

CUPRINS

Cuprinsul figurilor	2
1 Introducere	4
2 Metoda de calcul al structurii de sprijin.....	6
2.1 Concepte de teorie a elasticității.....	6
2.1.1 Relații între încărcare și forța tăietoare	7
2.1.2 Relații între forța tăietoare și momentul încovoietor	7
2.1.3 Teoria încovoierii simple	8
2.2 Modelul Winkler	11
2.2.1 Grinda continuă.....	11
2.2.2 Grinda infinită acționată de o forță concentrată.....	12
2.2.3 Grinda infinită acționată de mai multe forțe concentrate.....	15
2.2.4 Grinda infinită acționată de moment încovoietor	16
2.2.5 Grinda finită	17
2.2.6 Aplicații ale modelului Winkler pentru structurile de sprijin	18
3 Metoda de calcul al eforturilor secționale ale conductei	21
3.1 Tipuri de acțiuni	21
3.2 Tipuri de încărcări	21
3.3 Modelul de calcul	23
3.3.1 Modele de calcul pentru interacțiunea conductă – pat de fundare.....	24
3.3.2 Schema statică.....	27
4 Metoda de calcul al deformațiilor conductei	30
5 Programul de calcul	31
5.1 Descriere generală	31
5.2 Modulul pentru calculul structurii de sprijin.....	32
5.2.1 Preprocesorul	33
5.2.2 Solverul	37
5.2.3 Postprocesorul.....	38
5.3 Modulul pentru calculul conductei.....	44
5.3.1 Preprocesorul	45
5.3.2 Solverul.....	48
5.3.3 Postprocesorul.....	48
6 Calibrarea solverului	52
6.1 Modulul pentru calculul structurii de sprijin.....	52
6.1.1 Calibrare folosind metoda analitică prelucrată cu programul MathCAD	52
6.1.2 Calibrare folosind programul PyWall	57
6.1.3 Calibrare folosind metoda elementelor finite cu ajutorul programului Plaxis2D..	60
.....	60
6.2 Modulul pentru calculul conductei.....	63
6.2.1 Calibrare folosind metoda analitică prelucrată cu programul MathCAD	63
6.2.2 Calibrare folosind metoda elementelor finite cu ajutorul programului AxisVM	81
10	81
7 Concluzii.....	85
Bibliografie	86

CUPRINSUL FIGURILOR

Fig. 2.1: Grindă simplu rezemată, supusă unei încărcări distribuite.....	6
Fig. 2.2: Segmentul CC'	6
Fig. 2.3: Grindă încărcată la capete cu momente de aceeași magnitudine și sens contrar.....	8
Fig. 2.4: Secțiunea AB	9
Fig. 2.5: Încovoierea axei neutre.....	10
Fig. 2.6: Grinda infinită acționată de o forță concentrată	12
Fig. 2.7: Variația coeficienților de efort pentru lungimea adimensională	14
Fig. 2.8: Distribuția eforturilor secționale de-a lungul unei grinzi infinite acționate de o forță concentrată	15
Fig. 2.9: Grindă încărcată cu mai multe forțe concentrate.....	16
Fig. 2.10: Grindă acționată de moment încovoietor	16
Fig. 2.11: Grinda finită.....	17
Fig. 2.12: Schema de calcul a unei secțiuni de structură de sprijin considerând modelul de interacțiune Winkler.....	19
Fig. 3.1: Modelul pozării pe pat amenajat compactat	25
Fig. 3.2: Modelul reacțiunii dirijate radial	25
Fig. 3.3: Modelul reacțiunii proporționale cu tasarea	26
Fig. 3.4: Modelul reacțiunii în cazul pozării în pământ necoeziv	26
Fig. 3.5: Schema statică inițială	27
Fig. 3.6: Schema statică în care se consideră doar reacțiunea la bază	28
Fig. 3.7: Suprapunerea efectelor	28
Fig. 3.8: Determinarea eforturilor pentru jumătate din secțiunea conductei	29
Fig. 4.1: Schema de calcul pentru determinarea deformațiilor	30
Fig. 5.1: Schema logică a modului pentru calculul structurii de sprijin	32
Fig. 5.2: Interfața pentru definirea datelor litologice	33
Fig. 5.3: Interfața pentru definirea adâncimii excavației	33
Fig. 5.4: Interfața pentru definirea coeficientului de reacțiune.....	35
Fig. 5.5: Interfața pentru definirea coeficienților parțiali de siguranță	36
Fig. 5.6: Interfața pentru definirea caracteristicilor palplanșei	37
Fig. 5.7: Clasa responsabilă de calculul integralelor definite	38
Fig. 5.8: Diagramele de eforturi verticale	39
Fig. 5.9: Diagramele de eforturi orizontale.....	39
Fig. 5.10: Clasa responsabilă de crearea diagramelor.....	40
Fig. 5.11: Schema proceselor desfășurate de către postprocesor.....	41
Fig. 5.12: Interfața pentru determinarea lungimii de încastrare.....	42
Fig. 5.13: Schema logică a modului pentru calculul conductei	44
Fig. 5.14: Interfața pentru crearea încărcărilor și a combinațiilor de încărcări.....	45
Fig. 5.15: Lanțul evenimentelor în procesul de definire al unei încărcări	46
Fig. 5.16: Definirea combinațiilor de încărcări.....	47
Fig. 5.17: Definirea caracteristicilor conductei și a adâncimii de fundare	47
Fig. 5.18: Clasa responsabilă de crearea diagramelor.....	49
Fig. 5.19: Schema proceselor desfășurate de către postprocesor.....	50
Fig. 6.1: Secțiune perete de susținere.....	52
Fig. 6.2: Palplanșa utilizată în model.....	53
Fig. 6.3: Datele de intrare	54
Fig. 6.4: Diagramele de variație ale împingerii active.....	55
Fig. 6.5: Diagramele de variație ale forțelor tăietoare și ale momentelor încovoietoare.....	56
Fig. 6.6: Datele de intrare din programul PyWall.....	57
Fig. 6.7: Diagramele de moment încovoietor și forță tăietoare	58

Fig. 6.8: Diagramele deformațiilor	59
Fig. 6.9: Datele de intrare	60
Fig. 6.10: Discretizarea modelului și diagrama forței tăietoare.....	61
Fig. 6.11: Diagramele de forță tăietoare și moment încovoietor	62
Fig. 6.12: Încărcarea din greutate proprie.....	64
Fig. 6.13: Încărcarea din presiunea verticală a pământului	65
Fig. 6.14: Încărcarea provenită din greutatea pământului cuprins între cheie și diametrul orizontal	66
Fig. 6.15: Încărcarea din presiunea activă a pământului - componenta uniformă.....	67
Fig. 6.16: Încărcarea din presiunea activă a pământului - componenta liniară.....	68
Fig. 6.17: Încărcarea din presiunea hidrostatică la gradul de umplere 1	69
Fig. 6.18: Încărcarea din presiunea hidrostatică uniformă.....	70
Fig. 6.19: Încărcare provenită dintr-o forță verticală concentrată	71
Fig. 6.20: Încărcare provenită dintr-o forță orizontală concentrată	72
Fig. 6.21: Pozarea în pământ necoeziv cu o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagrama forței axiale	73
Fig. 6.22: Pozarea în pământ necoeziv cu o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagramele forței tăietoare și a momentului încovoietor	74
Fig. 6.23: Reacțiune proporțională cu tasarea, dată de o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagrama forței axiale	75
Fig. 6.24: Reacțiune proporțională cu tasarea, dată de o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagramele forței tăietoare și a momentului încovoietor	76
Fig. 6.25: Reacțiune uniform distribuită, dirijată radial, dată de o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagrama forței axiale	77
Fig. 6.26: Reacțiune uniform distribuită, dirijată radial, dată de o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagramele forței tăietoare și a momentului încovoietor.....	78
Fig. 6.27: Reacțiune uniform distribuită, dirijată orizontal, dată de o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagrama forței axiale	79
Fig. 6.28: Reacțiune uniform distribuită, dirijată orizontal, dată de o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagramele forței tăietoare și a momentului încovoietor.....	80
Fig. 6.29: Schema statică folosită pentru calibrarea cu ajutorul programului AxisVM 10	81
Fig. 6.30: Diagramele forțelor axiale pe modelul propus	82
Fig. 6.31: Diagramele forțelor tăietoare pe modelul propus.....	83
Fig. 6.32: Diagramele momentelor încovoietoare pe modelul propus.....	84

1 INTRODUCERE

Lucrarea înfățișează modul de realizare a unui program de calcul menit să dimensioneze din punct de vedere structural structuri îngropate (elementele de susținere ale unei tranșee pentru instalarea unei conducte precum și a unei conductei considerată circulară perfect rigide, modelând fie un element al unei rețele de transport al apei, fie un tunel).

Pentru dimensionarea tranșeei s-a considerat ipoteza sprijinirii cu elemente în consolă de tip palplanșă, utilizând două modele de comportare a pământului pentru determinarea împingerilor generate de acesta, respectiv pentru determinarea eforturilor dezvoltate în lungul structurii de sprijin: pe zona excavației s-a considerat o întreagă mobilizare a împingerii active a pământului (comportare plastică), în timp ce sub nivelul excavației s-a utilizat un model de interacțiune Winkler (comportare elastică). Conducta îngropată este modelată ca placă cilindrică având un raport lungime/diametru foarte mare, rezemată continuu pe un pat de fundare și în permanent contact cu pământul din jur și apa transportată.

Programul are o interfață prietenoasă și a fost optimizat pentru calculul instantaneu al structurilor astfel încât operațiunile de dimensionare/redimensionare să se desfășoare prin simpla modificare a parametrilor de intrare. Postprocesorul permite vizualizarea simultană a mai multor combinații de încărcare, precum și a înfășurărilor combinațiilor alese.

Pentru validarea modelului au fost utilizate atât metoda calculului analitic pornind de la diferite ipoteze de calcul implementate în programul MathCAD, cât și un model simplificat calculat cu programul Axis VM ce utilizează Metoda Elementelor Finite.

Cu această ocazie a fost pusă în evidență și ușurința în utilizare a programului creat. Metoda calculului analitic prezintă dezavantajul faptului că relațiile trebuie

The paper is a brief walkthrough the process of creating a software application used to aid in the structural design steps of the retaining structure of a trench for the embedment of a perfect rigid pipe, as well as aiding in the design of the pipe itself. A sheet pile wall cantilever retaining structure hypothesis was implied in the dimensioning of the trench, using two soil behaviour models for the computation of the soil thrust and the respective stresses that appear along the retaining structure: a soil plastic behaviour model was implied above the excavation depth, assuming a full mobilization of the soil's active thrust, while a linear or non-linear elastic model was used below the excavation, based on Winkler's theory for continuous beams. The embedded pipe is modelled as a cylindrical plate having a very large length to diameter ratio, being continuously supported by a foundation bed, and in permanent contact with the surrounding soil and the transported water.

The software has a user-friendly interface and was specially designed to allow for instantaneous results to be obtained so that the dimensioning and re-dimensioning operations to take place by simply modifying the input parameters, in a very intuitive way. The post-processor allows multiple load cases to be simultaneously overviewed as well as showing both their minimum and maximum envelopes.

Both analytical computations, based on different loads conditions, using MathCAD, and a simplified model created in Axis VM (using the Finite Elements Method), were used to calibrate and validate the results obtained using *PipeDoctor*.

This was also an opportunity to emphasise the ease in using the designed software. The disadvantage of the analytical computations method is that one needs to rewrite the equations for each loading hypothesis, leading to a slow iterative process, and the final results are difficult to emphasise. Using

rescrise pentru fiecare ipoteză de încărcare în parte, calculul iterativ fiind greoi, iar rezultatele finale sunt relativ greu de pus în valoare. Grupările de încărcări măresc dificultatea în exploatarea a acestui tip de analiză, iar diferențele în rezultate față de metodele numerice sunt neglijabile.

Programele ce implementează Metoda Elementelor Finite sunt concepute pentru a rezolva o gamă largă de probleme astfel încât problemele specifice trebuie implementate la nivelul unor detalii neimportante, pe de o parte, neglijându-se pe de altă parte aspecte ce pot avea importanță majoră în anumite situații. Un astfel de exemplu îl constituie modelarea geometriei conductei ce este aproximată în programele de MEF printr-un poligon. Se remarcă și în calibrarea prezentată în lucrare că datorită discontinuității poligonului prin care a fost modelată conducta, diagrama de forțe tăietoare apare la rândul său discontinuă, ceea ce duce la abateri importante ale modelului de calcul.

Metodele și teoriile implementate în aplicația propusă sunt detaliate în cele ce urmează. Ca principiu general s-a urmărit, acolo unde a fost posibil, utilizarea de soluții exacte ale ecuațiilor ce guvernează comportarea structurilor. În situațiile în care acest lucru nu a fost posibil, s-a căutat implementarea unor metode numerice optimizate pentru procesoarele moderne. Rezultatul este calculul instantaneu al structurilor dimensionate, ușurând activitatea de proiectare.

multiple load cases only makes this type of approach even more difficult, while the obtained results are not very different from the ones obtained through numerical models.

The programs using Finite Elements Method are usually designed to work for a wide variety of problems, so that certain specific situations must, on one hand, take into account unimportant details, neglecting, on the other hand, some aspects that might be of great significance in some cases. Such an example is the modelling of the pipe's geometry, which is considered as a polygon in FEM applications. This issue is shown in the calibration chapter of this paper, where it can be observed that due to the polygon's discontinuities through which the pipe was modelled, the shear force diagram is also discontinuous, which leads to important deflections from the real results.

The methods and theories implemented in the proposed software application are detailed in the following chapters. As a general principal, exact solutions of the equations that model the structures' behaviour were used, whenever possible. When this could not be accomplished, numerical methods were implemented to obtain approximate solutions, optimized for modern processors. The result lays in the instantaneous computation of the structures, aiding the design process.

2 METODA DE CALCUL AL STRUCTURII DE SPRIJIN

Pentru calculul structurii de sprijin a excavației s-au utilizat două ipoteze distincte, combinând un model de comportare plastică a pământului în zona superioară a bazei excavației cu un model de comportare elastică de tip Winkler racordată sub cea dintâi. În cadrul primului model de calcul s-a utilizat teoria Mononobe-Okabe pentru determinarea împingerii active a pământului exercitată asupra lucrării de susținere în condiții seismice, aplicând principiile teoriei elasticității pentru a stabili valorile eforturilor care se dezvoltă în palplanșă.

Se vor detalia în cele ce urmează principiile care au stat la baza calculelor atât pentru zona superioară, cât și pentru cea inferioară.

2.1 Concepte de teorie a elasticității

Considerând o grindă simplu rezemată AB supusă unei încărcări distribuite oarecare ω (Fig. 2.1), fie două puncte C și C' situate la o distanță Δx unul față de celălalt. Forța tăietoare și momentul încovoietor în punctul C vor fi notate cu V , respectiv M , și vor fi presupuse pozitive, iar perechea de moment și forță tăietoare din punctul C' se vor nota cu $V+\Delta V$, respectiv $M+\Delta M$.

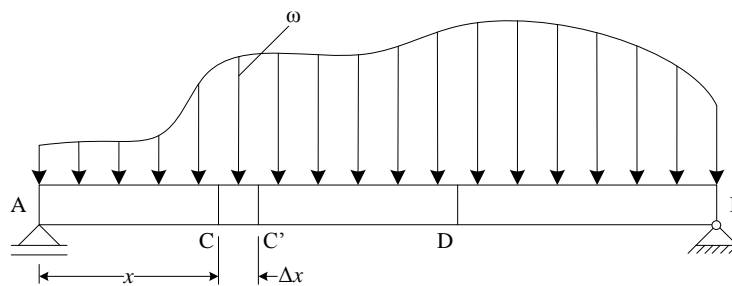


Fig. 2.1: Grindă simplu rezemată, supusă unei încărcări distribuite

Detășând segmentul CC' de restul barei putem reprezenta diagrama corpului liber, așa cum este arătat în Fig. 2.2. Forțele exercitate pe corpul astfel obținut includ o încărcare de magnitudine $\omega \cdot \Delta x$ și forțele și momentele interne de la capetele C și C' .

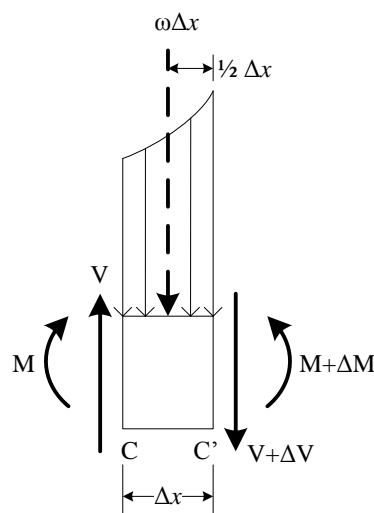


Fig. 2.2: Segmentul CC'

2.1.1 Relații între încărcare și forța tăietoare

Scriind ecuația de echilibru a forțelor pe verticală $\sum F_y=0$ obținem:

$$\begin{aligned} V - (V+\Delta V) - \omega \cdot \Delta x &= 0 \\ \Delta V &= -\omega \cdot \Delta x \end{aligned} \quad (2.1)$$

Împărțind ecuația la Δx și presupunând că Δx tinde la zero, obținem:

$$\frac{dV}{dx} = -\omega \quad (2.2)$$

Din ecuația (2.2) rezultă că pentru o grindă încărcată precum în Fig. 2.1 panta curbei forței tăietoare este negativă; valoarea numerică a pantei în orice punct este egală cu încărcarea pe unitatea de lungime în acel punct.

Integrând relația anterioară între punctele C și D , putem scrie:

$$V_D - V_C = - \int_{x_C}^{x_D} \omega \, dx \quad (2.3)$$

sau

$$V_D - V_C = - (\text{aria de sub curba încărcării între punctele } C \text{ și } D) \quad (2.4)$$

2.1.2 Relații între forța tăietoare și momentul încovoietor

Scriind ecuația de echilibru a momentelor în punctul C' , $\sum M_{C'}=0$ obținem:

$$\begin{aligned} (M + \Delta M) - M - V \cdot \Delta x + \omega \cdot \Delta x \cdot \frac{\Delta x}{2} &= 0 \\ \Delta M &= V\Delta x - \frac{1}{2} \omega(\Delta x)^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Împărțind ecuația la Δx și presupunând că Δx tinde la zero, obținem:

$$\frac{dM}{dx} = V \quad (2.6)$$

Din relația (2.6) rezultă că panta curbei momentului încovoietor, dM/dx , este egală cu valoarea forței tăietoare. Acest lucru este valabil în orice punct în care nu există forțe tăietoare concentrate. De asemenea, se poate observa că $V = 0$ în punctele în care M atinge valori maxime. Acest lucru facilitează determinarea punctelor în care grinda poate ceda din încovoiere.

Integrând relația (2.6) între punctele C și D , rezultă:

$$M_D - M_C = \int_{x_C}^{x_D} V \, dx \quad (2.7)$$

sau

$$M_D - M_C = \text{aria de sub curba forței tăietoare între punctele C și D} \quad (2.8)$$

Ecuțiile (2.7) și (2.8) sunt valabile chiar și când există încărcări concentrate între punctele C și D, atâta vreme cât curba forței tăietoare a fost corect realizată.

2.1.3 Teoria încovoierii simple

Vom considera o grindă realizată dintr-un material omogen încărcată la capete cu două momente de aceeași magnitudine și sens opus (Fig. 2.3).

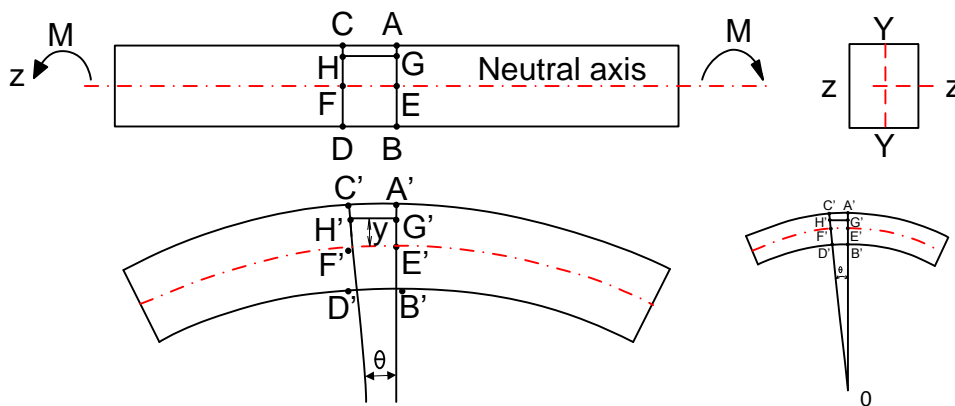


Fig. 2.3: Grindă încărcată la capete cu momente de aceeași magnitudine și sens contrar

În continuare, vom considera următoarele ipoteze:

- Grinda este simetrică față de axa Y-Y;
- Secțiunile transversale rămân plane și normale pe fibrele longitudinale chiar și după încovoiere;
- Relația efort-deformație caracteristică materialului din care este confecționat grinda rămâne lineară, guvernată de modulul lui Young, și este aceeași atât pentru întindere cât și pentru compresiune ($\sigma = E \cdot \varepsilon$).

Să presupunem două secțiuni foarte apropiate AB și CD . După încovoiere secțiunile vor fi la $A'B'$ și $C'D'$ și nu vor mai fi paralele. AC se va extinde în $A'C'$, iar BD se va comprima în $B'D'$. Linia EF este localizată astfel încât nu va suferi modificări de lungime. Suprafața determinată de aceasta se numește *suprafață neutră*, iar intersecția ei cu axa Z-Z se numește *axa neutră*.

Prelungind segmentele $A'B'$ și $C'D'$, acestea se vor intersecta într-un punct O , realizând un unghi θ iar raza arcului descris de $E'F'$ cu centrul în O va avea raza R .

Fie y distanța $E'G'$ de la axa neutră la un strat oarecare inițial paralel cu aceasta, atunci:

$$\frac{H'G'}{E'F'} = \frac{(R + y) \cdot \theta}{R \cdot \theta} = \frac{R + y}{R} \quad (2.9)$$

iar alungirea relativă a stratului $H'G'$ este:

$$\varepsilon = \frac{H'G' - HG}{HG} = \frac{H'G' - HG}{EF} = \frac{(R + y) \cdot \theta - R \cdot \theta}{R \cdot \theta} = \frac{y}{R} \quad (2.10)$$

Deoarece am presupus valabilă legea lui Hooke, rezultă:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{y}{R} \quad (2.11)$$

sau

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{y}{R} \quad (2.12)$$

Deoarece grinda este în echilibru static și nu este încărcată cu forțe tăietoare, ci doar cu momente încovoietoare, forțele care acționează pe secțiunea AB sunt în întregime longitudinale, iar suma forțelor de întindere trebuie să fie egală cu suma forțelor de compresiune, pentru îndeplinirea condiției de echilibru. Cuplul intern pe întreaga secțiune trebuie să fie egal cu momentul extern.

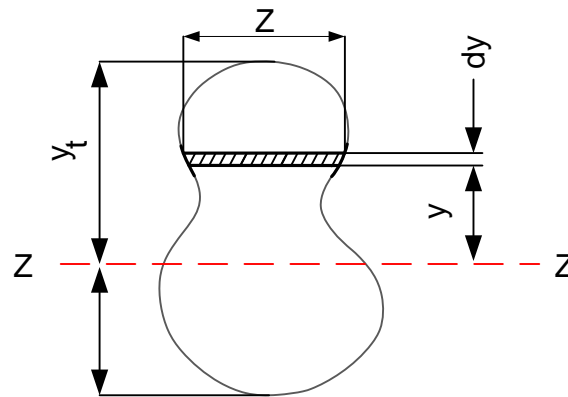


Fig. 2.4: Secțiunea AB

Astfel, din echilibrul de forțe, avem:

$$\sum \sigma \cdot \delta A = 0 \quad (2.13)$$

sau

$$\sum \sigma \cdot z \cdot \delta y = 0 \quad (2.14)$$

Utilizând relațiile (2.13) și (2.14) putem descrie momentul încovoietor total astfel:

$$M = \sum y \cdot \sigma \cdot \delta A = \sum y \cdot \sigma \cdot z \cdot \delta y \quad (2.15)$$

Înlocuind pe σ din relația (2.12) rezultă:

$$M = \frac{E}{R} \sum y^2 \cdot \delta A = \frac{E}{R} \sum y^2 \cdot z \cdot \delta y \quad (2.16)$$

dar $\sum(y^2 \cdot \delta A)$ este momentul de inerție al secțiunii (I), astfel putem deduce următoarea relație:

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R} = \frac{\sigma}{y} \quad (2.17)$$

Considerând încovoierea doar pentru axa neutră, putem simplifica Fig. 2.3 prin Fig. 2.5:

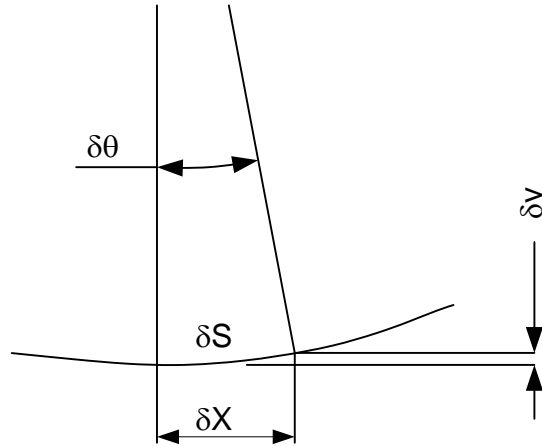


Fig. 2.5: Încovoierea axei neutre

Pentru valori mici ale unghiului θ , putem considera:

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta \cong \theta \quad (2.18)$$

Curbura grinzii se definește ca:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{R} \quad (2.19)$$

În exemplul din Fig. 2.5 $\delta\theta$ este mic, deci $\delta x \approx \delta s$, i.e. $ds/dx=1$. Așadar:

$$\frac{1}{R} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{d\theta}{dx} = \frac{d}{ds} \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.20)$$

Din aceste mici aproximări, putem deduce următoarea relație, înlocuind (2.17) în (2.20):

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.21)$$

și

$$\text{Panta} = \theta = \frac{dy}{dx} = \int \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right) dx = \int \frac{M}{EI} dx \quad (2.22)$$

Ținând cont de ecuația (2.18), putem determina deformația y integrând panta, anterior determinată:

$$\text{Deformația} = y = \int \theta \, dx = \int \left(\frac{dy}{dx} \right) dx = \iint \frac{M}{EI} dx = \frac{1}{EI} \iint M dx \quad (2.23)$$

2.2 Modelul Winkler

2.2.1 Grinda continuă

Calculul momentelor încovoietoare, al forțelor tăietoare și al deformațiilor unei grinzi continue solicitată la încovoiere se bazează pe ecuația diferențială a fibrei deformate mediane a grinzii.

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} = \bar{p} \quad (2.24)$$

unde \bar{p} este încărcarea pe unitate de lungime, iar produsul EI este rigiditatea la încovoiere a grinzii.

Pentru a exprima relația dintre \bar{p} și presiunea de contact la nivelul fundației se poate folosi următoarea relație:

$$\bar{p} = pB \quad (2.25)$$

unde B este lățimea grinzii.

Înlocuind relația (2.25) în ecuația (2.24) obținem:

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + pB = 0 \quad (2.26)$$

Ținând cont că $p = k_s z$, rezultă:

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + k_s z B = 0 \quad (2.27)$$

sau

$$\frac{d^4 z}{dx^4} + \frac{k_s B}{EI} z = 0 \quad (2.28)$$

Înmulțind și împărțind cu 4 termenul al doilea, rezultă:

$$\frac{d^4 z}{dx^4} + \frac{4k_s B}{4EI} z = 0 \quad (2.29)$$

Putem introduce notația $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_s B}{4EI}}$, unde λ se măsoară în m^{-1} . Ecuația diferențială devine:

$$\frac{d^4 z}{dx^4} + 4\lambda^4 z = 0 \quad (2.30)$$

Soluția generală a acestei ecuații diferențiale este:

$$z = e^{\lambda x}(C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x}(C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) \quad (2.31)$$

Constantele de integrare C_i , unde $i=1 \div 4$, se determină din condițiile de margine.

2.2.2 Grinda infinită acționată de o forță concentrată

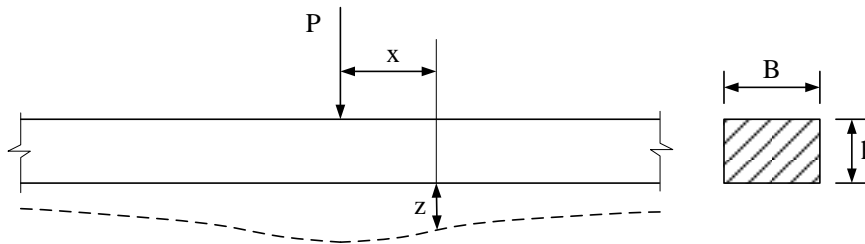


Fig. 2.6: Grinda infinită acționată de o forță concentrată

Din condițiile de margine obținem:

- Pentru $x = \pm\infty$, $M=0$, $T=0$ $\rightarrow C_1=C_2=0$;
- Pentru $x=0$, $\frac{dz}{dx}=0$, $\rightarrow C_3=C_4$;
- Pentru $x=0$, $T = \frac{P}{2}$, $\rightarrow C_3 = C_4 = \frac{P}{8EI\lambda^3} = \frac{P\lambda}{8EI\lambda^4} = \frac{P\lambda}{8EI \frac{k_s B}{4EI}} = \frac{P\lambda}{2k_s B}$

Soluția ecuației diferențiale devine astfel:

$$z = \frac{P\lambda}{2k_s B} e^{-\lambda x}(\cos \lambda x + \sin \lambda x) = \frac{P\lambda}{2k_s B} f_1(\lambda x) \quad (2.32)$$

unde $f_1(\lambda x) = e^{-\lambda x}(\cos \lambda x + \sin \lambda x)$.

$$\frac{dz}{dx} = \theta = -\frac{P\lambda^2}{k_s B} e^{-\lambda x} \sin \lambda x = -\frac{P\lambda^2}{k_s B} f_2(\lambda x) \quad (2.33)$$

unde $f_2(\lambda x) = e^{-\lambda x} \sin \lambda x$.

Introducem notația $l_e = \frac{1}{\lambda}$ unde l_e este lungimea elastică.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dx^2} &= -\frac{M}{EI} = -\frac{P\lambda^3}{k_s B} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) = -\frac{P\lambda^4}{k_s B \lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \\ &= -\frac{P \frac{k_s B}{4EI}}{k_s B \lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$M = -P I_e \frac{1}{4} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) = \frac{1}{4} P I_e f_3(\lambda x)$$

unde $f_3(\lambda x) = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$.

$$\frac{d^3 z}{dx^3} = -\frac{T}{EI} = -\frac{2P\lambda^4}{k_s B} e^{-\lambda x} \cos \lambda x = -\frac{2P \frac{k_s B}{4EI}}{k_s B \lambda} e^{-\lambda x} \cos \lambda x \quad (2.35)$$

$$T = -P \frac{1}{2} e^{-\lambda x} \cos \lambda x = -\frac{1}{2} P f_4(\lambda x)$$

unde $f_4(\lambda x) = e^{-\lambda x} \cos \lambda x$.

Variația funcțiilor $f_1(\lambda x)$, $f_2(\lambda x)$, $f_3(\lambda x)$ și $f_4(\lambda x)$ având ca argument pe λx , este descrisă în Fig. 2.7. Aceste funcții pot fi utilizate pentru calculul lui z , θ , M și respectiv T .

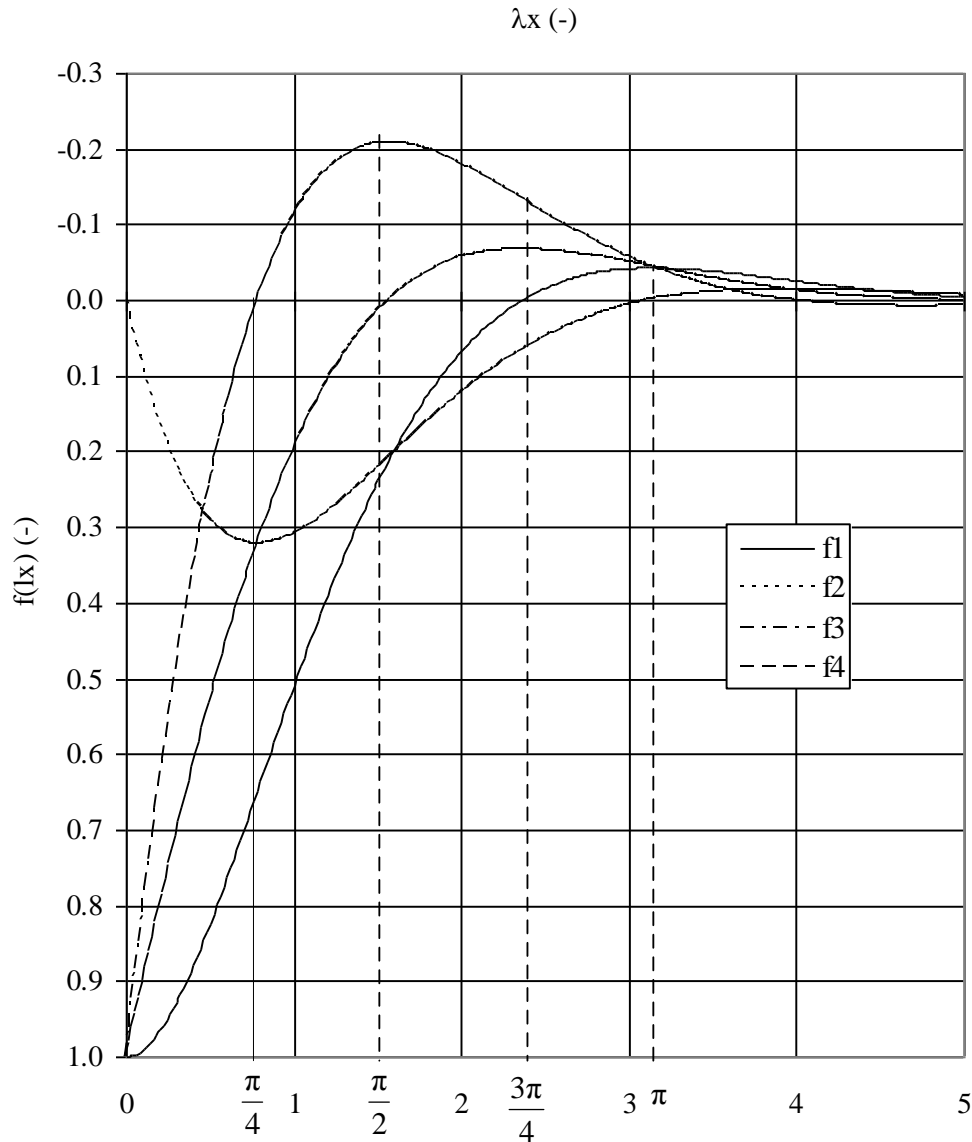


Fig. 2.7: Variația coeficienților de efort pentru lungimea adimensională

Deoarece diagrama forței tăietoare este antisimetrică față de punctul de aplicație al forței, valorile funcției f_4 se vor lua cu semnul indicat în figură când forța se află la stânga față de secțiunea de calcul și cu semn contrar când punctul de aplicație al forței este situat în partea dreaptă a secțiunii.

