
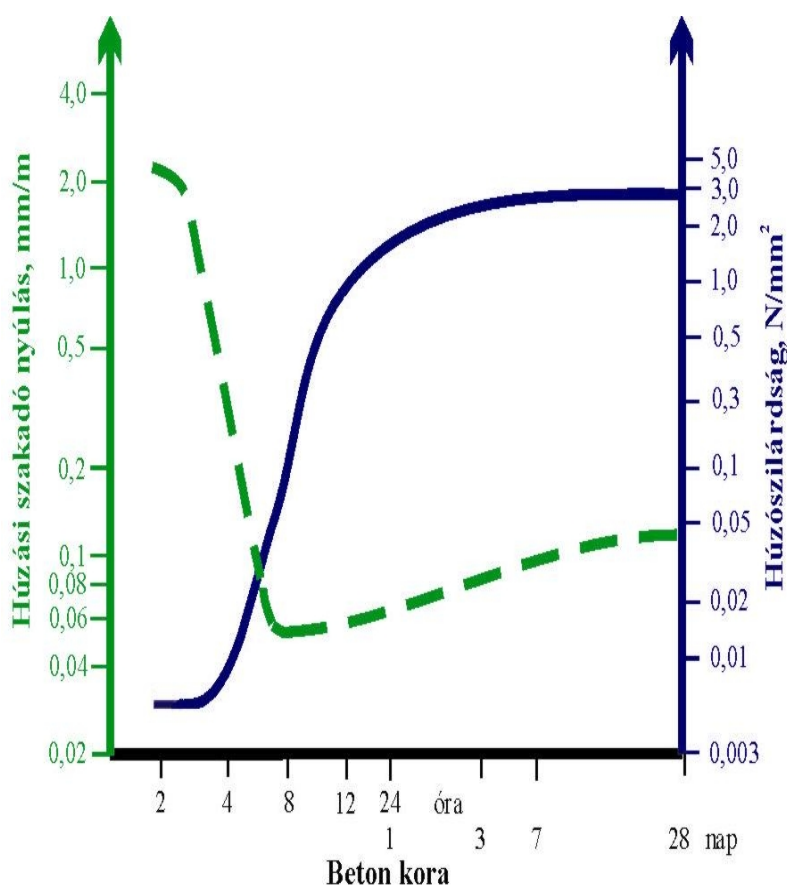
	<p><u>Fiatal beton szilárdulási folyamata</u> <u>1. rész: Nurse-Saul-féle modell,</u> <u>Papadakis-Bresson-féle modell</u></p>	
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. 1. Teil: Modell nach Nurse-Saul, Modell nach Papadakis-Bresson	
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 1: Model 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 (érés) 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 porozítása 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/mm², legfeljebb 0,5 N/mm²) nem a hidratáció, hanem a cementpép folyáshatárának és adhézios 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 (*I. ábra*). Ettől az időponttól (vagy a *Vicat*-féle kötés kezdetétől) általában 14 napos korig (vagy rövidebb ideig, például 36 vagy 72 óras korig) nevezik a betont fiatal betonnak. A fiatal beton már megkötött és nem munkálható meg, átmenetet képez a friss és a szilárd beton között.

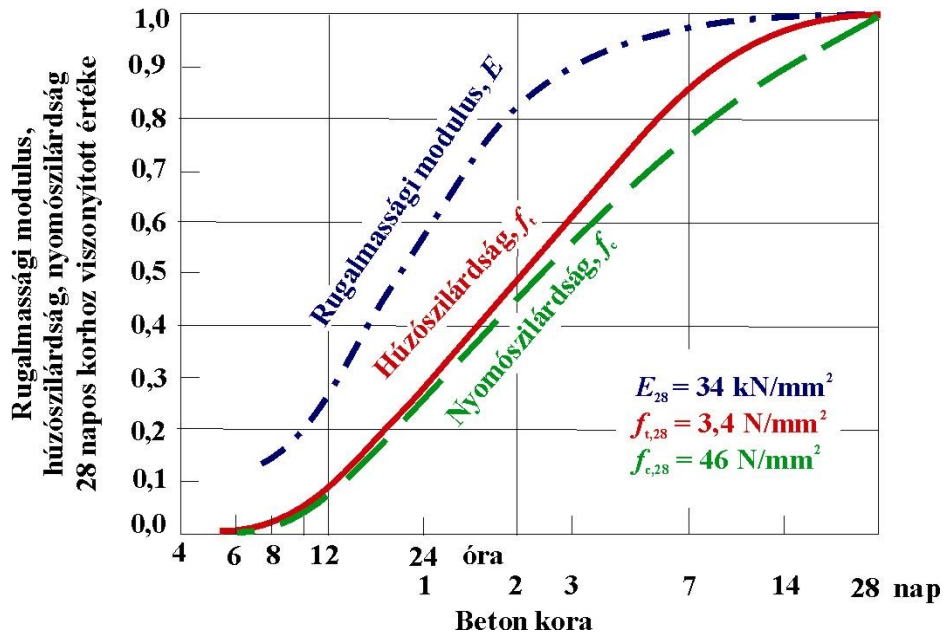


1. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai.

