



ALAPOZÁSI MÓDSZEREK SZÉN-DIOXID-KIBOCSÁTÁSA: A KARBONLÁBNYOM CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

TDK-dolgozat

SZERZŐ:

GYÜRKY KATALIN

IV. éves építőmérnök hallgató

KONZULENSEK:

DR. ILLÉS ZSOMBOR

DR. NAGY GÁBOR

Budapest, 2024.

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	2
1. BEVEZETÉS.....	3
1.1 CÉLKITŰZÉSEK.....	4
1.2 KARBONLÁBNYOM-SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREK	4
2. A VIZSGÁLT PROJEKT BEMUTATÁSA	7
2.1 A TÉRSÉG ALTALAJVISZONYAI	7
2.1.1 Geológiai adottságok	7
2.1.2 Talajrétegződés.....	8
2.1.3 Talajvízviszonyok.....	9
2.1.4 Szeizmicitás	10
2.2 AZ ÉPÍTÉSI PROJEKT ÁLTALÁNOS BEMUTATÁSA	11
2.2.1 Helyszíni viszonyok	11
2.2.2 A mélyalapozás és a munkatérhatárolás szükségessége.....	12
2.2.3 A résfal és a munkatérhatárolás technológiai leírása	13
2.2.4 A tervezett szerkezetek	15
2.3 AZ EFFC KALKULÁTOR LEÍRÁSA	16
2.3.1 Alapelv	16
2.3.2 Kibocsátási források	17
3. SZÁMÍTÁSOK.....	18
3.1 ÁLTALÁNOS BEÁLLÍTÁSOK	18
3.2 ÉPÍTŐANYAGOK.....	19
3.3 HELYSZÍNI ENERGIAFELHASZNÁLÁS	22
3.4 MÁSODLAGOS KIBOCSÁTÁSI FORRÁSOK.....	23
4. EREDMÉNYEK.....	27
5. DISZKUSSZIÓ.....	31
6. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK.....	33
6.1 ÖSSZEFOGLALÁS	33
6.2 KITEKINTÉS, TOVÁBBI VIZSGÁLATI CÉLOK	33
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	34
FELHASZNÁLT IRODALOM.....	35
MELLÉKLETEK	37

1. BEVEZETÉS

A világ gazdaságának egyik legnagyobb ágazata az építőipar, amelynek ezáltal a környezetre gyakorolt hatása jelentős. Egyrészt az építőanyagok előállítása során óriási mennyiségű üvegházhatású gáz keletkezik, a globális szén-dioxid-kibocsátás több mint 7%-áért a kivitelezés folyamán felhasznált beton, acél és alumínium gyártása felel (UNEP, 2024). Másrészt a választott technológia függvényében a gépek által használt energiát meg kell termelni. Kisebb, de nem elhanyagolható mértékben a szállítások során elégetett üzemanyag szintén szennyezi a környezetet, ezért a logisztika döntéseket alaposan át kell gondolni.

Az antropogén üvegházhatású gázok (továbbiakban: ÜHG) legnagyobb mennyiségét a szén-dioxid (CO_2) jelenti, de emellett a metán (CH_4), a dinitrogén-oxid (N_2O), valamint a fluortartalmú gázok (F-gázok) is káros hatással vannak az éghajlatra. Ezek az anyagok a légkörbe jutva csapdázzák a földfelszínről visszaverődő napfényt, így a hőenergia nem tud távozni, és globális felmelegedést okoz (WRI és WBCSD, 2011).

Az európai klímarendelet törvénybe foglalja, hogy Európa gazdasága és társadalma 2050-re klímasemleges legyen, azaz az országok nettó nulla ÜHG-kibocsátást érjenek el, a zöld technológiákba való beruházás és a természeti környezet védelme révén (Európai Bizottság, 2021).

Egyes becslések szerint világszerte minden héten egy újabb, Párizs nagyságú terület épül be (UN News, 2023). Tehát napjaink legfontosabb problémájának, a klímaváltozásnak csökkentéséhez a mérnöki döntések jelentősen hozzájárulhatnak.

1.1 CÉLKITŰZÉSEK

A kutatásom során egy Kelet-Magyarországon megvalósult szállodaberuházás mélyalapozásának munkatérhatárolását vizsgálom. Számításokat végzek a kivitelezés közben keletkezett üvegházhatású gázok mennyiségére, az EFFC/DFI programjának alkalmazásával. Az elemzés keretén belül figyelembe veszem többek között a felhasznált építőanyagokat, a géplánc energiafogyasztását és az építkezés folyamán termelt hulladékokat.

A kalkuláció segítségével látható lesz, hogy melyik folyamat befolyásolja legnagyobb mértékben a globális kibocsátást. Így azokon a területeken kiemelten fontos új, környezetkímélőbb eljárást választani, amellyel csökkenthető az építkezés karbonlábnyomának nagysága.

Ezenkívül a különböző műszaki megoldások eltérő károsanyag-kibocsátással járnak, tehát ezek összehasonlítása miatt érdemes számszerűsíteni a környezeti hatásukat. Ennek ismeretében az építőipar mérnöki, gazdasági és időbeli hatékonyságán kívül a fenntarthatóság mértéke is kiemelhető lesz a paraméterek tervezésénél.

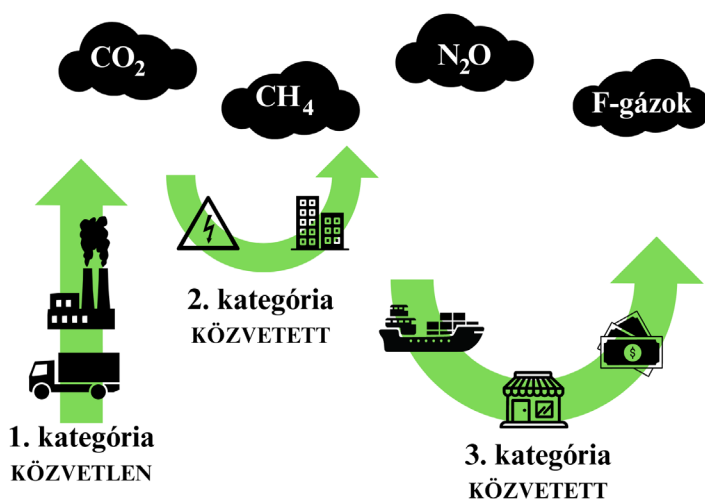
Kulcsszavak: karbonlábnyom, karbonsemlegesség, klímaváltozás, építőipari kibocsátás, geotechnika

1.2 KARBONLÁBNYOM-SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREK

A klímaváltozás súlyos hatása miatt világszerte egyre több intézkedést dolgoznak ki és hajtanak végre, annak érdekében, hogy az ÜHG-ok koncentrációját számszerűsíteni, majd csökkenteni lehessen. A szén-dioxid-kibocsátás számítási módszereinek története a 2000-es évek elején kezdődött, ezek két kategóriába sorolhatóak: a vállalati szabványok a szervezet karbonlábnyomának kiszámítására koncentrálnak, még a termékszabványok egy konkrét termékre vagy projektre összpontosítanak, ezért az életciklus-elemzésnek (Life Cycle Assessment, LCA) több elemét tartalmazzák. Mindkettő opció lehetővé teszi egy-egy kivitelezési projekt elemzését, néhány különbséggel. Az alábbiakban az Európában használt főbb szabványok rövid bemutatása következik, amelyek összehangolására törekednek a közös gyakorlatok megosztása céljából (Carbone 4, 2014).

Vállalati szabványok terén elsők között a GHG Protocol Corporate Standard (greenhouse gas, GHG) fogalmazta meg az üvegházhatásúgáz-kibocsátás fő forrásait, amelyet három kategóriába sorol (WRI és WBCSD, 2004):

- 1. kategória: közvetlen kibocsátás (scope 1)
Olyan forrásból származik, amely a vállalat tulajdonában van, vagy az ellenőrzése alatt áll. Például a cég által működtetett járművek; az üzemben történő égetés.
- 2. kategória: energiafogyasztáshoz kapcsolódó közvetett kibocsátás (scope 2)
A vállalat által felhasznált energia előállításából származik, amely például az irodaház üzemeltetéséhez szükséges.
- 3. kategória: egyéb közvetett kibocsátás (scope 3)
A vállalat tevékenységeinek következménye, de olyan forrásból, amely nem a vállalat tulajdonában vagy ellenőrzése alatt áll. Például a vásárolt anyagok kitermelése, az eladott szolgáltatás használata.

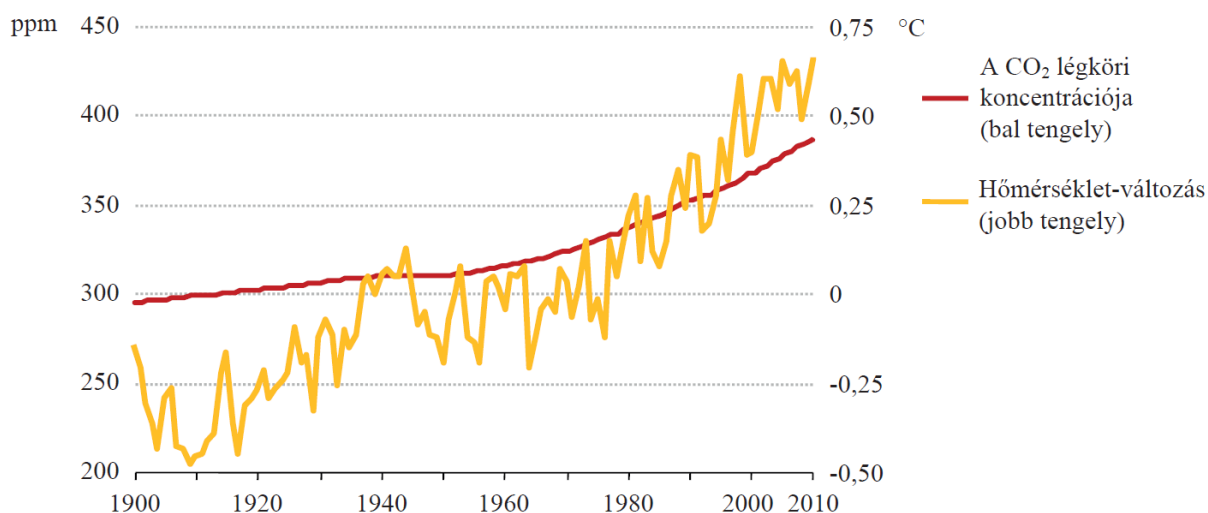


1. ábra: A vállalati kibocsátás kategóriái a GHG Protocol alapján (WRI és WBCSD, 2004)

A francia eredetű ADEME Bilan Carbone nevű módszer a szén-dioxid-kibocsátások operatív kezelése felé irányul. A módszertan hat fázisa:

1. Az éghajlatváltozással kapcsolatos tudatosság növelése
2. A szén-dioxid-kibocsátási jelentés hatáskörének meghatározása
3. Adatok összegyűjtése
4. Adatok elemzése, az ehhez szükséges kibocsátási tényezőkre nyilvános adatbázist hoztak létre
5. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére szolgáló stratégia megalkotása
6. A stratégia megvalósítása (Tapio, 2024).

