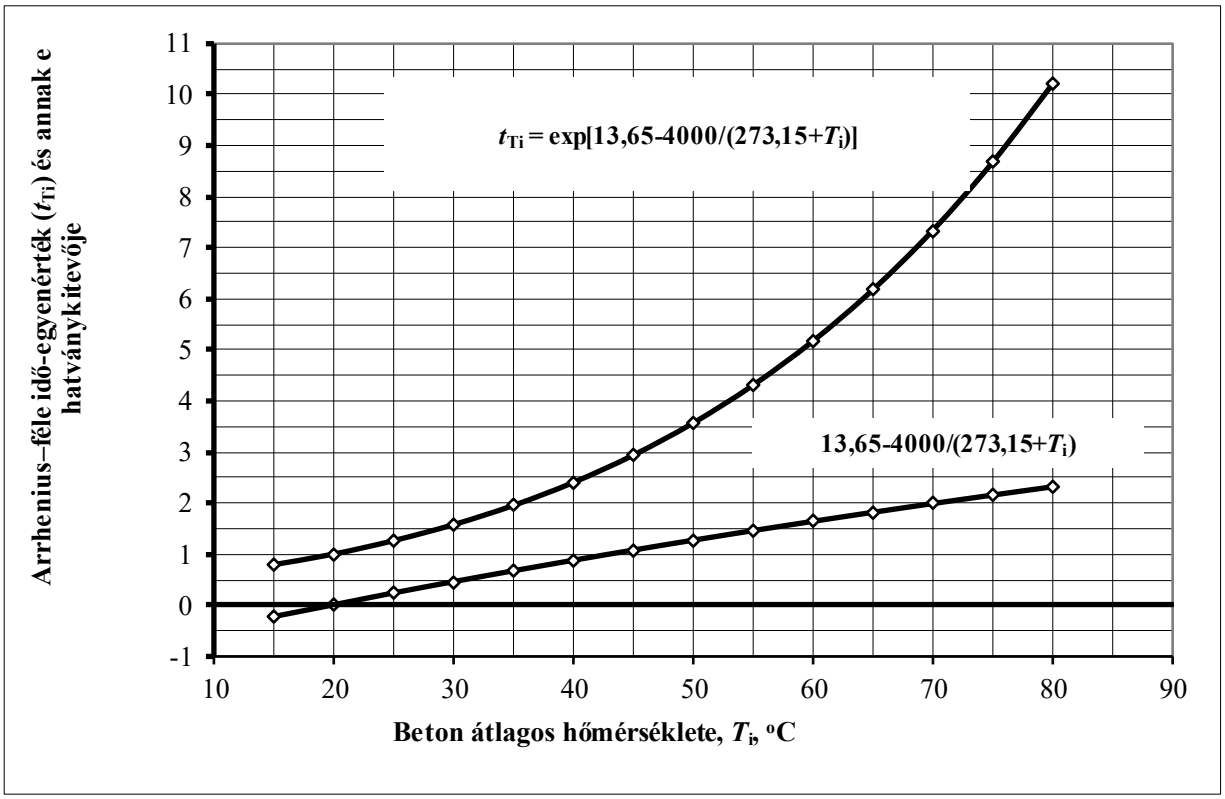
Az *Arrhenius*-féle formulában a k/A hányados az **idő-egyenértéket (t_{Ti})** fejezi ki, amelynek összefüggése – ha a vizsgálati anyag hőmérséklete ≥ 20 ºC – a következő, és amely $T_i = 20$ ºC vizsgálati anyaghőmérsékleten $t_{Ti} = t_{20ºC} = 1{,}0$ értéket vesz fel (*27. ábra*):

$$\frac{k}{A} = t_{T_i} = e^{\left(13{,}65-\frac{4000}{273{,}15+T_i}\right)} \quad [\textit{nevezetlen szám}] \qquad (3)$$

Meg kell jegyezni, hogy az *Arrhenius*-féle (2) és (3) jelű összefüggést a szabványok olykor 20 ºC alatti hőmérsékleten is alkalmazzák, illetve nem tiltják (például: CEB-FIP Model Code 1990; MSZ EN 1992-1-1:2010; ASTM C 1074-04), és ezért az *1. táblázatban* és a *2. ábrán* az idő-egyenértéket 15 ºC hőmérséklet esetére is megadtuk.