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.)

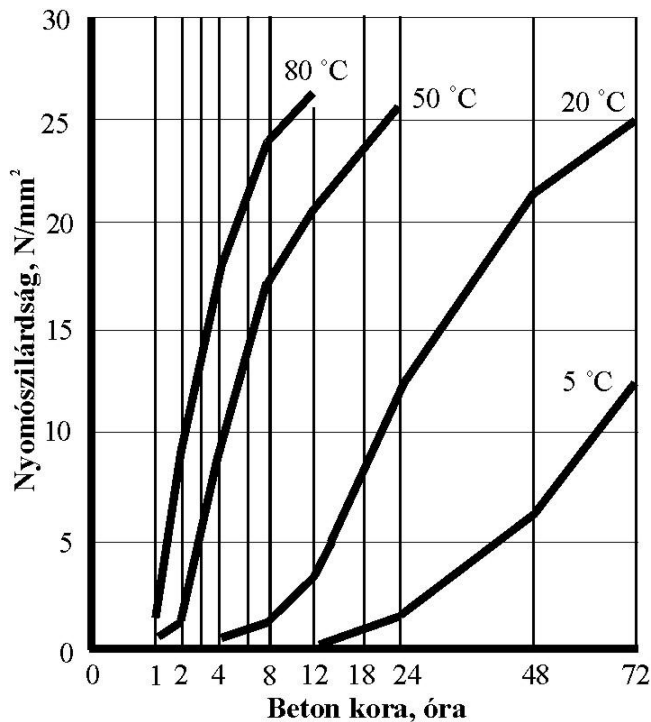
Az időfüggő alakváltozási tulajdonságok, mint a kúszás és az ernyedés, jelentős mértékben függenek a fiatal beton korától és az igénybevétel sebességétől, amely utóbbi a fiatal beton esetén lassúnak tekinthető. A fiatal beton ernyedési viszonyainak meghatározásához fontos a gátolt alakváltozásból eredő feszültségek leépülésének megismerése. Az ernyedési tényező, azaz a maradó feszültség és a számított, gátolt alakváltozásból eredő feszültség viszonyozása, 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 ernyedési 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.

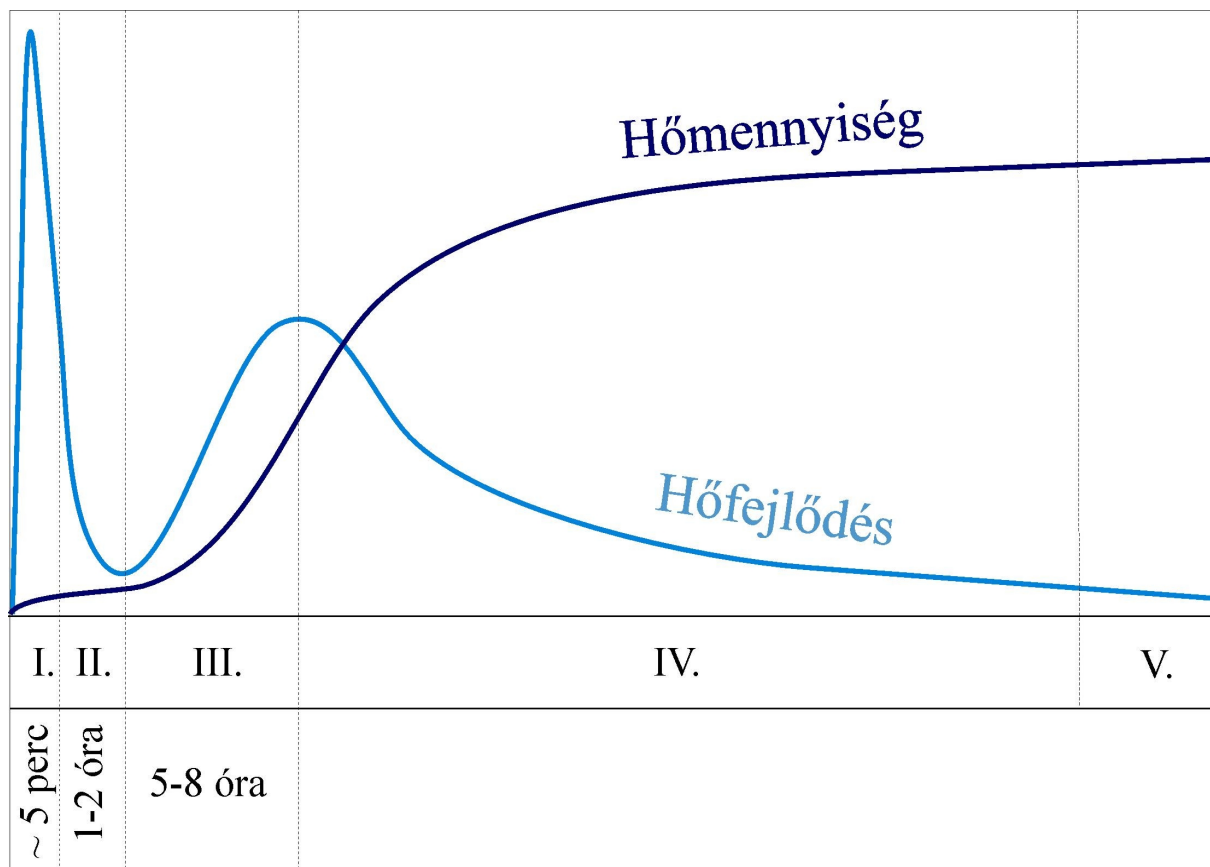
Forrás:
Weigler, H. –
Karl, S. (1974),
Iványi Gy.,
(2006),
Springenschmid,
R. (2007)