Az ENCORD (European Network of Construction Companies for Research and Development) azokat a kibocsátási forrásokat definiálta, amelyekre az építőipari ágazatnak hatása van, az általános GHG Protocol szabályzata alapján (ENCORD, 2012). Erre azért volt szükség, mert már 2012-ben történelmi csúcsot döntött az energiával kapcsolatos globális szén-dioxid-kibocsátás, elérte a 31,6 gigatonnát (IEA, 2013).

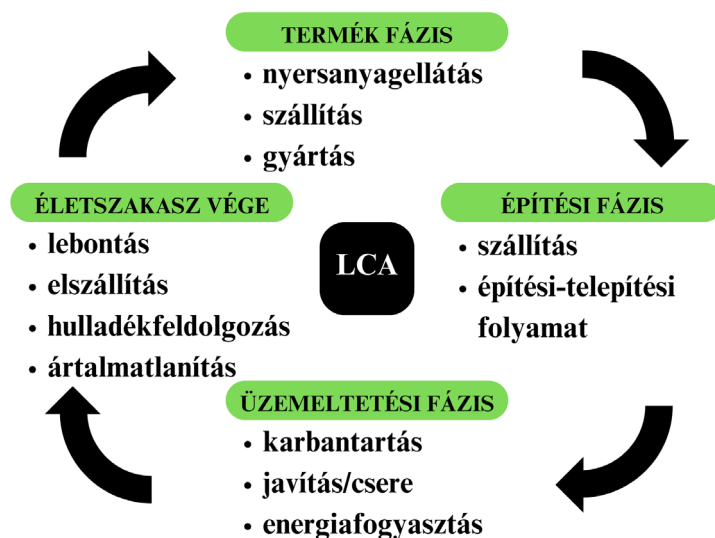


2. ábra: Légköri CO₂-koncentráció és a globális átlaghőmérséklet változása (IEA, 2013).

A hőmérsékleti adatok a NASA (2013) adatai, bázisidőszak: 1951-1980.

A CO₂-koncentráció adatainak forrása a NOAA Earth System Research Laboratory.

A káros környezeti hatásokat nemcsak az építési fázisra lehet számítani, hanem az építmények teljes életciklusára is, azaz a nyersanyagbeszerzéstől vagy a természeti erőforrásokból történő előállításától a végső ártalmatlanításig, esetleg újrahasznosításig. Erre a Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO), amely 172 országban működik, az ISO 14040:2006 szabványban leírja az életciklus-elemzés (LCA) elveit és keretrendszerét (ISO, 2006).



3. ábra: Példa az életciklus-értékelés határaitra (Fenner et al., 2018)

2. A VIZSGÁLT PROJEKT BEMUTATÁSA

A következőkben a vizsgált projekt környezetét, műszaki paramétereit, altalajviszonyait és egyéb sajátosságait mutatom be. A beruházás tárgya egy többszintes szállodaépület, résfalas munkatérhatárolással, belvárosi környezetben. A kivitelezés geotechnikai szakaszában munkagödör kiemelés, alaplemez, víztelenítés és résfalazás készül.

2.1 A TÉRSÉG ALTALAJVISZONYAI

2.1.1 Geológiai adottságok

Az építési helyszín a Dél-Nyírség kistáján található, amely Hajdú-Bihar és Szabolcs-Szatmár-Bereg vármegyében helyezkedik el. Területe 1215 km². A mozaikos kistáján a homoktalajok dominálnak (80%), amelyek között futóhomok talaj, humuszos homoktalaj és barna erdőtalaj fordul elő. Domborzata 97,9-179,3 m közötti tszf-i magasságú hordalékkúpsíkság. A felszín közeli üledékek jelentős része az 1-25 m vastagságban képződött futóhomok. Viszonylag nagy területet fed a nyírvízlaposokhoz kapcsolódó 1-5 m vastag folyóvízi homok („le mosott homok”), mészsizapos homok (Dövényi et al., 2010).



4. ábra: A dél-nyírségi kistáj (Dövényi et al., 2010)

2.1.2 Talajrétegződés

A talajfeltárás és a laboratóriumi vizsgálat alapján a tervezett épület $\pm 0,00$ mRel=119,40 mBf szintjétől viszonyítva az alábbi talajrétegződés jellemzi a területet (AA4 Mérnökiroda Kft., 2020). A réteghatárokat az R1 jelű rajzi melléklet ábrázolja.

a) feltöltés

A fúrások során a terepszint alatt mesterséges feltöltést tártak fel. Vastagsága 2 és 3 m között változik, anyaga építési törmelékes iszapos, homokos talaj. Jellege a korábbi beépítések függvényében változik, visszamaradt szerkezetek előfordulhatnak (pl. pincefal, falalap). Alapozásra nem alkalmas.

b) iszapos agyag, agyagos iszap

A feltöltés alatti fúrásokban homokos, iszapos agyag, agyagos iszap rétegek jelentkeztek. Heterogén állapotú, jellemzően kis teherbírású.

c) (1) iszapos homok-homok

Közepesen tömör-tömör állapotú talaj, amely az összes fúrásban megjelent.

d) iszapos homok-homokos iszap

Az (1) és (2) számozású rétegek között található, lényegesen különböző, laza-közepesen tömör, gyengébb talajjellenállással rendelkező szakasz.

e) (2) iszapos homok-homok

Hasonlóan az (1) jelű réteghez, közepesen tömör-tömör állapotú talaj.

f) (3) homokos iszap-agyagos iszap

Vékony, közepesen tömör-kemény állapotú réteg.

g) (4) homokos iszap-agyagos iszap

A felette lévő rétegekkel ellentétben nem egyenletes talajjellenállású, állapota nagyon laza.

h) agyagos homokos iszap-agyagos iszap

Merev-kemény állapotú réteg.

i) homok

Tömör állapotú homok réteg.

A geotechnikai tervezés kiinduló adatait a talajfizikai jellemzői nyújtják, amelyeket az 1. táblázat foglal össze, ahol:

- ρ_n : a természetes térfogatsűrűség
- φ_k : a belső súrlódási szög karakterisztikus értéke
- c_k : a kohézió karakterisztikus értéke
- $E_{s, k}$: az összenyomódási modulus karakterisztikus értéke
- c : az ágyazási tényező, rugalmasan ágyazott lemezhez

1. táblázat: A rétegek fizikai jellemzői (AA4 Mérnökiroda Kft., 2020)

a rétegek neve	ρ_n [t/m ³]	φ_k [°]	c_k [kPa]	$E_{s, k}$ [MN/m ²]	c [kN/m ³]
a) feltöltés	1,9	22	10	5	-
b) iszapos agyag, agyagos iszap	1,8	22	20	5	6000
c) iszapos homok-homok	1,9	32	0	30	20000
d) iszapos homok-homokos iszap	1,8	28	10	8	-
e) iszapos homok-homok	1,9	32	0	30	-
f) homokos iszap-agyagos iszap	1,9	24	30	10	-
g) homokos iszap-agyagos iszap	1,8	22	10	5	-
h) agyagos homokos iszap-agyagos iszap	1,9	24	30	7	-
i) homok	1,9	33	0	35	-

2.1.3 Talajvízviszonyok

A kistájon a talajvíz 2-4 m között várható, mennyisége nem jelentős. A szulfáttartalom a települések alatt 600 mg/l fölé emelkedhet. Az artézi kutak vízhozamátlagos mérsékelt, közel 200 l/p. Debrecenben több fűrészből 60 °C fölötti, nátrium-kloridos gyógyvizet termelnek, ezt a fürdők hasznosítják (Dövényi et al., 2010).

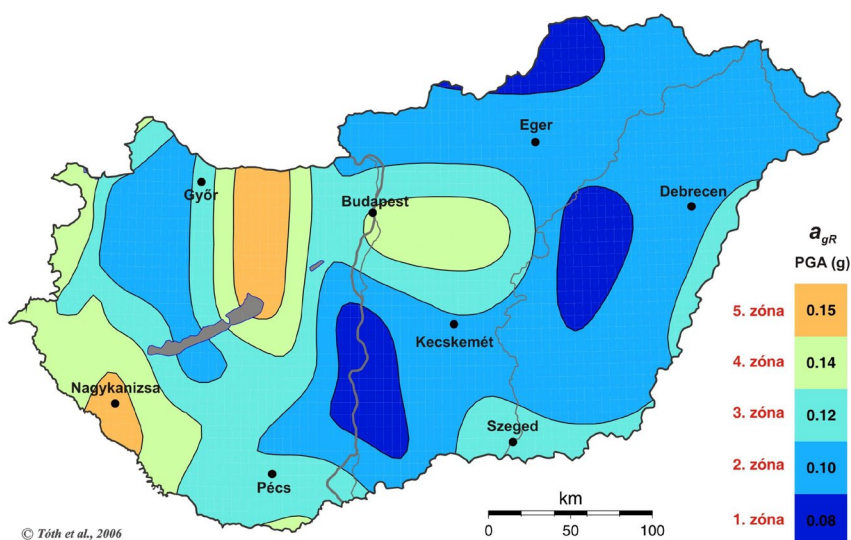
A talajvíz helyzetét különböző hatások befolyásolják, az összefüggő talajvízszint sosem állandó, hanem vízjátéka van. A vizsgált helyszínen a becsült maximális talajvízszint 117,00 mBf (-2,40 mRel), ez az 50 éves gyakorisággal előforduló várható legmagasabb vízszint. A mértékadó talajvízszint 117,30 mBf (-2,10 mRel), ez már egy biztonsági tartalékkal növelt érték. A várható építési talajvízszint magas talajvízállás esetén 116,50 mBf (-2,90 mRel), kivitelezés közben erre kell számítani. A talajvíz nem agresszív (AA4 Mérnökiroda Kft., 2020).

