

BETONTECHNOLÓGIAI ISMERETEK JELENTŐSÉGE A DIGITALIZÁCIÓ ÉS A 3D BETONMARÁS TERÜLETÉN



Spránitz Ferenc

<https://doi.org/10.32969/VB.2022.2.1>

A betonipari robottechnológia kb. 13 éve, a csatornázási aknafenek elemek 3D betonmarásos üze-
mi előregyártásában kezdte el térhódítását. Már ekkor célként fogalmazódott meg a szakmunkások
képzettségétől és lelkiismeretességétől független, nagy precizitású, nagy termelékenysé-
gű, sablonpark
nélkül is szinte tetszőleges geometriai kialakításra lehetőséget nyújtó termékgyártás. A robottechnológiát
méltató több tucatnyi írásból a betonismeretek fontosságára mindössze egyetlen cikkben található utalás:
Managing director thanks his two concrete technologists: „Concrete is the key. And I’m glad that my team
had the courage and ideas needed to implement the new solution“ (Rinninger, 2011).

A betonipar is átlépte egy új kor küszöbét; a még különlegesnek tűnő megoldások (UHPFRC, 3DCP) is
lehetnek akár rövid időn belül nyereségesek, ha a résztvevő felek felismerik a tervezés-ipar-egyetemi képzés
kapcsolat és a szakmaspecifikus ismeretek fontosságát.

Kulcsszavak: programozható robotok, sablon- és bérköltségek csökkenése, finomszemcsés beton, technológiához illeszkedő konzisztencia,
friss és szilárd beton jellemzők, betonstruktúra

1. BEVEZETÉS

1.1 Miért fontos a betontechnoló- gia?

A betonipar fejlődését a kisebb anyagigények irányába kény-
szeríti az alapanyagkészletek világméretű fogyása és az ipari
termelés CO₂-lábnyomának szükségszerű csökkentése.

A minél kisebb anyagigényhez és élőmunka-ráfordításhoz
társul a növekvő lakhatási és infrastrukturális szükségletek
kielégítése, melyek a digitalizáció és a 3D technológiák al-
kalmazásával tűnnek megoldhatónak.

A betontechnológia kulcsfontosságát erősíteni fogják a fenti
folyamatok, mert a rövidesen hatályba lépő új EC-2 és EN
206 szabványok szerint az erőtani tervezést olyan anyagtani
tervezés is ki kell egészítse, mely a műszaki ismeretek mai
szintjén, számszerűsített formában veszi figyelembe a várható
környezeti igénybevételeket (pl. karbonátosodás, fagyás, klori-
dok) és a beton anyagának ellenállását (CEN TC 250 – N 993

2013, Bilag 2014, BAW Merkblatt 2019, BME Kutatás 2019).

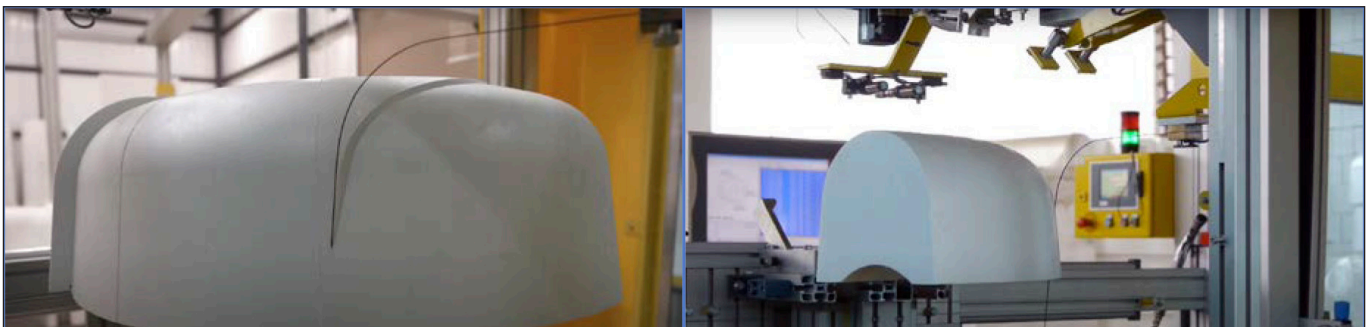
A jelenleg még prenormatív dokumentumok szerinti anyag-
tani tervezésen alapuló számszerűsített tartóssággal (pl. 50,
100, 200 vagy 500 év) megjelölt betonösszetételnek illeszked-
nie kell ahhoz az állaghoz is, amelyet a friss keverék építéshelyi
szállítása, tömörítési-bedolgozási módszere igényel, sőt még a
bedolgozás időpontjában éppen aktuális időjárási viszonyokat,
szerkezeti méreteket stb. is számításba kell venni.

E feladatok teljesítése nagy komplexitású mérnöki
átlátóképességet igényel; a különböző természeti-fizikai
törvényszerűségekhez szorosan kapcsolódó, esetenként új
anyagtani ismeretek megszerzése válhat szükségessé.

1.2 Első generációs betonipari 3D technikák és mozgatórugóik

A betonipar korai 3D technikái az előregyártás területére
koncentrálódtak; különösen a szennyvízcsatorna hálózatok
aknafenek elemeit, főként a bonyolult alakzatú, egyedi geo-
metriáit vették célba. A kifejlesztett különböző digitalizálási

1-2. ábra: Digitalizált folyásfenék negatív formájának kimarása EPS-ből robottechnológiával





3-4. ábra: A mágnessel rögzített negatív forma körbeöntése öntömörödő betonnal [fotók: Spránitz]



5-8. ábra: Az előregyártásban 2009-től terjed a 3D betonmarás (fotók: Spránitz)

módszerek és robottechnikák segítségével teljes mértékben elhagyhatóvá vált az utólagos építéshelyszíni vésés, a különböző görbületű folyásfenék-kialakítások helyszíni betonozása, a csőcsatlakozások helyszíni habarcsolása.