Diagramele deformatiei, a rotirii, a momentului încovoietor și respectiv a forței tăietoare pentru grinda infinită acționată de o forță concentrată sunt redată în Fig. 2.8.

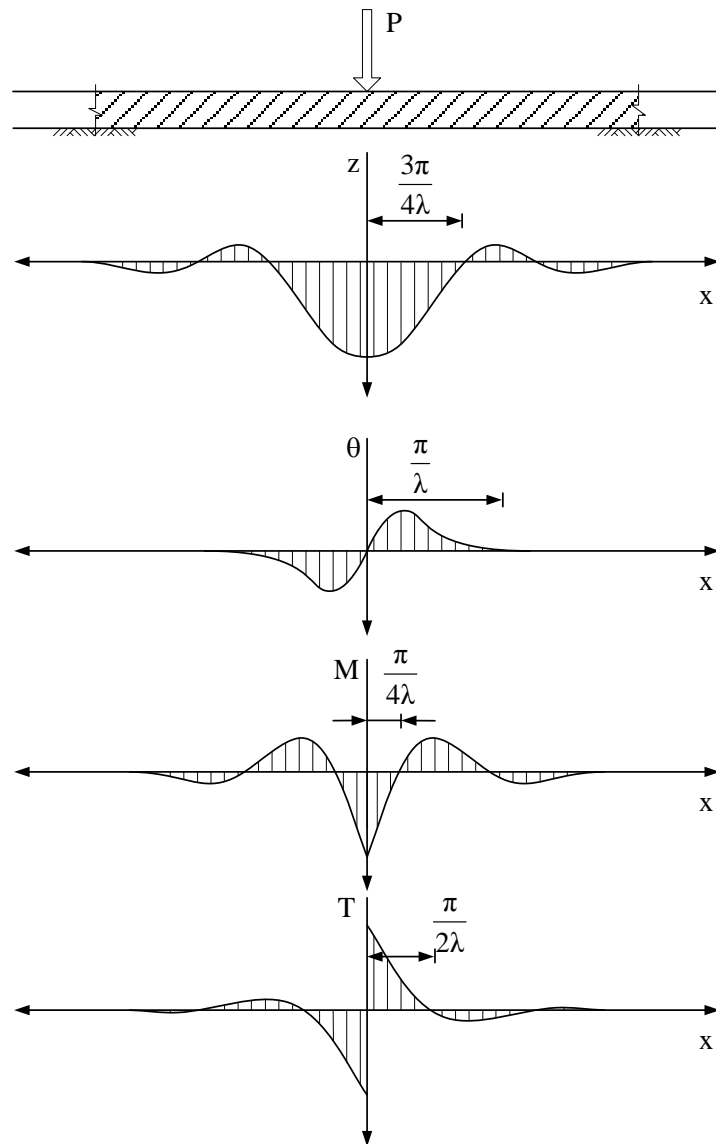


Fig. 2.8: Distribuția eforturilor secționale de-a lungul unei grinzi infinite acționată de o forță concentrată

2.2.3 Grinda infinită acționată de mai multe forțe concentrate

Pentru cazul în care grinda este acționată de mai multe forțe concentrate P_i , $i=1 \div n$, determinarea valorilor pentru z , θ , M , T într-o secțiune se face prin suprapunerea efectelor (Fig. 2.9).

$$z = \frac{\lambda}{2k_s B} \sum_{i=1}^n P_i f_1(\lambda x_i) \quad (2.36)$$

$$\theta = \frac{\lambda^2}{k_s B} \sum_{i=1}^n P_i f_2(\lambda x_i) \quad (2.37)$$

$$M = \frac{1}{4} I_e \sum_{i=1}^n P_i f_3(\lambda x_i) \quad (2.38)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_i f_4(\lambda x_i) \quad (2.39)$$

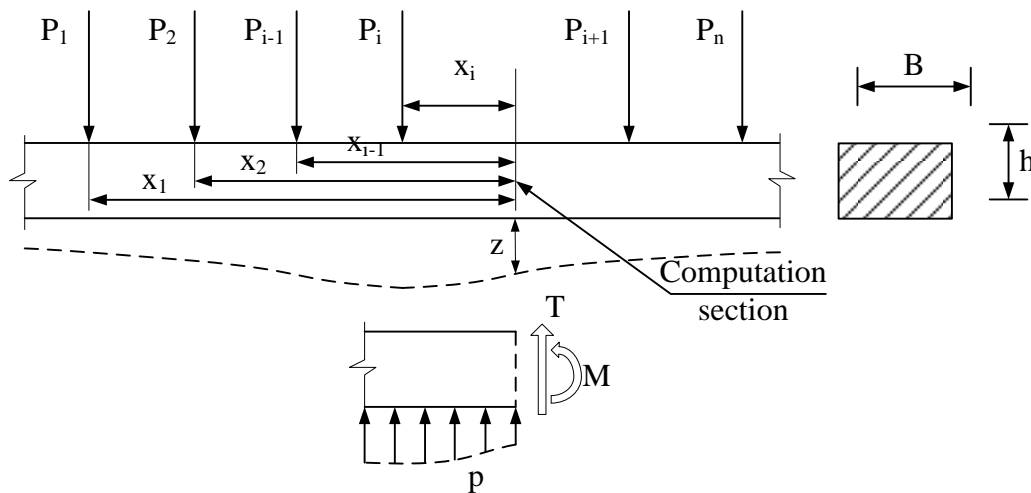


Fig. 2.9: Grindă încărcată cu mai multe forțe concentrate

2.2.4 Grinda infinită acționată de moment încovoietor

Momentul încovoietor M_0 este înlocuit de un cuplu de forțe $P\Delta x$ (Fig. 2.10).

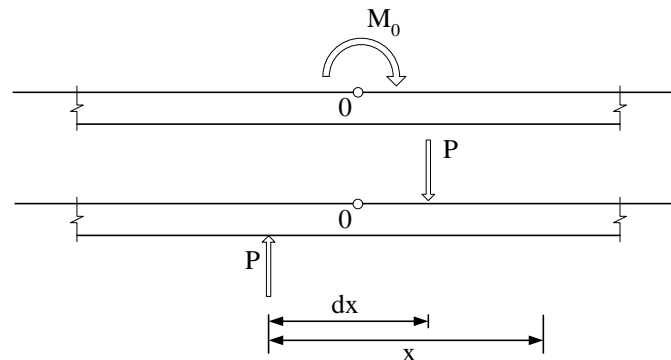


Fig. 2.10: Grindă acționată de moment încovoietor

Pentru determinarea tasării grinzii într-o secțiune situată la distanța x față de punctul de aplicație al cuplului, se folosește relația (2.34) pentru cazul în care acționează două forțe concentrate.

$$z = -\frac{P\lambda}{2k_s B} f_1(\lambda x) + \frac{P\lambda}{2k_s B} f_1[\lambda(x - dx)] = -\frac{\lambda}{2k_s B} P \{f_1(\lambda x) - f_1[\lambda(x - dx)]\} \frac{dx}{dx} =$$

$$\frac{M_0 \lambda}{2k_s B} \frac{f_1(\lambda x) - f_1[\lambda(x - dx)]}{dx} = \frac{M_0 \lambda}{2k_s B} \frac{df_1}{dx} = \frac{M_0 \lambda^2}{2k_s B} e^{-\lambda x} \sin \lambda x = \frac{M_0 \lambda^2}{2k_s B} f_2(\lambda x) \quad (2.40)$$

Deci, pentru calcularea deformației unei grinzi infinite acționată de un moment încovoietor M_0 , se folosește funcția $f_2(\lambda x)$, funcție care descrie rotația în cazul unei grinzi acționată de o

forță concentrată P. Aceasta înseamnă că pentru θ , M, T funcțiile f_1 , f_3 și f_4 vor fi refolosite, prin permutarea corespondenței descrisă în Tab. 2.1.

Tab. 2.1

	Funcțiile folosite în cazul în care grinda este acționată de	
	P	M_0
z	f_1	f_2
θ	f_2	f_3
M	f_3	f_4
T	f_4	f_1

2.2.5 Grinda finită

Pentru utilizarea funcțiilor determinate în cazul grinzilor infinite, grinda finită este calculată după metoda forțelor fictive.

Considerăm grinda de lungime finită care e transformată într-o grindă infinită adăugând prelungiri fictive la capetele A și B (Fig. 2.11).

Grinda de fundare considerată ca o grindă infinită este acționată de sistemul de forțe P_i , $i=1 \div n$, împreună cu forțele fictive V_i , $i=1 \div 4$ situate de o parte și de alta a grinzii, cu valori determinate astfel încât stare de eforturi și cea de deformații ale grinzii de lungime finită să nu fie modificate.

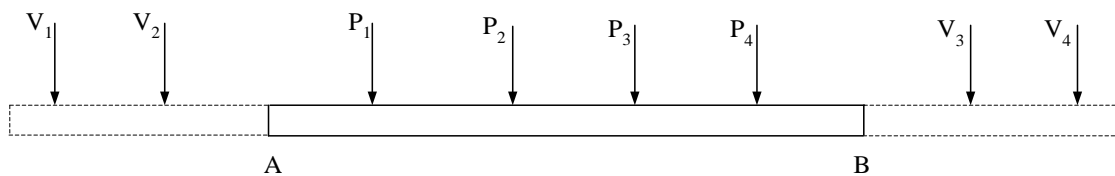


Fig. 2.11: Grinda finită

Pentru determinarea forțelor fictive sunt utilizate condițiile de margine, după cum urmează: $M_A=0$, $T_A=0$, $M_B=0$, $T_B=0$.

Folosind funcțiile $f_3(\lambda x_i)$ și $f_4(\lambda x_i)$ definite anterior și impunând condiția pentru care capetele grinzii sunt libere, se obține un sistem de patru ecuații liniare pentru determinarea valorilor forțelor fictive.

Pentru ușurința calculului, distanța dintre forța V_1 și capătul A al grinzii este aleasă în așa fel încât momentul încovoietor să fie nul, iar punctul de aplicație al forței V_2 este ales astfel încât forța tăietoare asociată din secțiunea A să fie de asemenea nulă.

Aceeași abordare este utilizată și în cazul forțelor V_3 și V_4 față de momentul încovoietor și forța tăietoare din capătul B al grinzii.

Din tabelele funcțiilor $f_3(\lambda x_i)$ și $f_4(\lambda x_i)$ reiese că pentru ca forțele fictive ce apar într-o ecuație să se anuleze reciproc, distanțele de la capetele grinzii până la punctele de aplicație ale forțelor fictive trebuie alese după cum urmează:

$$x = \frac{\pi}{4\lambda} \text{ pentru care } f_3\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0 \quad (2.41)$$

$$x = \frac{\pi}{2\lambda} \text{ pentru care } f_4\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (2.42)$$

Forțele V_i , $i=1\div 4$ obținute anterior sunt introduse în schema de încărcare a grinzii de lungime finită iar calculul deformațiilor și a eforturilor secționale pot fi făcute folosind tabelele și diagrame asociate grinzii infinite.

2.2.6 Aplicații ale modelului Winkler pentru structurile de sprijin

Modelarea structurilor de sprijin supuse la forțe orizontale ca grinzi pe mediu Winkler este una foarte realistă, prin această metodă fiind dimensionate majoritatea structurilor de sprijin din România.

Modelarea se bazează pe ipoteza că orice secțiune a structurii de sprijin este modelată printr-o grindă elastică a cărei fibră medie deformată este caracterizată de ecuația:

$$E_p \cdot I \cdot \frac{d^4 y(z)}{dz^4} = -p(z) \cdot B \quad (2.43)$$

unde:

$E_p I$ este rigiditatea la încovoiere a secțiunii;

B este lungimea secțiunii normale pe direcția presiunii reactive.

Presiunea reactivă a pământului la suprafața de contact a secțiunii, $p(z)$, este direct proporțională cu deplasarea, $y(z)$, acționând normal la suprafața de contact și este calculată pornind de la ecuația (2.44) care exprimă deformația unui resort imaginar prin care este modelat pământul

$$p(z) = k_s(z) \cdot y(z) \quad (2.44)$$

unde k_s este coeficientul de pat la adâncimea z . În Tab. 2.2 sunt prezentate câteva valori orientative pentru k_s :

Tab. 2.2: Valori orientative ale coeficientului de pat pentru câteva tipuri de pământuri

Tipul de pământ	k_s (daN/cm ³)
Pământuri prăfoase, umpluturi afânate, argile moi, nisipuri afânate	0.1÷0.5
Umpluturi compactate, argile vârtoase, nisipuri de îndesare medie	0.5÷5.0
Argile tari, nisipuri îndesate	5.0÷10.0

Argile tari, pietrișuri și bolovănișuri

10.0÷20.0

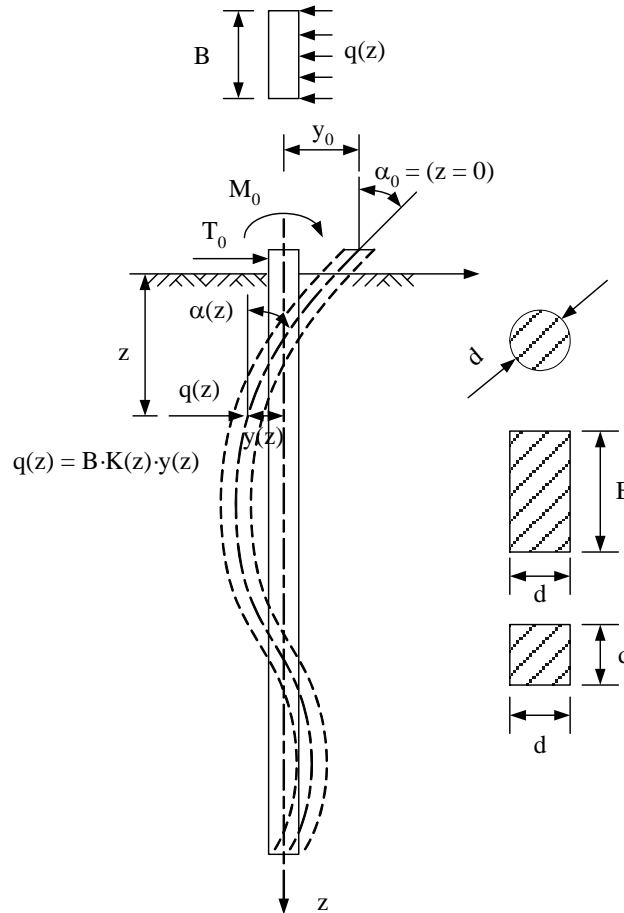


Fig. 2.12: Schema de calcul a unei secțiuni de structură de sprijin considerând modelul de interacțiune Winkler

Înlocuind relația (2.44) în ecuația (2.43) rezultă:

$$E_p \cdot I \cdot \frac{d^4 y(z)}{dz^4} = -B \cdot k_s(z) \cdot y(z) \quad (2.45)$$

Vom nota cu \bar{z} adâncimea redusă de calcul, dată de relația:

$$\bar{z} = \frac{z}{l_0(z)} \quad (2.46)$$

unde z este adâncimea de calcul, iar l_0 (lungimea elastică) este dată de relația:

$$l_0(z) = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_p \cdot I}{k_s(z) \cdot B}} \quad (2.47)$$

Astfel, pentru o secțiune infinită, la aplicarea unei forțe tăietoare T_0 și a unui moment încovoiător M_0 la capătul superior al secțiunii, se obțin următoarele ecuații:

$$y(\bar{z}) = \frac{2 \cdot \theta(\bar{z})}{I_0(z) \cdot k_s(z) \cdot B} \cdot T_0 + \frac{2 \cdot \psi(\bar{z})}{I_0^2(z) \cdot k_s(z) \cdot B} \cdot M_0 \quad (2.48)$$

$$\theta(\bar{z}) = -\frac{2 \cdot \rho(\bar{z})}{I_0^2(z) \cdot k_s(z) \cdot B} \cdot T_0 - \frac{4 \cdot \theta(\bar{z})}{I_0^3(z) \cdot k_s(z) \cdot B} \cdot M_0 \quad (2.49)$$

$$M(\bar{z}) = I_0(z) \cdot \xi(\bar{z}) \cdot T_0 + \rho(\bar{z}) \cdot M_0 \quad (2.50)$$

$$T(\bar{z}) = \psi(\bar{z}) \cdot T_0 - \frac{2 \cdot \xi(\bar{z})}{I_0(z)} \cdot M_0 \quad (2.51)$$

Valorile funcțiilor $\rho(\bar{z})$, $\psi(\bar{z})$, $\theta(\bar{z})$ și $\xi(\bar{z})$ sunt date în relațiile (2.52)÷(2.55):

$$\theta(\bar{z}) = e^{-\bar{z}} \cos(\bar{z}) \quad (2.52)$$

$$\xi(\bar{z}) = e^{-\bar{z}} \cos(\bar{z}) \quad (2.53)$$

$$\rho(\bar{z}) = e^{-\bar{z}} (\cos(\bar{z}) + \sin(\bar{z})) \quad (2.54)$$

$$\psi(\bar{z}) = e^{-\bar{z}} (\cos(\bar{z}) - \sin(\bar{z})) \quad (2.55)$$

3 METODA DE CALCUL AL EFORTURILOR SECȚIONALE ALE CONDUCTEI

Pentru calculul abordat în cadrul procesului de dimensionare al oricărei structuri este necesar, ca în primă instanță, să se stabilească tipurile de acțiuni ce pot determina o schimbare în starea de eforturi a structurii. Se consideră acțiune, orice fel de cauză care poate crea solicitări mecanice.

3.1 Tipuri de acțiuni

Este necesară o clasificare a acțiunilor în funcție de durata de timp în care acestea acționează și de intensitatea acestora. Astfel, se pot stabili trei mari categorii: acțiuni permanente – ale căror efect se manifestă pe întreaga durată de viață a structurii, dar nu suferă variații mari în intensitate; acțiuni temporare – apar adesea în timpul exploatării structurii și prezintă variații mari în intensitate; respectiv acțiuni excepționale – se consideră a avea caracter excepțional toate acțiunile care apar brusc, foarte rar, eventual niciodată în timpul duratei de viață a structurii, dar au intensități foarte mari, putând schimba dramatic eforturile și deformațiile, împingând adesea structura într-o stare din care nu se mai poate continua exploatarea sa în condiții normale. (Tab. 3.1)

Tab. 3.1: Clasificarea acțiunilor

Tipul acțiunii		Caracterizare
Permanentă		Se aplică pe întreaga durată de viață a structurii, cu variații mici în intensitate.
Temporară	Cvasipermanentă	Se aplică timp îndelungat, sau pe perioade relativ scurte, dar frecvente, cu intensitate mare.
	Variabilă	Variază puternic în intensitate, iar acțiunea acesteia poate să dispară.
Excepțională		Apare foarte rar, dar cu intensități mari și prezintă caracter de șoc. Poate să nu apară în timpul duratei de viață a unei structuri.

3.2 Tipuri de încărcări

Acțiunile ce influențează comportarea structurilor, exercită diferite tipuri de forțe asupra acestora, numite generic încărcări. Clasificarea acestora se face în funcție de tipul acțiunii din care fac parte, de natura aplicării acestora (i.e. statice sau dinamice) și, eventual, de direcția și sensul după care acționează (i.e. orizontale – verticale; interioare – exterioare). (Tab. 3.2)

În vederea verificării structurii la cele două stări limită (Starea Limită de Exploatare Normală – SLEN, respectiv Starea Limită Ultimă – SLU), se grupează acțiunile în diferite grupări de calcul corespunzătoare stărilor limită. Valorilor intensității cu care încărcările pot acționa, li se aplică factori de multiplicare, în funcție de gruparea în care acestea sunt considerate. Astfel, pentru calculul conductelor pentru transportul apei, se stabilesc două grupări fundamentale (pentru cazurile în care conducta este goală, respectiv în exploatare) și o grupare specială (pentru comportarea în condiții seismice). (Tab. 3.3)

Tab. 3.2: Tipuri de încărcări

Tipul acțiunii		Tipul încărcării	Încărcarea
Permanentă	Statică	Pasivă	Greutatea proprie a conductei
		Exterioară	Presiunea verticală datorată greutateii pământului de umplură
			Presiunea orizontală datorată împingerii pământului de lângă conductă
			Suprasarcini prezente la suprafața terenului
Cvasipermanentă	Statică	Interioară	Greutatea proprie a apei din conductă
			Presiunea hidrostatică din conductă
			Variația de temperatură
			Subpresiunea
Variabilă	Dinamică	Exterioară	Suprasarcină datorată încărcărilor din trafic
		Interioară	Presiunea hidrodinamică datorată schimbărilor bruște în regimul de curgere al apei
Excepțională	Dinamică	Exterioară	Încărcarea datorată acțiunii seismice

Tab. 3.3: Combinații de încărcări

Gruparea	Încărcarea	Factorul de multiplicare
Gruparea fundamentală I - conducta goală -	Greutatea proprie a conductei	1.1
	Presiunea verticală datorată greutateii pământului de umplură	1.3
	Presiunea orizontală datorată împingerii pământului de lângă conductă	1.3 (0.9 în cazul în care aceasta are efect favorabil)
	Suprasarcini prezente la suprafața terenului	1.2 ÷ 1.4
	Subpresiunea	1.1
	Suprasarcină datorată încărcărilor din trafic	1.3
	Variația de temperatură	1.1
Gruparea fundamentală II - conducta în exploatare -	Greutatea proprie a conductei	1.1
	Presiunea verticală datorată greutateii pământului de umplură	1.3
	Presiunea orizontală datorată împingerii pământului de lângă conductă	1.3 (0.9 în cazul în care aceasta are efect favorabil)
	Suprasarcini prezente la suprafața terenului	1.2 ÷ 1.4
	Greutatea proprie a apei din conductă	1.0
	Presiunea hidrostatică din conductă	1.1
	Subpresiunea	1.1
	Presiunea hidrodinamică datorată schimbărilor bruște în regimul de curgere al apei	1.1
	Presiunea de încercare a conductei	1.0
Suprasarcină datorată încărcărilor din trafic	1.3	
Gruparea specială	Greutatea proprie a conductei	1.0

Presiunea verticală datorată greutateii pământului de umplură – considerată în regim dinamic	1.0
Presiunea orizontală datorată împingerii pământului de lângă conductă – considerată în regim dinamic	1.0
Suprasarcini prezente la suprafața terenului	1.0
Greutatea proprie a apei din conductă	1.0
Presiunea hidrostatică din conductă – la care se adaugă presiunea hidrodinamică datorată acțiunii seismice	1.0
Subpresiunea	1.0
Suprasarcină datorată încărcărilor din trafic	1.0
Acțiunea seismică	1.0

3.3 Modelul de calcul

Conductele circulare pentru transportul apei pot fi acceptate – în vederea modelării lor numerice – ca fiind elemente structurale de tip placă cilindrică, având un raport lungime – diametru foarte mare, rezemate continuu pe un pat de fundare și în permanent contact cu pământul din jur și apa transportată.

Pentru a facilita calculul stării de eforturi induse de acțiunile ce solicită conducta, se consideră o serie de ipoteze simplificatoare ce permit utilizarea principiului suprapunerii efectelor și a legilor rezistenței materialelor:

- materialul din care este confecționată conducta este continuu, omogen și izotrop;
- comportarea materialului se petrece doar în domeniul elastic, cu un modul de elasticitate constant;
- legea constitutivă ce descrie comportarea materialului este o funcție liniară;
- grosimea conductei rămâne constantă pe tot parcursul aplicării acțiunilor;
- punctele ce formează planul normal la suprafața mediană rămân în plan în timpul aplicării acțiunilor, iar planul pe care acestea îl formează rămâne perpendicular pe suprafața mediană deformată.

În ceea ce privește interacțiunea teren-structură, aceasta se modelează în funcție de rigiditățile relative ale acestora. Ținând cont că o conductă mai flexibilă va interacționa mai intens cu pământul din jurul ei decât una mai rigidă, se vor stabili apriori trei tipuri de conducte, în funcție de rigiditățile acestora:

- conducte rigide;
- conducte semi-rigide;
- conducte flexibile.

Încadrarea unei conducte în una din aceste categorii se face cu ajutorul indicelui de flexibilitate, în cazul conductelor circulare fiind determinat astfel:

$$I_{fc} = \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{1 + \nu_0} \cdot \frac{E_0}{E} \cdot \left(\frac{R}{h}\right)^3 \quad (3.1)$$

unde: ν → coeficientul Poisson al materialului din care este confecționată conducta;

v_0	→ coeficientul Poisson al pământului din jurul conductei;
E	→ modulul de elasticitate al materialului din care este confecționată conducta;
E_0	→ modulul de deformație liniară al pământului de umplutură;
R	→ raza medie a conductei;
h	→ grosimea peretelui conductei.

Pentru: $I_{fc} < 2$	→ conductă rigidă;
$I_{fc} \in [2,10]$	→ conductă semirigidă;
$I_{fc} > 10$	→ conductă flexibilă.

Ca urmare a considerentelor simplificatoare menționate mai sus, se decide că cea mai facilă abordare în procesul de determinare a eforturilor este aceea de a considera ca model de calcul un contur închis (circular în cazul nostru), de rază egală cu raza medie a conductei și lungime unitară, aflat în interacțiune cu patul de fundare și pământul de umplutură și acționat de încărcările exterioare.

În cazul în care se trece la o astfel de abordare, pentru a obține rezultate admise ca fiind foarte apropiate de condițiile reale, este necesar ca încărcările și caracteristicile fizico-mecanice ale pământului de umplutură și ale patului de fundare să nu aibă variații semnificative în lungul conductei, pe lungimea pentru care se consideră dimensionarea.

3.3.1 Modele de calcul pentru interacțiunea conductă – pat de fundare

Ținând cont de principiile discutate anterior, au fost stabilite următoarele modele pentru calculul interacțiunii conductă – pat de fundare:

1. În cazul în care conducta sprijină pe un pat neamenajat, interacțiunea acestora se poate aproxima cu o încărcare uniform distribuită la bază, ce acționează pe o lățime b corespunzătoare unui unghi la centru 2α . Unghiul la centru se poate determina astfel:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1.131}{R} \cdot \sqrt{P_v \cdot R \cdot \left(\frac{1-v^2}{E} + \frac{1-v_0^2}{E_0} \right)} \right] \quad (3.2)$$

unde: R	→ raza medie a conductei;
P_v	→ rezultanta verticală a încărcărilor;
v	→ coeficientul Poisson al materialului din care este confecționată conducta;
E	→ modulul de elasticitate al materialului din care este confecționată conducta;
v_0	→ coeficientul Poisson al pământului ce constituie patul de fundare;
E_0	→ modulul de deformație liniară al pământului ce constituie patul de fundare.

2. În cazul în care conducta sprijină pe un pat amenajat compactat, iar interacțiunea acestora este considerată a produce o încărcare cu distribuție similară celei din cazul anterior, valoarea încărcării se poate determina din condiția de echilibru, având următorul rezultat:

$$q = \frac{P_v}{2 \cdot R \cdot \sin \alpha} \quad (3.3)$$

- unde: q → valoarea încărcării provenită din interacțiunea conductei cu patul de fundare;
 P_v → rezultanta verticală a încărcărilor;
 R → raza medie a conductei;
 α → unghiul la centru.

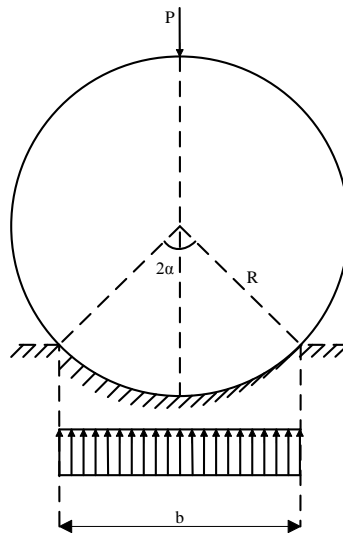


Fig. 3.1: Modelul pozării pe pat amenajat compactat

3. Încărcarea datorată interacțiunii conductă – pat de fundare se mai poate considera a avea o distribuție uniformă, însă dirijată radial, de-a lungul zonei de interacțiune. În acest caz, valoarea presiunii se poate stabili folosind aceeași ecuație ca și în cazul anterior, diferența constituind-o direcția de acțiune.

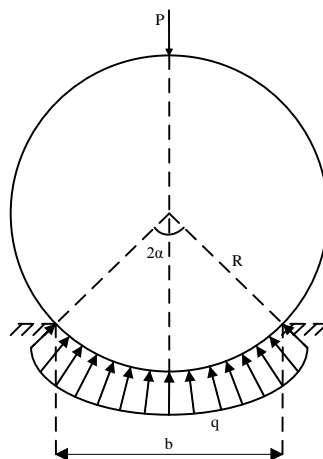


Fig. 3.2: Modelul reacțiunii dirijate radial

4. O dezvoltare a cazului 3 o constituie situația în care mărimea presiunii este considerată a fi proporțională cu componentele radiale ale tasării. Astfel, valoarea presiunii nu mai este constantă, aceasta nemaivând o distribuție uniformă, însă poate fi exprimată ca funcție de unghiul față de generatoarea verticală:

$$q(\theta) = K \cdot \Delta \cdot \cos \theta \quad (3.4)$$

- unde:
- $q(\theta)$ → valoarea presiunii corespunzătoare unghiului θ ;
 - θ → unghiul față de generatoarea verticală;
 - K → coeficientul de pat al pământului ce constituie patul de fundare;
 - Δ → tasarea verticală a conductei, provenită din tasarea patului de fundare.

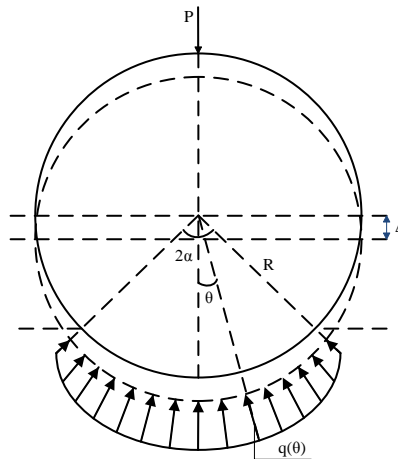


Fig. 3.3: Modelul reacțiunii proporționale cu tasarea

5. Aplicând modelul prezentat în cazul 4 unui pat de fundare realizat din pământ necoeziv, valoarea presiunii se poate calcula astfel:

$$q(\theta) = K \cdot \Delta \cdot (\cos \theta - \cos \alpha) \cdot \cos \theta \quad (3.5)$$

- unde:
- $q(\theta)$ → valoarea presiunii corespunzătoare unghiului θ ;
 - θ → unghiul față de generatoarea verticală;
 - K → coeficientul de pat al pământului ce constituie patul de fundare;
 - Δ → tasarea verticală a conductei, provenită din tasarea patului de fundare;
 - α → unghiul la centru corespunzător limitei zonei de interacțiune conductă – pat de fundare.

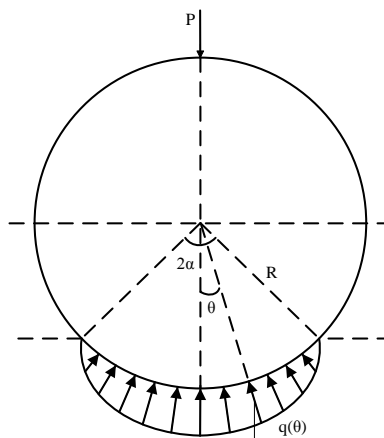


Fig. 3.4: Modelul reacțiunii în cazul pozării în pământ necoeziv

3.3.2 Schema statică

Odată stabilite tipurile de încărcări și interacțiuni, respectiv valorile acestora, se poate trece la determinarea schemei statice, în vederea obținerii stării de eforturi ce se dezvoltă în conductă. Profitând de ipotezele simplificatoare menționate în capitolul 3.3 abordarea firească ar fi să considerăm două scheme statice, după cum urmează, și să aplicăm apoi principiul suprapunerii efectelor.

Schema statică inițială este reprezentată printr-un inel circular simplu rezemat la bază, acționat, pe rând, de fiecare din încărcările considerate, neglijând însă încărcările rezultate din interacțiunea conductă – pat de fundare (Fig. 3.5). Se determină astfel eforturile ce apar pe conturul conductei, totodată stabilind și valoarea reacțiunii din reazem.

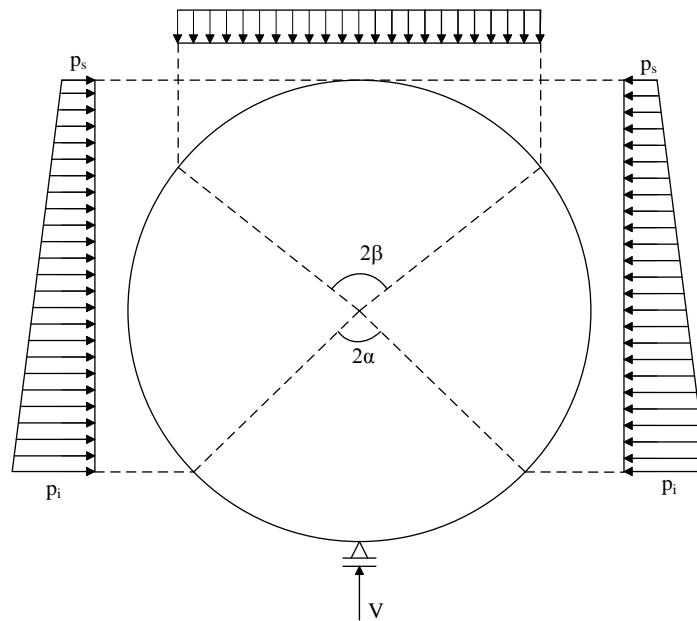


Fig. 3.5: Schema statică inițială

Se trece apoi la cea de-a doua schemă statică, în care inelul este de asemenea simplu rezemat la bază, dar este acționat doar de încărcarea stabilită a corespunde cel mai bine tipului de interacțiune conductă – pat de fundare, pentru cazul studiat (Fig. 3.6). Reacțiunea din reazem este înlocuită cu suma valorilor reacțiunilor date de încărcările considerate în schema inițială, ceea ce ne permite să determinăm starea de eforturi creată de încărcarea din reacțiunea patului de fundare.