2.1.4 Szeizmicitás

A létesítmény földrengés hatásokra való tervezését a MSZ EN 1998 (EC8) szabvány szerint kell elvégezni. Az MSZ 1998-1:2008 szabvány (TNCR = 475 év visszatérési periódusú és PNCR = 10% túllépési valószínűség értékhez tartozó) szeizmikus zónatérképének értékelése szerint a vizsgált terület a 2. zónába tartozik (Tóth et al., 2006). A településre megadott talajgyorsulási referenciaérték az alábbi képlettel számítható:

$$a_{gR} = 0,10 \cdot g = 0,981 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad [1]$$

Az altalaj az MSZ 1998-1:2008 3.1. táblázata szerinti szeizmikus osztályozás alapján D kategóriába sorolható, laza vagy közepesen tömör, kohézió nélküli talaj.



5. ábra: Szeizmikus zónatérkép (Tóth et al., 2006)

2.2 AZ ÉPÍTÉSI PROJEKT ÁLTALÁNOS BEMUTATÁSA

A mélyépítési munkarész a következő szerkezeti elemeket tartalmazza: résfal, résvezető gerenda, résfal fejgerenda, horgony, illetve dúc. Az ehhez szükséges kivitelezési adatokat a HBM Kft. szolgáltatta.

2.2.1 Helyszíni viszonyok

A kutatás során vizsgált helyszín egy nagyváros központjában lévő ingatlan, ahol egy többszintes hotelépületet valósítottak meg. A területen 1 tömböt alakítottak ki, melynek 2 pinceszintje, földszintje, valamint 7 emelete van. A beépítési telek közel sík, a korábban itt lévő épületek szintén pinceszinttel rendelkeztek, és elbontásra kerültek néhány falmaradvány kivételével.



6. ábra: Az építési telek elhelyezkedése a belvárosban

A projekt tárgyát képező építményt nyugati oldalról egy 10-12 m széles utca határolja, keleti szomszédságában egy különálló középület van, északi homlokzata zárt sorúan csatlakozik a mellette lévő épülethez. A déli irányban található lakóházat 6 szinttel és gépesített garázzsal tervezik átépíteni, de csak majd a vizsgált ingatlan pincefödémének elkészülése után.

A kivitelezési terület átnézeti helyszínrajza az R2 jelű rajzi mellékleten látható.

2.2.2 A mélyalapozás és a munkatérhatárolás szükségessége

A helyszíni viszonyok ismeretében tervezhető a megfelelő alapozási rendszer, amelyeknek két kategóriája van: a sicalapok és a mélyalapok. Mélyalapozás esetén egy teherkövetítő elemet terveznek az épület és a nagyobb mélységben lévő teherbíró réteg közé, főbb típusai: cölöpalapozás, résfalas alapozás, kút- és szekrényalapozás. Az utóbbi évtizedekben egyre inkább elterjedtek a mélyalapozási rendszerek, ennek hátterében több indok áll.

- Nagyobb terhelésű építményeket kell alapozni, ezért meg nem engedhető süllyedések keletkeznének sicalapozás esetén.
- A jó altalajjal rendelkező területek elfogytak, így kevésbé kedvező részeket jelölnek ki helyszínek, ilyen például a feltöltés, ahol teherbíró réteg csak mélyebben van.
- Amennyiben magas az építési talajvízszint, a sicalapok kivitelezése költségesebb lehet.
- A mélyalapozási technológiák gyorsan fejlődnek, emiatt sokszor gazdaságosabbak és gyorsabban kivitelezhetőek, mint a hagyományos sicalapozások. (Farkas, 2008).

A munkatérhatárolás szüksége azzal indokolható, hogy amennyiben felszín alatti építményrész készül, akkor mélyebb kiemelészt kell alkalmazni. Ez napjaink legtöbb beruházásra jellemző, hiszen nagy igény van a mélygarázsok kialakítására, a jelenleg vizsgált épület esetében is ezért végeznek munkatérhatárolást. Ez létrehozható részüvel, dúcolással, talajszegezéssel vagy réselt falakkal, a választott módszert befolyásoló tényezők:

- Rendelkezésre álló terület: a legegyszerűbb eljárás a részsűs kialakítás, azonban ennek nagy a helyigénye, így sűrűn beépített környezetben nem opció.
- Talaj: kohézió nélküli szemcsés talaj esetén kisebb az állékonyság, valamint feltöltésre tilos alapozni, hanem egy mélyebben fekvő, teherbíró réteget kell választani.
- Talajvízviszonyok: a mélységgel együtt növekszik a talajvíz megjelenésének valószínűsége, ezért a víztelenítésről, talajvíz kizárásáról szintén gondoskodni kell.
- Létesítmény méretei: többszintes vagy nagy alapterületű pince, mélygarázs esetén komplexebb igények jelentkeznek.
- Rendelkezésre álló eszközök: bizonyos technológiákkal, például réseléssel kialakítható munkatérhatárolás és alapozás is, érdemes ugyanazt a vezérgépet alkalmazni ezekhez.

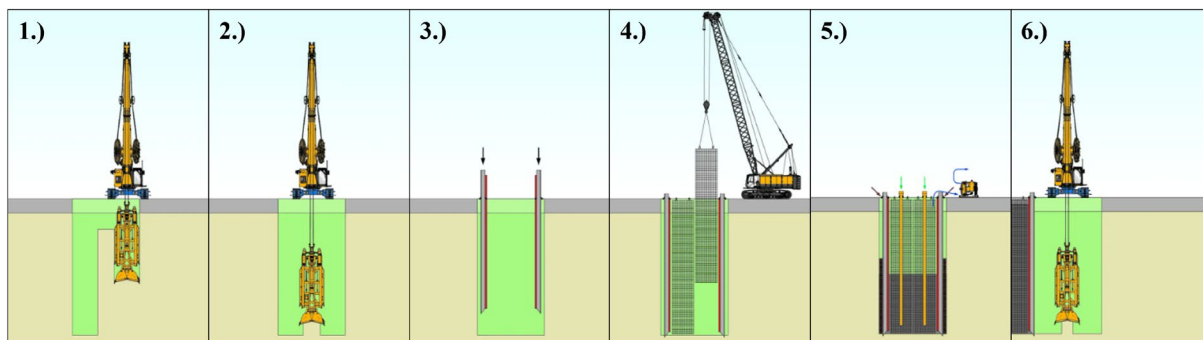
Az építmények alapozásának tervezésekor az alapozási rendszerrel együtt figyelembe kell venni a munkatérhatárolást és a víztelenítést (Farkas, 2008).

2.2.3 A résfal és a munkatérhatárolás technológiai leírása

A réselési technológiával 40-150 cm vastag, tetszőleges hosszúságú és akár 120 m mély vasbeton szerkezetek készíthetők az altalajban. Leggyakoribb alkalmazási területe a kvázi vízzáró, mély munkatérhatárolás, ezenkívül alkalmazható nagy teherbírású mélyalapozásként, más néven baretként. A kivitelezés során a fal méreteinek megfelelő rést kimarkolják a talajban. Ehhez legtöbbször réselőkanalat alkalmaznak (ld. 7. ábra), amely mechanikus vagy hidraulikus működésű, de speciális projekteknél marótárcsás, folyadék szállítású berendezést, Hydrofraisert is használhatnak. A földkiemelés során az üreg állékonyságát bentonit zagggyal segítik, majd behelyezik a vasalásként szolgáló betonacél armatúrát, végül pedig a víz alatti betonozás szabályai alapján kiöntik a rést (HBM Kft., 2024).

A résfal több réstábla sorozatából áll. A kivitelezés történhet szakaszos réseléssel, ahol előbb minden második réstábla készül el, majd ezt követik a közbenső panelok. Illetve épülhet a réstáblák egymás utáni, folyamatos kialakításával. A kivitelezés menetét a 7. ábra szemlélteti, lépései a következők.

- 0.) Résvezető gerenda készítése, amelynek célja, hogy segíti a réselőgép vezetését, támasztja a talaj felső részét, illetve megakadályozza a zagy szivárgását a feltöltésben.
- 1.) Réstáblák kieszedése és megtámasztása bentonitos, magas montmorillonit tartalmú zagggyal.
- 2.) A táblák közepének kiemelése, amelynek sorrendjét az indokolja, hogy a kanál két oldalán közel szimmetrikus földnyomásnak kell lenni.
- 3.) Szakaszoló elemek besüllyesztése
- 4.) Betonacél armatúra elhelyezése
- 5.) Betonozás
- 6.) Folytatás következő réspanel kiemelésével



7. ábra: A réselés technológiájának lépései (Forrás: Bauer)

Ha a résfal állékonyságát növelni kell, akkor egyéb szerkezetekkel egészítik ki a munkatérhatárolást. Egyik lehetőség az előfeszített, fűrt és injektált talajhorgony alkalmazása, amely a földmegtámasztó falszerkezet várható mozgását úgy csökkenti, hogy a húzóerőt a mögötte lévő talajra vagy kőzetre továbbítja. A módszer során a falon keresztül 15-30° hajlású furatokat készítenek, amelyekbe acél anyagú feszítőpázmákat helyeznek. Ezt követően a pászma környékén lévő talajt cementhabarccsal injektálják, majd szilárdulás után ennek segítségével a falszerkezetet a talajhoz feszítik egy speciális puskával (HBM Kft., 2024).