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) hőszugárzásból 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 elért 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/m^3 CEM I 32,5 jelű cement-tartalom 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 trikálcium-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 becsülő 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:

$$R = \sum(T_i + 10) \cdot \Delta t_i \quad [^{\circ}\text{C}\cdot\text{óra vagy } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{nap}] \quad (1)$$

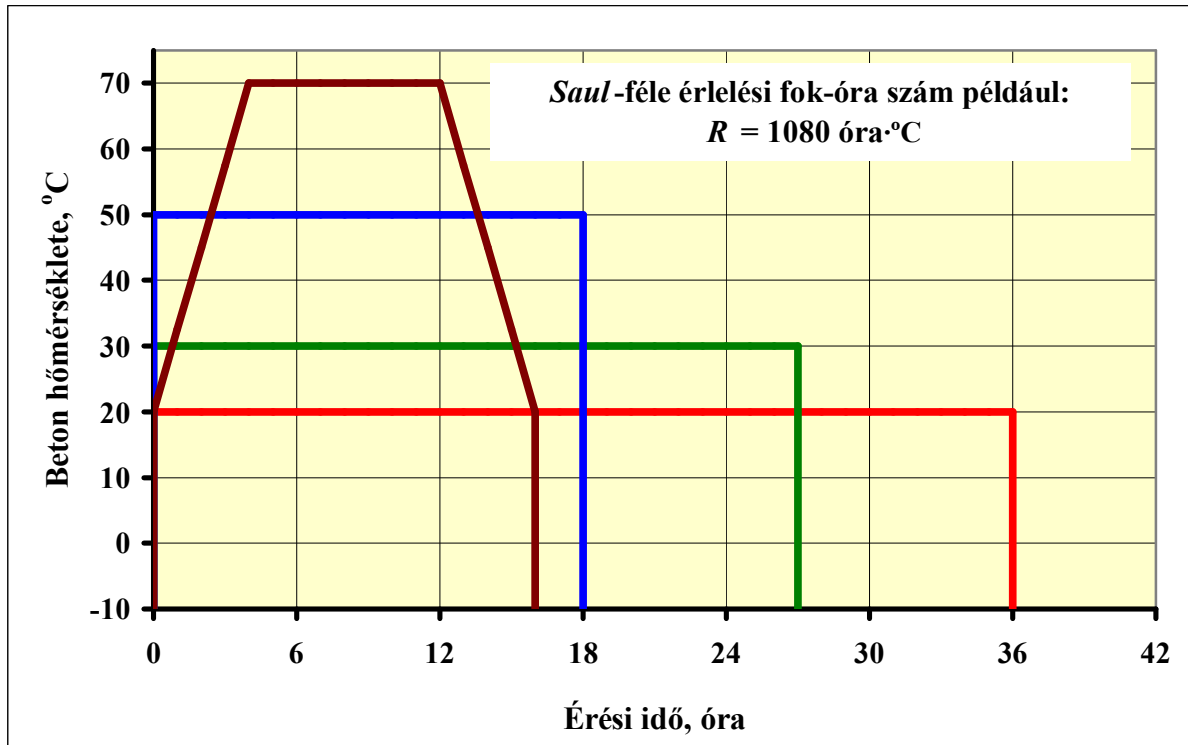
ahol:

- 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, $^{\circ}\text{C}$ -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, $i = 1, 2, 3 \dots n$

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

Saul tételéből az következne, 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 $20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten szilárdult beton [$R = (20 + 10) \cdot 36 = 1080 \text{ } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{óra}$] nyomószilárdsága ugyanakkora, mint az ugyanolyan összetételű, de
- 27 órán át konstans $30 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (30 + 10) \cdot 27 = 1080 \text{ } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{óra}$], vagy a
- 18 órán át konstans $50 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (50 + 10) \cdot 18 = 1080 \text{ } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{óra}$], vagy a
- 4 óra alatt $20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ -ról $70 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletre felfűtött, 8 órán át konstans $70 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten érlelt és 4 óra alatt $70 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ -ról $20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletre lehűtött betoné [$R = (20 + 50/2 + 10) \cdot 4 + (70 + 10) \cdot 8 + (20 + 50/2 + 10) \cdot 4 = 1080 \text{ } ^{\circ}\text{C}\cdot\text{óra}$], mert az érési fok-óra számuk egyforma (5. ábra).