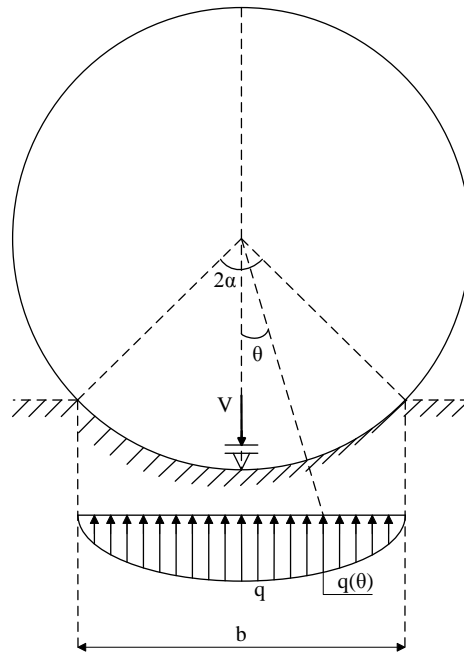


Fig. 3.6: Schema statică în care se consideră doar reacțiunea la bază

În final, aplicând principiul suprapunerii efectelor (Fig. 3.7), vom putea determina starea finală de eforturi în fiecare punct de pe contur.

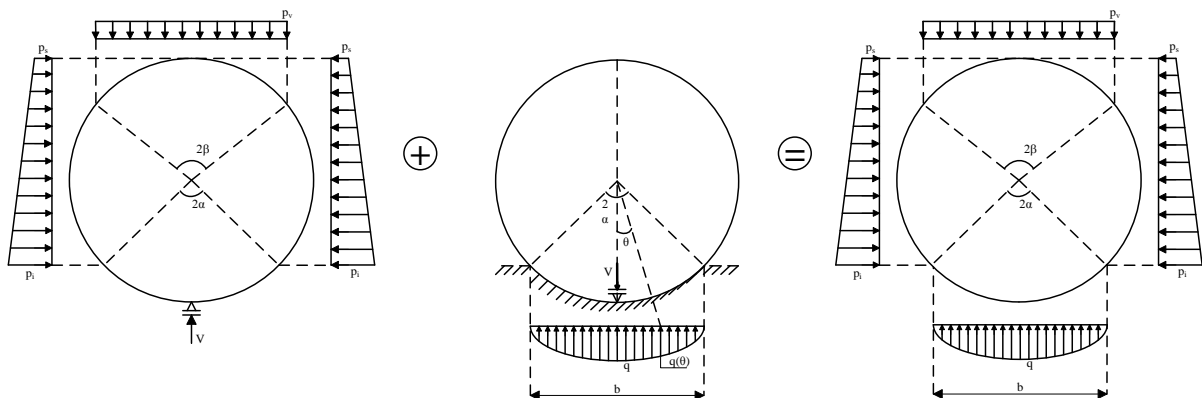


Fig. 3.7: Suprapunerea efectelor

Ținând cont că atât secțiunea conductei cât și încărcările sunt simetrice față de generatoarea verticală, este suficient să determinăm încărcările, respectiv eforturile create de acestea, doar pe jumătate din secțiune (Fig. 3.8).

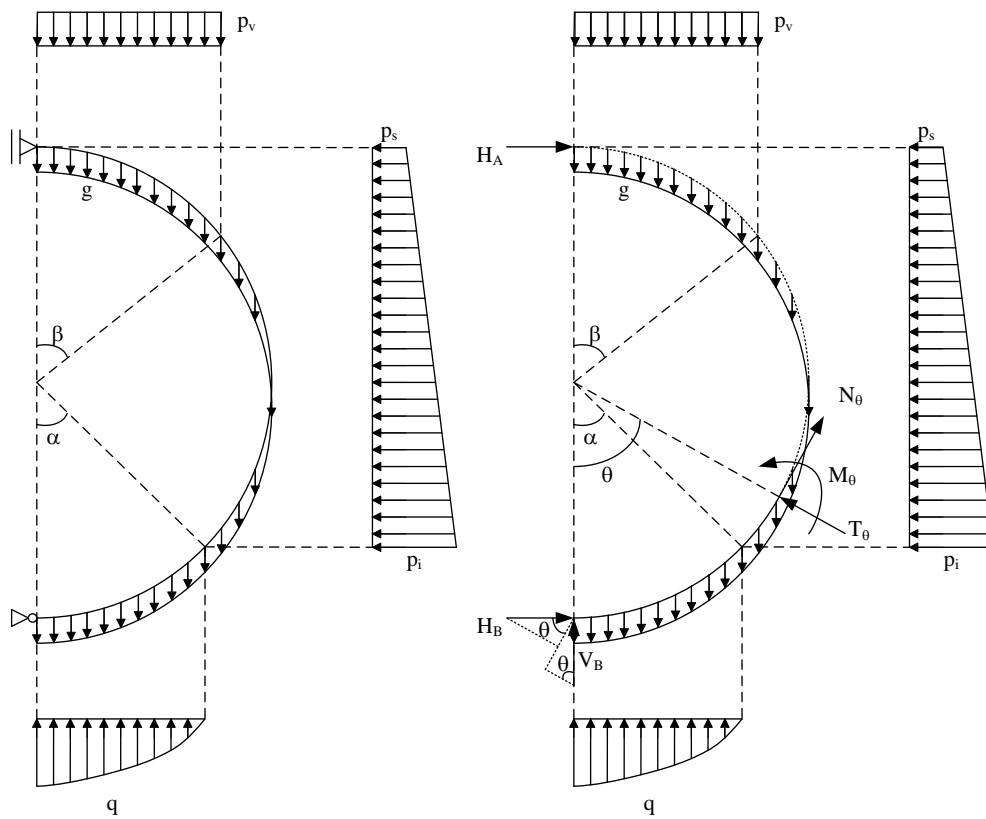


Fig. 3.8: Determinarea eforturilor pentru jumătate din secțiunea conductei

4 METODA DE CALCUL AL DEFORMAȚIILOR CONDUCTEI

Pentru verificarea conductei la Starea Limită de Deformații, este nevoie de calculul acestora și compararea valorilor rezultate cu valorile admisibile, impuse prin lege. Cu toate că aplicația ce reprezintă subiectul lucrării de față nu tratează decât cazul conductelor perfect rigide (acestea nesuferind deformații), se vor descrie principalele etape pentru calculul stării de deformații.

Din considerente practice, ne interesează aflarea valorilor maxime ale deformațiilor pe direcțiile verticală, respectiv orizontală. Pentru aceasta, se poate aplica formula Maxwell – Mohr (4.1) integrând eforturile rezultate din încărcările considerate cu eforturile create de acțiunea unei forțe unitare pe direcția dorită, după cum urmează:

$$\Delta = \frac{n}{E \cdot I} \left[\int_0^\beta \mathcal{M}_{P=1} \left(\sum_{i=1}^n \mathcal{M}_i \right) R d\varphi + \int_\beta^{\pi-\alpha} \mathcal{M}_{P=1} \left(\sum_{i=1}^n \mathcal{M}_i \right) R d\varphi + \int_{\pi-\alpha}^\pi \mathcal{M}_{P=1} \left(\sum_{i=1}^n \mathcal{M}_i \right) R d\varphi \right] \quad (4.1)$$

- unde:
- Δ → valoarea deformației pe direcția considerată;
 - E → modulul de elasticitate al materialului din care este confecționată conducta;
 - I → momentul de inerție al secțiunii conductei;
 - $\mathcal{M}_{P=1}$ → momentul creat de acțiunea unei forțe unitare;
 - \mathcal{M}_i → momentul creat de acțiunea încărcării i ;
 - n → numărul de încărcări ce acționează asupra conductei;
 - R → raza medie a secțiunii conductei;
 - β → unghiul corespunzător încărcărilor de la partea de sus a conductei;
 - α → unghiul corespunzător încărcărilor de la partea de jos a conductei.

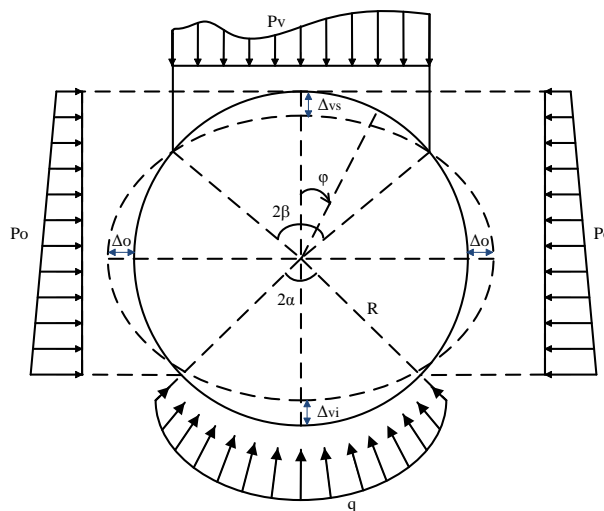


Fig. 4.1: Schema de calcul pentru determinarea deformațiilor

5 PROGRAMUL DE CALCUL

5.1 Descriere generală

Programul *PipeDoctor* a fost scris în limbajul C++, care oferă o mare libertate în crearea de structuri proprii ce facilitează stocarea și prelucrarea datelor. Cu ajutorul acestora, toate informațiile necesare obținerii diagramelor de eforturi sunt stocate în vectori derivați din structurile definite special pentru procedurile de calcul.

În scopul creării unei interfețe cât mai prietenoase și intuitive, s-a optat pentru utilizarea kitului de dezvoltare software *Microsoft Foundation Classes* (MFC), care permite obținerea ferestrelor de dialog familiare oricărei persoane inițiată în folosirea sistemului de operare *Windows*, creat de aceeași companie.

Din punct de vedere structural, programul este alcătuit din două module ce pot fi folosite independent, în funcție de scopul în care acesta este folosit:

- modulul pentru calculul structurii de sprijin, ce permite:
 - definirea litologiei pământului, prin introducerea parametrilor fizico-mecanici relevanți în calcul, pentru fiecare strat;
 - definirea caracteristicilor structurii de sprijin necesare pentru calculul eforturilor și deformațiilor dezvoltate în secțiunea acesteia;
 - definirea coeficientului de reacțiune necesar calculului cu modelul Winkler;
 - definirea opțională a coeficienților parțiali de siguranță, pentru a facilita calculul conform Eurocode 7;
 - obținerea diagramelor de eforturi verticale și orizontale în pământ, până la adâncimea excavației, atât în eforturi totale, cât și efective;
 - obținerea diagramelor de eforturi și deformații dezvoltate în structura de sprijin până la o adâncime de cinci ori mai mare decât adâncimea excavației;
 - obținerea unei lungimi recomandate de încastrare a structurii, impunând limite maxime pentru eforturi sau deformații la bază.

- modulul pentru calculul conductei, ce permite:
 - definirea diametrului secțiunii conductei și grosimea acesteia;
 - definirea încărcărilor ce acționează pe secțiunea conductei, atât exterioare, cât și interioare;
 - definirea combinațiilor de încărcări, cu coeficienți pentru fiecare încărcare implicată;
 - obținerea diagramelor de eforturi dezvoltate în secțiunea conductei, din combinațiile de încărcări definite, și din înfășurătoarele acestora.

Din punct de vedere funcțional, programul poate fi împărțit în trei, funcție de rolul fiecărei părți în cadrul proceselor de preluare, stocare, prelucrare și afișare a datelor:

- preprocesorul → permite utilizatorului să introducă datele corespunzătoare problemei de analizat și verifică dacă aceste date pot fi folosite în rezolvarea problemei;
- solverul → preia datele furnizate de către preprocesor și efectuează calculele numerice necesare creării diagramelor de eforturi;
- postprocesorul → redă informațiile obținute în urma analizei într-un format intuitiv din punct de vedere ingineresc.

5.2 Modulul pentru calculul structurii de sprijin

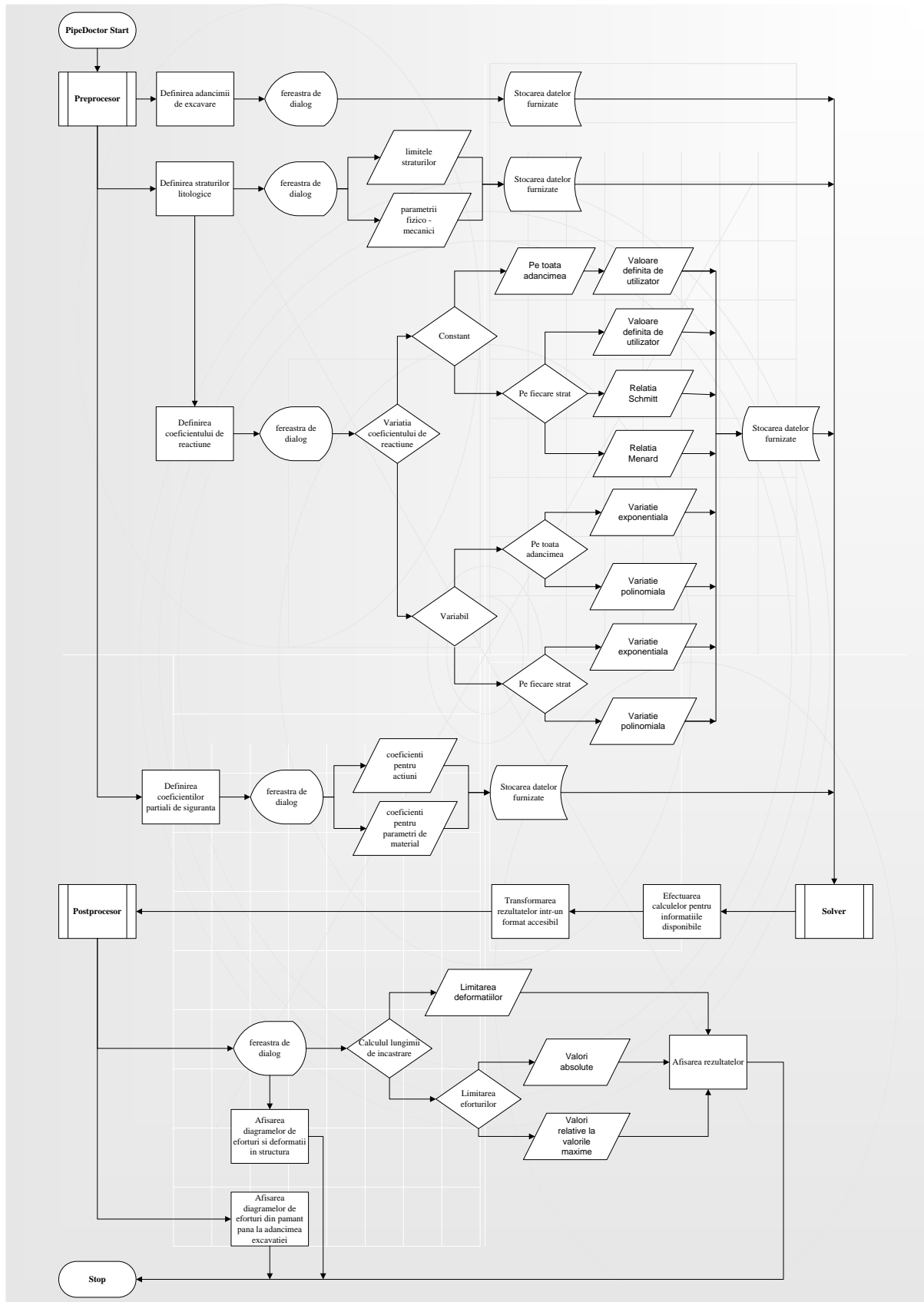


Fig. 5.1: Schema logică a modului pentru calculul structurii de sprijin

5.2.1 Preprocesorul

Profitând de avantajele oferite de librăria MFC (cap. 5.1), introducerea datelor în cadrul preprocesorului este facilă și intuitivă. Astfel, în Fig. 5.2 se prezintă fereastra pentru introducerea informațiilor litologice, care vor constitui baza pentru calculul împingerii active a pământului până la cota excavației. De asemenea, se poate adăuga și o suprasarcină uniform distribuită la nivelul terenului.

Accesul la această fereastră se poate face atât din meniul programului, cât și din apelarea butonului specific din bara de unelte.

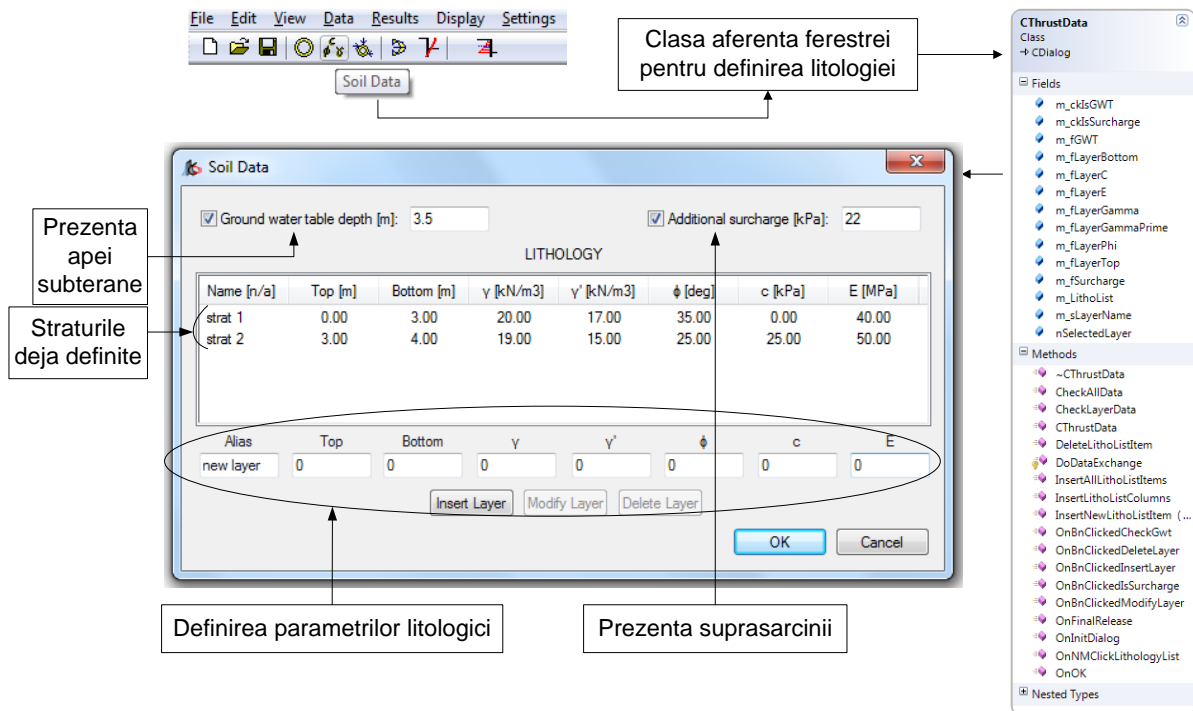


Fig. 5.2: Interfața pentru definirea datelor litologice

Stabilirea cotei excavației se face din fereastra de atribuire a datelor corespunzătoare conductei, sub forma definirii cotei de fundare a acesteia .

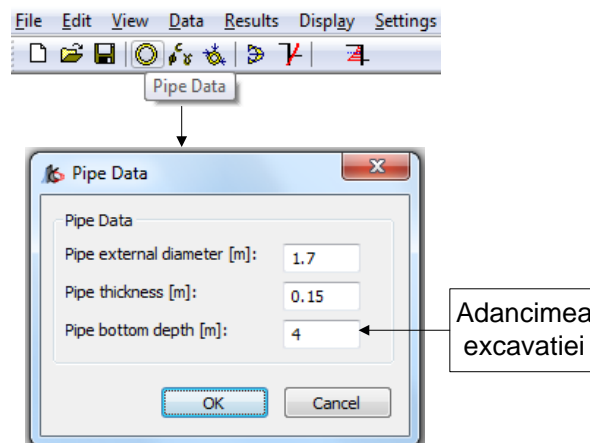


Fig. 5.3: Interfața pentru definirea adâncimii excavației

Pentru calculul eforturilor și deformațiilor cu modelul Winkler este necesară definirea modului de variație a coeficientului de reacțiune și a relației ce descrie această variație. Pentru aceasta, s-a creat o interfață specifică ce permite utilizatorului să aleagă între mai multe opțiuni (Fig. 5.4), după cum urmează:

- coeficient de reacțiune constant:
 - pe toată adâncimea;
 - pe fiecare strat:
 - prin definirea unei valori a coeficientului de reacțiune specifică fiecărui strat;
 - prin utilizarea relației lui Schmitt ($k_s = \frac{E}{a}$, unde E este modulul de deformație liniară a aceluși strat, valoare definită în introducerea datelor litologice), și definirea valorilor parametrului a pentru fiecare strat;
 - prin utilizarea relației lui Menard ($k_s = \frac{E_m}{\frac{\alpha \cdot a}{2} + 0.133 \cdot (9 \cdot a)^\alpha}$), prin definirea celor trei parametri pentru fiecare strat;
- coeficient de reacțiune variabil:
 - de formă exponențială ($k_s(z) = A + D \cdot z^n$):
 - pe toată adâncimea;
 - pe fiecare strat;
 - de formă polinomială ($k_s(z) = az^6 + bz^5 + cz^4 + dz^3 + ez^2 + fz + g$):
 - pe toată adâncimea;
 - pe fiecare strat.

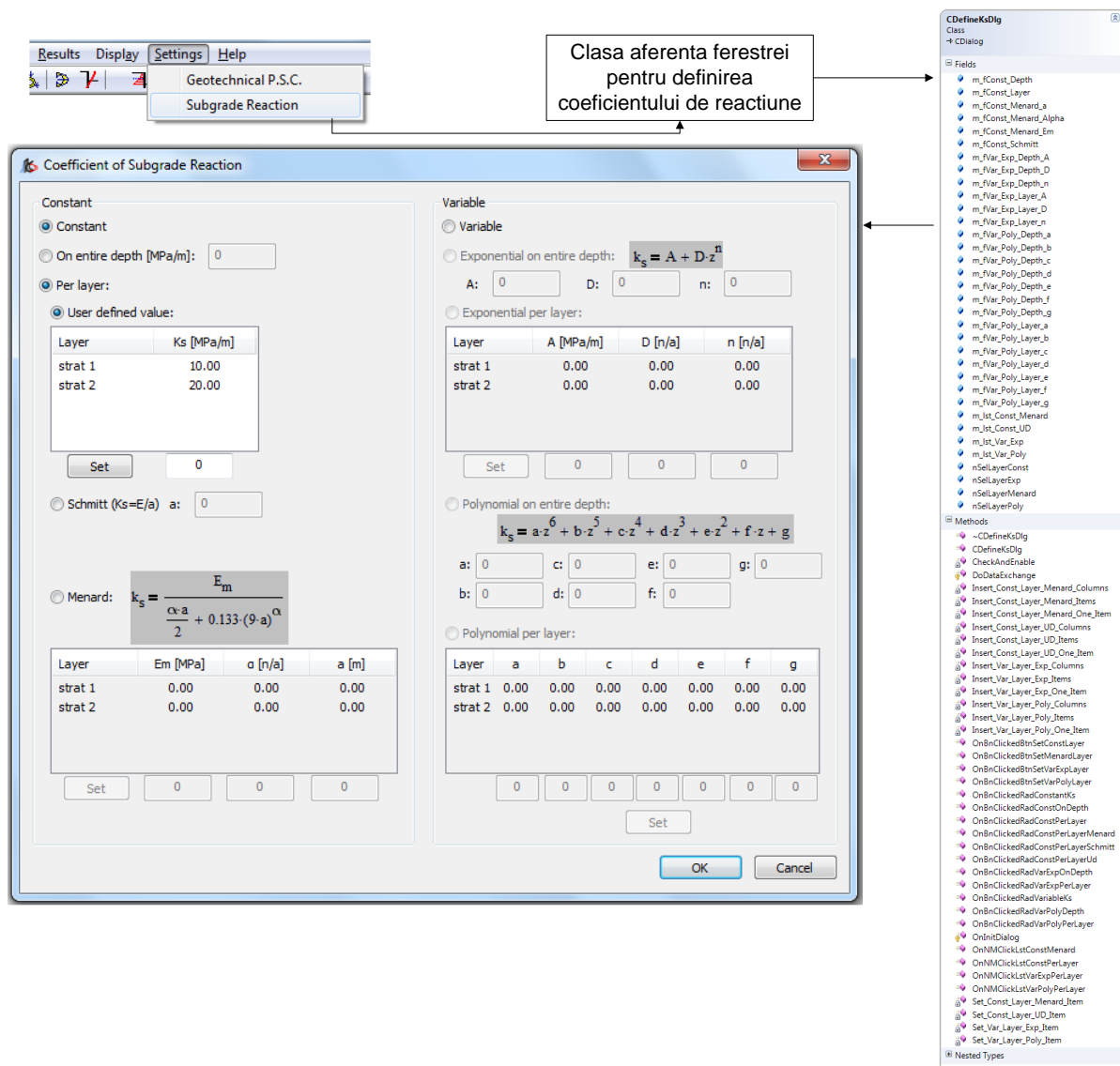


Fig. 5.4: Interfața pentru definirea coeficientului de reacțiune

Pentru calculul eforturilor conform Eurocode 7, s-a considerat necesară crearea posibilității introducerii de coeficienți parțiali de siguranță. Astfel, a fost concepută fereastra din Fig. 5.4, care permite atribuirea coeficienților de multiplicare pentru acțiuni generate de:

- prezența apei: s-a considerat importantă tratarea separată a împingerii date de prezența apei, deoarece aceasta poate fi considerată atât variabilă, cât și permanentă, în funcție de cazul analizat;
- împingerea pământului: coeficientul acestei acțiuni nu se aplică împingerii datorate suprasarcinii și apei, deoarece acestea pot fi considerate variabile;
- suprasarcina: în general, aceasta poate fi considerată ca fiind o acțiune variabilă, având propriul ei coeficient parțial de siguranță;

Pentru parametrii de material, s-au creat trei coeficienți parțiali, și anume:

- pentru unghiul de frecare internă (coeficient aplicat tangentei unghiului);

- pentru coeziune;
- pentru greutatea volumică.

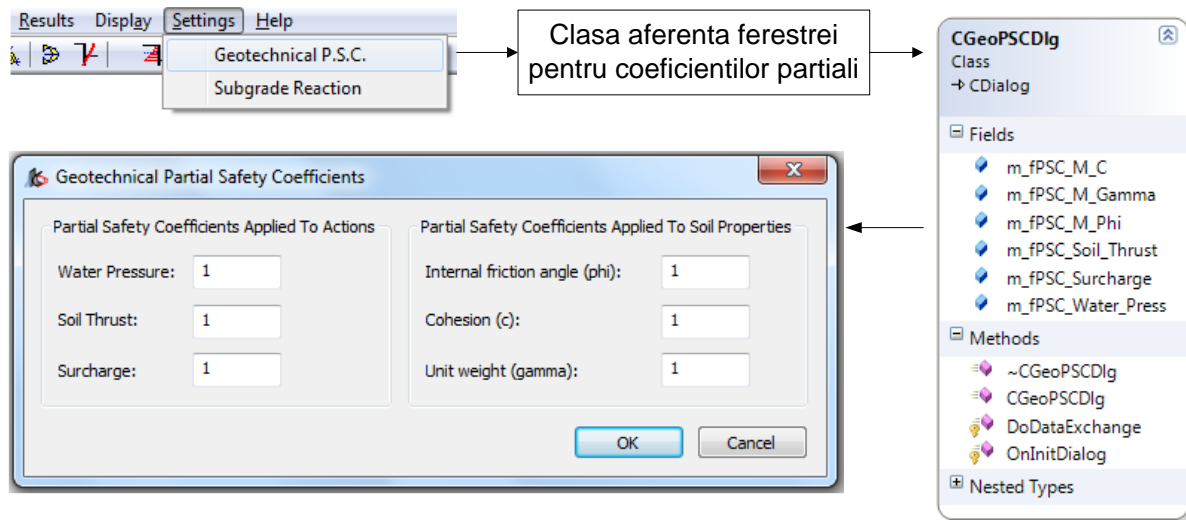


Fig. 5.5: Interfața pentru definirea coeficienților parțiali de siguranță

În fine, după ce toate caracteristicile geometrice și geotehnice de proiectare au fost definite, se poate trece la calculul eforturilor și deformațiilor din structura de sprijin. Din meniul *Results* → *Trench* (sau din butonul disponibil pe bara de unelte) se poate apela fereastra de calcul a palplanșei, utilizatorului rămânându-i doar să definească modulul de elasticitate și momentul de inerție ale structurii (Fig. 5.6).

În cadrul aceleași ferestre se pot obține și eforturile și deformațiile asociate palplanșei, parte detaliată în cap. 5.2.3, referitor la modul de redare a rezultatelor.

Tot aici se oferă posibilitatea verificării condițiilor de încastrare, pentru obținerea adâncimii necesare a structurii, de asemenea detaliată în cap. 5.2.3.

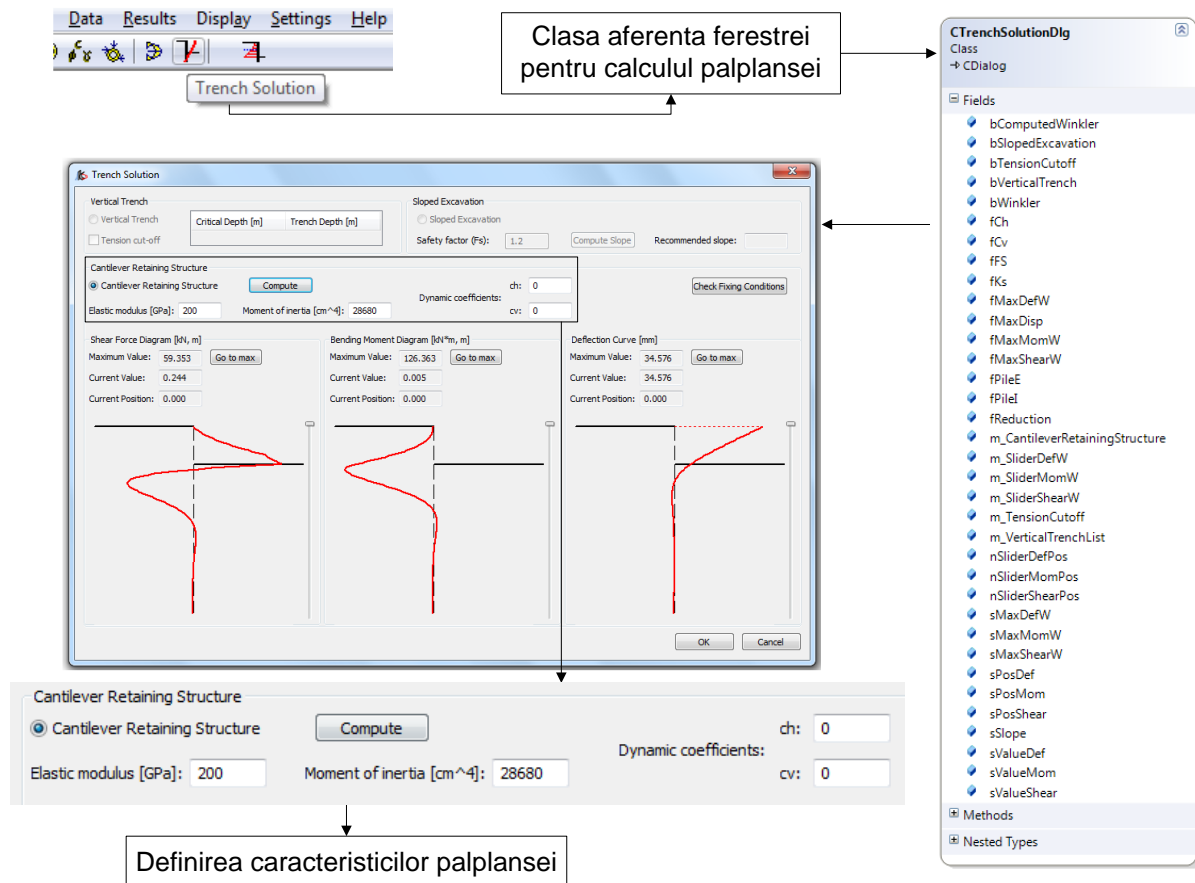


Fig. 5.6: Interfața pentru definirea caracteristicilor palpansei

5.2.2 Solverul

Solverul, probabil cea mai importantă componentă a unui program de calcul ingineresc, este apelat adesea în cadrul programului *PipeDoctor*, fiind în continuă legătură cu preprocesorul. În cadrul modulului de calcul al structurii de sprijin, solverul este apelat automat pentru determinarea eforturilor verticale și orizontale din pământ, la interfața cu structura de sprijin. Acest lucru permite utilizatorului să observe neregularități în introducerea datelor geotehnice, a priori determinării eforturile din structură.

Pe scurt, rolul solverului este acela de a efectua toate calculele necesare prelucrării datelor de intrare și redării datelor de ieșire. Pentru aceasta, la implementarea solverului s-a apelat la o serie de metode numerice de calcul.

Pentru determinarea eforturilor din pământ, la contactul cu structura de sprijin, până la nivelul excavației, s-au utilizat calcule aritmetice simple, bazate pe teoria împingerii active, considerând că aceasta se mobilizează în întregime, obținând astfel funcția de variație a încărcării pe elementul de susținere.

Odată obținută funcția încărcării, s-a utilizat un model derivat din teoria elasticității (cap. 2.1) pentru determinarea variației eforturilor dezvoltate în structură până la cota excavației. Forța tăietoare și momentul încovoietor obținute la bază au fost considerate încărcările pentru modelul Winkler (cap. 2.2), obținând astfel diagrama de variație a eforturilor pe zona inferioară excavației.

Pentru calculul deformației s-a utilizat diagrama determinată din modelul Winkler pentru determinarea constantelor de integrare necesare determinării deformațiilor pe zona superioară excavăției.