A 8. ábrán kivitelezési fázisokban lévő talajhorgonyokat lehet látni. A horgony fő részeit pedig az R2 rajzi melléklet mutatja be.



8. ábra: Horgonyzógép és talajhorgonyok fúrás után, valamint megfeszítve (saját fénykép)

Az egyensúly biztosítása érdekében csődúcokat is lehet alkalmazni, amelyek a munkatér sarkainál lévő vagy egymáshoz közel eső szemközti falszakaszok támaszrendszereként működik. Hátránya, hogy a területen zajló munkát nehezíti, viszont előnye, hogy alacsony az élőmunka igénye és sok alkalommal újra lehet használni az elemeket. Valamint a munkatérhatárolás megerősíthető löttbetonnal, amelyet jellemzően a horgonyokhoz hasonló, de kisebb teherbírású talajszegekre erősített betonacél hálóra rögzítenek (Farkas, 2008).



9. ábra: Acél dúcolatok és löttbeton fal (Móczár, 2023)

2.2.4 A tervezett szerkezetek

A munkatérhatárolás az altalajba befogott vasbeton résfallal valósul meg, kihorgonyzással és dúcolással együtt. Ez a résfal végleges szerkezet lesz, amely mélyalapozásként a függőleges teherviselésben aktív szerepet tölt be, valamint vízzáró módon határolja a pinceszintet. A kivitelezés során kétoldali részvezető gerendát, valamint a résfalat összefogó fejgerendát kell kialakítani. Az utca felőli oldalon, valamint a telek keleti oldalán szögezett löttbeton megtámasztást terveznek, acélhálóval és talajszegekkel együtt.

A résfal két sor megtámasztást kap, a felső sor kizárólag dúcolással, az alsó sor horgonyzással és dúcolással valósul meg. A dúcolatok S355 anyagminőségű és HEB300 szelvényű acélból készülnek. A horgonyok 3 pászmából állnak, a horgony szabad hossza 10,5 m, befogási hossza 7,0 m. Befogása az iszapos homok-homok rétegben található, kivitelezése víz alatti technológiával történik.

A horgonyról és a dúcolatokról mutat be egy tervrészletet az R1 jelű rajzi melléklet.

2.3 AZ EFFC KALKULÁTOR LEÍRÁSA

TDK-kutatásomban a projekt mélyépítési részében kibocsátott üvegházhatású gázok mennyiségét számítottam ki. Azért fontos ennek a szakágnak a karbonlábnyom-számítása, mert ebben a munkafázisban jelentős mennyiségű betonozás történik. A vizsgálathoz az EFFC és a DFI (European Federation of Foundation Contractors, Deep Foundations Institute) által tervezett kalkulátort használtam. 2014-ben a két szervezet közösen dolgozta ki a módszertant, speciálisan a mélyalapozások és talajjavítások számszerűsítése érdekében. Azóta folyamatosan fejlesztik, pontosítják a programot, a legújabb verziót 2023-ban adták ki.

2.3.1 Alapelv

A karbonlábnyom-elemzés alapelve megegyezik a többi szabványban használt alapelvvel. Az alábbi képlet mutatja, hogy a tevékenységi adatok és a kibocsátási tényező szorzata eredményezi a kibocsátás nagyságát (Carbone 4, 2014).

$$\text{karbonlábnyom} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot EF_i \quad [2]$$

Ahol:

- $\sum_{i=1}^n$: megadja a számítás körét, azaz, hogy milyen tevékenységet kell figyelembe venni
- A_i : a tevékenységi adat, pl.: földgáz [kWh], acél [tonna], szállítás [km]
- EF_i : a kibocsátási tényező (emission factor), amelynek segítségével az egyes tevékenységek kibocsátását a globális felmelegedési potenciáljuk (GWP) alapján egyenértékű szén-dioxid-tonna egységre (CO₂eq) alakítja át.

Az EFFC programja a leggyakrabban használt GWP-adatbázison alapszik, de ezenkívül elismeri az egyedi adatok alkalmazását is, ha azok relevánsabbak (Carbone 4, 2014). Kutatásom során felülvizsgáltam a tényezőket, és naprakész, helyi paraméterekkel frissítettem.

Az EFFC kalkulátora kompatibilis mind a GHG Protocol, Bilan Carbone, PAS 2050, valamint az ISO 14067 szabványokkal.

2.3.2 Kibocsátási források

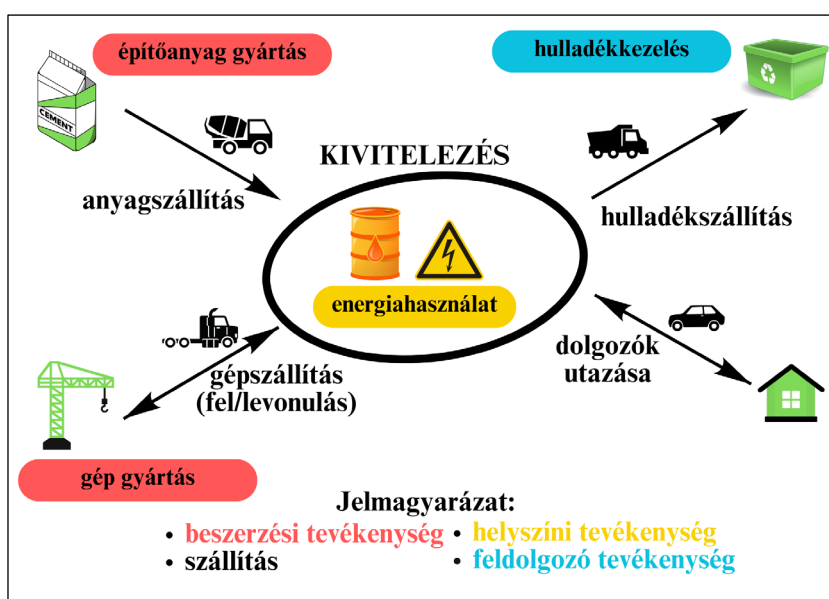
A kalkulátor felhasználási köre többféle geotechnikai eljárásra kiterjed, például fűrt cölöpözésre, résfalakra, injektálásra, horgonyzásra, talajszegekre. A fejlesztők minden technológia esetén példaszámításokat végeztek már megvalósult projektekből származó tapasztalatokkal. Így a különböző kibocsátási forrásokat meg lehetett becsülni nagyságrendileg és osztályozni is tudták azokat. A kibocsátásokat két kategóriába csoportosították. Elsődleges források az olyan ÜHG-ok, amelyek az adott technika globális lábnyomának legalább 5%-át jelentik. A másodlagos források az eljárás teljes lábnyomának kevesebb mint 5%-át teszik ki. Továbbá mindegyik esettanulmány során igazolták, hogy az elsődleges kibocsátások összessége a komplett szénlábnyom több mint 90%-át okozzák (Carbone 4, 2014).

Elsődleges források:

- Az építőanyagok gyártása során keletkező szén, legtöbbször a cement és az acél miatt.
- Az építkezés helyén felhasznált energia, tehát a hálózati áram, gázolaj, benzin hatása.

Másodlagos források:

- Az anyagok szállítása a helyszínre, amely történhet teherautóval, vonattal, hajóval.
- Az emberek utazása az építési helyszínre.
- A berendezések szállítása a projektre.
- A berendezések gyártásának kibocsátása, amellyel az amortizáció miatt kell számolni.
- A hulladékszállítás az építkezésről a hulladékkezelő telephelyre.
- A hulladékkezelés károsanyag-kibocsátása.



10. ábra: ÜHG-kibocsátások a mélyépítési projekteknél (Carbone 4, 2014)

3. SZÁMÍTÁSOK

A projekt során keletkező szén-dioxid-kibocsátás vizsgálatához a kivitelező cég, a HBM Kft. szolgáltatatta az adatokat és a tervrajzokat. Ezek tanulmányozásával elkészítettem a számítást, amelyet kétféle kategóriára osztottam a technológiáknak megfelelően. Egyik a réselés, ez tartalmazza a résfal, barett, résvezető gerenda, fejgerenda és a dúcolat adatait, a másik pedig a talajhorgonyzás fúrással, injektálással, illetve feszítéssel együtt. Erre azért van szükség, mert az alapértelmezett paraméterek a beállított módszerek függvényében változnak.

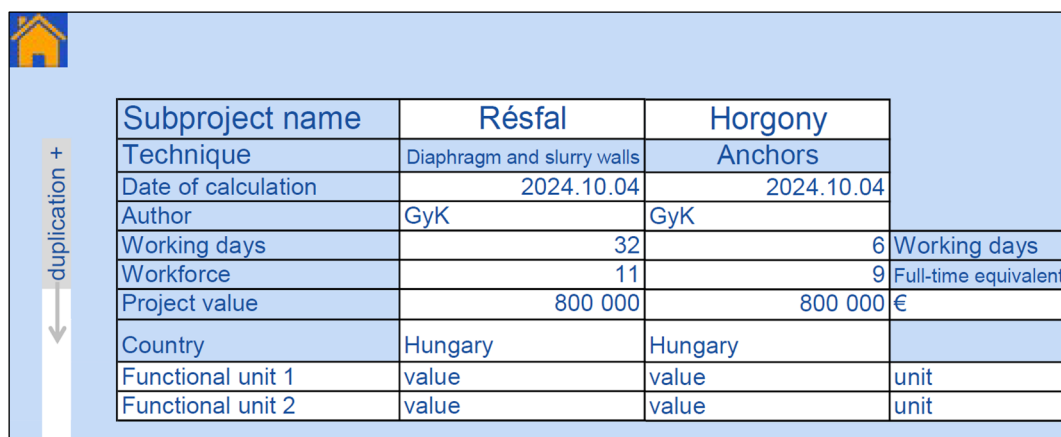
Kutatásom folyamán a globális adatbázis helyett hazai kibocsátási tényezőkkel pontosítottam a számolásokat. Ezeknek a gyártók EPD-nyilatkozataival (Environmental Product Declaration, környezeti terméknyilatkozat) és szakirodalmi forrásokkal jártam utána, illetve a kivitelező gyakorlata alapján aktualizáltam.

