

STATIKUS SZONDÁZÁSI EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA

PhD értekezés

Mahler András

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Tudományos vezető:

Dr. Farkas József

Budapest
2007. július

1. Témaválasztás indoklása

Az alapozások, földmunkák, földalatti műtárgyak tervezéséhez és építéséhez elengedhetetlen az adott terület általajviszonyainak megfelelő ismerete. A közvetett és közvetlen talajfelderítési módszerek megfelelő kombinálásával részletes képet kaphatunk az általaj rétegződéséről és az egyes talajrétegek tulajdonságairól. A közvetett talajfelderítési módszerek természetesen nem helyettesíthetik a közvetlen módszerekkel történő talajmintavételt és laboratóriumi vizsgálatokat, azonban jól kiegészítheti azokat. Napjainkban a helyszíni geotechnikai vizsgálatok egyre nagyobb teret hódítanak a hazai és nemzetközi geotechnikai gyakorlatban. A számos helyszíni („in-situ”) geotechnikai vizsgálati módszer közül jelenleg a statikus szondázás (CPT vagy CPTu) a legsokoldalúbb eszköz a talajfelderítés területén.

A statikus szondázás közel száz éve alatt óriási nemzetközi tapasztalat halmozódott fel a felhasználási lehetőségekről. Számos összefüggés született a szondaeredmények és a „hagyományos”, laboratóriumban meghatározható geotechnikai paraméterek kapcsolatáról, illetve szondaeredmények közvetlen felhasználási lehetőségeiről a geotechnikai tervezésben (pl. sík- és mélyalpok teherbírásának meghatározása).

Az összefüggések jó része tapasztalati úton született. Az ilyen képletek felhasználásával óvatosan kell bánni, ha azokat új területeken, eltérő geológiai eredetű talajok esetén kívánjuk felhasználni. Ilyen esetekben javasolt az összefüggések megbízhatóságát az adott körülmények között is ellenőrizni, vagy esetleg a tapasztalati tényezőket módosítani.

Magyarországon – bár régóta használnak statikus szondát a talajfelderítésben – a jelenleg is használt, pórúsvíznyomás mérésére is alkalmas CPTu szondák jelentősebb elterjedése az elmúlt évtizedekre tehető. A mérési eredmények kiértékelésekor azonban szinte kizárólag a nemzetközi szakirodalomban publikált összefüggésekre támaszkodhattunk. Kevés vizsgálat készült arra, hogy a különböző módszerek milyen megbízhatósággal alkalmazhatóak a hazai talajviszonyok esetén.

A CPTu eredmények geotechnikai tervezésben történő felhasználásában tehát elsősorban nem a téma kidolgozatlansága okozza a problémát, hanem az, hogy a különböző problémákhoz több, sokszor egymással ellentmondó tapasztalati összefüggés létezik. Szükséges tehát a tervezői gyakorlatban gyakran előforduló témákban a létező összefüggések áttekintése, megbízhatóságának ellenőrzése, szükség esetén új a hazai talajviszonyok jobban igazodó összefüggések kidolgozása.

2. Az értekezés célkitűzései, módszertan

A közvetett talajfelderítési módszerek egyes típusainak használhatóságát, elterjedtségét a mérnöki gyakorlatban elsősorban az határozza meg – természetesen a gazdaságossági kérdések mellett – hogy mennyire ad részletes képet a talajviszonyokról, mennyire szolgáltat információt a talaj tulajdonságaival kapcsolatban, azaz mennyire használható a későbbi tervezési folyamat során.

Ezekben a kérdésekben döntő jelentőséggel bír, hogy a vizsgálat során mért adatok kiértékelésére milyen módszerek, milyen megbízhatósággal állnak rendelkezésre. Értelemszerűen, minél több és minél pontosabb információt nyújt egy vizsgálat az általajviszonyokról, annál hasznosabb eszközt jelent a mérnökök kezében a talajfelderítés területén.