1.2.1 Aknaalj digitalizált negatív folyásfenéke
Németországban és Olaszországban talákoztam olyan csatornázási aknafenek elemekkel, melyekben a polisztirolhab tömbökből robottechnológiával kialakított és mágnesekekkel

9-11. ábrák: Aknaalj folyásfenék részének és csőcsatlakozásainak 3D marása (fotók: Spránitz)



fémsablonhoz rögzített negatív formára öntik rá az öntömörödő betont (1-4. ábra)

1.2.2 3D betonmarással készülő aknaaljgak

A szennyvízának előregyártásához Európában leginkább a mindössze 2-3 órás korban még száraz megmunkálásra lehetőséget adó 3D betonmarás terjedt el. (5-11. ábra).

Tény, hogy a 2000-es évek elején Németországban közel 40 milliárd euro/év költség kellett a kommunális szennyvízelvezető rendszerek oldódásos, azaz savkorrózió miatti kárainak elhárításához, ráadásul kb. 40%-ot tett ki a csatornahálózatokba kívülről bejutó talajvíz is (Nehdi et al 2007).

A betonipar e területén elindult technológiai fejlődéshez fenti tényezők is hozzájárulhattak, de vélhetően erős cselekvési készletet jelentett, hogy más iparágak is felfedezték a piacnak ezt a beavatkozásra alkalmas szegmensét (pl. kerámiaacsovek, műanyag tisztítóaknáknak), másrészt, pedig a német vízdíjakba beépítették az amortizációs díjtételt, mely jelentős áremelkedéshez vezetett mindazokon a területeken, ahol olyan, szokásos betoncsövek és tisztítóaknáknak kerültek beépítésre, melyek várható élettartamát max. 25 évre csökkentették Düsseldorf város csatornavizsgálatának eredményei alapján (Kovács, Füstös 2007).

2. A 3D BETONMARÁSOS ROBOT-TECHNOLÓGIA

2.1 A betonkeverék összetétele, friss és megszilárdult beton jellemzői

A 2-3 órás korban robotmarásra alkalmas, tehát még csak „zöldszilárdsággal” rendelkező friss beton jellemzőit firtató kérdéseimre a robotmaró technológiát (hardvert és szoftvert) eladó cég képviselői azt válaszolták, hogy ők nem betontechnológusok, hanem gépgyártók, de a korábbi vásárlóknál az alig földnedves, ún. „Dry-Cast Concrete”, azaz a 10 mm-nél kisebb roskadással jellemezhető állag vált be, melynek adalékváz legfeljebb $d_{max}=2$ mm szemmagyságú.

Az ilyen állagú frissbeton megfelelő tömöríthetősége a gyártósablon alatt elhelyezkedő külső vibrátorok esetében olyan gyártóberendezést igényel, mely széles intervallumban változtatható, programozható amplitúdó- és frekvenciaszabályozóval is fel van szerelve. Míg a kisebb méretű és tömegű termékeknel a kezdeti, rövid idejű nagyobb amplitúdójú rezgést követően általában célszerű a kisebb amplitúdójú,

nagy frekvenciájú vibrálás, addig a magasabb termékeknel nagyobb amplitúdó-beállításra és alacsonyabb frekvenciára lehet szükség, hogy a különböző magasságokat egyenletesen tömörítse a vibrálás energiája. Erre az emlékre „még futotta” a betontechnológiai szakmérnöki képzésen Dr. Rác Kornéliától megtanult gépészeti ismeretekből.

A beüzemelés követő néhány hét próbagyártás végén már betontechnológiai szemszögből is elfogadhatónak tűntek a $d_{max}=2$ mm-es adalékvázzal legyártott és kimart termékek (12. ábra).

A technológia beszerzésétől eltelt 10 év alatt - a gépgyártó kérésének eleget téve - Afrika kivételével a Föld valamennyi kontinenséről fogadtunk potenciális, 3D betonmaró technológiát vásárolni szándékozó ügyfeleket, ill. fogadtuk az esetenként évek óta sikertelen gyártással küszködő cégek képviselőit is.

Betonkeverék összetételei jellemzői:

- péptartalom: 31 V%,
- tervezett levegőtartalom (tömörítési hiányosság): 2 V%
- pépfázis szárazanyagtartalma: 49,5 V%
- kötőanyag: kis C_3A -tartalmú cement+kohósalak+metakaolin
- víz/kötőanyag tényező: $x=0,33$.

Frissbeton jellemzők:

- keverőgép teljesítmény kijelzőjének adata 1 m³ esetében: 520-540 mV (függ a mérőműszer típusától, érzékenységtől és a keverőlapátok kopásának mértékétől)
- keverék hőmérséklete: min. +8 °C max. 32 °C.

Fürt magmintákon mért szilárd beton jellemzők [8]:

- testsűrűség: 2.400-2.440 kg/m³
- tömörítési hiány okozta levegőtartalom: 2-4 V%
- nyomószilárdság: $R_{\phi 100 \times 100} \geq 60$ N/mm²
- primer vegyszerállóság: nincs károsodás (közegek: 400 mg/l NH_4^+ , 6.000 mg/l Mg^{2+} , 30.000 mg/l SO_4^{2-} tartalmú oldatokban és pH=3 kénsav oldatban tárolás 1 hónapig)
- szekunder vegyszerállóság (mart felületeken): pH=1 kénsavoldatban való 1 hónapos tárolás után a felületi keménységcsökkenés kisebb, mint 15%.

