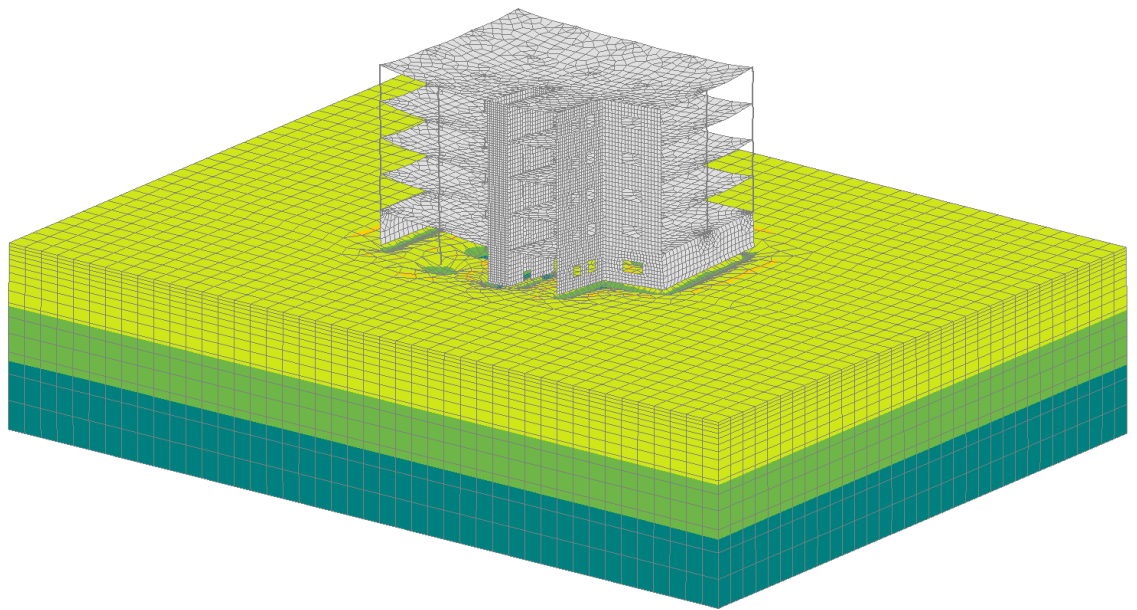


SAMVERKANSBERÄKNINGAR BYGGNAD/UNDERGRUND FAS III

Vidareutveckling av strukturanalysprogrammet FEM-Design



Sam Shiltagh, StruSoft AB

2018-08-10

FÖRORD

Projektet har genomförts med stöd från SBUF. Vi som arbetat i projektet vill tacka alla som har bidragit till projektet och gjort det här arbetet möjligt.

Styrgruppen för det här projektet består av:

- Magdalena Löfving, Skanska Sverige AB – Projektledare
- Mikael van de Leur, StruSoft AB

Arbetsgruppen består av:

- Sam Shiltagh, StruSoft AB
- Villy Kjeldsen, StruSoft DK - Geotekniker/programmerare
- Torbjörn Edstam, Skanska Sverige AB - Specialist geoteknik
- Zoltán Czap, Budapest University of Technology - Assisterande professor i geoteknik
- Andras Szlamenitzky, StruSoft Kft - Ansvarig programmerare
- Istvan Kirchner, StruSoft Kft - Programmerare
- Zoltán Bocskai, StruSoft Kft - Programmerare
- Árpád Tornnyos, StruSoft Kft - Specialist byggnadsmekanik/programmerare
- David Schmidt, StruSoft Kft - Programmerare

Vi vill även tacka referensgruppen som vi har träffat under projekttiden, den består av:

- Ander Petterson StruSoft AB/Malmö Högskola - Senior Advisor/Universitetslektor i byggnadsmekanik
- Stefan Åberg, StruSoft AB
- Mohsen Ghaemi, StruSoft Kft

Malmö 2018-08-10

Sam Shiltagh, StruSoft AB

SAMMANFATTNING

Det har länge saknats användarvänliga program som fullt ut möjliggör samverkansberäkningar mellan byggnadskonstruktion och undergrund. Geotekniska programvaror kan modellera jordens egenskaper medan möjligheterna att modellera byggnadskonstruktionen är begränsade. För strukturmekaniska programvaror gäller det omvända, där diskreta fjädrar oftast används för att modellera jorden. För att optimera projekterings- och dimensioneringsarbetet har en programmodul, som binder ihop den geotekniska och den strukturmekaniska modelleringen, skapats i samband med SBUF projekt 12611 - Utveckling av datorprogram för samverkansberäkningar byggnad/undergrund.