1. táblázat: Példa *a* t_{Ti} idő-egyenérték számítására a (3) összefüggés alapján, feltételezve, hogy a hőmérséklet $T_i \geq 15$ ºC (*2. ábra*)

T_i a beton átlagos hőmérséklete egy napon át, °C	e hatványkitevője a t_{Ti} idő-egyenérték összefüggésben	t_{Ti} idő-egyenérték (20 °C hőmérsékletű napra vonatkoztatva, az e hatványa)
15	-0,232	0,793
20	0,000	1,000
25	0,234	1,264
30	0,455	1,577
35	0,669	1,953
40	0,877	2,403
45	1,077	2,937
50	1,272	3,567
55	1,460	4,308
60	1,643	5,173
65	1,821	6,178
70	1,993	7,340
75	2,161	8,677
80	2,323	10,210



2. ábra: *Arrhenius*–féle idő-egyenérték (t_{Ti}) összefüggés és abban az e hatványkitevője a hőmérséklet függvényében

A 20 °C betonhőmérsékletre vonatkoztatott **helyettesítő időtartam az** *Arrhenius*–**féle összefüggés alapján**, portlandcement esetén:

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} t_{T_i} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n} e^{\left(13{,}65 - \frac{4000}{273+T_i}\right)} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{4}$$

ahol:

T_i az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan betonhőmérséklet vagy átlagos betonhőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), ºC-ban kifejezve

Δt_i a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan vagy átlagával jellemezhető (T_i), napban vagy órában kifejezve

A t_T helyettesítő időtartam számítására a (4) *Arrhenius*–féle összefüggés alapján a *2. táblázatban* mutatunk be példát.

2. táblázat: Példa a helyettesítő időtartam számítására a (4) *Arrhenius*–féle összefüggés alapján

Érlelési idő, óra	Mért hőmérséklet, °C	Δt_i, óra	Átlagos hőmérséklet, T_i, °C	Idő-egyenérték, t_{Ti}	Helyettesítő időtartam, t_T, óra
0,5	20	0,5	20,5	1,029	1,03
1,0	21	0,5			
1,5	22	0,5	22,5	1,128	2,16
2,0	23	0,5			
2,5	24	0,5	24,5	1,235	3,39
3,0	25	0,5			
3,5	27	0,5	27,5	1,413	4,80
4,0	28	0,5			
4,5	29	0,5	29,5	1,543	6,35
5,0	30	0,5			
5,5	31	0,5	31,5	1,682	8,03
6,0	32	0,5			
6,5	33	0,5	33,0	1,794	9,82
7,0	33	0,5			
7,5	34	0,5	34,0	1,872	11,70
8,0	34	0,5			
8,5	35	0,5	35,0	1,953	13,65
9,0	35	0,5			
9,5	36	0,5	36,0	2,037	15,69
10,0	36	0,5			
10,5	36	0,5	36,5	2,080	17,77
11,0	37	0,5			
11,5	37	0,5	37,0	2,123	19,89
12,0	37	0,5			

Minthogy az eredeti *Saul*-féle formula {◄} alkalmazása 20 ºC hőmérséklet felett ellentmondásokra vezet, a *CEB-FIP Model Code 1990* kidolgozói a szabályozásba az *Arrhenius*-féle törvényt emelték be. A (3) összefüggést a *CEB-FIP Model Code 1990* nyomán az *MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2)* szabvány is tartalmazza.