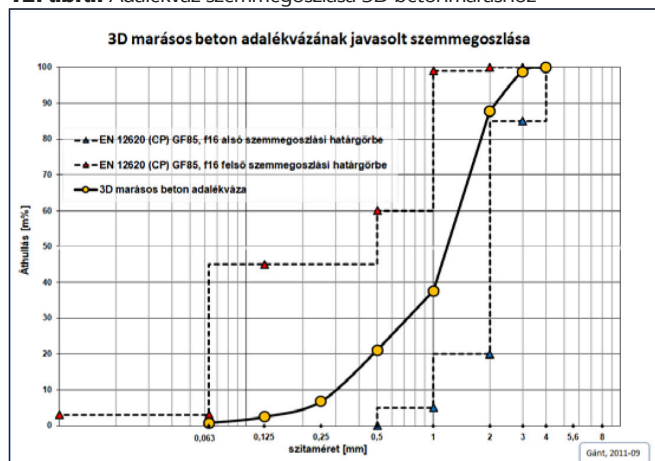
2.2 A 3D marású friss- és szilárd-beton jellemzők anyagtani háttere

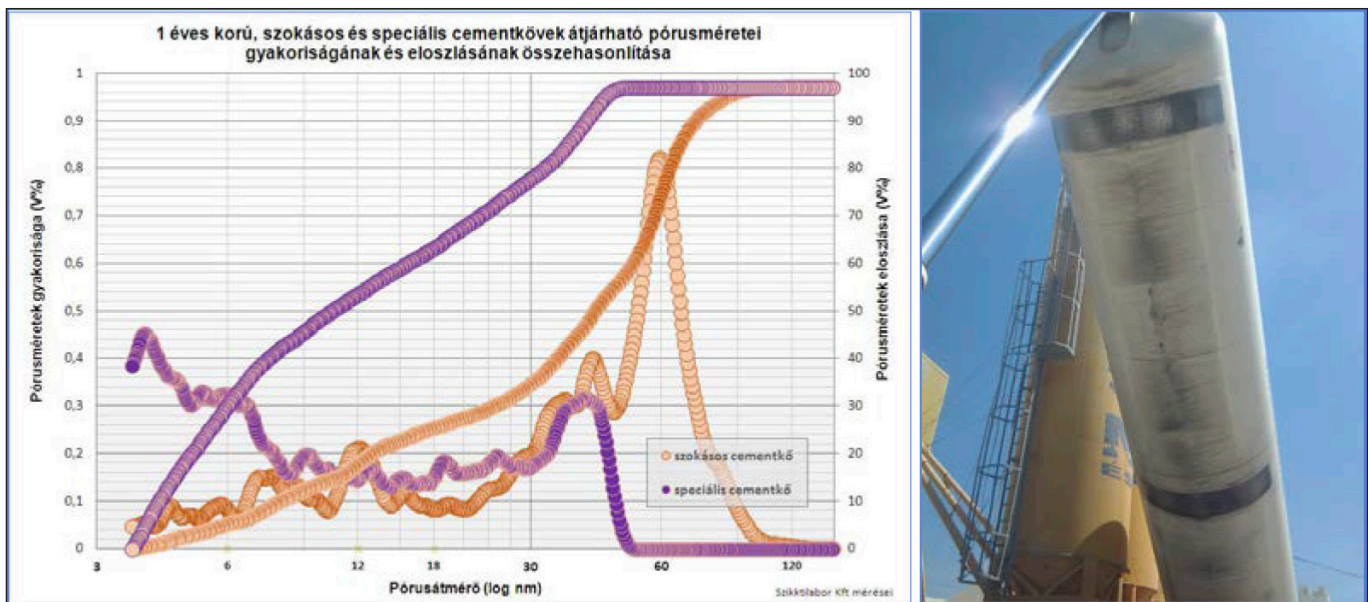
A szokásos portlandcementekkel készített, megfelelően tömör és repedésmentes szerkezetek is gyorsan károsodhatnak, ha agresszív közegek igénybevételének (pl. savaknak, kloridoknak) vannak kitéve. A gyors károsodás legfőbb okozói a porózus cementkő mezostruktúrájában végbemenő transzportfolyamatok. Ennek során viszonylag gyors vándorlási sebességet is elérhetnek el a pórusfolyadékba jutó olyan ionok és molekulák, melyek a portlandit vagy akár a kalcium-szilikáthidrátok kioldódását, az acélbetétek korrózióját, majd a beton repedezését eredményezik.

A cementkő eredendően kedvezőtlen pórusméret-eloszlását és nagy portlandit tartalmát előnyösen befolyásolja a jól ismert, szokásosan alkalmazott örölt kohósalak és szilikapor mellett a metakaolin és kőszénpernye is, melyeket célszerű ömlesztett formában, silóban tárolni és a recepteknek megfelelően automatikusan adagolni a betonkeverőbe (13-14. ábra).

A frissbetontól megkívánt mozgékonyasági, reológiai jellemzők is jelentősen befolyásolhatók az egyes cementkiegészítő anyagokkal. Az örölt kohósalak pl. többnyire nem változtat a vízigényen és mozgékonyaságon, de megnöveli a betonkeverék érzékenységét a vérzésre; a metakaolin valamelyest megnöveli a vízigényt, ill. lényegesen javítja a friss termék

12. ábra: Adalékváz szemmegoszlása 3D betonmaráshoz





13-14. ábra: 1 éves cementkő pórusméret-eloszlásának és gyakoriságának javítása puccolánokkal (baloldali ábrán narancsszínű a tiszta cementkő, lila a kötőanyag-keverék)

állékonyságát és korai szilárdságát, míg a kőszénpernye csökkenti a vízgényt és megnöveli a keverék mozgékony-ságát. E kölcsönhatások magyarázatára jó lehetőséget adnak az elektronmikroszkópos felvételek is. A 15-17. ábrák SEM fotói 3500-szoros nagyításban vizualizálják egy kohósalak, egy metakaolin és egy kőszénpernyetípus szemcsehalmazát.