În final, îmbinând diagramele de eforturi și deformații din ambele zone de calcul, s-au obținut diagramele pentru întreaga structură.

Pentru determinarea acestor diagrame, proces ce necesită calcul de integrale, a fost necesară definirea unui algoritm propriu de calcul numeric pentru integrale definite. Astfel, a fost creată o clasă special destinată unui asemenea tip de calcul (Fig. 5.7), care preia funcția în cauză, o împarte într-un număr de n intervale între capetele de integrare – unde n poate fi mărit pentru îmbunătățirea preciziei, sau micșorat pentru creșterea rapidității calculului – determină valorile funcției în capetele intervalelor și calculează apoi aria trapezelor astfel formate de fiecare interval în parte cu axa absciselor. Rezultatul final al integrării îl reprezintă suma ariilor trapezelor descrise anterior.

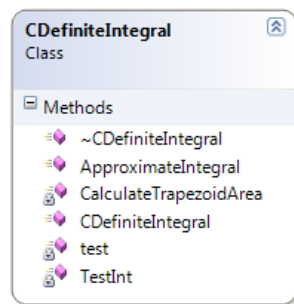


Fig. 5.7: Clasa responsabilă de calculul integralelor definite

5.2.3 Postprocesorul

Postprocesorul este partea programului responsabilă cu redarea rezultatelor. În cazul de față, programul oferă rezultate privind eforturile din pământ (până la baza excavăției), eforturile din palplanșă și deformațiile acestora și oferă, de asemenea, o interfață ce permite obținerea unei lungimi recomandate de încăstrare pentru structura de sprijin.

În cazul eforturilor din pământ, utilizatorul poate obține rezultatele într-un format foarte intuitiv, adesea utilizat de inginerii din domeniu. Astfel, din meniul *Display* → *Pressure Diagrams* (sau butonul aferent din bara de unelte) se pot afișa pe ecran diagramele de eforturi verticale, respectiv orizontale, calculate atât în eforturi totale, cât și efective (Fig. 5.8 și Fig. 5.9).

Pe diagrame se evidențiază clar eventuala prezență a suprasarcinilor sau a apei subterane și se redau și valori relevante ale eforturilor, la limitele dintre straturi și la baza excavăției. De asemenea, este redată și stratificația terenului, așa cum a fost ea definită de utilizator din fereastra asociată acestei operațiuni, fiecare strat fiind identificat după numele care i-a fost acordat.

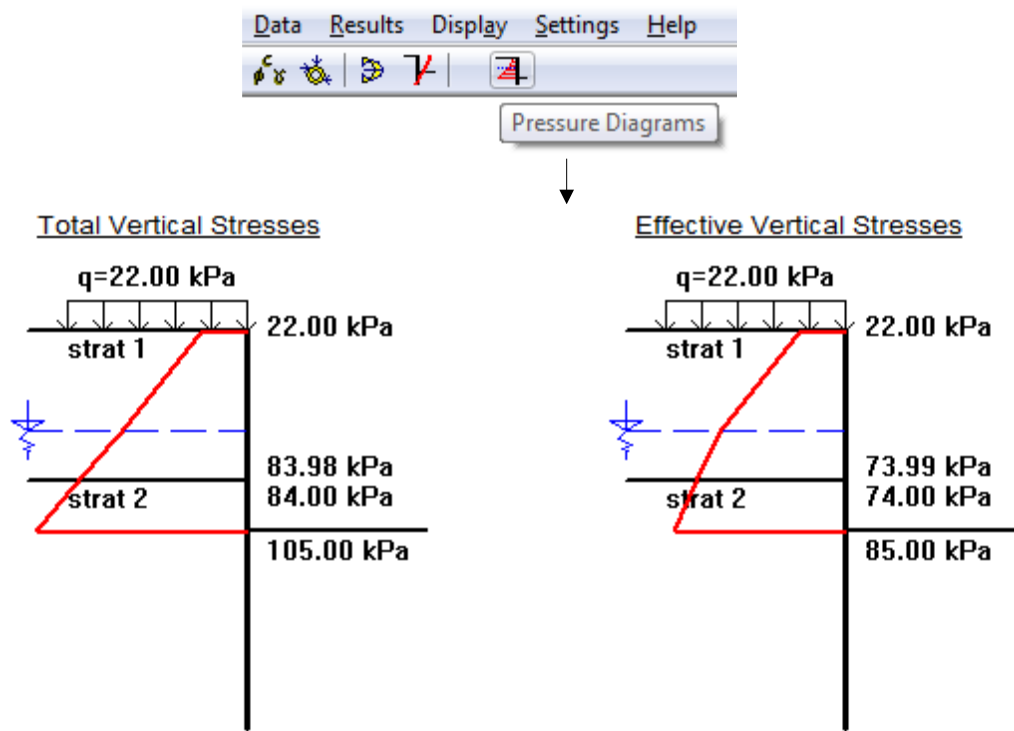


Fig. 5.8: Diagramele de eforturi verticale

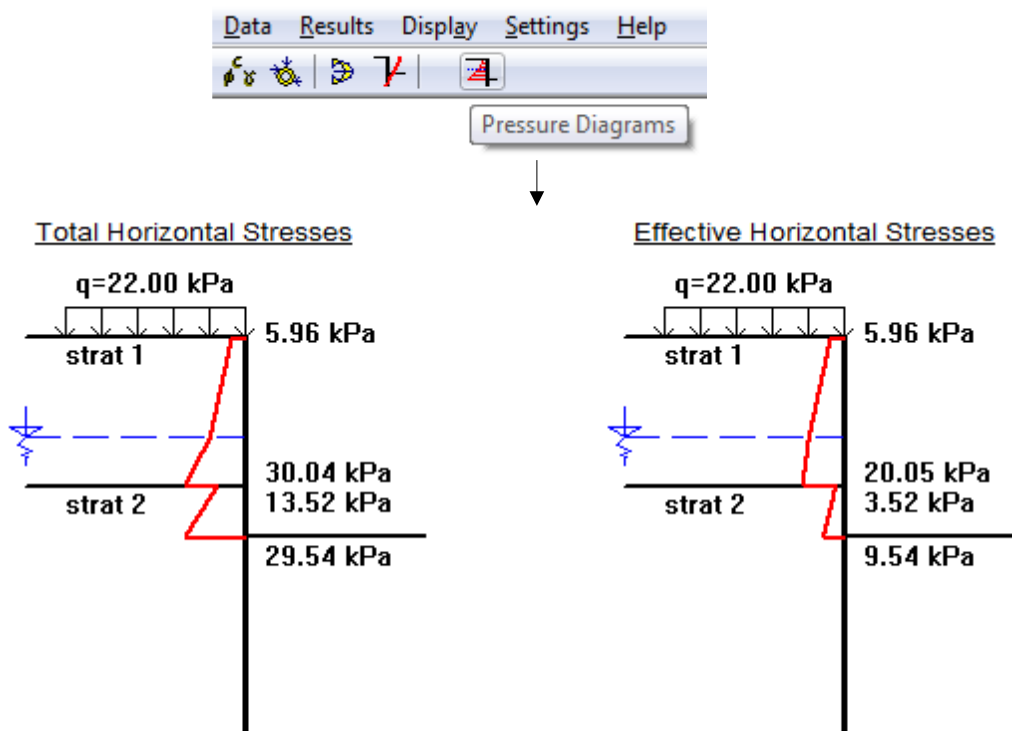


Fig. 5.9: Diagramele de eforturi orizontale

Pentru redarea informațiilor obținute din calculul eforturilor și deformațiilor aferente structurii de sprijin a fost creată o clasă derivată din clasa *CStatic* (aparținând librăriei *MFC*), care să preia informațiile oferite de solver și să le redea grafic sub formă de diagrame – *CTrenchDiagramCtrl*.

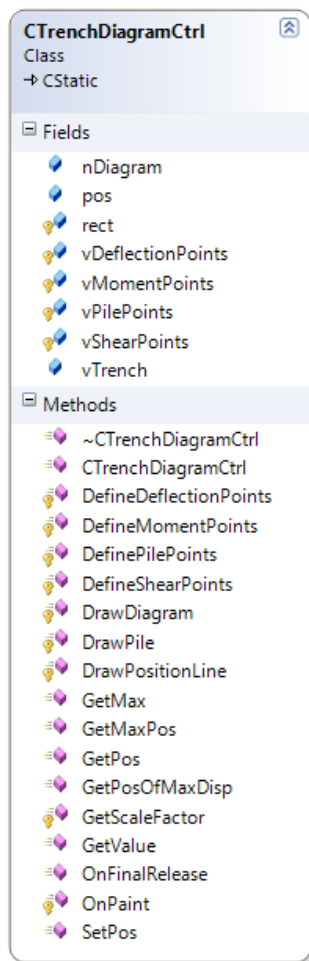
Atribuțiile clasei *CTrenchDiagramCtrl*:

Fig. 5.10: Clasa responsabilă de crearea diagramelor

- Creează linia verticală ce reprezintă structura de sprijin și liniile reprezentând cota terenului natural și cota excavației, prin funcția *DrawPile*;
 - Creează linia ce indică poziția curentă pe secțiune. Cu ajutorul acesteia, utilizatorul știe în orice moment cărui punct de pe secțiune îi corespunde valoarea indicată a efortului;
 - Preia valorile calculate de solver ale eforturilor și deformațiilor și populează vectorul de puncte asociat acestora;
 - Redă numeric atât poziția curentă cât și valoarea curentă a efortului, în două câmpuri special create: *Current value*, respectiv *Current position*;
 - Calculează factorul de scară astfel încât valorile extreme ale eforturilor să nu depășească zona dedicată afișării diagramelor;
 - Afișează diagramele redând printr-o polilinie punctele din vectorul cu rezultate;
 - Obține valorile extreme ale eforturilor și le afișează în câmpurile *Minimum Value*, *Maximum Value*;
- Oferă posibilitatea de a naviga către punctele corespunzătoare valorilor extreme cu ajutorul butoanelor *Go to min*, respectiv *Go to max*, actualizând în același timp atât câmpurile ce indică poziția și valorile curente, cât și poziția liniei indicator.

Apelând meniul *Results*→*Trench* (sau din butonul disponibil pe bara de unelte) se deschide fereastra de calcul a palplanșei. În Fig. 5.11 este o descriere grafică a evenimentelor desfășurate în procesul de creare a diagramelor. Pentru realizarea calculului este necesar să se introducă informații despre caracteristicile palplanșei, proces descris în cap. 5.2.1.

Aționând butonul *Compute*, se apelează solverul din clasa *CTrenchSolutionDlg* care calculează valorile diagramelor în 200 de puncte distincte și le transmite clasei de creare a diagramelor *CTrenchDiagramCtrl*, descrisă anterior. În cazul în care solverul găsește valori nule ale coeficientului de pat, utilizatorul va fi avertizat, iar procesul de calcul va fi întrerupt, însă dacă acesta se încheie cu succes, se va afișa o înștiințare de confirmare a terminării calculului, actualizându-se apoi diagramele.

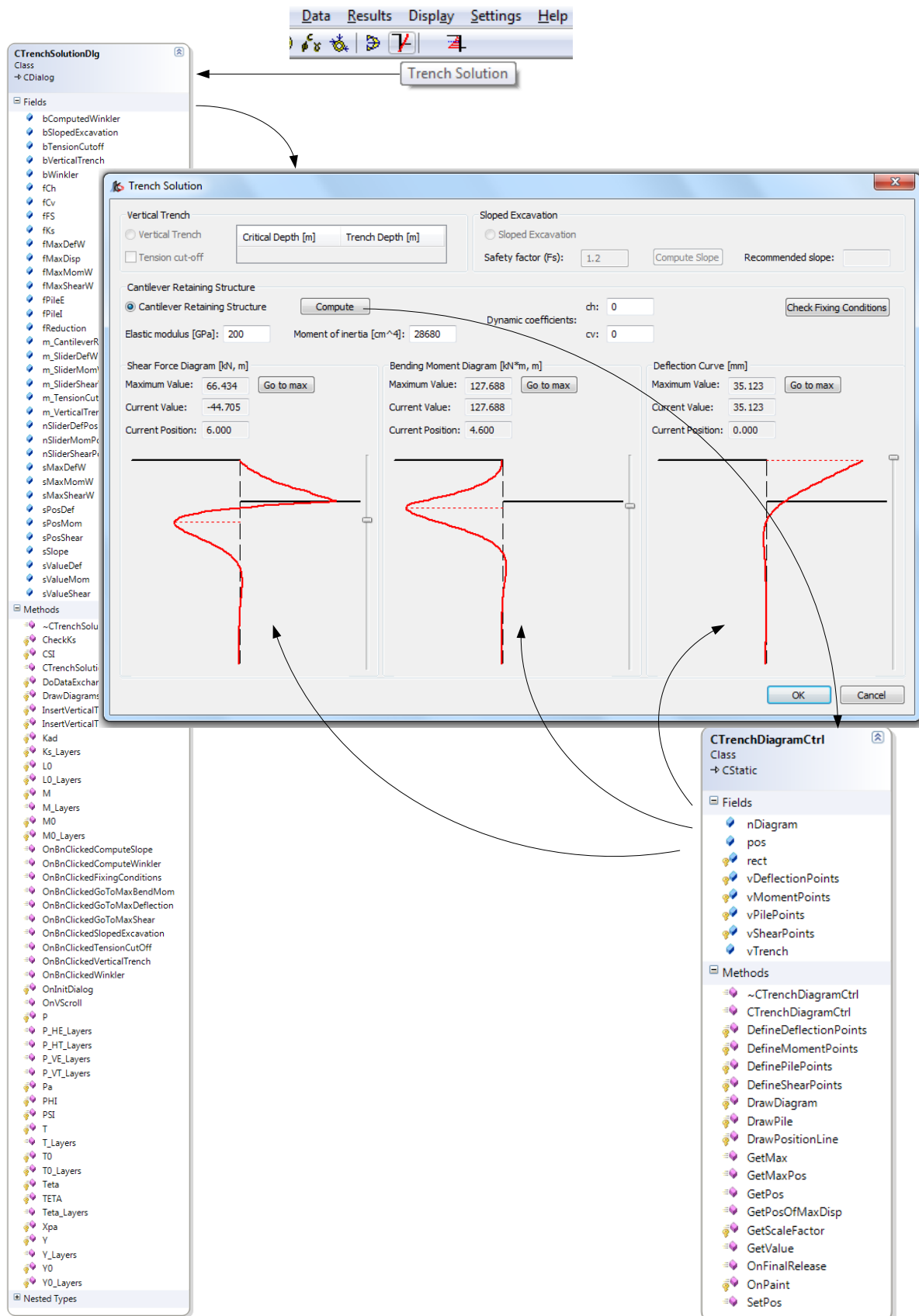


Fig. 5.11: Schema proceselor desfășurate de către postprocesor

După finalizarea calculului, utilizatorul poate naviga pe diagramele obținute prin simpla acționare a unor controale de tip *sliding control*, cu care operatorii obișnuiți cu sistemul de operare *Windows* sunt familiarizați. Totodată, devine accesibil butonul *Check Fixing Conditions*, care, prin apelare, deschide fereastra pentru determinarea lungimii de încastrare a structurii de sprijin (Fig. 5.12).

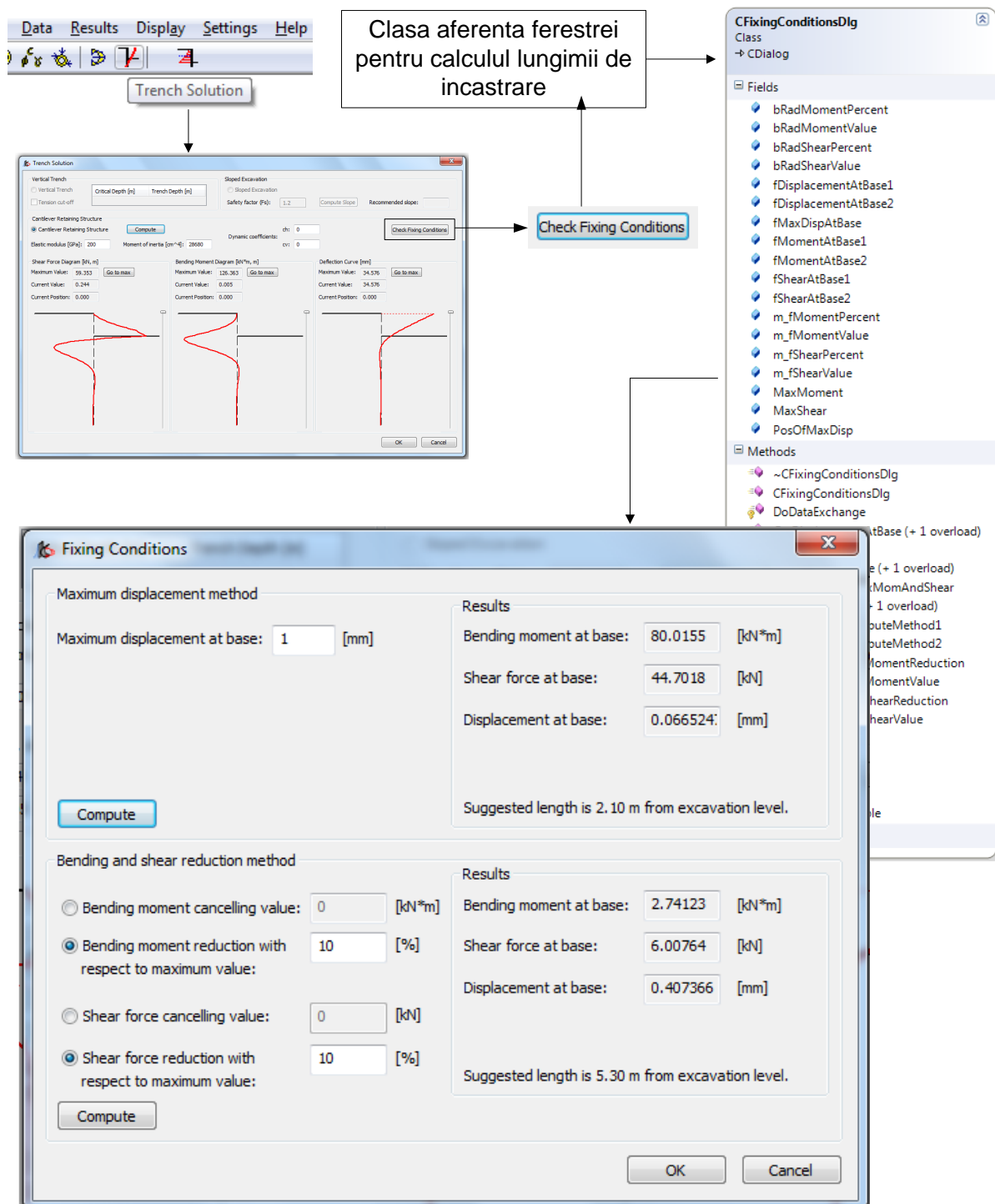


Fig. 5.12: Interfața pentru determinarea lungimii de încastrare

În cadrul acestei ferestre se poate obține o valoare recomandată a lungimii de încastrare prin două metode:

- limitarea deformațiilor:
 - prin această metodă, se impune o valoare maximă admisibilă a deformației, iar programul sugerează ca lungime de încastrare adâncimea la care deformația este nulă, și nici o altă deformație sub această cotă nu depășește nivelul impus;

- limitarea eforturilor:
 - în acest caz, se pot impune valori maxime ale eforturilor, iar programul caută adâncimea sub care aceste valori nu sunt depășite;

 - valorile maxime ale eforturilor pot fi impuse în două moduri:
 - prin valori numerice, introducând valorile efective ale eforturilor pe care utilizatorul dorește să le obțină la bază;

 - prin valori procentuale, introducând procente ce se vor utiliza pentru calculul valorilor eforturilor de la bază, ca fiind o fracție din valorile maxime ale eforturilor dezvoltate în palplanșă.

Odată introduse datele de intrare, acționând butonul *Compute* aferent modului dorit de introducere a datelor, programul afișează atât lungimea de încastrare necesară obținută din calcul, cât și valorile eforturilor și deformațiilor de la acea adâncime.

5.3 Modulul pentru calculul conductei

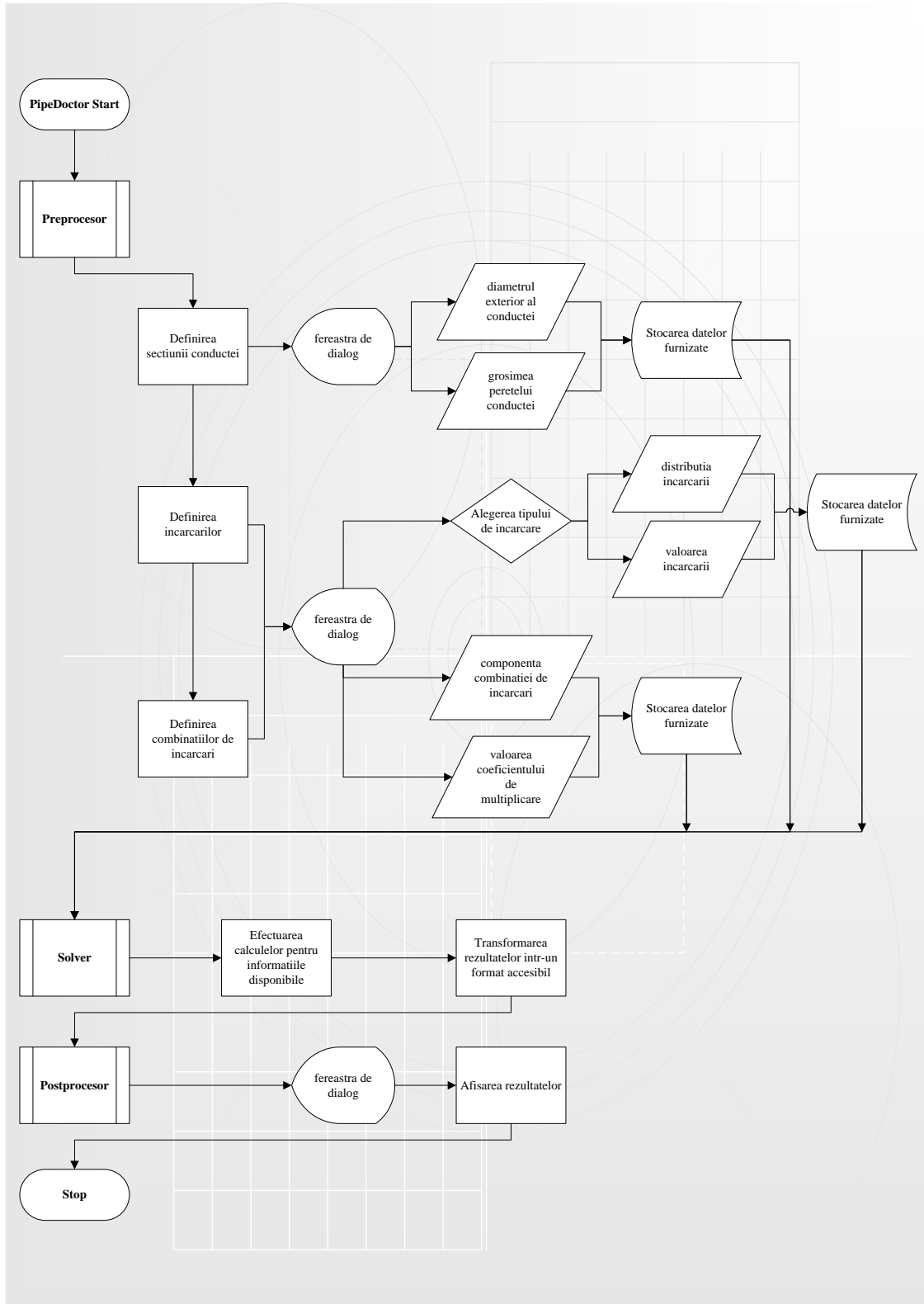


Fig. 5.13: Schema logică a modului pentru calculul conductei

5.3.1 Preprocesorul

Pentru crearea interfeței respective s-a recurs la crearea de clase pentru fiecare fereastră de dialog, dar și pentru fiecare tip de încărcare în parte (Fig. 5.14).

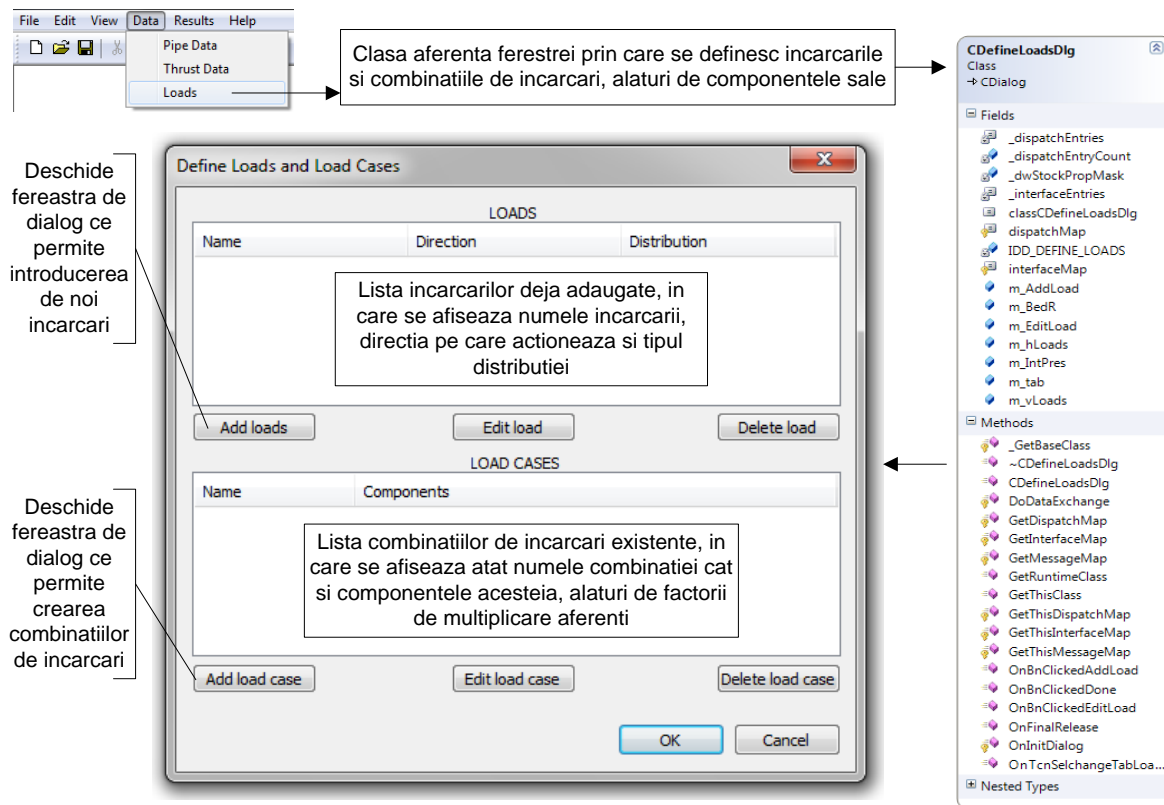


Fig. 5.14: Interfața pentru crearea încărcărilor și a combinațiilor de încărcări

Definirea încărcărilor se face alegând mai întâi direcția după care acestea acționează, tipul de distribuție aferentă, atribuindu-i un nume, și definind apoi datele numerice necesare pentru o descriere completă (e.g. mărimea încărcării, unghiul aferent acesteia, etc).

În exemplul din Fig. 5.15 se prezintă pașii pe care preprocesorul îi execută în cazul în care utilizatorul dorește definirea unei încărcări din greutate proprie, atribuind o greutate volumică de 25 kN/m^3 și o grosime a peretelui conductei de 15 cm. În momentul în care se face click pe *Add loads* din fereastra *Define Loads and Load Cases*, programul apelează clasa *CDefineLoadsDlg* răspunzătoare de crearea dialogului *Define L-s*. Implicit, acesta se deschide pe opțiunea *Vertical Load*, a cărei interfață este redată cu ajutorul clasei *CVerticalLoadsDlg*, în timp ce cadrul introducerii datelor aferente încărcării este creat de clasa *CSelfWeightDlg*. Aceasta crează câmpurile pentru definirea numelui încărcării, cel pentru atribuirea greutății volumice, și cel pentru eventuala modificare a grosimii peretelui conductei, valoare care este preluată din datele obținute din interfața de definire a secțiunii.

După apăsarea butonului *Add Load*, preprocesorul extrage datele introduse de utilizator și le stochează într-un vector derivat din structura *Loads*, prin intermediul claselor *CSelfWeight* și *CVerticalLoad*, responsabile de gestionarea încărcărilor din greutate proprie, derivate din categoria încărcărilor verticale. Încărcării i se atribuie exact parametrii specifici acesteia - *id*, *name*, *type*, *subtype*, *thick* și *gamma* - ceilalți parametri fiind irelevanți pentru acest tip de încărcare.

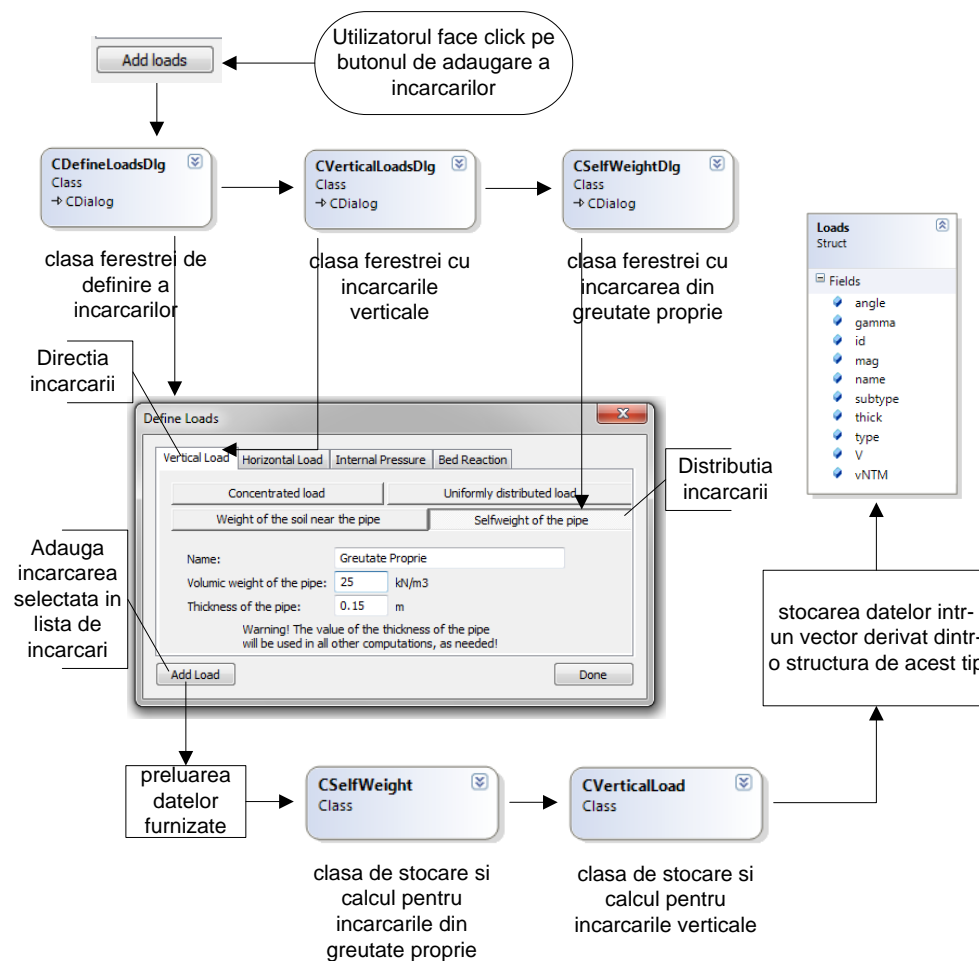


Fig. 5.15: Lanțul evenimentelor în procesul de definire al unei încărcări

Totodată, pentru o rapidă obținere a rezultatelor, programul apelează și solverul (detalii în cap. 5.3.2), ce populează vectorul $vNTM$, aparținând aceleiași structuri *Loads*, care este responsabil cu stocarea valorilor forțelor axiale și tăietoare, respectiv ale momentelor, în puncte predefinite de pe conturul secțiunii conductei.

După încheierea procesului de definire a încărcărilor, următorul pas firesc este cel de combinare a acestora în grupări de încărcări. Interfața de definire a combinațiilor de încărcări este de asemenea disponibilă din fereastra *Define Loads and Load Cases* și se apelează accesând butonul *Add load case*, ceea ce determină clasa *CDefineCombosDlg* să creeze fereastra de dialog *Define Load Combinations* (Fig. 5.16). În cadrul acesteia, utilizatorul poate atașa o denumire noii combinații de încărcări și poate selecta elementele acesteia, alături de coeficienții de calcul. Procesul este unul dinamic și intuitiv, preprocesorul făcând apel la informațiile obținute în pasul anterior, cel de definire a încărcărilor, și totodată făcând legătura cu pasul următor, cel de furnizare de informații către solver, calculând componentele vectorului $vResult$ (derivat din structura *NTM*) în momentul apelării butonului *OK*. Astfel, rezultatele sunt disponibile imediat după crearea combinației de încărcări și stocate într-un vector de tipul structurii *LoadCases*, care conține informații despre numele grupării de încărcări (*name*), reacțiunile din bază create de încărcările verticale (*V*) și componentele grupării ($vLoadC$ fiind un vector ce stochează valorile de calcul ale fiecărei încărcări).

