

Pécsi Tudományegyetem
Műszaki és Informatikai Kar
Építőmérnök Tanszék

Vasbeton gabonasiló tartószerkezeti ellenőrzése
optimális megbízhatósági szint alapján módosított
parciális tényezőkkel

Készítette: Fehér Sándor Zsolt
Szerkezet-építőmérnöki MSc

Konzulens: Dr. Orbán Zoltán

Pécs

2024

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott Fehér Sándor Zsolt hallgató kijelentem, hogy jelen pályamunkát a Pécsi Tudományegyetem Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar Építőmérnök Tanszékén készítettem.

Kijelentem, hogy a pályamunka saját munkám eredménye, és kizárólag a megjelölt forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen, az előírásoknak megfelelően megjelöltem. Ugyanígy jártam el a más forrásból átvett illusztrációk (rajzok, ábrák, képek, grafikonok, táblázatok, stb.) esetében is.

Pécs, 2024.11.17.



.....
hallgató aláírása

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Orbán Zoltán tanár úrnak a sok segítségért, kitüntető bizalmáért, amelyek hozzájárultak ennek a pályamunkának a létrejöttéhez, és tanulmányom ideje alatt kapott tanácsokért, folyamatos figyelmességért.

Végül szeretnék köszönetet mondani a családomnak, különösképpen a feleségemnek és a gyermekeimnek a türelméért, a támogatásért, hogy lehetővé tették ennek a tanulmánynak a folytatását.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	1
2. Vasbeton silók építési és méretezési gyakorlata, valamint üzemeltetési tapasztalatai	2
2.1. Silókról általában.....	2
2.1.1. Silók alkalmazásának területei.....	2
2.1.2. Silók anyagai.....	3
2.1.3. Silók felépítése, részei	4
2.2. Silók méretezése akkor és most.....	6
2.2.1. Silók geometriája és osztályozása.....	6
2.2.2. A tárolt anyagból származó nyomások.....	7
2.2.3. Silónyomások üzemeltetés közben	10
2.2.4. Külpontosság	11
2.2.5. Rendkívüli terhek.....	12
2.2.6. Parciális tényezők, hatáskombinációk	12
2.3. Vasbeton silók építésmódjai	13
2.3.1. Monolit silók.....	13
2.3.2. Előregyártott és részben előregyártott silók.....	14
2.4. Silók leggyakoribb tönkremeneteli módjai.....	14
2.4.1. Meghibásodások jellemző okai.....	15
2.4.2. Tervezési hibákból adódó meghibásodások	15
2.4.3. Építési hibákból adódó meghibásodások.....	16
2.4.4. Nem megfelelő használatból adódó meghibásodások	17
2.4.5. Különleges szempontok hőmérséklet és nedvesség tekintetében	18
2.4.6. Dinamikus terhelések, rezgések és robbanások	18
2.4.7. Karbantartási hibákból adódó meghibásodások	19
2.4.8. Jellegzetes károsodások	20
2.4.9. Silócella károsodásai.....	20
2.4.10. A silócella fenéklemezének és vasbeton tölcserének a meghibásodásai ..	22
2.4.11. A siló alátámasztási szerkezetének a károsodásai	22
3. Megbízhatóság és parciális tényezők a <i>fib</i> Bulletin 80 alapján.....	24
3.1. Tervezési értékek és parciális biztonsági tényezők	25
3.2. Módosított biztonsági tényezők anyagtulajdonságokra.....	28
3.3. Biztonsági tényezők állandó terhekre	30
3.4. Biztonsági tényezők hasznos terhekre	31
4. Vasbeton silóegyüttes szerkezeti leírása és diagnosztikája	32

4.1. A meglévő szerkezet leírása	32
4.2. Vasbeton silóegyüttes diagnosztikája	33
4.2.1. Szemrevételezés.....	33
4.2.2. Szilárdsági vizsgálatok betonon.....	34
4.2.2.1. Roncsolásmentes szilárdsági vizsgálatok Schmidt kalapáccsal.....	34
4.2.2.2. Roncsolásos szilárdsági vizsgálatok fűrt mintákon.....	34
4.2.2.3. Betonstruktúra vizsgálatok fűrt mintákon.....	35
4.2.2.4. Beton szilárdsági vizsgálatainak összegzése.....	36
4.2.3. Szilárdsági vizsgálatok betonacélon	36
4.2.4. Tartóssági és szerkezeti jellemzők vizsgálata.....	38
4.2.4.1. Kémiai vizsgálat furatpor minták és feltárások alapján	38
4.2.4.2. Vizsgálat mágneses vaskeresővel	39
4.2.5. Repedéstágasság és repedésmélység vizsgálatok	41
5. Tartószerkezeti ellenőrzés	42
5.1. Alkalmazott szabványok.....	42
5.2. Modell felvétele	43
5.3. Anyagjellemzők.....	43
5.4. Terhek	44
5.4.1. Siló osztályozása.....	44
5.4.2. Állandó terhek.....	44
5.4.3. Esetleges terhek	45
5.4.3.1. Tárolt anyag terhei	45
5.4.3.2. Meteorológiai terhek	46
5.5. Eredmények	46
5.6. Eredmények a parciálális tényezők korrigálása nélkül.....	48
6. Következtetések.....	49
7. Összefoglalás	51
8. Irodalomjegyzék	
9. Mellékletek	

1. BEVEZETÉS

Csakúgy, mint a meglévő vasbeton építmények jelentős része, a vasbeton silók legtöbbje is már elérte, vagy a közeljövőben el fogja érni a tervezett élettartamát. Ennek oka, hogy a meglévő szerkezetek jelentős részét az '60-as, '70-es években építették. Ezeket újra kell értékelni annak érdekében, hogy megállapítsuk, megfelelnek-e a ma érvényben lévő biztonsági követelményeknek.

A jelenlegi gyakorlatban a meglévő beton szerkezetek értékelése alapos átgondolást igényel a kockázat és a megbízhatóság szempontjából. Jelenleg a meglévő szerkezeteket jellemzően egyszerűsített eljárásokkal ellenőrzik, amelyeket általában az új szerkezetek tervezésénél is alkalmaznak. Az ilyen konzervatív értékelések gyakran költséges felújításokhoz vezethetnek. A meglévő szerkezetek tényleges teherbírásának reálisabb ellenőrzését valószínűségi módszerekkel lehet elérni.

A szerkezetek terhelési és ellenállási tényezőit figyelembe vevő valószínűségi módszerek segítenek a jelenlegi állapot pontosabb megértésében, ami alapja lehet a jövőbeli beavatkozásoknak és felújításoknak. A *fib* (Fédération internationale du béton – Nemzetközi Betonszövetség) harmadik - meglévő betonszerkezetekkel foglalkozó - bizottságának 80. közlönye szerinti megbízhatósági vizsgálatok különösen fontosak, mivel ezek segítenek azonosítani azokat a kritikus pontokat, amelyek megerősítésre szorulnak, és segítenek elkerülni a költséges túltervezést.

Pályamunkámban bemutatom *fib* által javasolt biztonsági tényezők csökkentésének módszerének alkalmazását egy meglévő vasbeton silócsoport diagnosztikáján és erőtani vizsgálatán keresztül.

A diagnosztikai vizsgálatokkal átfogó képet nyújtok a vasbeton silócsoport jelenlegi állapotáról. Az eredmények felhasználásával, illetve az optimális megbízhatósági szint alapján módosított parciális tényezők alkalmazásával alkalmazásával elvégzem a szerkezet erőtani vizsgálatát. A szerkezet ellenőrzését elvégzem az Eurocode által új építésű szerkezetekre alkalmazott korrekciós tényezőkkel is. Ezek összehasonlításával átfogó képet kapunk a módszer alkalmazásának jelentőségéről.

2. VASBETON SILÓK ÉPÍTÉSI ÉS MÉRETEZÉSI GYAKORLATA, VALAMINT ÜZEMELTETÉSI TAPASZTALATAI

2.1. Silókról általában

„Silóknak nevezzük az ömlesztett anyagok tározói közül azokat az építményeket, amelyeknél a tározó magassága (H) jelentősen meghaladja a keresztmetszeti méretet(a), vagyis $H > 1,5 a$, illetve $H > 10$ méter.” [12] A mérnöki gyakorlatban olyan szerkezetek, amelyek számos iparágban nélkülözhetetlenek a nagy mennyiségű ömlesztett anyagok biztonságos, hatékony és hosszú távú tárolására. A silók tervezése és építése összetett feladat, amely nem csupán statikai, hanem anyagtani, technológiai és logisztikai szempontokat is figyelembe vesz. A silók kialakítása és működése jelentős hatással van a bennük tárolt anyagok minőségére és felhasználhatóságára, így alapvető fontosságú, hogy a tervezési folyamat során minden részletet gondosan megtervezzünk.

A silók a függőleges tárolás elvén alapulnak, ami lehetővé teszi a tárolt anyagok hatékony mozgását a gravitáció segítségével.

Az építőmérnöki gyakorlatban a silók tervezésekor különös figyelmet kell fordítani a szerkezeti stabilitásra és a megfelelő anyagválasztásra, mivel a silókban tárolt anyagok jelentős terhelést gyakorolnak a szerkezetre. A silók statikai tervezésénél figyelembe kell venni az anyagok mechanikai tulajdonságait, a tárolt anyag sajátos jellemzőit, valamint az esetleges dinamikus terheléseket is, amelyek a siló működése során felléphetnek. [4]

2.1.1. Silók alkalmazásának területei

A silók felhasználási területei rendkívül szélesek. Nélkülözhetetlen szerepet töltenek be az ágazatokban, főbb alkalmazási területeken többek között a mezőgazdaságban, az élelmiszeriparban, a vegyiparban, a bányászatban és az építőiparban. [2]

- **Mezőgazdaság:** A mezőgazdaságban a silók egyik legfontosabb alkalmazási területe a gabonatárolás. A betakarított gabona hengeres gabonasilóban tárolható a feldolgozásra vagy értékesítésre készen. A mezőgazdasági silók egyéb alkalmazásai közé tartoznak a takarmánysilók, a műtrágyasilók és a más típusú ömlesztett mezőgazdasági termékek tárolására szolgáló silók.
- **Élelmiszeripar:** Az élelmiszeriparban a lisztet, cukrot, sót és más nyersanyagokat legtöbbször silókban tárolják. Ezek a silók segítenek az élelmiszer-feldolgozó üzemeknek

abban, hogy folyamatosan és megbízhatóan ellássák nyersanyaggal a gyártási folyamatokat, és megőrizzék a tárolt anyagok minőségét.

- Vegyipar: A vegyiparban a silók szerepe különösen fontos, mivel a tárolt anyagok gyakran veszélyesek vagy speciális kezelést igényelnek. A vegyipari silókban gyakran tárolnak különféle porított anyagokat, például cementet, műtrágyát, vegyszereket vagy más ömlesztett vegyi anyagokat.
- Bányászat: A bányák különféle nyersanyagokat, például ércet, szenet vagy más ásványokat tárolnak silókban. Általában a bányasilók hatalmas mennyiségű anyagot képesek tárolni.
- Építőipar: Az építőiparban használt silókat többek között cement, homok, kavics és egyéb építőanyagok tárolására használják. Ezekre a silókra azért van szükség, hogy a betonkeverőkben és hasonló építőipari üzemekben alkalmazott alapanyagok folyamatosan rendelkezésre álljanak.

2.1.2. Silók anyagai

A silók anyagainak megválasztása alapvetően meghatározza azok tartósságát, teherbíró képességét és a tárolt anyag minőségének megőrzését. Az anyagválasztás során figyelembe kell venni a siló által tárolt anyag típusát, a helyszíni körülményeket, valamint a silóval szemben támasztott statikai és dinamikai igényeket. [3]

- Beton: A beton az egyik leggyakrabban használt anyag a silók építésénél. Elsősorban nagy kapacitású silók esetén alkalmazzuk. A beton kiváló teherbíró képességgel rendelkezik, és ellenáll a különböző időjárási viszonyoknak, így hosszú távú tartósságot biztosít.

A beton előnyei közé tartozik a jó hőtartó képesség is, amely csökkenti a silóban tárolt anyag hőmérséklet-ingadozását. Ez különösen fontos olyan anyagok tárolása esetén, amelyek érzékenyek a hőmérséklet-változásokra, mint például a gabona vagy a liszt.

- Acél: Az acél szintén gyakran használt anyag a silók építésénél, különösen akkor, ha könnyű, de erős szerkezetre van szükség. Az acélsilók előnyei közé tartozik a gyors telepíthetőség és a könnyű szállíthatóság. Az acélból készült silók gyakran előre gyártott elemekből állnak, amelyek könnyen össze- és szét szerelhetők, így ideálisak ideiglenes vagy mobil tárolási megoldásokhoz.

Az acélsilók esetében különös figyelmet kell fordítani a korrózióvédelemre, főként akkor, ha a silóban tárolt anyagok nedvességet tartalmaznak vagy kémiai reakciókra hajlamosak.

A korrózió elkerülése miatt az acélsilókat gyakran bevonattal látják el, például galvanizálással vagy festéssel.

- Alumínium: Az alumínium ritkábban használt anyag a silók építésénél, de bizonyos esetekben előnyös lehet. Az alumínium előnyei közé tartozik a kicsi önsúly és a kiváló korrózióállóság, amely lehetővé teszi a hosszú távú használatot agresszív környezetben is.
- Műanyagok: A műanyagok, különösen a polietilén és a polipropilén, szintén alkalmazhatók silók építésénél, elsősorban kisebb méretű és könnyű tárolási megoldások esetén. Alkalmazásuk előnyei közé tartozik az alacsony önsúly, a korrózióállóság és a könnyű telepíthetőség. A műanyag silókat gyakran használják kisebb mennyiségű szárazanyagok, például takarmány vagy műtrágya tárolására.
- Fa: A fa hagyományos anyagnak számít, manapság már ritkábban használják ebből a célból. A fából készült silók előnyei közé tartozik a jó hőszigetelési képesség és a természetessége. A fából készült silók azonban hajlamosak a rovar- és gombakárosodásra, és a nedvesség hatására is jelentősen károsodhatnak.
- Kombinált anyagok: A kombinált anyagú silók különböző anyagok előnyeit ötvözik. Például acél- és betonelemek kombinációjával épített silók esetében a beton alap és az acél felső szerkezet lehetővé teszi a nagy teherbíró képességet és a könnyű szerelhetőséget is.

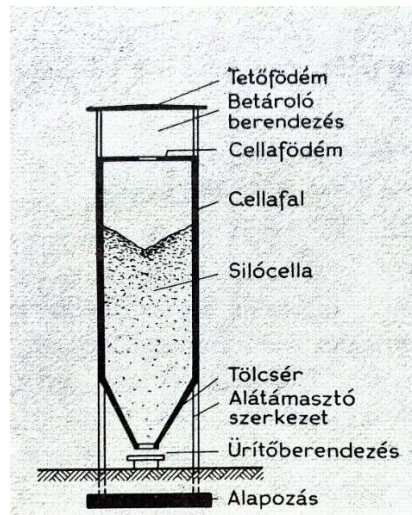
2.1.3. Silók felépítése, részei

A silók felépítése számos szerkezeti elemből áll, amelyek mindegyike fontos szerepet játszik a siló stabilitásában és teherbíró képességében. [5]

- Alapozás: Az alapozás lehet síkalap vagy cölöpalap. Ha nagy terhelésről van szó, vagy a teherbíró réteg mélyen található, akkor a cölöpalapozás előnyösebb választás. [13]
- Tartógerendák és -oszlopok: A tartógerendák és oszlopok biztosítják a silótest stabilitását és teherbírását. Ezek az elemek általában acélból vagy vasbetonból készülnek, és úgy vannak elhelyezve, hogy egyenletesen eloszlassák a silótestben tárolt anyag súlyát az alapozásra, majd a talajra.
- Silótest: A silótest a siló legnagyobb és legfontosabb része, amelyben a tárolt anyagok elhelyezkednek. A silótest általában hengeres vagy kúpos alakú, és lehetővé teszi a tárolt anyag gravitációs úton történő mozgatását.

Részei:

- silótölcsér
- tárolócellák
- cellafalak
- cellafödém
- tetőfödém



1. ábra: Siló részei (forrás: Dr. Bölcseki Elemér, Dr Orosz Árpád: Vasbeton szerkezetek: Faltartók, lemezek, Tárolók)

- Kivezető nyílás: A kivezető nyílás gravitációs úton lehetővé teszi az anyagok kiáramlását a silóból. A kimenet alakja és mérete befolyásolja az anyagok kiürülésének gyorsaságát és egyenletességét.
- Üritő rendszer: A siló alján található ürítőrendszer segíti a tárolt anyagok szabályozott kijuttatását. Az ürítési rendszer kiválasztása a tárolt anyagtól és annak kiáramlási sebességétől függ. Többféle általánosan használt rendszer létezik, például gravitációs-, csigás-, vibrációs- és pneumatikus ürítők.
- Töltőnyílás: A töltőnyílás a siló tetején található, és lehetővé teszi a tárolni kívánt anyagok betárolását a silóba. A töltőnyílás lehet egyszerű nyílás, vagy tartalmazhat tölcseres beömlőt is, amely egyenletesen osztja el a tárolt anyagot a silóban.
- Szellőző rendszer: A szellőző rendszer többnyire a siló tetején vagy oldalán helyezkedik el, és biztosítja a siló belsejében lévő levegő megfelelő cseréjét.
- Emelő- és mozgató berendezések: Ezek az eszközök biztosítják a tárolt anyagok betöltését és kiürítését, valamint a silóban történő mozgatását. Az emelő- és mozgató berendezések közé tartozhatnak szállítószalagok, csigák, serleges felvonók és vibrációs adagolók.

