



Építész-, Építő- és Közlekedésmérnöki Kar
Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék

TDK DOLGOZAT

Keresztirányban terhelt cölöpök vizsgálata

Konzulens: Dr. Wolf Ákos

Külső konzulens: Dr. Szilvágyi Zsolt

Vidosza Gréta

2021-22/2. félév

TARTALOMJEGYZÉK:

1	Bevezetés.....	4
2	FEM programok számítási elvei.....	5
2.1	Lineáris közelítés.....	5
2.2	Bilineáris közelítés	8
2.3	Nemlineáris közelítés.....	9
3	P-y görbék.....	11
3.1	Homoktalaj.....	11
3.1.1	Reese, et al. (1974)	11
3.1.2	American Petroleum Institute (2010).....	13
3.2	Agyagtalaj	15
3.2.1	Az első ajánlások.....	15
3.2.2	Puha agyag, Matlock (1970)	15
3.2.3	Puha agyag, API.....	16
3.2.4	Merev agyag víz jelenléte nélkül, Reese, Cox, Koop (1975).....	16
3.2.5	Merev agyag víz jelenlétében, Reese, Cox, Koop (1975).....	17
3.2.6	Módosított merev agyag víz jelenléte nélkül.....	18
3.3	Összefoglalás	19
4	Paraméteranalízis	21
4.1	Előzmények.....	21
4.2	Homoktalaj.....	22
4.2.1	Belső súrlódási szög hatásának vizsgálata	22
4.2.2	Vízszintes erő növelésének hatása	24
4.2.3	Függőleges erő növelésének hatása.....	29
4.2.4	Vasalás hatása.....	31
4.3	Agyagtalaj	33
4.3.1	Alapeset vizsgálata.....	33
4.3.2	Drénezetlen nyírószilárdság hatása	34
4.3.3	Módosított és eredeti merev agyag modell összehasonlítása.....	35
5	Cölöpök próbaterhelése.....	38
5.1	Statikus próbaterhelés.....	38
5.2	Dinamikus próbaterhelés.....	38
6	Vízszintes próbaterhelés visszamodellézése	40
6.1	A helyszín bemutatása.....	40
6.2	Kiindulási adatok.....	41
6.2.1	Első közelítés.....	43

6.2.2	Második közelítés.....	44
6.2.3	Harmadik közelítés.....	46
6.2.4	Negyedik közelítés.....	48
6.2.5	Eredmények értékelése.....	49
7	Összefoglalás.....	50

1 Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben a cölöpalapozás nagy mértékben elterjedt alapozási móddá vált. A városok egyre nagyobb fokú beépítésével csökkent azoknak a területeknek a mennyisége, ahol a teherbíró réteg a felszín közelében van, ezáltal elegendő lehet a síkalapok alkalmazása. Ezen kívül a városi lakosság növekedése és a területek csökkenése többszintes, így nagyobb terhelést jelentő épületeket eredményezett. A városi környezeten kívül az ipari épületek esetén is egyre inkább elterjedt a mélyalapozás, mivel a csarnokok egyre nagyobb fesztávval és raszter távolsággal épülnek, amelyek így nagyobb koncentrált terhet jelentenek.

A cölöpalapozások lehetővé teszik, hogy a terhet a mélyebben fekvő, megfelelő teherbírási talajrétegre adjuk át. A mélyalapozások iránt megnőtt igények a cölöpözés gépesítésének fejlődését vonzotta magával, ami a cölöpalapozás versenyképességét biztosította (Szepesházi, 2008).

Vízszintes irányú terhet a cölöpön szél-, földrengés- és daruteher is okozhat, így ezeknek a cölöp viselkedésére gyakorolt hatását fontos vizsgálni.

A keresztirányban terhelt cölöpök számítása bonyolult geotechnikai kérdés, mivel a pontos számításhoz elengedhetetlen a talaj térbeli kiterjedésének, valamint a nemlineáris viselkedés figyelembevétele. A minél pontosabb számításhoz a mai gyakorlatban különböző végeelem programokat használnak. Ezek a programok leggyakrabban a talajt rugalmas megtámasztásként veszik figyelembe, azaz a modellben a rugalmas ágyazás körül modellezésre, lineáris vagy nemlineáris rugókkal való helyettesítéssel.

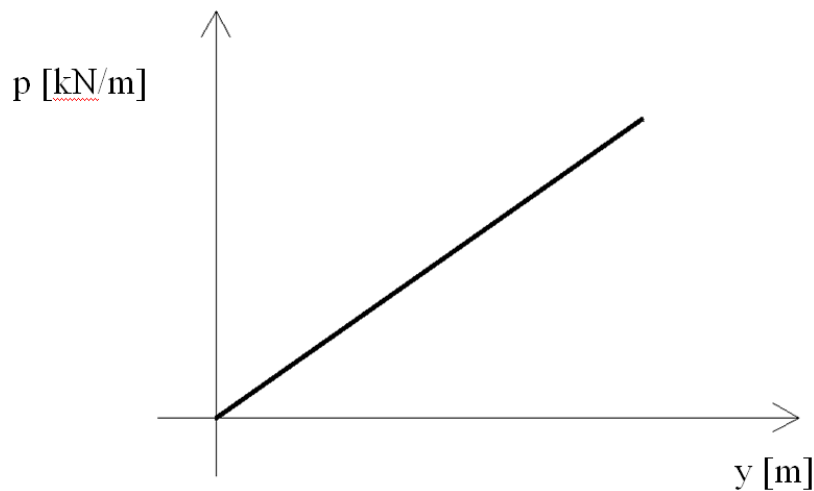
Dolgozatomban egy, a hazai gyakorlatban újnak számító, a nemlineáris rugókat p - y görbékkel modellező programmal, az LPile-lal vizsgálom a keresztirányban terhelt cölöpök viselkedését. Irodalomkutatásom szerint hazai publikáció, mely p - y görbés számításra alapul, még nem született.

2 FEM programok számítási elvei

2.1 Lineáris közelítés

A mai gyakorlatban használt programok között lényeges különbséget adhat, hogy milyen módon képes az előző fejezetben említett rugalmasan ágyazott gerendamodell számítására. Amennyiben az erő-elmozdulás kapcsolatot lineárisnak tekintjük, egyszerű és gyors, viszont pontatlan számításokat tudunk végrehajtani az alkalmazott programmal.

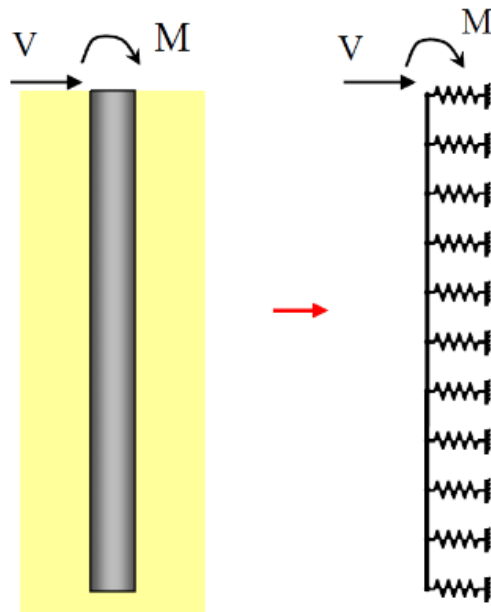
Lineáris kapcsolat esetén ugyanis a talaj teherbírását nem vesszük figyelembe, ezáltal az elmozdulás egészen addig növekszik, amíg a terhelés. Ez a közelítés ebben a formában nem helyes, bizonyos esetekben a valóságnál lényegesen kisebb elmozdulás értéket kaphatunk eredményül.



1. ábra: Lineáris erő-elmozdulás diagram (Spisák, 2014)

Ezt a közelítést alkalmazva a talajt lineárisan rugalmas közegnek tekintjük, azaz a teher növelésével növekszik az elmozdulás is, azonban a terhelés megszüntetése után a függvény ismét az origóba tér vissza, nincs maradó alakváltozás.

Ezt a rugómodellt először Winkler alkalmazta. A modellben az egy pontban kialakuló elmozdulás csak az adott pontban fellépő feszültség függvénye.



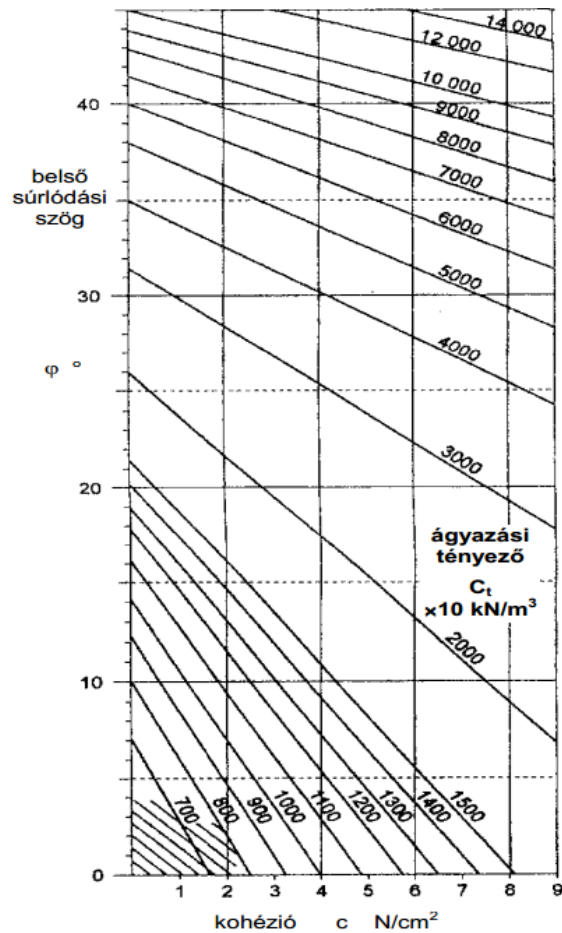
2. ábra: Winkler-féle rugómodell (Hazzar, Karray, Pasic, 2015)

Bármilyen programot is használunk, a Winkler-féle rugómodell alkalmazásakor meg kell határozni az ágyazási tényező (rugóállandó) értékét. Ennek számítására a szakirodalomban több ajánlást is találhatunk, a leginkább elterjedtnek a következő tekinthető:

$$C_h(z) = \alpha \cdot \frac{E_s(z)}{D} \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad 1.egyenlet$$

Az egyenletben E_s az összenyomódási modulus, D a cölöpátmérő. Az α szorzó értéke eltér a különböző ajánlásokban. Az MSZ szerint értéke 2,0; míg Terzhagi szerint 1,3-ra, Smoltczyk szerint pedig 1,0-ra vehető fel a szorzó értéke (Szép, 2014).

Szintén gyakran használt az ágyazási tényező értékének meghatározására a Monnet (1994) által publikált diagram.



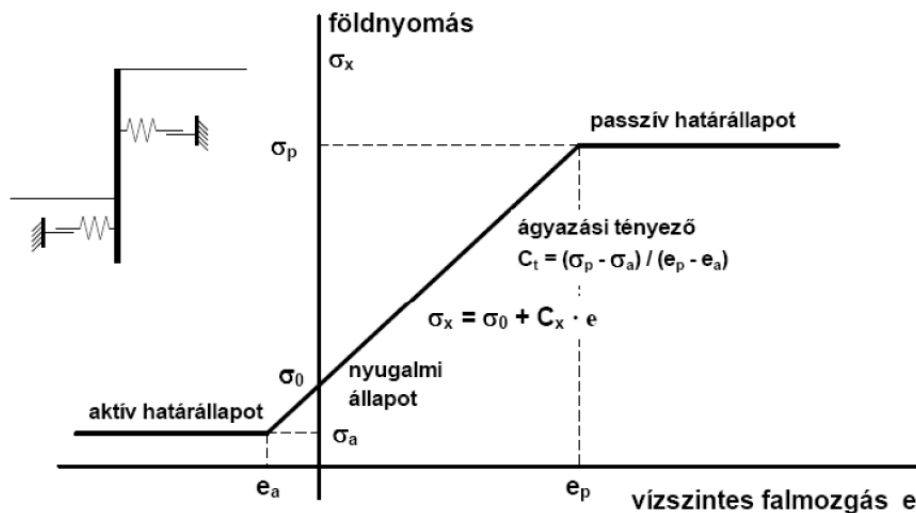
3. ábra: Monnet-féle diagram (Monnet, 1994)

Az ágyazási tényező leolvasásához ismernünk kell a talaj belső súrlódási szögét és kohézióját. A megfelelő $\varphi - c$ értékpárhoz tartozó ágyazási tényező leolvasása után az értéket meg kell szorozni 10-zel, így kapjuk meg a megfelelő dimenzióval [kN/m³] rendelkező rugóállandót.

2.2 Bilineáris közelítés

Nemlineáris anyagi viselkedésről beszélhetünk, amennyiben a feszültség és a fajlagos nyúlás kapcsolata nem lineáris. Ennek az anyagi nemlinearitásnak a figyelembe vételére leggyakrabban a lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny anyagmodell szolgál, melyet a gyakorlatban mindennaposan használt, AxisVM szoftverben is alkalmaznak nemlineáris számítás futtatása esetén.

A valósághoz jobban közelítő megoldást ad ugyanis az, ha a Winkler-féle rugómodellt csak az aktív vagy passzív határállapotig fogadjuk el, ezt a két értéket elérve pedig az erő-elmozdulás függvény konstanssá válik.



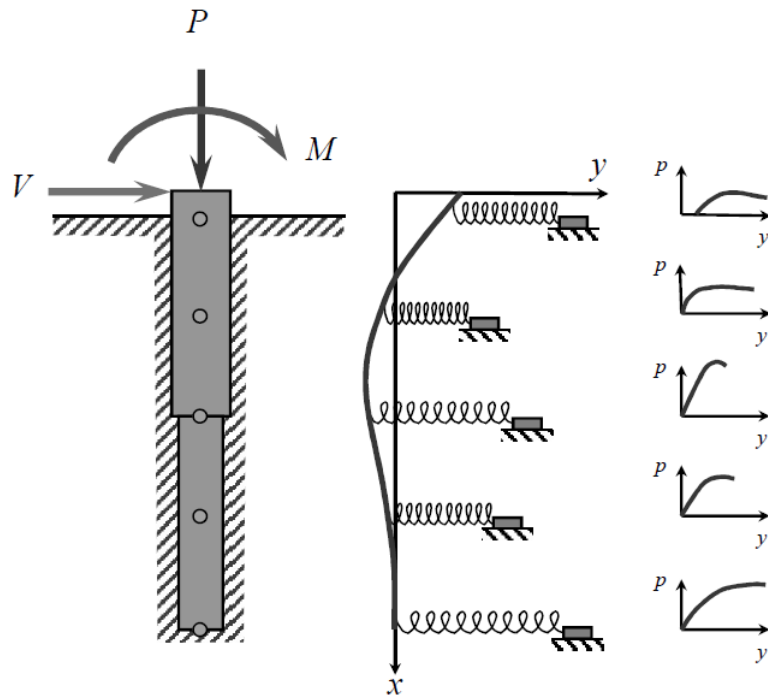
4. ábra: Ideálisan rugalmas-tökéletesen képlékeny anyagmodell (Schmitt, 1995)

A 4. ábrán látható rugókat ennek megfelelően lehet értelmezni. A határállapot eléréséig a támasz lineáris rugóként viselkedik, azaz az erő növekedésével egyenesen arányosan nő az elmozdulás. A határérték elérése után a csúszkák biztosítják az erő értékének állandósulását, miközben az elmozdulás értékének növekedését megengedik.

Ez a rugómodell abban az esetben írja le a valós viselkedést, ha a cölöphöz minden irányból kapcsolódik egy ilyen karakterisztikájú támasz.

2.3 Nemlineáris közelítés

A valós viselkedést legjobban leíró modellek a nemlinearitást veszik alapul. Az erő-elmozdulás diagram ebben az esetben parabolikus közeli, a teher növelésével az alakváltozások hatványozottan nőnek.



5. ábra: Nemlineáris rugók (Isenhower et al., 2019)

Nemlineáris rugók alkalmazásakor az adott pontban érvényes p-y görbe segítségével határozhatók meg az elmozdulás értékek. A p-y görbék a talaj ellenállás-vízszintes elmozdulás kapcsolatát mutatják. Ezen görbék alakját több tényező határozza meg, mind például a mélység, vagy a talaj típusa és a talajjellemzők. Éppen emiatt alkalmazhatók jól egy adott talaj viselkedésének jellemzésére keresztirányú terhelés esetén.

A korai kutatásokat a p-y görbék használatára vonatkozóan a kőolajipar támogatta, ugyanis az olajfúró tornyok létesítésekor a cölöpök jelentős vízszintes terhelésnek voltak kitéve a hullámvás és szél által.

A homoktalajokra jellemző p-y görbék 1955-ben Terzaghi tett javaslatot, amely a következő összefüggéssel jellemezhető:

$$E_s = k \cdot x \quad \text{2. egyenlet}$$

Az egyenlet szerint E_s , a talaj rugalmassági modulusa a mélységgel lineárisan változik. Az összefüggésben k állandó, melynek értékeit tömörségtől függően táblázatosan adta meg.

Mivel a talaj rugalmassági modulusa és a mélység között lineárisan növekvő kapcsolat van, így Terzaghi elképzelése szerint a talajok p - y görbéje is egyenesek sorozata, amelyek meredekségét a k érték határozza meg.

Azóta ismert, hogy a Terzaghi által ajánlott k értékek túlságosan konzervatívak. Az ajánlást ugyanis az 1950-es évek elején publikált szakirodalomra alapozta, nem valós próbaterhelések eredményeire. 1958-ban Terzaghi maga is elismerte, hogy az általa megadott k értékek nem pontosak, így azok használatát nem ajánlja.

Később Reese és Matlock is ajánlással állt elő a k értékekre vonatkozóan. Ezek az értékeket a szakirodalmat, és már valós próbaterhelések eredményeit is felhasználva határozzák meg. Az LPile ezekkel az értékekkel számol.

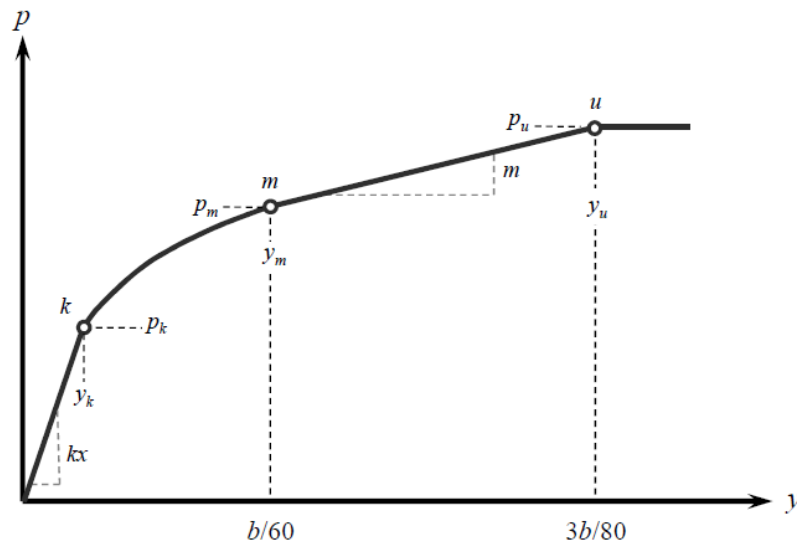
A programban homoktalajok esetén két p - y görbe közül választhatunk, dolgozatomban ezeket ismertetem részletesen.