A megtanult szakmai alapismeretekből tudjuk, hogy hang-súlyosan fontos a cementkiegészítő anyagokat tartalmazó, frissen bedolgozott beton megfelelő védelme és utókezelése.

A gépgyártók, technológiát forgalmazók szerint „ezzel a kérdéssel nem nagyon kell foglalkozni, mert a finomszemcsés alig földnedves betonban olyan kevés a víz, hogy azt biztosan megköti a cement”.

Altalában nem egyszerű feladat ilyen esetekben meggyő-zni a cégvezetést az elhangzottak ellenkezőjéről. A szakmai érvek alátámasztására laborméréseket végeztünk a gyár-tásból kivett, kis víztartalmú („Dry Cast Concrete”), de je-lentős mennyiségű kötőanyagot, hidraulikus és puccolános kiegészítőanyagot tartalmazó keverékből, hogy a korai víz-vesztést és a betonkeverékben rejlő szilárdsági lehetőségek kiteljesedének mértékét számszerűsítsük.

A vízvesztés és a hajlító-húzószilárdság mérésére irányu-ló laborkísérleteink során 4×4×16 cm-es hasábokat készí-tettünk, azokat letakartuk, majd 6 óras korban kiszalztuk, tömegüket megmértük és 4×4 cm-es véglapjukra állítva la-borklimán tároltuk a rákövetkező vizsgálatokig.

A komponensek sűrűségéből, a keverési arányokból és a kiszalzáskori tömegmérésből számított, tömörítési hiány

okozta levegőtartalom ($V_{lev} = 6-7 V\%$) azért haladta meg kissé a termékgyártás során mért értékeket, mert a speciális gépi tömörítés hatásfokát a nagy gondosságú, rétegenkénti tömő-rítéssel sem érthettük el.

A Haegermann-sablonokból kiszaluzott próbatetek leve-gővel érintkező felületeit különböző vizes diszperziós bázisú kipárolgás-csökkentő szerekkel lepermeteztük, majd 1, 3 és 28 napos korban megmértük a hajlító-húzószilárdságokat és a tömegmérésekből kiszámítottuk a 6 órás kort követő vízvesz-tés mértékét (18. ábra).

Az összehasonlító jellegű mérésekből azt a következtetést vontuk le, hogy a kis víztartalmú keverékből készített, utó-kezeléstől mentes, nagy párolgó felületű beton 3 napos korra $30 \pm 7\%$ -ot elérő szilárdságvesztést szenvedhet el a jelentős korai vízvesztést nem elszenvedett betonhoz képest, mely veszteség 28 napos korra már $50 \pm 5\%$ -ra nő.

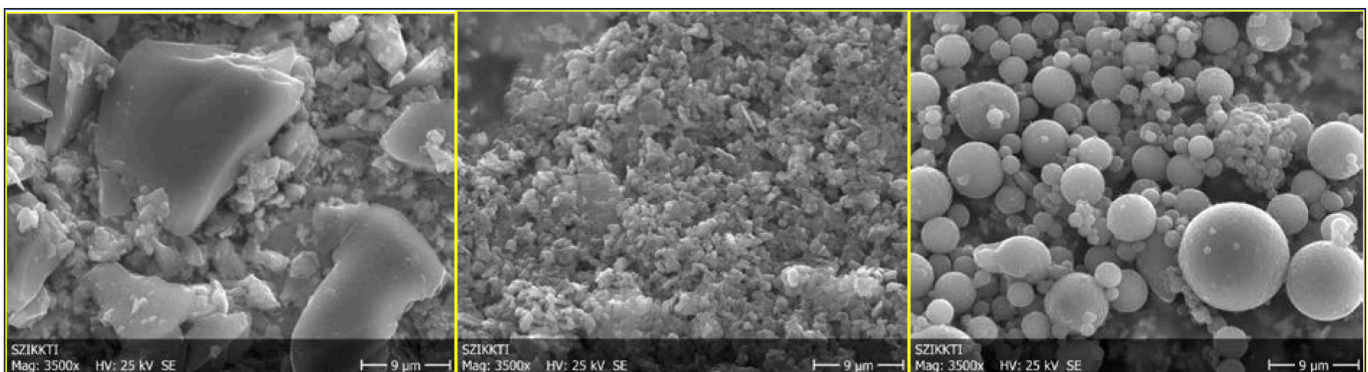
Az eredményekből megfigyelhető, hogy a 72 órás korú vízvesztés és a hajlító-húzószilárdság igen szorosnak tűnő, tengelyesen szimmetrikus összefüggést mutat.

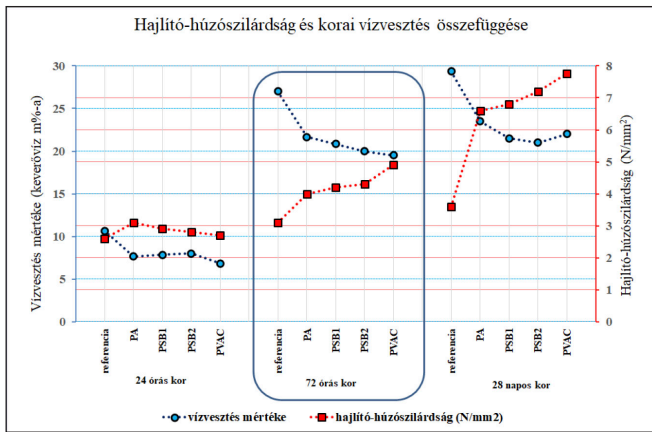
A 4-féle kipárolgáscsökkentő adalékszer fajlagos anyag-költsége a vizsgálatok idején $50-630 Ft/m^2$ volt, azaz a több tízezer Ft értékű 3D betonmarású termékek gondos utókeze-lésével a szilárdsági jellemzők a duplájára növelhetők a ter-mékár mindössze 0,1-1 %-nyi költségével.