- **Monitoring és mérőeszközök:** A modern silók gyakran felszereltek különféle monitoring és mérőeszközökkel, amelyekkel a tárolt anyagok állapotát lehet nyomon követni. Ilyen eszközök a hőmérséklet- és páratartalom-érzékelők, töltöttségi szintmérők és nyomásérzékelők.
- **Karbantartási és hozzáférési eszközök:** A silók rendszeres karbantartást igényelnek. A karbantartási és hozzáférési eszközök közé tartozhatnak létrák, járdák, ellenőrző nyílások, amelyek lehetővé teszik a siló biztonságos és pontos ellenőrzését, karbantartását.
- **Biztonsági berendezések:** A silók biztonságos üzemeltetése érdekében számos biztonsági berendezést kell telepíteni. Ilyen berendezések a túlnyomás-szelepek, robbanásgátlók, vészleállítók és tűzvédelmi rendszerek.

2.2. Silók méretezése akkor és most

A silók tervezésének és építésének vizsgálata 1882-ben kezdődött, amikor Roberts 15 méter magas, téglalap alakú silón végzett nyomásmérést. Az első laterális és vertikális nyomásokat Janssen határozta meg 1895-ben, melyek képleteit azóta is széles körben alkalmazzák, annak pontatlanságát figyelembe véve.

A szerkezet tervezésében a terhelések pontos meghatározása és a megfelelő szabványok alkalmazása létfontosságú. A vasbeton silók 1970-es kiadású hazai számítási iránymutató szabványa az adott kor műszaki ismeretein alapul, míg az MSZ EN 1991-4:2006 az Eurocode család részeként nemzetközi szinten összehangolt, és figyelembe veszi a korszerű tervezési elveket. Az alábbiakban összehasonlítom a két szabvány különböző terhelési számítási módszereit, geometriai megközelítéseit és biztonsági tényezőit, különös tekintettel elvi eltérésekre és hasonlóságokra.

2.2.1. Silók geometriája és osztályozása

Az 1970-es szabvány nem különbözteti meg részletesen a silók geometriai eltéréseit. A geometriai változások, mint a hengeres és tölcséres kialakítás.

Ezzel szemben a MSZ EN 1991-4 szabvány különbséget tesz a különböző geometriai formák között. A karcsú és zömök silókra vonatkozó előírások részletesen tárgyalják az oldalnyomás különbségeit, és figyelembe veszik a geometriából adódó eltéréseket. Ez pontosabb terhelési eloszlást eredményez a siló falain és alaplemezen.

Az 1970-es szabvány nem rendelkezik részletes hatásosztályokról. A silókra ható terhelések inkább általánosan kerülnek meghatározásra, és az osztályozás hiánya miatt kevésbé pontosan írhatók le a tervezési követelmények.

A MSZ EN 1991-4 szabvány három hatásosztályt különböztet meg: kis, közepes és nagy hatású silók. Ezek az osztályok a siló méretétől, anyagától és az adott helyen várható terhelésektől függően változnak.

Hatásosztály	Leírás
3. hatásosztály	10 000 t-nál nagyobb tárolókapacitású silók 1 000 t-nál nagyobb tárolókapacitású olyan silók, melyekre a következő tervezési állapotok bármelyike érvényes: a) külpontos ürítés $eo/dc > 0,25$ külpontossággal; b) olyan zömök silók, melyekben a halomfelszín csúcspontjának külpontosságára teljesül az $et/dc > 0,25$ feltétel.
2. hatásosztály	Az összes olyan siló, melyet e szabvány alkalmazási területe lefed és nem tartozik másik hatásosztályba.
1. hatásosztály	100 t-nál kisebb tárolókapacitású silók.

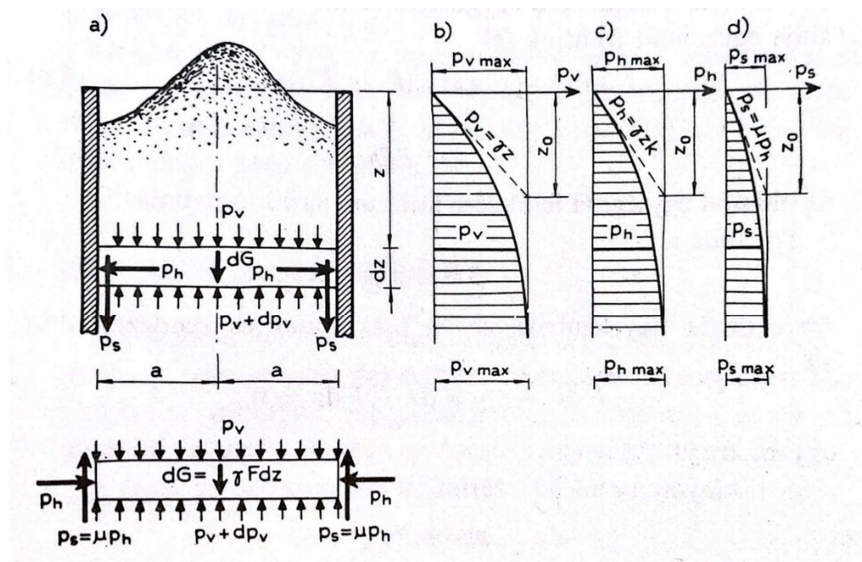
1. táblázat: Ajánlott silóhatásosztályok (forrás: MSZ EN 1991-4:2006)

Az osztályozás segíti a pontosabb tervezési paraméterek meghatározását, különös tekintettel a dinamikus terhelésekre és az anyagfolyási tulajdonságokra.

2.2.2. A tárolt anyagból származó nyomások

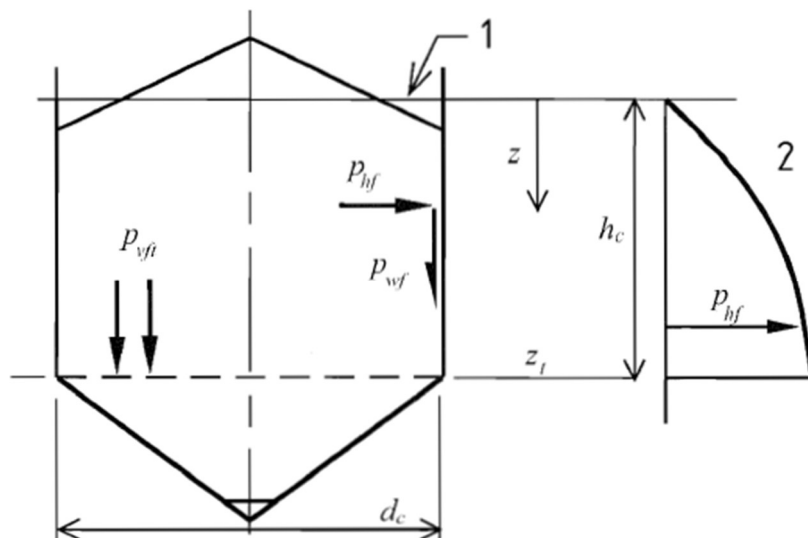
A silók tervezésében mind az 1970-es magyar szabvány, mind a MSZ EN 1991-4:2006 figyelembe veszi a tárolt anyagok tulajdonságait, mivel ezek meghatározzák a silóra ható függőleges és vízszintes terheléseket. A tárolt anyagok nyomáseloszlása közvetlenül befolyásolja a siló falaira és aljára ható erőket, amelyek fontosak a biztonságos szerkezeti tervezés szempontjából. Mindkettő elismeri, hogy mind a töltési, mind az ürítési terheléseket figyelembe kell venni.

Az 1970-es szabvány a tárolt anyagból származó nyomások alapértékeit a Janssen-féle elméleten alapuló képletek segítségével számította ki. Janssen elmélete azt feltételezi, hogy a szemcsés anyag saját súlya nem egyenletesen oszlik meg a siló falain és alján, mivel a falak súrlódása csökkenti a függőleges terhelést, és a vízszintes terhelések növekedését eredményezi.



2. ábra: Janssen-féle silónyomások (forrás: Dr. Bölcskei Elemér, Dr Orosz Árpád:
Vasbeton szerkezetek: Faltartók, lemezek, Tárolók)

A MSZ EN 1991-4:2006 szabvány azonban jelentősen továbbfejlesztette a tárolt anyagokból származó nyomások figyelembevételét, különös tekintettel a mechanikai tulajdonságokra, mint például a szemcsés anyagok kohéziója, tapadása és belső súrlódása. Ezek a tényezők nemcsak a függőleges nyomást befolyásolják, hanem a siló falaira ható vízszintes nyomást is.



3. ábra: A függőleges falú szegmensben fellépő szimmetrikus töltési nyomások (forrás: MSZ EN 1991-4:2006)

A tárolt anyagból származó különböző irányú terhelések számításainak összehasonlítását a 2. számú táblázat tartalmazza.

	1970-es szabvány	Eurocode
Függőleges	$p_v = z_0 \gamma (1 - e^{-\frac{z}{z_0}})$	$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} Y_J(z)$
Vízszintes	$p_h = k p_v$	$p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z)$
Súrlódó	$p_s = p_h$	$p_{wf}(z) = \mu p_{hf}(z)$
ahol	γ = tárolt anyag térfogatsúlya $z_0 = \frac{F}{\mu k K}$ F = cella keresztmetszet terület K =cella keresztmetszet kerület μ =a súrlódó és a vízszintes nyomás viszonya $k = \frac{p_h}{p_v}$	$p_{ho} = \gamma K z_0$ $z_0 = \frac{1}{K \mu} \frac{A}{U}$ $Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_0}$ γ =halmaztérfogatsúly karakterisztikus értéke μ =szemcsés anyag falsúrlódási tényezőjének karakterisztikus értéke K =oldalnyomásarány z =szemcsés anyag egyenértékű felületétől mért mélység A = keresztmetszet területe U = keresztmetszet kerülete

2. táblázat: A tárolt anyagból származó különböző irányú terhelések számításainak összehasonlítása

Függőleges nyomás esetében a 2 képlet behelyettesítése során és összehasonlítása során a következőt vehetjük észre:

1970-es szabvány	Eurocode
$p_v = z_0 \gamma (1 - e^{-\frac{z}{z_0}})$	$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} Y_J(z)$
	$p_{vf}(z) = \frac{\gamma K z_0}{K} (1 - e^{-z/z_0})$
	$p_{vf}(z) = \gamma z_0 (1 - e^{-z/z_0})$
	$p_v = p_{vf}(z) = z_0 \gamma (1 - e^{-\frac{z}{z_0}})$

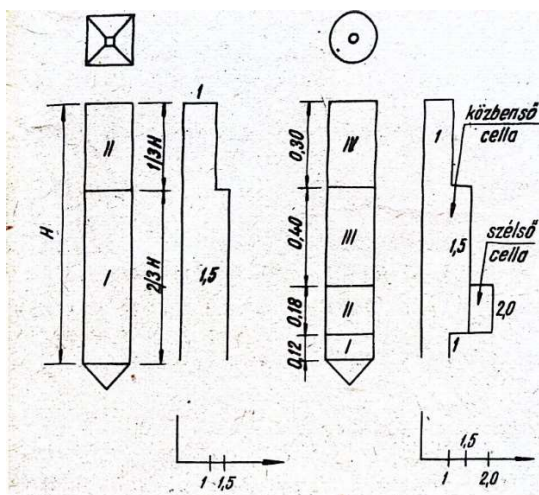
A függőleges terhek számítása tehát ugyanazon elvek mentén történik, viszont jelentős eltérés a szabványban javasolt anyagjellemzők mértéke. Például a '70-es években búzára javasolt figyelembe veendő térfogatsúly (γ) értéke 800 kg/m³ míg ugyanez az érték az Eurocode-ban 9 kN/m³.

Más a helyzet a vízszintes nyomások elemzésénél, ugyanis „Jenssen képlete a silóban tárolt anyag elemi vastagságú rétegének egyensúlyegyenletéből ered – annak figyelembevételével, hogy a siló belsejében azonos metszetben (keresztmetszetben) az oldalnyomás és fenéknyomás viszonya konstans.” [12]

2.2.3. Silónyomások üzemeltetés közben

Az '50-es években különböző országokban számos cementsiló megsérült, néhány siló össze is omlott, ezért ezt követően számos kísérletet végeztek silókon az anyagmozgások mérésére. [12]

Üritésnél általában azt vették észre, hogy a nyugalmi állapotban tapasztalható oldalnyomás növekedni kezdett. Emiatt ezt követően a szemcsés anyagoknál a Janssen képletből kapott nyomásértékek javító tényezővel való megnövelésével veszik figyelembe. A '70-es években hazánkban nem volt egységes irányelv erre vonatkozóan, de a gyakran a Cnipsz javítótényezőket használták. Általában a siló legalsó részében nem növelik a Janssen féle értékeket, a középső harmadban 50%-os növekedéssel számolnak, illetve szélső celláknál 100%-kal.



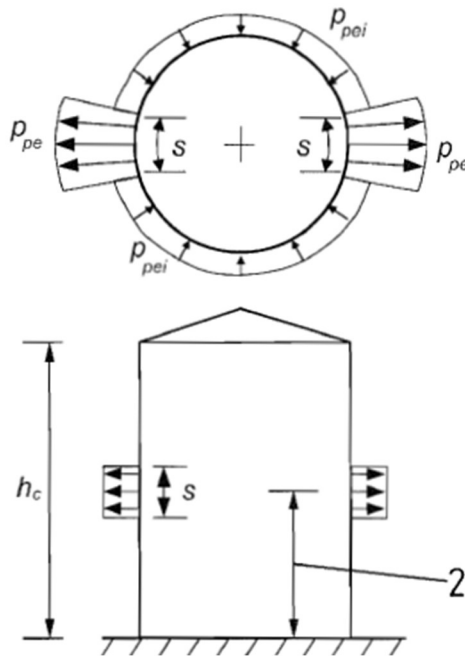
4. ábra: Cnipsz javító tényezők (forrás: Kilián József: Vasbeton szerkezetek, tározók)

Napjainkban az Eurocode részletesebben előírja a silók töltésekor és ürítésekor megváltozott körülmények okozta hatásokat. Mivel jellemzően az ürítéskor nagyobb igénybevétel változás történik, jelen pontban ezt emelem ki.

Ürítéskor a vízszintes nyomásokat C_h tényezővel szükséges módosítani, melynek értéke 2.- és 3. hatáosztályba tartozó karcsú siló esetén 1,15.

A tapadási falsúrlódást C_w tényezővel szükséges módosítani, melynek értéke 2.- és 3. hatáosztályba tartozó karcsú siló esetén 1,10.

Az Eurocode továbbá részletesen előírja az ürítéskor fellépő helyi túlnyomásterhek által okozott többlet igénybevételek figyelembevételét.



5. ábra: Az ürítéskor fellépő helyi túlnyomás-teher oldalnézete és felülnézete (forrás: MSZ EN 1991-4:2006)

Vastag falú hengeres silók esetében a p_{pe} helyi nyomását rendszerint két, egymással szemben lévő, kifelé mutató s oldalhossz mentén kell kezelni az alábbi összefüggések szerint:

$$p_{pe} = C_{pe} p_{he}$$

Ahol:

$$h_c/d_c > 1,2 \text{ esetén } C_{pe} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] \left[1 - e^{-1,5 \left(\frac{h_c}{d_c} - 1 \right)} \right]$$

p_{he} : ürítési nyomás értéke

$$p_{pei} = p_{pe}/7$$

2.2.4. Külpontosság

A külpontos töltés és ürítés jelentős hatással van a silók szerkezetére, különösen a falakra és az aljzatra ható terhelések eloszlására. A külpontosság lényege, hogy a siló nem szimmetrikusan terhelődik a tárolt anyag miatt, ami a siló falain és alján egyenlőtlen nyomáseloszlást okoz. Különösen nagy méretű és nagy kapacitású silók esetén a külpontos töltés és ürítés figyelmen kívül hagyása komoly stabilitási problémákat okozhat. Az MSZ EN 1991-4:2006 külön előírásokat tartalmaz ezen állapotok kezelésére.

Ezzel szemben a 1970-es években alkalmazott magyar szabvány nem fordít különösebb figyelmet a töltéskori és ürítéskori külpontosság kérdésére. A külpontos terhelések

elhanyagolása azonban hosszú távon károsodást eredményezhet a silók szerkezetében, leginkább a nagy kapacitású silóknál, ahol a felerősödő terhelés lerövidítheti az használhatósági élettartamot.