3.1 ÁLTALÁNOS BEÁLLÍTÁSOK

A számítás folyamán fontos kiindulási adatok a következők:

- munkanapok száma
- munkaerő, az adott folyamatot hány fős brigád végezte
- a projekt pénzben kifejezett értéke, ezáltal összehasonlíthatóak az egyes beruházások költségarányos kibocsátásai
- kivitelezés országa, amely például az energiaárak normáira vannak hatással

A károsanyagok mennyiségét tCO₂e egységben fejezik ki, amely ekvivalens egy tonna szén-dioxiddal egyenlő emisszióval. Viszonyításként a gáz kb. 505 m³ térfogatnak felel meg, amely egy 2,75 m belmagasságú, 180 m² alapterületű nagyobb családi ház légterével azonos.



Subproject name	Résfal	Horgony	
Technique	Diaphragm and slurry walls	Anchors	
Date of calculation	2024.10.04	2024.10.04	
Author	GyK	GyK	
Working days	32	6	Working days
Workforce	11	9	Full-time equivalent
Project value	800 000	800 000	€
Country	Hungary	Hungary	
Functional unit 1	value	value	unit
Functional unit 2	value	value	unit

11. ábra: Általános beállítások

3.2 ÉPÍTŐANYAGOK

Elsőként a felhasznált építőanyagok gyártásából származó CO₂ mennyiségét vizsgáltam meg. Ez részalazás esetén elsősorban a betont és annak fő alkotóelemét, a cementet jelenti, valamint az armatúrákhoz használt betonacélt és a dúcolatok acélcsöveit. Horgonyzásnál pedig a cementhabarccsal és a horgonypásmákkal kell számolni.

A kiindulási paramétereket a tervrajzok valamint a betonreceptúrák adták. A számításokat a 3-5. táblázat foglalja össze.

Az építőanyagok, valamint az egész projekt tekintetében a legfőbb károsanyag forrás a cementgyártás, annak bányászati, őrlési, égetési folyamataival együtt. Ez utóbbi lépés nemcsak magas hőmérsékletet igényel, hanem fosszilis tüzelőanyagokat használ, továbbá a mészkő széntelenítése kémiai reakciókkal nagy CO₂ emissziót okoz. A cementgyártás a globális antropogén ÜHG-kibocsátás több, mint 4%-árt felelős (Friedlingstein et al., 2023).

A cementgyártók katalógusait tanulmányozva látható, hogy a portlandcement széntartalma átlagosan 900-1000 kgCO₂e/tonna között mozog, az egyéb összetevők kibocsátási tényezője pedig 100 kgCO₂e/tonna alattiak (Carbone 4, 2014). Ezért a betonreceptúra erősen befolyásolja a kibocsátás mértékét.

2. táblázat: Cementtermékek fajlagos CO₂-kibocsátása (Duna-Dráva Cement Kft., 2024)

cementtermék	nettó fajlagos CO ₂ kibocsátási érték [kg CO ₂ /tonna cement]
CEM I 52,5 N	665
CEM II/A-S 42,5 N	599
CEM II/A-LL 42,5 N	596
CEM II/B-LL 42,5 N (2022 év)	528
CEM II/B-S 42,5 N	548
CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R	547
CEM III/A 32,5 N-MSR	462
CEM III/B 32,5 N-LH/SR	365

Az acélt, mint a másik leggyakoribb építőanyagot, a vizsgált projektben betonacél armatúra, dúcolat acélcső, illetve horgonypászma formában alkalmazták. Az armatúraként használt acélok 100%-ban újrahasznosított anyagból készülnek, kibocsátási tényezőjéhez egyedi értéket, a gyártó terméknyilatkozatát vettem figyelembe, amely 424 kgCO₂e (Bay Zoltán Nonprofit Kft., 2024). Ilyen esetben üvegházhatású gázok a tüzelőanyagokból keletkeznek, amely olvasztáshoz, formázáshoz és hengerléshez egyaránt szükségesek.

Az alumíniumot korlátlan alkalommal újra lehet hasznosítani, amely a kristályszerkezetének köszönhető, mivel ez segít megolvasztani és átalakítani anélkül, hogy az alapvető tulajdonságai megváltoznának, ellentétben például a műanyagok többségével (IAI, 2024).

Ha a kivitelező cég által megrendelt acélokról nem tanúsítják, hogy mekkora hányadban tartalmaznak újrahasznosított anyagot, akkor is lehet 70% értéket feltételezni. A horgonypáaszma esetén ezt alkalmaztam. A dúcolatokat pedig újra felhasználják, ezért a gyártás szempontjából nem számottevő az emisszió, majd későbbi fejezetben kell értékelni, mint amortizációt.

3. táblázat: A talajhorgonyok beton kibocsátása

	horgony	kgCO ₂ e
habarcsmennyiség	10 m ³	-
cementtípus	CEM II/A	-
cementtartalom	1125 kg/m ³	6 488
víztartalom	625 kg/m ³	1
		Σ 6 489

4. táblázat: A réselés beton kibocsátása

	résfal	kgCO _{2e}	résvezető	kgCO _{2e}	fejgerenda	kgCO _{2e}
betonmennyiség	1261 m ³		72 m ³		62 m ³	
cementtípus	CEM II/A		CEM II/A		CEM II/A	
cementtartalom	400 kg/m ³	292 345	230 kg/m ³	9 598	340 kg/m ³	12 218
adalékanyag		4 928		536		258
homok		6 053		0		304
víz		34		2		2
mészkő		202		29		10
		Σ 303 562		Σ 10 165		Σ 12 792
Σ 326 519 kgCO _{2e}						

5. táblázat: A betonacél kibocsátása

	résfal + barett	kgCO _{2e}	fejgerenda + résvezető	kgCO _{2e}	horgony	kgCO _{2e}
acélmennyiség	125,6 t	53 254	13,45 t	5 703	1,57 t	2 328
újrahasznosított hányad	100%		100%		70%	
Σ 61 285						

3.3 HELYSZÍNI ENERGIAFELHASZNÁLÁS

Ebben a fejezetben csak a projekt helyszínén keletkező szén-dioxid-kibocsátással foglalkozok, a szállításhoz vagy a felvonuláshoz szükséges energiát egy másik életciklusban és egy másik szakaszban veszem figyelembe. A mélyépítés során felhasznált energia két forrásból származik:

- a) üzemanyag, amely jelen esetben dízelolaj
- b) villamos energia, amely a munkagépek üzemeléséhez és mozgásához szükséges

Az üzemanyag CO₂-kibocsátásához a munkagépek által felhasznált dízelolaj normáiból kell kiindulni [liter/nap], ezt meg kell szorozni a munkanapok számával [nap], illetve a kibocsátási tényezővel [kgCO₂e/kWh]. A számítások adatai a 6. táblázatban láthatóak.

Ez az érték figyelembe veszi az üzemanyag elégetését (scope 1, közvetlen kibocsátás), valamint a dízel előállításából keletkező ÜHG mennyiséget (scope 3, egyéb közvetett kibocsátás). Az EFFC adatbázisát az ADEME által javasolt értékkel frissítettem.

6. táblázat: Az üzemanyag kibocsátása

	réselőgép (résfal)	daru (résfal)	horgonyzógép
fogyasztás [liter/nap]	240	40	70
munkanap	32	32	4
felhasznált üzemanyag [liter]	7680	1280	280
EF (forrás: ADEME)	2,51	2,51	2,51
kgCO ₂ e	19277	3213	703

Az áramfogyasztást a gépek műszaki teljesítményéből lehet számítani [kWh/nap], amelyet megszorozva a munkanapok számával [nap], majd az emissziós tényezővel [kgCO₂e/kWh], elérhető a CO₂-kibocsátás mennyisége. A kibocsátási tényező az egyes országok erőműveinek függvényében változó, és a hálózaton keletkező szállítási veszteségeket is figyelembe veszi. Az EFFC adatbázisát a magyar gyakorlatban használt számmal frissítettem. A villamos energia kibocsátását a 7. táblázat foglalja össze.

A villamos energia kibocsátás viszonylag alacsony, ezt a többi esettanulmány is bebizonyította, így az erre való áttérés jó lehetőség a károsanyagok csökkentése érdekében (Carbone 4, 2014).

7. táblázat: A villamos energia kibocsátása

	résfal	horgony fűrés	horgony feszítés
teljesítmény [kWh/nap]	160	100	30
munkanap	32	4	2
áramfogyasztás [kWh]	5120	400	60
EF (forrás: IEA, ADEME)	0,2725	0,2725	0,2725
kgCO ₂ e	1395	109	16

3.4 MÁSODLAGOS KIBOCSÁTÁSI FORRÁSOK

Ebben a fejezetben olyan tevékenységeket vizsgálunk, amelyek kibocsátásai a másodlagos források közé tartoznak. Ezek becslésére kétfajta módszer használható:

- A komplett elsődleges kibocsátás bizonyos százalékaival. Ez az arány a mintapéldákból számított mennyiségek átlaga, azaz közvetlen CO₂-kibocsátási számítás.
- Adott másodlagos forráshoz kapcsolódó szabványosított tevékenységi adattal.

Teherszállítás:

A teherszállítás legtöbbször közúton történik, erre működik a legpontosabban a program, de ritkábban légi vagy tengeri közlekedés is előfordul. A károsanyag emisszió függ a jármű típusától (merev vagy csuklós dömper), a terhelhetőségétől [tonna], a szállított anyagmennyiségtől [tonna], továbbá a szállítási távolságtól [km], ezek együttese befolyásolja a megtett utak számát is. Fontos tényező az üres visszaút aránya [%], amely attól függ, hogy a gépek elvisznek-e valami egyéb dolgot az építkezésről, vagy csak megtöltés nélkül indulnak tovább. Környezetvédelmi okokból érdemes ezt a százalékot minél alacsonyabban tartani, minél jobban kihasználni a fuvarozást.

A keverés helyszíne szintén hatással van a kibocsátásra, amennyiben a kivitelezési területen állítják elő, csak az egyes frakciók szállítási szénlábnyomát kell figyelembe venni. Ezzel szemben, ha a betonüzemben készítik, még az üzem-építkezés közötti távolság is fontos. Jelen esetben és a projektek többségénél a réseléshez szükséges betont egy üzemből rendelik, a horgonyzáshoz kellő habarcsot a helyszínen keverik.