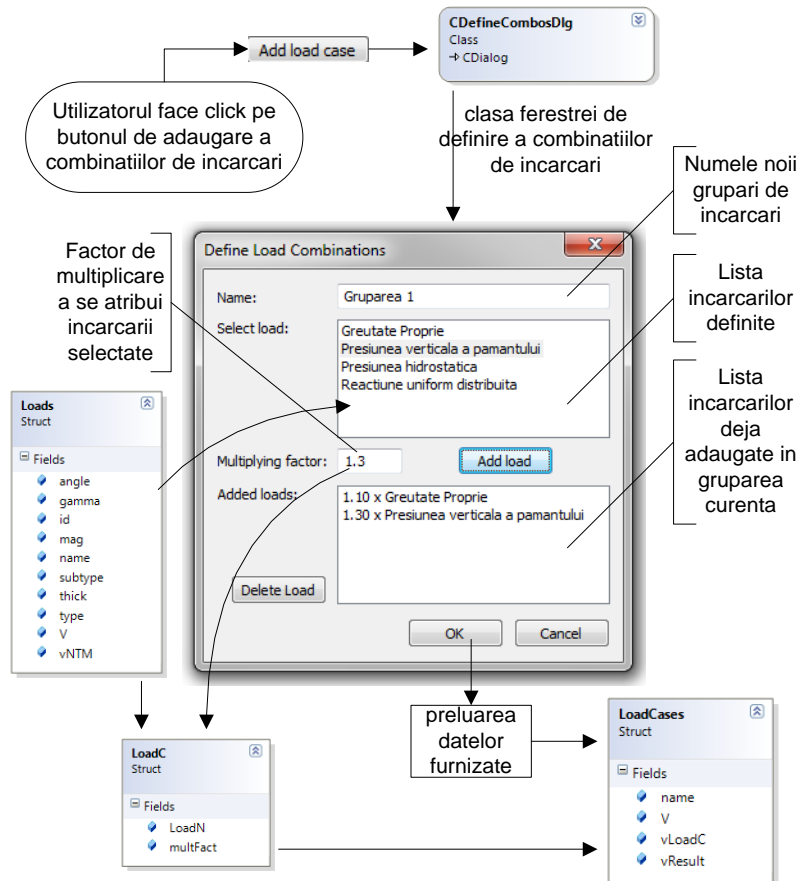


Fig. 5.16: Definirea combinațiilor de încărcări

O altă componentă a preprocesorului este aceea ce permite definirea secțiunii conductei și a adâncimii de fundare a acesteia, valoare ce este asociată adâncimii excavației, necesară modulului pentru calculul structurii de sprijin (Fig. 5.17).

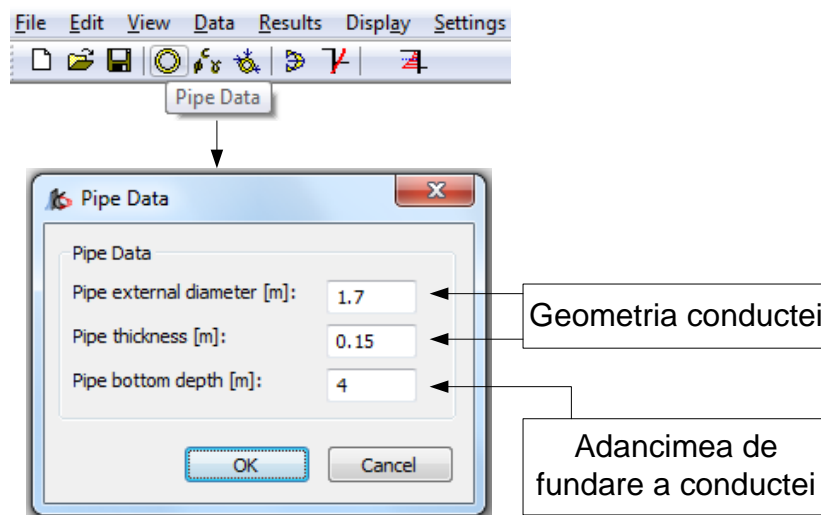


Fig. 5.17: Definirea caracteristicilor conductei și a adâncimii de fundare

5.3.2 Solverul

În cadrul acestui modul, solverul este o componentă dinamică, care preia datele de la preprocesor de fiecare dată când utilizatorul le introduce, le analizează validitatea și efectuează calculele necesare pentru actualizarea vectorului responsabil cu stocarea rezultatelor.

Calcululele sunt realizate analitic, implementând funcții de determinare a eforturilor create de fiecare tip de încărcare în parte și aplicând principiul suprapunerii efectelor pentru obținerea rezultatelor finale.

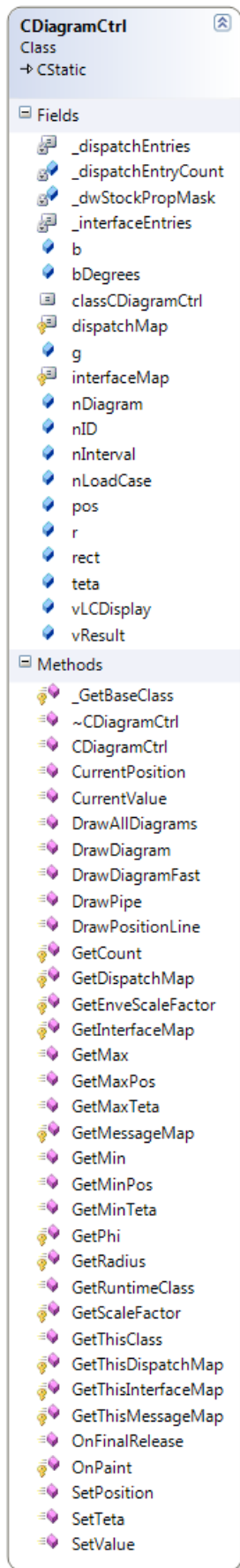
5.3.3 Postprocesorul

Pentru a crea un program cât mai interactiv și ușor de utilizat, am decis că este nevoie de o modalitate de prezentare a rezultatelor cât mai flexibilă cu putință. Multe programe de modelare oferă posibilitatea extragerii datelor sub formă de tabele, conținând în general valori limită ale eforturilor interesate. Cu toate că pentru un bun inginer acest tip de expunere a rezultatelor poate fi suficient pentru a intercepta eventualele erori sau condiții nefavorabile, am hotărât că acest lucru poate fi mai ușor întâmpinat dacă se oferă posibilitatea obținerii informației în orice punct de pe conturul secțiunii conductei.

Drept urmare, a fost creată o clasă derivată din clasa *CStatic* (aparținând librăriei *MFC*), care să preia informațiile oferite de solver și să le redea grafic sub formă de diagrame pe conturul secțiunii conductei – *CDiagramCtrl*.

Atribuțiile clasei *CDiagramCtrl*:

- Creează conturul secțiunii conductei, folosind funcția proprie *DrawPipe*, obținând coordonatele a 200 de puncte distincte ce împreună formează un cerc;
- Creează linia ce indică poziția curentă pe secțiune, unind centrul cercului cu punctul de pe cerc corespunzător unghiului la centru. Cu ajutorul acesteia, utilizatorul știe în orice moment cărui punct de pe secțiune îi corespunde valoarea indicată a efortului;
- Redă numeric atât poziția curentă (în grade sau metri) cât și valoarea curentă a efortului, în două câmpuri special create: *Current value*, respectiv *Current position*;
- Calculează pozițiile punctelor de pe diagramă, adaptându-le coordonatele x și y în așa fel încât o diagramă de valoare nulă să se suprapună peste conturul secțiunii;
- Calculează factorul de scară astfel încât valorile extreme ale eforturilor să nu depășească zona dedicată afișării diagramelor;



- Aplică factorul de scară coordonatelor punctelor de pe diagramă și redă grafic rezultatul obținut;

- Obține valorile extreme ale eforturilor și le afișează în câmpurile *Minimum Value*, *Maximum Value*;

- Oferă posibilitatea de a naviga pe diagramă la o poziție dorită (exprimată în grade sau metri), accesând butonul *Go to pos*, direcționând linia indicator către poziția dorită și în același timp actualizând valorile afișate în câmpurile *Current value* și *Current position*;

- Oferă posibilitatea de a naviga pe diagramă către o valoare dorită cu ajutorul opțiunii *Go to value*, căutând valoarea de pe diagramă cea mai apropiată de valoarea dorită și poziționând linia indicator către acea valoare, actualizând totodată valorile câmpurilor *Current value* și *Current position*;

- Oferă posibilitatea de a naviga către punctele corespunzătoare valorilor extreme cu ajutorul butoanelor *Go to min*, respectiv *Go to max*, actualizând în același timp atât câmpurile ce indică poziția și valorile curente, cât și poziția liniei indicator.

Fig. 5.18: Clasa responsabilă de crearea diagramelor

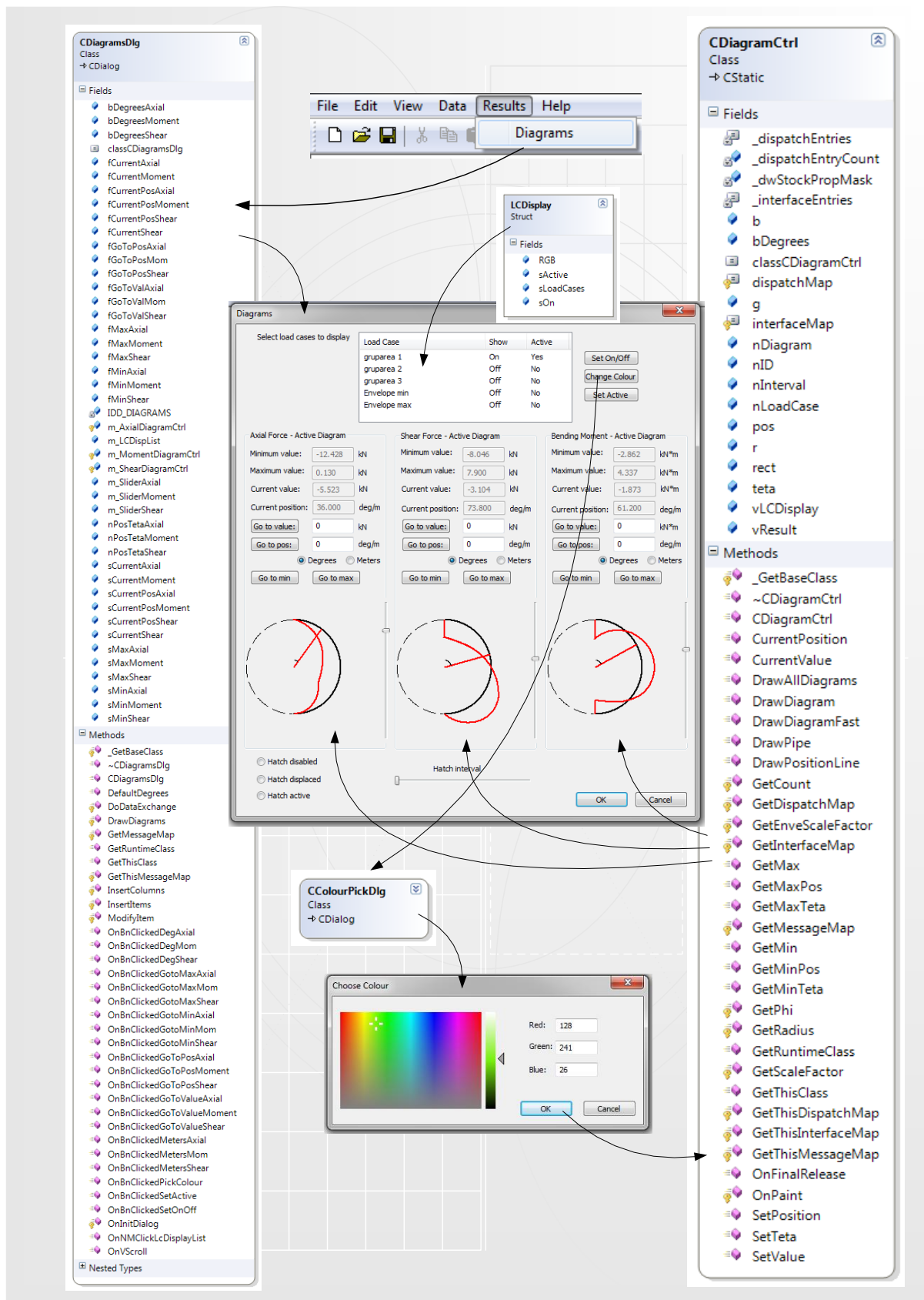


Fig. 5.19: Schema proceselor desfășurate de către postprocesor

În Fig. 5.19 este prezentată o schemă succintă ce descrie procesele care au loc în momentul în care utilizatorul dorește să obțină diagramele de eforturi pentru grupările de încărcări definite.

Când se face *click* pe meniul *Results – Diagrams*, programul apelează clasa *CDiagramsDlg*, care înglobează toate elementele ferestrei de dialog în care se afișează diagramele, și gestionează evenimentele care au loc în acea fereastră (e.g. evenimentele generate de *mouse-click*).

În partea de sus a ferestrei este afișată lista combinațiilor de încărcări, alături de două combinații generate automat (în cazul în care lista are mai mult de un element), în care se stochează valorile maxime, respectiv minime, corespunzătoare fiecărui punct de pe diagramă, din toate grupările existente (*Envelope min*, respectiv *Envelope max*).

Fiecăreia din grupările prezentate în listă i se alătură două atribute: *Show* și *Active*.

Atributul *Show* poate lua valorile *On* sau *Off* și indică faptul că diagramele asociate grupărilor respective sunt afișate sau nu.

Atributul *Active* poate lua valorile *Yes* sau *No* și arată cărei grupări de încărcări îi sunt asociate valorile afișate în câmpurile numerice. În cazul în care o grupare devine setată pe *Active – Yes*, aceasta va lua automat valoarea *Show – On* (în cazul în care aceasta este *Off*) și diagrama-i corespunzătoare devine afișată cu linie îngroșată, pentru ca utilizatorul să știe care din diagrame este cea activă.

Pentru o mai ușoară comparare a diagramelor, a fost implementată clasa de atribuire a culorii acestora – *CcolourPickDlg*. În mod implicit, programul fixează prima încărcare din listă pe *Show – On* și *Active – Yes* și îi atribuie culoarea roșie. Celelalte încărcări au atribuită culoarea neagră, dar aceasta se poate schimba folosind opțiunea *Change Colour*, din stânga listei, care apelează clasa menționată.

6 CALIBRAREA SOLVERULUI

În scopul validării rezultatelor obținute folosind solverul propriu, bazat pe metode numerice de calcul, a fost necesară calibrarea acestuia, proces ce a presupus rularea unor modele în diferite programe de calcul, eventual bazate pe diferite metode de lucru, și compararea rezultatelor.

6.1 Modulul pentru calculul structurii de sprijin

6.1.1 Calibrare folosind metoda analitică prelucrată cu programul MathCAD

Pentru simplificarea calculului analitic din programul *MathCAD*, am decis realizarea unui model monostratificat din pământ necoeziv, cu apă subterană.

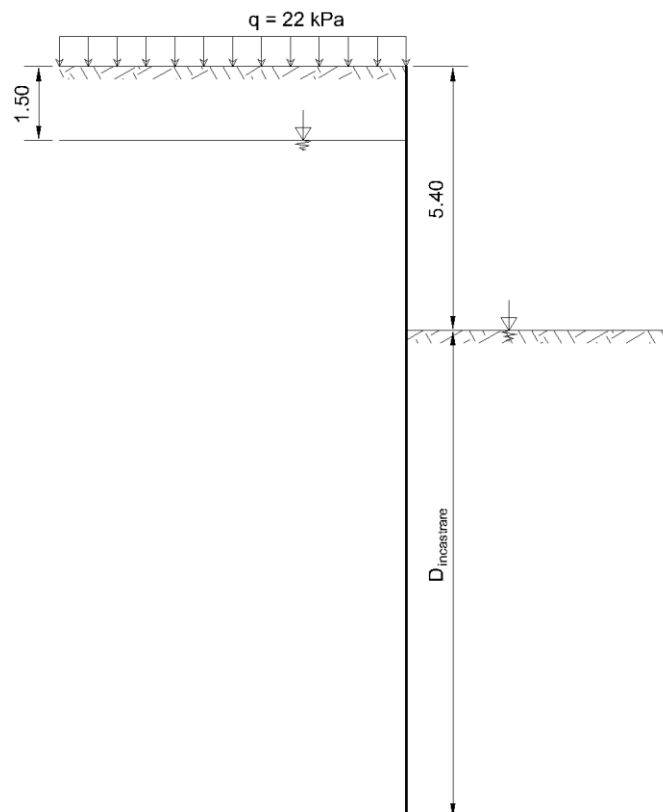


Fig. 6.1: Secțiune perete de susținere

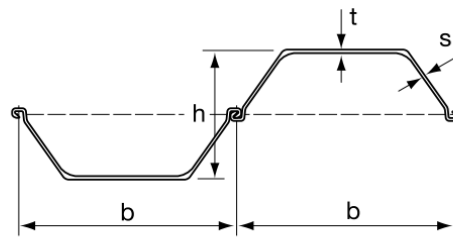
Terenul este alcătuit dintr-un masiv omogen de nisip cu pietriș aflat în stare medie de îndesare. Valorile caracteristice ale parametrilor geotehnici sunt:

- greutatea volumică în stare naturală: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$;
- unghi de frecare interioară: $\phi' = 35^\circ$;
- coeziune: $c' = 0 \text{ kPa}$.

Sub nivelul apei subterane nisipul se consideră în stare submersată ($\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$).

În lateral față de excavație s-a considerat aplicată la suprafața terenului o suprasarcină uniform distribuită, $q = 22 \text{ kPa}$.

Structura de sprijin utilizată în model este o palplanșă conform celei descrise în Fig. 5.18 Fig. 6.2.



SECTION	Width (b) in (mm)	Height (h) in (mm)	THICKNESS		Cross Sectional Area in ² /ft (cm ² /m)	WEIGHT		Section Modulus in ³ /ft (cm ³ /m)	Moment of Inertia in ⁴ /ft (cm ⁴ /m)
			Flange (s) in (mm)	Wall (t) in (mm)		Pile lb/ft (kg/m)	Wall lb/ft ² (kg/m ²)		
AU 14	29.53 750	16.06 408	0.394 10.0	0.327 8.3	6.23 132	52.35 77.9	21.30 104	26.13 1405	209.36 28680

Fig. 6.2: Palplanșă utilizată în model

Pentru modelul de față s-a utilizat prima ipoteză de combinare a coeficienților parțiali de siguranță, conform Eurocode 7, A1+M1+R1 (Tab. 6.1), unde:

A1 → coeficienți pentru acțiuni;

M1 → coeficienți pentru parametri de material (parametri geotehnici);

R1 → coeficienți pentru rezistențe (irelevanți în cazul de față)

Tab. 6.1: Tabel cu coeficienții parțiali de siguranță, conform Eurocode 7

Acțiune		Simbol	Set	
			A1	A2
Permanentă	Defavorabilă	γ_G	1.35	1
	Favorabilă		1	1
Variabilă	Defavorabilă	γ_Q	1.5	1.3
	Favorabilă		0	0
Parametru geotehnic		Simbol	Set	
			M1	M2
Rezistența la forfecare (aplicat la $\tan\phi'$)		γ_ϕ	1	1.25
Greutate volumică		γ_γ	1	1

Datele de intrare in programul MathCAD

Caracteristicile stratului de deasupra nivelului apei subterane:

$$\phi := 35\text{deg} \quad c := 0\text{kPa} \quad \gamma := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$h_1 := 1.5\text{m} \quad h_2 := 3.9\text{m} \quad h := h_1 + h_2 = 5.4\text{m} \quad \text{Suprasarcina: } q := 22\text{kPa}$$

Caracteristicile celui de-al doilea strat:

$$\phi_2 := 35\text{deg} \quad c_2 := 0\text{kPa} \quad \gamma_{\text{sub}} := 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \gamma_2 := \gamma_{\text{sub}} + 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$k := 20000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \rightarrow \text{valoarea de calcul a coeficientului de pat}$$

Caracteristicile palplanseii:

$$d := 1\text{m} \quad E_{\text{palplansa}} := 210\text{GPa} \quad I := 28680\text{cm}^4$$

$$\gamma_{G.A1.def} := 1.35$$

$$\gamma_{G.A1.f} := 1 \quad \gamma_{\phi.M1} := 1$$

$$\text{coeficienti partiali: } \gamma_{Q.A1.def} := 1.5 \quad \gamma_{\gamma.M1} := 1$$

$$\gamma_{Q.A1.f} := 0$$

Datele de intrare in programul PipeDoctor

The screenshot displays the PipeDoctor software interface with several dialog boxes and input fields. Arrows point to specific fields with labels:

- Soil Data dialog:**
 - Ground water table depth [m]: 1.5 (labeled "nivelul apei subterane")
 - Additional surcharge [kPa]: 22 (labeled "suprasarcina")
 - LITHOLOGY table:

Name [n/a]	Top [m]	Bottom [m]	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	ϕ [deg]	c [kPa]	E [MPa]
nisip	0.00	5.40	20.00	12.00	35.00	0.00	40.00
- Pipe Data dialog:**
 - Pipe external diameter [m]: 1.7
 - Pipe thickness [m]: 0.15
 - Pipe bottom depth [m]: 5.4 (labeled "adancimea excavatiei")
- Coefficient of Subgrade Reaction dialog:**
 - Constant: selected
 - On entire depth [MPa/m]: 20 (labeled "coeficientul de pat")
- Geotechnical Partial Safety Coefficients dialog:**
 - Water Pressure: 1
 - Soil Thrust: 1.35
 - Surcharge: 1.5
 - Internal friction angle (phi): 1
 - Cohesion (c): 1
 - Unit weight (gamma): 1

Other visible fields include "Elastic modulus [GPa]: 210" and "Moment of inertia [cm⁴]: 28680".

Fig. 6.3: Datele de intrare

Diagramele de variație ale împingerii active

$$\text{nat}(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq h_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{sat}(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq h_1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{exc}(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x > h \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{\text{incarcare}}(z, \gamma, \phi, \gamma_q, \gamma_g) := \text{exc}(z) \cdot \left[\begin{aligned} & \left(k_a(\gamma, \phi) \cdot q \cdot \gamma_q + \gamma \cdot z \cdot k_a(\gamma, \phi) \cdot \gamma_g \right) \cdot \text{nat}(z) \dots \\ & + \left[k_a(\gamma, \phi) \cdot q \cdot \gamma_q + 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot (z - h_1) + [\gamma \cdot h_1 \cdot k_a(\gamma, \phi) + \gamma_{\text{sub}} \cdot (z - h_1) \cdot k_a(\gamma, \phi)] \cdot \gamma_g \right] \cdot \text{sat}(z) \end{aligned} \right]$$

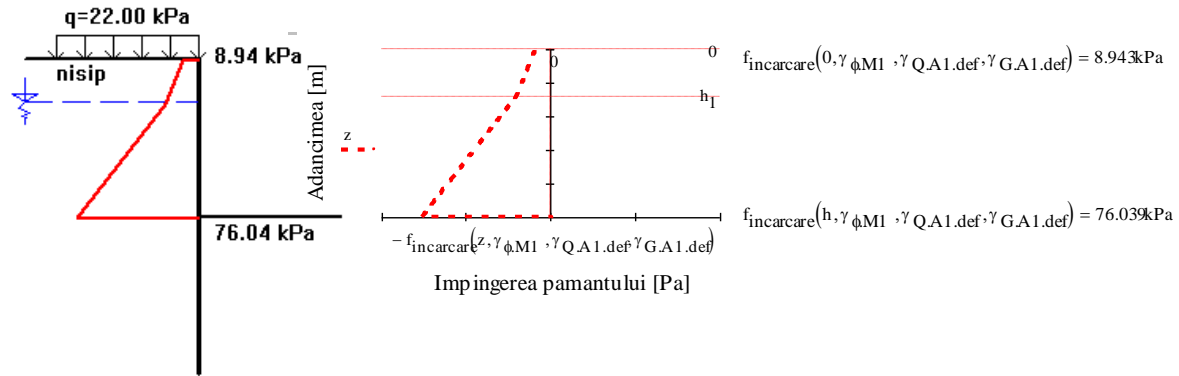
Total Horizontal Stresses

Fig. 6.4: Diagramele de variație ale împingerii active

În continuare vor fi prezentate diagramele de variație ale forțelor tăietoare și ale momentelor încovoietoare, fără diagramele pentru deplasări, acestea fiind dificil de implementat în MathCAD, deoarece necesită integrarea de patru ori a împingerii, operațiune de foarte lungă durată.

Totuși, se pot observa din diagramele obținute că rezultatele sunt practic identice.

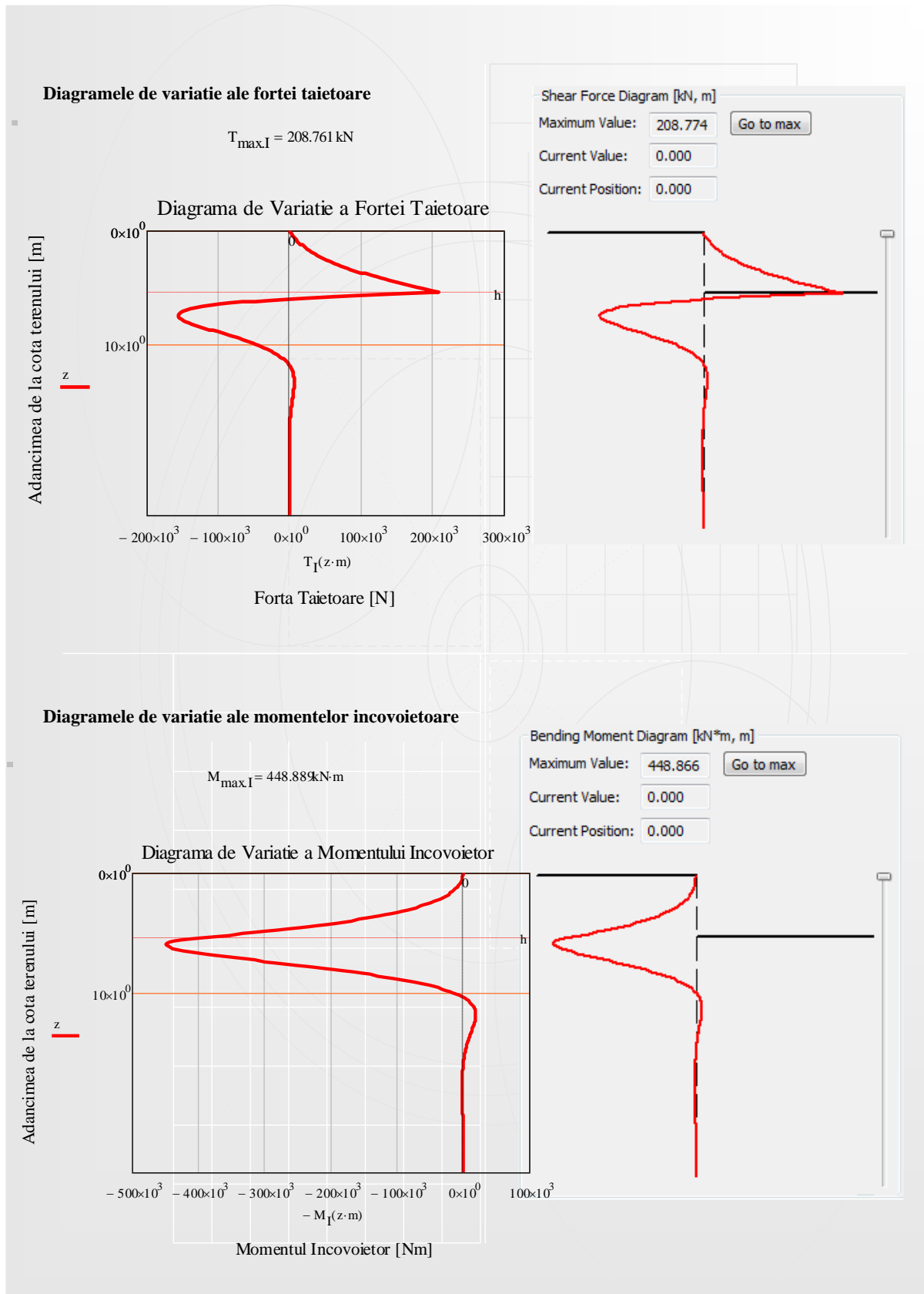


Fig. 6.5: Diagramele de variație ale forțelor tăietoare și ale momentelor încovoietoare

6.1.2 Calibrare folosind programul PyWall

Programul *PyWall* permite calculul structurilor de sprijin folosind metoda coeficientului de reacțiune. Pentru calibrare, s-a utilizat același model ca și cel anterior, cu excepția coeficienților parțiali de siguranță, care au fost considerați unitari în cazul acestei calibrări, fiind dificilă implementarea coeficienților parțiali de siguranță în programul *PyWall*.

Proprietatile pamantului

Soil Layers

Soil	Depth at Bottom of the Layer, (m)	Edit Soil Parameters
1 Sand	20	1: Sand

Add Row Insert Row Delete Row

Sand 1

Total Unit	Friction Angle, deg.	k(p _{py}) (kN/m ³)
1	35	20000
2	35	20000

Presiunea activa a pamantului

Distributed Loads

Depth measured from the top of the wall, (m)	Lateral distributed line load, (kN/m)
1 0	-5.96
2 1.5	-14.09
3 5.4	-65.774

Add Row Insert Row Delete Row

Total Horizontal Stresses

Proprietatile peretelui

Wall Configuration

Free Height of Wall, H (m): 5.4

Width for Active Earth Press. Calculation, W_a (m): 1

Width for Generating p_y Soil Resistance, W_p (m): 1

Depth to the Water Table in backfill side, DW_b (m): 1.5

Depth to the Water Table in excavation side, DW_e (m): 5.4

Modification Factor for Active Earth Pressure: 1

Slope of the backfill, Beta (deg.): 0

Wall Properties

Increments (nodes): 100

Wall Stiffness (EI): Enter Section Data

Increment Length (m): 0.2

Maximum Allowable Deflection (m): 2.54

Deflection Closure Tolerance (m): 2.54E-7

Free Height of Wall (m): 5.4

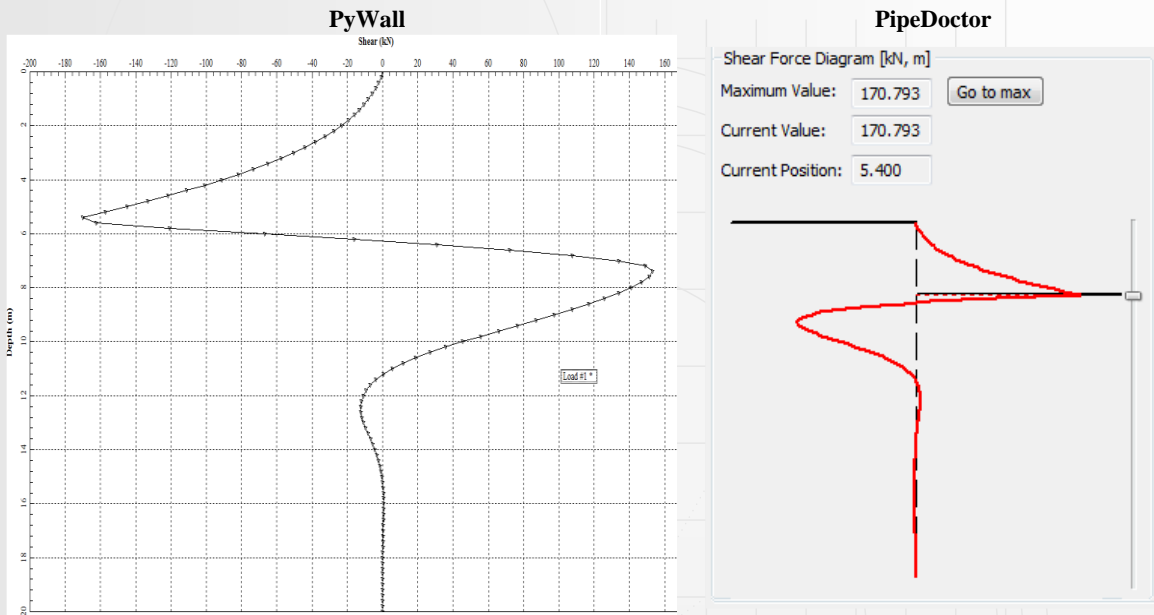
Wall Stiffness

Section	From Node No. [Start]	To Node No. [End]	Constant or Interpolate?	Flexural Stiffness (EI) (kN-m ²)
1	0	100	Use Constant Value for all Nodes on this L	60228