2.2.5. Rendkívüli terhek

A dinamikus terhelések a silók tervezésében kiemelt figyelmet igényelnek, különösen olyan esetekben, amikor a silók működés közben rezgésnek vannak kitéve, vagy földrengésveszélyes területeken. Az MSZ EN 1991-4:2006 szabvány részletesen foglalkozik ezekkel a hatásokkal, míg a korábbi szabvány kevésbé összpontosít ezekre a terhelésekre.

Az MSZ EN 1991-4:2006 szabványban részletes előírásokat találunk a robbanási hatások kezelésére, különösen a porrobbanásokra vonatkozóan. A korábbi szabvány nem foglalkozik kifejezetten a robbanási terhelésekkel.

2.2.6. Parciális tényezők, hatáskombinációk

Az MSZ EN 1991-4:2006 szabvány részletesen foglalkozik a különféle biztonsági tényezőkkel, beleértve a parciális tényezők alkalmazását, amelyeket a különböző terhelések kombinációinál használ.

Ezek a tényezők segítenek abban, hogy a silók különböző üzemállapotokban is megfeleljenek a biztonsági követelményeknek. A '70-es években kevésbé foglalkoztak a különféle kombinált hatásokkal és azok parciális tényezőivel, inkább egyszerűsített tervezési eljárásokra építettek.

A silók tervezésére vonatkozó szabványok az 1970-es évek óta jelentős fejlődésen mentek keresztül. A korábban használt szabvány inkább az egyszerű statikus terhelésekre összpontosított, és a gyakorlati tapasztalatokat figyelembe véve alakítottak ki. Ez a szabvány a hazai ipari követelményekhez igazodott, és az akkori technikai elvárásoknak felelt meg. Ugyanakkor a modern szabványok, mint az MSZ EN 1991-4:2006 már figyelembe veszik a dinamikus terheléseket, a szeizmikus hatásokat, a robbanási terheléseket, valamint a hőmérsékleti ingadozásokat is. Ez az újfajta szabvány sokkal konkrétabb utasítást ad, amely megfelel a mai ipari követelményeknek és a biztonsági szabályoknak.

2.3. Vasbeton silók építésmódjai

2.3.1. Monolit silók

A '60-as évek előtt épített vasbeton silók többsége monolit vasbeton szerkezetű volt. Az ilyen silók építésekor kezdetben teljes alátámasztású állványozással dolgoztak, amely az építési költségek jelentős részét képezte, gyakran az 50%-át is. [12]

Az idő előrehaladtával a monolitikus silók építési technológiájában jelentős előrelépést hozott a Faye-féle zsaluzási rendszer. Ez a módszer üreges elemekből állt, amelyek könnyen összeszerelhetők és újrahasználatosak voltak, akár 70 alkalommal is.

A csúszózsálas átörést hozott a vasbeton silók építésében. Ezt a technikát már fél évszázada használják, és a mai napig alkalmazzák különféle építkezéseken, például hűtőtornyoknál, silóknál és kémények esetében is.



6. ábra: a Kaposvári Cukorgyár fermentor silóinak csúszózsálas kivitelezése (forrás: https://www.epitesimegoldasok.hu/20100122nagymeretu_silok_epitese_zsuszoszsaluval.html, letöltés ideje: 2024.09.15.)

A kivitelezés lényege, hogy az építmény falának körülbelül 2 méteres szakaszát zsaluzzák be, majd amikor a beton elérte a megfelelő szilárdságot, a zsaluzatot áthelyezik a következő szakasz betonozásához. Ezt az áthelyezést végezhetik átemelhető vagy forgatható zsaluzattal. Kiemelt fontosságú, hogy a zsalutáblák könnyen kezelhetők legyenek, valamint egyszerűen leszerelhetők és stabilan rögzíthetők.

Napjainkban továbbfejlesztett változata lehetővé teszi, hogy nagyobb átmérőjű szerkezeteket is gyorsabban és gazdaságosabban építsenek meg.

2.3.2. Előregyártott és részben előregyártott silók

Az előregyártás technológiája korábban elterjedt volt a silóépítésben, hiszen költségghatékonyabb megoldásnak bizonyult. Az előregyártott elemek ismételt felhasználásával jelentősen csökkenthetővé váltak az építési költségek. Az előregyártott elemek három kategóriába sorolhatók: kis, nagy és óriás elemek.

- Kiselemek: A kiselemek közé tartoznak az 50 kg alatti üreges elemek, valamint a bordázott vasbeton panelek, amelyeket gyakran alkalmaznak a hűtőtornyok és a silók építése során. A kiselemek jellemzője, hogy kis súlyuk miatt könnyen kezelhetők, és gyorsan összeszerelhetők. A falakat általában kézi munkával összeszerelik, majd utólagos feszítéssel és rögzítéssel biztosítják a stabilitást.
- Nagyobb elemek és közepsúlyú elemek: A nagyobb méretű előregyártott elemek közé tartoznak a bordázott vasbeton panelek, amelyeket általában egyedi csatlakozókkal erősítenek össze. Az ilyen rendszerek egyik előnye, hogy a soros elrendezés lehetőséget biztosít a cellák gyors bővítésére és a kapacitás növelésére. A bordázott vasbeton panelek különösen alkalmasak kör keresztmetszetű silók építésénél, ahol a stabilitást és az összeszerelés egyszerűségét vasrudak és vasbeton oszlopok biztosítják. Egy ilyen panel súlya akár 500 kg is lehet, ami könnyebb kezelhetőséget biztosít az óriás elemekhez viszonyítva.
- Óriás elemek vagy nehézsúlyú elemek: Az előregyártott vasbeton pillérekhez hasonlóan itt is nehézsúlyú elemekről beszélhetünk, amelyek akár 2 tonna súlyúak is lehetnek. Az ilyen elemek között megtalálhatók a fal-elemek és a kazettás szerkezetek, melyek vasbetonból készülnek, gyakran bordás kivitelben. A pillérek és a falak közötti kapcsolatot speciális betonacél horgokkal biztosítják. A kör keresztmetszetű, gyűrűs elemek széles körben használtak a silóépítésben.

2.4. Silók leggyakoribb tönkremeneteli módjai

A vasbeton silók felújításának kérdése rendkívül aktuális probléma. Ezt többek között a növekvő gabonátárolási igények is alátámasztják, különösen Közép- és Kelet-Európa országaiban. Ugyanakkor sok, 30-50 éve épült siló rossz műszaki állapotban van a hosszú és intenzív üzemeltetés, a növekvő légszennyezettség, szélsőséges időjárási viszonyok és időnkénti túlterhelések miatt. [14]

2.4.1. Meghibásodások jellemző okai

Habár pontos statisztikai adatok nem állnak rendelkezésre, évente világszerte több száz ipari és mezőgazdasági siló, tartály és garat szenved kisebb-nagyobb meghibásodásokat. [11] Néhány esetben teljes szerkezeti összeomlás következik be, máskor kisebb repedések jelennek meg a betonfalakon vagy horpadások a fémszerkezeteken. Bár ezek a jelek elsőre ártalmatlannak tűnhetnek, általában komolyabb problémákra figyelmeztetnek, és javítási beavatkozást igényelnek.

2.4.2. Tervezési hibákból adódó meghibásodások

A silók tervezése nagy szakértelmet és megfontolt mérnöki tervezést igényel, mivel a tárolt anyagok tulajdonságai és a különböző terhelési helyzetek jelentős hatással vannak a silók szerkezetére. A tervezési hibák számos meghibásodási formát eredményezhetnek, amelyek közül sok a terhelések, az anyagáramlás vagy a szerkezeti elemek nem megfelelő figyelembevételéből adódik.

- Nem megfelelő anyagáramlás figyelembevétele: A silók tervezése során fontos szempont az anyagáramlás jellemzőinek megértése és figyelembevétele. Az anyagáramlás iránya, a nyomáeloszlás, valamint az anyag viselkedésének különböző hatásai mind hatással vannak a siló terhelésére.
- Aszimmetrikus terhelések figyelmen kívül hagyása: A siló falára ható terhek nem mindig egyenletesen oszlanak el, különösen, ha a kiürítési pont nem a siló középső tengelyén van. Külpontosság esetén az áramlási csatorna a siló falának csak egy részén fejthet ki nyomást, ami aszimmetrikus terhelést okoz.
- Belső szerkezeti elemek hatásának alábecsülése: A belső szerkezeti elemek, mint például a tartógerendák és egyéb merevítő elemek szintén jelentős hatással lehetnek a siló falán belüli nyomáeloszlásra.
- Rezgések és dinamikai terhelések figyelmen kívül hagyása: A vibráció és a dinamikus terhelések figyelmen kívül hagyása a silókban egy másik gyakori tervezési hiba. A silók gyakran okoznak öngerjesztett rezgéseket nagy frekvenciás, kis amplitúdójú ismétlődő rezgések vagy kis frekvenciás, nagy amplitúdójú rezgések formájában, amelyek hirtelen lökésekhez vezethetnek.
- Anyag tulajdonságainak pontatlan figyelembevétele: Az olyan anyagtulajdonságok, mint a szemcseméret, a nedvességtartalom és a hőmérséklet jelentős hatással vannak a siló terhelésére.

- Szabványok figyelmen kívül hagyása vagy helytelen értelmezése: Bár a tervezés során a mérnökök bizonyos mértékben alkalmazhatnak saját mérnöki megítélést, fontos, hogy betartsák a vonatkozó tervezési szabványokat. A siló terhelésére vonatkozó szabványok azonban nem mindig adnak egyértelmű útmutatást a különböző terhelési helyzetekre, így figyelmet kell fordítani a szabványok megfelelő értelmezésére.

2.4.3. Építési hibákból adódó meghibásodások

A silóépítés során elkövetett hibák ugyanolyan súlyos következményekkel járhatnak, mint a tervezési hibák. A siló szerkezete még megfelelő tervezés esetén is könnyen meggyengülhet vagy akár teljesen össze is omolhat, ha az építés nem az előírásoknak megfelelően történik, vagy ha rossz minőségű anyagokat használnak.

- Gyenge minőségű kivitelezés: A rossz minőségű kivitelezés az építési hibák egyik fő oka. Ha az építkezés során nem tartják be a tervezési előírásokat, az komoly szerkezeti problémákhoz vezethet.



7. ábra: Kivitelezésből származó hiányosságok oszlop és oszlopfő találkozásánál
(forrás: Dr. Bucur-Horváth Ildikó, Dr. Mátyás Gyöngyvér: Vasbeton silók jellegzetes károsodása és megerősítése I.)

- Nem megfelelő alapozás és egyenlőtlen süllyedés: Az alapozás hibái az egyik legsúlyosabb tönkremenetelt jelenthetik egy siló szerkezetében. Bár az alapozás tervezése hasonló más ipari építmények alapozásához, a silók esetében külön figyelmet kell fordítani a terheléeloszlás egyenletességére. A süllyedés hatásai szintén veszélyesek lehetnek, mivel a siló tömege és a tárolt anyag súlya a szerkezet súlypontját jelentősen megemeli, így bármilyen egyenlőtlen süllyedés nagy erőhatást okozhat a silófalakon.

- **Anyagválasztás hibái:** Az építési hibák közé tartozik a nem megfelelő anyagok használata is. Például a beton vagy acél minősége nagy fontosságú a szerkezet tartóssága szempontjából. Ha a kivitelezés során gyengébb minőségű vagy nem megfelelő anyagokat használnak, az a siló élettartamát jelentősen lerövidítheti.
- **Változtatások építkezés közben:** Az építési hibák másik oka a tervezési előírásoktól való eltérés. A kivitelezők gyakran változtatnak az eredeti terveken a tervező mérnökkel való egyeztetés nélkül a munka felgyorsítása vagy a költségek csökkentése érdekében.

2.4.4. Nem megfelelő használatból adódó meghibásodások

A silók élettartama és szerkezeti integritása is csökkenhet a nem megfelelő használat miatt. A silókat úgy tervezték, hogy bizonyos anyagokat meghatározott körülmények között tároljanak, ellenkező esetben a szerkezet súlyosan károsodhat. A nem megfelelő használat olyan belső terhelési körülményekhez vezethet, amelyekre a silót nem tervezték.

- **Nem megfelelő anyag tárolása:** A silókat mindig úgy tervezik, hogy megfeleljenek a tárolt anyag jellemzőinek. Ha a tervezéstől eltérő anyagokat tárolnak a silókban, az komoly problémákat okozhat. Az anyagtulajdonságok megváltozása, például a megnövekedett nedvességtartalom, megváltoztathatja az anyag konszolidációs nyomását is, és túlzott sugárirányú nyomást gyakorolhat a siló falára.
- **Kiürítési geometria módosítása:** A tárolt anyag áramlásának szabályozásához fontos a siló kiömlő nyílásának helyzete. A siló eredeti kialakításában a kiürítési geometria megváltoztatása, például egy középső kiürítésű silóhoz egy oldalsó kiürítő nyílás hozzáadása jelentősen megváltoztathatja a siló belső terhelési körülményeit. A tárolt anyag nyomása és áramlási mintázata jelentősen megváltozhat, ami új feszültségcsomópontokat és alakváltozást hozhat létre a siló falában.
- **Dinamikus terhelések és rezgések:** A siló használata során a tárolt anyagok áramlása miatt dinamikus terhelések léphetnek fel. Amikor a dinamikus terhelések a tárolt anyag beomlása miatt lépnek fel, a siló szerkezetet hirtelen nagy terhelés éri. Az ilyen dinamikus terhelések a siló falait olyan túlzott igénybevételnek tehetik ki, amelyre a silót eredetileg nem tervezték. Ilyen meghibásodások gyakran fordulnak elő olyan rendszereknél, ahol a silót külső rezgőkkel próbálják tehermentesíteni. Ezek a rezgések hosszú távú fáradást okozhatnak, ami a siló tönkremeneteléhez vezethet.

- **Karbantartás hiánya:** Rendszeres karbantartás nélkül a silók élettartama jelentősen lerövidülhet. Idővel a kopás, a korrózió és más szerkezeti romlás folyamatos ellenőrzést és javítást igényel. A nem megfelelő karbantartás a siló falának elvékonyodásához vezethet, ami növeli a repedések és a szerkezeti károsodás kockázatát.

2.4.5. Különleges szempontok hőmérséklet és nedvesség tekintetében

A silók szerkezeti integritását nem csak a tárolandó anyagok tulajdonságai befolyásolják, hanem a környezeti tényezők, például a hőmérséklet és a páratartalom is. Ezeket a külső hatásokat figyelembe kell venni a silók tervezésekor, különösen akkor, ha a silót kültérre építik.

- **Hőmérséklet-ingadozások hatásai:** A kültéri silók hőmérséklet ingadozásoknak vannak kitéve, ami jelentős hatással lehet a szerkezetükre. Különösen veszélyes ez a jelenség akkor, ha a siló belsejében tárolt anyag nem folyik vagy nem mozog, például ha az anyag statikus helyzetben van hosszabb ideig. Amikor a siló falai kitágulnak, az anyag "leülepszik", de amikor a falak összemennek, az anyagot nem tudják újra felemelni. Ez azt eredményezi, hogy az anyag a falak összehúzódását akadályozza, így növekvő feszültségek alakulnak ki a siló falában, ami végül repedésekhez és deformációkhoz vezethet.
- **Nedvesség és páratartalom hatásai:** A tárolt anyagok nedvességtartalma befolyásolja azok áramlási tulajdonságait, súlyát és a siló falaira gyakorolt nyomást. Ezt különösen akkor kell figyelembe venni, ha a silóban tárolt anyagok nedvszívók, például gabona, cement vagy más porózus anyagok.
- **A hőmérséklet és nedvesség közötti interakció:** A hőmérséklet ingadozás és a páratartalom kölcsönhatása súlyosbíthatja a szerkezeti problémákat. A hőmérséklet ingadozás például a siló falának ismételt tágulásához és összehúzódásához vezethet, míg a nedvesség az anyag tágulását okozhatja.

2.4.6. Dinamikus terhelések, rezgések és robbanások

A silók szerkezetére nem csak a statikus terhelések, mint a tárolt anyag súlya és a nyomás, hanem a dinamikus terhelések, rezgések és robbanások is nagy hatással lehetnek. Ezek hirtelen, intenzív terheléseket idézhetnek elő, amelyek a silót jelentősen veszélyeztethetik. A dinamikus terhelések közé tartoznak az anyagáramlás hirtelen változásai, a siló falainak rezgései, valamint az esetleges robbanások.