3 P-y görbék

3.1 Homoktalaj

3.1.1 Reese, et al. (1974)

Az 1994-ben publikált módszer a p-y görbék számítására mind statikus, mind ciklikus terhelés esetére használható, sík terep és függőleges cölöp esetében.



6. ábra: A Reese-féle p-y görbe jellemző pontjai (Isenhower et al., 2019)

A 6. ábrán látható görbe négy szakaszra bontható. A számítás során a megjelölt nevezetes pontok (k, m, u) p és y értékét kapjuk meg. „k” pontig a függvény mélységgel lineárisan nő, meredekségét a k tényező határozza meg. „k” és „m” pont között parabolikus szakasz van. „m” és „u” pont között ismét lineáris szakasz következik. A p értékek a teljes ellenállás elérése után állandósulnak.

A görbe számításához ismernünk kell a belső súrlódási szöget (φ), a talaj térfogatsúlyát (γ), és a cölöp átmérőjét (b).

Ezekből a kiindulási adatokból számíthatók a következő paraméterek:

$$\alpha = \frac{\varphi}{2}, \beta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}, K_0 = 0.4, K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad 3. \text{ egyenlet}$$

ahol K_0 a nyugalmi földnyomási szorzó, K_1 pedig az aktív földnyomási szorzó.

Az egységnyi cölöphosszra vonatkoztatott talajellenállás értékét a következőképpen kapjuk:

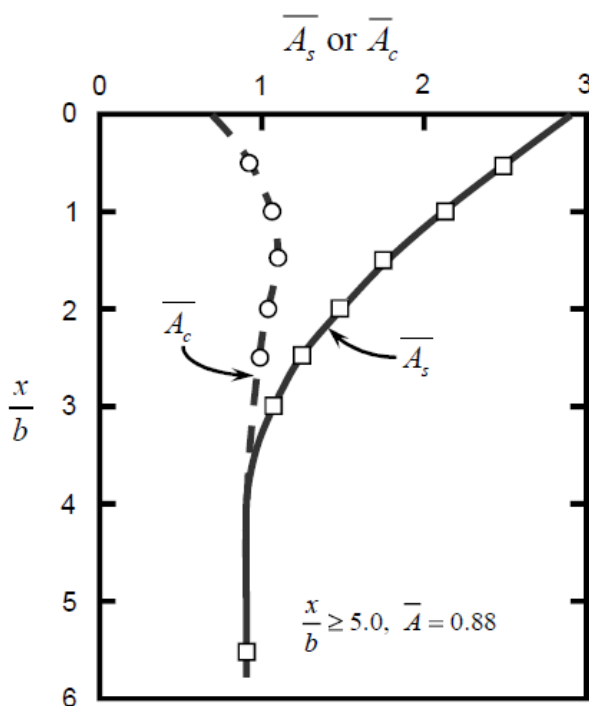
$$p_s = \min [p_{st}; p_{sd}] \quad 4. \text{ egyenlet}$$

p_{st} és p_{sd} értéke az előző paraméterektől függ, illetve a vizsgált pont mélységétől (x).

p_u , azaz a teljes ellenállás a 4. egyenlet alapján számítható.

$$p_u = A_s \cdot p_s \quad 5. \text{ egyenlet}$$

Az A együttható értéke diagramról olvasható le, annak függvényében, hogy a cölöpöt statikus (A_s) vagy ciklikus (A_c) terhelés éri.



7. ábra: A együttható értékei (Isenhower et al., 2019)

Leolvasáshoz szükséges ismernünk a mélység (x) és a cölöp átmérőjének (b) hányadosát, majd ezt az arányszámot a megfelelő görbére vetítve olvashatjuk le A_s vagy A_c értékét a vízszintes tengelyen.

Ezzel p_u meghatározható, a hozzá tartozó y érték az ábrán látható $3b/80$ összefüggéssel számítható.

A görbe másik nevezetes pontja az m pont, melyhez tartozó y érték a $b/60$ összefüggéssel számítható. A p értékéhez egy újabb együtthatót vezettek be, melyet B jelöl, értéke A -val megegyező módon grafikonról olvasható le.

$$p_m = B \cdot p_s \quad 6. \text{ egyenlet}$$

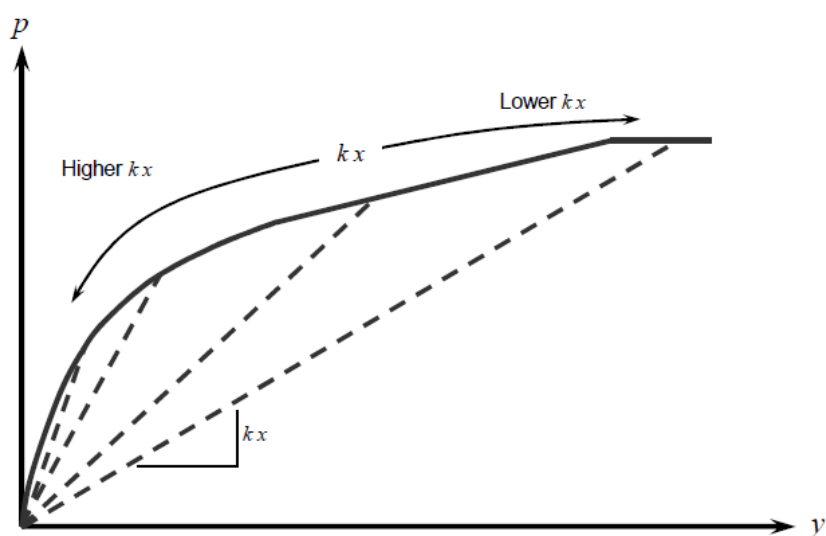
A görbe kezdeti, egyenes szakasza Terzaghi formuláját felhasználva számítható:

$$p = (kx)y \quad 7. \text{ egyenlet}$$

A p - y görbe számításához ismernünk kell k értékét is, melyet táblázatos formában közöltek, és ahogy a korábbi alfejezetben említtem, helyszíni méréseken alapul.

Reese és társszerzői két táblázatot publikáltak, melyek a talajvízszint alatti és a talajvízszint feletti homokrétegek k értékeire tesz javaslatot, a homok tömörsége függvényében, ahol a víz alatti értékeket csökkenti. Laza homok esetében 80%-ra, közepes homok esetén már 67%-ra, tömör homok esetén pedig 44%-ra való csökkentést ajánlanak a vízszint feletti rétegekhez képest.

A k érték megválasztása nagyban befolyásolhatja az eredményeket, amelyet a következő ábra szemléltet.



8. ábra: k értékének hatása a p - y görbékre (Isenhowe et al. 2019)

Kisebbségi k esetén a függvény meredeksége csökken, ellaposodik, amely jelentősen nagyobb elmozdulást eredményez.

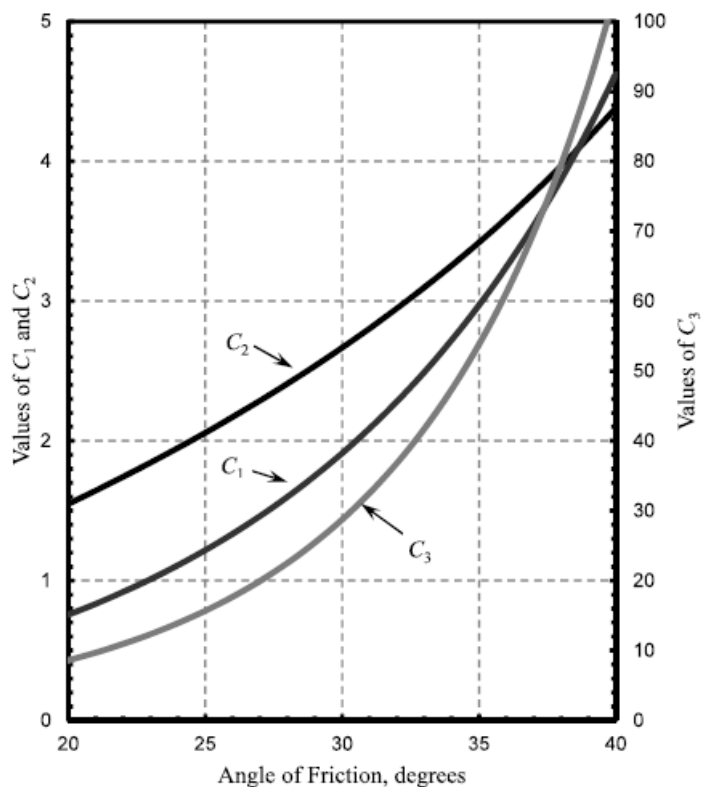
3.1.2 American Petroleum Institute (2010)

Az American Petroleum Institute által javasolt módszert az olajfúró tornyok tervezéséhez dolgozták ki. Az eljárás hivatalosan is elismert, illetve mára az egyik legelterjedtebb. Az előző eljáráshoz képest (Reese et al.) a különbséget az adja, hogy az API hiperbolikus függvényt képez.

Az API ajánlás szerint a maximális ellenállás értéke két érték között változik, melyek közül az egyik kis mélységben adja meg a maximális talajreakciót, a másik nagy mélységben. A két eredmény közül a kisebbet kell figyelembe venni p_u értékeként.

p_u mindkét esetben a mélységnek (x), a víz alatti térfogatsúlynak (γ'), a cölöp átmérőjének (b) függvénye, a különbséget a két egyenlet között a C együtthatók adják, melyekből hármat vezettek be (C_1, C_2, C_3). Míg kis mélységben C_1 és C_2 tényezővel számolhatunk, nagy mélységben a C_3 együtthatót kell alkalmaznunk.

Az együtthatókat a belső súrlódási szög függvényében határozhatjuk meg.



9. ábra: C együtthatók értékei (Isenhower et al., 2019)

Az ábra szerint a bal oldali függőleges tengelyre vetítve kaphatjuk meg C_1 és C_2 értékét, C_3 -at pedig a jobb oldalon olvashatjuk le. Látható, hogy C_3 értéke egy nagyságrenddel nagyobb a C_1 és C_2 értékekhez képest, ennek oka, hogy C_3 esetében a passzív földnyomás szorzó (K_p) négyzetes formában kerül figyelembevételre.

A hiperbolikus függvény a következő módon számítható:

$$p = A \cdot p_u \cdot \tanh \left(\frac{kx}{A \cdot p_u} \cdot y \right) \quad 8. \text{ egyenlet}$$

ahol A a terhelés típusától függő szorzó.

Az API eljárás esetében a k értéke a tömörség mellett a belső súrlódási szögtől is függ, értéke diagramról meghatározható.

3.2 Agyagtalaj

3.2.1 Az első ajánlások

A műszeres mérések lehetősége előtt a tervezők igyekeztek elméleti úton megközelíteni a vízszintes irányban terhelt cölöpök problémáját. Az első megoldások agyagtalajokra Skempton (1951) és Terzaghi (1955) munkái voltak.

Terzaghi (1955) ajánlásában a homoktalajokhoz hasonlóan az agyagtalajok esetében sem végzett helyszíni méréseket, így meglátásai kizárólag szakirodalmon és elméleti megfontolásokon alapultak. Terzaghi arra a következtetésre jutott, hogy a merev agyagokban a p - y görbék mélységgel nem változnak, és hogy a p és y közötti arány egy állandóval, α_T -vel írható le. Hasonlóan a homoktalajokhoz tartozó k értékéhez, Terzaghi ajánlásai az α_T értékekre sem használatosak már.

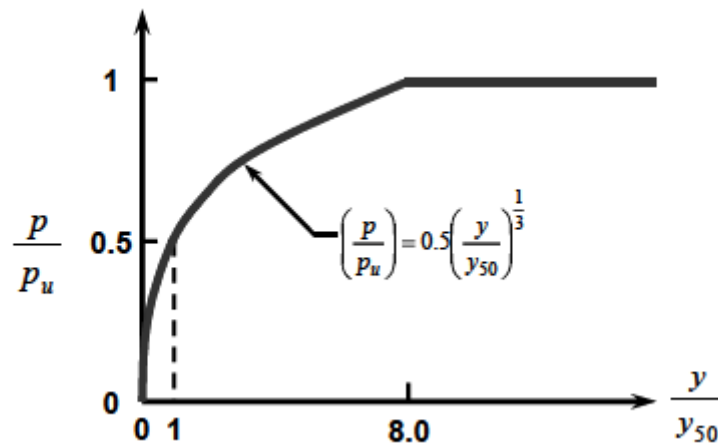
Később, a nagyobb kutatási projektek idején McClelland és Focht (1956) javasolt újabb módszert a megoldásra. Ez a modell azért volt jelentős, mert a két szerző mutatta be először a p - y görbék olyan alkalmazását, ahol a talaj oldalirányú mozgásokkal szembeni ellenállásának modellezésére használják fel. Szintén ők voltak az elsők, akik műszeres próbaterhelések alapján határozták meg a p - y görbét, melyeket vízszintes teherátviteli függvényeknek neveztek.

Az LPile-ban öt eljárás közül választhatunk agyagtalajok esetén.

3.2.2 Puha agyag, Matlock (1970)

Matlock a méréseit egy acélcső cölöppel végezte el két különböző talajkörnyezetben. Először a texasi Austin-tó mellett, ahol a talaj nyírószilárdsága körülbelül 38 kPa volt, majd pedig a Sabine-tó melletti Sabine Passben, ahol a talaj nyírószilárdsága körülbelül 14,4 kPa volt. A cölöpöt statikus és ciklikus terhelésre is vizsgálták.

Matlock számításai alapján olyan parabolikus p - y görbét javasolt, amely egy egyenlettel leírható.



10. ábra: Puha agyag p-y görbéje (Isenhower et al., 2019)

A maximális talajreakciót az átlagos térfogatsúlyból (γ'_{avg}), a mélységből (x), a drénezetlen nyírószilárdságból (c), a cölöp átmérőjéből (b), és egy J állandóból kapjuk.

J értékét Matlock kísérleti úton határozta meg, 0,5-öt ajánlott puha agyagok, és 0,25-öt merev agyagok esetében.

A p_u érték kiszámítása után a p-y görbe az ábrán látható összefüggéssel kirajzolható. A görbe $8 \cdot y_{50}$ értékig parabolikus, majd p értéke konstans. y_{50} a maximális talajreakció feléhez tartozó elmozdulást jelöli, a 9. egyenlet alapján számítható.

$$y_{50} = 2,5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot b \quad 9. \text{ egyenlet}$$

Az egyenletben ε_{50} a maximális feszültség felénél fellépő megnyúlás.

3.2.3 Puha agyag, API

Az API ajánlása valójában teljesen megegyezik a Matlock által publikált p-y görbével. Külön modellben jelenik meg mégis, ennek oka pedig az, hogy míg a Matlock-féle modellnél J értéke adott (0,5), addig az API-féle modellben ez a bemenő adatok megadásakor szabadon felvehető az általunk választott értékre.

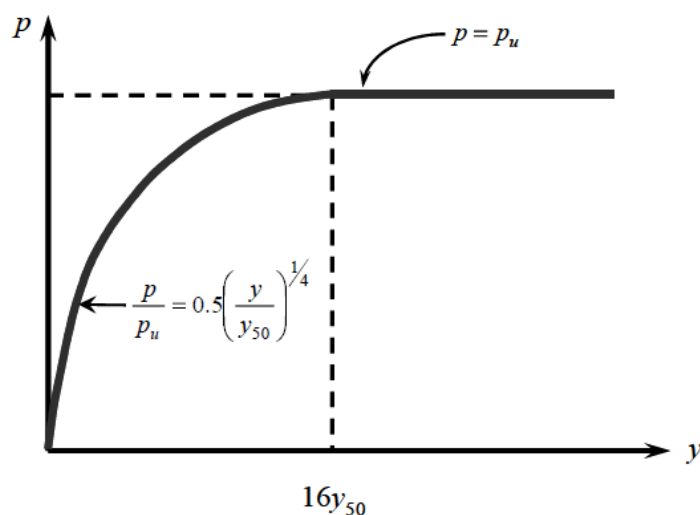
3.2.4 Merev agyag víz jelenléte nélkül, Reese, Cox, Koop (1975)

Reese, Cox és Koop Matlockhoz hasonlóan helyszíni mérésekre alapozták a merev agyagokra jellemző p-y görbék javaslatukat. Két görbe köthető a nevékhöz, annak függvényében, hogy a vizsgált talajréteghez juthat-e be víz a felszínről, vagy a környező vízáteresztő rétegekből. Ahhoz, hogy eldöntsük melyik modellt alkalmazzuk, fontos ismernünk a pontos rétegződést, illetve a cölöp pozícióját is.

Amennyiben várható, hogy a felszínről víz jut az agyagréteghez, illetve magas talajvíz esetén, a víz jelenlétét figyelembe vevő p-y görbét kell alkalmazni.

A víz jelenléte nélkül alkalmazható p-y görbe esetében a maximális talajreakció számításához a drénezetlen nyírószilárdságot (c_u), a térfogatsúlyt (γ'), a cölöpátmérőt (b), és ε_{50} értékét kell ismernünk.

Szintén szerepel az egyenletben a J faktor, amelyet 0,5-nek vettek fel.



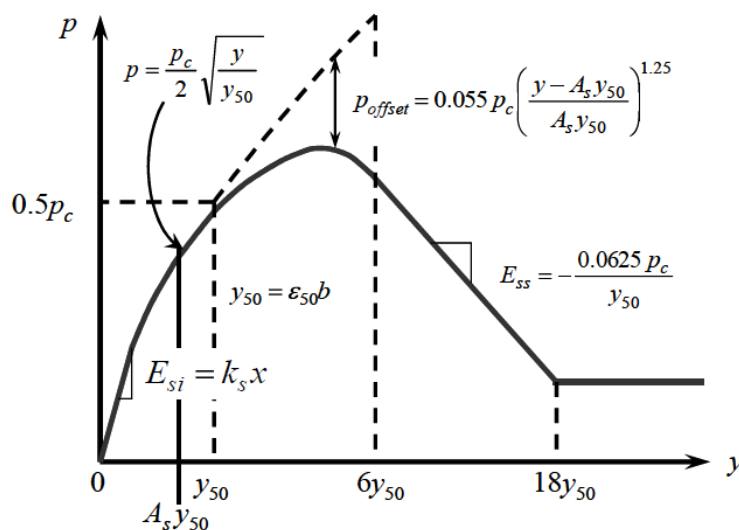
11. ábra: Merev agyag p-y görbéje (víz jelenléte nélkül) (Isenhower et al., 2019)

A p-y görbe pontjait p_u ismeretében az ábrán szereplő összefüggés adja meg.

y_{50} értéke a puha agyaghoz hasonlóan a $2,5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot b$ összefüggéssel számítható.

3.2.5 Merev agyag víz jelenlétében, Reese, Cox, Koop (1975)

Víz jelenlétében a p-y görbe már bonyolultabb képet ad.