Add Row Insert Row Delete Row

Fig. 6.6: Datele de intrare din programul PyWall

Diagramele de variație ale forței tăietoare



Diagramele de variație ale momentelor încovoietoare

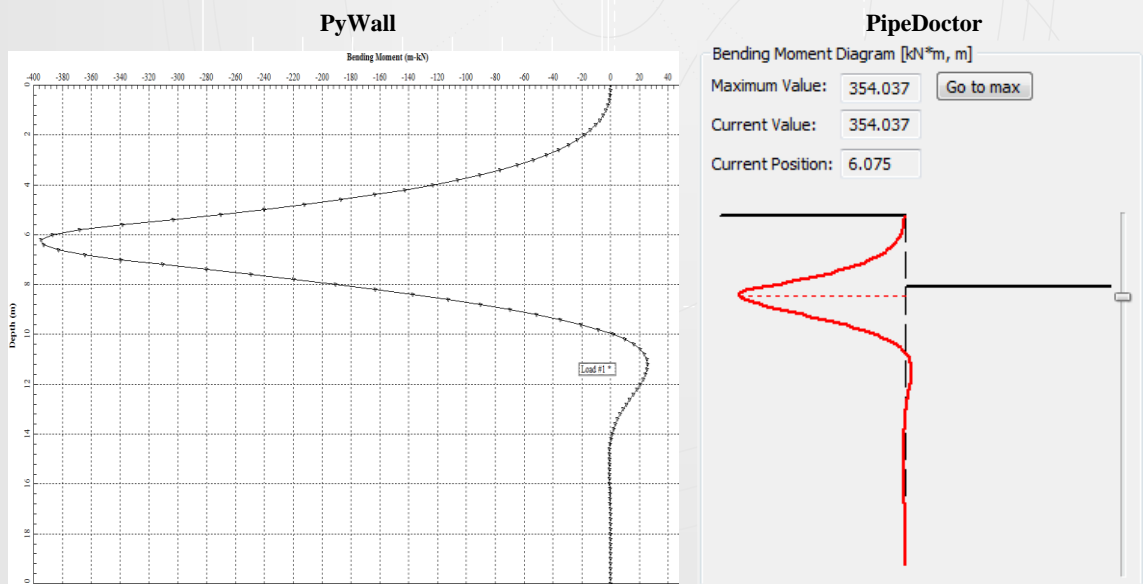


Fig. 6.7: Diagramele de moment încovoietor și forță tăietoare

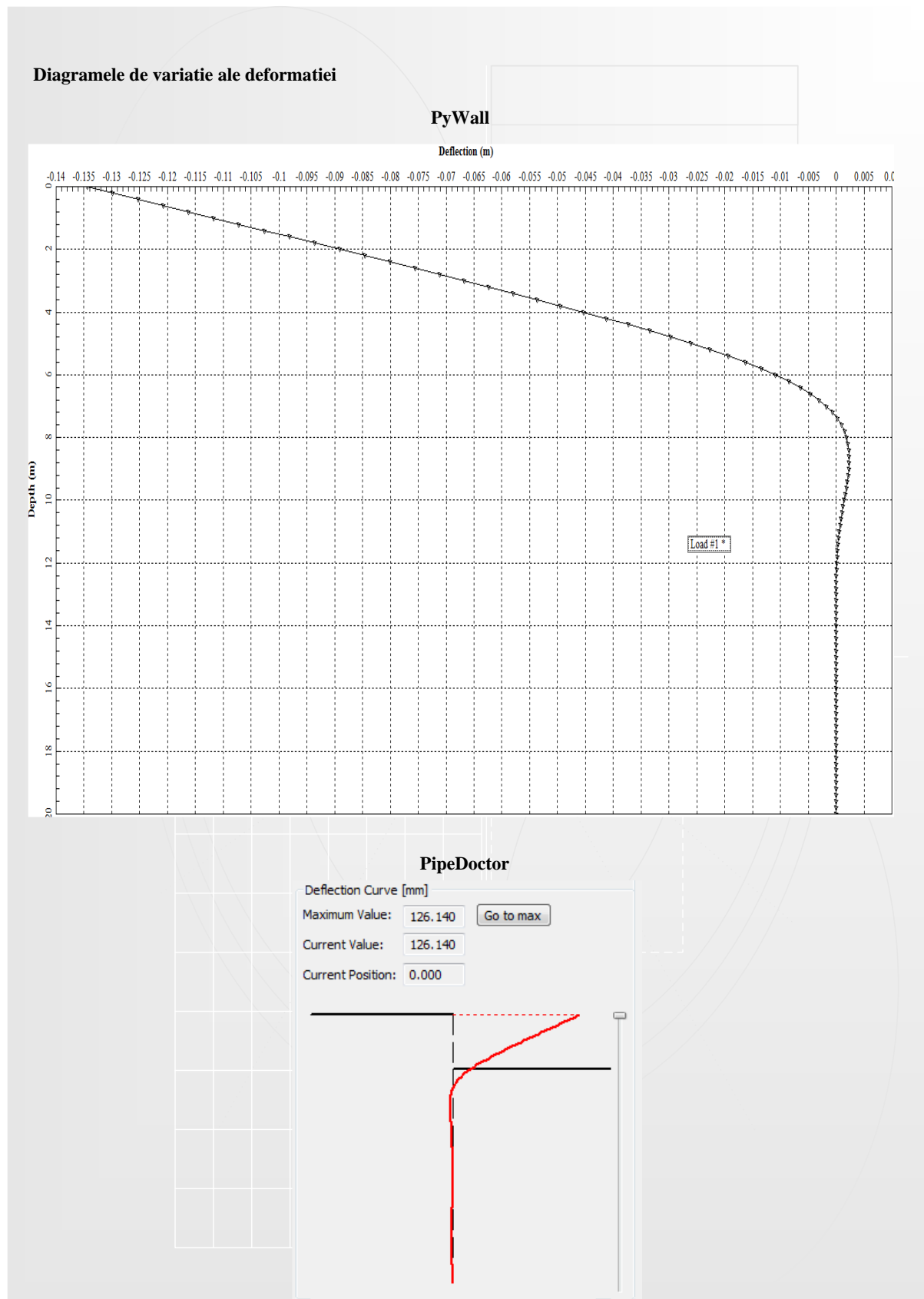


Fig. 6.8: Diagramele deformațiilor

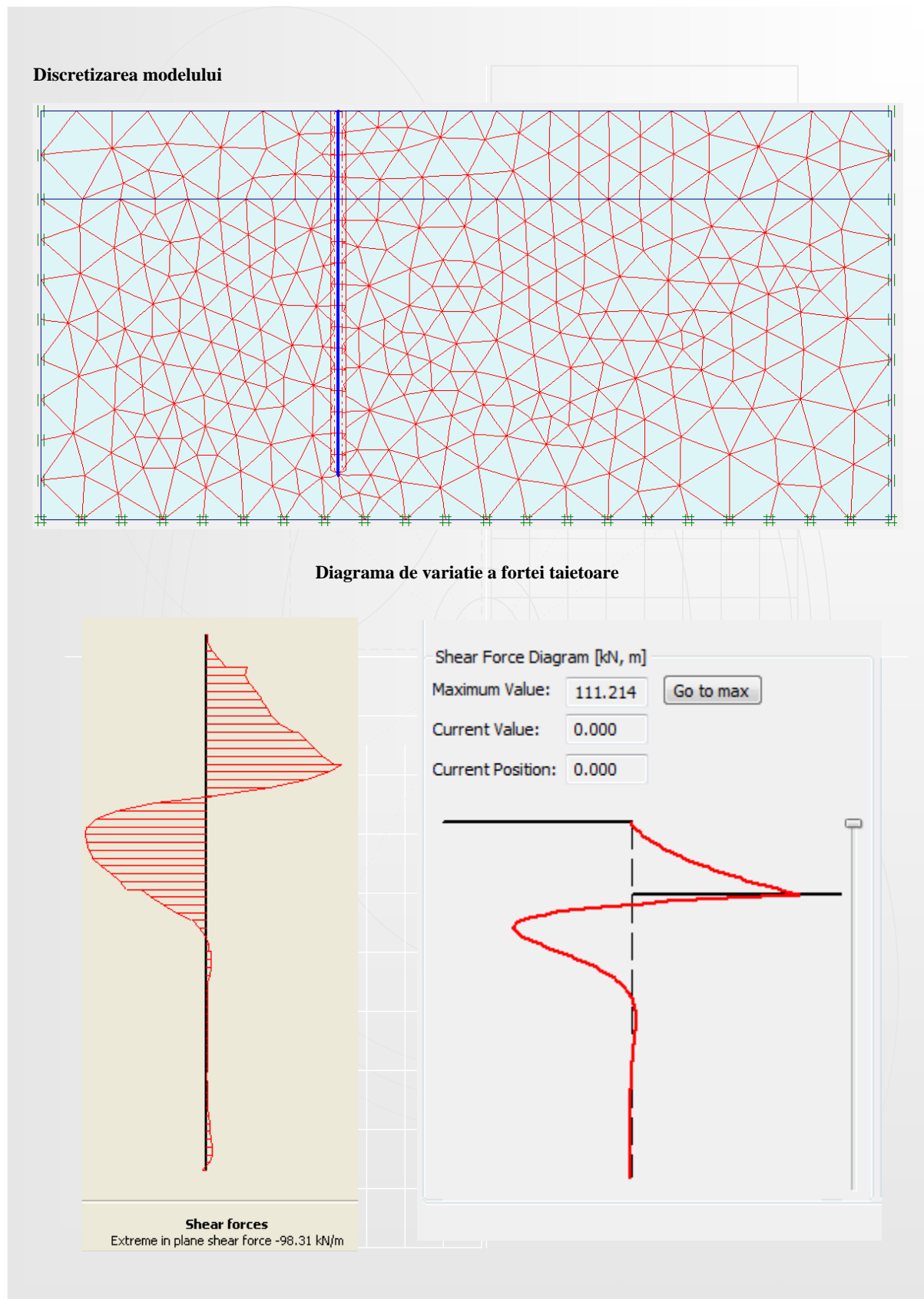


Fig. 6.10: Discretizarea modelului și diagrama forței tăietoare

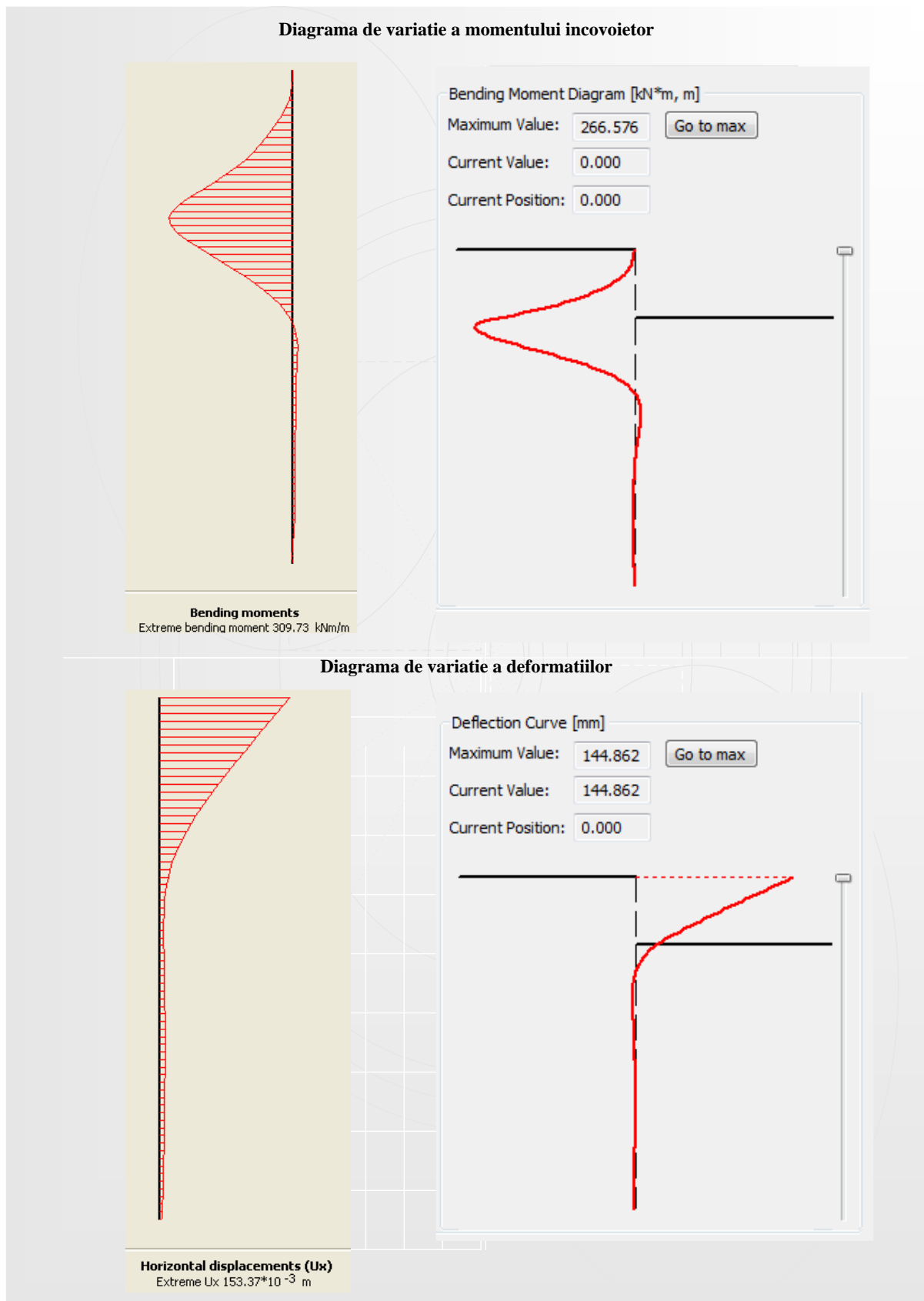


Fig. 6.11: Diagramele de forță tăietoare și moment încovoietor

6.2 Modulul pentru calculul conductei

6.2.1 Calibrare folosind metoda analitică prelucrată cu programul MathCAD

În scopul calibrării acestui modul folosind programul *MathCAD*, s-au exprimat funcțiile de variație a eforturilor, s-au obținut graficele atât în *MathCAD*, cât și în *PipeDoctor* și s-au comparat valorile la 0 , $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/2$ și π . Modelul folosit a fost o conductă cu diametrul exterior de 1.7m și grosime a peretelui de 15cm.

- Încărcarea din greutate proprie:
 - material folosit: beton – $\gamma=25\text{kN/m}^3$;
 - se observă că diferențele între valorile obținute sunt sub 5%, diferența maximă înregistrându-se la $\varphi=\pi/2$, unde valoarea forței tăietoare obținută numeric este -1.381kN, iar valoarea analitică este -1.453kN.

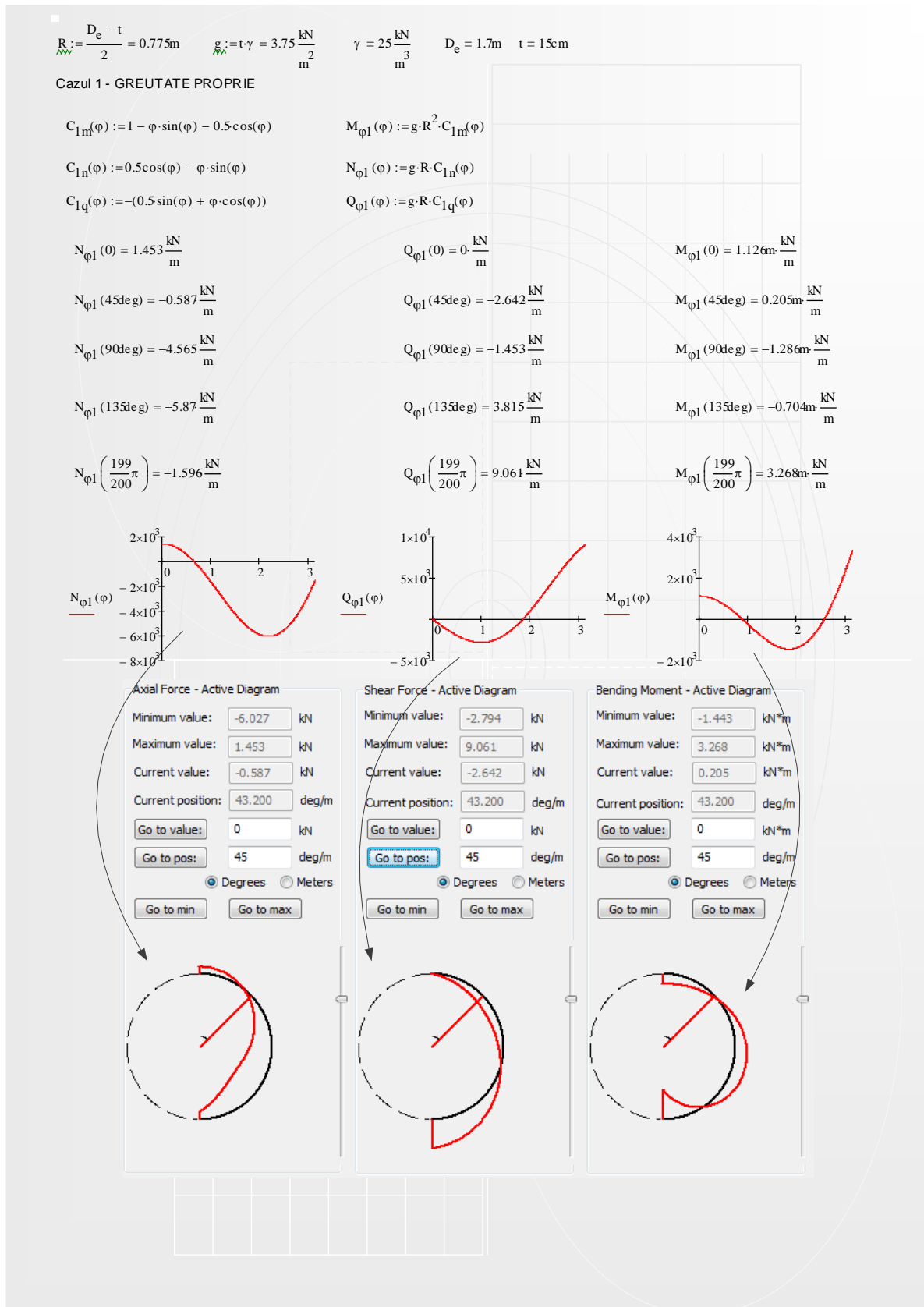


Fig. 6.12: Încărcarea din greutate proprie

- Încărcarea din presiunea verticală a pământului:
 - presiune considerată – $p_v=15\text{kN}$;

- unghiul la centru considerat pentru încărcarea din greutatea pământului – $\beta=45^\circ$;
- în acest caz, diferențele între valorile obținute în cele două moduri sunt chiar mai mici decât în cazul anterior.

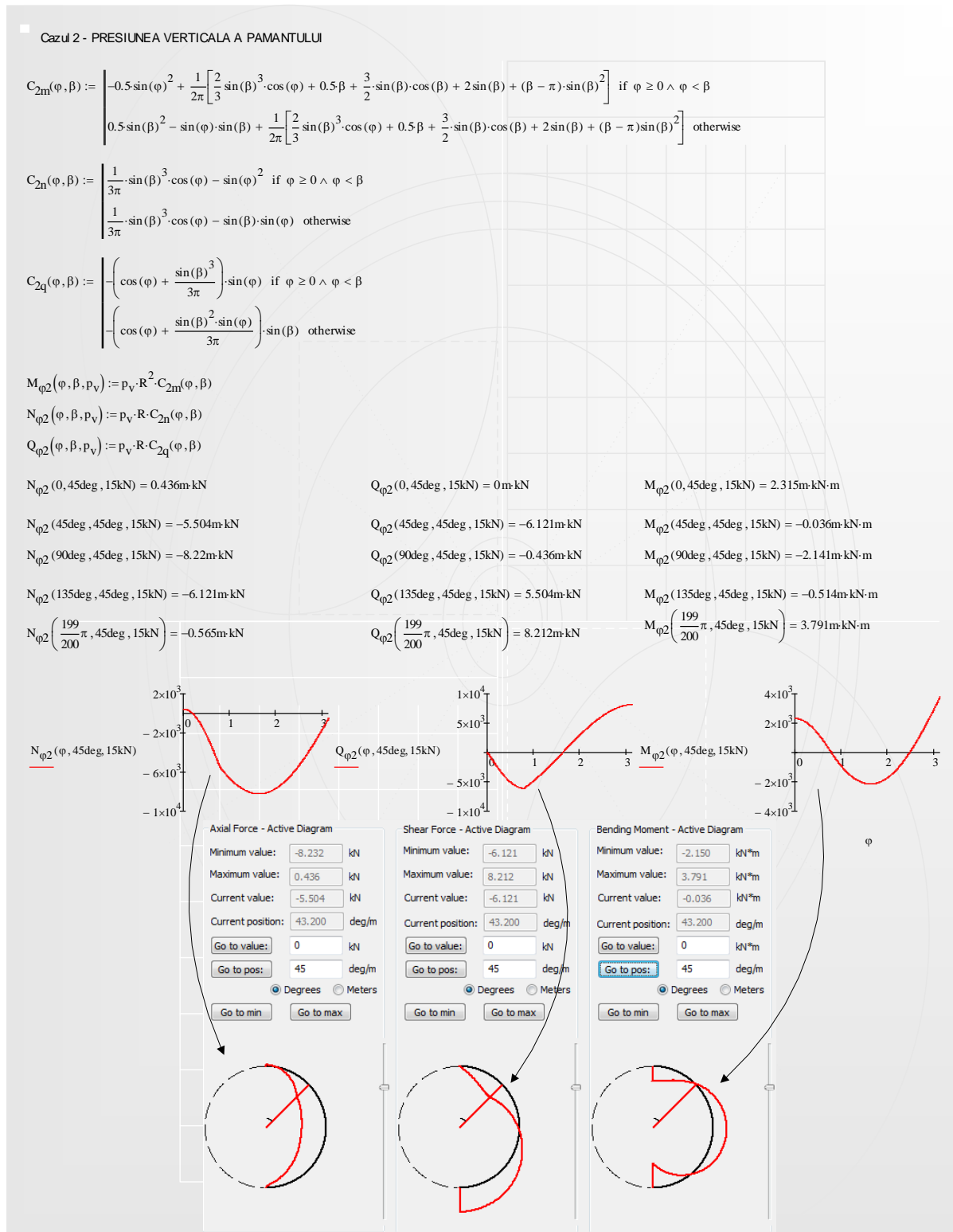


Fig. 6.13: Încărcarea din presiunea verticală a pământului

- Încărcarea din greutatea pământului cuprins între cheie și diametrul orizontal:

- o densitatea considerată a pământului – $\gamma_p=18\text{kN/m}^3$;

Cazul 3 - Greutatea pamantului cuprins între cheie și diametrul orizontal

$$C_{3m}(\varphi) := \begin{cases} -0.33963 \cdot 0.5(\varphi - \sin(\varphi)) + \left(0.54361 \frac{\cos(\varphi)^2}{6}\right) \cos(\varphi) & \text{if } 0 \leq \varphi \wedge \varphi < \frac{\pi}{2} \\ 0.16037 \cdot 0.21466 \sin(\varphi) + 0.0436 \cos(\varphi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C_{3n}(\varphi) := \begin{cases} 0.5(\varphi + 0.5 \sin(2\varphi)) \sin(\varphi) - \sin(\varphi)^2 + 0.0436 \cos(\varphi) & \text{if } 0 \leq \varphi \wedge \varphi < \frac{\pi}{2} \\ -0.21466 \sin(\varphi) + 0.0436 \cos(\varphi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C_{3q}(\varphi) := \begin{cases} [0.5(\varphi + 0.5 \sin(2\varphi)) \cos(\varphi) - \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) - 0.0436 \sin(\varphi)] & \text{if } 0 \leq \varphi \wedge \varphi < \frac{\pi}{2} \\ -(0.21466 \cos(\varphi) + 0.0436 \sin(\varphi)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{\varphi 3}(\varphi, \gamma_p) := \gamma_p \cdot R^3 \cdot C_{3m}(\varphi)$$

$$N_{\varphi 3}(\varphi, \gamma_p) := \gamma_p \cdot R^2 \cdot C_{3n}(\varphi)$$

$$Q_{\varphi 3}(\varphi, \gamma_p) := \gamma_p \cdot R^2 \cdot C_{3q}(\varphi)$$

$$N_{\varphi 3} \left(0, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 0.47 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{\varphi 3} \left(45 \text{ deg}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -0.159 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{\varphi 3} \left(90 \text{ deg}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -2.32 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{\varphi 3} \left(135 \text{ deg}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -1.974 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{\varphi 3} \left(\frac{199}{200} \pi, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -0.508 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{\varphi 3} \left(0, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{\varphi 3} \left(\frac{\pi}{4}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -0.826 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{\varphi 3} \left(\frac{\pi}{2}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -0.471 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{\varphi 3} \left(135 \text{ deg}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 1.307 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{\varphi 3} \left(\frac{199}{200} \pi, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 2.312 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\varphi 3} \left(0, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 0.313 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$M_{\varphi 3} \left(45 \text{ deg}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 0.209 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$M_{\varphi 3} \left(90 \text{ deg}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -0.454 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$M_{\varphi 3} \left(135 \text{ deg}, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = -0.186 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$M_{\varphi 3} \left(\frac{199}{200} \pi, 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 0.95 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

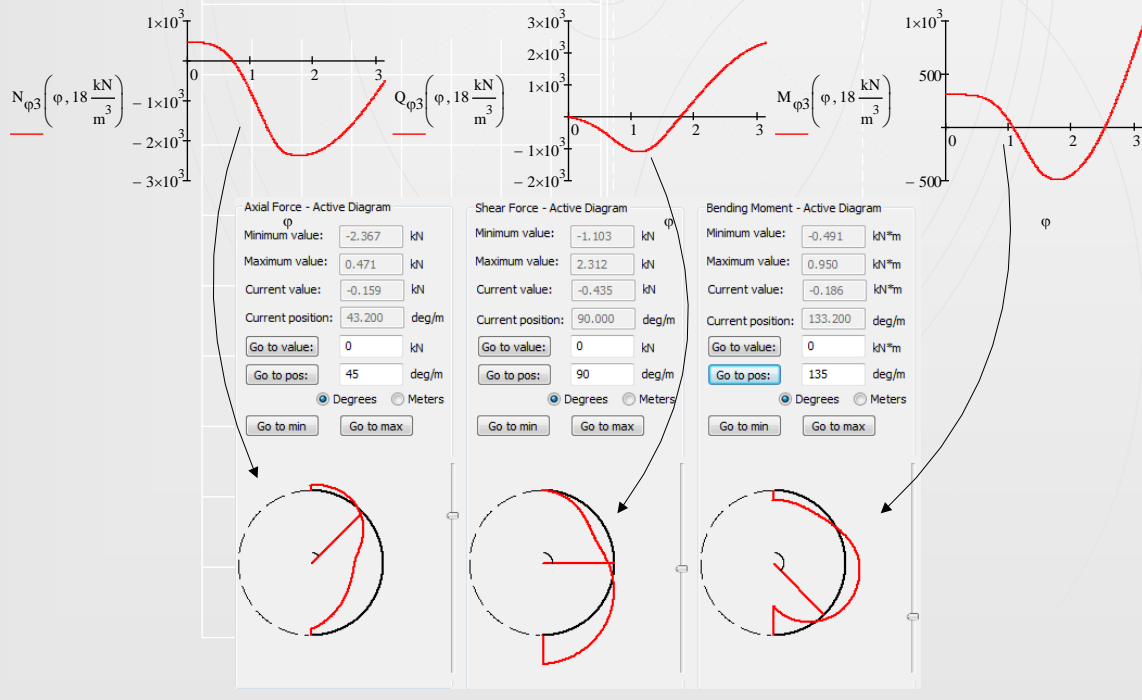


Fig. 6.14: Încărcarea provenită din greutatea pământului cuprins între cheie și diametrul orizontal

- Încărcarea din presiunea activă a pământului – componenta uniformă:
 - o valoarea presiunii laterale $p=15\text{kN}$;
 - o valoarea unghiului la centru de la partea inferioară a conductei: $\alpha=30^\circ$.

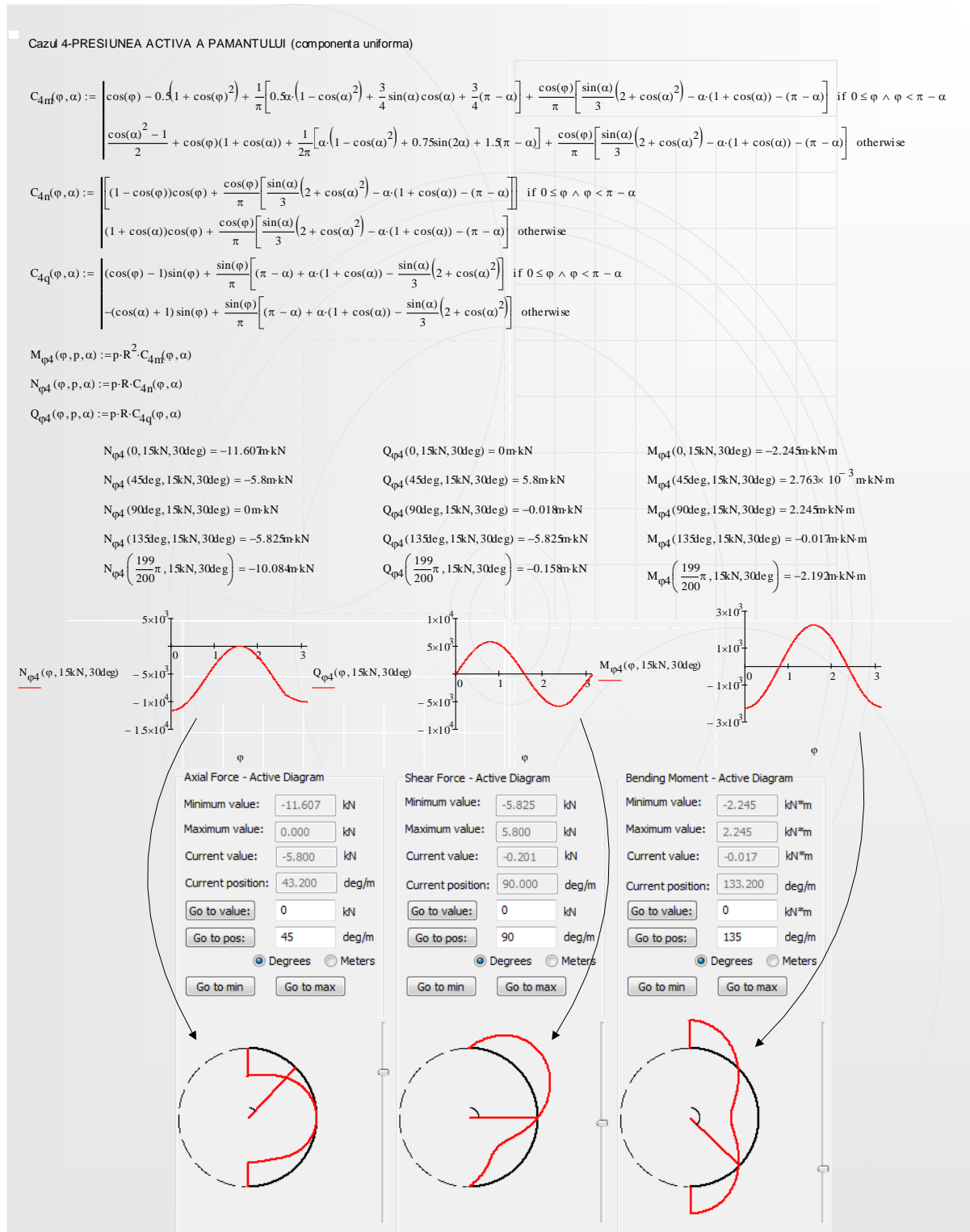


Fig. 6.15: Încărcarea din presiunea activă a pământului - componenta uniformă

- Încărcarea din presiunea activă a pământului – componenta liniară:
 - valoarea presiunii laterale maxime: $p=15\text{kN}$;
 - valoarea unghiului la centru de la partea inferioară a conductei: $\alpha=30^\circ$.

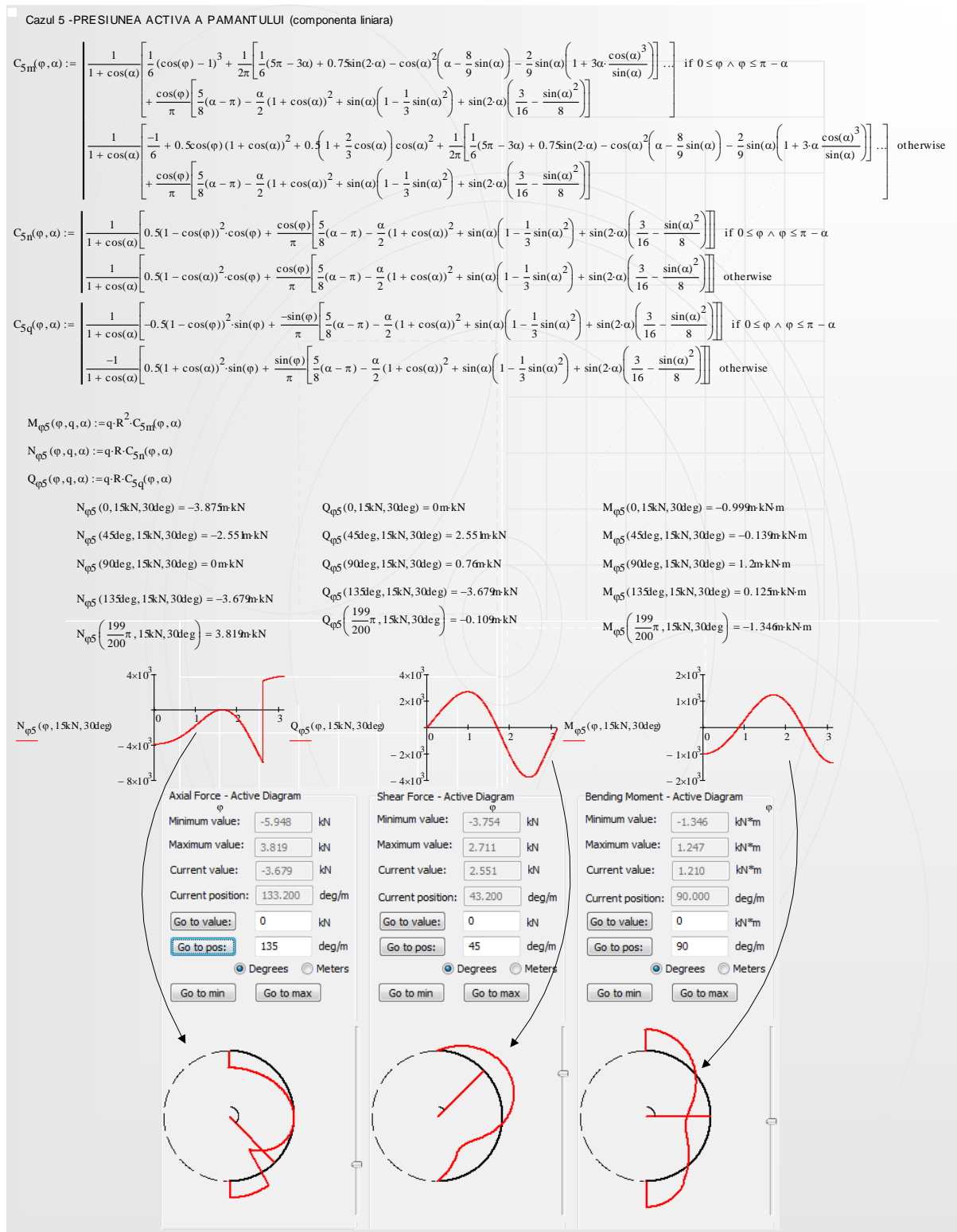


Fig. 6.16: Încărcarea din presiunea activă a pământului - componenta liniară

- Încărcarea din presiunea hidrostatică la gradul de umplere unu:
 - densitatea apei: $\gamma_a=10\text{kN/m}^3$.