A beton és acél teherszállítási kibocsátása a 8-9. táblázatban látható. A kibocsátási tényezők tartalmazzák az üzemanyag előállítását és elégetését, illetve a járművek gyártását és amortizációját.

8. táblázat: A beton szállítási kibocsátása

anyagok	távolság [km]	üres visszaút	EF	résfal		résvezető		fejgerenda		talajhorgony	
				fuvarok [db]	kgCO ₂ e	fuvarok [db]	kgCO ₂ e	fuvarok [db]	kgCO ₂ e	fuvarok [db]	kgCO ₂ e
beton	20	100%	1,21	158	7 670	9	437	8	388	-	-
cement	20	100%	1,21	68	3 301	3	146	3	146	2	97
adalékanyag	20	100%	1,13	83	3 768	9	409	5	227	-	-
homok	20	100%	1,13	68	3 087	0	0	4	182	-	-
mészkő	300	100%	1,13	2	1 362	1	681	1	681	-	-
					Σ 19 188		Σ 1 673		Σ 1 624		Σ 97

9. táblázat: Az acél szállítási kibocsátása

	távolság [km]	üres visszaút	EF	fuvarok [db]	kgCO ₂ e
résfal + barett	150	100%	1,13	9	3 064
fejgerenda + résvezető	150	100%	1,13	1	340
dúcolat	220	100%	1,13	4	1 997
					Σ 5 401
horgonypászma	150	50%	1,13	1	255

Személyszállítás:

Ebben a szakaszban azt kell vizsgálni, hogy az emberek hogyan jutnak el a munkavégzés helyszínére. Ez nem függ a geotechnikai eljárástól, csak az építési terület pozíciójától és a dolgozók összetételétől. Érdekes az alapértelmezéseket átírni, mert erősen helyzetfüggők a paraméterek. Figyelembe kell venni a napi ingázást az otthon és a munkahely között, a hétvégi hosszabb hazautazást, illetve a jármű típust, amely lehet személygépkocsi, autóbusz, vonat vagy akár repülőgép. A résfalazás közbeni személyszállítás emisszióját a 10. táblázat mutatja be.

A kibocsátási tényezők magukba foglalják az üzemanyag előállítását és elégetését, valamint a járművek gyártását. A felszabadult szén-dioxid mennyisége az alábbi képlettel számítható:

$$\text{fuvarszám} \cdot \frac{\text{munkanapok száma}}{\text{minden X. napi utazás}} \cdot (2 \cdot \text{távolság egy útra}) \cdot \text{EF} = \text{kgCO}_2\text{e} \quad [3]$$

10. táblázat: Személyszállítás kibocsátása a résfalazás fázisában

jármű	fuvarok száma	minden X. napon	távolság egy útra [km]	EF (Defra 2022)	kgCO ₂ e
autó	3	1	20	0,1983	761
autó	3	7	200	0,1983	1 088
autó	1	2	150	0,1983	952

További másodlagos kibocsátási források:

A projekt során még néhány egyéb forrásból is származik károsanyag-kibocsátás. Ezek hatását az egyszerűsítés kedvéért az elsődleges kibocsátások bizonyos százalékával kell figyelembe venni, az arány a technológia függvényében változik. Ez az automatizálás azért engedhető meg, mert összességében nincsenek nagy hatással a projekt globális karbonlábnyomára. A további három féle másodlagos forrás kibocsátását a 11. táblázat foglalja össze.

11. táblázat: Egyéb másodlagos források kibocsátása

	résfal		horgony	
$\sum \text{kgCO}_2\text{e}$ elsődleges forrásból	409 360		9 645	
másodlagos források	arány	kgCO ₂ e	arány	kgCO ₂ e
a) fel- és levonulás	1,189%	4 868	0,989%	95
b) amortizáció	1,056%	4 322	1,521%	147
c) hulladékok	0,646%	2 643	0,147%	14

A fel-és levonulás keretén belül az eszközök és minden egyéb berendezés építési helyszínre való szállítását kell megvizsgálni.

Az amortizáció az eszközök értékcsökkenését jelenti, mivel a gépparknak folyamatosan csökken a hátralévő élettartama, ezért a gyártásuk során felszabadult szén-dioxid mennyiségét el kell osztani a projektek között.

A hulladékok, amelyek a kivitelezésen keletkeznek, döntő többségében inert anyagok, és hulladéklerakókba kerülnek.

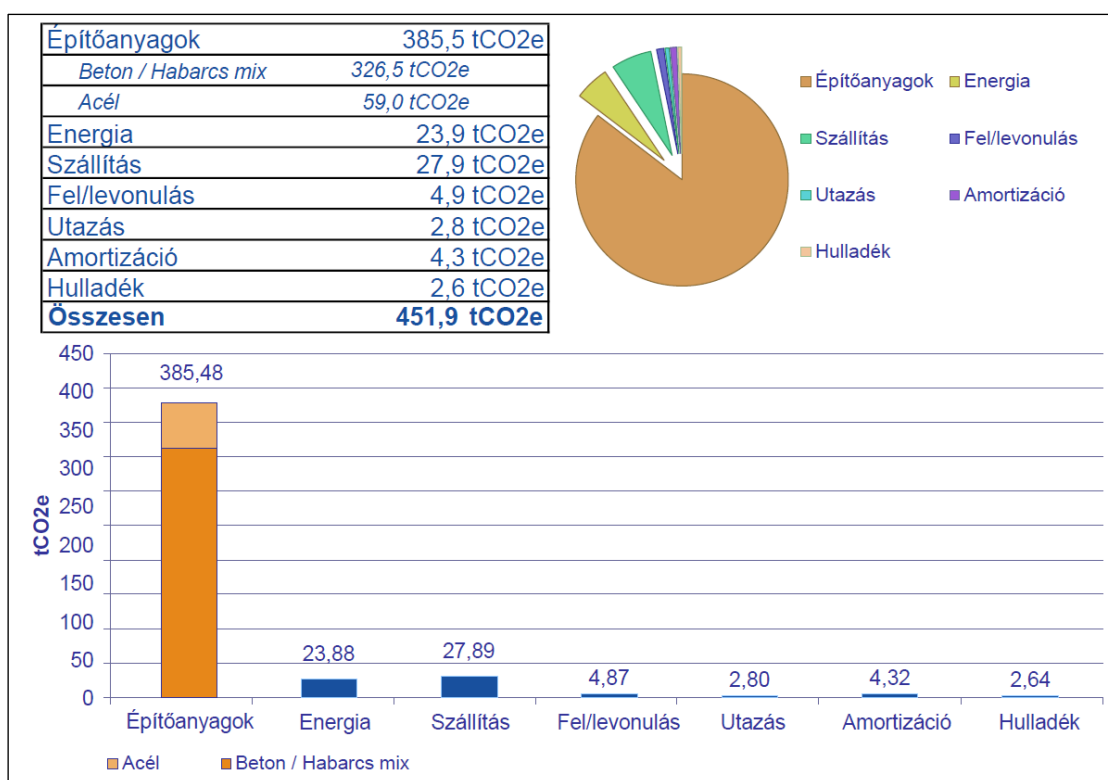
4. EREDMÉNYEK

A kibocsátott karbonmennyiség értékeléséhez mindkét technológia esetén kiszámítottam a szén-dioxid egyenértékeket. Ezeket érdemes összehasonlítani tényezőnként, hogy látható legyen az egyes források aránya. Ebben a fejezetben a számítások eredményeit ismertetem az EEFC/DFI programja által generált diagramok segítségével.

A mértékegység érzékelése miatt, néhány példa az egyéb emberi tevékenységekből származó CO₂ mennyiségeire:

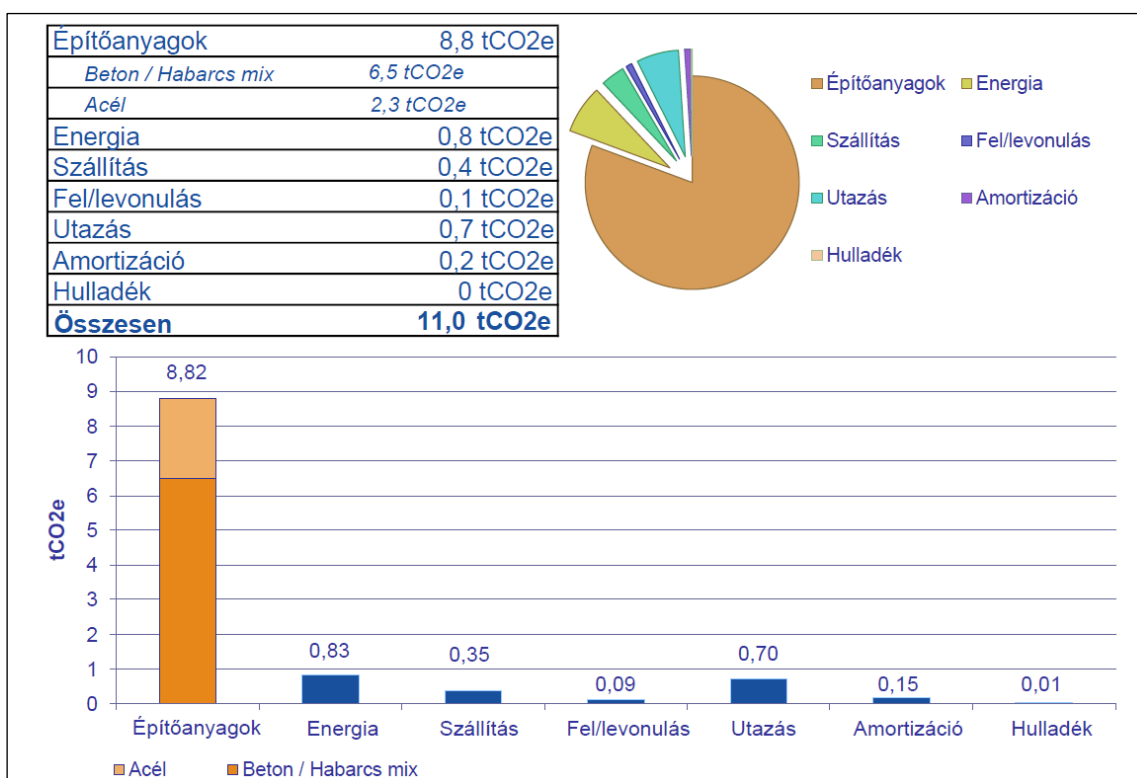
- a) egy átlagos amerikai ember éves szén-dioxid-lábnyoma: 15 tCO₂e/év (Friedlingstein et al., 2023)
- b) egy átlagos magyar ember éves szén-dioxid-lábnyoma: 6,6 tCO₂e/év (MNB, 2024)
- c) egy új személygépkocsi átlagos kibocsátása: 108,2 gCO₂e/km (EEA, 2023)
- d) egy hektárnyi erdő átlagosan 1,57 millió tCO₂e/év szén-dioxidot köt meg (EKÜ, 2021)