12. ábra: Merev agyag p - y görbéje (víz jelenlétekor) (Isenhowe et al., 2019)

A 12. ábrán megadott p_{offset} képletében szereplő A_s együttható megegyezik a homoktalajoknál használt, 7. ábrán látható értékekkel.

p_c a talajellenállás egységnyi cölöphosszra vonatkoztatott értéke, amelyet a korábban homoktalajnál bemutatotthoz hasonlóan kis mélységben és nagy mélységben is szükséges számítani, a kettő eredmény közül pedig a kisebb adja p_c értékét.

$$p_{ct} = 2c_a b + \gamma' b x + 2.83 c_a x \quad 10.\text{egyenlet}$$

$$p_{cd} = 11 c b \quad 11.\text{egyenlet}$$

Az egyenletekben c_a az átlagos drénezetlen nyírószilárdságot, c a drénez-telen nyírószilárdságot, γ' a térfogatsúlyt jelöli.

p_c ismeretében az ábrán feltüntetett összefüggésekkel számíthatók a görbe egyes szakaszai.

3.2.6 Módosított merev agyag víz jelenléte nélkül

A 3.2.3 fejezetben ismertetett merev agyaghoz tartozó maximális talajreakció számításakor az értéket megadó paraméterek között nem szerepel a k , kezdeti merevség paraméter. Bár a Reese, Koop, Cox féle formulát éveken keresztül sikeresen alkalmazták, az Egyesült Államok délkeleti részéről többször beszámoltak olyan esetről, amikor a terheléses vizsgálatok során azt tapasztalták, hogy a p - y görbe kezdeti szakaszán a merevség túl nagy-nak bizonyult a valósághoz képest. Ennek feltehetőleg az volt az oka, hogy kis alakváltozások esetén a talaj ellenállását olyan tényezők is befolyásolják, mint a talaj nedvességtartalma, az agyagszerkezet, az esetleges kiszáradás, vagy a cölöp átmérője.

Brown (2002) a p-y görbék kezdeti szakaszának módosítására egy helyszíni, vízszintes próbaterheléseken alapuló k érték használatát javasolta. Ez a modell a szoftveren belül tehát akkor használható jól, ha rendelkezésünkre állnak próbaterhelés eredmények, amely alapján a k értéket megadhatjuk.

A modell a p-y görbe kezdeti szakaszán a p értéket a 12. és 13. egyenlet közül a kisebb eredményt adóval számol.

$$p = (kx)y \quad 12. \text{ egyenlet}$$

$$p = \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{0.25} \quad 13. \text{ egyenlet}$$

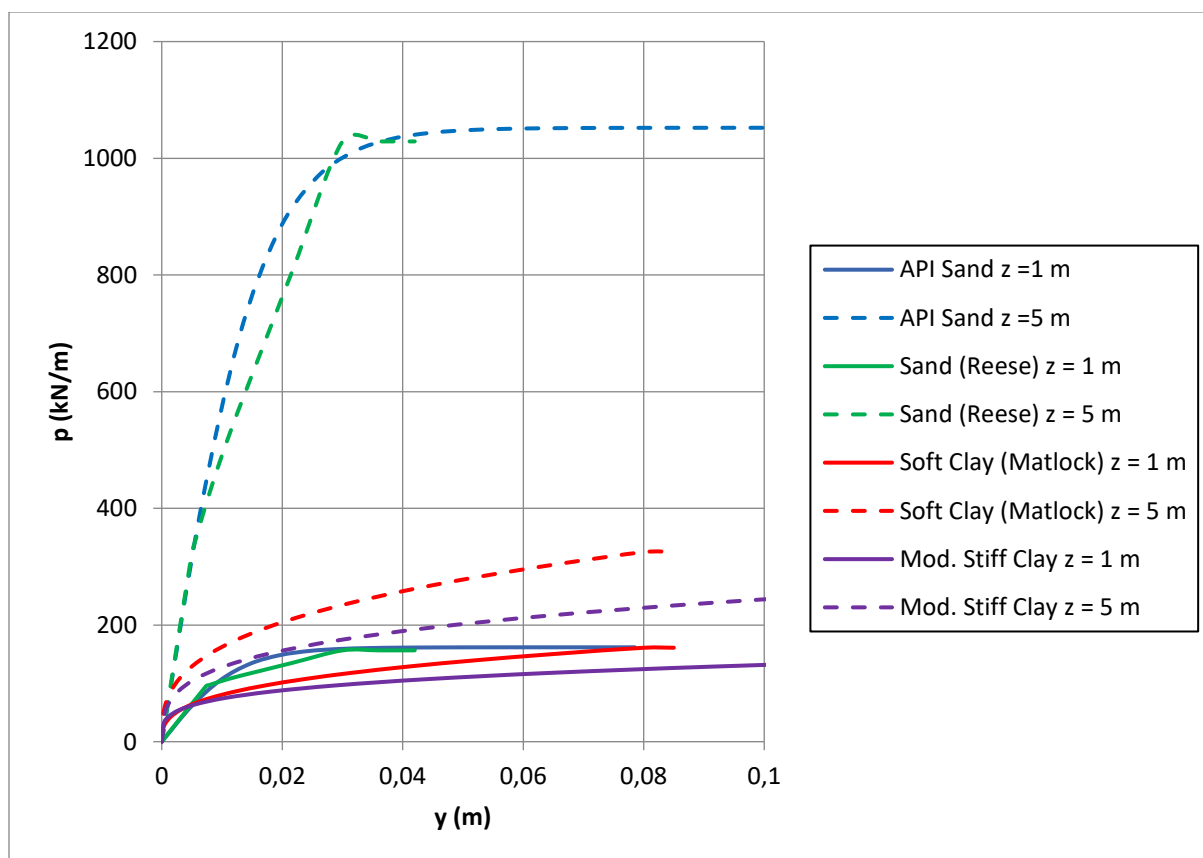
Az y_{50} a 14. egyenlet alapján számolható.

$$y_{50} = 2,5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot b \quad 14. \text{ egyenlet}$$

Talajfelszínen a 12. egyenlet esetén, mivel a mélység (x) nulla, ezért a talaj-ellenállás (p) is nulla lesz. A talajreakció tehát a felszínen minden esetben nulláról indul a módosított modell használatakor.

3.3 Összefoglalás

A 13. ábrán a különböző talajokra jellemző p-y görbék láthatók 1 és 5 méteres mélységben.



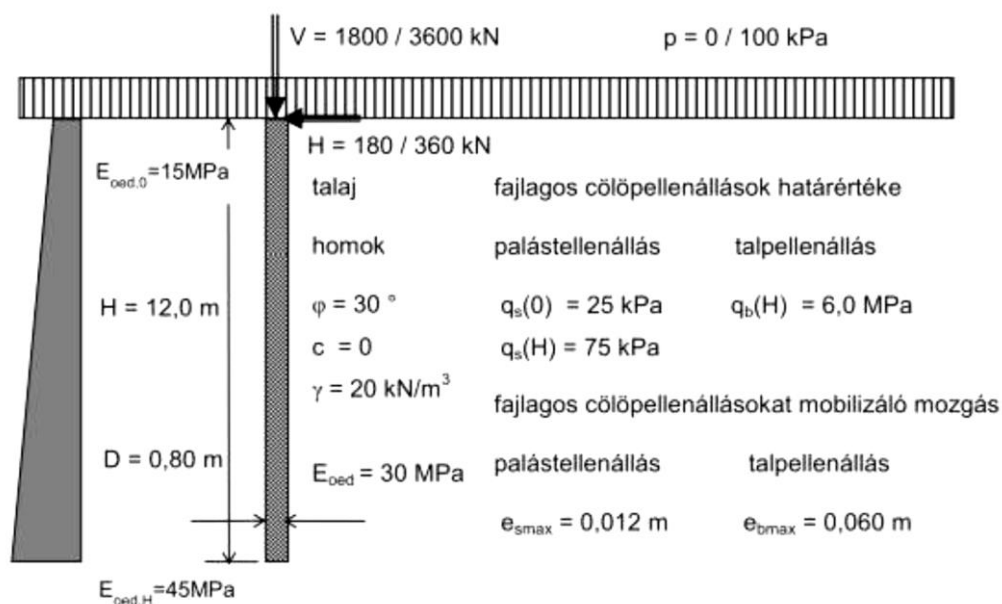
13. ábra: p-y görbék összehasonlítása

Az ábrán látható, hogy homoktalajok esetében a mélységet (z) növelve jelentősen nő a merevség és a határerő. Agyagtalajok esetében ez a növekedés kevésbé markáns, a határerő értéke mindkét feltüntetett modell esetében a kétszeresére nő (161 kN/m, 325 kN/m).

4 Paraméteranalízis

4.1 Előzmények

A paraméteranalízis során az ábrán látható mintafeladatot vettem alapul.



14. ábra: Kiindulási példa (Szép, 2014)

A számításokat mind a homok, mind az agyag esetén homogén talajrétegződésre végeztem el. A vizsgált paraméterek a két talajtípus esetén eltérnek, a választott p-y görbékhez tartozó bemenő adatok ugyanis nem egyeznek meg.

A beton anyagminőségének C30/37-et választottam, vasalásnak pedig 16 db 20 mm átmérőjű vasat alkalmaztam, amely így 1%-os vashányadot jelentett.

4.2 Homoktalaj

Homoktalajok esetén a paraméteranalízist négy esetre végeztem el. Vizsgáltam a talaj belső súrlódási szögének, a vízszintes erő változtatásának, a függőleges erő változtatásának, valamint a vashányad változtatásának hatását.

4.2.1 Belső súrlódási szög hatásának vizsgálata

A programban az előző fejezetben említett két p-y görbe alkalmazásával vizsgáltam a belső súrlódási szög hatását. Az eredmények közül minden paraméter vizsgálatánál az elmozdulás és a nyomaték változását ábrázoltam először.

Az LPile homoktalajok esetén a 30°-40°-ig terjedő tartományban tud számolni, így a vizsgálatot ebben a tartományban végeztem, az értékeket 2°-onként változtatva. A cölöpre 180 kN vízszintes, és 1800 kN tengelyirányú erőt működtettem, a cölöpfejet pedig szabadon elfordulónak vettem fel.

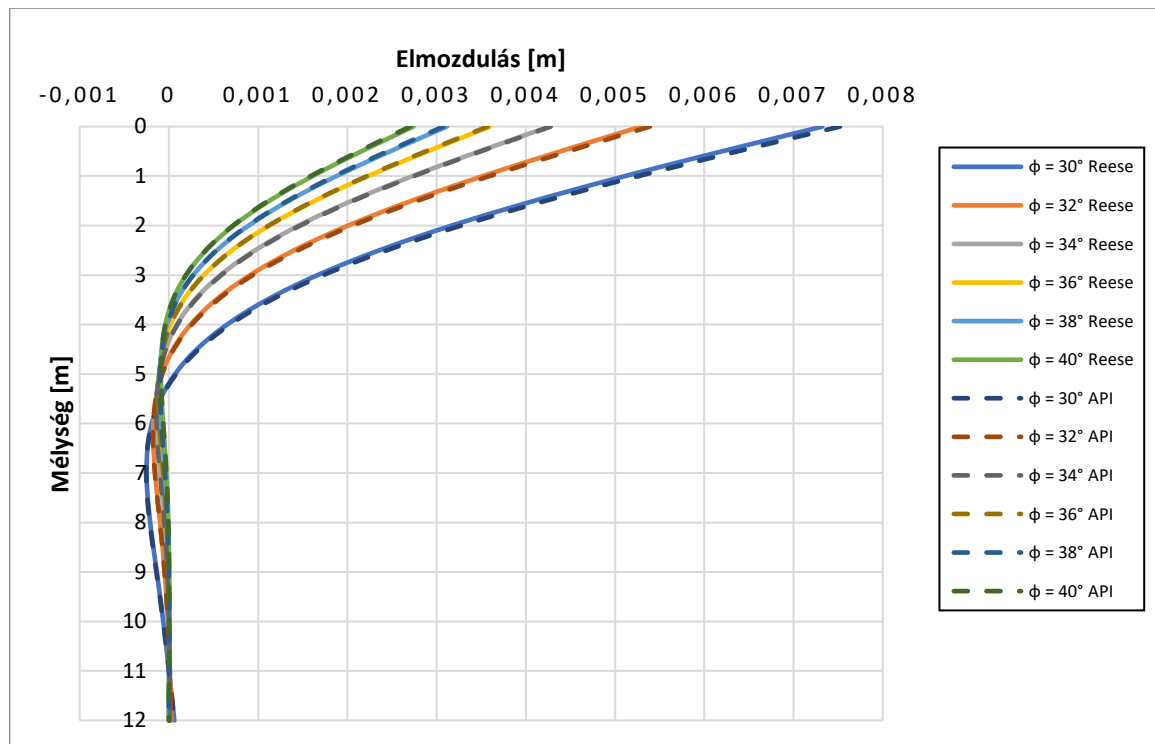
4.2.1.1 Belső súrlódási szög hatása

A 15. ábrán látható, hogy a belső súrlódási szög növelése jelentős különbségeket okoz az elmozdulás értékekben. Megfigyelhető, különösen $\varphi=30^\circ$ esetén, hogy a felvett erők nagy mélységben is hatással vannak a cölöpre, a 12 méteres cölöphosszból ugyanis 11 méter mélységig látható elmozdulás. Ennek oka, hogy kisebb belső súrlódási szög esetén a talaj teherbírása kisebb, ezáltal a felszín közelében a talajellenállás kimerül.

Az aktív cölöphossz képlet (Randolph, 1981) összefüggései is megjelennek a kapott elmozdulások képében.

$$L_a = 1,5 \cdot \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{1/4} \cdot d \quad 15.\text{egyenlet}$$

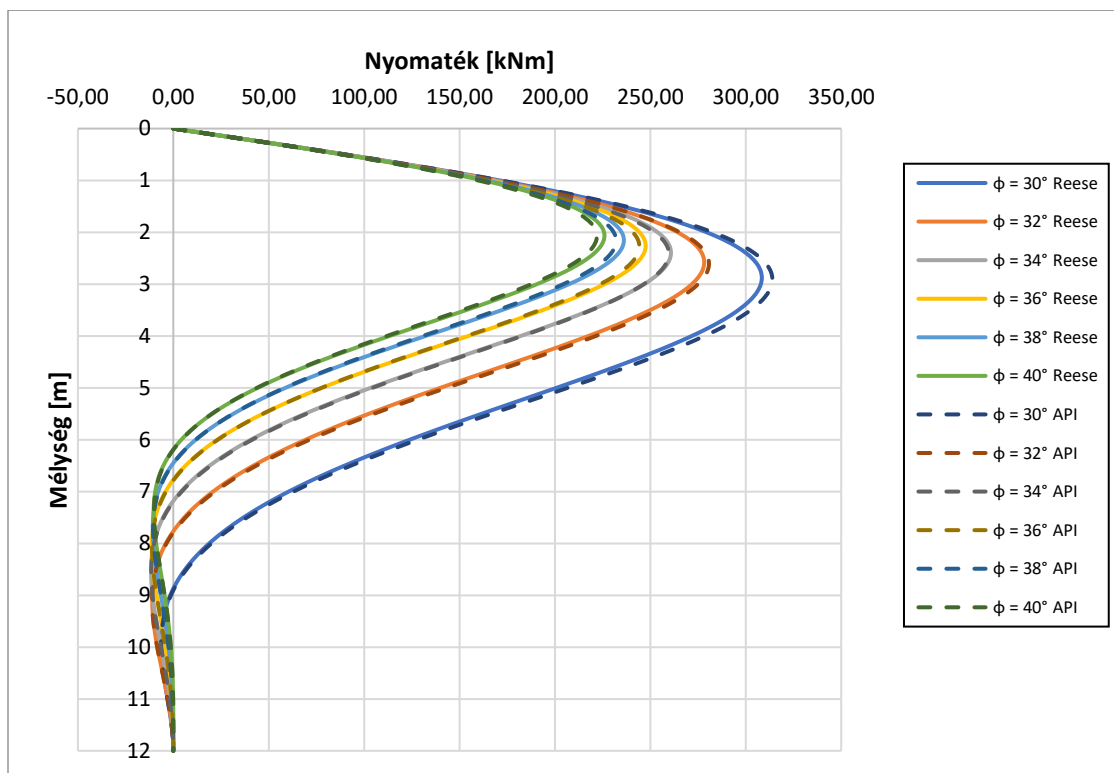
Az aktív cölöphossz az a mélység, amíg a vízszintes erő lehat. A képletben E_p a cölöp rugalmassági modulusa, amely jelen esetben állandó. d a cölöp átmérője, E_s pedig a talaj rugalmassági modulusa. Az egyetlen változó tényező tehát az E_s értéke, amely a belső súrlódási szög növelésével változik. E_s növekedésével a hányados csökken, ezáltal a dolgozó cölöphossz is kisebb lesz.



15. ábra: Belső súrlódási szög hatása, elmozdulás

A nyomatéki ábrákról látható, hogy a nyomatéki maximum helye változik, míg $\phi=40^\circ$ -nál körülbelül két méteres mélységben van, úgy $\phi=30^\circ$ -nál a maximális nyomaték helye 3 méter mélyre tehető.

A nyomatéki ábrán megmutatkozik, hogy a különböző belső súrlódási szög értékek befolyásolják a lehatást a cölöpön, a nyomatéki nullpontok helye között ugyanis lényeges különbség van, $\phi=30^\circ$ esetén 9 méter mélységben lesz a nyomaték értéke nulla, $\phi=32^\circ$ esetén ez 7,8 méter mélységben adódik.



16. ábra: Belső súrlódási szög hatása, nyomaték

4.2.1.2 Modellbeli eltérések

A 15. és 16. ábra alapján a két modell alkalmazásakor az eredményekben jelentős különbség nem adódik. Kisebb belső súrlódási szög (30° , 32°) alkalmazása esetén az API modell nagyobb elmozdulást ad eredményül, azonban ez a különbség elhanyagolható mértékű.

A nyomatékok esetében sincs nagyobb eltérés, az API modell $\phi=34^\circ$ -ig kisebb, majd nagyobb nyomatéki maximumot ad eredményül.