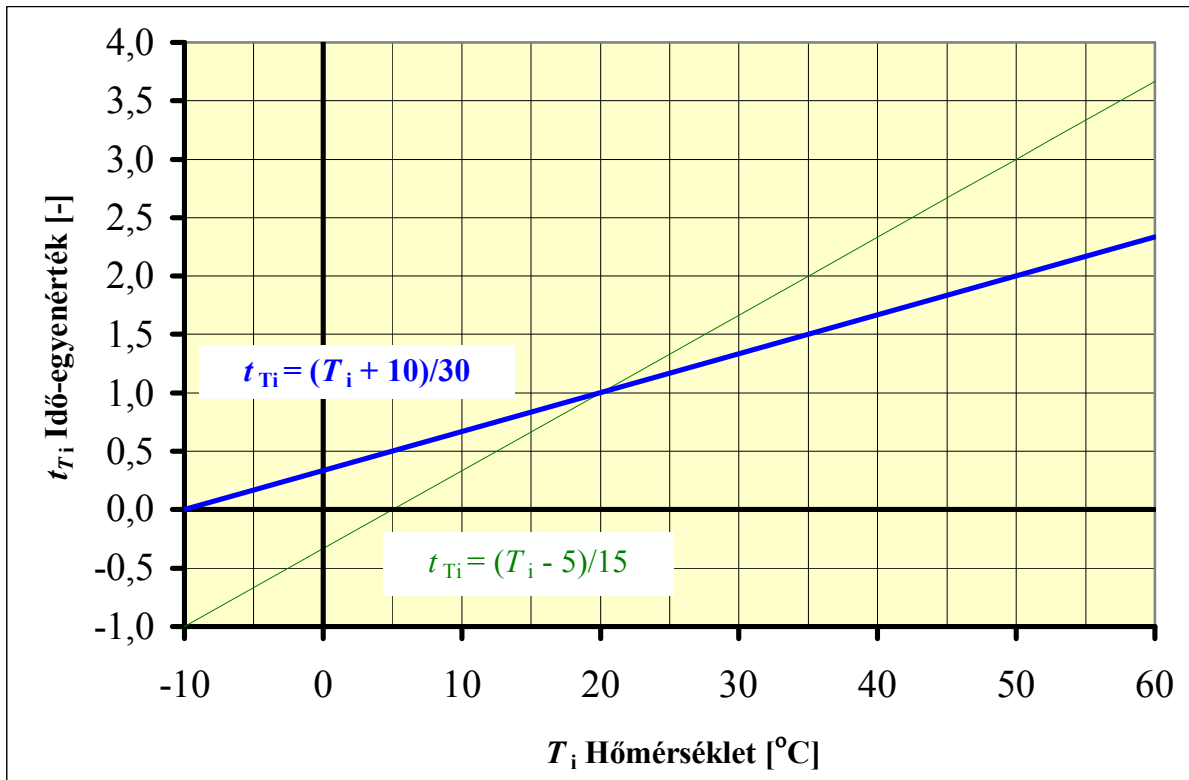
5. ábra: Azonos érési (érlelési) fok-óra számú betonok Saul-féle hőmérséklet-idő diagramja

Ha $\Delta t_i = 1$ napon át a hőmérséklet $T_{20^\circ\text{C}} = 20^\circ\text{C}$, akkor a 20°C hőmérsékletéhez tartozó fok-idő szám $R_{20^\circ\text{C}} = (20 + 10) \cdot 1 = 30^\circ\text{C} \cdot \text{nap}$. Képezzük egy adott T_i betonhőmérsékletéhez tartozó R_{T_i} fok-idő szám és a $T_{20^\circ\text{C}} = 20^\circ\text{C}$ betonhőmérsékletéhez tartozó $R_{20^\circ\text{C}}$ fok-idő szám hányadosát, ha a szilárdulási időtartam $\Delta t_i = 1$ nap:

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

A (2) szerinti hányados azt fejezi ki, hogy egységnyi időtartamot, például 1 napot tekintve, egy adott T_i hőmérsékletéhez tartozó R_{T_i} fok-nap szám hányszorosa a $T_{20^\circ\text{C}} = 20^\circ\text{C}$ hőmérsékletéhez tartozó $R_{20^\circ\text{C}} = 30$ 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°C hőmérsékletű nappal ér fel. Ezt a t_{T_i} 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_{T_i} koordináta rendszerben ábrázolva egy $y = a \cdot x + b$ alakú egyenes, amelynek paraméterei: $a = 1/30$ és $b = 10/30$. A 20°C hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{T_i} = t_{20^\circ\text{C}} = 1,0$, a $T_i = T_0 = -10^\circ\text{C}$ alsó hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{T_i} = t_{-10^\circ\text{C}} = 0,0$ (6. ábra). A következőkben látni fogjuk, hogy a $T_i = T_0 = 5^\circ\text{C}$ alsó hőmérséklettel jellemzett Saul-féle függvényt a $(10 - 35)^\circ\text{C}$ hőmérsékleti tartományban akár ma is használhatjuk, ezért a 6. ábrán ennek egyenesét is feltüntettük.



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

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

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

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:

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

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 ($\sum \Delta t_{T_i}$) 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

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

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 fentiekől 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*):

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

ahol:

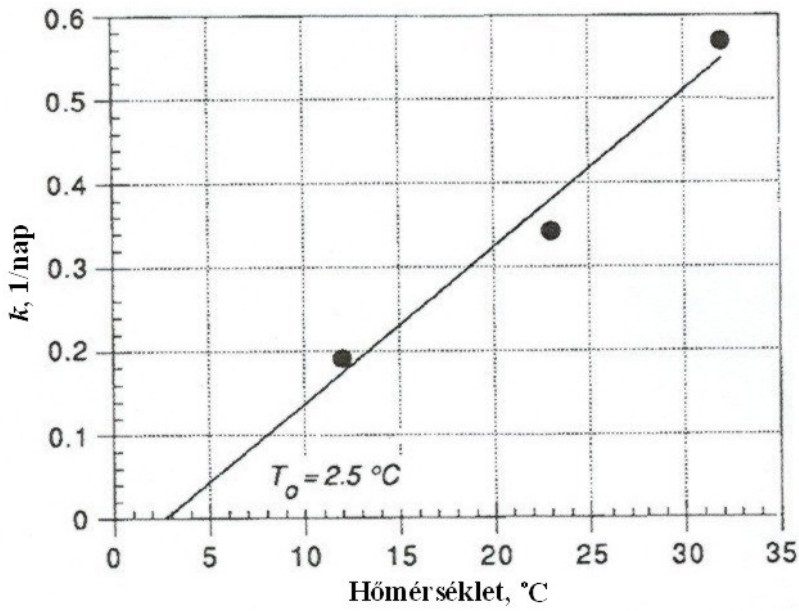
T_i a beton napi átlaghőmérséklete, °C-ban kifejezve

Δt_i a napok száma, amelyeken a beton napi átlaghőmérséklete T_i

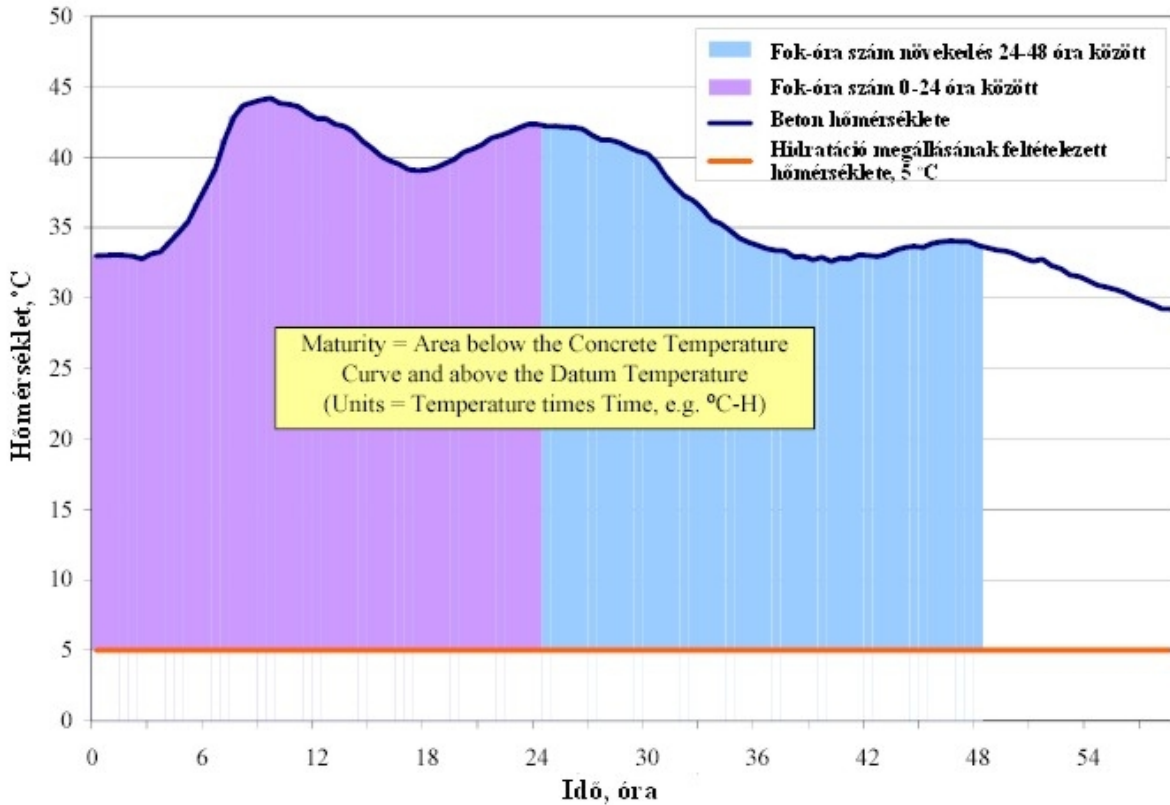
A *Nurse-Saul-féle* elmélet hiányosságai ellenére sem vesztette el időszerűségét, így például az *Iványi György* által szerkesztett *DAfStb Heft 555.* előírás magyarázat (*Iványi Gy.*, 2006) a vízzáró beton építmények irányelvvel kapcsolatban a gátolt alakváltozás (németül: *Zwang*) szempontjából tárgyalja.