Az európai szabványok a t_T helyettesítő időtartam összefüggést a 28 napnál fiatalabb szabványosan érlelt és az előre gyártott, hőérlelt beton szilárdság becsléséhez 0-80 °C hőmérsékleti tartományban alkalmazzák.

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. és 2.1.8.2. fejezete, valamint D. függelékének d.4.2.1. szakasza szerint a (3) összefüggés lényegében a mai értelemben vett CEM I és CEM II típusú portlandcementek esetén használható. Ettől a korlátozástól az *MSZ EN 1992-1-1:2010* (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése érdemben nem tér el.

HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK ÉS JELENTÉSEK

ASTM C 1074-04 „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”, 2004;
A szabvány korábbi változata 1993-ban, illetve 1998-ban jelent meg „Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method” címmel

CEB-FIP Model Code 1990 Comité Euro-International du Béton, Bulletin d’Information No. 203-205, Final Draft, Chapters 4-10, Lausanne 1991; First published by Thomas Telford Services Ltd., London, 1993.

MSZ EN 1992-1-1:2010 Eurocode 2: „Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok”

Report IPRF-01-G-002-03-6 „Using Maturity Testing for Airfield Concrete Pavement Construction and Repair”, An Research Report IPRF. Innovative Pavement Research Foundation. Airport Concrete Pavement Technology Program. Skokie (USA, Illinois) 2006.

HIVATKOZÁSOK

Arrhenius, S.:„On the Reaction Velocity of the Inversion of Cane Sugar by Acids” *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, No. 4, 1889, pp. 226-232 (as translated and published in Margaret H. Back and Keith J. Laidler, 1967, „Selected Readings in Chemical Kinetics” *Pergamon*, Oxford, 1967).

Freiesleben Hansen, P. – Pedersen, E. J.: „Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete”, *Nordisk Betong*, 1, 1977, pp. 19-34.

Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, *Magazine of Concrete Research*, 1951, No. 6., pp. 127-140.

Jelmagyarázat:
{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.
{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.

A cikk megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. március havi számának 18-20. oldalán

Fiatal beton szilárdulási folyamata
5. rész: Szilárdulási idő tényező

Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 5: Koeffizient für Alter des Betons im Festigungsprozeß
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 5: Coefficient which depends on the age of concrete in the hardening process
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 5: Coefficient qui dépend de l'âge de béton dans le processus de durcissement

Fogalom-tár

Dr. Kausay Tibor
betonopu@t-online.hu, http://www.betonopus.hu

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezetének (2.1-54) összefüggése a 28 naposnál fiatalabb beton szilárdsági tulajdonságainak változását – a 28 napos korú, szabványosan tárolt és utókezelt (MSZ EN 12390-2:2009) beton átlagos nyomószilárdságára vonatkoztatva – az idő függvényében a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényezővel veszi figyelembe:

$$\beta_{cc}(t) = exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t_T / t_{1,T}} \right)^{1/2} \right] \right\} = e^{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t_T / t_{1,T}} \right)^{1/2} \right]} \qquad (1)$$

ahol:

- s cement fajtájától függő tényező, lásd az *1. táblázatot*
- t_T helyettesítő időtartam, napban kifejezve
- $t_{1,T}$ 1 nap, a mértékegységre tekintettel szerepeltetnek az összefüggésben.

Eszerint a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező a hőmérséklet befolyásolta helyettesítő időtartamnak (t_T) és a cement fajtájától függő együtthatónak (s) a függvénye (*1. ábra*).

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezete szerint az (1) összefüggés az ISO 2736-2:1986 szerint szabványosan készített és (20 ± 2) °C hőmérsékleten, kizsaluzás után vízben vagy legalább 95 % relatív nedvességtartalmú laboratóriumi körülmények között – úgy, hogy a vizsgálatig a próbatestek felületét állandóan vízfilm vonja be – tárolt próbatestek esetén érvényes. (A visszavont ISO 2736-2:1986 szabványt az ISO 1920-3:2004 szabvány váltotta fel, mai európai megfelelője az MSZ EN 12390-2:2009 szabvány.)