- Dinamikus terhelések a tárolt anyag összeomlásából: A dinamikus terhelések egyik leggyakoribb forrása a silókban tárolt anyag hirtelen összeomlása, például amikor egy boltozat alakul ki az anyagban, majd ez az ív hirtelen összeomlik. Ezek az anyagtorlódások idővel óriási mennyiségű anyagot tartanak vissza, amelynek összeomlása esetén a siló falai hirtelen nagy nyomásnak és terhelésnek vannak kitéve.
- Rezgések hatása: A silók dinamikus terhelései közé tartoznak a különböző rezgési jelenségek is, amelyek külső vagy belső forrásokból eredhetnek. A rezgések kétféle formában jelentkezhetnek: nagyfrekvenciás, alacsony amplitúdójú rezgések vagy alacsony frekvenciájú, nagy amplitúdójú ingadozások. A silók esetében a rezgések forrása gyakran a silókhoz csatlakoztatott külső vibrátorok vagy vibráló adagoló rendszerek.
- Hirtelen nyomásnövekedés és robbanások: A robbanások jelentik a legszükségesebb dinamikus terhelést a silókra. A robbanásokat általában a silókban tárolt finomszemcsés anyagok, például por és gabonamaradékok felhalmozódása okozza. Ezek az anyagok elérnek egy bizonyos telítési pontot, és robbanást okozhatnak, ha gyújtószikrával érintkeznek. Egy másik veszélyforrás a gázrobbanás, amely akkor következik be, amikor a tárolóból gáz szabadul fel, amely egy zárt térben felhalmozódhat, és robbanást okozhat.

2.4.7. Karbantartási hibákból adódó meghibásodások

A silók hosszú távú biztonságos működéséhez elengedhetetlen a rendszeres és szakszerű karbantartás. A silók karbantartásának elhanyagolása vagy nem megfelelő végrehajtása az egyik leggyakoribb oka a silók tönkremenetelének.

- A belső felület és a falak karbantartásának elhanyagolása: A silók belső felülete, amely segíti az anyag áramlását és védi a szerkezetet, különösen nagy figyelmet igényel. A bélés kopása vagy elhasználódása miatt a siló falai közvetlenül érintkezhetnek a tárolt anyaggal, ami jelentős szerkezeti problémákat okozhat.
- Korrózió elleni védelem elhanyagolása: A korrózió az egyik legnagyobb veszélyforrás a silók szerkezeti elemeinél. A korrózió fokozatosan elvékonyítja a siló falait, gyengítve a szerkezetet, ami hosszú távon jelentős károkat okoz. A korrózió különösen gyakori olyan környezetekben, ahol a siló magas páratartalomnak vagy nedvességnek van kitéve, illetve ahol az anyag maga is nedvességet tartalmaz.

- Szerkezeti károsodások figyelmen kívül hagyása: A silók szerkezeti integritása folyamatosan változik, különösen, ha nagy mennyiségű anyagot tárolnak bennük, vagy ha gyakran töltik újra és ürítik őket. A szerkezeti károk figyelmen kívül hagyása különösen veszélyes, ha a siló falain repedések vagy faldeformációk alakulnak ki, melyek előrejelzői lehetnek egy súlyosabb meghibásodásnak.



8. ábra: Betontakarás leválása (szerző fényképe, készítés ideje: 2024.06.12.)

- Üzemeltetési rendszerek karbantartásának elmulasztása: A siló mechanikus rendszerei, például a szintérzékelők, az adagolók, a kiürítő rendszerek és az ajtók szintén rendszeres karbantartást igényelnek. A siló mechanikai rendszereinek rendszeres ellenőrzése és karbantartása továbbá csökkenti a dinamikus igénybevételek, például a hirtelen anyag beomlások kockázatát is.

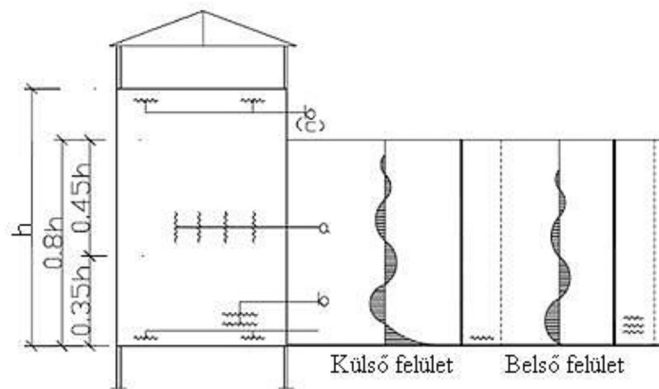
2.4.8. Jellegzetes károsodások

A silók és silócsoportok működése közben számos hiba és károsodás előfordulhat. Ezek a problémák kiterjedhetnek a cellára, valamint érinthetik a feltöltő rendszert is. Továbbá, a silók alátámasztó szerkezetében és az alapozásban is jelentkezhetnek meghibásodások. [14]

2.4.9. Silócella károsodásai

- Teljes cellafalat érintő lényeges károsodások: A silócella falának legsúlyosabb károsodását a függőleges repedések jelentik, amelyek a tárolt anyag vízszintes nyomása miatt alakulnak ki. Ezek a repedések leggyakrabban a cellafal alsó harmadában, illetve a

cellamagasság 35-85%-ánál fordulnak elő. A repedések gyakran áthaladnak a teljes falvastagságon, és használati szempontból általában 0,2 mm szélesek. A cella bizonyos részein előforduló szélesebb, függőleges repedések jellemzően arra utalnak, hogy a tervezés, a kivitelezés vagy az üzemeltetés során valamilyen hiányosság lépett fel.



9. ábra: A cellafal jellegzetes repedései (forrás: Dr. Bucur-Horváth Ildikó, Dr. Mátyás Gyöngyvér: Vasbeton silók jellegzetes károsodása és megerősítése I.)

A hengeres kialakítású silófalon gyakran vízszintes repedések alakulnak ki, főként a felső és az alsó födém közelében (9. ábra). Ezek a repedések jellemzően a falat képező héjszerkezet és a hozzá csatlakozó födém találkozási pontján fellépő forgatónyomatékok következményei, amelyek akkor fordulnak elő, ha a függőleges vasalás nem megfelelő mértékben van kialakítva.

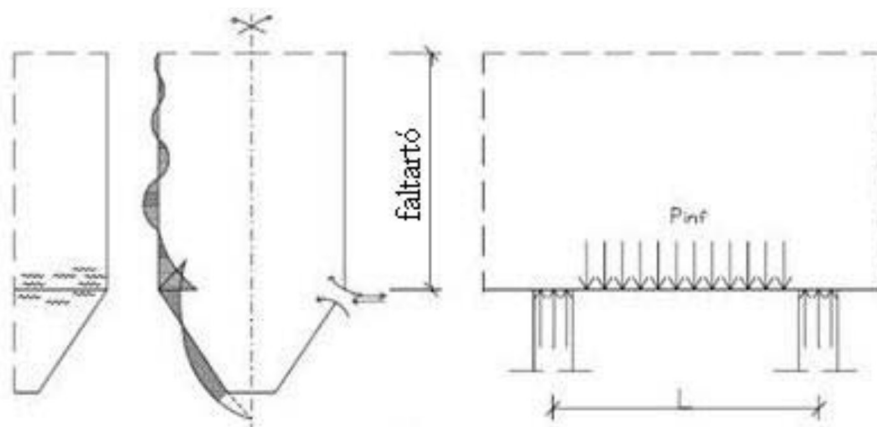
- A cellafal belső felületének károsodása és kopása: A cellafalak belső felületének rongálódásai és kopásai kifejezetten a belső falfelületet érintik. Amikor szemcsés anyagokat (például gabonát) tárolnak a silóban, a betonfal és a tárolt anyag közötti súrlódás fokozatosan károsítja a fal belső felületét. Ez egyrészt megváltoztatja a falsúrlódási szöget és ezáltal befolyásolja a silóban keletkező nyomáseloszlást. Másrészt a súrlódás következtében a betontakarást is csökkentheti, ami korróziós hatásoknak teszi ki az acélbetéteket. Idővel ezek a problémák közvetetten a siló teherbíró képességét is alááshatják, ami hosszú távú működési gondokat okozhat.
- A cellafal külső felületének károsodása: Ez a jelenség a külső környezeti tényezők, például az éghajlati viszonyok és a légszennyezés hatására alakul ki a siló külső falain. Az idővel kialakuló korrózió a betonréteg fokozatos leválásához és az acélbetétek rozsdásodásához vezethet. Ennek megelőzése érdekében a silók külső felületeit általában védőbevonattal látják el, amely hosszabb távon biztosítja a szerkezet védelmét.



10. ábra: betontakarás leválása (szerző fényképe, készítés ideje: 2024.06.13.)

2.4.10. A silócella fenéklemezének és vasbeton tölcserének a meghibásodásai

A cellafal szerkezete gyakran szenved el vízszintes repedéseket, különösen a cellafal és a fenéklemez találkozásánál, vagy a kúphej csatlakozási zónájában. Ez a jelenség általában a fellépő, a membránállapotot túllépő hajlító nyomatékokból ered. Emellett a cella támaszközökben függőleges repedések is előfordulhatnak, mivel a fal és a kúphej teherbíróként viselkedik, ami szerkezeti feszültségeket generál.



11. ábra: A vasbeton tölcser jellegzetes repedése (forrás: Dr. Bucur-Horváth Ildikó, Dr. Mátyás Gyöngyvér: Vasbeton silók jellegzetes károsodása és megerősítése I.)

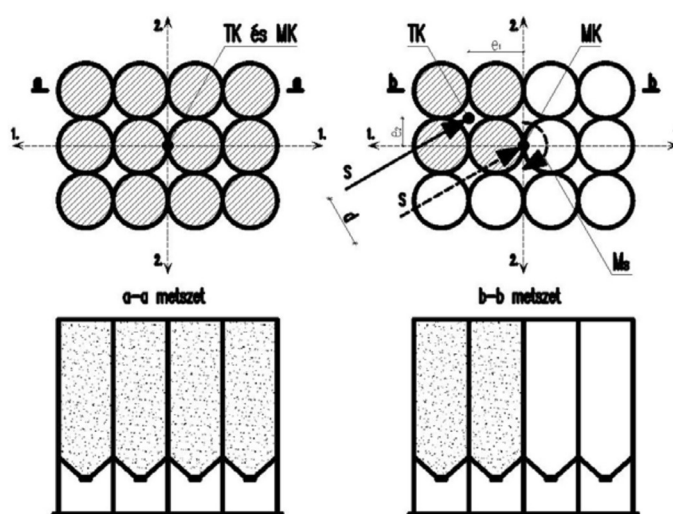
Ugyanígy a korróziós problémák is megjelenhetnek ezen felületeken, hasonlóan a cellafalhoz.

2.4.11. A siló alátámasztási szerkezetének a károsodásai

A silók és silótömbök alátámasztási szerkezete, amely a cella vagy cellák pereme alatt helyezkedik el, oszlopokból és vasbeton falrészekből áll. Ezek a részek sokkal kevésbé

merevek, mint maga a cella vagy cellák szerkezete. Emiatt az alátámasztási rendszer különösen érzékeny a vízszintes erőhatásokra, mint például szél vagy földrengés esetén.

Az alátámasztó szerkezetre a legveszélyesebb hatást a szeizmikus terhelés gyakorolja. Egy földrengés során erőteljes dinamikus erők lépnek fel, amelyek az egész silótömböt vagy egyes silókat mozgásba hozhatják. Továbbá, silótömbök esetén figyelembe kell venni a nem szimmetrikus terheléseket is, amelyek akkor fordulhatnak elő, ha a silók nem egyenletesen vannak feltöltve. Ez a nem egyenletes töltési állapot vízszintes irányú csavaró hatást eredményezhet a szerkezetben, különösen az alátámasztó szerkezet függőleges elemeinél, amelyek így további vízszintes terhelésnek lesznek kitéve.



12. ábra: A silótömb szimmetrikus és asszimmetrikus terhelése (forrás: Dr. Bucur-Horváth I., Dr. Mátyás Gy.: Vasbeton silók jellegzetes károsodása és megerősítése I.) ahol:

TK – tömegközpon

MK – merevségi (nyírási) központ

S – szeizmikus terhelés

$M_s = S \times d$ – az asszimmetrikus terhelésből eredő általános csavaró nyomaték

A siló vagy silótömb szerkezeti tartóoszlopai különösen ki vannak téve a károsodásnak szeizmikus terhelések, például földrengések esetén. Az ilyen típusú terhelések gyakran nyírási erőket és repedéseket idéznek elő az oszlopokban. A tartóoszlopok különösen sérülékenyek abban az esetben, ha a kivitelezés során nem tartották be a megfelelő szerkezeti szabványokat. Ilyen szabványok például a duktilis (energia elnyelő) elemek alkalmazása, amelyek kritikusak a szeizmikus ellenálló képesség szempontjából. A tervezés során különös figyelmet kell fordítani a tartóoszlopok megfelelő hosszanti vasalására és a keresztirányú megerősítésre.

3. MEGBÍZHATÓSÁG ÉS PARCIÁLIS TÉNYEZŐK A *FIB* BULLETIN 80 ALAPJÁN

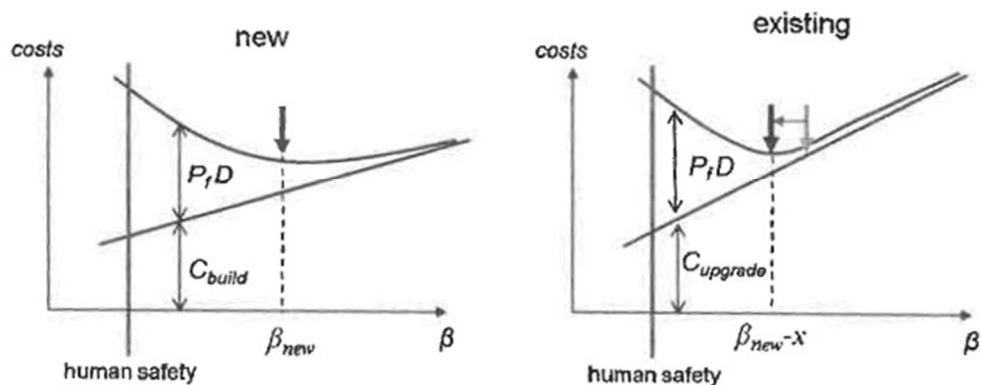
A jelenlegi gyakorlatban a meglévő beton szerkezetek értékelése alapos átgondolást igényel a kockázat és a megbízhatóság szempontjából. Jelenleg a meglévő szerkezeteket jellemzően egyszerűsített eljárásokkal ellenőrzik, amelyeket általában az új szerkezetek tervezésénél is alkalmaznak. Az ilyen értékelések gyakran konzervatívak, és költséges felújításokhoz vezethetnek. A meglévő szerkezetek tényleges teljesítményének reálisabb ellenőrzését valószínűségi módszerekkel lehet elérni, amelyek a terhelési és ellenállási változók bizonytalanságait megfelelő valószínűségi modellekkel írják le. [15]

Noha a meglévő beton szerkezetek megbízhatóság-alapú értékelése az elmúlt évtizedekben széles körű figyelmet kapott a kutatási területen, egy következetes, megbízhatóság-alapú értékelési keretrendszer és egy gyakorlati, a Eurocode-okkal kompatibilis, a mindennapi szerkezetmérnöki problémákra alkalmazható megközelítés jelenleg még hiányzik.

A meglévő szerkezetek megbízhatósági értékelése számos szempontból különbözik az új szerkezetekétől, beleértve:

- A megnövekedett célzott megbízhatósági szintek általában nagyobb költségnövekedést eredményeznek a meglévő szerkezetek esetében, mint az új szerkezeteknél.
- A meglévő szerkezetek hátralévő élettartama gyakran rövidebb, mint az új szerkezetekre feltételezett 50-100 éves tervezési élettartam.
- Részletes információk szükségesek a szerkezet aktuális állapotáról a meglévő szerkezetek értékeléséhez (ellenőrzési jelentések, tesztek, mérések).

A meglévő szerkezetek célzott megbízhatósági szintje csökken az új szerkezetekhez képest, mivel nehezebb növelni a meglévő szerkezetek megbízhatósági szintjét (13. ábra). Az új építmények építési költsége kevésbé fog növekedni a biztonsági szint növekedésével, mint a meglévő szerkezetek korszerűsítésének költsége.



13. ábra: Az új szerkezetek tervezésének és a meglévő szerkezetek korszerűsítésének költségoptimalizálása közötti különbség (forrás: fib Bulletin 80: Partial factor methods for existing concrete structures)

Az ISO 13822:2010 szerint alacsonyabb célzott megbízhatósági szintek alkalmazhatók meglévő szerkezetek esetében, ha ez indokolt társadalmi, kulturális, gazdasági és fenntarthatósági szempontok alapján. Az üzemi élettartam költségének minimalizálása a cél, figyelembe véve a meghibásodás következményei és a biztonsági intézkedések költségei közötti egyensúlyt.