2.3 Robotmarás előkészítése

A megrendelő által közölt egyedi jellemzőket számítógépes programmal modellezzük a gyárthatóság szempontjából (pl.

15-17. ábra: A kohósalakszemcsék alakja (baloldalon) leginkább a nyújtott szemmegoszlású zúzottkőre, a metakaoliné (középen) egy sűrű szövésű csipkére, míg a kőszénpernyéről készült felvétel a csapágygolyókra emlékeztet





18. ábra: Korai vízvesztés és hajlító-húzószilárdság összefüggése

csatornázási akna átmérője, falvastagsága és magassága, ki- és becsatlakozó csövek külső és belső átmérője, irányszögei, ki- és befolyások közötti szintkülönbségek, csöcsatlakozások lejtése stb.), majd a gépkezelő számítógépállomásának szoftvere ezeket a jellemzőket lefordítja a marórobot nyelvére (19-21. ábra).

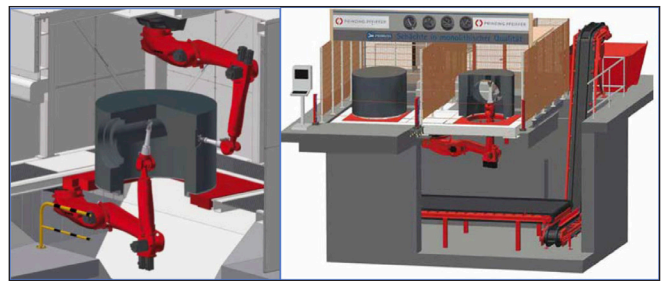
A kinyomtatott és a termékre felragasztott gyártási adatlap nem csak az emberi agy által szokásosan értelmezhető betűkkel és számokkal jelzi az egyedi termék paramétereit, hanem a rajta lévő vonalkód segít a robot számára azonosítani a végrehajtandó feladatot.

A vonalkód beolvasását követően a gépkezelő megjelöli a használni kívánt forgatóasztalt, majd a kezelőpult számítógépállomás elvégzi a biztonsági protokollokat, lefordítja a robot nyelvére az aktuális termékparamétereiket, s átadja a marórobotnak a gyártást.

A gyártási adatlapot - rajta az elszállíthatóság napját - e-mailben megkapja a megrendelő, és rendszerint 2 nap múlva (kivételes esetben 24 órán belül) elszállítható az optimális áramlási jellemzőkkel tervezett és legyártott egyedi csatornázási fenékelem.

2.4 Robotmarás

Az általunk használt (23. ábra szerinti), 2 forgatóasztalos, 6-tengelyes robotmaró, egyedileg konfigurálható szerszámgépként működik, önállóan, automatizálva végzi el a munka egyes lépéseire tartozó precíz, háromdimenziós munkafolyamato-



22-23. ábrák: 2 robot és 1 forgatóasztal (bal) vagy 1 robot és 2 forgatóasztal (jobb)

kat. A szokásos méretű, bonyolultságú aknafenek legyártása során kb. 4000-6000 parancsot hajt végre a robot.

Az egyedileg konfigurálható aknafenek elemek gyártásához a robot 3,5 m sugarú körben képes elérni szinte minden pontot. Kellően gyors munkavégzést eredményez a marófejek 4200 fordulatszám/perc forgási sebessége, de biztosítva van a gépkezelő számára a fogásmélység és előtolás kézi szabályozhatósága is, mely fontos a hosszú marásidejű termékek betonjának keményedésekor felerősödő szerszámkopás mérsékléséhez. A marófejek ipari gyémánttal bevont, gyorsan cserélhető marólapkák találhatók.

A „nagy és erős” robotmaró „gyenge és kicsi oldalbordája” az ún. KCP kontrollpanel, mely a robot kézi programozó készüléke, s egyben a robot „agyá”. Ezzel a kisméretű KCP készülékkel (24. ábrán baloldalon) történik a robot ki- és bekapcsolása, a robotkarok tetszőleges irányítása, a folyamatban lévő parancs teljesítésének képernyőn való megjelenítése, az esetlegesen fellépő hibák kijelzése és azok kezelése.

Az aknaelem méretétől, a marás bonyolultságától függően mintegy 15-50 perc szükséges a tervezett konfiguráció 3D marásához. Kétműszakos gyártás esetén akár napi 40-50 db egyedi termék is gyártható.

A napi gyártások ütemezése során kb. 5 percnyi pontossággal kell megtervezni az egyes betonadagok keverésének és a termék legyártásának időpontját. Erre azért van szükség, mert ha gyorsabb az egymást követő termékgyártás, mint a marási idő, akkor a marásra várakozó friss termék túlzottan megkeményedhet, s a gyártás meghiúsulhat; míg, ha túl korán kezdődik a marás, akkor a nem kellő „zöldszilárdságú” betontermék könnyen roncsolódhat. A gyártást megelőző napon

19-21. ábra: A megrendelés (baloldalon), a vonalkóddal kinyomtatott gyártási lap (középen), valamint a gépkezelő számítógépállomása, mely rögzíti a lézerszenkerral aktuálisan megadott vonalkódot



24-25. ábra: A KCP készüléken (baloldali ábrán) a gépkezelő csökkenti a marás előtolását, mely főként a jobboldali ábrán látható, hosszú marásidejő aknáknál válik szükségessé

előkészített gyártási terv több szempontot is figyelembe vesz (pl. az egyes marások várható időtartama, gyártás hideg vagy meleg időszakban, dolgozók étkezési szünetének időpontja, elvárt hatékonyság, selejmentesség, kis szerszámkopás stb.).