Beräkningsmodulen, som fick namnet 3D Soil, är en modul till strukturanalysprogrammet FEM-Design. Med 3D Soil modelleras undergrunden med ingående jordlager som volymselement. Detta ger en mer korrekt bild av jordens beteende jämfört med en modellering baserad på bäddmoduler och med fördelen att överbyggnadens styvhet utnyttjas i samverkansberäkningen.

FEM-Design 3D Soil använde då en linjärelastisk jordmodell och analysen var koncentrerad till jordens vertikala töjnings- och spänningsbeteende. Detta begränsade programmets tillämpningsområden till framförallt samverkansberäkningar där grundläggningen görs med ytliga fundament i icke spänningskänsliga jordar.

För att FEM-Design ska kunna användas för fler geotekniska tillämpningar, krävdes vidare utveckling av programmet som möjliggör hantering av fler grundläggningsmetoder och fler jordtyper. Grundläggning med källare, kompensationsgrundläggning samt kontroll av släntstabilitet är några av de funktioner som infördes i FEM-Design 3D Soil inom ramen för föregående projekt (SBUF-projekt 13075 *Samverkansberäkningar byggnad/undergrund Fas II*). Programmet fick en ny finita elementgenerator som ger mer avancerade volymselementen för beskrivning av jorden samt fler jordmodeller tillsammans med Mohr-Coulombs brottkriterium. Den nya programmuppbyggnaden möjliggör nu införandet av fler grundläggningstyper och grundläggning med pålar är det som har utvecklats inom ramen för detta projekt.

I januari 2018 släpptes FEM-Design 17 som nu innehåller verktyg för modellering, analys och dimensionering av pålar tillsammans med en beskrivning av de nya funktionerna och en uppdaterad användarmanual.

Nyckelord:

Datorprogram, Finita element, Grundläggning, Samverkansgrundläggning, Samverkansberäkning, Byggnad, Undergrund, Pålar, Pålfundament, Pågrundläggning, Jordanalys.

INNEHÅLL

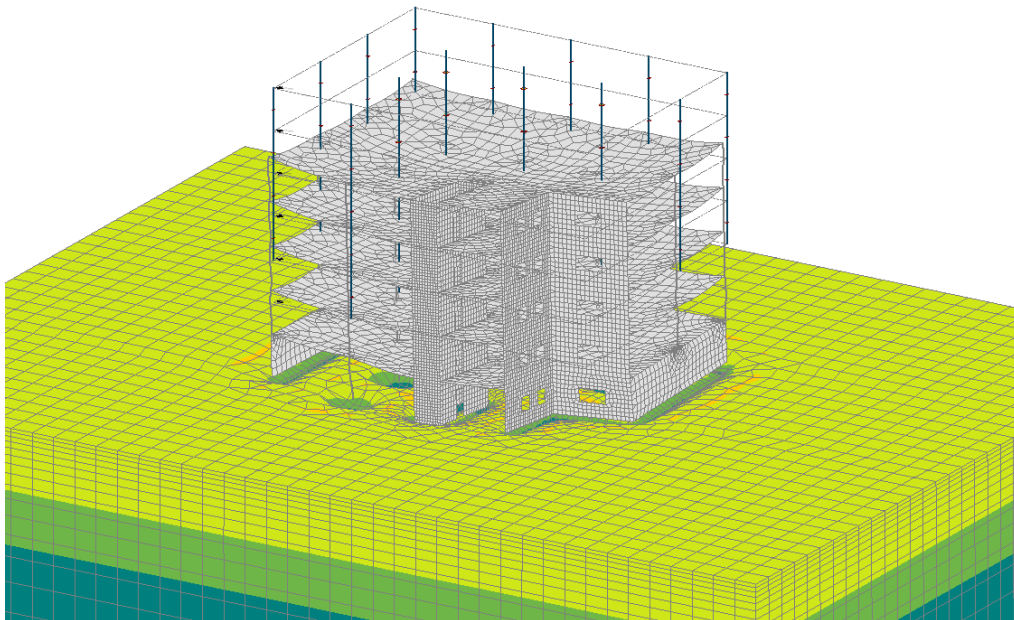
1. BAKGRUND	4
2. SYFTE MED PROJEKTET	6
AVGRÄNSNING	6
3. METODIK OCH GENOMFÖRANDE	6
IMPLEMENTERING AV PÅLELEMENT.....	7
VAL OCH IMPLEMENTERING AV JORDMODELL	7
UPPDATERING AV ANVÄNDARGRÄNSSNITTET	9
TEST AV PROGRAMMET.....	9
PROTOTYP (BETA-VERSION).....	9
TEORIHANDBOK OCH ANVÄNDARMANUAL	9
VALIDERING OCH KALIBRERING	9
JUSTERINGAR/FÖRBÄTTRINGAR	9
KOMPLETTERANDE TESTER.....	9
LANSERING	9
4. SLUTSATS	10
5. FRAMTIDEN	10
6. BILAGOR	10
BILAGA 1	10
BILAGA 2	10