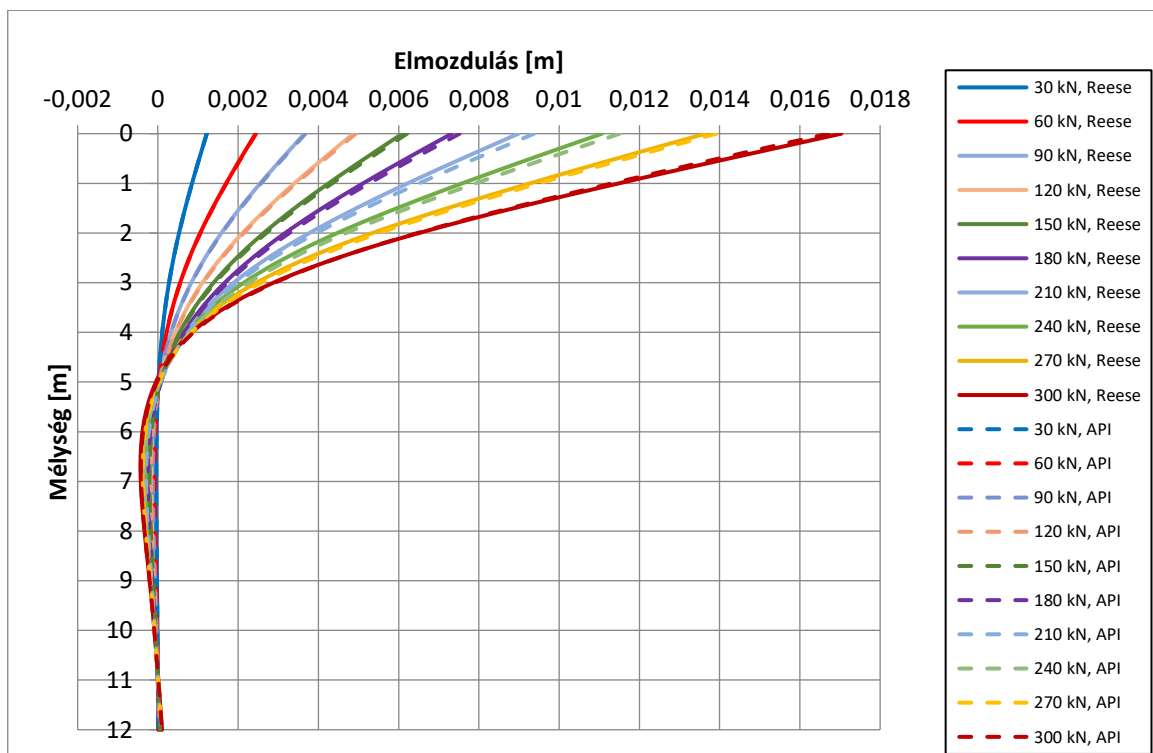
4.2.2 Vízszintes erő növelésének hatása

A vízszinter erő növelésekor 30 kN-os lépésközöket alkalmaztam, szintén a Reese és API-féle modellt használva. Függőleges erőnek minden esetben 1800 kN-t működtettem, a belső súrlódási szögnek 30° -t alkalmaztam, a cölöpfej kapcsolatát pedig ebben az esetben is szabadon elfordulónak tekintettem.

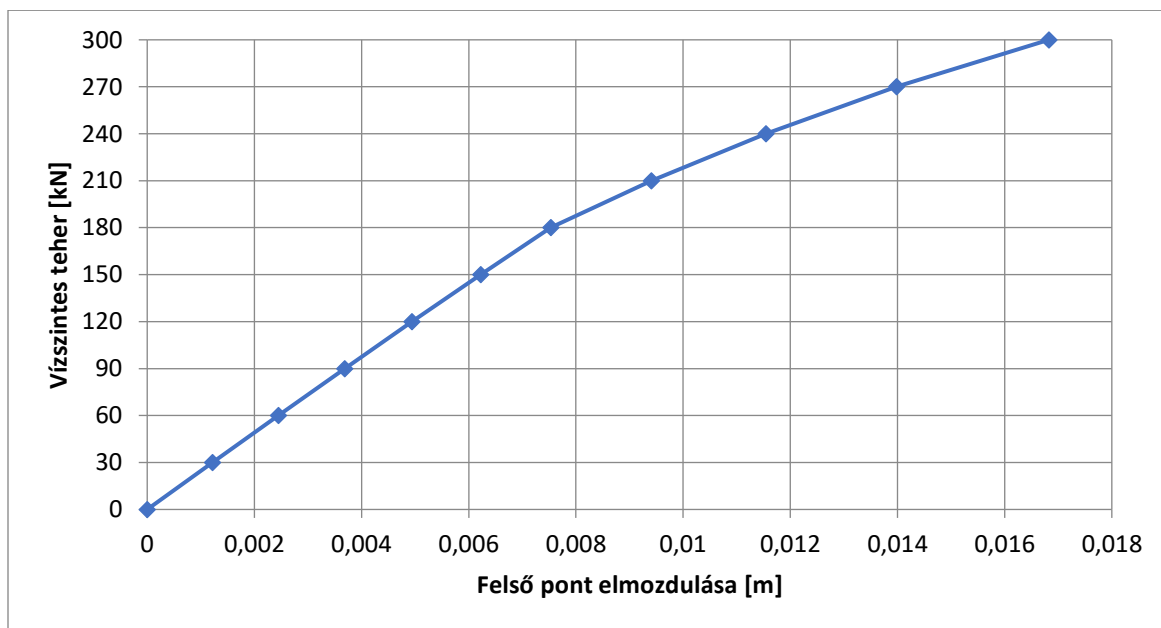
A vízszintes elmozdulás diagramján a nemlinearitás szembetűnő. A különböző vízszintes erőket működtetve ugyanis a maximális elmozdulások értékei közti lépésközök egyre nagyobbak. Míg a 30 kN és a 60 kN görbét nézve a felső pont elmozdulása között körülbelül 1 mm különbség van, 270 kN és 300 kN között ez a különbség már 3 mm.

A 18. ábra a vízszintes terhelés és a felső pont elmozdulásának kapcsolatát mutatja. Látható, hogy a görbe meredeksége a kezdeti szakaszon nagyobb, 180 kN-ig nagyjából állandó, azaz eddig az értékig az erő-elmozdulás kapcsolat lineáris. Ahogy a görbe laposodik, ugyanakkora teherlépcsőhöz nagyobb elmozdulás tartozik.

A két modell között minimális eltérés 180-240 kN-ig látszik, ennek mértéke azonban itt is elhanyagolható.

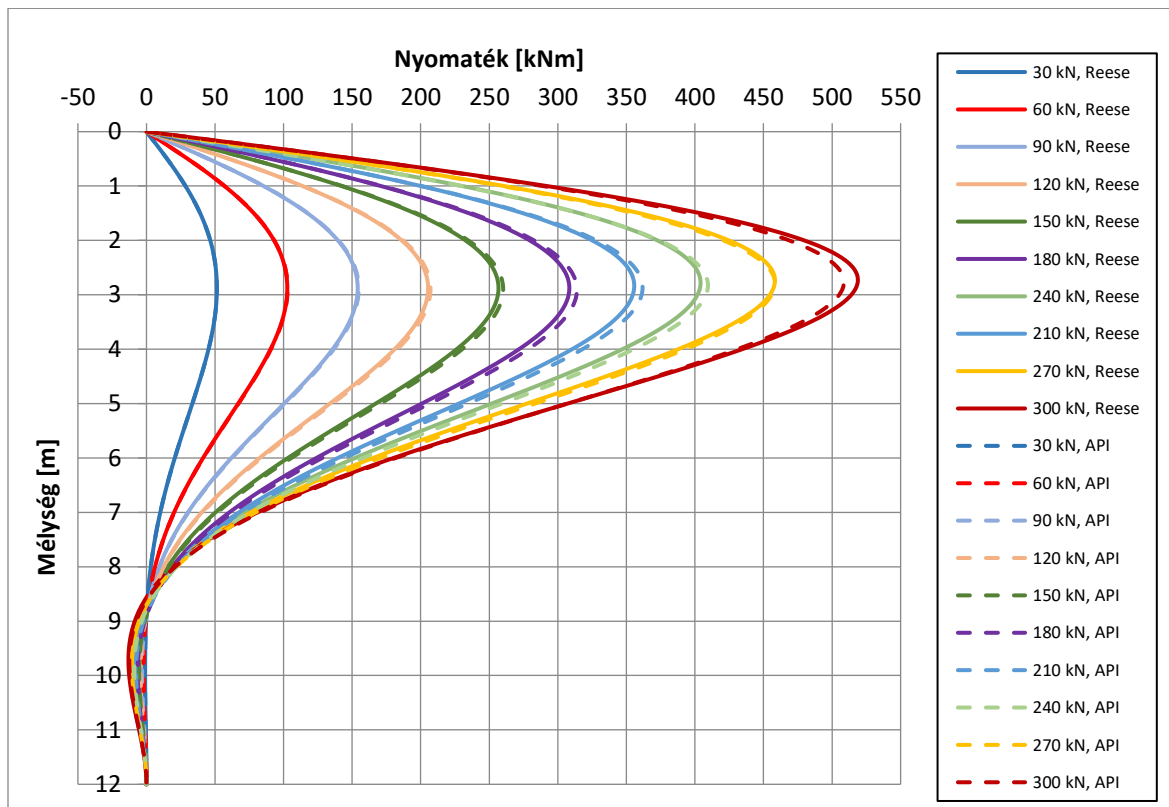


17. ábra: Vízszintes erő hatása, elmozdulás



18. ábra: Vízszintes teher-felső pont elmozdulás kapcsolata

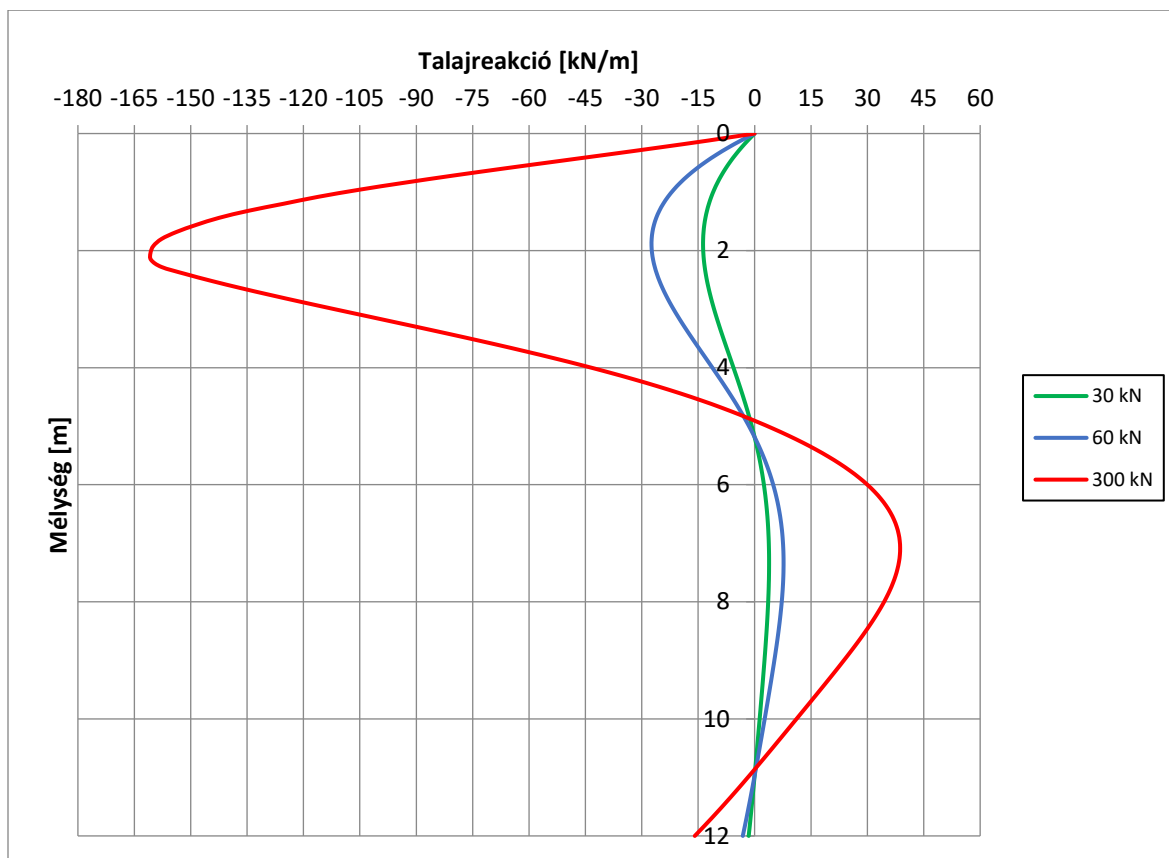
A nyomatéki ábra esetén a korábbi tapasztalattal ellentétben a nyomatéki csúcsok helye nem változik az erő növelésével. Ezen kívül a lehatás mélysége sem változik, a nyomatéki nullpont ugyanolyan mélyen van, körülbelül 9,5 méteren. Az elmozdulás görbékkel ellentétben itt nem jelenik meg a nemlinearitás, a nyomatéki maximum ugyanolyan lépésközökkel növekszik. Ennek okának megtalálásához a talaj reakcióerő, illetve a cölöp merevség változását volt szükséges megvizsgálni.



19. ábra: Vízszintes erő hatása, nyomaték

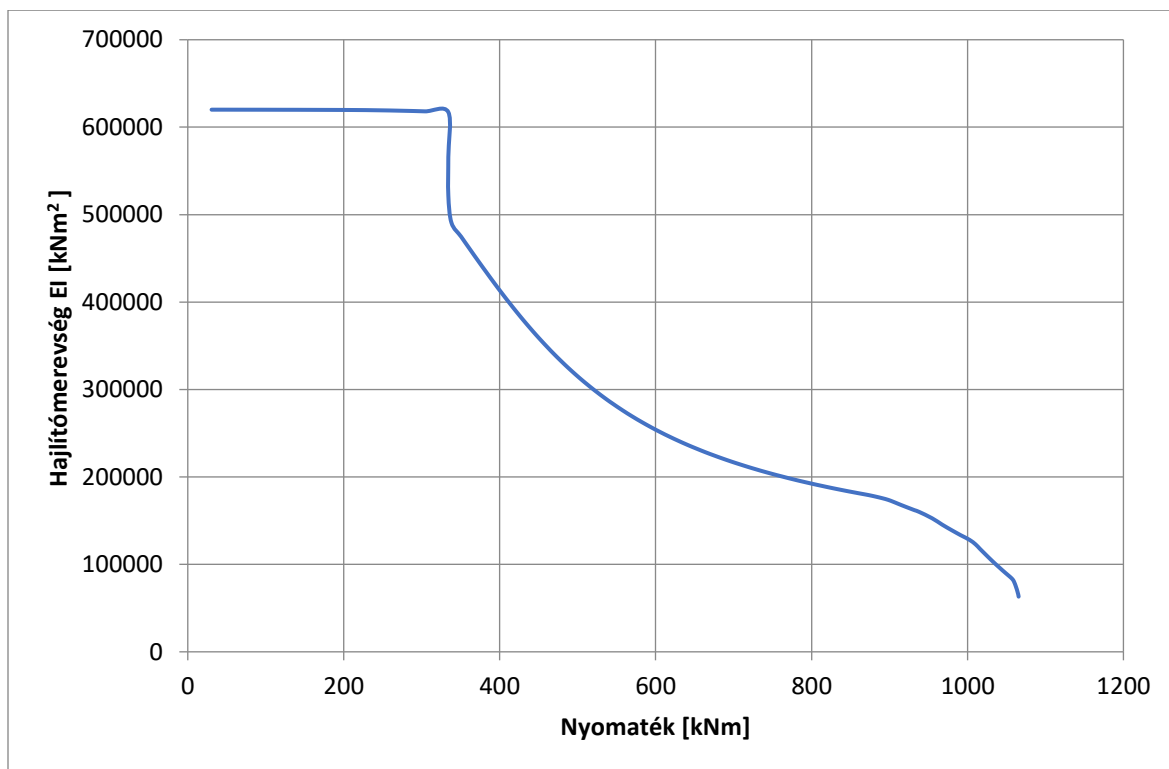
A 20. ábrán a talajreakció változása látható 30, 60 és 300 kN vízszintes erőt működtetve. A 30 és 60 kN teherhez tartozó görbéket összehasonlítva az tapasztalható, hogy az erőhöz hasonlóan a talajreakció is kétszeresére nő.

30 és 300 kN terhelés esetében a reakcióerő 10-szeres növekedése volt várható az előző eredmények alapján, azonban a reakcióerő 300 kN erő működtetésekor több, mint tízszeres értékre növekedett (13,6 kN; 160,5 kN.).



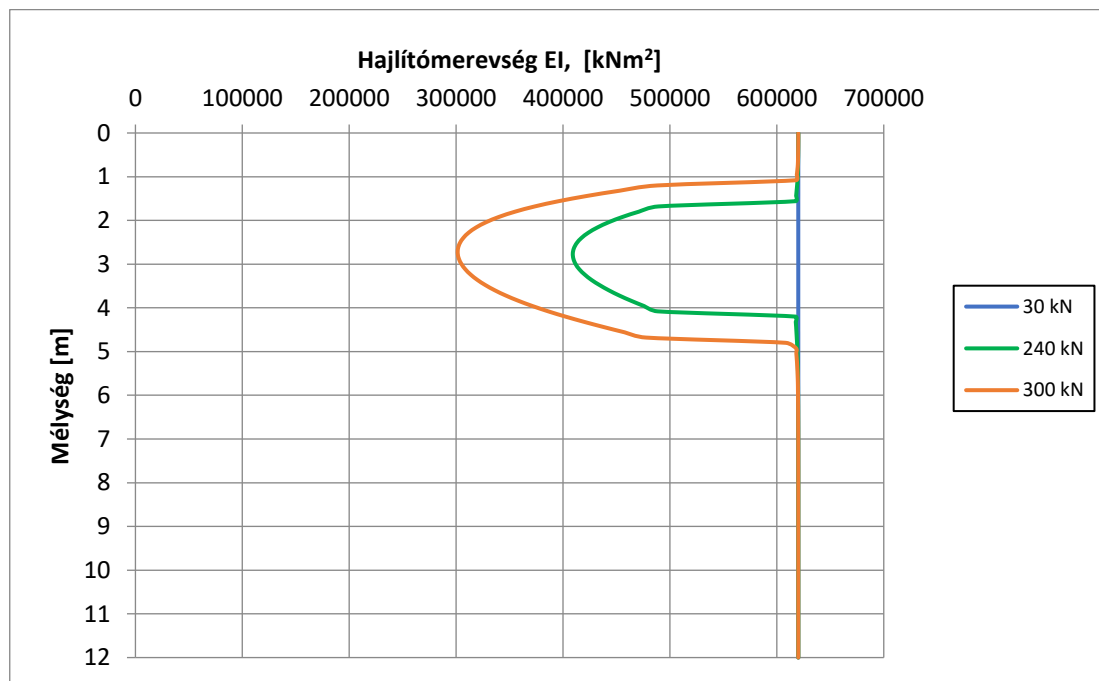
20. ábra: Vízszintes erő hatása, talajreakció

A cölöp merevségének változása látható a következő ábrán a nyomaték változásának függvényében. 334 kNm nagyságú nyomatékot elérve látható, hogy az addig konstans merevségi érték hirtelen csökkenésnek indul, az értékugrás után pedig folyamatos csökkenés mellett mérséklődik a mereksége. Ez az érték a vasbeton keresztmetszet repesztőnyomatéka, melynek elérése után a berepedési zóna növekedésével csökken a merevség. A program figyelembe veszi a vasbeton keresztmetszet berepedését, amely elérése után nagyobb nyomatékok esetén csökkentett merevségi értékkel számol. A 19. és 21. ábra szerint a körülbelül 200 kN vízszintes erő eléréséig a cölöp merevsége állandó, utána csökken egyre nagyobb tartományon, melyet a 22. ábra is igazol.



21. ábra: Hajlítómerevség-nyomaték diagram

A cölöp merevségének mélységgel való változását 30, 240 és 300 kN erő működtetésekor vettem össze. Míg 30 kN-nál a merevség konstans értékkel rendelkezett a cölöp teljes hosszán, 300 kN esetében a cölöp egy szakaszán jelentős csökkenés látható.