Az értekezésem fő célkitűzése, hogy a statikus szonda (CPTu) eredmények feldolgozásához hazai talajviszonyok esetén megbízhatóan használható összefüggéseket adjon. Feldolgoztam a témával kapcsolatos nemzetközi szakirodalmat, valamint az elérhető hazai (laboratóriumi, és

helyszíni) vizsgálati eredményeket. Vizsgáltam az irodalomban javasolt összefüggések megbízhatóságát a hazai talajadottságok esetén, valamint több a magyarországi talajviszony mellett pontosabb eredményeket adó (megbízhatóbb) összefüggést javasoltam.

3. Tézisek

1. tézis

1.1. altézis

Számítási algoritmust dolgoztam ki a statikus szondázás eredményeinek feldolgozására. A módszer segítségével a talajrétegek különválaszthatóak, a vékony rétegek és a véletlenszerű mérési hibák megkülönböztethetőek.

Az eredmények kiértékelése a statikus szonda csúcscellenállásának logaritmusából létrehozott integrálgörbe segítségével történik. Az integrálgörbe értékét „t” mélységben a következő összefüggéssel lehet meghatározni:

$$Q'_c(t) = \int_0^t \ln q_c(z) dz .$$

Az integrálgörbén a különböző csúcscellenállású rétegek különböző meredekségű közel egyenes szakaszokként jelentkeznek. A görbét egyenesekkel közelítve az egyenesek közti töréspontok jelzik a réteghatárokat. A módszer előnye, hogy a kiugró mérési hibák csak nagyon rövid szakaszokként jelentkeznek, így belesimulnak a réteg egyenesébe.

1.2. altézis

Javaslatot adtam a réteghatároknál a szondaellenállásban tapasztalható „átmeneti zónák” leválasztására (az átmeneti zónákat az okozza, hogy az eltérő keménységű talajok határának környékén a szonda „érzi” a szomszédos réteg hatását, a csúcscellenállás értéke megváltozik, ld.: példa: 5-6 m mélységben). Az ilyen átmeneti zónák kiszűrése a következő kritérium alapján lehetséges:

$$\frac{|q_{c,i-1} - q_{c,i+1}|}{h_i} > 10\,000 \frac{kPa}{m} .$$

ahol:

$q_{c,i-1}$: a vizsgált réteg feletti réteg átlagos csúcscellenállása,
 $q_{c,i+1}$: a vizsgált réteg alatti összlet átlagos csúcscellenállása,
 h_i : a vizsgált réteg vastagsága.

Ha a feltétel teljesül akkor a leválasztott réteg átmeneti zónát takar.

Hasonló kritériumot javasoltam a nagy vastagságú, mélységgel fokozatosan növekedő csúcscellenállású rétegek lokalizálására (az ilyen réteg az algoritmus eredményeként több réteggént jelentkezhet. A mennyiben a szomszédos rétegek esetén a lenti kritérium teljesül, a szétválasztott rétegek egy, a mélységgel fokozatosan növekvő csúcscellenállású réteget jeleznek (ld. példa 6-18 m):

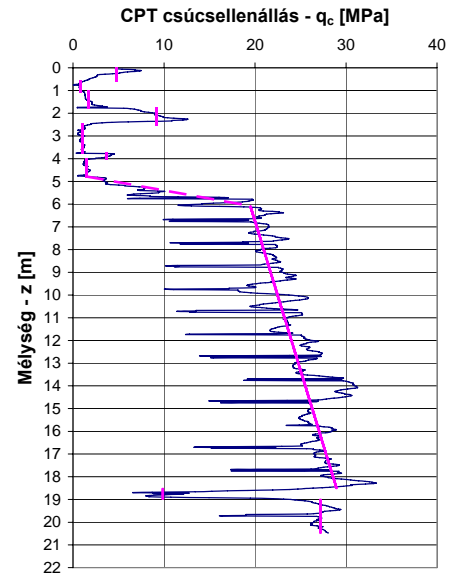
$$\frac{|q_{c,i+1} - q_{c,i}|}{q_{c,i} \cdot (h_i + h_{i+1})} < 0,2 .$$

ahol:

$q_{c,i}$: a vizsgált réteg átlagos csúcscellenállása,
 $q_{c,i+1}$: a vizsgált réteg alatti összlet átlagos csúcscellenállása,
 h_i : a vizsgált réteg vastagsága,
 h_{i+1} : a vizsgált réteg alatti összlet vastagsága.