1. BAKGRUND

Vid analys av en byggnad analyseras ofta överbyggnadens spänningar och deformationer i detalj medan undergrunden vanligtvis modelleras med diskreta fjädrar, s.k. bäddmoduler. Att använda sig av en likformig bäddmodul vid dimensioneringen av grundkonstruktionen är en grov förenkling som påverkar analysresultaten. Tidigare saknades program som möjliggör samverkansberäkningar mellan byggnad och undergrund. Strukturmekaniska analysprogram kan modellera och analysera strukturen och olika konstruktionsdelar med god noggrannhet, medan möjligheterna att modellera marken vanligtvis är begränsade till bäddmoduler. Geotekniska beräkningsprogram däremot, kan modellera marken utförligt men är begränsade när gäller modellering av strukturen.

För att tillgodose ett ökat behov av att koppla ihop den strukturmekaniska modelleringen med den geotekniska och ett ökat behov av samverkan mellan geotekniker och konstruktörer initierades SBUF projekt 12611 - Utveckling av datorprogram för samverkansberäkningar byggnad/undergrund som resulterade i en geoteknisk modul – FEM-Design 3D Soil. Ett program som kan användas av båda discipliner i projekt. En första version av programmet lanserades i december 2013.

Med FEM-Design 3D Soil modelleras marken som en volym med 3-dimensionella finita element och med olika jordlager. Jorden liksom byggnaden betraktas som en konstruktionsdel, vilket resulterar i en kopplad mark-strukturmodell. Jorden analyseras med ovanliggande struktur, där en linjärelastisk jordmodell används. En kopplad mark-strukturmodell påverkar snittkraftsfördelningen och därmed också dimensioneringen av såväl strukturen som armeringen i fundamenten.