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 (I) szerintitől kissé eltérő $R = \sum (T_i + T_0) \cdot \Delta t_i$ 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).

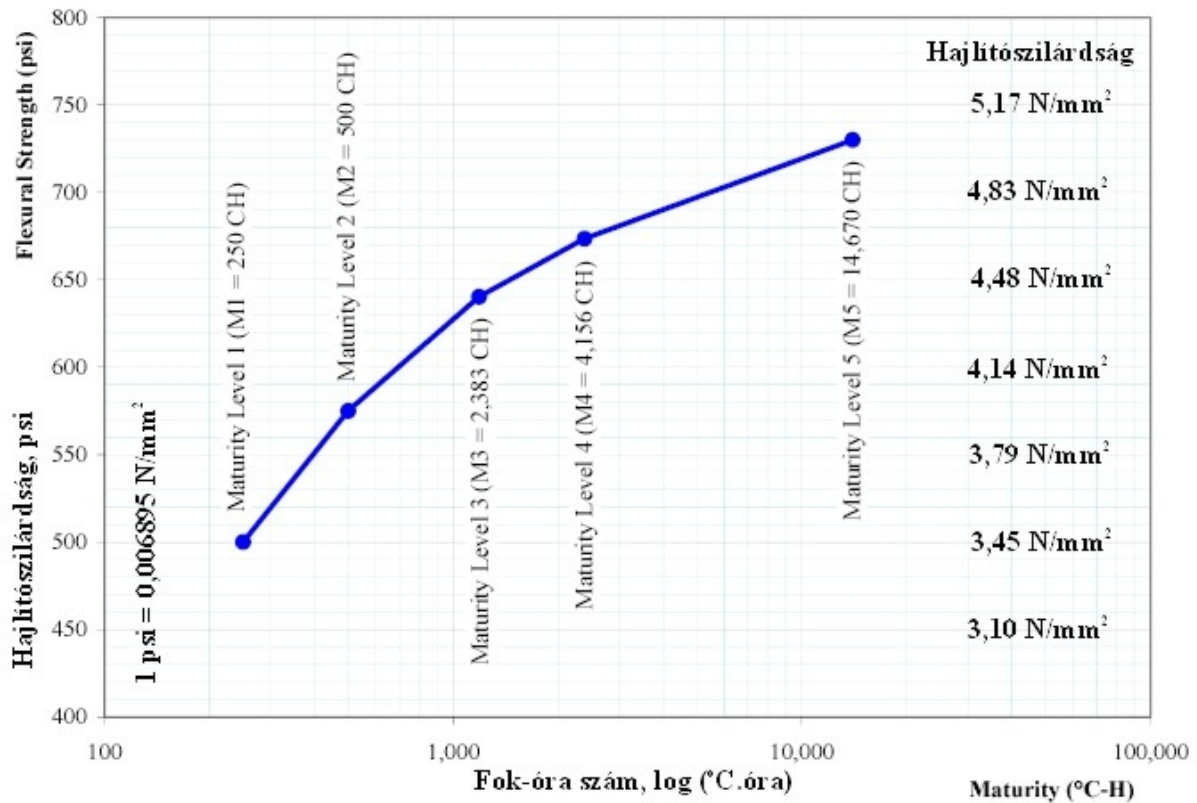


7. ábra: A Saul-féle fok-óra szám diagram alatti terület értelmezése az ASTM C 1074-04 szabvány szerint, annak feltételezésével, hogy $T_0 = 2,5 \text{ °C}$ hőmérséklet alatt nincs hidratáció.