3.1. Tervezési értékek és parciális biztonsági tényezők

Az F hatás tervezési értéke, F_d , az alábbiak szerint fejezhető ki:

$$F_d = \gamma_f F_{rep}$$

ahol:

F_{rep} : erő karakterisztikus értéke

γ_f : biztonsági tényező

Az E terhelési hatás tervezési értéke, E_d , általánosan az alábbiak szerint fejezhető ki:

$$E_d = \gamma_{sd} E(\gamma_f F_{rep}; a_d)$$

ahol:

a_d = geometriai méretek tervezési értéke

γ_{sd} = modell bizonytalanságok parciális tényezője

Az X_d anyagi vagy termék tulajdonság tervezési értéke a következőképpen számítható:

$$X_d = \eta X_k / \gamma_m$$

ahol:

η = átváltási tényező

γ_m = biztonsági tényező

X_k = anyagi tulajdonságok

Az ellenállás tervezési értéke R_d :

$$R_d = R\left(\frac{\eta X_k}{\gamma_M}; a_d\right)$$

Az első rendű megbízhatósági módszer (First Order Reliability Method - FORM) egyszerű és hatékony módszer a szerkezeti megbízhatóság értékelésére, amely a szerkezet meghibásodási valószínűségét határállapot esetén vizsgálja.

A meghibásodási valószínűséget, P_f az alábbiak szerint definiálják:

$$P_f = P(g \leq 0)$$

A meghibásodási valószínűséget helyettesíthetjük a megbízhatósági indexszel (β), amelyet az alábbiak szerint definiálunk:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

ahol Φ^{-1} a normál eloszlás inverz szabványosított függvénye. A meghibásodási valószínűség és a megbízhatósági index közötti kapcsolat a következő táblázatban látható.

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,3	2,3	3,1	3,7	4,2	4,7	5,2

3. táblázat: A meghibásodási valószínűség és a megbízhatósági index közötti kapcsolat (forrás: *fib Bulletin 80: Partial factor methods for existing concrete structures*)

Tegyük fel, hogy a határállapot függvény (g) az ellenállás (R) és a terhelési hatás (E) függvénye:

$$g = R - E$$

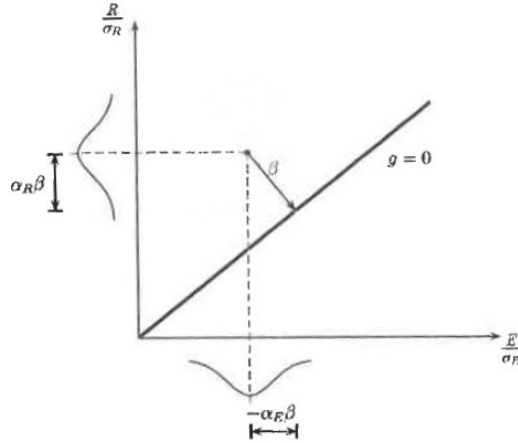
A FORM-alapú tervezési pont koordinátái, azaz (R_d , E_d) az alábbiak szerint határozhatók meg:

$$R_d = F_R^{-1}[\Phi^{-1}(-\alpha_R \beta)]$$

$$E_d = F_E^{-1}[\Phi^{-1}(-\alpha_E \beta)]$$

Ahol α_R és α_E az ellenállás és a terhelési hatás érzékenységi tényezői, és β a megbízhatósági index.

Ha R és E független normál eloszlású véletlen változók, akkor a tervezési pontot a határállapot felületének azon pontjaként definiáljuk, amely a legközelebb van az átlagponthoz a normál eloszlású R és E változók terében.



14. ábra: FORM-alapú tervezési pont (forrás: fib Bulletin 80: Partial factor methods for existing concrete structures)

A gyakorlati tervezési szabályok levezetése érdekében egy széles körű új szerkezethez az α_R és α_E értékeket az alábbiak szerint határozták meg [16]:

$$\alpha_R = 0,8$$

$$\alpha_E = -0,7$$

Az ellenállás oldalon a legfontosabb változó általában az anyag szilárdsága, amely normál vagy lognormál eloszlással írható le. Ebben az esetben a megfelelő biztonsági tényező (γ_m) kifejezései a következők:

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X_d} = \frac{\mu_x(1 - 1,645V_x)}{\mu_x(1 - \alpha_R\beta V_x)}$$

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X_d} = \frac{\mu_x \exp(-1,645V_x)}{\mu_x \exp(-\alpha_R\beta V_x)}$$

ahol V_x az anyagtulajdonság variációs együtthatója.

Az állandó terhek G esetében a parciális tényező meghatározható az eloszlásából is. Feltételezve egy Gauss-eloszlást (pl. önsúly), ha a teher kedvezőtlen hatást fejt ki, a parciális tényezőt a következőképpen adjuk meg:

$$\gamma_g = \frac{G_d}{G_k} = \frac{\mu_G(1 - \alpha_E\beta V_G)}{\mu_G(1 + kV_G)}$$

Ahol V_G a teher variációs együtthatója állandó terhek esetén.

Amikor a modell bizonytalanságokat is figyelembe vesszük, a határállapot függvény az alábbiakra módosul

$$g = \theta_R R - \theta_E E$$

ahol θ_R az ellenállási modellhez kapcsolódó bizonytalanságokat írja le, míg θ_E a terhelési hatás modellhez kapcsolódó bizonytalanságokat veszi figyelembe.

Ha a modell bizonytalanságai normál eloszlásúak, a biztonsági tényezők γ_{Rd} és γ_{Ed} az alábbiak szerint definiálhatók:

$$\gamma_{Rd} = \frac{\mu_{\theta R}}{\theta_{Rd}} = \frac{1}{1 - \alpha_R \beta V_{\theta R}} = \frac{1}{1 - 0,4 \times 0,8 \times \beta V_{\theta R}}$$

$$\gamma_{Ed} = \frac{\theta_{Ed}}{\mu_{\theta E}} = 1 - \alpha_E \beta V_{\theta E} = 1 + 0,4 \times 0,7 \beta V_{\theta E}$$

3.2. Módosított biztonsági tényezők anyagtulajdonságokra

Egy egyszerűsített megközelítésben a meglévő szerkezetekben lévő anyagtulajdonságokra vonatkozó parciális tényezők a következő egyenlet szerint határozhatók meg:

$$\gamma_x = \omega_\gamma \gamma_{x,new}$$

ahol:

ω_γ = módosító tényező

$\gamma_{x,new}$ = az új szerkezetekre vonatkozó biztonsági tényező

A modellbizonytalanság a következő egyenlet szerint számítható ki:

$$\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd1} \times \gamma_{Rd2}$$

ahol:

$$\gamma_{Rd1} = \frac{1}{1 - 0,32 \times \beta V_{\theta,R1}}$$

$$\gamma_{Rd2} = \frac{1}{1 - 0,32 \times \beta V_{\theta,R2}}$$

Általános esetekben, $\gamma_{Rd1} = 1,10$ feltételezhető a beton szilárdságára, és $\gamma_{Rd1} = 1,025$ a betonacélra. Továbbá, $\gamma_{Rd2} = 1,10$ feltételezhető betonra, és $\gamma_{Rd2} = 1,05$ az acél vasalásra, hogy figyelembe vegyék a geometriai bizonytalanságokat a beton keresztmetszeti méretéhez vagy a vasalás helyzetéhez kapcsolódóan. Amikor a meglévő szerkezeten végzett releváns mérések jelentéktelen geometriai tulajdonság-változékonyságot mutatnak, $\gamma_{Rd2} = 1,0$ alkalmazható.

Mivel jelen szerkezetünkben az elvégzett mérések során kiderült, hogy elhanyagolhatóak a geometriai eltérések, számításaim során 1,0 értékkel fogok számolni.

A levezetett képletek figyelembevételével az anyagtulajdonságokhoz kapcsolódó parciális biztonsági tényező kiszámítható a következők alapján:

$$\gamma_m = \gamma_{Rd} \frac{1 - 1,645V_x}{1 - \alpha_R \beta V_x}$$

$$\gamma_m = \gamma_{Rd} \frac{\exp(\mu_{\ln x} - 1,645V_x)}{\exp(\mu_{\ln x} - \alpha_R \beta V_x)} = \gamma_{Rd} \exp(\alpha_R \beta V_x - 1,645V_x)$$

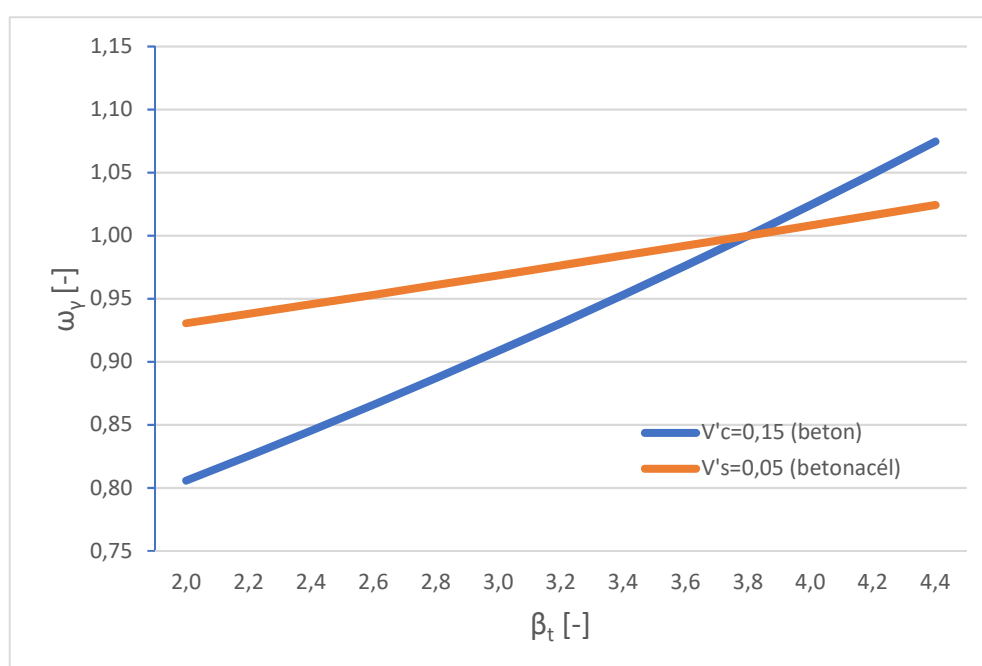
Az egyenletek alapján a ω_γ módosító tényező kiszámítható a következőképpen:

$$\omega_\gamma = \frac{\gamma_{Rd}(\beta'')}{\gamma_{Rd}(\beta')} \exp(\alpha_R(\beta'' V_x'' - \beta' V_x') - 1,645(V_x'' - V_x'))$$

amit felírhatunk a következőképpen is:

$$\omega_\gamma = \frac{\gamma_{Rd}(\beta'')}{\gamma_{Rd}(\beta')} \exp\left(\alpha_R \beta' V_x' \left(\frac{\beta'' V_x''}{\beta' V_x'} - 1\right) - 1,645 V_x' \left(\frac{V_x''}{V_x'} - 1\right)\right)$$

A képletekben ' -el jelölve az új szerkezetekre, míg '' -el jelölve a meglévő szerkezetekre vonatkozó tényezők.



15. ábra: A megbízhatósági index β_t hatása meglévő szerkezeteknél a korrekciós tényezőre ω_γ ($\alpha_R=0,8$, $\beta'=3,8$, $V_x''/V_x'=1$)

A pályamunkámban bemutatott siló anyagtulajdonságaira vonatkozó biztonsági tényező számításokat a 6. melléklet tartalmazza.

3.3. Biztonsági tényezők állandó terhekre

A biztonsági tényezők az állandó terhelésekre meglévő szerkezetek esetében hasonlóan határozhatók meg az anyagi tulajdonságokra vonatkozó egyenlet alapján.

$$\gamma_G = \omega_\gamma \gamma_{G.new}$$

ahol

ω_γ =korrekciós tényező

$\gamma_{G,new}$ =az új szerkezetekre vonatkozó állandó terhelések biztonsági tényezője

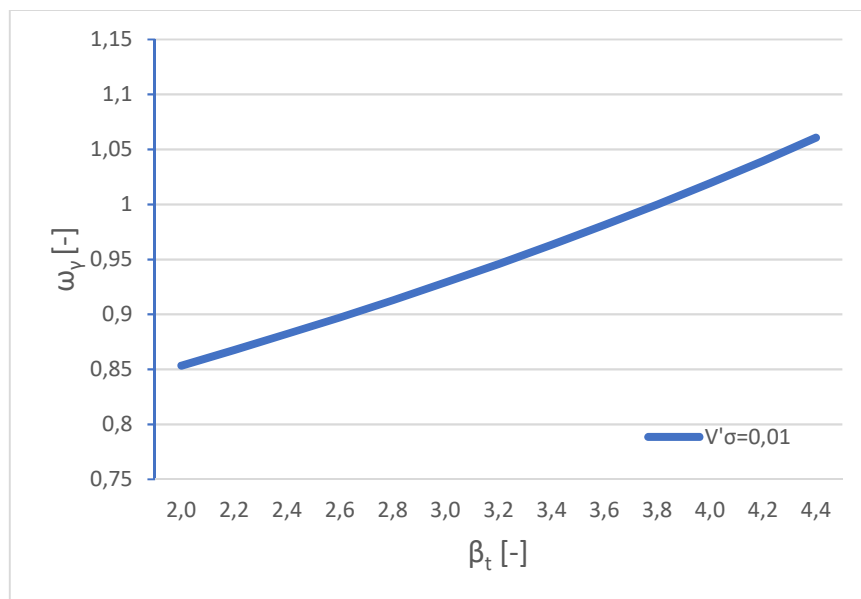
Általános esetekben $\gamma_{Ed,G} = 1 - \alpha_E \beta$ $V_{e,G} = 1 + 0,28 \beta$ $0,065 = 1 + 0,018 \beta$ feltételezhető az állandó terhelésekre. A feltételezett $V_{e,G}=0.065$ variációs együttható összhangban van a gyakran feltételezett értékekkel.

A levezetett egyenletek alapján az állandó terhelések biztonsági tényezője kiszámítható:

$$\gamma_G = \gamma_{Ed,G}(1 - \alpha_E \beta V_G)$$

Mindebből kifejezhető:

$$\omega_\gamma = \frac{\gamma_{Ed,G}(\beta'')}{\gamma_{Ed,G}(\beta')} \frac{1 - \alpha_E \beta'' V_G''}{1 - \alpha_E \beta' V_G'}$$



16. ábra: A megbízhatósági index β_t hatása a meglévő szerkezetekre vonatkozó ω_γ korrekciós tényezőre ($\alpha_E=-0.7$, $\beta=3.8$, $V_G''/V_G'=1$)

A pályamunkámban bemutatott siló állandó terheinek vizsgálatához alkalmazott biztonsági tényezők számításait a 7. melléklet tartalmazza.

3.4. Biztonsági tényezők hasznos terhekre

A hasznos terhek esetében (referencia időszak $t_{ref}=50$ év), a biztonsági tényező az alábbi módon számítható:

$$\gamma_{Q,imp} = \frac{u_{Q,50} - \frac{1}{\alpha_{Q,50}} \ln(-\ln(\phi(-\alpha\beta)))}{u_{Q,50} - \frac{1}{\alpha_{Q,50}} \ln(-\ln(0,95))}$$

$$\gamma_{Q,imp} = \frac{u_{Q,50} - 0,45\sigma_{Q,50} - 0,78\sigma_{Q,50} \ln(-\ln(\theta(-\alpha\beta)))}{u_{Q,50} - 0,45\sigma_{Q,50} - 0,78\sigma_{Q,50} \ln(-\ln(0,95))}$$

$$= \frac{1 - V_{Q,50} \{0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\phi(-\alpha\beta)))\}}{1 - V_{Q,50} \{0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,95))\}}$$

Ez újraírható egy 5 éves alap referencia periódusra az alábbi módon:

$$\gamma_{Q,imp} = \frac{\mu_{Q,5} + 0,78\sigma_{Q,5} \ln\left(\frac{t_{ref}}{5}\right) - 0,45\sigma_{Q,5} - 0,78\sigma_{Q,5} \ln(-\ln(\phi(-\alpha\beta)))}{\mu_{Q,5} + 0,78\sigma_{Q,5} \ln\left(\frac{t_{ref}}{5}\right) - 0,45\sigma_{Q,5} - 0,78\sigma_{Q,5} \ln(-\ln(0,95))}$$

$$= \frac{1 + V_{Q,5} \left\{0,78 \ln\left(\frac{t_{ref}}{5}\right) - 0,45 - 0,78 \ln(-\ln(\phi(-\alpha\beta)))\right\}}{1 + V_{Q,5} \left\{0,78 \ln\left(\frac{t_{ref}}{5}\right) - 0,45 - 0,78 \ln(-\ln(0,95))\right\}}$$

A meglévő szerkezetek változó terheire alkalmazott parciális tényezők (beleértve a modell bizonytalansági tényezőt) hasonlóképpen meghatározhatók a korábban meghatározott képlet alapján:

$$\gamma_Q = \omega_\gamma \gamma_{Q,new}$$

ahol

ω_γ = korrekciós tényező

$\gamma_{Q,new}$ =az új szerkezetek terheire alkalmazott parciális tényező

Az hasznos terhek biztonsági tényezőjét a részletezett egyenlet alapján lehet kiszámítani:

$$\gamma_Q = \gamma_{E,d,Q} \frac{1 - V_{imp,50} [0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\phi(-\alpha\beta)))]}{1 - V_{imp,50} [0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,95))]}$$

Hasonlóképpen a korábbiakhoz a hasznos terhek biztonsági tényezőjének meghatározásával kapcsolatos egyenlet alapján, a módosítási tényező kiszámítható:

$$\omega_\gamma = \frac{\gamma_{Ed,Q}(\beta'')}{\gamma_{Ed,Q}(\beta')} \frac{1 + V_{Qimp,5}'' [0,78 \ln\left(\frac{t_{ref}''}{5}\right) - 0,45 - 0,78 \ln(-\ln(\theta(-\alpha_E \beta'')))]}{1 + V_{Qimp,5}' [0,78 \ln\left(\frac{t_{ref}'}{5}\right) - 0,45 - 0,78 \ln(-\ln(\theta(-\alpha_E \beta')))]}$$

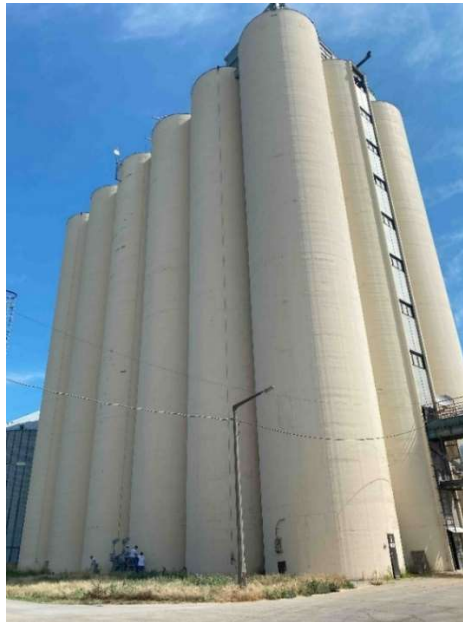
ahol:

$$V_{Qimp,5} = \frac{1}{\frac{1}{V_{Qimp,tref}} - 0,78 \ln\left(\frac{t_{ref}}{5}\right)}$$

A pályamunkámban bemutatott siló hasznos terheinek vizsgálatához alkalmazott biztonsági tényezők számításait a 8. melléklet tartalmazza.