Ilyen esetekben a réteg a mélységgel lineárisan növekvő csúcscellenállás-értékkel jellemezhető. Ez a lineáris

összefüggés az integrálgörbére illesztett másodfokú görbe deriválásával állítható elő. A javasolt eljárás által eredményezett idealizált a q_c diagramot az ábrán bemutatott példa szemlélteti.



2. tézis

2.1. altézis

Összefüggést állapítottam meg a statikus szonda csúcscellenállása (q_c) és a dinamikus szonda ütőszáma (N_{20}) között, szemcsés és kötött talajok esetére. Táblázatban foglalom össze a javasolt összefüggéseket, azok érvényességi tartományát, illetve a korrelációs tényezőt.

| Talajtípus (érvényességi tartomány) | q_c - N_{20} összefüggés | Korrelációs tényező (r) |
|--|--|----------------------------|
| Szemcsés talajok ($d_{\max} \leq 2\text{mm}$) | $\frac{q_c/p_0}{N_{20}} = 4,5 \cdot \log d_m + 7,8$ | 0,93 |
| | $\frac{q_c/p_0}{\bar{\sigma}_0/p_0} = -2,3 \cdot \log FC + 1,88$ | 0,79 |
| Kötött talajok ($I_c \leq 0,85$) | $\frac{q_c/p_0}{N_{20}} = 12 \cdot I_c + 0,22 \cdot I_p$ | 0,81 |
| Minden talajtípus | $\frac{q_c/p_0}{\bar{\sigma}_0/p_0} = 294 \cdot I_c^{*-2,9}$ | 0,80 |

Itt:

q_c : a statikus szonda csúcscellenállása

N_{20} : a dinamikus szonda 20 cm behatoláshoz tartozó ütőszáma

$\bar{\sigma}_0$: az átlagos hatékony geozstatikai nyomás a vizsgált rétegben

p_0 : a légköri nyomással megegyező referencia feszültség ($p_0=100$ kPa)

d_m : a mértékadó szemcseátmérő mm-ben,

(I+A): a talaj iszap+agyag tartalma ($d < 0,02$ mm szemcsék tömegszázaléka)

I_c : a relatív konzisztencia index

I_p : a plasztikus index

I_c^* : a „talajviselkedési” („soil behaviour”) index

2.2. altézis

Kimutattam, hogy kavicsfrakciót is tartalmazó ($d_{\max} > 2,0$ mm) talajok esetén a szondaellenállás értékek között nem állapítható meg összefüggés. Ennek oka, hogy kavicsos rétegekben a nagyobb szemcseméret miatt, mindkét szondatípusnál az eredmények – közel homogén rétegben is – igen tág határok között mozognak. A nagy szórású szondaeredmények között, még durva becslésre alkalmas összefüggést sem lehetett találni.

3. tézis

A külföldi szakirodalom, valamint a hazai talajokon végzett helyszíni és laboratóriumi kísérletek feldolgozásával kimutattam, hogy a külföldön használt összefüggések a hazai agyag talajok esetén nem, vagy csak erős közelítésként használhatóak.

Javaslatot adtam a $q_c > 2000$ kPa szondaellenállású agyagok CPTu eredményekből történő meghatározására:

$$E_s = 3000 + 1,44 \cdot q_c \cdot$$

ahol,

E_s : a talaj összenyomódási modulusa (a hatékony geosztatikai nyomás értékéhez tartozó érintő modulus)

q_c : a statikus szonda csúcseellenállása

Az összefüggésnél a korrelációs tényező értéke $r=0,86$ -ra adódott.