A réselés munkafázisai (résfal, résvezető, fejgerenda) által kibocsátott szén-dioxid mennyisége:



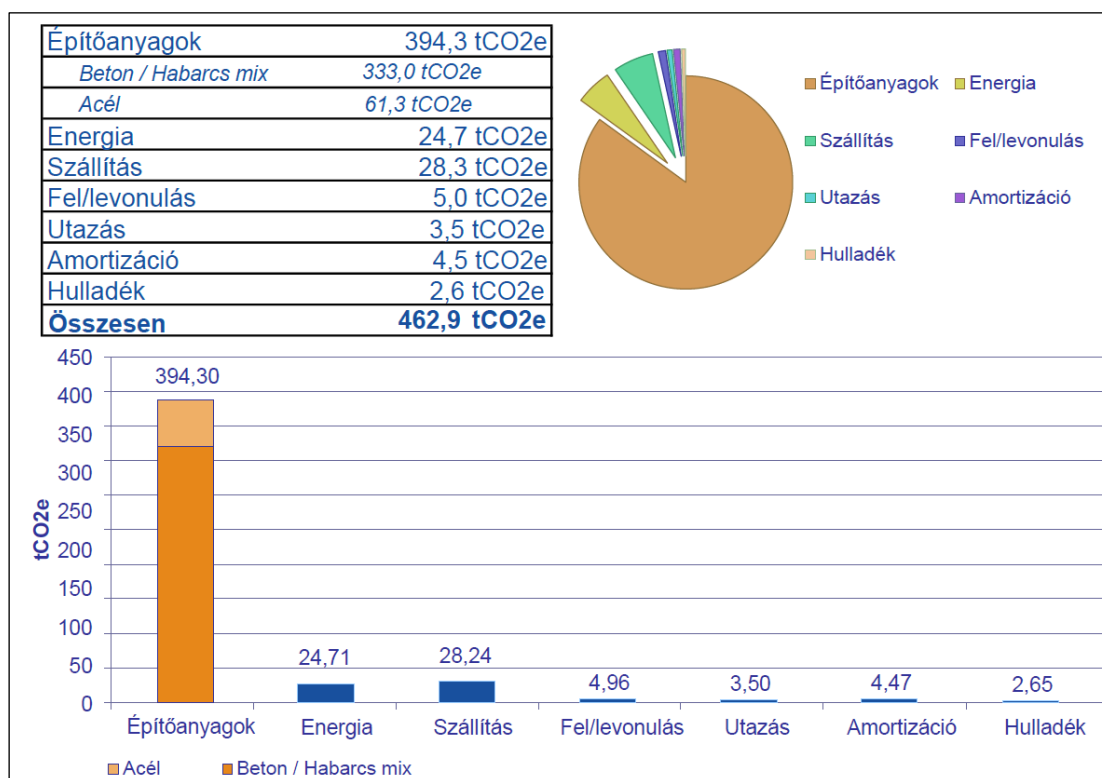
12. ábra: A réselés karbonlábnyoma

A horgonyzás (fúrás, injektálás, feszítés) által kibocsátott szén-dioxid egyenértékek:



13. ábra: A horgonyzás karbonlábnyoma

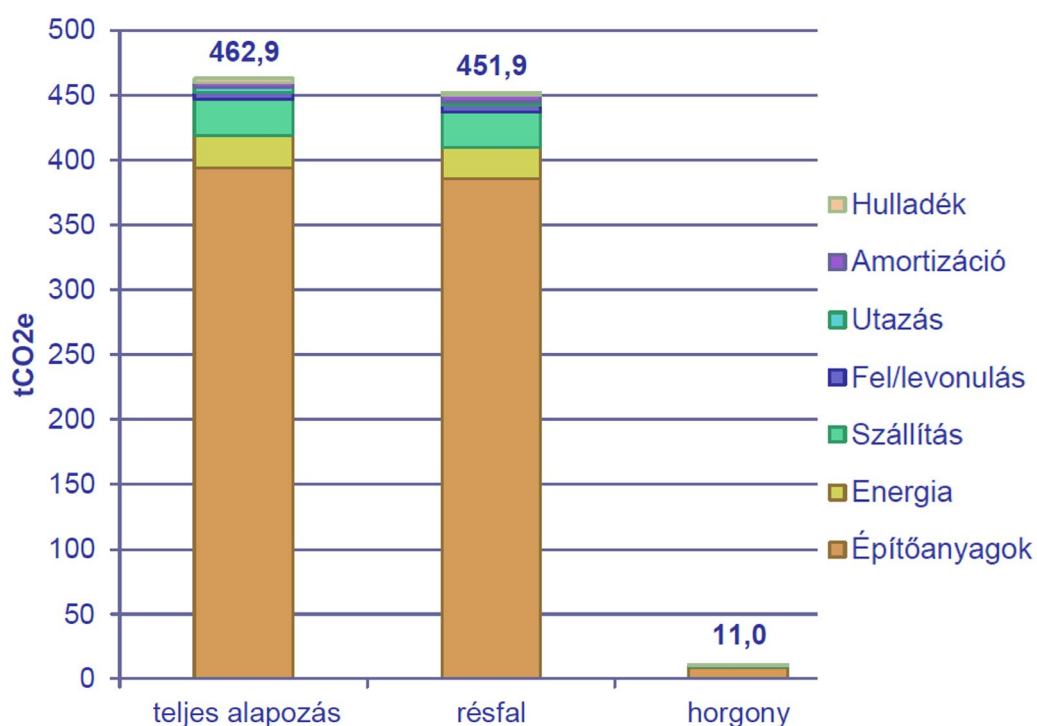
A mélyépítési szakág szén-dioxid-kibocsátása:



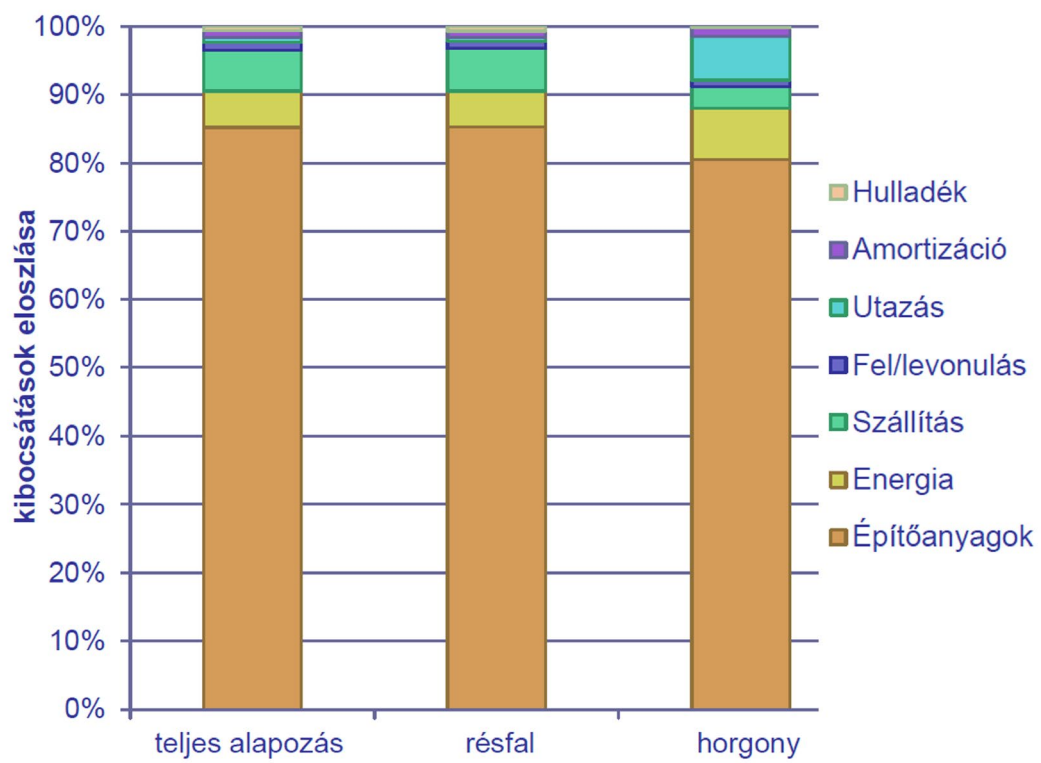
14. ábra: A hotel mélyépítési karbonlábnyoma

12. táblázat: Az eredmények összefoglalása

	résfal	horgony	teljes alapozás	
Építőanyagok	385,5	8,8	394,3	tCO ₂ e
Energia	23,9	0,8	24,7	tCO ₂ e
Szállítás	27,9	0,4	28,3	tCO ₂ e
Fel/levonulás	4,9	0,1	5,0	tCO ₂ e
Utazás	2,8	0,7	3,5	tCO ₂ e
Amortizáció	4,3	0,2	4,5	tCO ₂ e
Hulladék	2,6	0,0	2,6	tCO ₂ e
Összesen	451,9	11,0	462,9	tCO ₂ e
Munkanapok	32	6		nap
Munkaerő	11	9		fő



15. ábra: A projekt teljes CO₂-kibocsátása



16. ábra: A kibocsátási források eloszlása

5. DISZKUSSZIÓ

A vizsgálat eredményeinek alapján a legfőbb károsanyag forrás az építőanyagok előállítása. A résfalas technológiánál ez az arány 85%, a horgonyzásnál 80%. A korábbi statisztikák szerint az energia is elsődleges kibocsátás, azonban ez kisebb mértékben befolyásolja az összes keletkező CO₂ mennyiségét, résfalazásnál 5,3%, horgonyzás esetén 7,6%.