A 3D betonmaráshoz tartozó három számítógép hálózati kapcsolatban kell legyen. Az irodai gépen, a megrendelői adatok alapján elkészül a gyártási lap; a gépkezelő számítógépe a gyártási lap vonalkódját befogadva lefordítja a műszaki adatokat a robot nyelvére; s végül a robot KCP-je pedig ez alapján adja ki a parancsokat a robotnak.

Ezek, a betonipari gyakorlatban korábban ismeretlen informatikai történések számos izgalmas „leckét” adnak fel, mint pl. a számítógépek közötti hálózati kapcsolatok ún. „pingelés” ellenőrzése, a marófej megszorulása miatt leálló robot újraindítása a KCP billentyűzetén való „lin visszalépegetésekkel”, a KCP által bármilyen okból hibásnak értelmezett xml fájl cseréje, vagy a robot számára kezelhetetlen, ún. egyedi helyzet fellépése esetén szükséges teendők stb.

3. IPAR ÉS EGYETEM EGYÜTTMŰKÖDÉSÉNEK EREDMÉNYE

2021 tavaszától hiánytermékeknek minősültek egyes, kisméretű, vasbeton termékek.

Mind a vasszerelés díj-, mind pedig annak anyagköltsége drámai módon emelkedett meg. A díjköltség emelkedését a vasszerelés esetenkénti bonyolultsága és a szakemberhiány magyarázta; az anyagköltség növekedését pedig az alapanyaghiány és a nemzetközi szállításokban keletkezett zavarok.

Az adott vasbeton termékek árának ésszerű határokon belül tartásához célul tűztük ki a hagyományos vasalás teljes mértékű helyettesítését szálereősítéssel.

Műszaki-gazdaságossági számításaink szerint még a jelentősnek tekinthető szálmennyiség (1,6-2 V%) költsége is átlagosan kb. 10.000 Ft/db előnyt mutatott fel az adott termékek esetében a szálereősítés javára, a hagyományos vasalással való összehasonlításban.

Az elképzelés megvalósításához szükség volt az ún. UHPFRC („Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete) típusú beton rutinszerű előállítására.

Kis száltartalmú, száladagolás nélküli, valamint rövid szálakkal kevert nagyszilárdságú betonokra voltak már többé-kevésbé sikeres gyártási tapasztalataink, de ezek egyike sem eredményezett nagy szívósságú, repedést követően felkeményedő betont.

Közel 1 hónap laboratóriumi és ipari keverési próbáit követően tapasztaltuk, hogy a kiszaluzott betontermékek rendkívüli szívósságúak, szinte törhetetlenek; de a mérnökiileg számszerűsített mértéket csak az egyetemi laborvizsgálatok deríthették ki.

Egyazon összetételű keverékhez adagolt 3 fajta száltípussal és egy szálereősítés nélküli verzióval készítettünk - valós, ipari keverékekből - gerenda és kocka próbatesteket, melyeket a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék laboratóriumában vizsgáltattunk meg.

Dr. Balázs L. György professzor javaslatára az egyes száltípusok hatásának értékeléséhez az MSZ EN 14651:2005+A1 szabvány szerinti gerendakísérlettel meghatározható, erő – CMOD (Crack Mouth Opening Distance) görbe felvételét kértük.

3.1 Az ipari megoldás

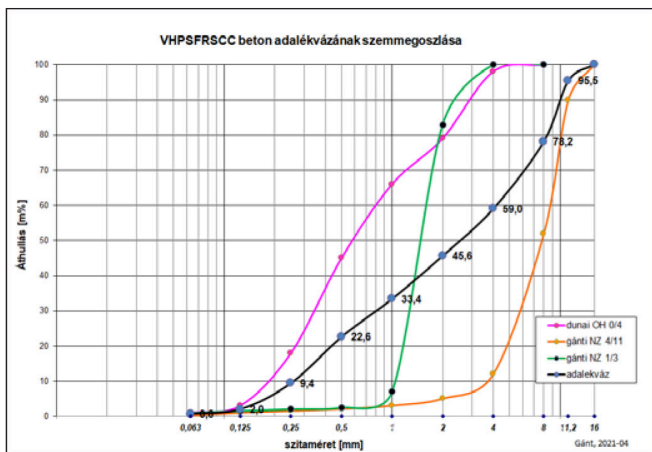
A betongyári keverőgépben a korábbi években már sikertelennek bizonyult a hosszú és nagy mennyiségű szállal való betonkeverés, ill. a vékony és rövid acélszálak pedig a keverő tengelyének tömítéseit roncsolva bejutottak a zsírzással kent forgási helyekre, ezért az ún. felkeményedő típusú, szívós beton iparszerű gyártása az ifjúkori vágyalmok polcára került.

2021 tavaszán, a korábbi tapasztalatok birtokában kezdtük el az új típusú, ún. kétütemű betonkeverést.

Az első ütemben 49 V% pépfázissal kevertük meg a $d_{max}=12$ mm-es adalékvázat (26. ábra), majd a második keverési ütemben a betonkeveréket adagoltuk az 50 mm hosszú, nagy mennyiségű (1,6 V%) acélszálhoz. Szemmel is jól látható volt, hogy a betonkeverék jól befogadja, esetenként a kőszemcsék alakjához görbíti az acélszálakat.