Alkalmazva a $t = t_T/t_1$ egyszerűsítést, a CEB-FIP Model Code 1990 modell-kódból átvett (1) összefüggés az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezetének (6) bekezdésében – (3.2) jel alatt – a következő alakot ölti, és ugyancsak a 28 napos korú, szabványosan tárolt és utókezelt beton átlagos nyomószilárdságára vonatkoztatva az idő függvényében a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényezőt adja meg:

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} = e^{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right]} \tag{2}$$

A (2) összefüggésben a t betonkor alatt a t_T helyettesítő időtartam értendő.

A (2) összefüggés az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 10.3.1.1 fejezetének (3) bekezdése szerint az előregyártott vasbeton szerkezeti elemek hőérlelése esetén is érvényes, ha a beton 28 napnál fiatalabb. Megjegyzik, hogy ebben az esetben a $\beta_{cc}(t)$ tényezőt általában 1,0-ra kell korlátozni. Ez azt jelenti, hogy a (2) jelű összefüggés hőérlelt betonok esetén is akkor alkalmazható, ha azok 28 napnál fiatalabbak (*1. ábra*).

Kanstad, T. – Hammer, T. A. – Bjøntegaard, Ø. – Sellevold, E. J. (1999) a korai szilárdulási folyamat jobb leírására a (2) összefüggést a következőképpen módosította, és a húzószilárdság, valamint a rugalmassági modulus alakulásának kifejezésére is alkalmazta (*Röhling, S.*, 2009, *Atrushi, D. S.*, 2003):

$$\beta_{cc}(t) = exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28 - t_0}{t - t_0} \right)^{c} \right] \right\} \tag{3}$$

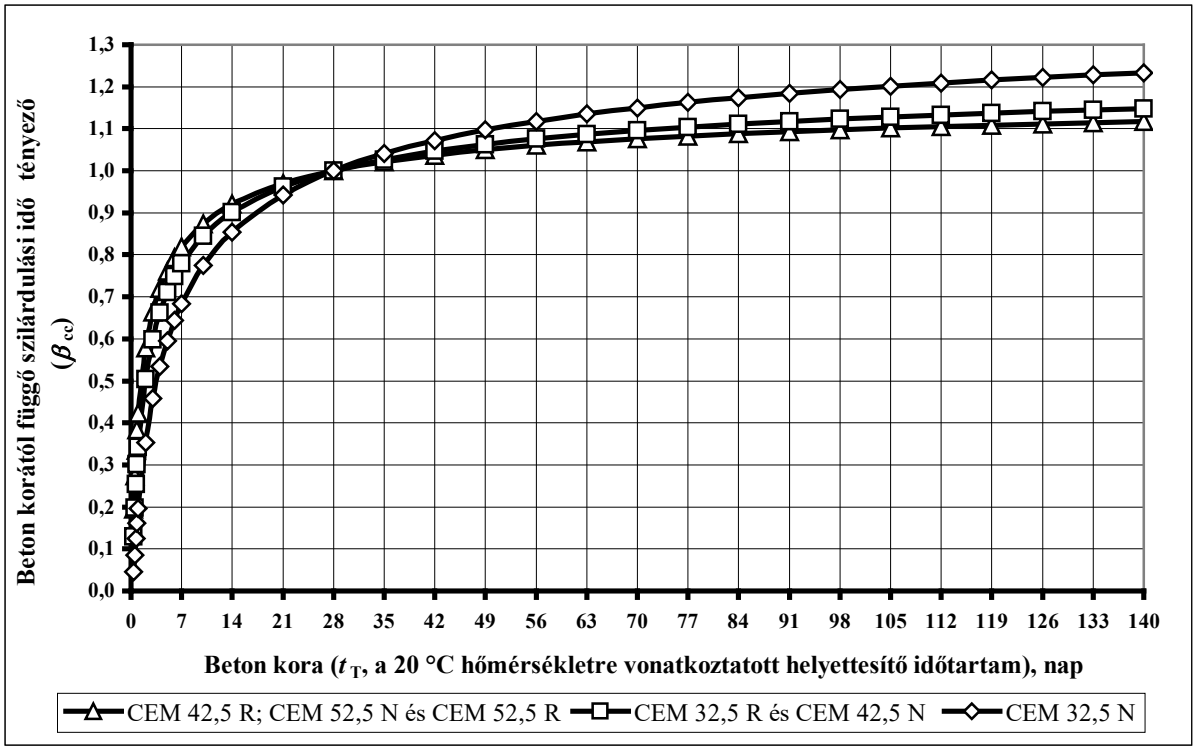
ahol:

- t_0 a hőfejlődés és a szilárdulás kezdetének a cementfajtától és a beton összetételétől függő időpontja
- c kísérletekkel meghatározandó függvényállandó

A t_0 időpont figyelembevétele főként akkor előnyös, ha a kötéskésleltető adalékszer hatását, vagy a hidratáció első néhány óráját jellemző pangó szakasznak (németül: dormante Periode) a hatását nem kívánjuk elhanyagolni. A pangó szakasz a kezdetleges trikalcium-aluminát-szulfát hidratáció (az elsődleges ettringit képződés kezdetének) ideje, amely szakasz a kalcium-szilikát-hidrát fázisok képződésének kezdetéig, lényegében nem egészen a *Vicat*-féle kötésidő végéig tart. A pangó szakasz alatt a beton már nem tömöríthető, de még nem is szilárd.

1. táblázat: A cement fajtájától függő tényező (s) értéke a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező a (2) – (4) összefüggésben

CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód 2.1.6.1. fejezete és az *MSZ EN 1992-1-1:2010* (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése szerint	
s	ha a cement fajtája
0,20	CEM 42,5 R; CEM 52,5 N; CEM 52,5 R [a)]
0,25	CEM 32,5 R; CEM 42,5 N [b)]
0,38	CEM 32,5 N [c)]
Megjegyzés: A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezete és d.4.2.1 függeléke az a) szerinti cementek csoportját *RS* osztályú, gyorsan szilárduló és nagyszilárdságú (rapid hardening high strength cements), akkori jelöléssel CE 52,5; b) szerinti cementek csoportját *R* osztályú, gyorsan szilárduló (rapid hardening cements), akkori jelöléssel CE 42,5 R, és *N* osztályú, normál módon szilárduló (normal hardening cements), akkori jelöléssel CE 32,5 R és CE 42,5; c) szerinti cementek csoportját *SL* osztályú, lassan szilárduló (slowly hardening cements), akkori jelöléssel CE 32,5 cementnek nevezi; *MSZ EN 1992-1-1:2010* (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése az a) szerinti cementek csoportját *R* osztályú, b) szerinti cementek csoportját *N* osztályú, c) szerinti cementek csoportját *S* osztályú cementnek nevezi. Ezek a betűjelek nem tévesztendők össze az MSZ EN 197-1:2000 cement-szabvány szerinti betűjelekkel.	
Rostasy, F. S. – Krauß, M. – Budelmann, H. (2002) szerint, lásd *Röhling, S.* (2009)	
s	ha a cement fajtája
0,17 – 0,22	CEM I 52,5 (C60/75 osztályú betonok)
0,20 – 0,23	CEM I 42,5 R (C40/50 osztályú betonok)
0,28 – 0,45	CEM III/B 32,5 NW, kis hőfejlesztésű kohósalakcement (C40/50 osztályú betonok)