22. ábra: Hajlítómerevség mélységgel való változása

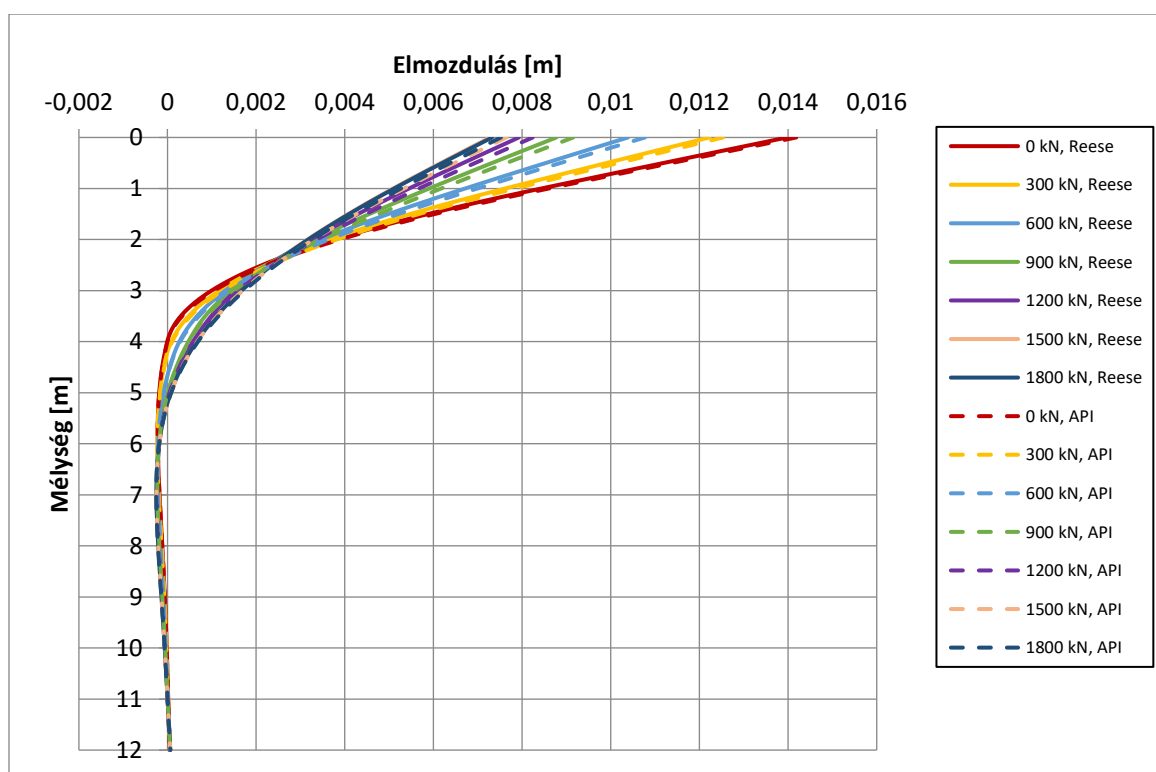
Az előbbiek alapján a nyomatékok változása az erő növelésével nemlinearitást, egyre nagyobb lépésközöket kellene, hogy mutassanak. A nyomaték azonban a merevség mellett a görbülettől is függ, így a nyomaték egyenletes lépésközzel való növekedése indokolható azzal, hogy bár a merevség csökken, a görbület akkora mértékben növekszik, hogy végeredményben a nyomatékokra nincs jelentős hatással.

Ezzel ellentétben az elmozdulásnál nemlinearitást tapasztalható, azonban itt a talaj kimerülésével indokolható a nagyobb deformáció.

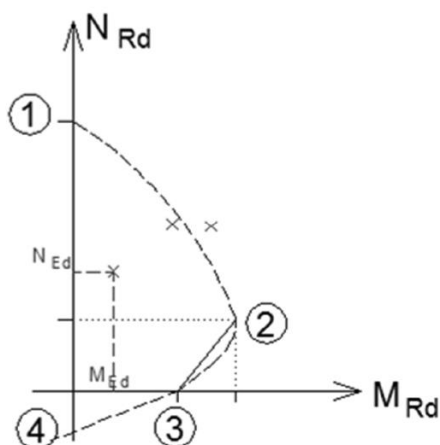
4.2.3 Függőleges erő növelésének hatása

A függőleges erőt 0-tól 300 kN-onként 1800 kN-ig növeltem, szintén mindkét talajmodellt vizsgálva. A belső súrlódási szög értéke 30° , a vízszintes erő pedig 180 kN.

Az elmozdulás diagramon látható, hogy amikor nem működtetünk függőleges erőt, az elmozdulás akkor a legnagyobb. Minél nagyobb tengelyirányú erőt működtetünk a cölöpön, annál kisebb érték adódik a felső pont elmozdulására. Ennek oka a vasbeton keresztmetszetekre jellemző teherbírási görbével szemléltethető.



23. ábra: Függőleges erő hatása, elmozdulás

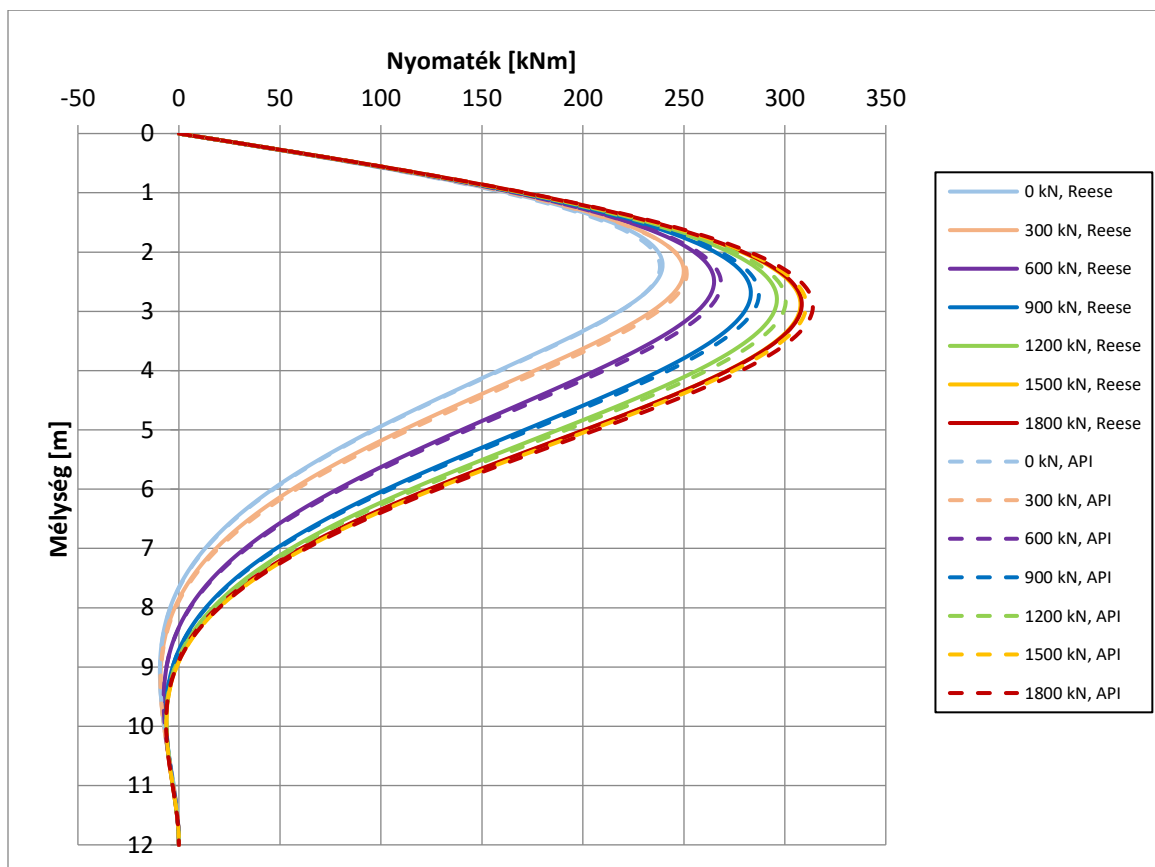


24. ábra: Teherbírési görbe (Szép, 2021)

Amennyiben a cölöpre nem hat normálerő, az ábrán feltüntetett 3-as pont, a tiszta hajlítás esete áll fent. Ez esetben kisebb a határnyomaték, ebből következően pedig a keresztmetszet kisebb nyomatéknál reped be. A nagyobb berepedt zóna nagyobb hosszon okoz merevségcsökkenést, ezáltal az elmozdulás is nagyobb.

A nyomaték esetében az látható, hogy amikor nem működtetünk függőleges erőt, a nyomatéki csúcs akkor lesz a legkisebb. Ez azzal indokolható, hogy a korábban leírtak szerint a berepedés kisebb nyomatéknál következik be, hosszabb tartományon, amely miatt a cölöp merevsége lecsökken.

A nagyobb elmozdulás nagyobb görbületet is jelent, azonban e növekmény kisebb arányú, mint a merevségcsökkenés. Ez indokolja, hogy kisebb függőleges erő működtetésekor a nyomaték is kisebb lesz.

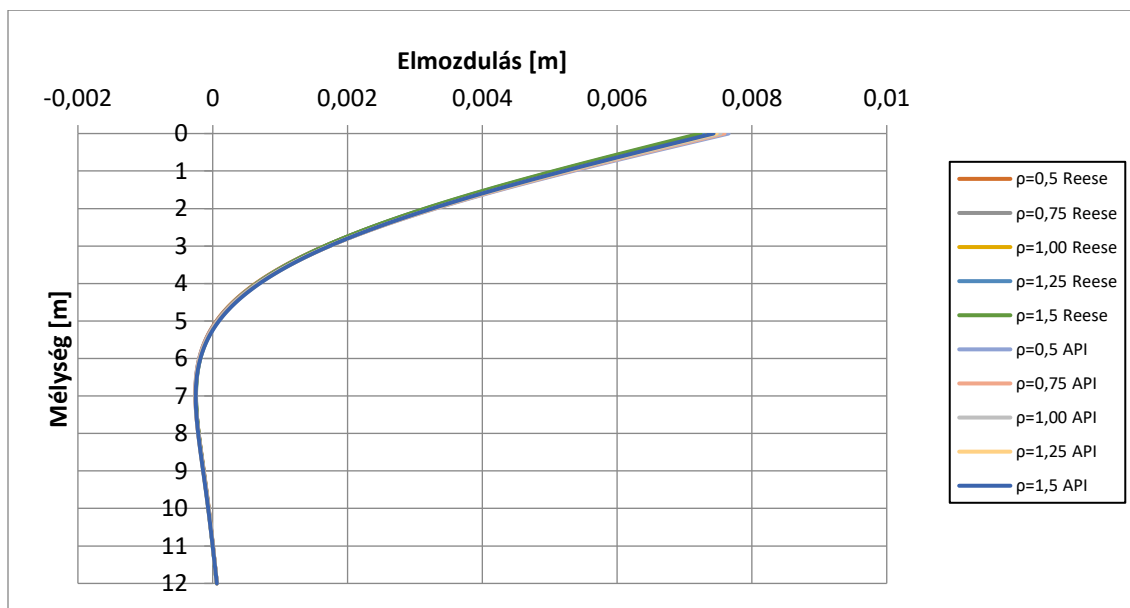


25. ábra: Függőleges erő hatása, nyomaték

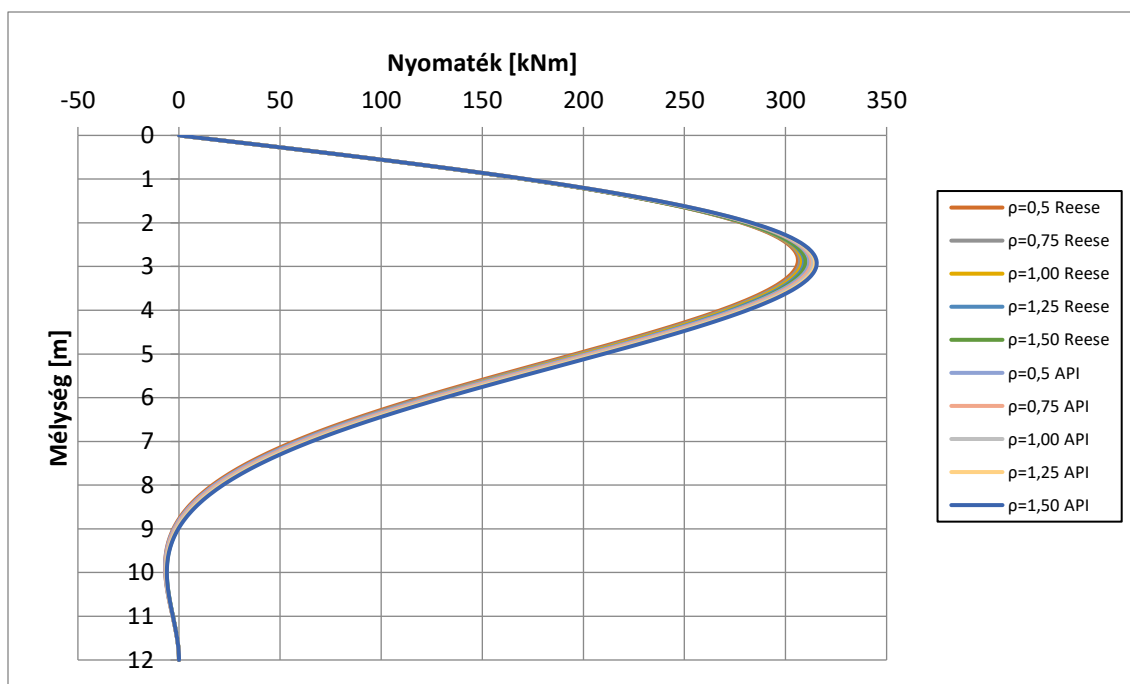
4.2.4 Vasalás hatása

A vasalás hatását a vashányad növelésével vizsgáltam. Normálisan vasalt keresztmetszet esetén a vashányad általában 0,5% és 1,5% közötti érték. Dolgozatomban ezért az alkalmazott vasalást úgy változtattam, hogy a vashányad 0,25%-kal növekedjen. A vasalás hatását szintén mindkét homokmodell esetén vizsgáltam.

Elmondható mind az elmozdulás, mind a nyomaték esetében, hogy a vasalás változtatása alig okozott eltérést az eredményekben. Az eredményre számítani lehetett, hiszen a vasbeton keresztmetszetek hajlítási merevségét nagyrészt a beton adja.



26. ábra: Vasalás hatása, elmozdulás



27. ábra: Vasalás hatása, nyomaték

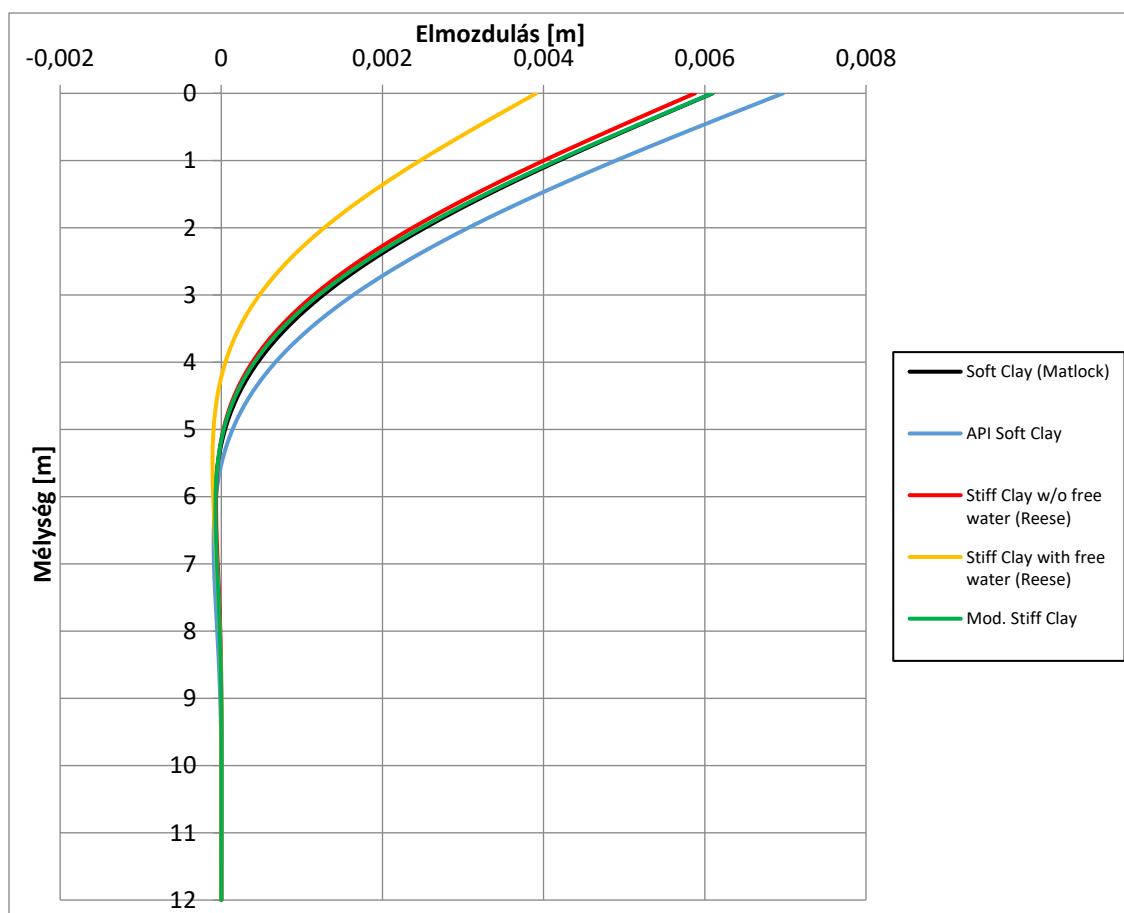
4.3 Agyagtalaj

4.3.1 Alapeset vizsgálata

Az agyagtalajok esetén a homogén talajkörnyezetet úgy határoztam meg, hogy a drénezetlen nyírószilárdság értékére 50 kPa-t vettem fel, és elsőként a különböző modellek viselkedését vettem össze, 180 kN vízszintes és 1800 kN függőleges terhet működtetve.