4. tézis

Huszonhárom hazai próbaterhelés eredményét feldolgozva számítási eljárást javasolok a CFA cölöpök köpenymenti ellenállásának statikus szondaeredményekből történő meghatározására. A fajlagos köpenymenti ellenállás számítása közvetlenül a mért adatok felhasználásával történik a következő összefüggések segítségével:

szemcsés és átmeneti esetben:

$$\tau = 0,237 \cdot q_E^{0,61},$$

kötött esetben:

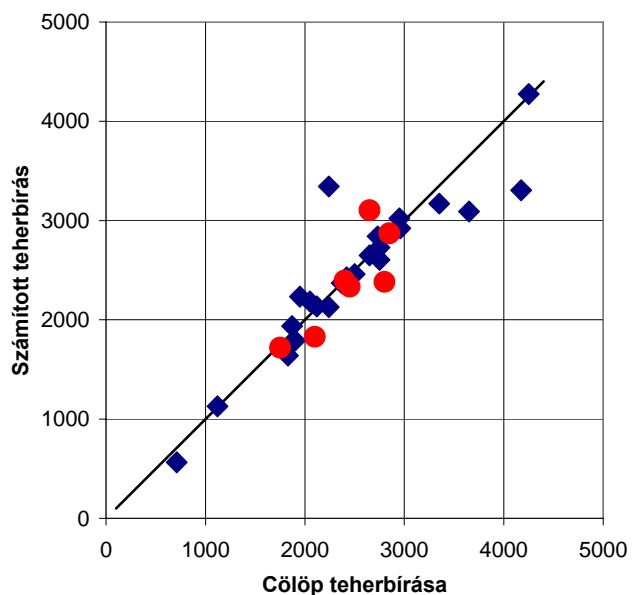
$$\tau = 0,92 \cdot \sqrt{q_E}.$$

Itt:

τ : a CFA cölöp köpenymenti ellenállása

q_E : a statikus szonda hatékony csúcseellenállása ($q_E = q_c - u_2$)

A hazai próbaterhelési adatok feldolgozásával kimutattam, hogy az Eurocode 7-3 által javasolt – általában jó eredményeket adó, a cölöptalp környékén tapasztalható talajrétegzettség hatását jól figyelembe vevő – módszer nagy vastagságú talajrétegek esetén (ha a talp felett 8D mélységtől a talp alatt 4D mélységig közel azonos szondaellenállású talaj fekszik, így $q_{c1} \approx q_{c2} \approx q_{c3}$) a talpellenállást túlbecsüli. Ilyen esetekben az LCPC módszerrel számítható a talpellenállás.



A számítási módszer a vizsgált 23 db (rombusszal jelölt) valamint 7 db ellenőrzésképpen használt (körrel jelölt) cölöp esetén az ábrán látható eredményeket adta. Itt a vízszintes tengelyen ábrázoltam a próbaterhelés eredményeként kapott törőterhet (kritérium: $s=D/10$), a függőleges tengelyen pedig a számított teherbírást.

5. tézis

Számítási módszert javasolok a CFA cölöpök terhelés-süllyedés görbéjének becslésére. Az összefüggéseket a teherbírási vizsgálatánál is használt 23 hazai próbaterhelés eredményének feldolgozásával dolgoztam ki. A CFA cölöpök köpenymenti ellenállásának mobilizálódását a következő összefüggésekkel javaslom becsülni:

szemcsés és átmeneti talajok esetén:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{ult}} = 0,602 \cdot \lg\left(\frac{s}{D}\right) + 2 \quad \tau(s) \leq \tau_{ult} ;$$

kötött talajok esetén:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{ult}} = \frac{\left(\frac{s}{D}\right)^{2,88}}{2 \cdot 10^{-8} + \left(\frac{s}{D}\right)^{2,88}} \quad \tau(s) \leq \tau_{ult} .$$