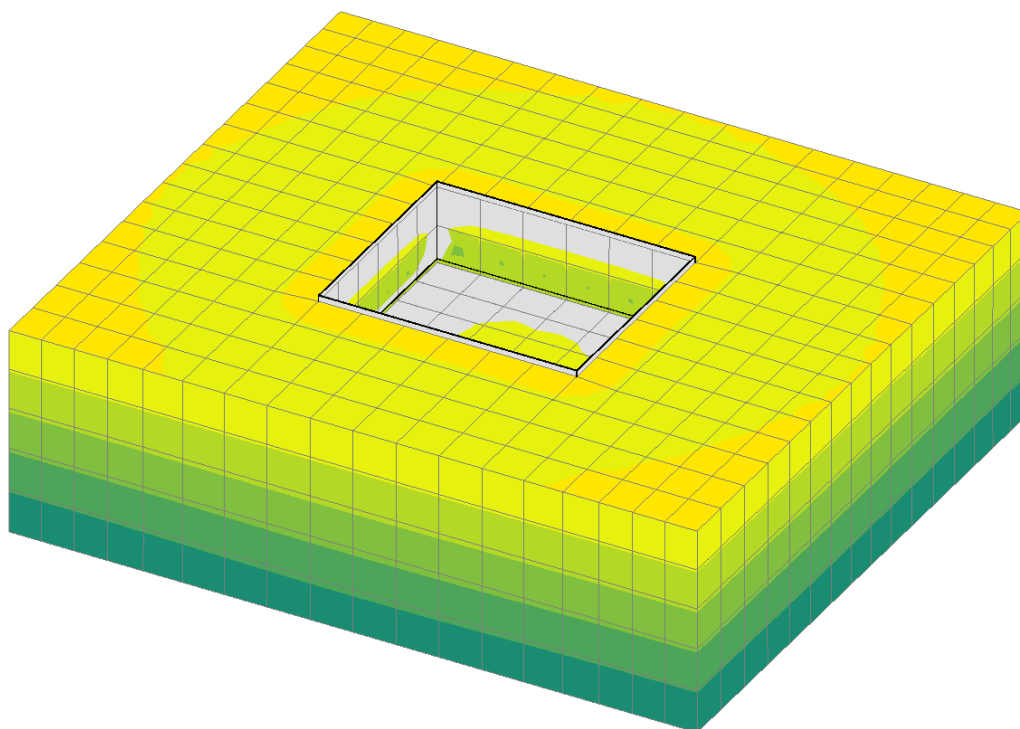
Figur 1.1. Samverkansanalys mellan en byggnad och undergrunden i version I av FEM-Design 3D Soil

Den första versionen av FEM-Design 3D Soil är ett stort steg i rätt riktning när det gäller att betrakta jorden och dess samverkan med konstruktionen, men den är också begränsad till enkla grundläggningstyper och vissa jordtyper. Den första versionen av programmet kan hantera **ytligt grundlagda fundament** som platta på mark och pelarfundament. Den beskriver jorden med en **linjär elastisk modell** som har ett konstant förhållande mellan

jordens styvhet och dess spänningsnivå utan möjlighet att räkna fram de plastiska deformationer som uppstår när jorden går till brott. Beräkningarna är begränsade till spänningar och töjningar i jordens **vertikala plan**.

I och med att 3D Soil modulen har börjat användas och det nya sättet att betrakta jorden har börjat etableras bland konstruktörer, har behovet av att vidareutveckla programmet vuxit fram med krav på fler grundläggningstyper och fler jordmodeller. Grundläggning med spetsburna- och mantelburna **pålar**, **källargrunder**, **kompensationsgrundläggning**, möjligheten att göra mer avancerade **icke-linjära analyser** i framförallt kohesionsjordar, kontroll av **brott i jorden** och **tidsberoendedeformationer** har varit de mest efterfrågade funktionerna i en ny version av 3D Soil.

I april 2016 släpptes en ny version av FEM-Design 3D Soil som är resultatet av SBUF-projekt 13075 *Samverkansberäkningar byggnad/undergrund Fas II*. Den nya versionen har en ny finita elementnätgenerator som gör programmet kapabelt att analysera jorden och dess samverkan med konstruktionen i det horisontella planet också. Programmet kan nu analysera och dimensionera grundläggning med källare samt kompensationsgrundläggning. Icke-linjära jordmodeller har implementerats vid sidan om den befintliga linjär-elastiska jordmodellen. Mohr-Coulombs brottkriterium har också implementerats vilket möjliggör analysen av brott i jorden och redovisning av plastiska deformationer. Beräkningar av stödkonstruktioner och släntstabilitetskontroller har också blivit möjliga i denna version.



Figur 1.2. Analys av källargrund i version II av FEM-Design 3D Soil

Med ett verktyg som FEM-Design kan konstruktörer tillsammans med geotekniker bestämma hur jordprofilen, den ingående jordlagerföljden och dess egenskaper ser ut. Tanken är att konstruktörer och geotekniker ska kunna jobba med samma modell i FEM-Design, men att varje disciplin ansvarar för sitt kompetensområde. På så sätt har både geotekniker och konstruktörer alltid tillgång till en uppdaterad modell och eventuella ändringar i modellen kan enkelt kommuniceras mellan dessa två discipliner.