Az első ütemben megkevert frissbeton pépfázisa 61 V% szárazanyagtartalommal és e szárazanyagtartalomra vetített 4 V% PCE folyósítószer tartalommal (MC-Bauchemie Kft.) készült. A pépfázis szilárdanyag része az előzetes laborkísérletek alapján összeállított porkeverék. A porkeverék összetevőinek célzott megválasztásával nem csak a friss pépfázis, ill. a frissbeton reológiai jellemzői befolyásolhatók, hanem a megszilárd betonban lezajló, ion- és molekulavándorlással járó transzportfolyamatok sebessége is, mely a beton tartósságának talán a legfőbb jellemzője (Ujhelyi 2005). E transzportfolyamatok sebessége jó korrelációban van az átjárható pórusok méretelosztásával, különösen a 30 nm alatti pórusok részarányával (Laczkó, Spráncz 2021).

Ipari gyakorlati keveréseink során tapasztaltuk, hogy az $l/d=50$ körüli „aspect ratio”-vel jellemezhető, kampós kivitelű acélszállal (Avers Kft.) akár még a 2 V% (kb. 160 kg/m³)



26. ábra: UHPFRC beton adalékvázának szemmegoszlása

mennyiség is homogénre keverhető, ha van lehetőség a szálak 2. ütemben történő bekeverésére. Ehhez a módszerhez kézenfekvőnek tűnt a Bobcat munkagépünk keverőadapterébe szórt egy zsák (25 kg) acélszálhoz adagolt, előzetesen már megkevert 200 l beton (27-29. ábra) másodszori megkeverése. A keverék öntömörödő jellege láthatóan elősegítette a viszonylag nagy szálmennyiség 3-4 percen belüli homogén eloszlását.

Ez a frissbeton a szokásosan alkalmazott, nyírásra vékonyodó reológiai viselkedéssel szemben nyírásra már éppen vastagodó, így nem áll fenn az acélszálak ülepedésének veszélye.

3.2 BME vizsgálatok, egyetemi szakértés

A BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék a szakértésében megemlíti, hogy a bevizsgált négyféle betonkeverékből a nagy mennyiségben, hosszú acélszálakat tartalmazó betonösszetétel szívóssága meghaladja a szokásos szálerősítésű betonokét, ezért különösen alkalmas lehet a fásztzó jellegű és a nagy dinamikus terhek tartós elviselésére [Balázs, Sólyom, Dunai 2021].

Az elvégzett nagyszámú laboratóriumi vizsgálat eredményeiből az 50 mm hosszú, 125 kg/m³ acélszáltartalmú betonon mért értékeket tartalmazza az 1. táblázat.

Örültem, hogy az egyetemi CMOD laborvizsgálatokon jelen lehettem, mert a több mint 10 éve megcélzott, repedést követő felkeményedést végre sikerült elérni, sőt ezt az eredményt számszerűsítette is a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék akkreditált Anyagvizsgáló laboratóriuma (33. ábra).

27-29. ábra: A Bobcat munkagép keverőadapterével gyorsan homogenizálható a 125 kg/m³ acélszál



1. táblázat: Acélszálás betonösszetételen elvégzett mechanikai vizsgálatok eredményei

Mechanikai vizsgálatok	Mért eredmények, min-max (zárójelben az átlagérték)
Hajlító-húzószilárdság (N/mm ²)	12,8-15,4 (14,1)
Arányosági határ, azaz a 0,05 mm repedésmegnyíláshoz tartozó feszültség (N/mm ²)	7,7-8,7 (8,1)
CMOD _{0,5} , azaz maradó hajlító-húzószilárdság 0,5 mm repedéstágasságnál (N/mm ²)	12,4-15,4 (13,9)
CMOD _{1,5} , azaz maradó hajlító-húzószilárdság 1,5 mm repedéstágasságnál (N/mm ²)	12,3-14,4 (13,3)
CMOD _{2,5} , azaz maradó hajlító-húzószilárdság 2,5 mm repedéstágasságnál (N/mm ²)	10,8-12,9 (11,9)
CMOD _{3,5} , azaz maradó hajlító-húzószilárdság 3,5 mm repedéstágasságnál (N/mm ²)	9,7-11,9 (10,8)
Nyomószilárdság a hajlítóvizsgálat után levágott gerendavégeken (N/mm ²)	115-133 (126)
Nyomószilárdság a 15 cm élhosszúságú próbakockákon (N/mm ²)	121-124 (123)
Testsűrűség próbakockákon (kg/m ³)	2466-2558 (2520)
Testsűrűség hajlítóvizsgálat után levágott gerendavégeken (kg/m ³)	2533-2560 (2548)

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A hazánkban, de talán világszerte is még különlegesnek tekinthető betonok (pl. 3D marás, UHPFRC) szakértői vizsgálatával is foglalkozó BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék korszerű vizsgálóberendezésekkel és felkészült műszaki gárdával segíti az ipari innovációs kezdeményezéseket.

A betoniparnak, de tulajdonképpen az egész országnak jelentős értékeremtést eredményez, hogy a BME Építőmérnöki Karán már több mint 20 éves a betontechnológus szakmérnök-képzés, melyre, mint eddig is, úgy a remélhetően közelgő 3D betonnyomatás korszakában is támaszkodhatnak a tervezők és az ipar képviselői. Ez a típusú és tematikájú szakmérnöki képzés az ország szinte minden szegletében forrása a jelentős mérnöki alkotások jó gyakorlati megvalósításának.



30-32. ábra: Az önjáró Bobcat munkagép sablonokba is üríti a kívánt adagokat

A 3D betonmarás iránt érdeklődő, különböző országokból érkezett, valamint hazai ipari szakemberekkel folytatott szakirányú információcseréket értékelve elmondható, hogy a betontechnológia területén Európa-szerte kivételes előnyünk lehet.