Cazul 6: PRESIUNEA HIDROSTATICĂ LA GRAD DE UMLERE UNU

$$C_{6m}(\varphi) := \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \varphi \cdot \sin(\varphi) - \frac{1}{4} \cdot \cos(\varphi)$$

$$C_{6n}(\varphi) := 1 - \frac{1}{2} \cdot \varphi \cdot \sin(\varphi) - \frac{1}{4} \cdot \cos(\varphi)$$

$$C_{6q}(\varphi) := -\left(\frac{\sin(\varphi)}{4} + \frac{\varphi}{2} \cdot \cos(\varphi)\right)$$

$$M_{\varphi 6}(\gamma_a, \varphi) := \gamma_a \cdot R^3 \cdot C_{6m}(\varphi)$$

$$N_{\varphi 6}(\gamma_a, \varphi) := \gamma_a \cdot R^2 \cdot C_{6n}(\varphi)$$

$$Q_{\varphi 6}(\gamma_a, \varphi) := \gamma_a \cdot R^2 \cdot C_{6q}(\varphi)$$

$$N_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 0\right) = 4.505 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$Q_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 0\right) = 0 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$M_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 0\right) = 1.164 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kNm}$$

$$N_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 45 \text{deg}\right) = 3.277 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$Q_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 45 \text{deg}\right) = -2.73 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$M_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 45 \text{deg}\right) = 0.212 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kNm}$$

$$N_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 90 \text{deg}\right) = 1.289 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$Q_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 90 \text{deg}\right) = -1.502 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$M_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 90 \text{deg}\right) = -1.328 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kNm}$$

$$N_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 135 \text{deg}\right) = 2.065 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$Q_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 135 \text{deg}\right) = 3.942 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$M_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, 135 \text{deg}\right) = -0.727 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kNm}$$

$$N_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) = 7.36 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$Q_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) = 9.363 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

$$M_{\varphi 6}\left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) = 3.377 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kNm}$$

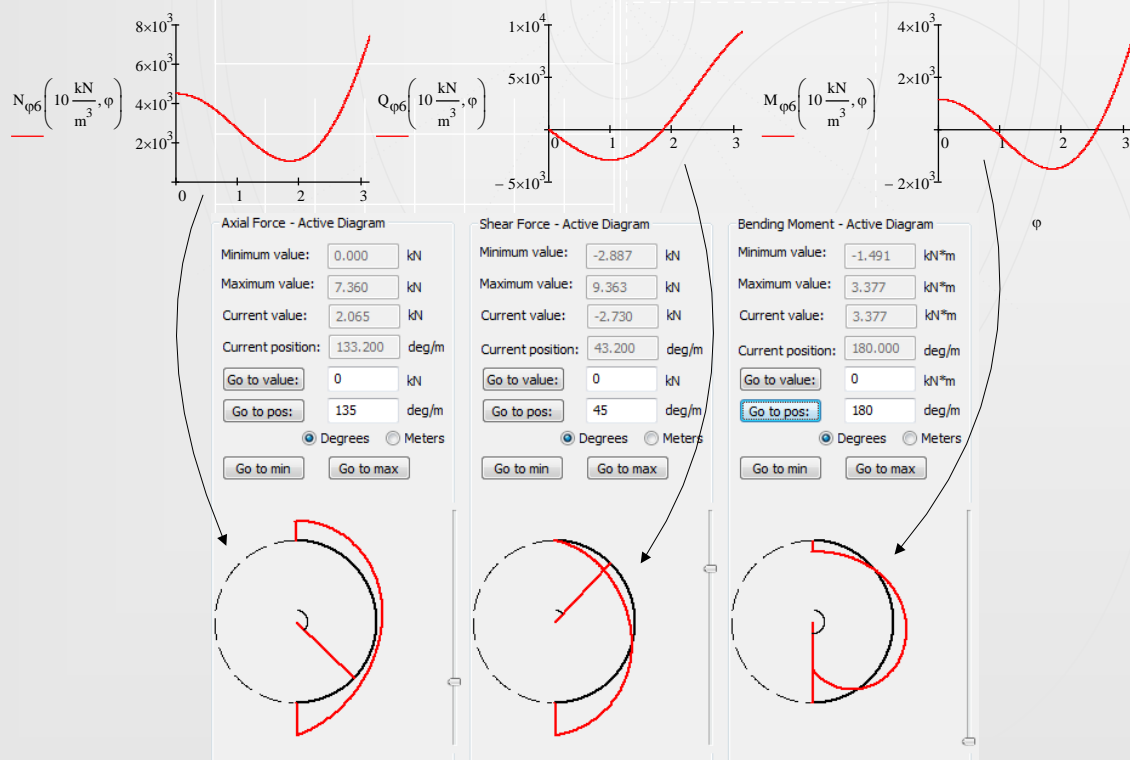


Fig. 6.17: Încărcarea din presiunea hidrostatică la grad de umplere 1

- Încărcarea din presiunea hidrostatică uniformă:
 - mărimea încărcării: $p_i = 10 \text{ kN/m}^2$.

Cazul 7 - PRESIUNEA HIDROSTATICĂ UNIFORMĂ

$$M_{\varphi 7} := 0$$

$$N_{\varphi 7}(p_i) := p_i \cdot R$$

$$Q_{\varphi 7} := 0$$

$$N_{\varphi 7} \left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 7.75 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

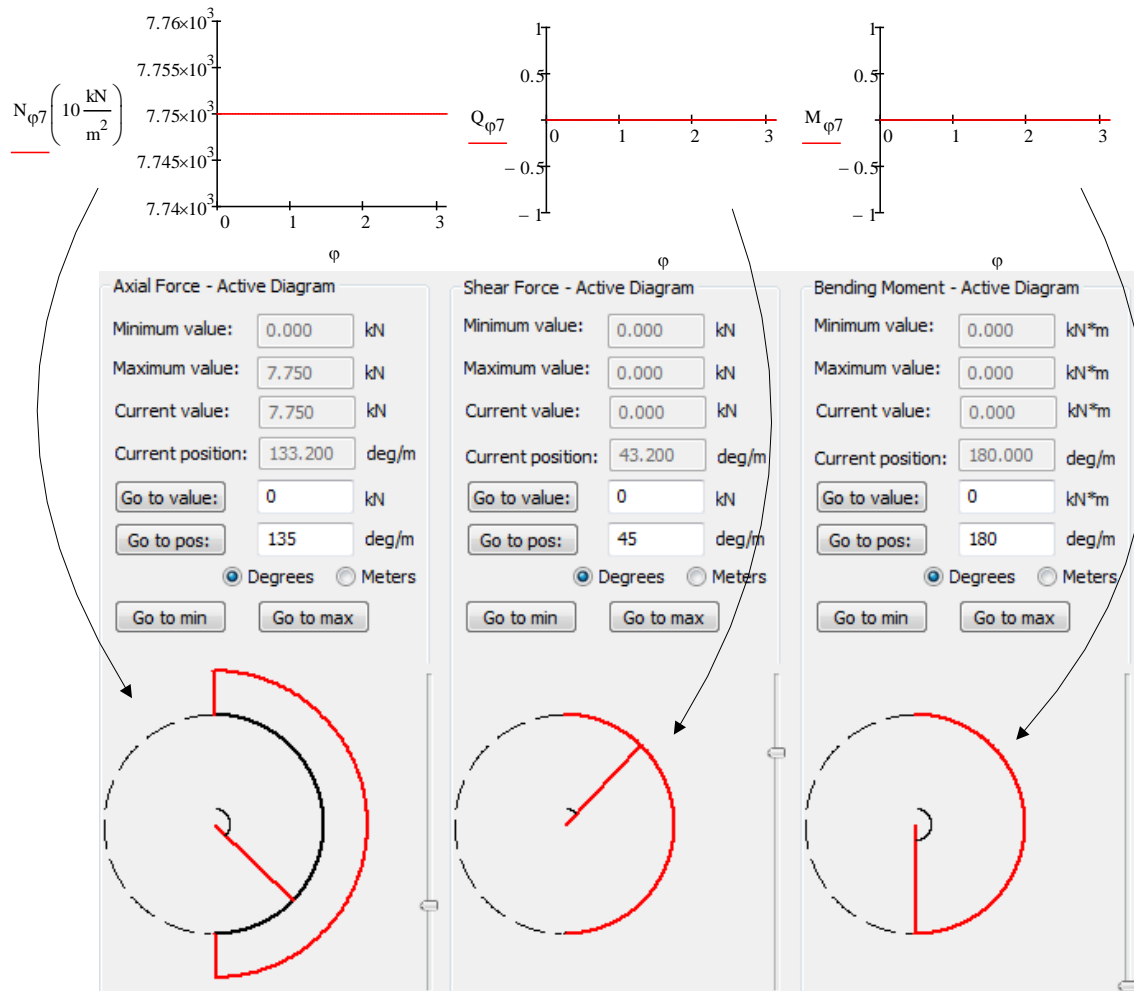


Fig. 6.18: Încărcarea din presiunea hidrostatică uniformă

- Forță verticală concentrată:
 - mărimea încărcării: $P=10\text{kN}$.

Cazul 8 - FORȚA VERTICALĂ CONCENTRATĂ

$$C_{8m}(\varphi) := \frac{1}{\pi} - 0.5 \sin(\varphi)$$

$$C_{8n}(\varphi) := -0.5 \sin(\varphi)$$

$$C_{8q}(\varphi) := -0.5 \cos(\varphi)$$

$$M_{\varphi 8}(P, \varphi) := P \cdot R \cdot C_{8m}(\varphi)$$

$$N_{\varphi 8}(P, \varphi) := P \cdot C_{8n}(\varphi)$$

$$Q_{\varphi 8}(P, \varphi) := P \cdot C_{8q}(\varphi)$$

$$N_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 0) = 0 \text{ kN}$$

$$N_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 45 \text{ deg}) = -3.53 \text{ kN}$$

$$N_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 90 \text{ deg}) = -5 \text{ kN}$$

$$N_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 135 \text{ deg}) = -3.53 \text{ kN}$$

$$N_{\varphi 8}\left(1 \text{ kN}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) = -0.07 \text{ kN}$$

$$Q_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 0) = -5 \text{ kN}$$

$$Q_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 45 \text{ deg}) = -3.53 \text{ kN}$$

$$Q_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 90 \text{ deg}) = 0 \text{ kN}$$

$$Q_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 135 \text{ deg}) = 3.53 \text{ kN}$$

$$Q_{\varphi 8}\left(1 \text{ kN}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) = 4.99 \text{ kN}$$

$$M_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 0) = 2.467 \text{ kNm}$$

$$M_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 45 \text{ deg}) = -0.27 \text{ kNm}$$

$$M_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 90 \text{ deg}) = -1.408 \text{ kNm}$$

$$M_{\varphi 8}(1 \text{ kN}, 135 \text{ deg}) = -0.27 \text{ kNm}$$

$$M_{\varphi 8}\left(1 \text{ kN}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) = 2.406 \text{ kNm}$$

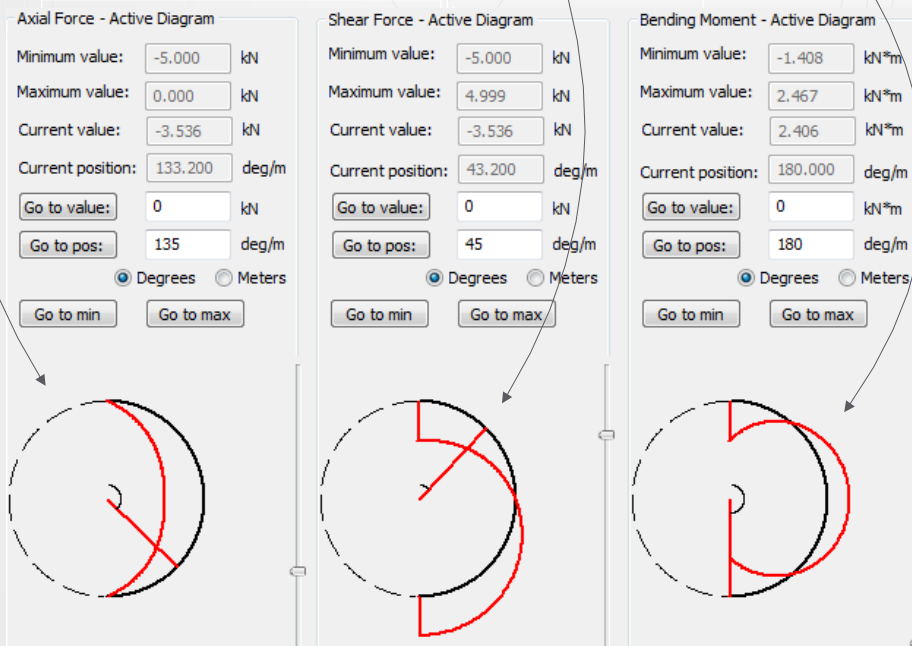
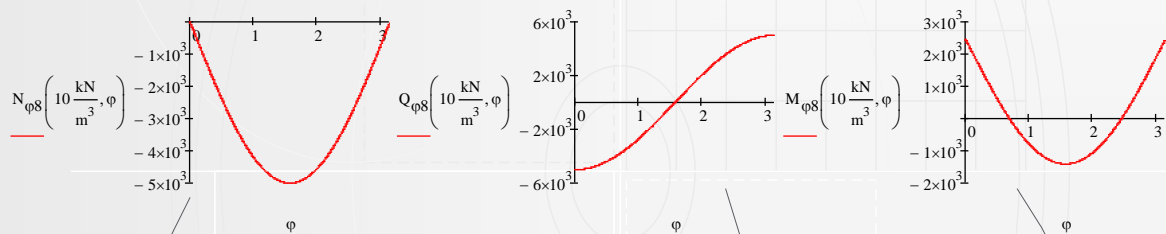


Fig. 6.19: Încărcare provenită dintr-o forță verticală concentrată

- Forță orizontală concentrată:
 - mărimea încărcării: $P=10\text{kN}$.

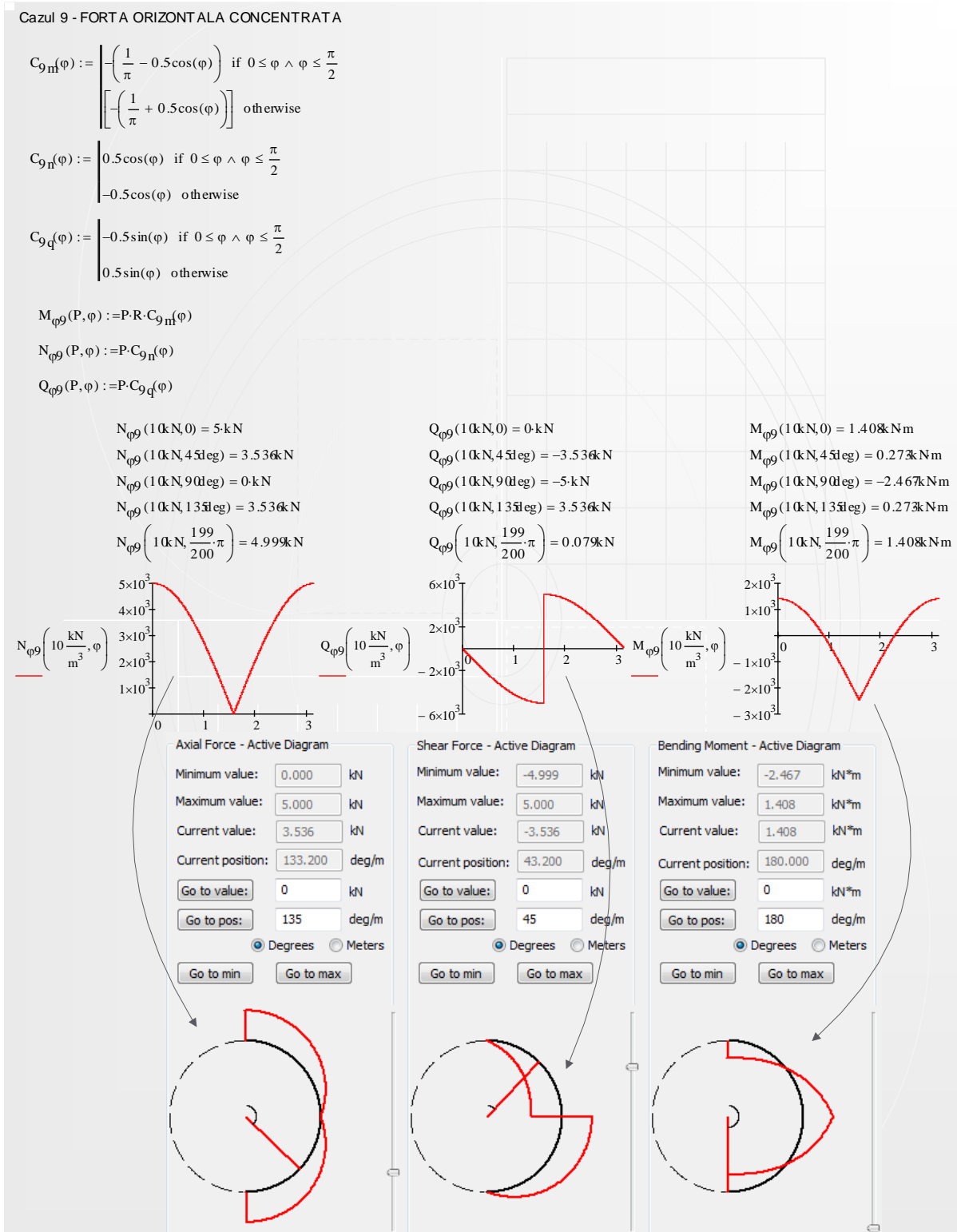


Fig. 6.20: Încărcare provenită dintr-o forță orizontală concentrată

- Modelul de reacțiune în cazul fundării în teren necoeziv (Cap. 3.3.1 – modelul 5), având conducta încărcată cu o forță verticală concentrată de 10kN și unghiul la centru al patului de fundare $\alpha=30^\circ$:

SCHEMA DE INCARCARE A - Modelul 5 - pozarea pe pamant necoeziv

$$c_0(\alpha) := \frac{3}{\sin(\alpha)^3 + 3 \cdot \sin(\alpha) - 3 \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha)}$$

$$q(V_i, \alpha, \theta) := \frac{V_i \cdot c_0(\alpha)}{R} (\cos(\theta) - \cos(\alpha)) \cos(\theta)$$

$$C_{Am}(\alpha, \varphi) := \begin{cases} \frac{c_0(\alpha)}{\pi} \left[\frac{\alpha}{2} (1 + \cos(\alpha)) - \frac{2}{3} \sin(\alpha) - 0.25 \sin(2\alpha) + \frac{1}{12} \sin(2\alpha) \cos(\alpha) \dots \right] & \text{if } 0 \leq \varphi \wedge \varphi \leq \pi - \alpha \\ + \frac{-1}{36} \left[\sin(\alpha) (3 + 5 \sin(\alpha)^2) + 3\alpha \cdot \cos(\alpha) (2 \cos(\alpha)^2 - 3) \right] \cos(\varphi) & \\ -c_0(\alpha) \left[0.5(\alpha + \varphi - \pi) \cos(\alpha) - \sin(\alpha) \right] \sin(\varphi) + \frac{1}{3} (1 + \sin(\varphi)^2) \dots & \text{if } \pi - \alpha \leq \varphi \wedge \varphi \leq \pi \\ + \frac{1}{3} \cos(\varphi - \alpha) + \frac{\sin(2\alpha)}{12} \sin(\varphi + \alpha) & \\ + \frac{c_0(\alpha)}{\pi} \left[\frac{\alpha}{2} (1 + \cos(\alpha)) - \frac{2}{3} \sin(\alpha) - 0.25 \sin(2\alpha) + \frac{1}{12} \sin(2\alpha) \cos(\alpha) \dots \right] & \\ + \frac{-1}{36} \left[\sin(\alpha) (3 + 5 \sin(\alpha)^2) + 3\alpha \cdot \cos(\alpha) (2 \cos(\alpha)^2 - 3) \right] \cos(\varphi) & \end{cases}$$

$$C_{An}(\alpha, \varphi) := \begin{cases} -c_0(\alpha) \frac{\cos(\varphi)}{36\pi} \left[\sin(\alpha) (3 + 5 \sin(\alpha)^2) + 3\alpha \cdot \cos(\alpha) (2 \cos(\alpha)^2 - 3) \right] & \text{if } 0 \leq \varphi \wedge \varphi \leq \pi - \alpha \\ -c_0(\alpha) \left[0.5(\alpha + \varphi - \pi) \cos(\alpha) - \sin(\alpha) \right] \sin(\varphi) + \frac{1}{3} (1 + \sin(\varphi)^2) \dots & \text{if } \pi - \alpha \leq \varphi \wedge \varphi \leq \pi \\ + \frac{1}{3} \cos(\varphi - \alpha) + \frac{\sin(2\alpha)}{12} \sin(\varphi + \alpha) & \\ + (-c_0(\alpha)) \frac{\cos(\varphi)}{36\pi} \left[\sin(\alpha) (3 + 5 \sin(\alpha)^2) + 3\alpha \cdot \cos(\alpha) (2 \cos(\alpha)^2 - 3) \right] & \end{cases}$$

$$C_{Aq}(\alpha, \varphi) := \begin{cases} c_0(\alpha) \frac{\sin(\varphi)}{36\pi} \left[\sin(\alpha) (3 + 5 \sin(\alpha)^2) + 3\alpha \cdot \cos(\alpha) (2 \cos(\alpha)^2 - 3) \right] & \text{if } 0 \leq \varphi \wedge \varphi \leq \pi - \alpha \\ -c_0(\alpha) \left[0.5 \sin(\varphi) \cos(\alpha) \left(1 - \frac{2}{3} \cos(\alpha)^2 \right) - \sin(\alpha) \cos(\varphi) \left(1 - \frac{1}{3} \sin(\alpha)^2 \right) \dots \right] & \text{if } \pi - \alpha \leq \varphi \wedge \varphi \leq \pi \\ + \frac{\alpha + \varphi - \pi}{2} \cos(\alpha) \cos(\varphi) + \frac{1}{3} \sin(2\varphi) + \frac{1}{4} \sin(2\alpha) \cos(\alpha + \varphi) & \\ + c_0(\alpha) \frac{\sin(\varphi)}{36\pi} \left[\sin(\alpha) (3 + 5 \sin(\alpha)^2) + 3\alpha \cdot \cos(\alpha) (2 \cos(\alpha)^2 - 3) \right] & \end{cases}$$

$$M_{\varphi A}(V_i, \alpha, \varphi) := V_i \cdot R \cdot C_{Am}(\alpha, \varphi)$$

$$N_{\varphi A}(V_i, \alpha, \varphi) := V_i \cdot C_{An}(\alpha, \varphi)$$

$$Q_{\varphi A}(V_i, \alpha, \varphi) := V_i \cdot C_{Aq}(\alpha, \varphi)$$

$$N_{\varphi A}(10\text{kN}, 30\text{deg}, 0\text{deg}) + N_{\varphi 8}(10\text{kN}, 0) = -0.085\text{ kN}$$

$$N_{\varphi A}(10\text{kN}, 30\text{deg}, 45\text{deg}) + N_{\varphi 8}(10\text{kN}, 45\text{deg}) = -3.595\text{ kN}$$

$$N_{\varphi A}(10\text{kN}, 30\text{deg}, 90\text{deg}) + N_{\varphi 8}(10\text{kN}, 90\text{deg}) = -5\text{ kN}$$

$$N_{\varphi A}(10\text{kN}, 30\text{deg}, 135\text{deg}) + N_{\varphi 8}(10\text{kN}, 135\text{deg}) = -3.476\text{ kN}$$

$$N_{\varphi A}\left(10\text{kN}, 30\text{deg}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) + N_{\varphi 8}\left(10\text{kN}, \frac{199}{200} \cdot \pi\right) = -0.889\text{ kN}$$

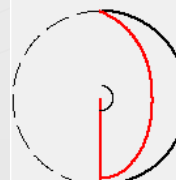
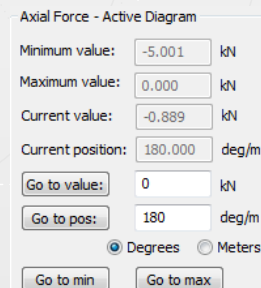
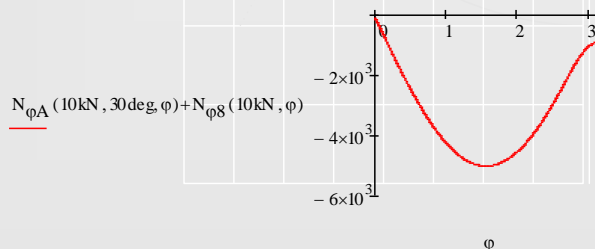


Fig. 6.21: Pozarea în pământ necoeziv cu o încărcare verticală concentrată de 10 kN - diagrama forței axiale

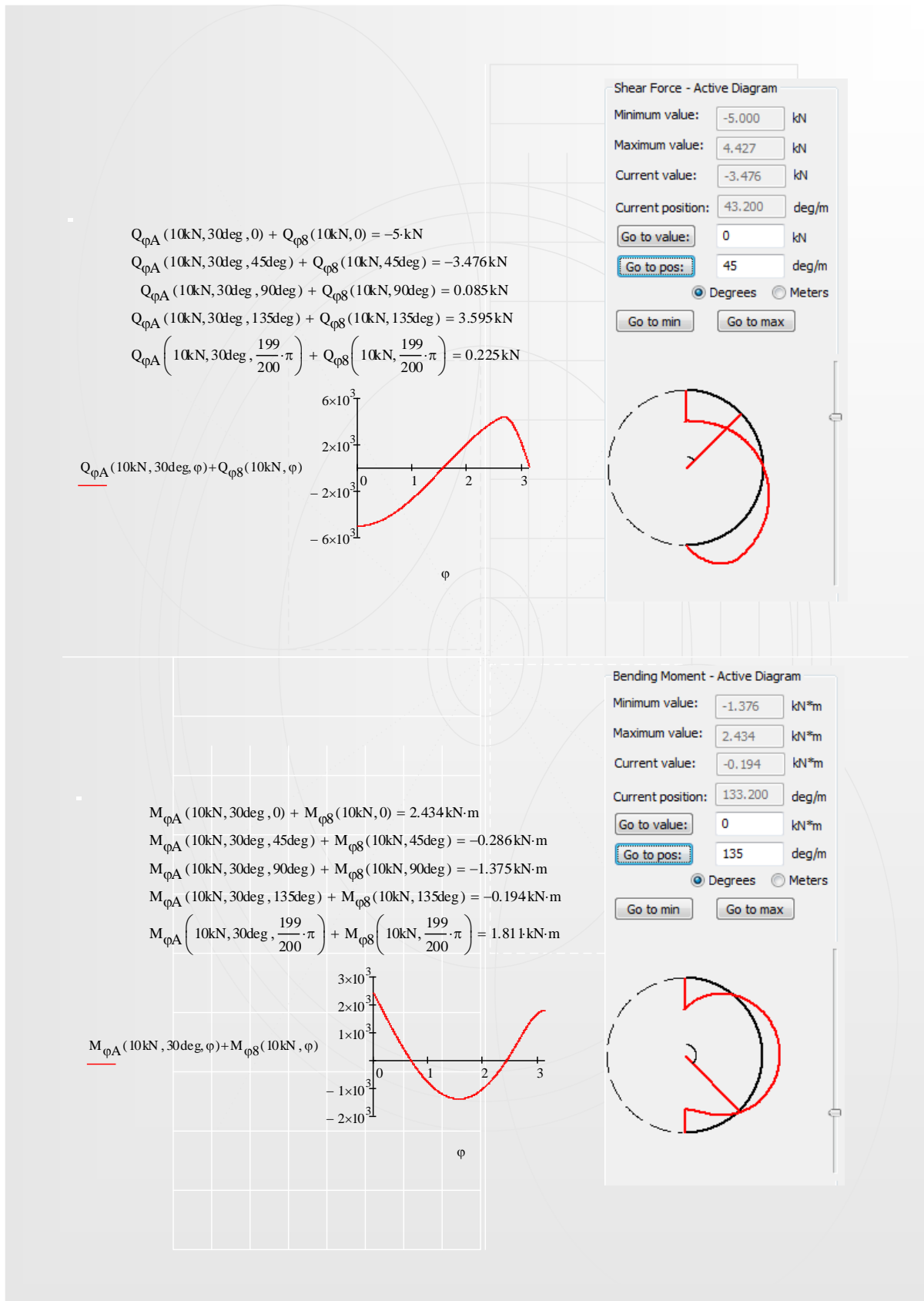


Fig. 6.22: Pozarea în pământ necoeziv cu o încărcare verticală concentrată de 10 kN - diagramele forței tăietoare și a momentului încovoietor

- Modelul de reacțiune proporțională cu tasarea (Cap. 3.3.1 – modelul 4), având conducta încărcată cu o forță verticală concentrată de 10kN și unghiul la centru al patului de fundare $\alpha=30^\circ$:

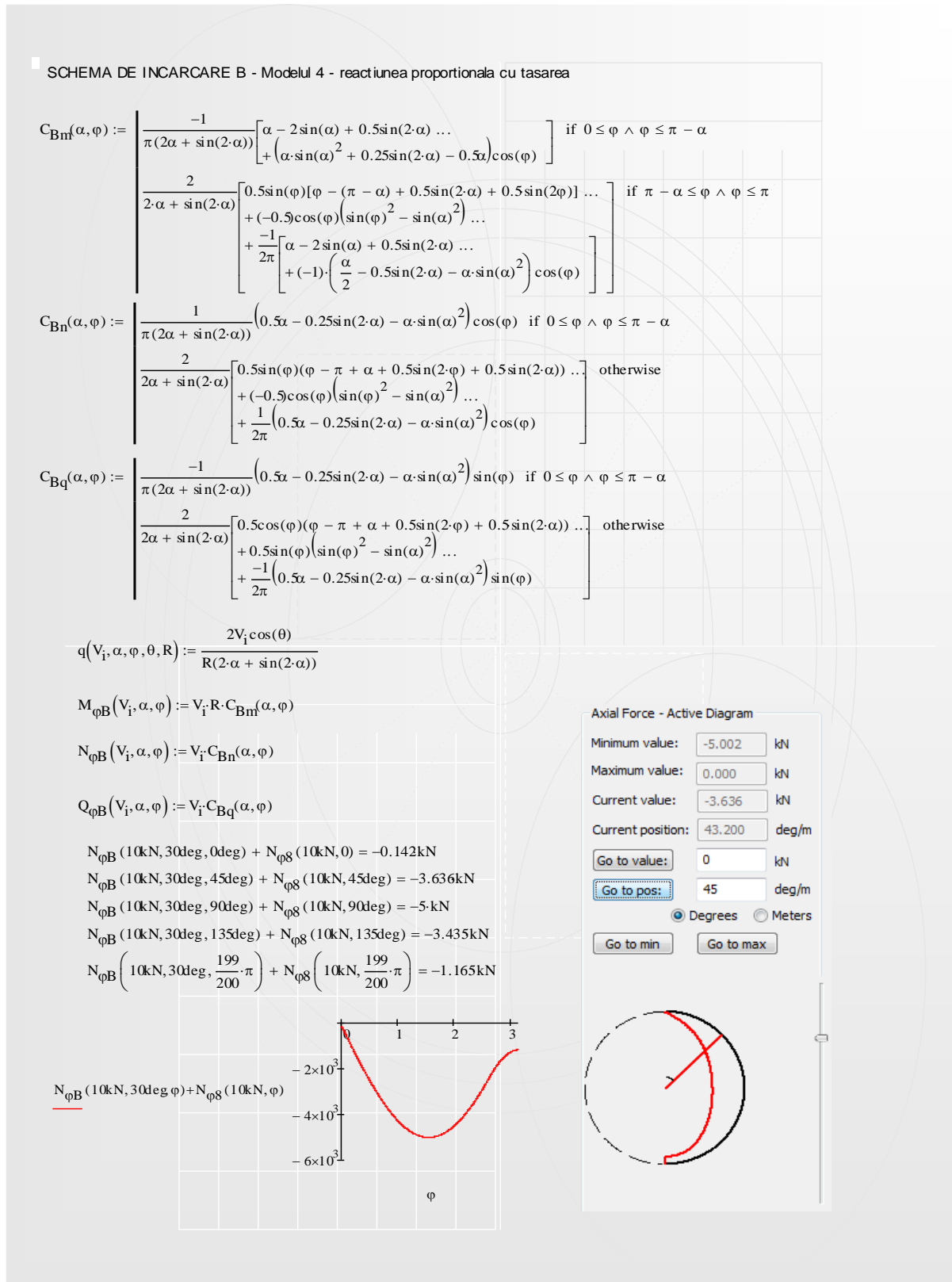
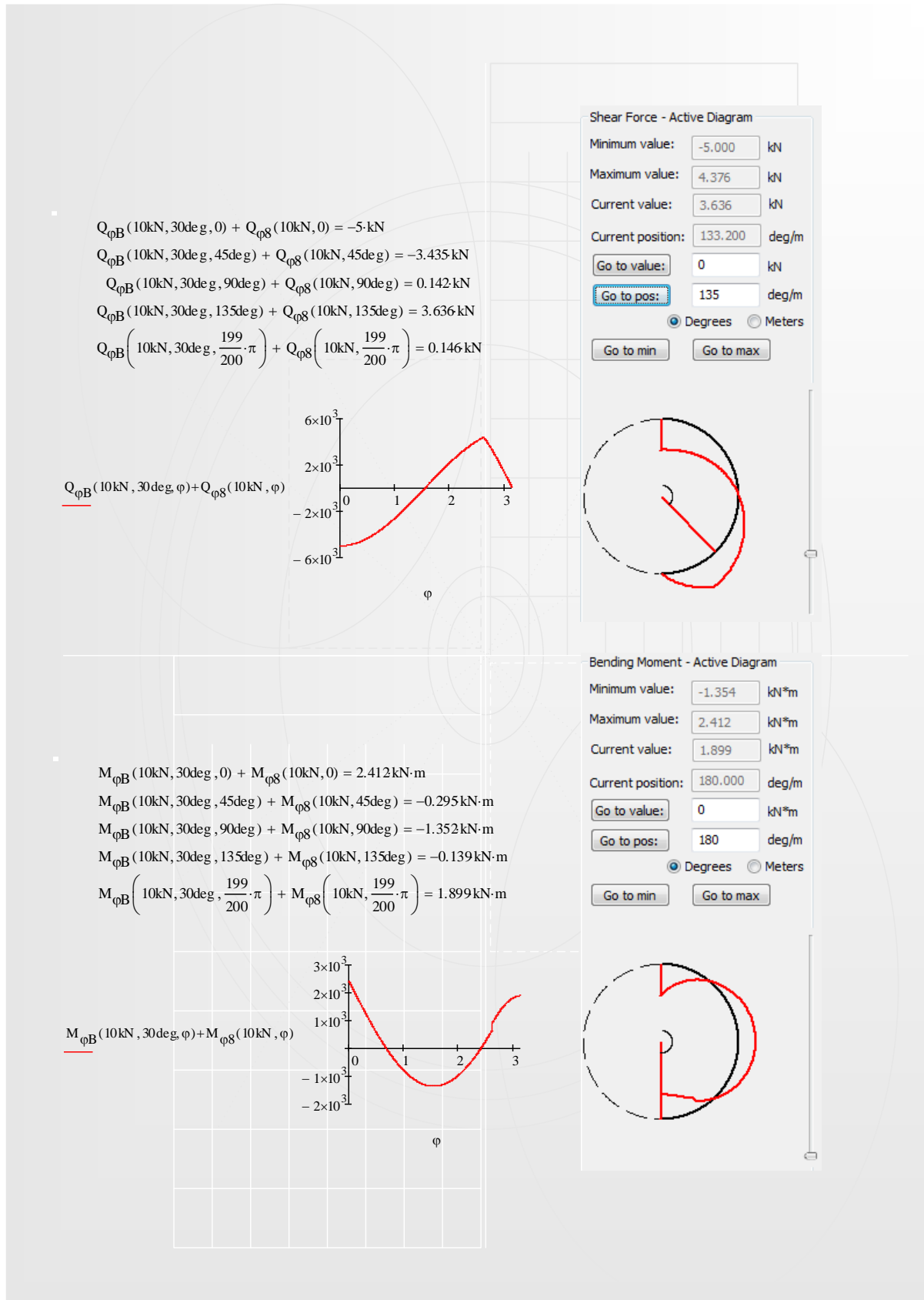