8. ábra: Irodalmi példa a Saul-féle fok-óra szám diagram alatti terület értelmezésére, annak feltételezésével, hogy $T_0 = 5 \text{ °C}$ 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 cementféléseknek 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 hőérzékenységet 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 pondérée, 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 abszcissa-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 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ sorszámokkal 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 „Aⁿ” tényezővel megszorozták. A 20 °C hőmérséklet alatti s_1 terület szorzója

$A^0 = 1,0$; a $(20 - 30) \text{ }^\circ\text{C}$ 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:

$$F_{mp} = \sum_{n=0}^i s_{n+1} \cdot A^n \quad [^\circ\text{C} \cdot \text{óra}] \quad (7)$$

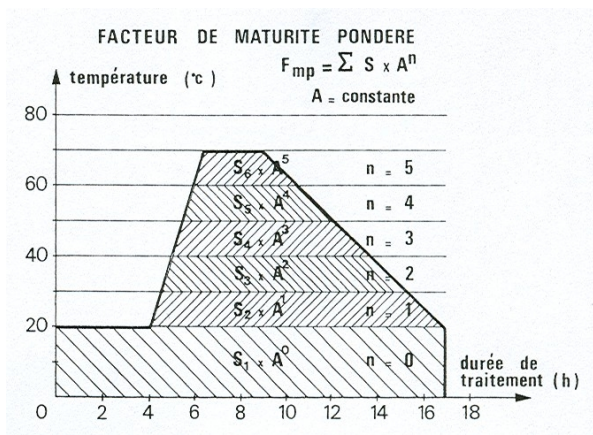
A (7) szerinti *Papadakis-Bresson*-féle összefüggés a *DAfStb Heft 422*. kiadvány (*Bunke, N.*, 1991) 4.2.2 fejezetében is megtalálható.

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

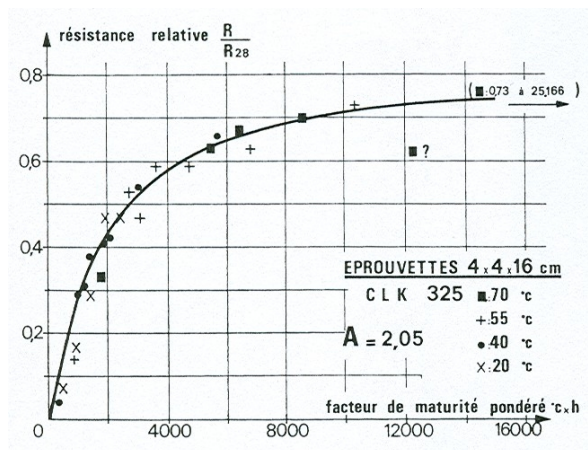
A 11. és 12. ábrán összesen hat különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramját tüntettük fel, a lineáris beosztású abszcisszán az érési fok-óra szám, az ordinátán a viszonyított nyomószilárdság szerepel. Ezek közül a cementek közül 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, logaritmikusan beosztású, cementfüggő érési fok-óra szám abszcisszájú koordináta-rendszerben ábrázolták (15. ábra). A szemi-logaritmikusan beosztású 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 ($R/R_{28} = 0,5$) $3000 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{óra}$ érési fok-óra szám mellett el lehet érni. A *Papadakis – Bresson*-féle $3000 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{óra}$ érési fok-óra számú cementek 16. ábrán feltüntetett érési diagram változatai közül a technológiailag legkedvezőbbet lehet alkalmazni.

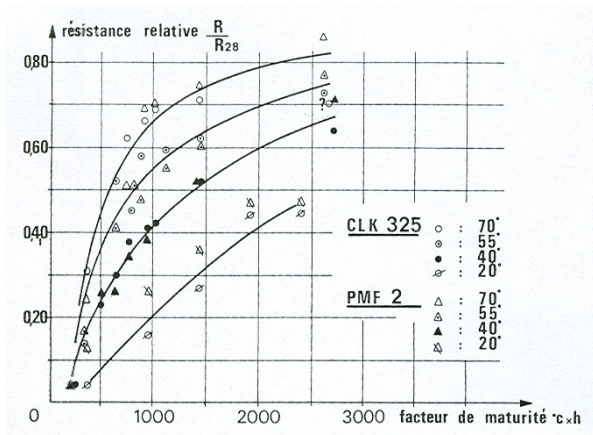
A *Papadakis – Bresson*-féle módszer hátránya, hogy csak $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet felett használható, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet alatt minden cement egyforma hőérzékenységűnek tűnik, ami nem felel meg a valóságnak, hiszen például kis hőmérsékleten a CEM III/B típusú kohósalakcement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