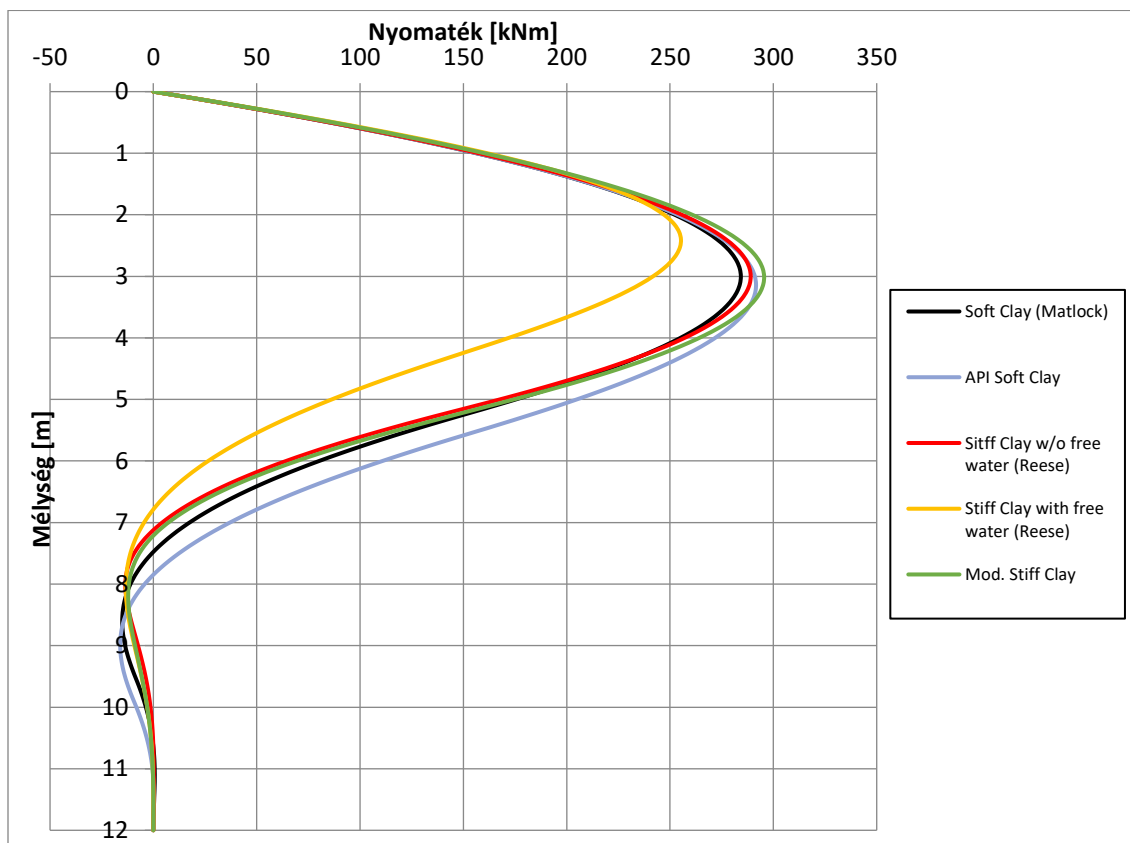
Az elmozdulás a 28. ábrán látható, mely szerint az öt modell közül három közel egy tartományba esik, minimális köztük az eltérés. A két nagyobb eltérést adó görbe a merev agyag víz jelenlétében, és az API puha agyag talajokra ajánlott p-y görbékkel számolt.

Az eltérést az API agyag esetében az adja, hogy bemenő adatként felvehető tetszőlegesen a J érték, míg a Matlock-féle puha agyag esetén a program 0,5-tel számol. A számítás futtatása előtt az API agyag J értékét 0,25-re vettem fel, így látható, hogy ennek hatása közel 1 mm-es eltérést okoz a vízszintes elmozdulás tekintetében.



28. ábra: Agyagmodellek összevetése, elmozdulás

A nyomatékok esetében szintén a merev agyag görbéje víz jelenlétében mutatta a legnagyobb eltérést. Amennyiben megnézzük a 9. egyenletet, és a 12. ábrát, látható, hogy az y_{50} számításában 2,5-szeres különbség van a két modell között. Ez gyakorlatilag a víz jelenlétében számoló modellnek jelent 2,5-szeres merevséget, amely így kisebb elmozdulást és nyomatéki maximumot eredményez.

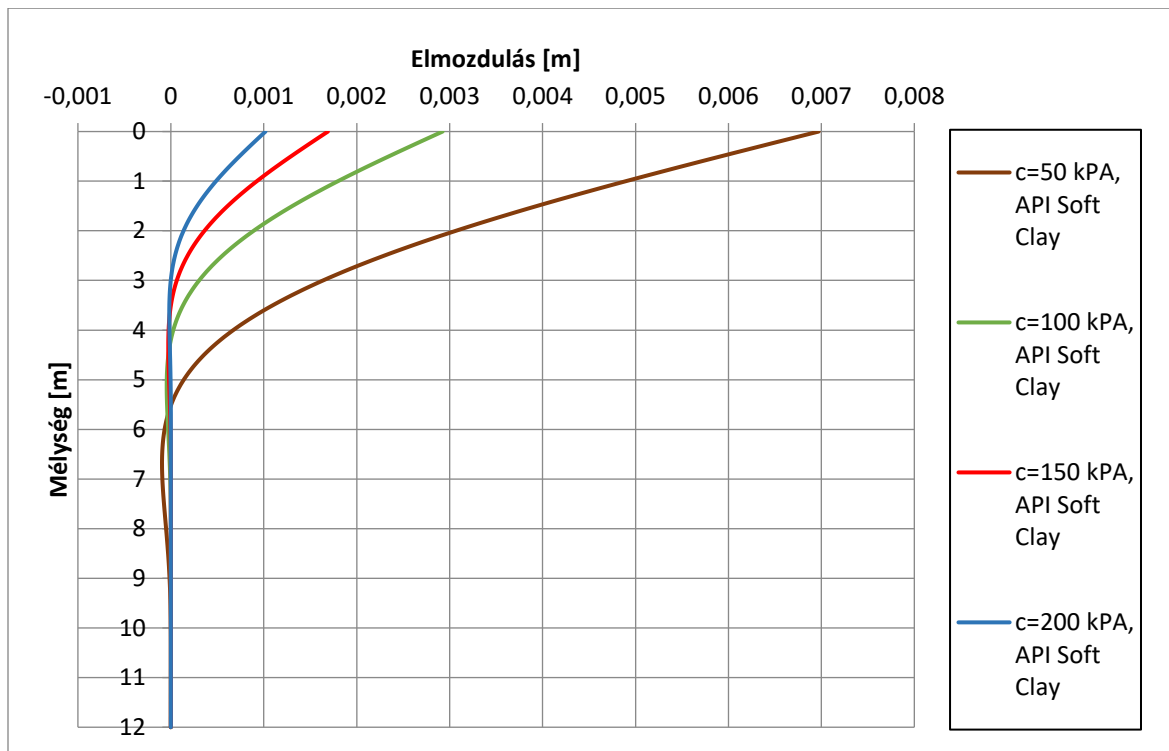


29. ábra: Agyagmodellek összevetése, nyomaték

4.3.2 Drénezetlen nyírószilárdság hatása

A drénezetlen nyírószilárdság növelése mind puha agyag, mind merev agyag esetén ugyanazt a képet adja, példaként a puha agyag talajra vonatkozó eredményeket ismertetem.

Az elmozdulásbeli különbségek a görbék között markánsan kijönnek. Mind a homoktalajoknál is tapasztalt egyre növekvő lépésköz, nemlinearitás, mind az erő hatásának változása jól látható.



30. ábra: Drénezetlen nyírószilárdság hatása, elmozdulás

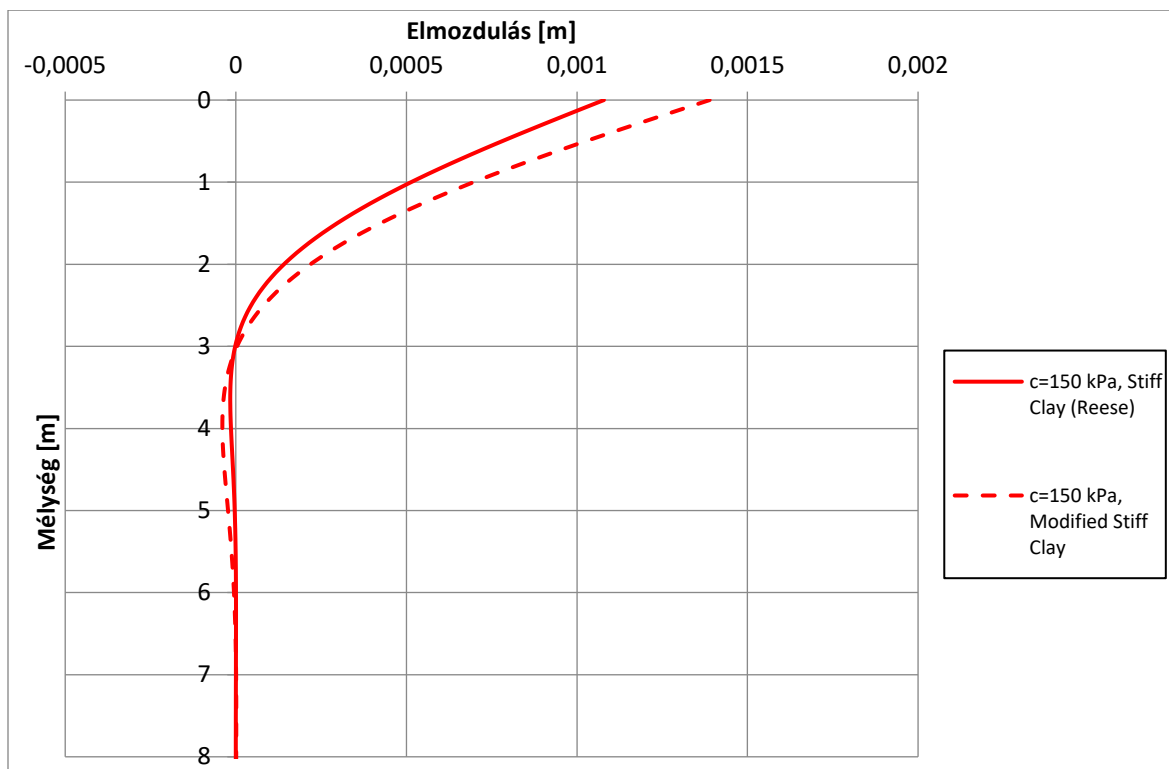
A különbségeket ebben az esetben is a merevség adja. A kohézió növelésével ugyanis nő a merevség, ezáltal az elmozdulás értékek lecsökkennek.

Az aktív cölöphossz képlet (Randolph, 1981) összefüggései az agyagtalaj esetében is megjelennek. Látható, hogy 50 kPa drénezetlen nyírószilárdság működtetésekor a cölöp 8 méter mélységben is elmozdul az erő irányába, ellentétben a nagyobb kohézióhoz tartozó számításokkal.

4.3.3 Módosított és eredeti merev agyag modell összehasonlítása

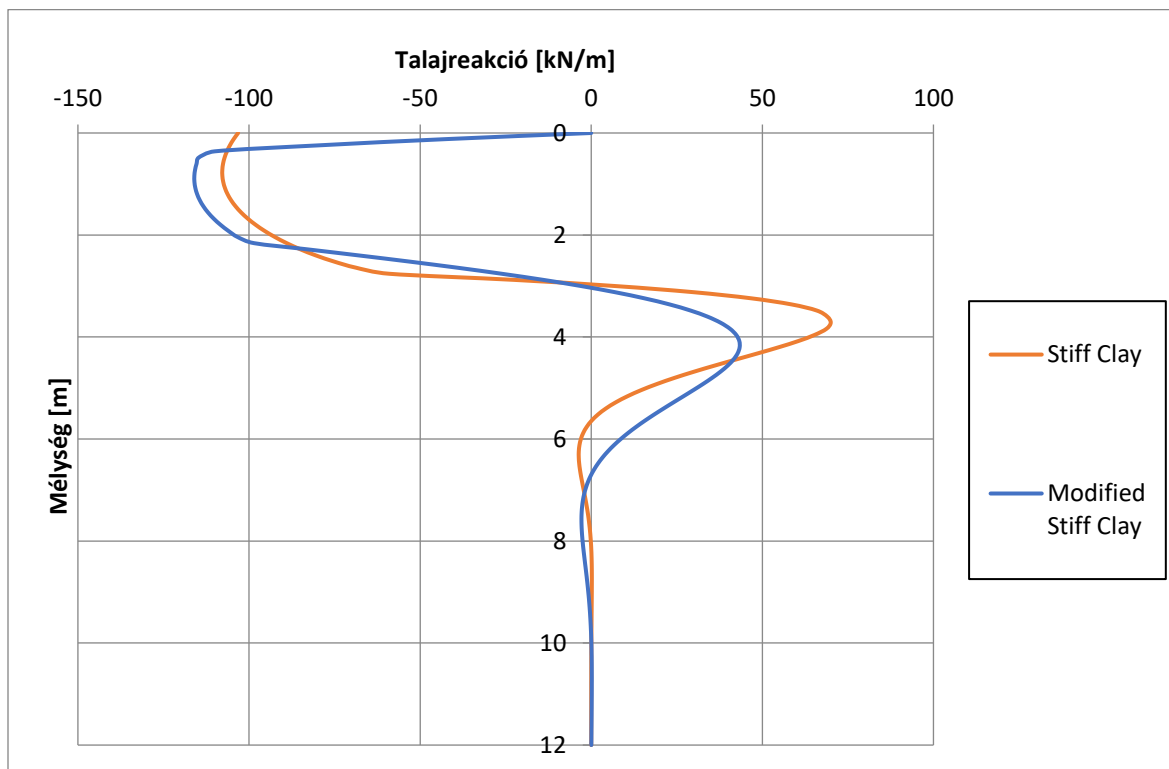
A módosított és az eredeti (víz jelenléte nélküli) agyag (Reese, Cox, Koop) modellek összehasonlítására a drénezetlen nyírószilárdságot mindkét esetben 150 kPa-ra vettem fel.

A program lehetőséget ad arra, hogy a módosított modellt használjuk, saját k érték megadása nélkül. Ekkor a k értékeket a program számítja, a drénezetlen nyírószilárdság függvényében meghatározott görbe alapján. A számítás lefuttatásakor nem adtam meg saját k értéket, így az elmozdulás eredmények a program által alkalmazott értéknek megfelelően jelennek meg.



31. ábra: Módosított és eredeti agyag modell összehasonlítása, elmozdulás

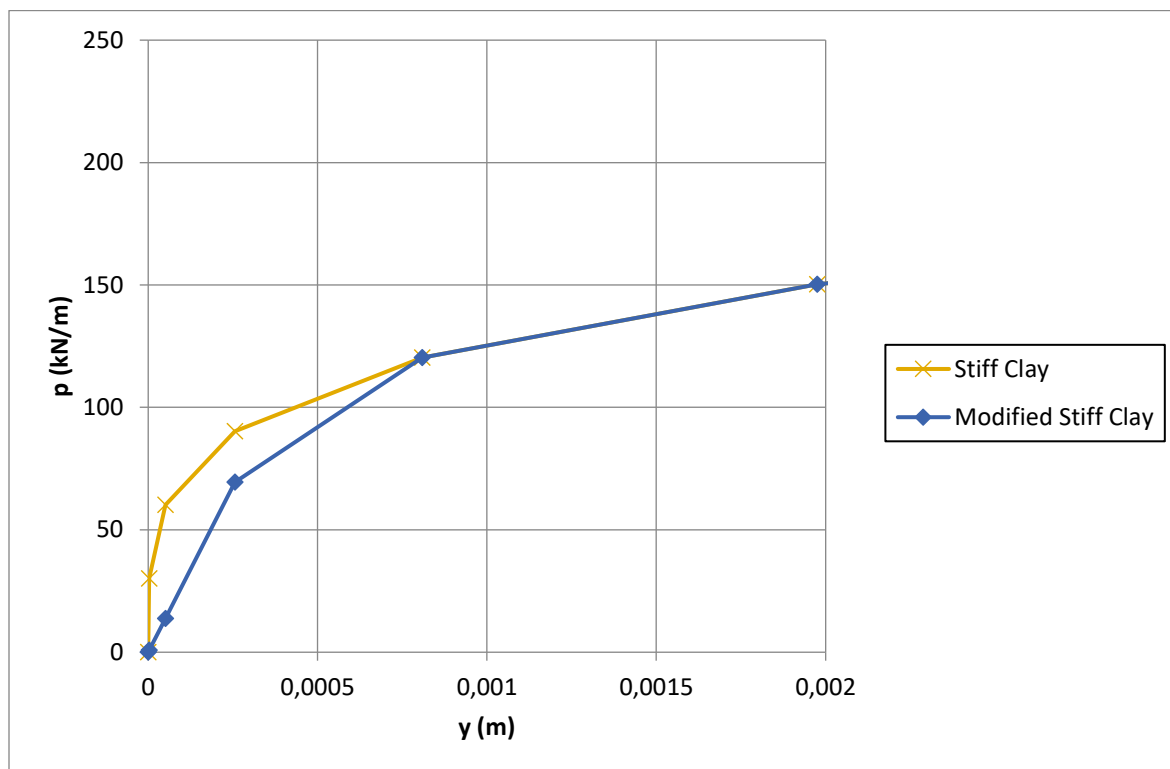
A 31. ábrán a teljes grafikon egy kinagyított részlete látható, 8 méter mélységig. A módosított modell esetében a cölöp felső pontjának elmozdulása nagyobb, mint a merev agyag esetén. Hasonlóképp, mélyebben az erővel ellentétes irányú elmozdulás is a módosított modell esetében nagyobb.



32. ábra: Módosított és eredeti agyag modell összehasonlítása, talajreakció

A talajreakció görbéit megnézve látható, hogy 4 méteres mélységben, bár az elmozdulás egészen minimális, az eredeti merev agyag modell esetében a talajreakció 1,5-szerese a módosított modellnél kapott értéknek.

Látható az ábrán, hogy a módosított modell esetében a talajreakció értéke, ahogy az a 3.2.6 fejezet alapján várható, 0 kN/m.



33. ábra: Módosított és eredeti agyag modell összehasonlítása, p-y görbe

A 33. ábrán a p-y görbe kinagyított részlete látható. Jól megmutatkozik, hogy a kezdeti szakaszon a módosított modellhez tartozó görbe meredeksége kisebb, ezáltal nagyobb elmozdulásokat ad.

Ez tehát azt jelenti, hogy a 3.2.6 fejezetben leírt túl nagy kezdeti merevség problémáját a program abban az esetben is igyekszik mérsékelni, ha nem adunk meg saját kiindulási k értéket.

Mivel a cölöphossz több szakaszán is előfordulhat, hogy a p-y görbe ezen kezdeti szakasza érvényes, a nem megfelelő k érték jelentős eltéréseket eredményezhet.

5 Cölöpök próbaterhelése

A próbaterhelés az Eurocode 7 szerint egy számítás utólagos ellenőrzésére, a számítási módszer igazolására is végezhető. Ezen kívül gyakori a próbaterhelések eredményeinek felhasználása a tervezéshez, vagy egy új cölöpözési technológia megismeréséhez végrehajtott mérés is.

Mivel a próbaterhelések jelentős költséget jelentenek, számukat és helyüket érdemes ésszerűen megválasztani.

E fejezetben a hazánkban alkalmazott próbaterheléseket mutatom be, majd a következő fejezetben egy valódi próbaterhelés back-analízisét végzem el LPile programmal.

5.1 Statikus próbaterhelés

A próbaterhelések két fő csoportba oszthatók: statikus és dinamikus próbaterhelés.

Az esetek többségében hazánkban statikus próbaterhelést végeznek. Ennek során a cölöpre hidraulikus sajtó működtet húzó-, nyomó-, valamint vízszintes erőt. A működtetett erőt 4, vagy ritkább esetben 2 lehorgonyzó cölöp veszi fel. Vízszintes próbaterheléskor 2 cölöp biztosítja az ellentartást.

A próbaterhelés lehet terhelés-, vagy elmozdulásvezérelt. Terhelésvezérelt próbaterhelés esetén a terhet állandó növekménnyel növeljük, meghatározott időtartam vagy süllyedés eléréséig. Elmozdulásvezérelt próbaterhelés esetén a működtetett erő az elmozdulás függvényében változik.

5.2 Dinamikus próbaterhelés

Dinamikus próbaterhelés során a cölöpre előre meghatározott tömeget ejtünk. Ez lökéshullámot indukál a cölöpben, amelyet a cölöptestre rögzített erő-, elmozdulás- és gyorsulásmérő regisztrál. A kapott eredményekből a cölöp nyomási ellenállása számítható.