ahol:

s : a cölöp süllyedése

D : a cölöpátmérő

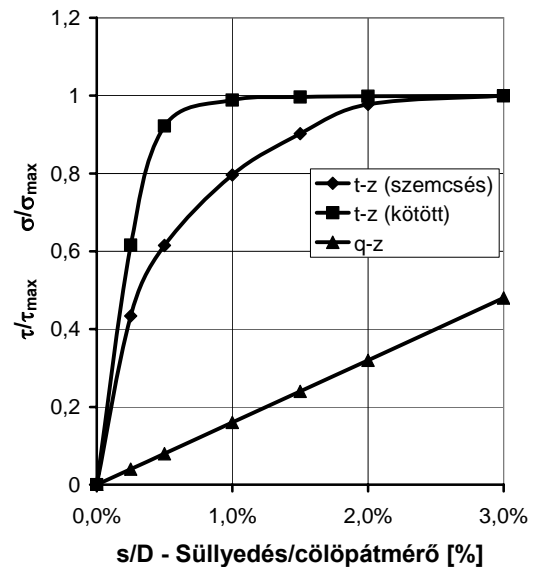
$\tau(s)$: az „ s ” süllyedésnél mobilizálódó köpenymenti ellenállás

τ_{ult} : az $s=D/10$ süllyedésnél mobilizálódó köpenymenti ellenállás

A csúcseellenállás mobilizálódása legegyszerűbben lineáris összefüggéssel közelíthető a kezdeti szakaszon ($s=0,03D$ -ig):

$$\frac{\sigma(s)}{\sigma_{ult}} = \frac{16 \cdot s}{D}$$

A javasolt összefüggéseket az ábra szemlélteti:



6. tézis

A nemzetközi szakirodalom, valamint a hazánkban készült próbaterhelések eredményeinek feldolgozásával javaslatot adtam a Screwsol cölöpök teherbírásiának CPTu eredményekből történő számítására:

köpenymenti ellenállás szemcsés és átmeneti talajok esetén:

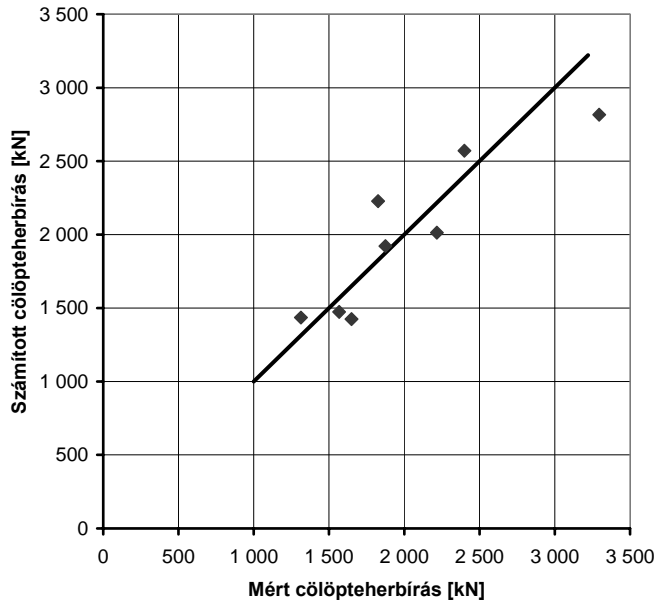
$$\tau = 0,3 \cdot q_E^{0,6} ;$$

kötött talajok esetén:

$$\tau = 0,1 \cdot q_E^{0,8} .$$

Kimutattam, hogy a talpellenállás az Eurocode 7-3-ban javasolt módszerrel jól meghatározható, a számításához kötött talajoknál $\alpha_b=0,8$, szemcsés talajoknál pedig $\alpha_b=1,0$ (a talp körüli tömörítőhatás okozta teherbírástöbblet miatt) értékek figyelembe vételét javaslom.