1. ábra: $\beta_{cc}(t)$, szilárdulási idő tényező függvénye

Az (1) és (2) összefüggés a CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód és az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány szerint 20 °C átlagos hőmérsékletre vonatkoztatva és az MSZ EN 12390-2:2009 szerinti utókezelés esetén érvényes. Az MSZ EN 12390-2:2009 szabvány 5.5. fejezetében a próbatestek utókezeléséről (tárolásáról) a következőket olvashatjuk: a próbatesteket legalább 16 órán át, de 3 napnál nem hosszabb ideig – védve ütéstől, rázástól, vízvesztéstől – a sablonban, (20 ± 5) ºC hőmérsékletű térben kell tárolni. A próbatesteket a sablonból kivéve közvetlenül a vizsgálatig (20 ± 2) ºC hőmérsékletű vízben vagy (20 ± 2) ºC hőmérsékletű és legalább 95 %-os relatív páratartalmú klímakamrában kell tárolni.

A CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód 2.1.6.1. fejezetének (2.1-53) összefüggése és az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezete (6) bekezdésének (3.1.) összefüggése szerint a 28 naposnál fiatalabb beton átlagos nyomószilárdságát a t időpontban – a szilárdulási idő tényező $\beta_{cc}(t)$ és a beton 28 napos átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) felhasználásával – a következő összefüggéssel lehet megbecsülni:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} = e^{s\cdot\left[1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}\right]} \cdot f_{cm} \qquad (4)$$

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezete (6) bekezdésben kihangsúlyozzák, hogy ha a beton 28 napos megkövetelt nyomószilárdsága nem teljesül, akkor a (2) és (4) alatti összefüggést használni, továbbá ezekkel a nem megfelelő referencia-szilárdság meglétét visszamenőlegesen, az utószilárdulás figyelembevételével igazolni nem szabad.

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 10.3.1.1 fejezetének (3) bekezdése szerint a 28 naposnál fiatalabb (t < 28 napos) hőérlelt előregyártott vasbeton szerkezeti elem betonjának $f_{cm}(t)$ nyomószilárdsága ugyancsak a (4) jelű összefüggéssel számítható, amely összefüggésben a t a hőmérséklettel módosított t_T betonkor.

Példaképpen – MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány szerinti (4) összefüggés, valamint az *1. táblázat* alapján – a *2. táblázatban* számítsuk ki annak a CEM 32,5 N jelű cementtel készítendő betonnak a kizsaluzhatósági idejét, amelytől megköveteljük, hogy a teherhordó zsaluzat eltávolításának időpontjában a beton nyomószilárdsága érje el a 28 napos nyomószilárdság 80 %-át. A betonozás tervezésének idején felkészülünk arra, hogy a fiatal beton átlagos hőmérséklete a kizsaluzásig – az időjárástól függően, és az egyszerűség kedvéért – például 15 °C vagy 20 °C vagy 25 °C lesz.

$$\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} = \beta_{cc}(t) = 0{,}8 = e^{s\left[1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}\right]}$$

$$\frac{ln\,0{,}8}{s} = \frac{-0{,}2231435}{0{,}38} = -0{,}5872198 = 1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}$$

$$\frac{28}{t_T} = 1{,}5872198^2 = 2{,}5192667$$

$t_T = 11{,}114345$ nap, helyettesítő idő

2. táblázat: Példa a kizsaluzhatóság időpontjának kiszámítására

T Beton átlagos hőmérséklete a készítéstől a kizsaluzásig °C	t_{Ti} Idő-egyenérték	$\Delta t_{kizsaluzási} = t_T/t_{Ti}$ Kizsaluzhatóság időpontja nap
15	0,793	14,0
20	1,000	11,1
25	1,264	8,8

Tehát a példa szerinti beton 15 °C átlagos hőmérséklet esetén 14 napos, 20 °C átlagos hőmérséklet esetén 11 napos, illetve 25 °C átlagos hőmérséklet esetén 9 napos korban zsaluzható ki. Arról természetesen meg kell győződni, hogy az adott nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori nyomószilárdságának 80 %-a a teherbírás szempontjából kizsaluzáskor elegendő-e. Így például

- a C20/25 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0{,}8 \cdot 1{,}4 \cdot (20+8) = 31{,}4$ N/mm^2;
- a C25/30 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0{,}8 \cdot 1{,}4 \cdot (25+8) = 37{,}0$ N/mm^2;
- a C30/37 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0{,}8 \cdot 1{,}4 \cdot (30+8) = 42{,}6$ N/mm^2.