Fig. 6.23: Reacțiune proporțională cu tasarea, dată de o încărcare verticală concentrată de 10 kN - diagrama forței axiale



- Modelul de reacțiune uniform distribuită, dirijată radial (Cap. 3.3.1 – modelul 3), având conducta încărcată cu o forță verticală concentrată de 10kN și unghiul la centru al patului de fundare $\alpha=30^\circ$:

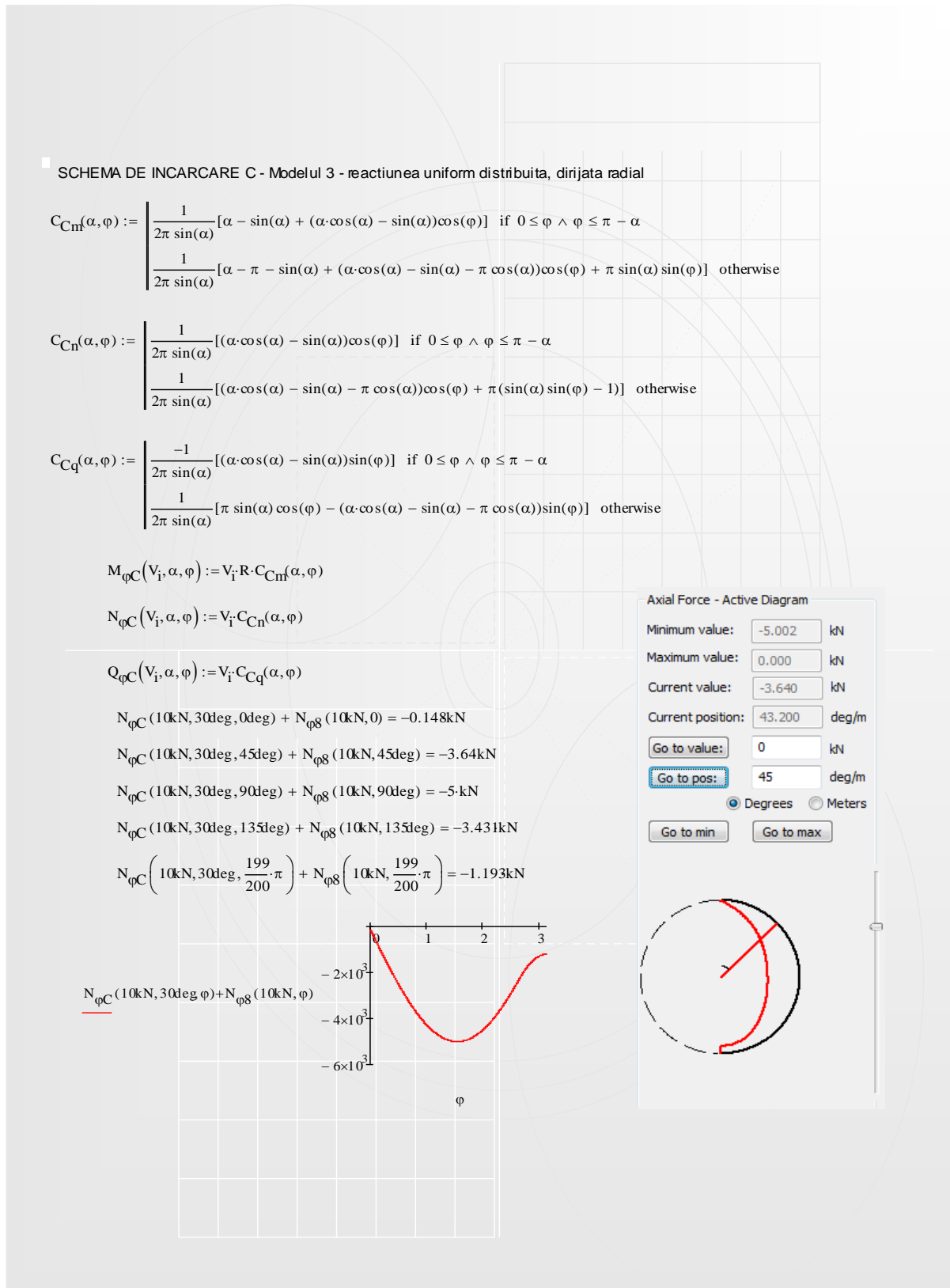


Fig. 6.25: Reacțiune uniform distribuită, dirijată radial, dată de o încărcare verticală concentrată de 10 kN - diagrama forței axiale

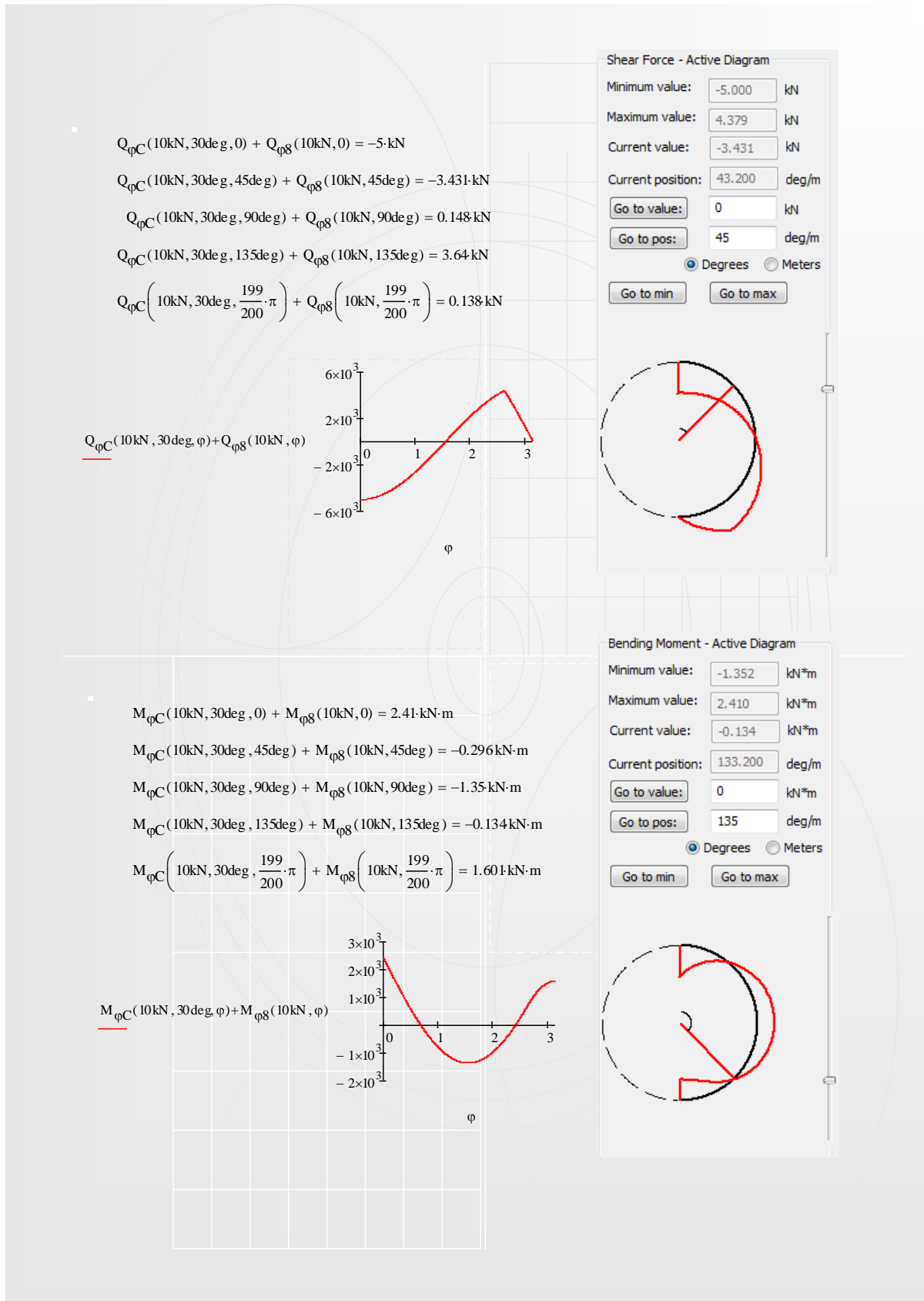


Fig. 6.26: Reacțiune uniform distribuită, dirijată radial, dată de o încărcare verticală concetrată de 10 kN - diagramele forței tăietoare și a momentului încovoiator

- Modelul de reacțiune uniform distribuită, dirijată orizontal (Cap. 3.3.1 – modelul 2), având conducta încărcată cu o forță verticală concentrată de 10kN și unghiul la centru al patului de fundare $\alpha=30^\circ$:

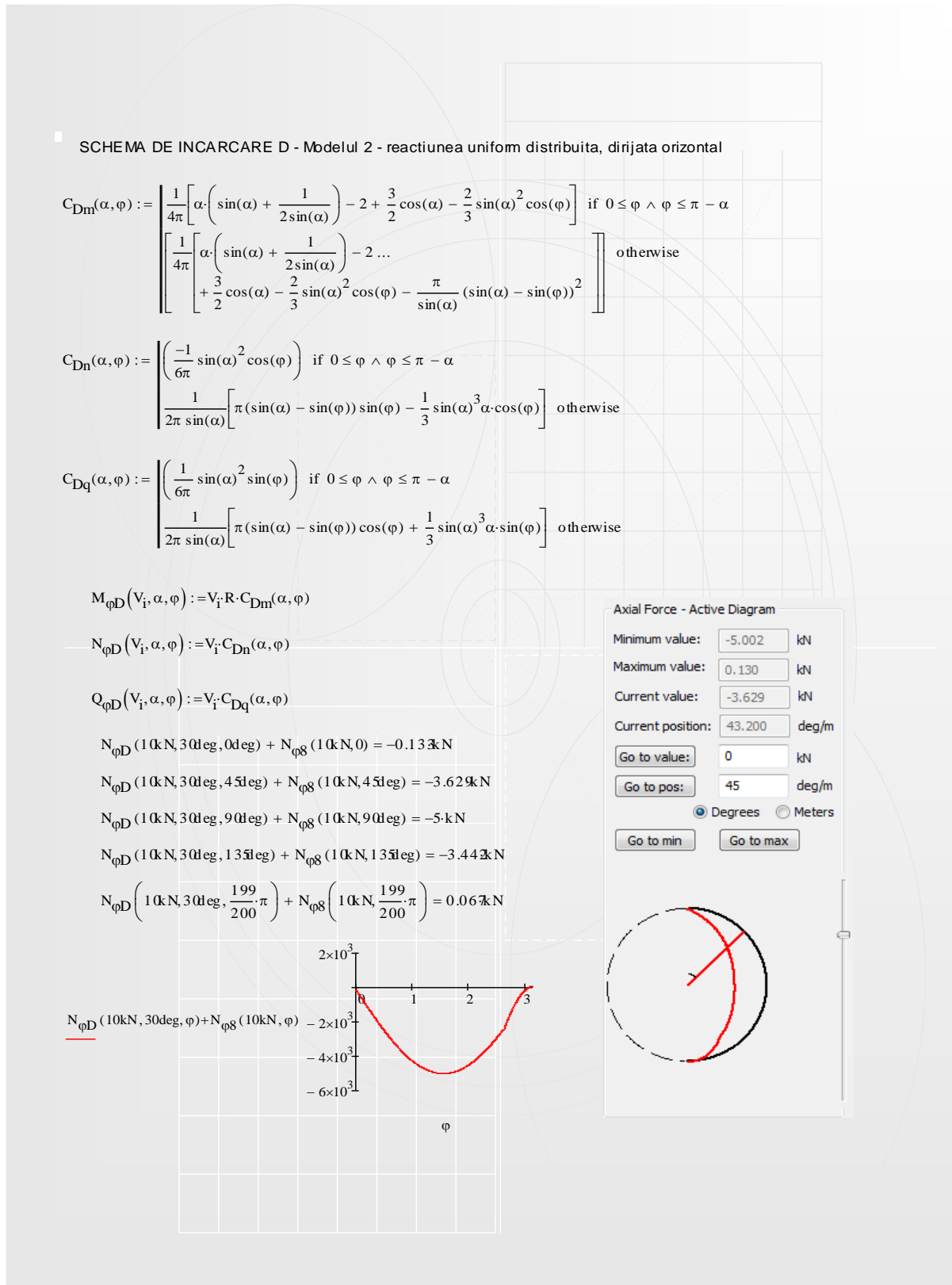


Fig. 6.27: Reacțiune uniform distribuită, dirijată orizontal, dată de o încărcare verticală concentrată de 10 kN - diagrama forței axiale

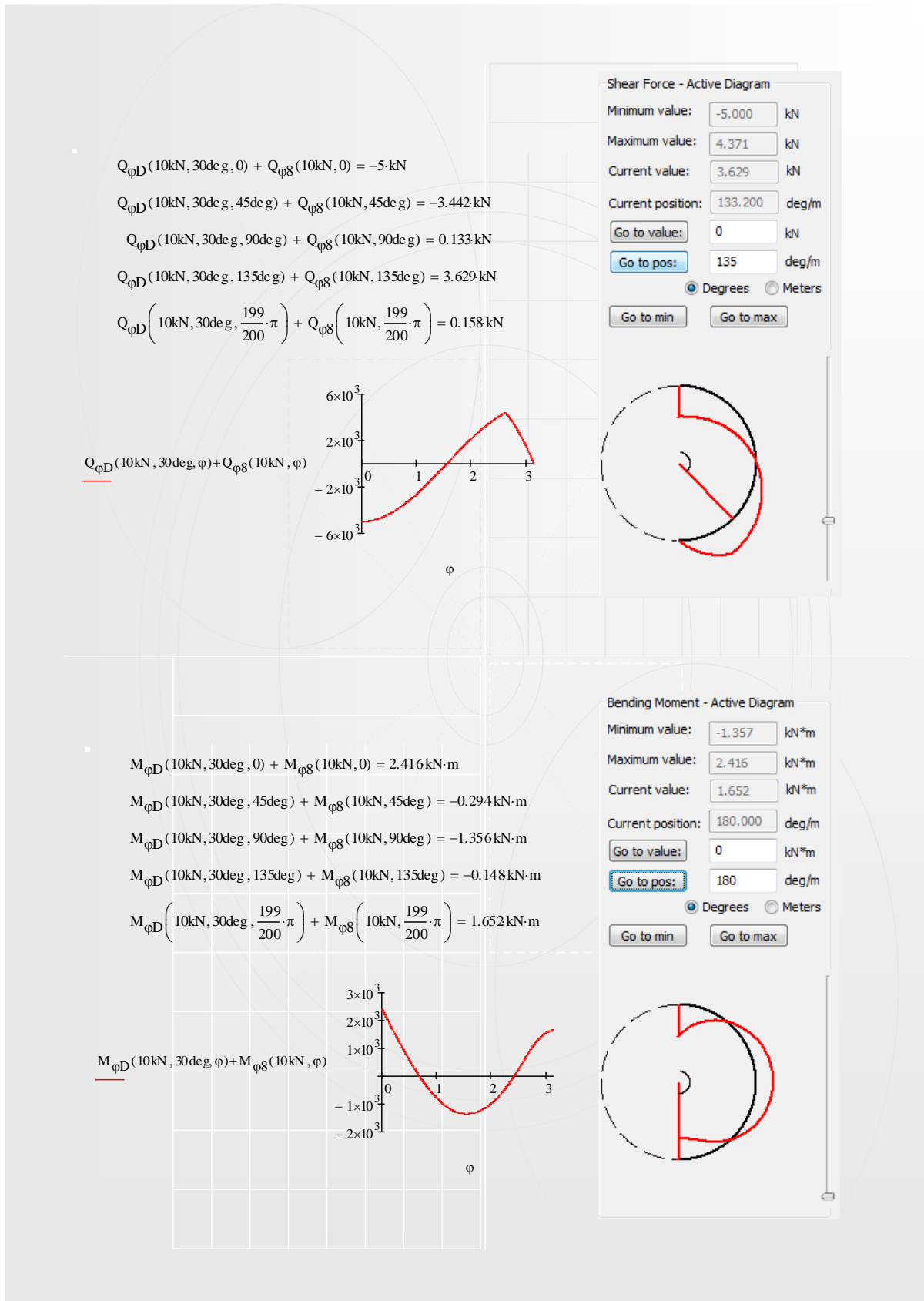


Fig. 6.28: Reacții uniform distribuită, dirijată orizontal, dată de o încărcare verticală concentrată de 10 kN - diagramele forței tăietoare și a momentului încovoietor

6.2.2 Calibrare folosind metoda elementelor finite cu ajutorul programului AxisVM 10

Pentru acest pas s-a hotărât crearea unui model de conductă cu diametrul exterior de 1.7m și grosimea peretelui secțiunii de 15cm, la fel ca în cazul precedent. Pentru a realiza un model compatibil în programul *AxisVM*, a fost creat un arc, cu diametrul asemănător cu cel al conductei folosite în programul *PipeDoctor*. Schema încărcărilor folosite, alături de schema statică, sunt prezentate în Fig. 6.29.

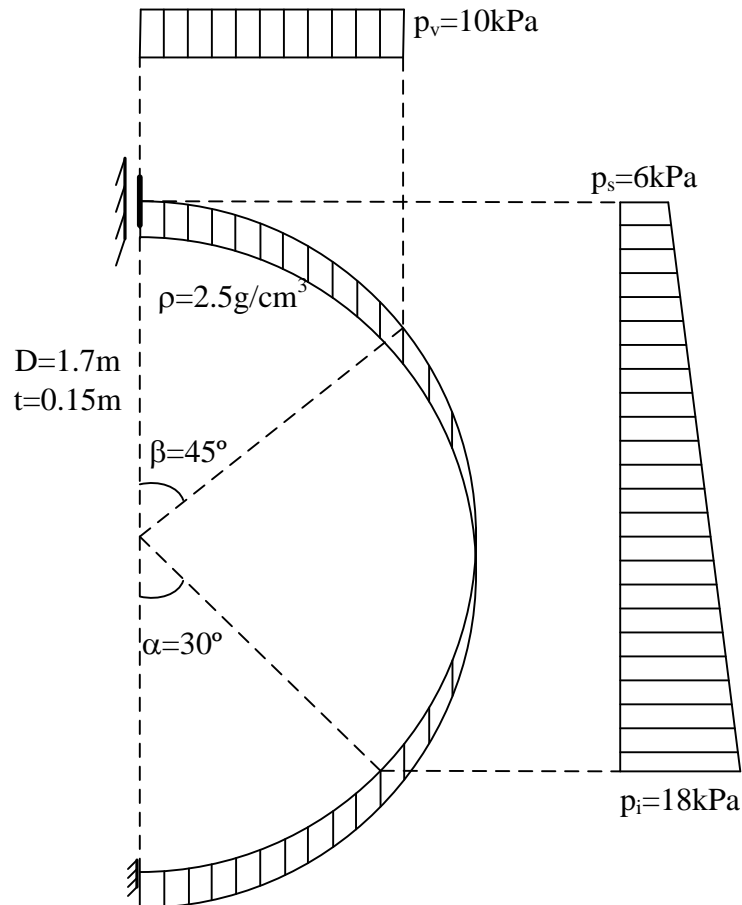


Fig. 6.29: Schema statică folosită pentru calibrarea cu ajutorul programului AxisVM 10

Rezultatele obținute pe modelul introdus în *AxisVM*, alături de cele obținute folosind programul *PipeDoctor* sunt următoarele:

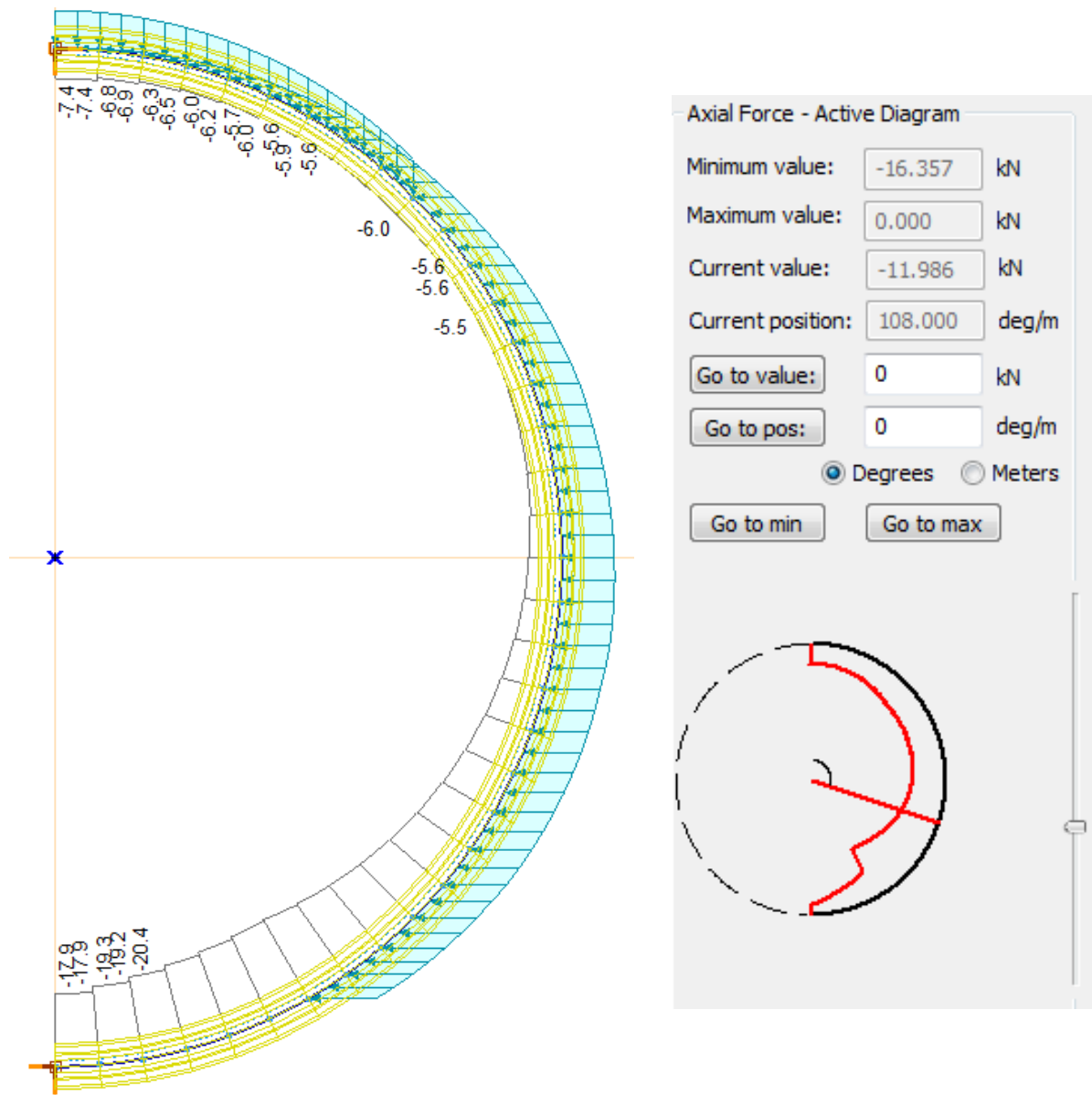


Fig. 6.30: Diagramele forțelor axiale pe modelul propus

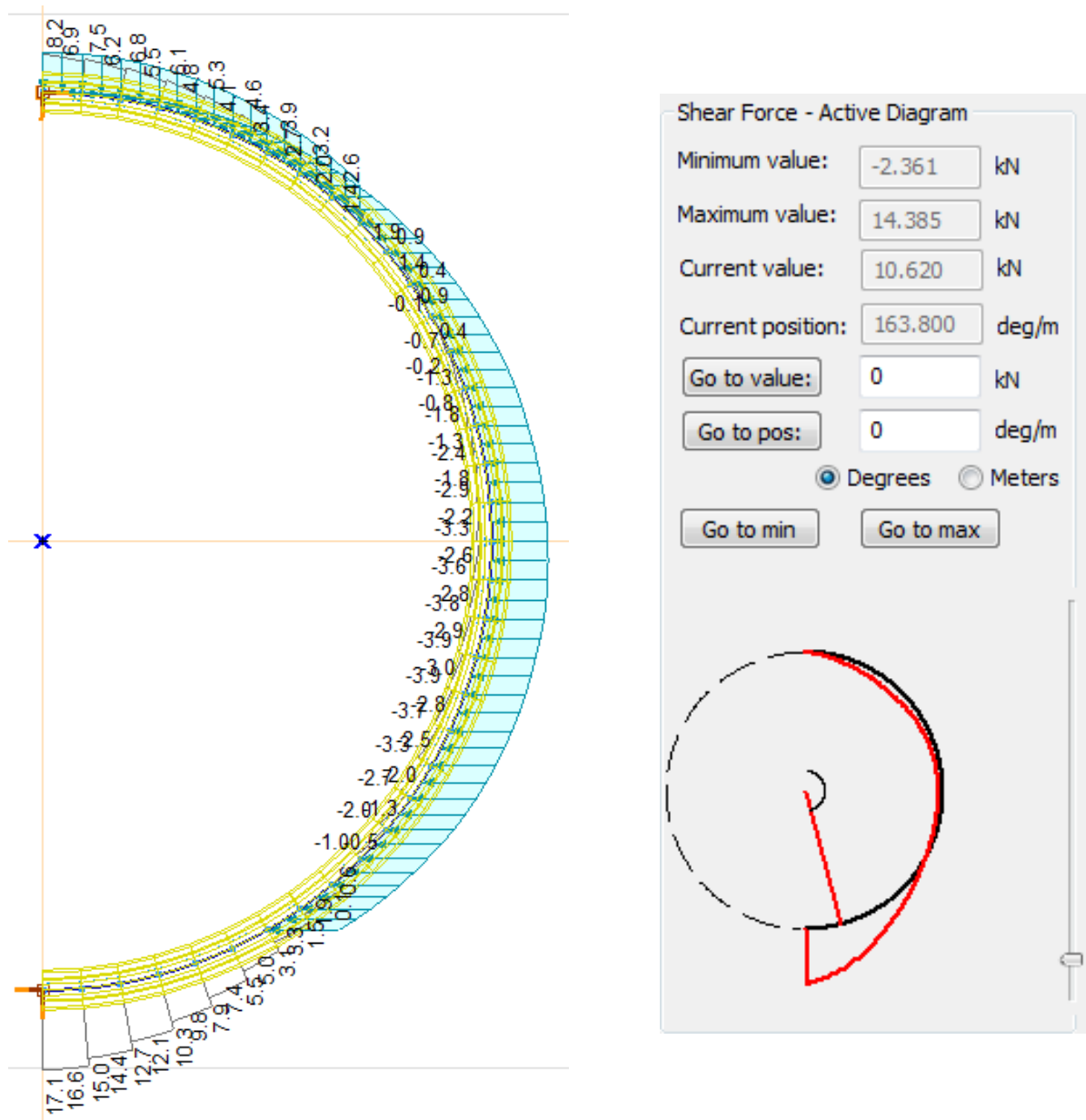


Fig. 6.31: Diagramele forțelor tăietoare pe modelul propus

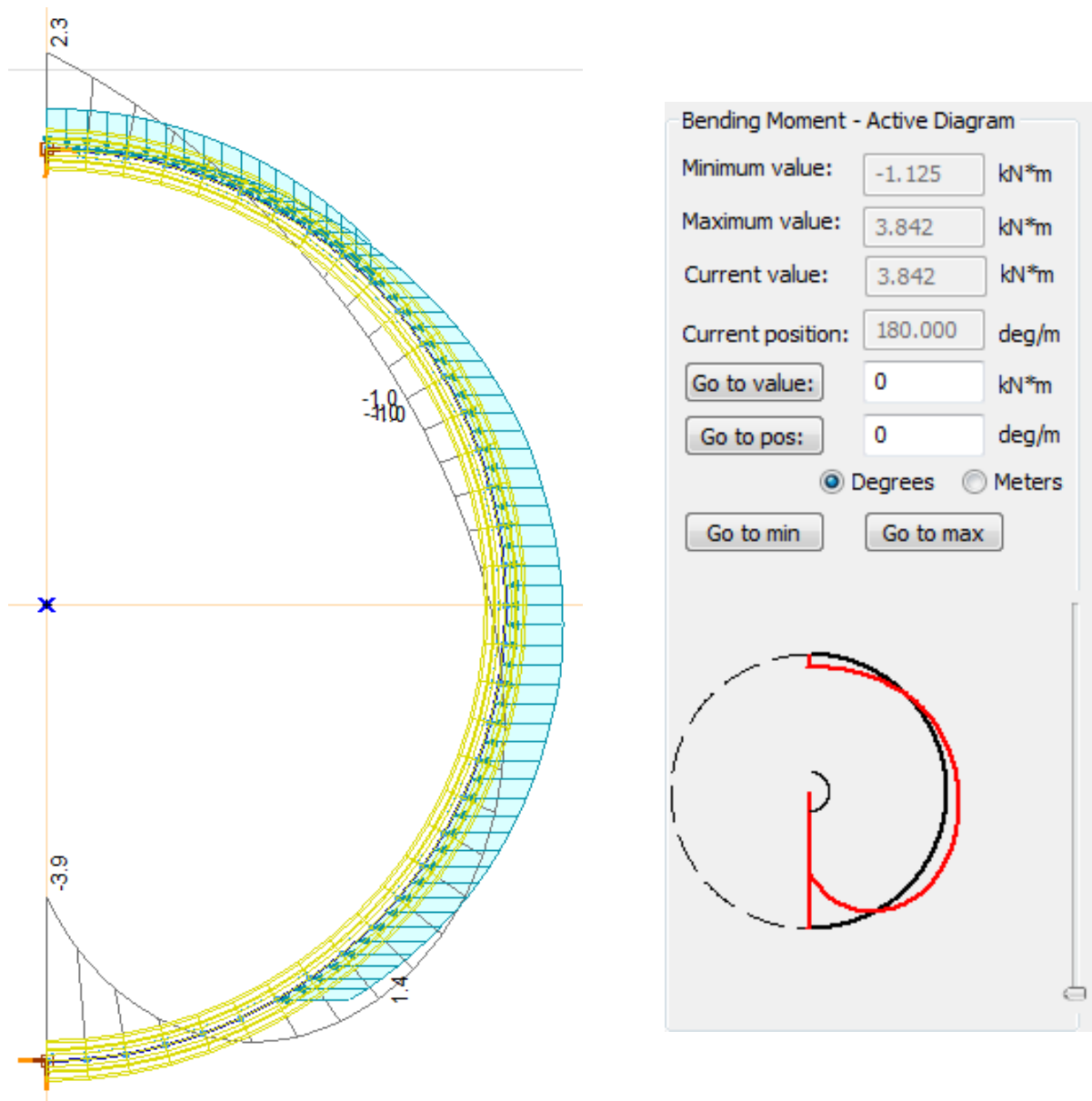


Fig. 6.32: Diagramele momentelor încovoietoare pe modelul propus

7 CONCLUZII

Lucrarea de disertație prezintă implementarea unor modele de calcul unor elemente structurale îngropate. Aplicația poate fi folosită fie la dimensionarea lucrărilor de susținere necesare instalării unor conducte îngropate și al calculului structural al conductei, dar și ca instrument în proiectarea lucrărilor de artă în domeniul infrastructurilor de transport, prin metoda cut-and-cover sau prin metoda săpării cu scut.

Aplicația prezintă avantajul implementării unor modele de calcul specifice teoriei elasticității cu considerarea unor modele constitutive neliniare pentru pământuri din punct de vedere al comportării efort-deformație. Au fost propuse următoarele modele de variație a coeficientului de pat: constant, constant pe domenii, exponențial și polinomial precum și două relații empirice din practica ingierească (Schmitt și Menard).

Pentru calibrarea programului au fost utilizate atât metode analitice cât și diferite implementări ale Metodei Elementelor Finite, fiind obținute rezultate foarte bune în toate cazurile.

Ca direcții ulterioare de dezvoltare ale programului se au în vedere implementarea unor noi secțiuni cu aplicație largă (rectangulare, ovoidale și sub formă de clopot semieliptic și circular) pentru dimensionarea structurilor înglobate precum și introducerea calculului de șpraițuri și contrafișe pentru metoda cut-and-cover.

Se are în vedere, de asemenea, dezvoltarea aplicației și pentru dimensionarea structurilor discontinue de sprijin.

BIBLIOGRAFIE

Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnson JR, John T. Dewolf – Mechanics of Materials, McGraw-Hill Education, 2006

Furiș, D, Teodorescu, M.E., Sorohan, L. – Calculul structurilor pentru transportul apei, Ed. Conspress București, 2005

Manoliu, I. – Fundații și procedee de fundare, Ed. Tehnică București, 1983

Monaco P., Marchetti S.– Evaluation of the coefficient of subgrade reaction for design of multipropped diaphragm walls from DMT moduli, University of L'Aquila, Italy

Popa, H. – Recomandări privind calculul pereților de susținere a excavațiilor adânci și evaluarea riscului asociat asupra mediului construit, Ed. Conspress București, 2009

Scheinerman, E. – C++ for mathematicians, Chapman&Hall/CRC Taylor&Francis Group, 2006

* * – Eurocod 7: SR EN 1997-1:2004: Proiectarea geotehnică

* * – http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Beams/Beam_theory.html

* * – MSDN – Library for Visual Studio 2008, Microsoft Corp.

* * – STAS 3221/86 – Poduri de șosea. Convoaie tip și clase de încărcare