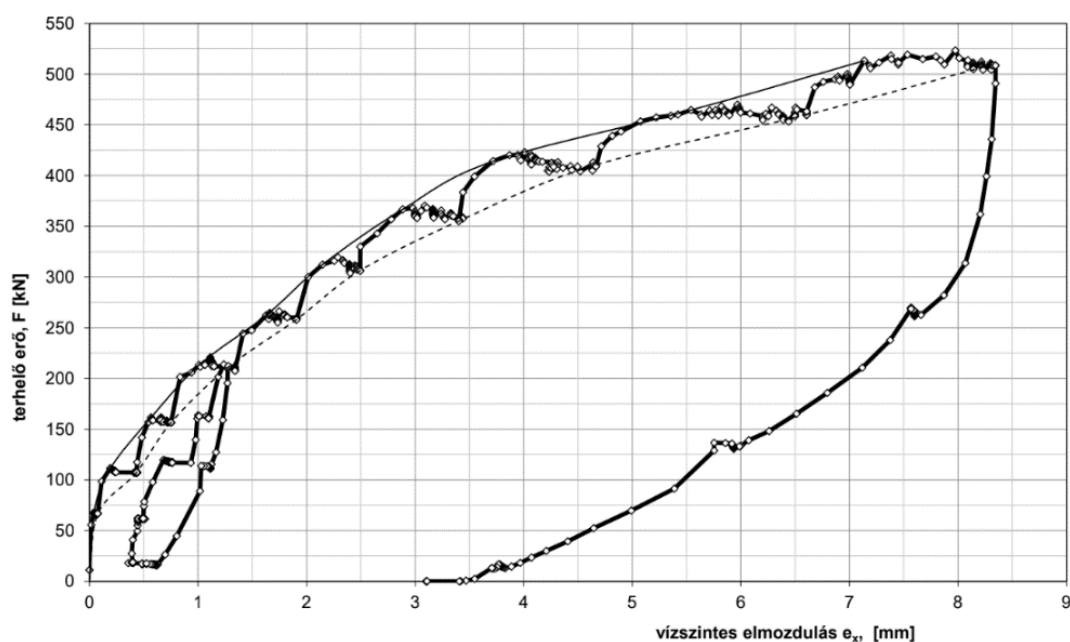
Dinamikus próbaterhelést végeznek önállóan is, ám általában statikus próbaterhelésekkel kalibrálva alkalmazzák.



34. ábra: A dolgozatban vizsgált vízszintes próbaterhelés (HBM Kft., 2021)

6.2 Kiindulási adatok

A próbaterhelés során 500 kN erőig, 50 kN-os teherlépcsőkkel végezték a vizsgálatot. A mérési eredmények alapján az egyes teherlépcsőkhöz az 1. táblázatban látható elmozdulás értékek tartoztak. A mérés során a teher növelését az adott teherlépcsőn fellépő elmozdulás értékek állandósulása után kezdték meg.

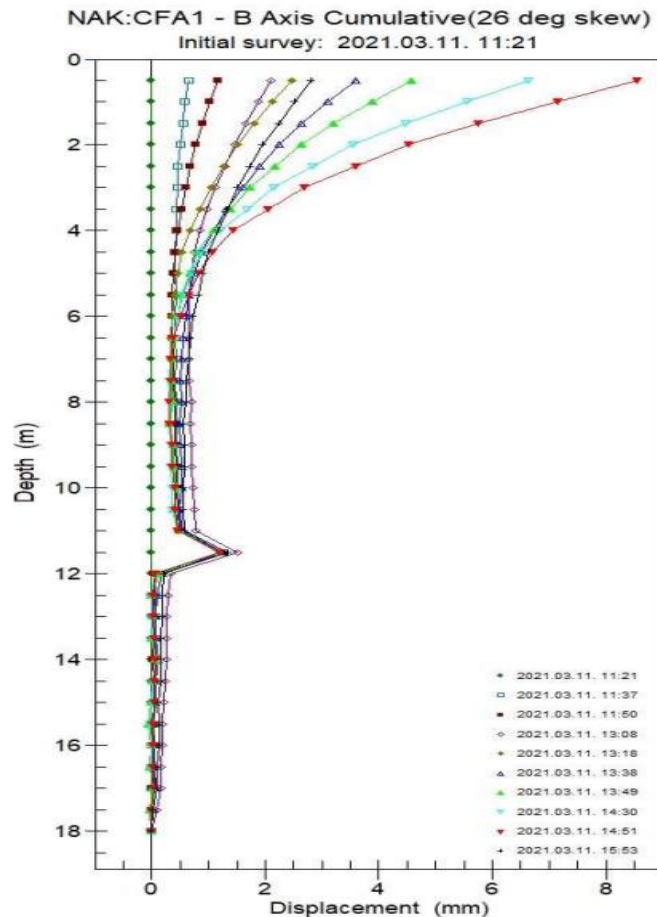


36. ábra: Az erő elmozdulás kapcsolata (HBM Kft., 2021)

1. táblázat: Vízszintes próbaterhelés eredményei – felső pont elmozdulás

Vizsgálati teher [kN]	Vízszintes elmozdulás [mm]
50	0,08
100	0,43
150	0,75
200	1,27
250	1,91
300	2,49
350	3,40
400	4,65
450	6,61
500	8,31

A próbaterhelés során az egyes teherlépcsők végén inklinométeres mérést végeztek. A műszer a görbületet méri, amelyből a vízszintes elmozdulások meghatározhatók. A 37. ábra alapján az eredményekben mérési hiba látható. A görbéken 11-12 méter mélységben közel 2 mm-es kiugrás van. Ilyen jellegű viselkedés a valóságban nem fordul elő, a mérési hibát ezért a vizszámmodellezés eredményeinek vizsgálatakor nem veszem figyelembe.



37. ábra: Vízszintes próbaterhelés eredményei – elmozdulások (HBM Kft., 2021)

Az elmozdulások képe alapján az első két teherlépcsőnél a cölöp felső néhány méteres zónája hajlik ki, ami rugalmas viselkedésre utal. A terhelésével a hatás egyre nagyobb lesz. Ezt a talaj felső talajrétegek képlékeny viselkedése, a cölöp berepedése, vagy a kettő együttesen okozza.

A modellezés során az 1. táblázatnak megfelelően vettem fel a tehereseteket. A cölöpfejet szabadon elfordulónak állítottam be.

Mivel a talajmechanikai fúrás, illetve a CPT szondázás eredményei azonos rétegződést mutattak, a réteghatárokat az 6.1 fejezetben megjelölt mélységekben vettem fel. A felső három szemcsés rétegre kiindulásként az API homokmodelljét alkalmaztam, az alsó agyagrétegre a módosított merev agyagmodell.

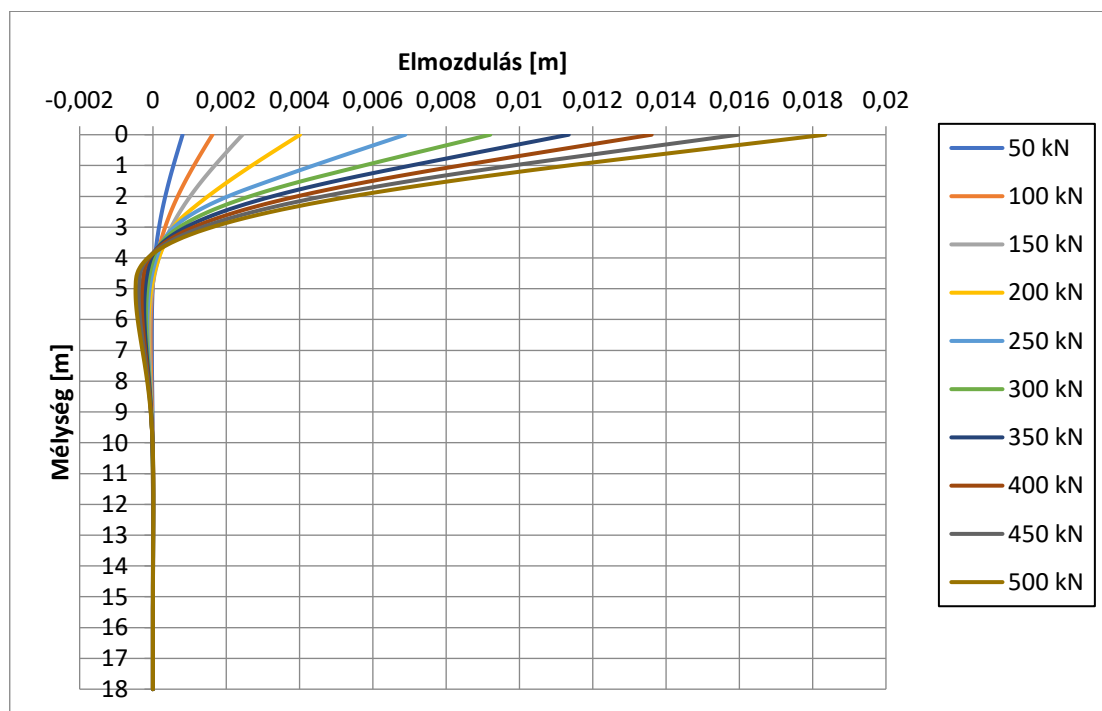
A cölöp modellezését a kapott jelentések és vasalási terv alapján végeztem el. Ezek alapján a cölöpöt 18 méter hosszúra, átmérőjét 1000 mm-re vettem fel. Az alkalmazott betonminőség C30/37. A cölöp 7,5 cm betontakarással, 20 db 25 mm átmérőjű fővassal és 12 mm átmérőjű spirálkengyel alkalmazásával készült.

A szemcsés rétegek esetében a térfogatsúly, illetve a belső súrlódási szög megadására van szükség. Az agyagréteg esetén a térfogatsúly, illetve a drénezetlen nyírószilárdság megadását kéri a program.

6.2.1 Első közelítés

Az első közelítés során a talajparamétereket a CPT szondázás alapján vettem fel. A csúcsellenállás értékének változása alapján elmondható, hogy a felső szemcsés réteg, körülbelül a 11,5 méteres réteghatárig változó ellenállású, így első közelítésként a belső súrlódási szög értékét a rétegen belül 30° és 40° között változónak vettem fel.

A térfogatsúly értékét egységesen 20 kN/m^3 értékre állítottam.



38. ábra: 1. közelítés – elmozdulások

2. táblázat: Próbaterhelés és 1. közelítés eredményeinek összehasonlítása

Vizsgálati teher [kN]	Próbaterhelés vízszintes elmozdulás [mm]	1. közelítés vízszintes elmozdulás [mm]
50	0,08	0,81
100	0,43	1,62
150	0,75	2,44
200	1,27	4,01
250	1,91	6,89
300	2,49	9,20
350	3,40	11,35
400	4,65	13,61
450	6,61	15,97
500	8,31	18,34

A 38. ábrán, és a 2. táblázatban szereplő eredmények alapján látható, hogy a kapott elmozdulás értékek sokszorosai a valós próbaterhelés eredményeinek. Az első közelítés beállításai így semmiképpen nem feleltethetők meg a valós talajviszonyoknak. A bemenő paraméterek közül szemcsés talaj esetében a térfogatsúly, a belső súrlódási szög és a k paraméter változtatható. Kijelenthető, hogy a térfogatsúly változtatása nem okoz jelentős eltérést a kapott eredményben, illetve, hogy k értékét pontosabb mérési adatok hiányában az ajánlások alapján érdemes felvenni. A változtatható paraméter így a belső súrlódási szög.

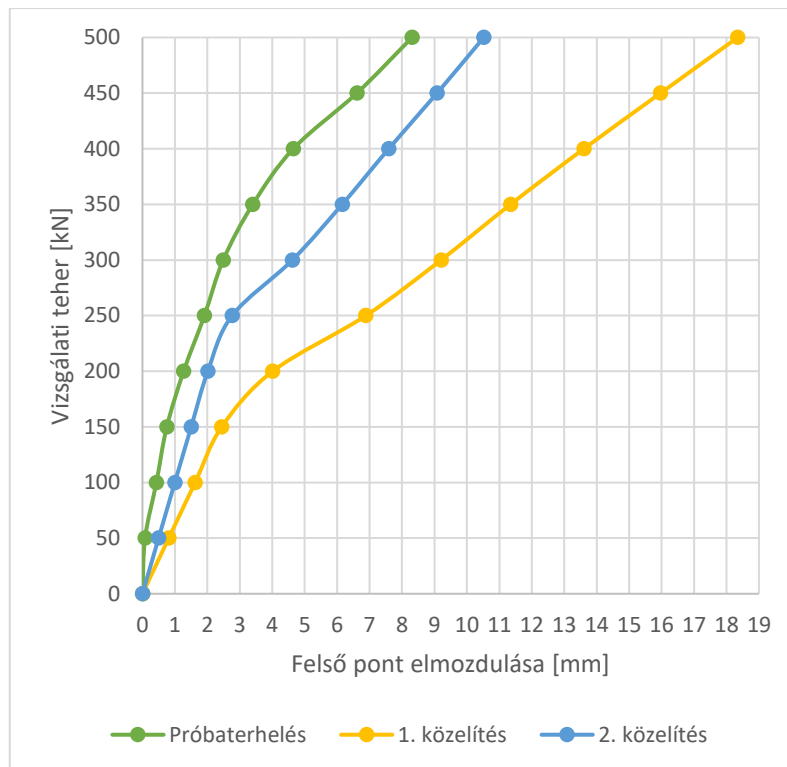
A talajrétegződés szerint a cölöp 3,5 méter hosszon ér bele az agyagrétegbe. Az alsó szakaszon felvett paraméterek hatása a teljes cölöp elmozdulás értékeire elhanyagolhatóak.

6.2.2 Második közelítés

Az első közelítés eredményei alapján a belső súrlódási szög értékét a szemcsés talajrétegekben 40° -ra vettem fel.

3. táblázat: Próbaterhelés és 2. közelítés eredményeinek összehasonlítása

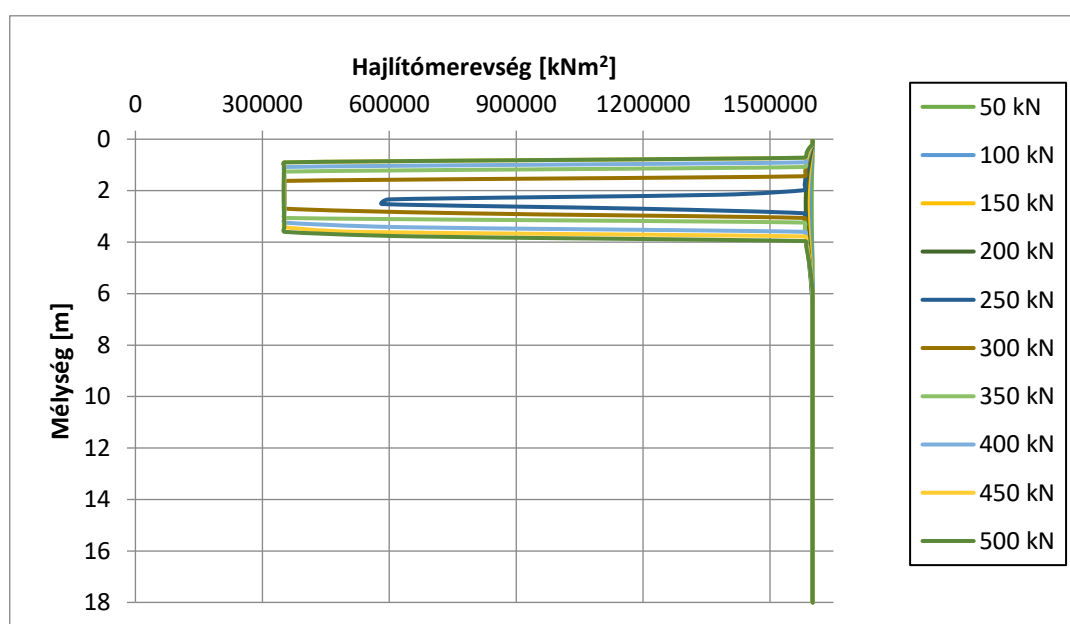
Vizsgálati teher [kN]	Próbaterhelés vízszintes elmozdulás [mm]	2. közelítés vízszintes elmozdulás [mm]
50	0,08	0,50
100	0,43	1,00
150	0,75	1,50
200	1,27	2,01
250	1,91	2,76
300	2,49	4,62
350	3,40	6,16
400	4,65	7,59
450	6,61	9,08
500	8,31	10,52



39. ábra: 1. és 2. közelítés – felső pont elmozdulás

A kapott eredmények alapján elmondható, hogy bár a 2. közelítés eredményei sem illeszkednek az eredeti próbaterhelés görbéjére (38. ábra), lényegesen jobb közelítés érhető el $\varphi = 40^\circ$ alkalmazásával.

A 39. ábrán látható, hogy míg az 1. közelítés már a kisebb vizsgálati tehernél is az eredeti elmozdulások többszörösét adta eredményül, a 2. közelítés esetében a 250 kN-os teherlépcső eléréséig a két függvény hasonló képet ad, az elmozdulások közötti különbségek nem érik el az 1 mm-t.



40. ábra: Hajlítómerevség változása

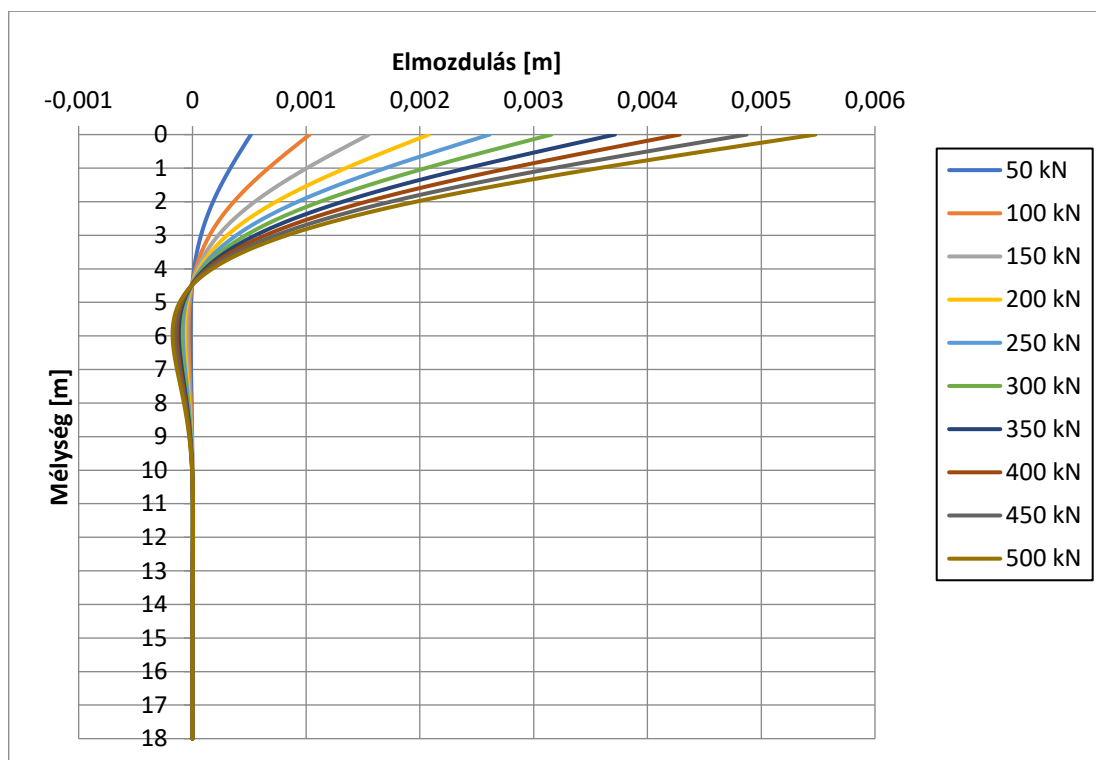
A 39. ábrán, próbaterheléshez és a 2. közelítéshez tartozó görbe távolodását a 250 kN-es teherlépcsőtől kezdődően a 40. ábrán látható merevségcsökkenés okozza.