4. VASBETON SILÓEGYÜTTES SZERKEZETI LEÍRÁSA ÉS DIAGNOSZTIKÁJA

Egy 3x6 cellás vasbeton silóegyüttes, amely az ÁTI Depo Zrt. mezőkovácsházi telephelyén (5800 Mezőkovácsháza, Móra Ferenc utca 20.) található, az elmúlt időszakban egyre több figyelmet igényelt a tartószerkezeti állapotromlás miatt. Korábbi karbantartási felülvizsgálatok már rávilágítottak arra, hogy a silók állapota jelentős mértékben romlott, azonban azóta átfogó, szerkezeti javítás nem történt. Bár a silók külső felületén korrózióvédelmi bevonatot alkalmaztak, ez a beavatkozás önmagában nem volt elegendő.



17. ábra: Perspektív nézet déli oldal (forrás: szerző fényképe, készítés ideje: 2024.06.12)

A silók üzemeltetője hosszú távú használatot tervez, ezért kulcsfontosságú, hogy a silók tartószerkezeti biztonsága, teherbíró képessége és tartóssága megfelelő szinten maradjon. A jelen pályamunka részeként átfogó diagnosztikai vizsgálatokat végeztünk a silók állapotának felmérésére.

4.1. A meglévő szerkezet leírása

A silókomplexum összesen 18 tárolócellából és 8 kárócellából áll. A tárolócellák mindegyike 7 méter átmérővel, 35 méter magassággal rendelkezik, és egyenként 1495 köbméternyi tárolókapacitást biztosít. A kárócellák, amelyek kisebbek, 286 köbméter

tárolókapacitással bírnak. A cellafalak vastagsága 20 cm. Az építési technológiát tekintve a silók csúszózsálas módszerrel készültek, amely gyors és hatékony építési folyamatot biztosított.

Az építmény tervezése és kivitelezése az 1970-es években történt, azonban pontos dátumokkal nem rendelkezünk, mivel az eredeti tervdokumentáció nem állt rendelkezésünkre. Az üzemeltető nem tudta biztosítani a silók építésének részletes terveit, ami megnehezítette az építési folyamat pontos nyomon követését és az eredeti szerkezeti megoldások felderítését.

A silók kiürítése központos ürítőnyílású vasbeton tölcseken keresztül történik, ami lehetővé teszi az egyenletes és hatékony anyagáramlást. A töltőfejek kialakítása olyan, hogy a töltési külpontosság minimálisnak tekinthető. A központosság abban az esetben valósul meg, ha a silónkénti 4 ürítőnyílást egyszerre üzemeltetik. Mivel a megbízó elmondása szerint a 4 ürítőnyílást minden esetben egyszerre üzemeltetik, külpontossággal nem számoltam.

A silócsoport diagnosztikai vizsgálata nemcsak az építmény állapotának felmérésére, hanem a hosszú távú használat biztonságának megőrzésére is irányul. A jelenlegi és jövőbeni teherbírásuk értékelése, valamint a szerkezeti integritásuk fenntartása szempontjából alapvető, hogy a vasbeton silók terheléseloszlását, károsodási folyamatait és tartósságát alaposan elemezzük.

4.2. Vasbeton silóegyüttes diagnosztikája

A vasbeton silók diagnosztikai vizsgálatának célja, hogy felmérje a szerkezet jelenlegi állapotát, beleértve annak szilárdsági és tartóssági jellemzőit, valamint korróziós állapotát.

Ezen fejezet jelentős részét az ORISOFT Mérnöki Építő és Tanácsadó Kft. által a mezőkovácsházi vasbeton silók statikai állapotáról készített anyagvizsgálati és tartószerkezeti szakvélemény alapján készítettem, melynek elkészítésében magam is részt vettem. A diagnosztikai vizsgálatokhoz szükséges minták vételezésénél közreműködtem, a vizsgálatok eredményeit a szakvéleményből emeltem át.

4.2.1. Szemrevételezés

A szemrevételezéses vizsgálat során olyan jellegzetes károsodásokat értékeltünk, amelyek negatívan befolyásolhatják a szerkezet teherbíró képességét, használhatóságát

és tartósságát, nem csupán esztétikai problémákat okozva. A vizsgálat célja továbbá az volt, hogy adatokat és szerkezeti jellemzőket gyűjtsünk, amelyek alapot adnak a felújítási vagy megerősítési technológiák kidolgozásához.

4.2.2. Szilárdsági vizsgálatok betonon

4.2.2.1. Roncsolásmentes szilárdsági vizsgálatok Schmidt kalapáccsal

A kijelölt silók hengeres palástjain végeztük el a vizsgálatot, összesen 6 mérési tartományban és 70 mérési ponton, a szerkezet egészére nézve reprezentatív mintaszámmal. Minden egyes mérési ponton 10-10 visszapattanási értéket rögzítettünk DigiSchmidt mérőeszköz használatával.



18. ábra: Roncsolásmentes szilárdsági vizsgálatok Schmidt kalapáccsal (forrás: szerző fényképe, készítés ideje: 2024.06.13)

A vizsgálatok dokumentációja és az eredmények értékelése az 1. mellékletben szerepel.

4.2.2.2. Roncsolásos szilárdsági vizsgálatok fűrt mintákon

A silók vasbeton falszerkezetének betonszilárdságát a roncsolásmentes vizsgálatok mellett roncsolásos módszerrel is megállapítottuk, Ø100 mm-es külső átmérőjű koronafúróval fűrt hengeres minták segítségével. A mintavételhez gyémántbetétes HILTI koronafúrót használtunk, folyamatos vízhűtés biztosításával. A fűrés során ügyeltünk arra, hogy a vasbeton falszerkezet acélhálóját ne károsítsuk, amit a fűrést megelőzően vaskereső műszerrel ellenőriztünk.



19. ábra: Betonminták vételezése fúrással (forrás: szerző fényképe, készítés ideje: 2024.06.12)

A kifúrt hengereket gyémánt vágókoronggal vágtuk méretre, majd a hengerek felfekvő és nyomó felületeit gyorsan kötő habarccsal párhuzamosítottuk. Az így előkészített hengeres próbatesteket hidraulikus törőgéppel nyomószilárdsági vizsgálatnak vetettük alá. Összesen 10 henger került szilárdsági tesztelésre. A szilárdsági eredmények kiértékelésekor figyelembe kellett venni, hogy a hengerek átmérője és az átmérő/magasság aránya eltérhet a szabványos értékektől ($D = 150 \text{ mm}$, $H/D = 2$). Ezért a szilárdsági értékek korrekciójához a szakirodalomban javasolt korrekciós tényezőket alkalmaztuk.

A vizsgálatok dokumentációja és az eredmények értékelése az 2. mellékletben szerepel.

4.2.2.3. Betonstruktúra vizsgálatok fúrt mintákon

A vizsgálatok összegzése alapján általánosan megállapítható, hogy a betonozáskor használt adalékanyag megfelelő szemeloszlású volt, és a beton kellően telített cementpép tartalommal rendelkezett. Ugyanakkor a betonban megfigyelt nagyszámú légzárvány arra utal, hogy bizonyos területeken, különösen a munkahézagok környékén, a helyszíni tömörítés nem volt kielégítő.



20. ábra: Légzárványok a szerkezetben (forrás: ORISOFT Mérnöki Építő és Tanácsadó Kft: A mezőkovácsházi vasbeton silók statikai állapotáról készített szakvélemény)

Ez a légzárványosodás különösen a 2. jelű, acélpántos megerősítést tartalmazó silóhenger betonjára volt jellemző, ahol alacsonyabb szilárdsági értékeket mértünk a fűrt mintákon a többi silóhengerhez képest.

4.2.2.4. Beton szilárdsági vizsgálatainak összegzése

A roncsolásmentes vizsgálatok alapján az egyes vizsgálati területeken a beton szilárdsági osztálya C16/20 és C30/37 között változott. A legnagyobb szilárdsági osztályt a 16. számú silócellánál, annak alsó külső felületén mértük (C30/37), míg a legalacsonyabbat a 2. és 15. cellák alsó külső felületén (C16/20). A mért értékek jelentős ingadozását részben a csúszózsarus technológia által okozott szórás, részben pedig az magyarázhatja, hogy egyes mérések a munkahézagok környékén történtek, ahol a beton lazább szerkezetű. A beton szilárdsági osztályának Schmidt kalapáccsal történő meghatározása során figyelembe kellett venni a karbonátosodás miatti módosító tényezőt, amelyet a visszapattanási értékekre alkalmaztunk. Ezt a tényezőt a roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatok összehasonlítása alapján határoztuk meg, és a silók betonja esetében javasolt értéke $\alpha=0,8$.

A roncsolásos vizsgálatok során valamivel magasabb nyomószilárdságokat mértünk, mint a roncsolásmentes vizsgálatoknál (az összehasonlítást a 2.-4. cellák alsó részein végeztük), és a beton megfelelt a C25/30 osztálynak. A kétféle vizsgálat eredményei ebben a szerkezeti szakaszban viszonylag jól egyeztek, mivel a roncsolásmentes értékek csak kis mértékben maradtak el a C25/30 osztálytól. Az egyedi roncsolásos és az ugyanazon mintavételi helyen elvégzett roncsolásmentes vizsgálatok eredményei azonban nem mutattak egyértelmű összefüggést. Ennek oka lehet, hogy a Schmidt kalapács csak a beton felületi rétegén méri a szilárdságot, így a mélyebb betonrétegek szerkezeti sajátosságai kevésbé befolyásolják az eredményeket, mint a fűrt minták töréskeresztjei.

4.2.3. Szilárdsági vizsgálatok betonacélon

A Poldi kalapácsos vizsgálat az acélok keménységének meghatározására szolgáló dinamikus módszer, amelyet a húzószilárdság mérésére használunk. Ezzel a vizsgálattal a keménységet határozzuk meg, amelyet táblázatok és képletek segítségével átszámítunk az acél húzószilárdságára.

A vizsgálat eredményeit a következő táblázat szemlélteti:

Jelölés	Benyomódás átmérője (etalon) [mm]	Benyomódás átmérője (betonacél) [mm]	Brinell keménység (HB) [kp/mm ²]	a	Szakítószilárdság [N/mm ²]
Po1	2,00	2,20	145	1,00	507
Po2	2,40	2,70	134	1,00	469
Po3	1,90	2,30	105	1,00	367

4. táblázat: Poldi kalapácsos vizsgálatok eredményei (forrás: ORISOFT Mérnöki Építő és Tanácsadó Kft: A mezőkovácsházi vasbeton silók statikai állapotáról készített Anyagvizsgálati és tartószerkezeti szakvélemény, 2024)

A vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy a három mérésből két alkalommal a meghatározott szakítószilárdság meghaladta a 450 N/mm² értéket, míg az utolsó mérés olyan alacsony eredményt mutatott, hogy az nem tekinthető értékelhetőnek. Az eredmények a táblázatból kiolvasott keménység értékeken alapulnak, amelyek a legtöbb esetben jelentősen alulbecsülik a vizsgált fém valós szilárdságát. A kapott HB értékek pontosítása az alábbi összefüggés alkalmazásával lehetséges.

$$HB_{Poldi} = \alpha \times HB_{etalon} \times \frac{D - \sqrt{D^2 - d_{etalon}^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_{betonacél}^2}}$$

Ebben az összefüggésben a HB_{etalon} az etalon rúd Brinell keménységét jelenti, amelyet 197 értéken vehetünk figyelembe, D a Poldi kalapács acélgolyójának átmérőjére utal (10 mm), d_{etalon} pedig az etalon rúdon mért benyomódás átmérőjét, míg d_{betonacél} a betonacélon mért benyomódás átmérőjét jelöli. Az adott képlet alkalmazásával a szilárdsági értékek a következő módosításokat eredményezik.

Jelölés	Módosított szakítószilárdság [N/mm ²]
Po1	569
Po2	543
Po3	469

5. táblázat: Módosított szakítószilárdsági eredmények (forrás: ORISOFT Mérnöki Építő és Tanácsadó Kft: A mezőkovácsházi vasbeton silók statikai állapotáról készített Anyagvizsgálati és tartószerkezeti szakvélemény, 2024)

A módosított eredmények már sokkal valósághűbb képet adnak a betonacélok szilárdságáról. A harmadik mérés figyelmen kívül hagyásával a számított szakítószilárdság átlagosan 555 N/mm²-re adódik. Még a realisabb módszer alkalmazásával sem éri el a 600 N/mm²-es szakítószilárdságot, de az eredmények viszonylag közel állnak hozzá. A vizsgálat hozzátétőleges jellege miatt azonban

valószínűsíthető, hogy a betonacél szilárdsági osztálya B60.40 (az építés időszakában használatos jelölés szerint) vagy B400 (a jelenleg érvényben lévő jelölés alapján). Ezen megfontolások alapján a B400-as szilárdsági osztály alkalmazása javasolt a statikai számításokhoz.

4.2.4. Tartóssági és szerkezeti jellemzők vizsgálata

4.2.4.1. Kémiai vizsgálat furatpor minták és feltárások alapján

A beton kémiai analízisét reprezentatív mennyiségű mintavétel alapján végeztük, amelyek a silócsoport különböző részeiből és különböző mélységekből származó furatpor mintákból álltak. A minták pH-értékét, valamint a klorid-, szulfát- és nitrát-tartalmukat vizsgáltuk. A vizsgálatig a pormintákat kétrétegű, lezárt zacskókban tároltuk hűtőszekrényben.



21. ábra: Furatpor mintavétel külső felületről (forrás: ORISOFT Mérnöki Építő és Tanácsadó Kft: A mezőkovácsházi vasbeton silók statikai állapotáról készített Anyagvizsgálati és tartószerkezeti szakvélemény, 2024)

A mérések eredményei az 4. mellékletben kerültek összefoglalásra. A porminták elemzése mellett bizonyos helyeken feltárásos vizsgálatokat is végeztünk a jellegzetes károsodási területeken (repedések, betonfedés leválások). A feltárási pontok nagy részén fenolftaleines permetezéssel határoztuk meg a beton karbonátosodásának mélységét, továbbá elemeztük a betonacélok felszínén megjelenő korróziós jelenségeket.

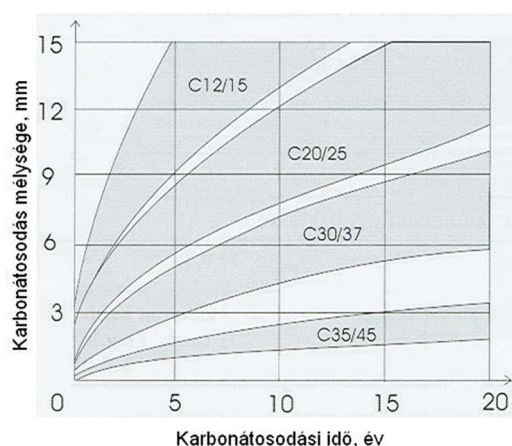
A furatpor minták kémiai elemzése és a karbonátosodási vizsgálatok alapján a betonacélok korróziós kockázatának értékeléséhez az MSZ4798: 2016/1M:2017 szabvány előírásait vettük figyelembe.

A vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a beton pH-értéke a vizsgált területeken meghaladja a korrózió szempontjából kritikusnak tekintett 9,0-es határértéket. Fontos megjegyezni, hogy a betonacélok teljes korrózióvédelmét biztosító minimum 11-

es pH-érték jellemzően csak 10 mm mélységtől tapasztalható, így ennél kisebb betonfedés esetén a karbonátosodás okozta korrózió veszélye fennállhat.

A betonminták kloridion-tartalma az MSZ4798: 2016/1M:2017 szabványban megengedett 0,20 m/m% érték alatt marad, így a kloridok miatt nem alakult ki jelentős korróziós kockázat a betonacélok esetében. A szulfáttartalom is a betonkorrózió szempontjából veszélyes határérték alatt van.

A feltárások során mért karbonátosodási mélységek változó eredményeket mutattak, az átlagos érték 5-10 mm között van, de jellemzően nem haladja meg a 10 mm-t. Összevetve hasonló korú és szilárdságú betonszerkezetek karbonátosodási mélységével (22. ábra), azt lehet megállapítani, hogy az elmúlt évtizedekben alkalmazott bevonati rétegek valószínűleg hatékonyan lassították a karbonátosodási folyamatot.



22. ábra: Karbonátosodás mélysége az idő és a beton nyomószilárdsági osztálya függvényében (forrás: Balázs, Kausay, Kopecskó, Nemes, Nehme, Lublóy, Józsa, Arany: Betonok oldódásos korróziója)

A feltárt vízszintes betonacélokon legtöbb esetben enyhe felületi korrózió nyomai voltak észlelhetők, de ez nem okozott jelentős keresztmetszet-csökkenést, és a bordázat is sértetlen maradt. Mindössze néhány esetben figyeltünk meg 3-5%-os keresztmetszet-csökkenést eredményező korróziós károkat a feltárt betonacélok között.

Összességében elmondható, hogy a szerkezetben lévő betonacélok szempontjából a jelenlegi környezeti feltételek csak enyhén korrózióveszélyesek, és a korrózió csak nagyon kis területen mutatkozott a teljes szerkezethez képest.

4.2.4.2. Vizsgálat mágneses vaskeresővel

A vizsgálatot a silók meghatározó szerkezeti részein végeztük, különösen részletesen a 15. és 16. számú silók külső felületén, amelyhez függőállványt használtunk. A méréseket

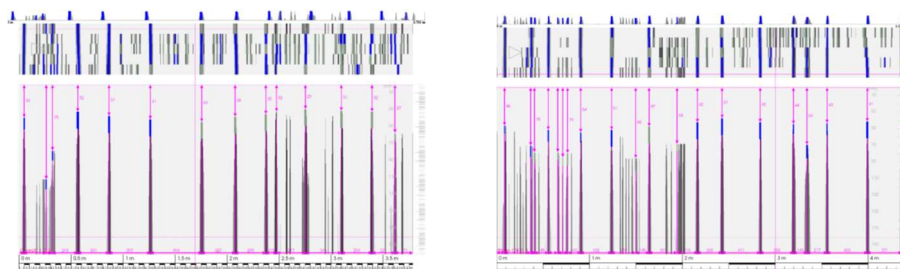
reprezentatív mennyiségben HILTI PS300 típusú mágneses vaskeresővel hajtottuk végre. A vizsgálat elsődleges célja a vízszintes és függőleges acélbetétek kiosztásának, valamint a betonfedés vastagságának meghatározása volt.



23. ábra: Mágneses vizsgálat (forrás: szerző fényképe, készítés ideje: 2024.06.12)

Ezek a vizsgálatok és azok megállapításai a 3. mellékletben találhatók.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a mért adatok alapján a silók magassága mentén a jellemző (átlagos) betonfedés vastagságok jelentős változatosságot mutatnak. A betonfedés átlagos értéke általában nagyobb, mint a mért karbonátosodási mélység.



24. ábra: V01 és V04 vízszintes irányú vizsgálatok (forrás: ORISOFT Mérnöki Építő és Tanácsadó Kft: A mezőkovácsházi vasbeton silók statikai állapotáról készített Anyagvizsgálati és tartószerkezeti szakvélemény, 2024)

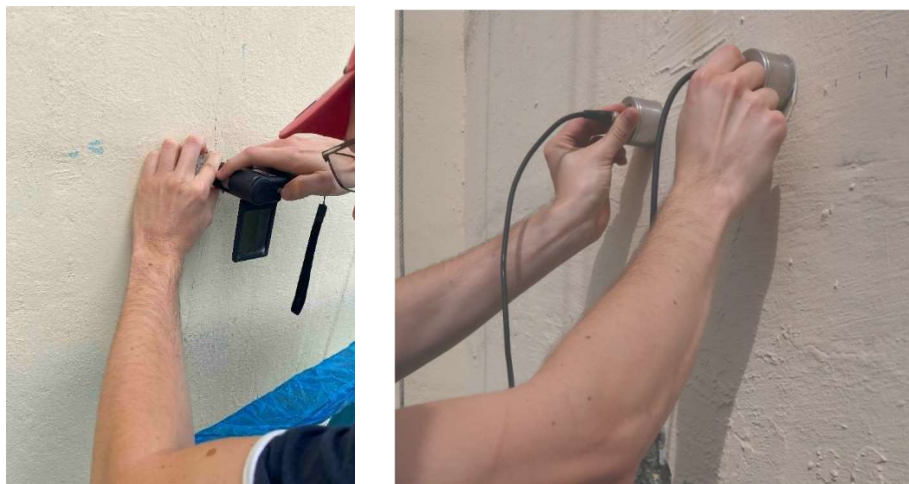
Az összes mérés eredményeit figyelembe véve, a betonfedés átlagos vastagsága 35,2 mm, a szórás pedig 12,5 mm, ami körülbelül 36%-os relatív szórásnak felel meg. Normális eloszlás feltételezése mellett annak valószínűsége, hogy a betonfedés a jellemző karbonátosodási mélység alá csökken, kevesebb mint 5%.

Mind a vízszintes, mind a függőleges acélbetétek elhelyezkedése csak minimális eltéréseket mutat, és a magasság mentén viszonylag egyenletesen oszlanak el.

A mágneses vizsgálatok nemcsak az erőtani számításokhoz, hanem a tartóssági kérdések értékeléséhez is alapvető fontosságú adatokat szolgáltatnak.

4.2.5. Repedéstágasság és repedésmélység vizsgálatok

A repedéstágasság méréseket a silócsoport 6-os, 12-es és 18-as számú silóinál, a talajközeli tartományokban végeztük digitális Levenhuk mikroszkóp és a hozzá tartozó kiértékelő szoftver segítségével.



25. ábra: Repedéstágasság és repedés mélység vizsgálat (forrás: szerző fényképe, készítés ideje: 2024.06.13)

A vizsgálati pontok kiválasztása a felületen szabad szemmel is jól látható, nagyobb nyílású repedéseknél történt, összesen 27 mérési ponton. Mivel a repedésvonal gyakran egyenetlen volt, minden mérési pontnál a repedéstágasságot legalább három mérés átlagából határoztuk meg. A repedéstágasság mérések részletes dokumentációja és elemzése az 5. mellékletben található.

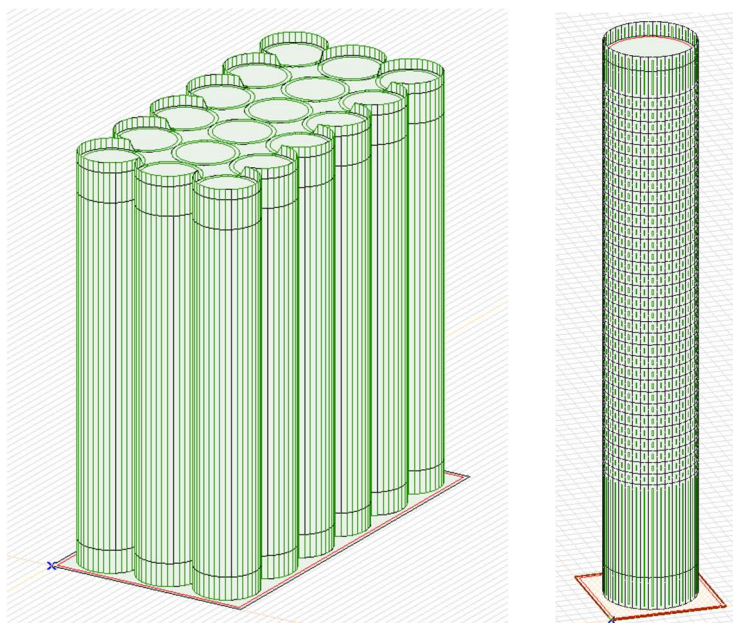
A repedés mélységének meghatározásához TICO ultrahangos készüléket használtunk.

A repedéstágasság vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a nagyobb, szabad szemmel is jól látható függőleges repedések átlagos megnyílása 0,48 mm, ami jelentősen meghaladja az ilyen típusú szerkezeteknél megengedett 0,2 mm-es határértéket. A legnagyobb mért repedéstágasság 0,7 mm volt.

A vizsgált függőleges repedések többsége 0,2 mm alatti tágasságot mutat, különösen a 15 méternél magasabb területeken. A vízszintes repedések esetében több helyen szintén 0,2 mm fölötti tágasságot regisztráltunk, elsősorban a csúszózsalus technológia alkalmazásakor keletkezett munkahézagoknál. Azonban ez nem jellemző az egész szerkezetre.

5. TARTÓSZERKEZETI ELLENŐRZÉS

Az egyes cellák teherbírásának ellenőrzését a kijelölt megbízhatósági szint figyelembevételével, valamint a diagnosztikai vizsgálatok eredményeinek felhasználásával végeztem el végeselemes analízissel, az AxisVM X7 szoftver segítségével. A számítások részletes dokumentációja a 11. mellékletben található.

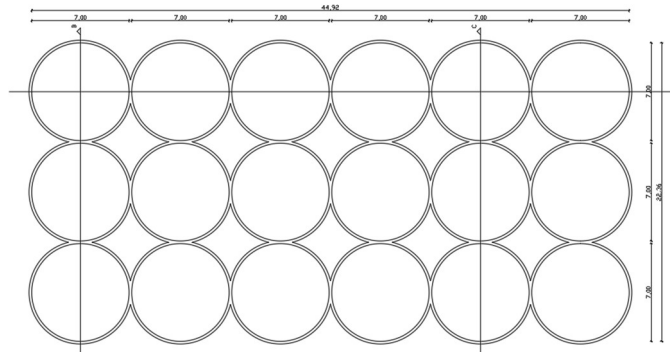


26. ábra: Silócsoport és egyedi siló modelljei Axis VM X7 szoftverrel (forrás: saját készítés, 2024.09.08)

5.1. Alkalmazott szabványok

- MSZ EN 1990 Eurocode: A tartószerkezeti tervezés alapjai
- MSZ EN 1991-1-1 Eurocode: A tartószerkezeteket érő hatások. Általános hatások. Sűrűség, önsúly és az épületek hasznos terhei
- MSZ EN 1991-1-3 Eurocode: A tartószerkezeteket érő hatások. Általános hatások. Hóteher
- MSZ EN 1991-1-4 Eurocode: A tartószerkezeteket érő hatások. Általános hatások. Szélteher
- MSZ EN 1991-4 Eurocode: A tartószerkezeteket érő hatások. Silók és tartályok.
- MSZ EN 1992-1-1 Eurocode: Általános előírások és az épületekre vonatkozó szabályok.
- Vasbeton silók számítása, Tervezési Segédlet, Tervezésfejlesztési és Típusfejlesztő Intézet, Budapest 1970
- Silók méretezése, Tervezési Segédlet, Tervezésfejlesztési és Technikai Építészeti Intézet, Budapest 1989
- fib Model Code for Concrete Structures 2010
- fib Bulletin 80, Partial factor methods for existing concrete structures, fib-Task 2016

5.2. Modell felvétele



27. ábra: Silócsoport alaprajza (forrás: saját készítés, 2024.09.07)

5.3. Anyagjellemzők

• Beton

A mérések szerint a betonszerkezet anyagminősége C16/20 és C25/30 között mozog. A munkahézagoknál C16/20, míg a szerkezet többi részén C25/30 minőségű beton található. A biztonság érdekében azonban a teljes szerkezetet egységesen C16/20 anyagminőséggel elemeztem.

Az α_{cc} értékét 0,85-re állítottam be, ezzel figyelembe véve a hosszú távú hatások nyomószilárdságra gyakorolt kedvezőtlen hatásait.

Az 3. pontban részletezett megbízhatósági tényezős eljárás és a 6. melléklet számításai alapján a γ_c -t 1,345-re vettem fel.

Beton jele	E_{cm} [kN/mm ²]	f_{ck} [N/mm ²]	γ_c	f_{cd} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]
C16/20	29	16	1,345	11,90	1,9

6. táblázat: Beton alkalmazott paraméterei

• Betonacél

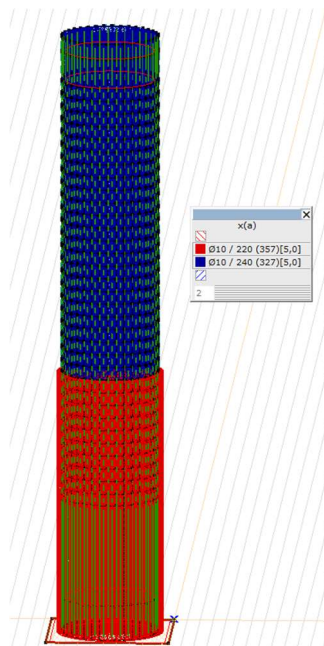
A betonacélok szilárdsági osztálya B60.40, melyet a modellben B400-as anyagminőséggel vettem figyelembe.

Az 3. pontban részletezett megbízhatósági tényezős eljárás és a 6. melléklet számításai alapján a γ_s -t 1,128-ra vettem fel.

Betonacél jele	E_s [kN/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	γ_s	f_{yd} [N/mm ²]	ϵ_{s1} [‰]	ϵ_{su} [‰]
B400	20	400	1,128	354,61	1,775	25

7. táblázat: Betonacél alkalmazott paraméterei

A vízszintes vasalás osztástávolsága az alsó 10 m-es tartományon 220 mm, míg fentebb 230-240 mm-es osztást mértünk. A vízszintes vasalás átmérője 10 mm. A függőleges vasalás jellemzően $\phi 12/330$.



28. ábra: Alkalmazott gyűrűirányú vasalás (forrás: saját készítés, 2024.09.21)

A belső oldali gyűrűirányú falvasalás a külsővel megegyező. A függőleges vasalás minden esetben $\phi 12/330$.

5.4. Terhek

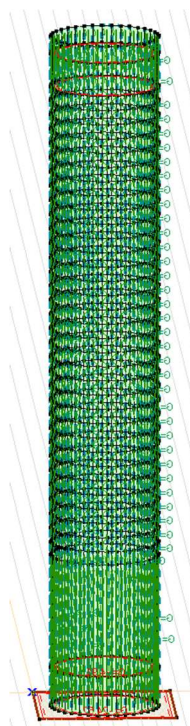
5.4.1. Siló osztályozása

Az MSZ EN 1991-4 alapján 3 hatásosztályt különböztethetjük meg. Jelen siló a 2. hatásosztályba sorolandó. A hatásosztályok bemutatását és a siló osztályozását a 9. melléklet 3. pontjában részletezem.

Az MSZ EN 1991-4 alapján a belső falfelületet is osztályozni szükséges. Az Eurocode által definiált 4 falfelületi osztály közül a D3 (nagy súrlódású „érdes” falfelület) osztályba tartozik a siló falfelülete. Az osztályozás bemutatását a 9. melléklet 2. pontjában részletezem.

5.4.2. Állandó terhek

Modellezésnél csak a falak és a födémek szerkezeti önsúlyát vettem figyelembe állandó teherként.



29. ábra: Önsúly terhelés (forrás: saját készítés, 2024.09.21)

5.4.3. Esetleges terhek

5.4.3.1. Tárolt anyag terhei

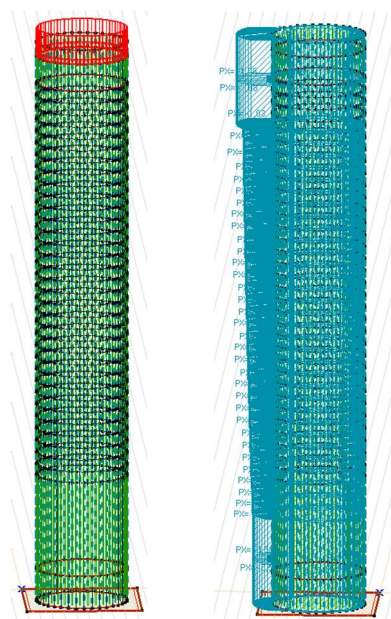
A megbízó által elmondottak alapján tudjuk, hogy a silókban 3 féle gabonát szoktak tárolni: kukorica, búza, valamint árpa. Az MSZ EN 1991-4 C2-es táblázata, valamint E1-es táblázatai alapján a következő terményjellemzőkkel számolhatunk:

	Térfogatsúly (γ) [kN/m³]		Rézsű- szög (φ_r) [°]	Belső súrlódási szög (φ_i)		Oldalnyomásarány (K)		Falsúrlódási tényező μ ($\mu = \tan\varphi_w$)				A szemcsés anyag helyi túlnyomás- terhének tényezője (C_{op})
	γ_ℓ	γ_u		φ_{im}	a_φ	K_m	a_K	D1	D2	D3	a_μ	
								falfelületosztály				
								várh. ért.	tényező	várh. ért.		
Kukorica	7	8	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9
Búza	7,5	9	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5
Árpa	7	8	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5

8. táblázat: Termény jellemzők (forrás: MSZ EN 1991-4)

A felsoroltak közül az árpával való töltöttség és ürítés mellett alakultak ki a legkedvezőtlenebb viszonyok, ezért a 9. mellékletben ennek számítási lépéseit mutatom be.