A hajdani betontechnológus szakmérnök képzés elindításához hasonlóan, talán már közel járhatunk egy új képzés, a 3D betonnyomtató szakmérnöki képzés bevezetéséhez.

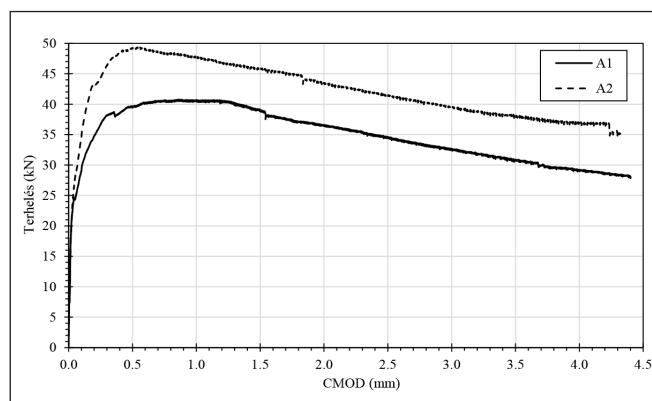
A 3D nyomtatású betonokkal kapcsolatban publikált kísérleti és ipari gyakorlat szakirodalmának tanulmányozásából kitűnik, hogy az építészeti szabadságot nyújtó egyedi formák megvalósítása, az anyag-, élőmunka- és építési időigény csökkentése látványos, erőteljes fejlődést mutat, ugyanakkor a tartósságra irányuló anyag- és betontechnológiai tervezés, valamint ezek gyakorlatba való átültetése terén még további kutatásokra van szükség.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzője köszönetet mond a Dolomit Kft. vezetőségnek, akik a bizalmat és az anyagi támogatást adták a munkához, valamint köszönettel tartozik a cég betonüzeme dolgozóinak.

6. HIVATKOZÁSOK

- Balázs L. Gy., Sólyom S., Dunai. L. „Gerenda próbatestek CMOD vizsgálata és beton nyomószilárdság vizsgálat – kísérleti eredmények összefoglalása”, Szakértői vélemény, OM: FI23344, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 2021.06.01.
- BAW Merkblatt (2019): Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC) – megtekintve 2021.11.09.
- Bilag (2014), http://www.expertcentre.dk/media/24477/bilag_2_n26_-_jwg_presentation_-_tc104_sc1_-_tc250_sc2_-_march_2014.pdf – megtekintve 2021.11.09.
- BME Kutatás (2019), NVKP_16-1-2016-0019, Fokozott ellenálló képességű beton termékek _ anyagtudományi, kísérleti fejlesztése, <https://em.bme.hu/em/nvkp>, megtekintve 2021.11.09.
- CEN/TC 250 – N 993 (2013), http://www.psc.ro/wp-content/uploads/2013/07/M515_TC-250-answerAnnexes.pdf - megtekintve 2021.11.09.
- Kovács, K., Füstös, A., Düsseldorf csatornavizsgálat eredményei és következményei- Vízű Panoráma szakmai lap, 2007/2. Különszám
- Laczkó L., Spráncz F., Vasbeton szerkezetek 5, 50 500 vagy 5000 évre?, online konferencia 2021.03.30., <https://www.epitmenyeink.hu/eloadasok-2021-2>
- <https://drive.google.com/file/d/1jSdb4TcaH9eHtszhZBZPwMTloFkICHRx/view>
- Nehdi M. et al (2007), https://www.researchgate.net/publication/242418868_Using_concrete_admixtures_for_sulphuric_acid_resistance - megtekintve 2021.11.09.



33. ábra: Terhelő erő - repedéscsúcs megnyílás (CMOD) diagram

Rinninger (2011); http://primuss.samagentur.de/fileadmin/user_upload/bilder/Press/DE/Rinninger_Mai_2011.pdf - megtekintve, 2021.11.08.

Ujhelyi, J., Betonismeretek, Egyetemi tankönyv, BME, 2005

Spráncz Ferenc (1961) okl. építőmérnök (1985), okl. betontechnológus szakmérnök (2000). Építésügyi szakértő, betonüzem vezető a Dolomit Kft-nél. Fő érdeklődési területei: betonok szövetszerkezete, áteresztőképessége, élettartama; vibropréselt, öntömörödő, nagy teljesítőképességű, szálerősített és felkeményedő viselkedésű betonok üzemszerű gyártása, levegőn szilárduló és hidraulikus kötőanyagú termékek, gyártástechnológiák fejlesztése, padozati szerkezetek (esztrich, ipari padló). Több szakmai szervezet tagja: **fib** Magyar Társaság, MMK, SzTE, ÉTE, Burkolástechnika Egyesület, az Esztrich és Ipari Padló Egyesület tiszteletbeli elnöke.

IMPORTANCE OF CONCRETE TECHNOLOGY BY THE DIGITALISATION AND BY 3D CONCRETE MILLING Ferenc Spráncz

The robot technology started to appear in the production of prefabricated shafts of concrete drainage tubes elements about 13 years ago. The objective of the development was to realize production of high precision and high productivity which enables the production without special formworks and without qualification and exactness of handworkers. Importance of parameters of concrete technology is mentioned only in this paper from many publications: „Concrete is the key. And I’m glad that my team had the courage and ideas needed to implement the new solution“ (Rinninger, 2011). The concrete industry is looking for new solutions. The new technologies of special characters (UHPFRC, 3DCP) can be economically advantageous, whenever the participants realize the importance of collaboration of design-industry-university in order to be able to solve specific questions.