Az így számított teherbíráserkéket a próbaterhelés eredményeként kapott törőteher függvényében az alábbi ábra szemlélteti.



4. Ipari hasznosítás

Az 1. tételben leírt eljárás lehetővé teszi a talajrétegek szétválasztását a statikus szondázási eredmények alapján. A rétegek különválasztásával, valamint az ahhoz tartozó – konstans vagy mélységgel növekvő – jellemző szondaellenállás meghatározásával, a CPTu adatok közvetlen számítógépes felhasználása (pl.: végeelemes vagy mérési eredményeket feldolgozó programok) könnyebbé válik.

A statikus (CPTu) és dinamikus (DPH) szonda kapcsolatát leíró összefüggések a tervezés fázisában nyújthat hasznos segítséget. A tervezők legtöbbször „hozott anyagból” (talajmechanikai szakvéleményből) dolgoznak, melyek gyakran nem a tervező által ideálisnak tartott helyszíni vizsgálatokat (szondázásokat) tartalmazza. Ilyen esetekre nyújtanak segítséget a tételben javasolt összefüggések, melyek a két leggyakrabban használt szondaeredmény kapcsolatát írják le különböző talajtípusok esetén.

A további tételben javasolt összefüggések (az összenyomódási modulus, cölöpteherbírás, cölöpsüllyedés meghatározására) támpontot jelenthetnek a statikus szondaeredmények hazai felhasználásával kapcsolatban. A magyarországi geológiai viszonyok figyelembevételével kidolgozott tapasztalati összefüggések pontosabb eredményeket szolgáltatnak a geotechnikai tervezéshez, ezáltal gazdaságosabb szerkezetek készítése válik lehetővé.

A javasolt cölöpsüllyedés-számítási módszerrel már a tervezés fázisában (próbaterhelés nélkül) becsülhető a CFA cölöpök várható süllyedése, ezáltal a későbbi próbaterhelést követő „áttervezések” mennyisége csökkenhet.

5. További vizsgálatok

A dolgozatomban javasolt összefüggések a hazai tapasztalatokon alapulnak. Mint minden tapasztalati összefüggésnél, a megadott tényezők további adatok feldolgozásával tovább finomíthatóak. Ilyen célból további vizsgálatok elvégzése a Screwsol cölöpök teherbírásszámításánál lehet célszerű. Itt a technológia újszerűsége miatt még csak kevés hazai próbaterhelés eredménye állt rendelkezésre, azonban a kedvező tapasztalatok miatt várhatóan ez a cölöpözési eljárás is rövid időn belül igen elterjedt lesz hazánkban, így e téma még aktuálisabbá válik.

6. Publikációs jegyzék

Magyarországon megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk

1. Mahler A.: Use of cone penetration test in pile design. Periodica Politechnica Ser. Civil Engineering Vol.47, No.2, pp 189-197. 2003.

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű publikáció

1. Mahler A.: Ermittlung der Pfahltragfähigkeit aus CPT Daten. XIV. Frühlingsakademie, München, 2002.
2. Mahler A.: Evaluation of pile capacity based on CPT results. I. Ph.D. Civilexpo, Budapest 2002. pp. 99-104
3. Mahler A.: Use of Cone Penetration Test in pile design. 2nd International Young Geotechnical Engineers' Conference, 2003.
4. Mahler A.: Use of cone penetration test in geotechnical design. Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering. Delft, 16-19 June 2004. pp. 947-952
5. Mahler A., Imre E., Kocsis A.: Evaluation of pile behaviour using piezocone tests. Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization. ISC-2 Porto pp. 1507-1510. 2004.
6. Imre, E., Szabó, V., Szalay, E., Pusztai, J., Mahler, A.: Evaluation of CFA pile behaviour using CPTu data. XIII: Danube-European Conference on Geotechnical Engineering. Ljubjana. 2006.