5.4.3.2. Meteorológiai terhek

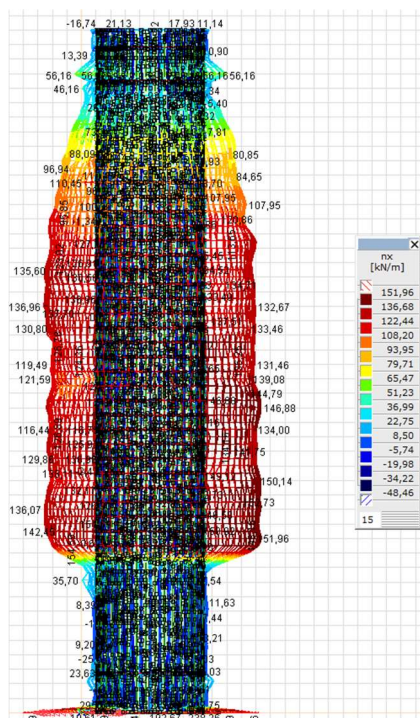


30. ábra: Hóteher és szélteher (forrás: saját készítés, 2024.09.21)

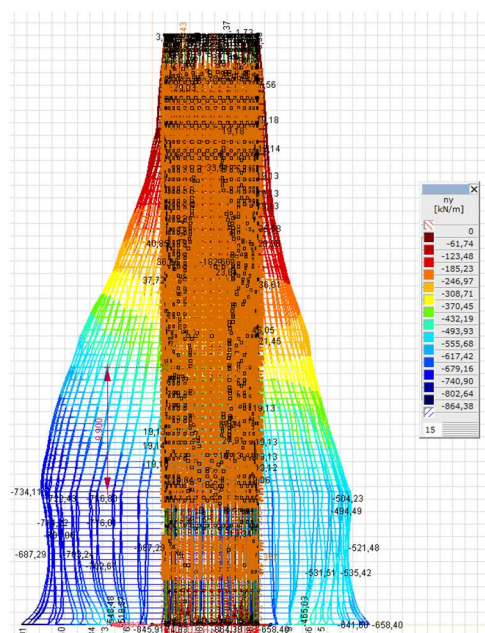
5.5. Eredmények

A végeselemes analízist AxisVM X7 szoftver segítségével végeztem el, melynek részletes dokumentációja a 11. számú mellékletben található.

A silófalak igénybevételei a következő ábrákon látható:



31. ábra: Gyűrű irányú metszeterők burkolóábrája (forrás: saját készítés, 2024.09.21)



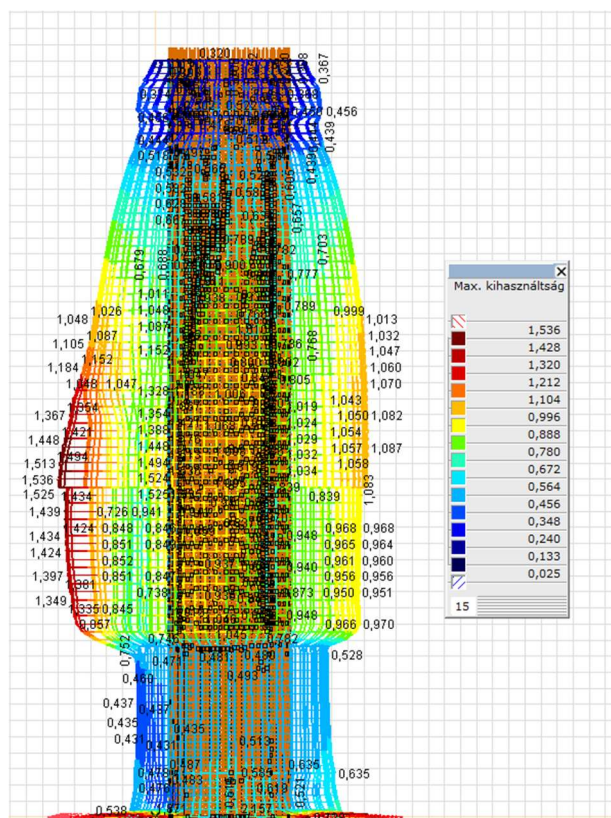
Összességében megállapítható, hogy a szerkezet rugalmas igénybevétel eloszlás esetén 20,6%-os igénybevétel túllépést mutat, tehát nem felel meg.

A kihasználtságot ellenőrzésként analitikus módszerrel is kiszámoltam, melynek eredményeként a végeselemes számítással közel megegyező 21,84%-os igénybevétel túllépést kaptam. A számítást a 10. mellékletben részleteztem.

Javasolt a szerkezet megerősítése.

5.6. Eredmények a parciálalis tényezők korrigálása nélkül

Az cellák teherbírásának ellenőrzését a parciálalis tényezők *fib* szerinti csökkentése nélkül is elvégeztem végeselemes analízissel, az AxisVM X7 szoftver segítségével. A számítások részletes dokumentációja a 12. mellékletben található.



34. ábra: Vasalás kihasználtsága (forrás: saját készítés, 2024.10.20.)

Megállapítható, hogy a mind a *fib* által javasolt biztonsági tényezők csökkentése nélkül, az Eurocode szabvány szerinti parciálalis tényezők alkalmazása mellett az előző pontban meghatározott 20,6%-os igénybevétel túllépés 53,6%-os többlet kihasználtságra emelkedik.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A roncsolásmentes és roncsolásos vizsgálatok eredményei alapján megállapítottuk, hogy a siló szerkezeti betonja nagyjából azonos szilárdsági osztályú az egyes vizsgált területeken, de a mérések szórása miatt a biztonság érdekében a statikai ellenőrzések során a C16/20-as beton szilárdsági osztály figyelembevételét javaslom. A roncsolásos vizsgálatok, valamint a betonstruktúra elemzése alapján megállapítást nyert, hogy a 2. számú silócellából, amely már acél pántolással megerősítésre került, gyengébb minőségű betonminták kerültek elő. Ezek alacsonyabb szilárdságot és kedvezőtlenebb szerkezeti tulajdonságokat mutattak, mint a többi silóból származó minták, ami arra utal, hogy építés közben bedolgozási problémák merülhettek fel, különösen ebben a cellában.

A kémiai vizsgálatok során nem találtunk olyan nyomokat, amelyek közvetlen korróziós veszélyt jelentenének sem a beton, sem a betonacélok számára. Valószínűsíthető, hogy az elmúlt időszakban alkalmazott bevonati rendszerek jól működtek, és hatékonyan megakadályozták a káros korróziós folyamatok elindulását. A mágneses vizsgálatok segítségével megállapítottuk, hogy a silók magasságában a betonfedés vastagsága változó, de általában meghaladja a mért karbonátosodási mélységet. Ennek eredményeként a betonacélok többsége megfelelő korrózióvédelemben részesül, ami azt jelenti, hogy csak a szerkezet kis része van kitéve potenciális korróziós veszélynek. A vizsgálatok arra is rámutattak, hogy a betonacélok elrendezése mind vízszintes, mind függőleges irányban egyenletesnek tekinthető, ami szintén hozzájárul a szerkezet teherbíró képességéhez és tartósságához.

A repedéstágassági vizsgálatok során kiderült, hogy a függőleges repedések legnagyobb megnyílása jellemzően 0,5 mm körül van, és leginkább a cella alsó és középső tartományában figyelhetők meg. Ugyanakkor a legtöbb függőleges repedés tágassága nem haladja meg a tartósság szempontjából kritikus 0,2 mm-t, különösen a 15 méternél magasabb részeken. A vízszintes repedések tágassága viszont több helyen meghaladja ezt az értéket, ami arra utal, hogy ezek a repedések hosszú távon nagyobb hatással lehetnek a szerkezet állapotára. Az ultrahangos vizsgálatok alapján úgy tűnik, hogy a nagyobb, megnyíló repedések nem csupán felületi jellegűek, hanem mélyebbre hatolnak, akár a keresztmetszet feléig is elérhetnek. Azonban a repedésvizsgálatok során nem találtunk olyan jeleket, amelyek arra utalnának, hogy a szerkezetben súlyos teherbírási problémák lennének.

Az elvégzett számos vizsgálatból kapott eredmények alapján elvégeztem a szerkezet erőtani vizsgálatát. Számításaim során a *fib* által meglévő vasbeton szerkezetekhez javasolt optimális megbízhatósági szint alapján módosított parciális tényezőket alkalmaztam. Ez alapján az anyagtulajdonságokhoz, állandó-, valamint hasznos terhekhez tartozó parciális tényezőket a következők szerint módosítottam.

		EC szerinti γ	Csökkentés mértéke	<i>fib</i> alapján alkalmazott γ
Anyag jellemzők	Beton	1,5	10%	1,35
	Betonacél	1,15	3%	1,12
Állandó terhek	Önsúly	1,35	13%	1,18
Hasznos terhek	Tárolt anyag	1,5	15%	1,27
	Helyi túlnyomás teher	1,5	15%	1,27
	Hőmérséklet	1,5	11%	1,34
	Szélteher	1,5	11%	1,34
	Hóteher	1,5	11%	1,34

9. táblázat: Parciális tényezők módosítása

A módszernek köszönhetően az Eurocode új építésű szerkezetekre is vonatkozó szabványával számolt 52,36%-os kihasználtság többlet 20,6%-ra csökkenthető. A szerkezet megerősítésére ugyan így is szükség van, de a 31,76%-os kihasználtság megtakarítás jelentős költségmegtakarítást jelenthet a rehabilitáció során.

Fontos megjegyezni, hogy a parciális tényezők módosítása csak abban az esetben alkalmazható biztonsággal, ha a meglévő szerkezet geometriája, anyagtulajdonságai, és felépítése kellő pontossággal és varianciával került meghatározásra. Mindemellett alkalmas lehet a meglévő szerkezetek pontosabb, ámde biztonságos vizsgálatára amellet, hogy nem veszélyeztetjük a szerkezet megbízhatóságát. Mint azt jelen példa levezetésben is láthatjuk, jelentős költségcsökkentést eredményezhet az alkalmazása. Amennyiben a szerkezet megfelel az elvárásoknak, a módszer alkalmazásával akár a teljes megerősítési kivitelezés is elkerülhetővé válhat.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A meglévő épületek nagyon nagy részénél az eredeti tervezett élettartam már lejárt, vagy a közeljövőben le fog járni. Ennek oka, hogy a meglévő vasbeton épületek jelentős részét az 1960-as években építették. Ezeket a szerkezeteket érdemes újra vizsgálni, annak érdekében, hogy megállapítsuk, megfelelnek-e a mai biztonsági követelményeknek.

Mint ahogy az építőiparban, a tervezési szabványkörnyezetben is nagyon nagy fejlődés történt az elmúlt 50-60 évben. Emiatt az építéskori tervezési szokásokon, és szabványokon túlmenően a szerkezetek rehabilitációjakor is az új tervezési szemléletnek és szabványoknak kell megfelelni, melyek számos szempontból részletesebbek, és szigorúbbak, mint az építéskori elvárások.

Emiatt a ma is használatban lévő vasbeton szerkezetek jelentős része nem tudna megfelelni az Eurocode-ban megfogalmazott – az új építésű szerkezetekre is vonatkozó – szigorú követelményeknek. A *fib* által ajánlott valószínűségi számításokkal a parciális tényezők biztonságosan csökkenthetők meglévő vasbeton szerkezetek értékelésekor.

Jelen pályamunka keretében a megbízó, egy 18 tárolócellás vasbeton siló diagnosztikájára, erőteni vizsgálatra kaptunk megbízást.

A részletezett diagnosztikai vizsgálatokat követően elvégeztem a szükséges számításokat a biztonsági tényezők megfelelő csökkentéséhez. Ennek alkalmazásával végeztem el a siló vizsgálatát. A *fib* módszere alapján az Eurocode-ban használt biztonsági tényezőivel kalkulált 52,36%-os többlet kihasználtság 20,6%-ra csökkenthető. Mindemellett szükséges a szerkezet megerősítése.

A vasbeton szerkezetek megerősítésére és rehabilitációjára a mai építőipari technológia számos lehetőséget biztosít. Ezek közül a legmodernebb, leghatékonyabban alkalmazható vasbeton szerkezet erősítési technológia a szál erősítésű polimerek, FRP rendszerek alkalmazása.

Fontos kiemelni, hogy a megerősítő kivitelezések elvégzését követően elengedhetetlen lesz a szükséges karbantartások időszakos elvégzése. A karbonátosodás okozta korróziós folyamat modellezése és a tartósságra vonatkozó valószínűségi elemzések azt mutatták, hogy rendszeres, tízévente végzett bevonatolással egy jól működő védelmi rendszert lehet alkalmazni, a korróziós folyamatok jelentősen lelassíthatók.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1.] Mészáros András: Mezőgazdasági építészet, Budapest, Akadémiai Kiadó, 2008.
- [2.] Kovács László: Ipari tároló rendszerek, Műszaki Kiadó, 2015.
- [3.] John Smith: Bulk Material Handling Systems, Wiley, 2012.
- [4.] Nagy István: Építőanyagok és technológiák a tároló rendszerekhez, Szaktudás Kiadó Ház, 2010.
- [5.] Robert Thompson: Silo Design and Construction, McGraw-Hill, 2014.
- [6.] Tóth Gábor: Anyagmozgatás a mezőgazdaságban, Mezőgazda Kiadó, 2007.
- [7.] Peter Walker: Silo Safety and Maintenance, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [8.] Szilágyi Katalin: A Schmiedt-kalapács 50 éve: Múlt, jelen, jövő. 2008.
- [9.] ORISOFT Mérnöki Építő és Tanácsadó Kft: A mezőkovácsházi vasbeton silók statikai állapotáról készített Anyagvizsgálati és tartószerkezeti szakvélemény, 2024
- [10.] Dr. Balázs L. György, Dr. Kausay Tibor, Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Nemes Rita, Dr. Nehme Salem G., Dr. Lublós Éva, Dr. Józsa Zsuzsanna, Dr. Arany Piroska: Betonok oldódásos korróziója
- [11.] Amit B. Dutta: Study of Types of Failures in Silos, 2013
- [12.] Kilián József: Vasbeton szerkezetek, tározók, 1962
- [13.] Dr. Bölskei Elemér, Dr. Orosz Árpád: Vasbeton szerkezetek: Faltartók, lemezek, Tárolók, 1981
- [14.] Dr. Bucur-Horváth Ildikó, Dr. Mátyás Gyöngyvér: Vasbeton silók jellegzetes károsodása és megerősítése I., 2007
- [15.] *fib* Bulletin 80: Partial factor methods for existing concrete structures, 2016
- [16.] König, Hosser: Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach der Empfehlung des NaBau eine Erläuterung, 1982
- [17.] Saim Raza, Muhammad K. I. Khan, Scott J. Menegon, Hing-Ho Tsang, John L. Wilson: Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns, 2019

9. MELLÉKLETEK

- 1.melléklet: Roncsolásmentes Schmidt kalapácsos szilárdsági vizsgálatok
- 2.melléklet: Roncsolásos beton szilárdsági vizsgálatok fűrt betonmintákon
- 3.melléklet: Mágneses vaskeresés
- 4.melléklet: Kémiai vizsgálatok
- 5.melléklet: Repedéstágasság mérés digitális mikroszkóppal
- 6.melléklet: Módosított biztonsági tényezők anyagtulajdonságokra
- 7.melléklet: Módosított biztonsági tényezők állandó terhekre
- 8.melléklet: Módosított biztonsági tényezők hasznos terhekre
- 9.melléklet: Tárolt anyag terhei
- 10.melléklet: Kihasználtság analitikus ellenőrzése
- 11.melléklet: Végeselemes analízis AxisVM X7 szoftverrel
- 12.melléklet: Végeselemes analízis Eurocode szerint AxisVM X7 szoftverrel

Rajz mellékletek:

- | | |
|-----|---|
| S01 | Alaprajz |
| S02 | A-A metszet |
| S03 | B-B és C-C metszet |
| S04 | Diagnosztikai terv (talajközeli vizsgálatok) |
| S05 | Diagnosztikai terv (függesztőkosaras vizsgálatok) |