2. SYFTE MED PROJEKTET

Projektet har som huvudsyfte att vidareutveckla programmet FEM-Design och dess geotekniska modul 3D Soil för att kunna modellera, analysera och dimensionera pålar och pålade fundament. Utvecklingen omfattade följande steg:

- Implementeringen av funktioner för modellering, analys och dimensionering av pålar och pålfundament.
- Implementering av beräkningsmodeller/jordmodeller för bestämning av jordens styvhet, bärförmåga och bäddmoduler vid pålning i olika jordtyper och med olika typer av pålar.
- Uppgradering och förbättring av programmets användargränssnitt för att kunna hantera den nya grundläggningstypen och de nya analysmodellerna.
- Upprättande av en handbok som beskriver teorierna bakom de geotekniska beräkningarna i programmet samt en användarmanual.

Genom användningen av FEM-Design och dess geotekniska modul 3D Soil kommer förståelsen för hur olika byggnadsdelar samverkar med jorden och för hur helheten byggnad/undergrund fungerar tillsammans att öka. Vidare kan, genom möjligheten att beräkna olika grundläggningstyper, konstruktörer och geotekniker få information med högre tillförlitlighet och därmed ett betydligt bättre underlag för att kunna göra olika dimensioneringsval och optimeringar.

Avgränsning

Implementeringen av pålelement och modeller för dimensionering och analys av pålar och dess samverkan med jorden är väldigt komplicerad och kräver mycket programmerings- och utredningsarbete. Därför kommer beräkningarna av pålar i ett första skede och inom ramen för detta projekt att begränsas till en förenklad analysmodell baserad på bäddmoduler och linjär-elastisk teori som kommer att ligga till grund för vidare utveckling av modulen 3D Soil där samverkan mellan pålar och jord baseras på finita elementanalyser.

Det är viktigt att begränsa omfattningen av indata för praktiskt hanterbart i vanliga projekterings- och produktionsprocesser. Parametrar som används som ingångsdata till jordmodellerna är lätta att förstå fysikaliskt, men också är av sådan art att de kan bestämmas utan mer omfattande analyser.

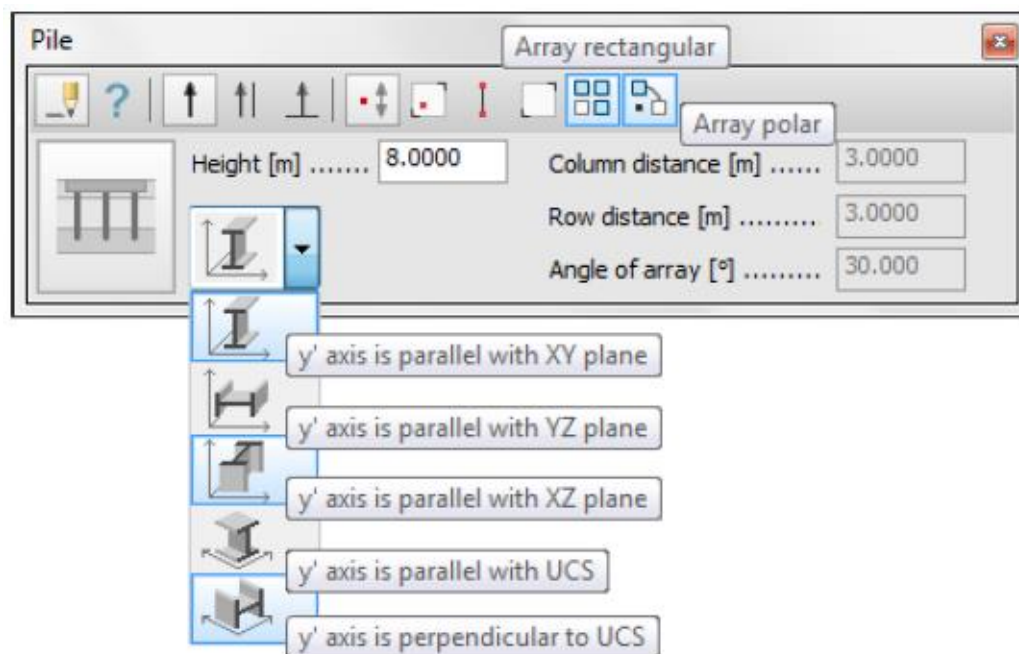
3. METODIK OCH GENOMFÖRANDE

Utgångspunkten för föreliggande projekt är det av StruSoft tidigare utvecklade strukturanalysprogram FEM-Design. Stommen i FEM Design återanvändes och vidareutvecklades för att kunna hantera modellering, analys och dimensionering av pålar i olika material och former.