Megjelenés alatt:

7. Mahler A.: Settlement Prediction of CFA piles. XIV. European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid, 2007. (elfogadott publikáció)
8. Imre, E., Pusztai, J., Mahler, A., Szabó, V., Szalay, E., Bogyó, Cs., Szilvággyi, L., Radványi, L., Kristóf, J., Szörényi, J. Evaluation charts for CFA Piles using CPTu data. XIV. European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid, 2007. (elfogadott publikáció)
9. Mahler A.: Correlation of CPTu and DPH test results 3rd International Conference on Site Characterization. ISC-3 Taiwan. 2008. (elfogadott abstract)

Magyar nyelvű folyóiratcikk

1. Mahler A.: A CPT alapján történő cölöpteherbírásmeghatározás megbízhatósága. Mélyépítő tükörkép, 2003/6

Magyar nyelvű konferencia kiadványban megjelent publikáció

1. Mahler A.: CPT használata a cölöptervezésben. ÉPKO2003, Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó. pp. 202-206. 2003.

Tudományos Diákköri Dolgozat

1. Mahler A., Varga G.: Nagyatmérőlű fűrt cölöpök teherbírásnak meghatározása szondázási eredményekből. TDK konferencia, Budapest, 1999.

Csak kivonatban megjelent konferencia-előadás

1. Mahler A.: CPT használata a cölöptervezésben. Geotechnika2003 konferencia, Ráckeve, 2003.
2. Imre, E., Szabó, V.; Szalay, E.; Pusztai, J.; Mahler, A., Radványi L.: A CFA cölöpök próbaterhelési görbéinek statisztikai értékelése CPTU adatok felhasználásával. Geotechnika2006 konferencia, Ráckeve.

Fontosabb ipari tevékenységeim:

1. Budapest XI. Budafoki út, Factory Outlet kereskedelmi központ és irodapark. Talajmechanikai szakvélemény 2003.
2. Pécs, Szilva u., Elcoteq magasraktár padlóburkolat-károsodásának vizsgálata. Talajmechanikai szakvélemény 2003.
3. Budapest IX. Dandár u. 19-21. Mélygarázsos társasház (foghíjbeépítés). Talajmechanikai szakvélemény 2003.
4. Bezenye, külterület. EUROVEGAS szórakoztató központ I. ütem. Talajmechanika szakvélemény. 2004.
5. Budapest III: Nánási út, Kócsag üdülőpark. Talajmechanikai szakvélemény 2004.
6. Levél, külterület, 25 db-os szélerőműpark. Talajmechanikai szakvélemény 2004.
7. Budapest XX. Sissy Lakópark II. ütem. Mélygarázsos 10 szintes társasház. Talajmechanikai szakvélemény 2004.
8. Budapest IX. Drégely u. 6-8. Mélygarázsos társasház (foghíjbeépítés). Talajmechanikai szakvélemény 2005.
9. Zsámbék, külterület. Ipari park. Talajmechanika szakvélemény. 2005.
10. Pátka, külterület, 8 db-os szélerőműpark. Talajmechanikai szakvélemény 2006.
11. Budapest XI. Ménési út 8., társasház. Talajmechanikai szakvélemény 2006.
12. Bezenye, Hegyeshalom, külterület. EUROVEGAS szórakoztató központ II-III. ütem. Talajmechanika szakvélemény. 2006.
13. Kisigmánd, Nagyigmánd, Ács külterület 40 db-os szélerőműpark. Talajmechanikai szakvélemény 2006.
14. Budapest XXI. Csillag u. Mélygarázsos társasház. Talajmechanikai szakvélemény 2006.
15. Ikervár, külterület 14 db-os szélerőműpark. Talajmechanikai szakvélemény 2006.
16. Diósd, Gárdonyi u. 9. Iskolaépület-károsodásának vizsgálata. Talajmechanikai szakvélemény 2006.
17. Zámoly, külterület 11 db-os szélerőműpark. Talajmechanikai szakvélemény 2007.