Ha a betont fiatal korában, amikor még kicsi a szilárdsága, megterhelik, akkor a kúszási alakváltozás a rugalmas alakváltozás 3-5-szörösét is kiteheti. Ilyen esetben a $\varphi(t, t_0)$ kúszási tényezőben szereplő, a beton megterhelésének napban kifejezett t_0 időpontját a cement szilárdulási ütemének figyelembevételével a CEB Bulletin 199:1990 és a CEB-FIP Model Code 1990 szerint a következő összefüggéssel kell kiszámítani:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{2 + \left(t_{0,T} / t_{1,T}\right)^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha} \geq 0{,}5\ nap \tag{5}$$

ahol:

$t_{0,T}$ az *Arrhenius*–féle t_T helyettesítő időtartam a megterhelés időpontjában, napban kifejezve

$t_{1,T}$ = 1 nap, amelyet a mértékegységre tekintettel szerepeltetnek az összefüggésben

α = -1 a lassan szilárduló (SL jelű) cement esetén; 0 normál (N jelű) vagy gyorsan (R jelű) szilárduló cement esetén; +1 a gyorsan szilárduló (RS jelű) nagyszilárdságú cement esetén

Az (5) szerinti összefüggést az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány a B.9 jel alatt a következő, egyszerűbb formában közli, és a cementek szilárdulását is némiképp módosítva értelmezi:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha} \geq 0{,}5\ nap \tag{6}$$

ahol:

$t_{0,T}$ az *Arrhenius*–féle t_T helyettesítő időtartam a megterhelés időpontjában, napban kifejezve

α = -1 a lassan szilárduló (S jelű) cement esetén; 0 normál módon szilárduló (N jelű) cement esetén; +1 a gyorsan szilárduló (R jelű) cement esetén

Egyes szabványokban az érési, szilárdulási modell segítségével nem csak a nyomószilárdság, hanem egyéb szilárdsági jellemzők időbeni változásának meghatározásával is foglalkoznak az *Arrhenius*-féle modell alapján.

Így például az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány

– 3.1.2 fejezetének (9) bekezdése szerint a *28 naposnál fiatalabb beton tengelyirányú húzószilárdsága* átlag értékének időbeni értéke $f_{ctm}(t)$ a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező és a 28 napos beton tengelyirányú húzószilárdsága f_{ctm} átlag értékének függvényében:

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{ctm} = \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \cdot f_{ctm} \qquad [N/mm^2] \tag{7}$$

– 3.1.3 fejezetének (3) bekezdése alatt a *rugalmassági modulus* (E_{cm}) időbeni változásának számítására a következő összefüggés található:

$$E_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)^{0,3} \cdot E_{cm} = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \qquad [N/mm^2] \tag{8}$$

ahol: E_{cm} a 28 napos korú beton rugalmassági modulusa

Mint már említettük, az ASTM C 1074-04 szabvány 8.7 fejezete a fiatal beton *hajlítószilárdságának* becslését teszi lehetővé a tárgyalt *Nurse-Saul*-féle és *Arrhenius*-féle helyettesítő időtartam meghatározásával.