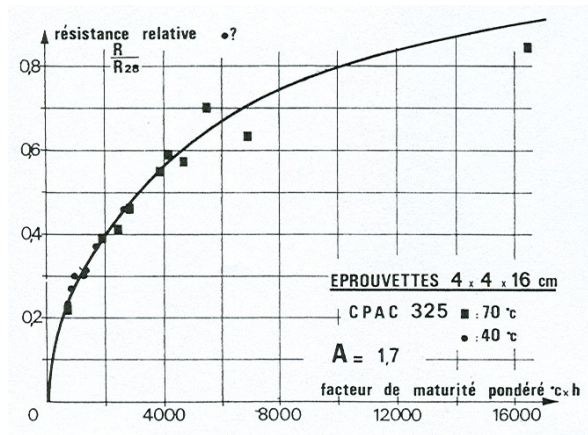
10. ábra: A „súlyozott” (cementfüggő) érési fok-óra szám meghatározása Papadakis – Bresson szerint



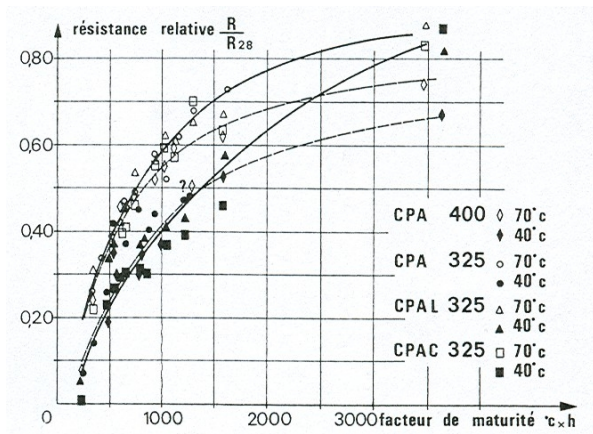
13. ábra: Kohósalakcement próbatetek Papadakis – Bresson-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja



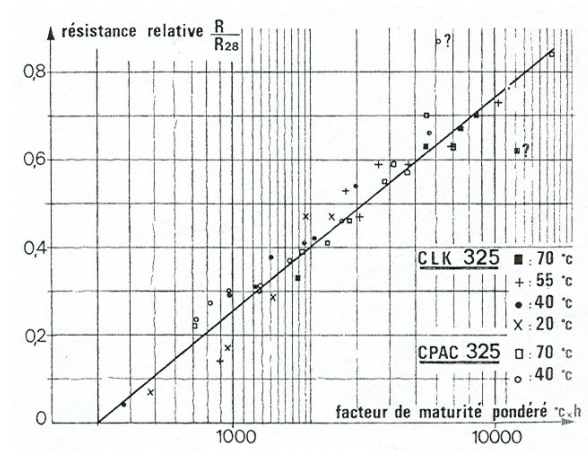
11. ábra: Két különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest Papadakis – Bresson-féle érési diagramja



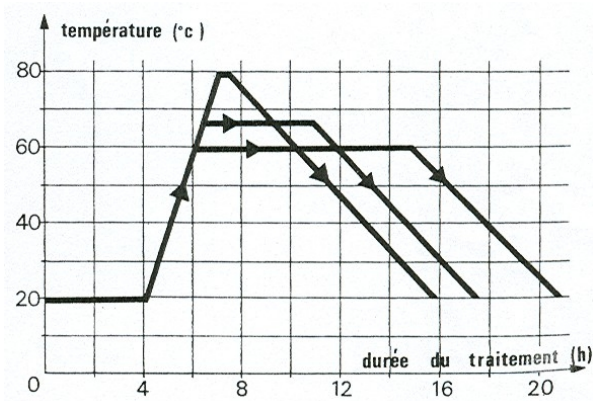
14. ábra: Pernyeportlandcement próbatetek Papadakis – Bresson-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja



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



15. ábra: Kohósalakcement és pernyeportlandcement próbatetek Papadakis – Bresson-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja szemilogaritmusos koordináta-rendszerben ábrázolva



16. ábra: Papadakis – Bresson-féle 3000 °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) = kompozitcement, mai megfelelője: CEM V

A cement betűjele után álló szám a cement nyomószilárdsága 28 napos korban, bar-ban kifejezve (1 bar = 0,1 N/mm²)

A 10. – 14. ábra, valamint a 16. ábra abszcissa-tengelye lineáris, a 15. ábra abszcissa-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'étude 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 underlying 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		2010. december havi számának 6-8. oldalán
---	---	---

**Vissza a Noteszlapok abc-ben
tartalomjegyzékhez**



**Vissza a Fogalmak könyvtár
tartalomjegyzékéhez**



**Vissza a Noteszlapok tematikusan
tartalomjegyzékhez**



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