Projektet utfördes i samverkan mellan Skanska och Strusoft. I Skanskas organisation finns erforderlig geoteknisk och byggtkniskt kompetens och i Strusofts organisation finns medarbetare som kunde utföra programmering och utveckling av beräkningsalgoritmer och praktiskt genomföra implementeringen i programmet.

Implementering av pålelement

Ett nytt element *Pile* har implementerats i FEM-Design. Elementet liknar det befintliga pelarelementet *Column* och kan ha olika former och bestå av olika material. Även pålar av kompositmaterial kan modelleras, analyseras och dimensioneras.



Figur 3.1. Dialogrutan för modellering av pålar i FEM-Design 17

Val och implementering av jordmodell

För att kunna analysera och dimensionera pålar och pålade fundament, krävs lämpliga jordmodeller som beskriver bl.a. friktionen och/eller adhesionen mellan jorden och pålens mantelyta, jordens horisontella motstånd som ger upphov till horisontell bärförmåga och ökar pålelementets styvhet mot knäckning samt jordens motstånd vid pålens spets.

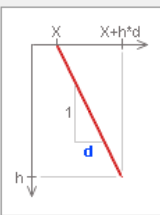
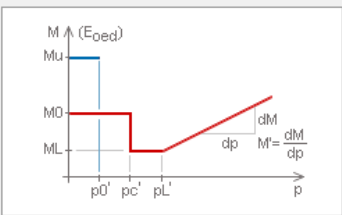
Det är viktigt att modelleringen av jorden blir praktiskt hanterbar i vanliga projekterings- och produktionsprocesser. De parametrar som används som ingångsdata till materialmodellerna som beskriver jorden, ska vara lätta att förstå fysikaliskt, men också vara av sådan art att de ska kunna bestämmas utan väsentligt mer omfattande analyser än vad som utförs i dagsläget

Inom ramen för detta projekt har en förenklad jordmodell använts, där egenskaperna ovan och interaktionen mellan pålar och jorden simuleras med bäddmoduler. Den valda modellen utgår från jordens deformations- och brottegenskaper och konverterar de till bäddmoduler med konstanta fjäderstyvheter samt maximal last för plastiska deformationer se *bilaga 1*. Användaren har möjlighet att ändra, de av programmet beräknade, egenskaper om så önskas. Den aktuella analysmodellen valdes av projektgruppen och sedan implementerades i programmet. Analysmodellen tar även hänsyn till påhängslaster som uppkommer p.g.a. negativ mantelfriktion.

Library material

Name

Foundation design
 Deformation calculation
 Both

Reference level [m] 0.000

Behaviour Undrained

Design according to combined behaviour

Material model Over consolidated

	Value	d
c uk [kN/m ²]	1.00	0.000
c k [kN/m ²]	120	0.000
phi k [deg]	45.0	
phi cvk [deg]	36.0	
Gamma dry [kN/m ³]	16.0	
Gamma sat. [kN/m ³]	20.0	
Mu [kN/m ²]	10000	0.000
M0 [kN/m ²]	16667	0.000
ML [kN/m ²]	500	0.000
M'	0.000	0.000
pc [kN/m ²]	1000	0.000
pL [kN/m ²]	2000	0.000
nu	0.200	

OK Cancel

Figur 3.2. Exempel på indata för jordensgenskaper som sedan konverteras till bäddmoduler

Pile

A.1 General Section Material End conditions Soil springs

Support springs Neg. shaft friction

Line supports (top down order)

Material	No	Ks, y' [kN/m ³]	Ks, z' [kN/m ³]
Jord	1	2057	2133
	2	2057	2133
	3	2057	2133
	4	2057	2133

Lateral line motion springs [kN/m/m]