Az építőanyagok csoportján belül legtöbbször betont és acélt használnak a geotechnikában. Ebben a tanulmányban résfalazás esetén 85%-15%, horgonyzás esetén 74%-26% volt a megoszlás. Ezért a legsürgetőbb intézkedéseket a beton kibocsátásának redukálására kell bevezetni. Alternatív receptúrákkal számos kutató folytat kísérleteket, ezzel például újrahasznosított adalékanyagokra keresve megoldást (Abed és Nemes, 2018).

A beton alapanyagai közül leginkább a cement terheli a környezetet, ezért ennek mennyiségi csökkentésével a szén-dioxid-kibocsátáson is lehet változtatni. Léteznek különböző kiegészítő anyagok, amelyek a cement helyettesítésében segítenek. Például a Penetron adalékszer előnye, hogy a betonszerkezetek vízáteresztő képességét csökkenti, tartósságát pedig növeli (Penetron, 2024). Azonban mélyépítési műtárgyaknál egyelőre nem válthatja ki, mert a víz alatti kivitelezés szigorúbb szabályokat követel a minimális cementtartalomra (MSZ 4798:2016). Másik lehetőség egy mosonmagyaróvári cég terméke, a cymment L betonkiegészítő anyag, amellyel a CO₂ egyenértéket 40 kg/tonna alá tudták redukálni, és ezáltal az emisszió 50%-át megtakarították (Cymment, 2024). Jet-grouting cölöphöz, amely egy ideiglenes mélyépítési eljárás, már használták a terméket, de egyelőre tartóssági követelményei kérdésesek.

Az Európai Uniónak a tervek szerint 2050-re klímasemlegessé kell válnia. Ez nem azt jelenti, hogy semennyi károsanyag nem kerül majd a levegőbe, a zöld technológiák bevezetése után sem. Hanem a nettó nulla kibocsátást szükséges betartani, tehát a légkörbe csak annyi üvegházhatású gáz juthat, amennyit a környezet meg tud tisztítani. Ha egy építőipari vállalatnak tevékenysége folytán nagy a karbonlábnyoma, akkor olyan intézkedéseket kell végrehajtania, amellyel egyensúlyozni tudja a kibocsátott gázokat. Semlegesítő tevékenység lehet az erdőtelepítés, és például egyre több megoldással üzemeltethetőek fenntarthatóan az építmények: napelemekkel, termocölöpekkel, amelyek a megújuló energiát hasznosítják.

A karbonlábnyom csökkentésében nagy szerepet töltenek be különböző műszaki döntések. Fontos átgondolni az építkezés organizációját, az építőanyagok gyártójának választását (mind távolság, mind EPD-nyilatkozataik szempontjából). Emellett jelentős CO₂ megtakarítást jelenthet, hogyha az ideiglenes szerkezeteket visszanyerhető módon kivitelezik, például szádfalazás esetén.

6. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

6.1 ÖSSZEFOGLALÁS

TDK-kutatásomban egy többszintes mélygarázshoz szükséges munkatérhatárolást vizsgáltam. A kiviteli tervek és adatok alapján kiszámítottam az üvegházhatású gázok kibocsátásának mennyiségét. Ehhez az EFFC/DFI programját használtam, amelyet hazai tényezőkkel frissítettem.

A számítás során megfigyelhető volt, hogy legnagyobb hatással az építőanyagok vannak a globális karbonlábnyomra. Ehhez képest az egyéb tényezők (például az energiafogyasztás, áruszállítás, hulladéktermelés) kisebb mértékben, de mégis számszerűsíthetően juttattak károsanyagot a környezetbe. Mivel főként a beton és acél használata okoz nagy emissziót, ezért ezek csökkentésére kell törekedni.

A klímasemlegesség elérése érdekében, egyre sürgetőbb a károsanyagok mennyiségét kompenzálni. A karbonlábnyom minimalizálására különböző lehetőségek vannak, akár műszaki (pl. termocölöpök; visszanyerhető eszközökkel készülő eljárások), akár egyéb környezetvédelmi (pl. erdőtelepítés; hulladék újrahasznosítás) szempontból.

6.2 KITEKINTÉS, TOVÁBBI VIZSGÁLATI CÉLOK

A kivitelezési adatok tanulmányozásával, valamint az EFFC/DFI kalkulátorral számszerűsíteni tudtam egy mélyépítési projekt során kibocsátott üvegházhatású gázok mennyiségét. Az eljárást szeretném alkalmazni egyéb műszaki folyamatok karbonlábnyomának mérésére. Későbbi kutatásomban, szakdolgozatomban arra használnám, hogy alternatív alapozási módszereket (pl. cölöpözés, szádfalazás) tervezzek, majd ezek környezeti hatásait összehasonlítsam. Ehhez első fontos lépésként – a jelenlegi vizsgálatom eredményeként – már rendelkezésre áll az egyik opció CO₂ terhelése.

Érdemes az alternatív építőanyagok fejlesztésével és alkalmazásával foglalkozni, mert ezek kulcsfontosságú mértékben befolyásolják a kibocsátást. Megoldást jelenthetnek az újrahasznosított összetevők, és a gyártási folyamatok fenntarthatóvá tétele.

Az építőipar környezetvédelmi hatásainak vizsgálatát fontosnak tartom a továbbiakban, mert globális szinten mindenhol sok beruházás zajlik. Az emberi igények, pénzügyi gazdaságosság, időbeli gyorsaság, illetve műszaki megfelelés mellett nagy hangsúlyt kell fordítani a fenntarthatósági szempontokra is. Ezért napjaink legfontosabb problémájának, a klímaváltozásnak csökkentéséhez a mérnöki döntések jelentősen hozzájárulhatnak.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet szeretném kifejezni:

Dr. Illés Zsombornak, aki konzulensemként lehetőséget adott a kutatásra, irányította és segítette a dolgozatomat.

Dr. Nagy Gábor konzulensem munkájáért, aki rengeteg szakmai segítséget és hasznos ötletet biztosított.

Táborszki-Szűcs Viviennek, a HBM Kft. munkatársának az adatszolgáltatásért, valamint a konzultációkon nyújtott alapos és széleskörű segítségéért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

AA4 Mérnökiroda Kft. (2020). *Munkatérhatárolás műszaki leírás.*

Abed, M., Nemes, R. (2018). *Újrahasznosított adalékanyagot tartalmazó betonok újrahasznosítása*

Bay Zoltán Nonprofit Kft. (2024). *Az Ózdi Acélművek Kft. Által gyártott betonacél termékek életciklus-értékelése (LCA).*

Carbone 4. (2014). *EFFC DFI Carbon Calculator Methodological & User Guide V2.2.*

Cyment. (2024). *Egy klímabarát úton.* <https://www.cyment.eu/hu/a-vallalat/>

Dövényi, Z. (szerk. 2010). *Magyarország kistájainak katasztere.* MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest.

EEA (European Environment Agency). (2023) *Average emissions from new cars and vans in Europe continue to fall, according to provisional data.*

www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/average-emissions-from-new-cars-and-vans

EKÜ (Európai Környezetvédelmi Ügynökség). (2021). *Klimaváltozás: az erdők védelmével a szén-dioxid-kibocsátás ellensúlyozásáért.*

<https://www.europarl.europa.eu/topics/hu/article/20170711STO79506/klimavaltozas-az-erdok-vedelmevel-a-szen-dioxid-kibocsatas-ellensulyozasaert>

ENCORD. (2012). *Construction CO₂e Measurement Protocol.*

Európai Bizottság. (2021). *Európai klímarendelet.*

Farkas, J. (2008). *Alapozás,* Műegyetemi Kiadó, Budapest.

Fenner, A. E., Kibert, C. J., Woo, J., Morque, S., Razkenari, M., Hakim, H. & Lu X. (2018). *The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94.

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., et al. (2023). *Global carbon budget 2023.* Earth Syst Sci Data.

HBM Kft. (2024. 10. 20.). *Technológiáink.* <https://www.hbm.hu/technologiaink/>

IAI (International Aluminium Institute). (2024). *Aluminium is infinitely recyclable.* <https://international-aluminium.org/portfolio/infininitely-recycled/>

- IEA (International Energy Agency). (2013). *World Energy Outlook Special Report. Redrawing the Energy-climate Map*. Paris, France.
- ISO (International Organisation for Standardization). (2016). ISO 14040:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
- MNB (2024). *Ökokalkulátor*: <https://okokalk.mnb.hu/>
- Móczár, B. (2023). *Alapozás elektronikus előadás jegyzet*.
- MSZ 4798:2016. *Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon*.
- Penetron. (2024). *A szén-dioxid mentes beton felé*. <https://www.penetron.hu/index.html>
- Tapio. (2024). *Bilan Carbone Methodology by ADEME (Full Guide)*. <https://www.tapio.eco/blog/bilan-carbone-methodology/>
- Tóth, L., Győri, E., Mónus, P., Zsíros, T. (2006). *Seismic Hazard in the Pannonian Region*. In: Pinter, N., Grenerczy, Gy., Weber, J., Stein, S., Medan, D., (eds.), *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*. Springer Verlag, NATO ARW Series, Vol. 61, p. 369-384.
- UN News. (2023). *Building Paris every week: Urgent need to cut emissions in construction sector*. <https://news.un.org/en/story/2023/09/1140677>
- UNEP (United Nations Environment Programme). (2024). *2024 Global Status Report for Building and Construction*.
- WRI és WBCSD (World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development). (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*.
- WRI és WBCSD. (2011). *Greenhouse Gas Protocol: Product Life Cycle and Accounting Standard*.

MELLÉKLETEK