ÖSSZEFOGLALÁS

A hőmérsékletnek a fiatal beton szilárdságára gyakorolt hatását legbiztonságosabban kísérlettel lehet megbecsülni. Ehhez meg kell határozni a szabványosan tárolt és utókezelt (MSZ EN 12390-2:2009) beton átlagos nyomószilárdságát minél több időpontban, de mindenképpen például 1 vagy 2 napos és 7 vagy 14, legfeljebb 28 napos korban, majd valamelyik számítási módszer (modell) segítségével, logaritmikus interpolálással ki kell számítani a tényleges betonhőmérséklethez tartozó helyettesítő időtartamot és a szilárdulási idő tényezőt, majd az adott időponthoz tartozó, hőmérsékletfüggő nyomószilárdságot. Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány a 28 naposnál fiatalabb beton szilárdulási tényezőjének összefüggését az *Arrhenius*-féle modell alapján adja meg. A szabványos *Arrhenius*-féle modell a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban az 5 °C alsó hőmérséklethez tartozó *Nurse-Saul*-féle függvénnyel jól közelíthető. Legtöbb kísérleti munkával jár, de épp ezért nagyobb biztonsággal becsülhető meg a fiatal beton nyomószilárdsága a *de Vree*-féle modellre épülő *CEMIJ*-féle számítási módszerrel.

HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK ÉS JELENTÉSEK

ASTM C 1074-04 „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”, 2004; A szabvány korábbi változata 1993-ban, illetve 1998-ban jelent meg „Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method” címmel

CEB Bulletin 199:1990 „Evaluation of the time dependent behaviour of concrete”

CEB-FIP Model Code 1990 Comité Euro-International du Béton, Bulletin d’Information No. 203-205, Final Draft, Chapters 4-10, Lausanne 1991; First published by Thomas Telford Services Ltd., London, 1993.

EN 197-1:2000 „Cement. 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei”. Módosítások: MSZ EN 197-1:2000/A1:2004 és MSZ EN 197-1:2000/A3:2007

ISO 1920-3:2004 „Testing of concrete. Part 3: Making and curing test specimens”

ISO 2736-2:1986 „Concrete tests. Test specimens. Part 2: Making and curing of test specimens for strength tests”. Visszavonva, felváltotta az ISO 1920-3:2004 szabvány. (Honosított változata: MSZ ISO 2736-2:1991 „Betonvizsgálati próbatestek. Próbatestek készítése és kezelése szilárdságvizsgálati célra”. Visszavonva: 2001. november 1.)

MSZ EN 12390-2:2009 „A megszilárdult beton vizsgálata. 2. rész: Szilárdságvizsgálati próbatestek készítése és tárolása”

MSZ EN 1992-1-1:2010 Eurocode 2: „Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok”

HIVATKOZÁSOK

Arrhenius, S.:„On the Reaction Velocity of the Inversion of Cane Sugar by Acids” *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, No. 4, 1889, pp. 226-232 (as translated and published in Margaret H. Back and Keith J. Laidler, 1967, „Selected Readings in Chemical Kinetics” *Pergamon*, Oxford, 1967).

Atrushi, D. S.:„Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling”, Doctoral Thesis. Trondheim, Norway, 2003

Kanstad, T. – Hammer, T. A. – Bjøntegaard, Ø. – Sellevold, E. J.: „Mechanical properties of young concrete: Evaluation of test methods for tensile strength and modulus of elasticity. Determination of model parameters”, Nor-Ipacs report STF22. *Norwegian Inst. of Techn*., Trondheim, 1999.

Rostasy, F. S. – Krauß, M. – Budelmann, H.: „Planungswerkzeug zur Kontrolle der frühen Rißbildung in massigen Betonbauteilen”, *Bautechnik*, 79, 2002, H. 7. – H. 12.

Röhling, S.: „Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme”, *Verlag Bau+Technik GmbH*, Düsseldorf, 2009

Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, *Magazine of Concrete Research*, 1951, No. 6., pp. 127-140.

Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons”, *beton*, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

Jelmagyarázat:
{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.
{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

A cikk megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. június havi számának 16-19. oldalán