Compression Ky' 802 Tension 802
 Compression Kz' 640 Tension 640

Lateral plastic limit forces [kN/m]

Compression 1.000e+15 Tension 1.000e+15
 Compression 1.000e+15 Tension 1.000e+15

Vertical line motion springs [kN/m/m]

Compression Kx' 1800 Tension 1800

Vertical plastic limit forces [kN/m]

Compression 74.5 Tension 74.5

Vertical pile tip spring [kN/m]

Compression Kx' 704 Tension 0.000e+00

Vertical plastic limit forces [kN]

Compression 18.6 Tension 1.000e+15

Options Auto calculate

OK Cancel

Figur 3.3. Beräknade bäddmoduler för pålar i FEM-Design 17

Uppdatering av användargränssnittet

Modelleringsverktygen för modellering av undergrunden och fundamenten uppdaterats och anpassats för att kunna modellera pålar och pålfundament. Bl.a. har möjligheten att bestämma en fundament horisontella bäddmodul införts för att kunna analysera pålade fundament på ett korrekt sätt.

Test av programmet

Programmet testades av programmerare/utvecklare efter avslutad programmering och implementering av jordmodeller för att säkerställa programmets funktionalitet.

Prototyp (beta-version)

En beta-version av programmet togs fram och var tillgänglig för arbetsgruppen och referensgruppen för validering och kalibrering. Beta-version var så pass komplett att fullständiga analyser kunde utföras.

Teorihandbok och användarmanual

En handbok som beskriver de nya funktionerna och teorin bakom beräkningarna i programmet upprättades tillsammans med en användarmanual för programmet, vilka finns i denna rapport som bilaga 1 & 2.

Validering och kalibrering

I detta steg ingår ett omfattande validerings- och kalibreringsarbete. Detta görs genom att ett antal typfall identifieras och formuleras. Dessa analyseras därefter med FEM-Design och responsen utvärderas ingående för att verifiera att beteendet blir det förväntade. Om möjligt ska typfall identifieras från verkliga projekt, företrädesvis även där mätningar av t ex. deformationer utförts.

Referensgruppen deltar också i valideringsarbetet och har möjlighet att lämna synpunkter på programmet innan den slutliga versionen är lanserad.

Justeringar/förbättringar

Efter att valideringsarbetet avslutas görs eventuella justeringar/förbättringar i programmet.

Kompletterande tester

Ytterligare tester och valideringar görs för att säkerställa att programmet fungerar och ger pålitliga analys – och dimensioneringsresultat.

Lansering

FEM-Design 17 som innehåller funktioner för modellering, analys och dimensionering av pålar lanserades i januari 2018 och har redan börjat användas av FEM-Designs användare.

4. SLUTSATS

Det finns idag, en ny version av strukturanalysprogrammet FEM-Design som har vidareutvecklats i samarbete med byggbranschen genom detta SBUF projekt. Den nu uppdaterade versionen av FEM-Design ger möjlighet till analys och dimensionering av pålar och pålade fundament som tillsammans med den tidigare utvecklade geomodulen 3D Soil utgör ett utmärkt verktyg för analys och dimensionering av samverkan mellan jorden och den ovanliggande strukturen.

5. FRAMTIDEN

I framtiden kommer även en avancerad modell för analys av pålar att införas. I den avancerade beräkningen kommer pålelementen att modelleras som en konstruktionsdel med full samverkan med jorden. Samverkan mellan jord och pålar bestäms genom en finita elementanalys där jorden modelleras med volymselement istället för dagens simulering med bäddmoduler. Det är då främst kohesionspålar (svävande pålar) som är av intresse. Vid grundläggning på spetsbärande pålar är betydelsen av samverkan mellan konstruktion och undergrund mindre uttalad. Utvecklingspotentialen är således stor och kommer att fortsätta även efter det att SBUF-projektet har avslutats.

6. BILAGOR

Bilaga 1

FEM-Design 17 - New features guide

<http://download.strusoft.com/FEM-Design/inst170x//documents/newfeatures.pdf>

Bilaga 2

FEM-Design User Manual

<http://download.strusoft.com/FEM-Design/inst170x//documents/manual.pdf>