Ahogy az a paraméteranalízis során tapasztalható volt (4.2.2 fejezet), a repesztőnyomaték elérése után a program csökkentett merevséggel számol. Jelen esetben ezt a 250 kN-os teherlépcsőnél érjük el, a 40. ábrán itt látható először kiugró értékcsökkenés, amely minden további, nagyobb teherlépcső esetén is jelentkezik.

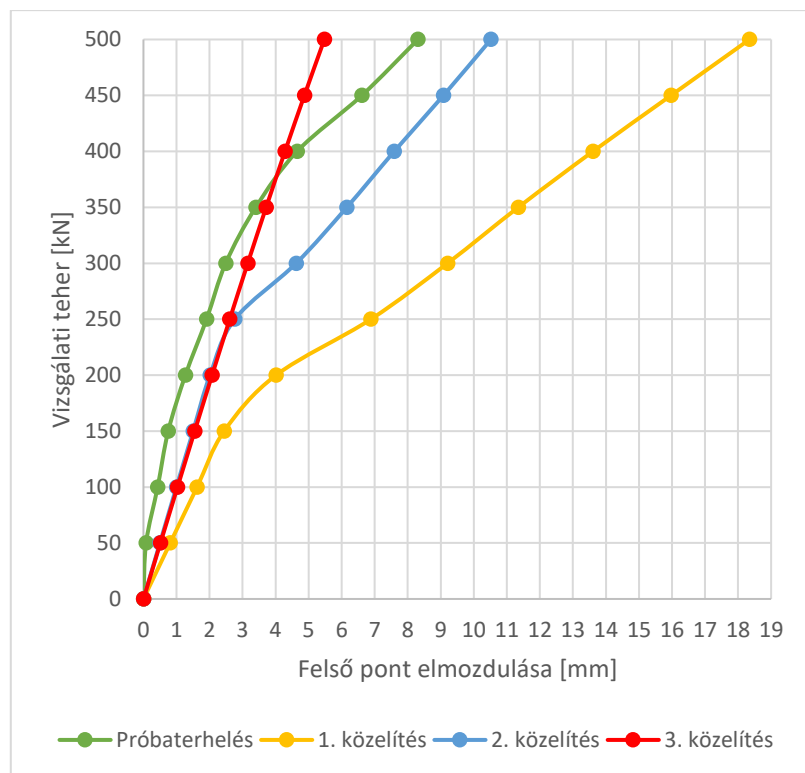
6.2.3 Harmadik közelítés

A második közelítés során tapasztaltak szerint az valószínűsíthető, hogy a próbaterhelés során 250 kN erőnél nem következett be a keresztmetszet berepedése.

A probléma kiküszöböléséhez a cölöp modellezésekor a rugalmas keresztmetszet opcióját választottam, amely alkalmazásakor a program csak a megadott átmérőt, keresztmetszeti területet, és betonszilárdságot veszi figyelembe, tehát a keresztmetszet berepedésével nem számol.



41. ábra: 3. közelítés - elmozdulás



42. ábra: 3. közelítés - felső pont elmozdulás

A modell változtatásával a második közelítéssel közel megegyező elmozdulásokat kaptam 250 kN-ig. A 4. táblázatban láthatóak szerint az elmozdulások 400 kN-os vizsgálati teherig 1 mm eltérésen belül maradnak. A 3. közelítés görbéjének 400 kN vizsgálati teher után is változatlan marad a meredeksége, míg a próbaterhelés görbéjének meredeksége csökken. Ez jelentheti azt, hogy a végső tartományban, körülbelül 400 kN elérésekor már bereped a keresztmetszet. A maximális teher (500 kN) felvitele után a végső elmozdulások közötti különbség 2,83 mm.

4. táblázat: Próbaterhelés és 3. közelítés eredményeinek összehasonlítása

Vizsgálati teher [kN]	Próbaterhelés vízszintes elmozdulás [mm]	3. közelítés vízszintes elmozdulás [mm]
50	0,08	0,51
100	0,43	1,03
150	0,75	1,55
200	1,27	2,08
250	1,91	2,61
300	2,49	3,16
350	3,40	3,71
400	4,65	4,28
450	6,61	4,87
500	8,31	5,48

6.2.4 Negyedik közelítés

A 42. ábra alapján a valós viselkedést az 1. és a 2. közelítés görbéje írja le jobban, tehát a teher-vízszintes elmozdulás kapcsolata nem lineáris. A túl korai merevségcsökkentés miatt azonban az elmozdulások nagysága a maximális belső súrlódási szög alkalmazásával is jócskán meghaladják a valós elmozdulásokat.

Az LPile-ban lehetőség van a p-y görbék korlátozására az általunk megadott mélységekben.

Doktori értekezésében Dr. Szép János (2014) az AxisVM szoftverben létrehozott talajmodell földstatikai alapú javításakor modelljében vonalmenti határerőt működtetett, amely a 16. egyenlet alapján számítható.

$$q_{hmax} = [(K_p - K_a) \cdot (p + z \cdot \gamma) + 2 \cdot c \cdot (\sqrt{K_p} + \sqrt{K_a})] \cdot \beta \cdot D \quad 16. \text{ egyenlet}$$

K_p : passzív földnyomás szorzó

K_a : aktív földnyomás szorzó

p: geosztatikus nyomás a felszínen

z: felszíntől mért mélység

γ : térfogatsúly

c: kohézió

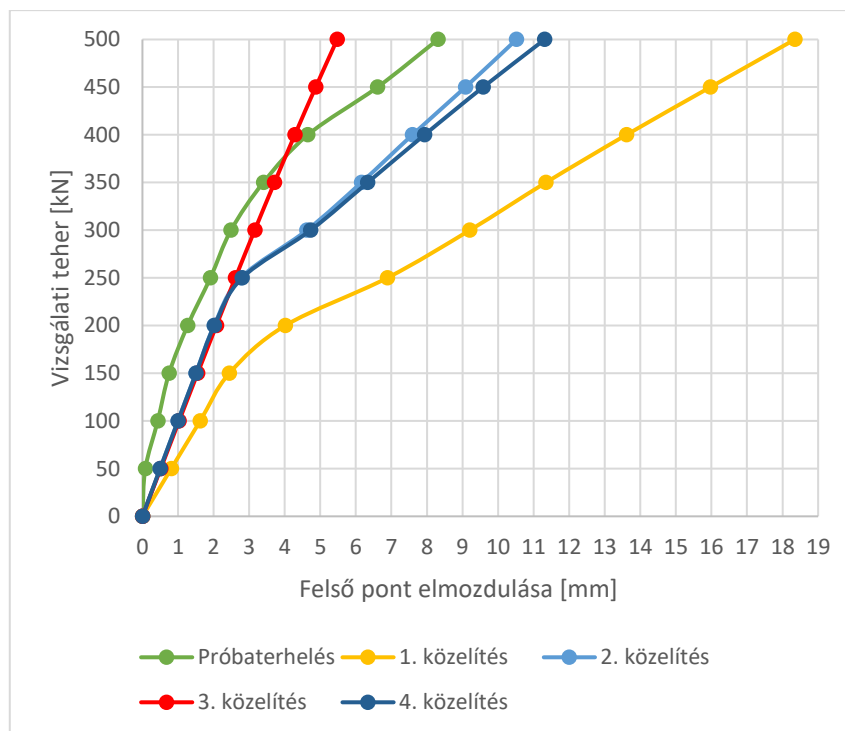
β : talajfeszültség szétterjedését figyelembe vevő tényező

D: a cölöp átmérője

Dolgozatomban a p-y görbék korlátozása érdekében kiszámítottam az egyes mélységekben működő határerőt. Az LPile-ban a p-y görbékhez megadható szorzókkal csökkentettem azokat olyan mértékben, hogy a görbék állandósulása után a maximális p értékek megegyezzenek a kiszámított határerő értékével. Több közelítés után a legjobb eredményt az 5. táblázatban látható határerők alkalmazása adta.

5. táblázat: Számított határerők

z [m]	σ_z [kPa]	φ [-]	β [-]	K_p [-]	K_a [-]	q [kN/m]
1	20	40	3	4.60	0.22	263
2	40	40	3	4.60	0.22	526
4	80	40	3	4.60	0.22	1052
6	120	40	3	4.60	0.22	1577
8	160	40	3	4.60	0.22	2103
10	200	40	3	4.60	0.22	2629
12	240	40	3	4.60	0.22	3155
14	280	40	3	4.60	0.22	3680



43. ábra: 4. közelítés – felső pont elmozdulás

Az eredményeken látható, hogy a határerő megadása a modellben valójában nem ad jobb eredményt, mint a 2. közelítés. A felső pont elmozdulásai tekintetében a két közelítés közel azonos eredményt ad.

6.2.5 Eredmények értékelése

Minden közelítés esetében elmondható, hogy a felső pont elmozdulásait figyelmen kívül hagyva a cölöp elmozdulások képei nem feleltek meg a valóságnak. A 37. ábra szerint a próbaterhelés eredményeként minden vizsgálati tehernél a cölöp jelentősebb mozgást már ~5 méter mélységtől végez, erővel ellentétes irányú mozgást 400 kN teherig pedig egyáltalán nem. Ezzel szemben a visszamodellezés során kapott eredmények mindegyike 4,5-5 méter mélységtől mozdul el ez erő irányában, az az alatti szakaszon pedig az elmozdulás erővel ellentétes irányú.

A legpontosabb közelítésnek a 3. közelítés mondható, mivel a legtöbb vizsgálati teherlépcsőnél ez adja a legközelebbi elmozdulás eredményeket.

7 Összefoglalás

A keresztirányban terhelt cölöpök a szerkezet ágyazási tényező (pl. AxisVM), vagy a talaj és a szerkezet (pl. Plaxis) FEM modellezésével vizsgálhatók. A hazai gyakorlatban leginkább az Axis lineárisan rugalmas modellje terjedt el. Ennek hátránya, hogy nem veszi figyelembe a talaj teherbírását, a talajreakció és elmozdulás nemlinearitását valamint a cölöp merevségének igénybevételtől való függését, keresztmetszet berepedésének hatását. Az LPile szoftver ezzel ellentétben képes a nemlinearitás figyelembevételére a beton szilárdsági és a talaj merevségi viselkedésében is. A szoftver a számításhoz a talajra jellemző talajreakció-elmozdulás (p-y) görbét veszi alapul, amely a geotechnikai gyakorlatban ismert és gyakran használt paraméterektől függ, használata ezért egyszerű, gyors és egyértelmű. A vasbeton keresztmetszet berepedés okozta hajlítási merevség csökkenését is számításba veszi a szoftver.

A program működésének feltérképezéséhez paraméteranalízist végeztem, melynek eredményei alapján az alábbiak állapíthatók meg:

- a talaj nyírószilárdsága jelentősen befolyásolja a cölöp viselkedését.
- a függőleges erő növelésével az oldalirányú merevség is növekszik, amely a beton keresztmetszetre jellemző nemlineáris viselkedés figyelembevételének tudható be. A beton berepedését nem csak egy képlékeny csukló felvételével modellezi, hanem szakaszosan csökken a hajlítómerevséget. Ez a módszer a valóságot jobban közelíti, ezért a számítás során pontosabb eredmények várhatók.
- az alkalmazott vasalásnak a vártan megfelelően nincs hatása a cölöp merevségére.

A próbaterhelés visszamodellezése során egy Budapesten végzett mérés eredményeinek reprodukálását kíséreltem meg. A mérési eredményeket pontosan ugyan nem sikerült visszakapni, de a tapasztalat alapján a program alkalmas a vízszintesen terhelt cölöpök viselkedésének modellezésére. A későbbiekben további kutatásokban érdemes lehet a programot a hazai talajviszonyokra kalibrálni más próbaterhelések back-analízisével.

A keresztirányban terhelt cölöpök esetében a terhelés növelésével a nemlinearitás figyelembevétele egyre fontosabb, ennek elhanyagolása jelentős eltéréseket okozhat a modell eredményei és a valóság között. A talaj szilárdsági és a beton merevségi nemlinearitásának együttes figyelembe vételei lehetőségei ezért aktuális és nagy kihívásokat rejtő kutatási téma.

ÁBRAJEGYZÉK:

1. ábra: Lineáris erő-elmozdulás diagram (Spisák, 2014)	5
2. ábra: Winkler-féle rugómodell (Hazzar, Karray, Pasic, 2015)	6
3. ábra: Monnet-féle diagram (Monnet, 1994)	7
4. ábra: Ideálisan rugalmas-tökéletesen képlékeny anyagmodell (Schmitt, 1995)	8
5. ábra: Nemlineáris rugók (Isenhowe et al., 2019)	9
6. ábra: A Reese-féle p-y görbe jellemző pontjai (Isenhowe et al., 2019)	11
7. ábra: A együttható értékei (Isenhowe et al., 2019)	12
8. ábra: k értékének hatása a p-y görbékre (Isenhowe et al. 2019)	13
9. ábra: C együtthatók értékei (Isenhowe et al., 2019)	14
10. ábra: Puha agyag p-y görbéje (Isenhowe et al., 2019)	16
11. ábra: Merev agyag p-y görbéje (víz jelenléte nélkül) (Isenhowe et al., 2019)	17
12. ábra: Merev agyag p-y görbéje (víz jelenlétékor) (Isenhowe et al., 2019)	18
13. ábra: p-y görbék összehasonlítása	19
14. ábra: Kiindulási példa (Szép, 2014)	21
15. ábra: Belső súrlódási szög hatása, elmozdulás	23
16. ábra: Belső súrlódási szög hatása, nyomaték	24
17. ábra: Vízszintes erő hatása, elmozdulás	25
18. ábra: Vízszintes teher-felső pont elmozdulás kapcsolata	25
19. ábra: Vízszintes erő hatása, nyomaték	26
20. ábra: Vízszintes erő hatása, talajreakció	27
21. ábra: Hajlítómerevség-nyomaték diagram	28
22. ábra: Hajlítómerevség mélységgel való változása	28
23. ábra: Függőleges erő hatása, elmozdulás	29
24. ábra: Teherbírási görbe (Szép, 2021)	30
25. ábra: Függőleges erő hatása, nyomaték	31
26. ábra: Vasalás hatása, elmozdulás	32
27. ábra: Vasalás hatása, nyomaték	32
28. ábra: Agyagmodellek összevetése, elmozdulás	33
29. ábra: Agyagmodellek összevetése, nyomaték	34
30. ábra: Drénezetlen nyírószilárdság hatása, elmozdulás	35
31. ábra: Módosított és eredeti agyag modell összehasonlítása, elmozdulás	36
32. ábra: Módosított és eredeti agyag modell összehasonlítása, talajreakció	36
33. ábra: Módosított és eredeti agyag modell összehasonlítása, p-y görbe	37

34. ábra: A dolgozatban vizsgált vízszintes próbaterhelés (HBM Kft., 2021)	39
35. ábra: Helyszínrajzi részlet a cölöp-próbaterhelés területéről (HBM Kft., 2021)	40
36. ábra: Az erő elmozdulás kapcsolata (HBM Kft., 2021)	41
37. ábra: Vízszintes próbaterhelés eredményei – elmozdulások (HBM Kft., 2021)	42
38. ábra: 1. közelítés – elmozdulások	43
39. ábra: 1. és 2. közelítés – felső pont elmozdulás	45
40. ábra: Hajlítómerevség változása	45
41. ábra: 3. közelítés - elmozdulás	46
42. ábra: 3. közelítés - felső pont elmozdulás	47
43. ábra: 4. közelítés – felső pont elmozdulás	49

TÁBLÁZATJEGYZÉK:

1. táblázat: Vízszintes próbaterhelés eredményei – felső pont elmozdulás	41
2. táblázat: Próbaterhelés és 1. közelítés eredményeinek összehasonlítása	44
3. táblázat: Próbaterhelés és 2. közelítés eredményeinek összehasonlítása	44
4. táblázat: Próbaterhelés és 3. közelítés eredményeinek összehasonlítása	47
5. táblázat: Számított határerők	48

IRODALOMJEGYZÉK:

American Petroleum Institute (2010): Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design, API RP 2A-WSA, 21st Edition, Errata and Supplement

Bognár B., Kanizsár Sz., Mahler A., Manninger M., Meszlényi Zs., Móczár B., Scheuring F., Schell P., Szepesházi A. (2016): Korszerű cölöpalapozások tervezése geotechnikai, tartószerkezeti és technológiai szempontok alapján, Magyar Mérnöki Kamara Geotechnikai Tagozat, Budapest, 2016

Hazzar, L., Karray, M., Pasic, A. (2015): Numerical study for soil stiffness of pile group

Isenhower, W.M., Wang, S., Vasquez, L.G. (2019): Technical Manual for LPile 2019, Ensoft, Inc.

Matlock, H. (1970): Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay, Proceedings, 6th Offshore Technology Conference, Vol.I, pp.473-484.

McClelland, B., Focht, J.A. (1956): Soil Modulus for Laterally Loaded Piles, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Paper 1081, 22 p.

O'Neill, M. W., Gazioglu, S. M. (1984): An Evaluation of p-y Relationships in Clays, Report to the American Petroleum Institute, The University of Houston

O'Neill, M. W., Murchison, J. M. (1983): An Evaluation of p-y Relationships in Sands, Report to the American Petroleum Institute, The University of Houston

Reese, L. C. (1958): Discussion of Soil Modulus for Laterally Loaded Piles, by B. McClelland and J.A. Focht, Jr., Transactions, Vol 123., pp.1071-1074.

Reese, L. C., Coe, W.R., Koop, F. D. (1974): Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand, Proceedings, 6th Offshore Technology Conference, Vol.II., pp.473-484.

Schmitt P. (1995): Méthode empirique d'évaluation de coefficient de réaction de sol vis à vis des ouvrages de soutènement souples, Revue Française de Géotechnique 71. p. 3-10

Szepesházi R. (2008). Geotechnika, Egyetemi jegyzet, Széchenyi István Egyetem, Győr

Szepesházi R., Koch E., Ray R. P., Szép J. (2008): Keresztirányban terhelt cölöpök viselkedésének modellezése. Kutatási jelentés. Széchenyi István Egyetem, Győr

Szép J. (2014): Hídszerkezetek modellezése a talaj és a szerkezet kölcsönhatásának figyelembevételével, Doktori értekezés, Széchenyi István Egyetem, Győr

Szép J. (2021): Vasbetonszerkezetek, egyetemi órai előadás, Győr, ÉÉKK, 2021

Terzaghi, K. (1955): Evaluation of Coefficients of Subgrade Modulus, Géotechnique, Vol. 5, No.4, pp. 297-326.