

Plooistabiliteit van open stalen buispalen in gedraineerde grondlagen

Afstudeerverslag

Auteur:	ing. M. (Max) van Splunter B.V. Ingenieursbureau M.U.C.
Begeleider:	Dr. ir. D.J. (Dirk Jan) Peters Royal HaskoningDHV
Opleiding:	Constructief Ontwerper BV/BmS
Cursusjaar:	2021/2022
Datum:	18-8-2022

Plooistabiliteit van open stalen buispalen in gedraineerde grondlagen

Afstudeerverslag

Auteur: ing. M. (Max) van Splunter
B.V. Ingenieursbureau M.U.C.
Begeleider: Dr. ir. D.J. (Dirk Jan) Peters
Royal HaskoningDHV
Opleiding: Constructief Ontwerper BV/BmS
Cursusjaar: 2021/2022
Datum: 18-8-2022

Revisie:	Omschrijving:	Datum:
1.0	Eerste uitgave van dit rapport	18-8-2022

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerverslag van de kandidaat Max van Splunter. Het betreft een onderzoek naar de effecten van gronddruk op het ovaliseren van open stalen buispalen in de bodem.

Ik wil mijn afstudeerbegeleider Dirk Jan Peters bedanken voor zijn begeleiding tijdens het afstudeeronderzoek. Daarnaast wil ik Diana FEA BV, en met name Marco Bolognin, bedanken voor de ondersteuning met betrekking tot het eindige elementenpakket Diana FEA en het ter beschikking stellen van een studentenlicentie gedurende de afstudeerperiode.

Tenslotte wil ik mijn collega's van B.V. Ingenieursbureau M.U.C. en mijn familie en vrienden bedanken voor de hulp en support welke ik heb mogen ontvangen tijdens deze studie.

Terheijden, 18-8-2022

Max van Splunter



Inhoudsopgave

1	Introductie	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Hoofd- en deelvragen	2
1.5	Leeswijzer	3
1.6	Symbolen	3
2	Theoretisch kader	4
2.1	Definities en functies	4
2.1.1	Afmeerpaal	4
2.1.2	Constructieve elementen	4
2.1.3	Spanningen en stijfheid	4
2.1.4	Grenstoestanden	5
2.2	Materiaalmodellen	6
2.2.1	Geotechnische modellen	6
2.2.2	Staal modellen	8
2.2.3	Lineair elastisch isotroop materiaal	9
2.2.4	Lineair elastisch orthotroop materiaal	10
2.3	Geotechniek	11
2.3.1	Gronddruk factoren: Brinch Hansen	11
2.3.2	Gronddrukfactoren volgens DIN 4085	12
2.3.3	Beddingsconstante	13
2.4	Staaldoorsnede	14
2.4.1	Doorsnedeclassificatie en rekenmodellen	14
2.4.2	Doorsnede eigenschappen	15
2.4.3	Analytisch moment-krommingsdiagram	16
2.4.4	Plooiweerstand	19
3	Methodologie	21
3.1	Algemeen	21
3.2	Uitgangspunten	22
3.2.1	Mechanische (materiaal)eigenschappen	22
3.2.2	Tolerantie op onrondheid	22
3.2.3	Imperfecties conform Eurocode	23
3.2.4	Geotechnische gegevens	24
3.3	Onderzoeksgrenzen	26
3.4	Randvoorwaarden	26
3.5	Modellering	27
3.5.1	Belastingen, randvoorwaarden en symmetrie	27
3.5.2	Elementen en elementgrootte	29

3.5.3	Materiaal	30
3.5.4	Niet-lineaire berekening	31
4	Resultaten.....	33
4.1	lineair-elastische bifurcatie analyse (LBA)	34
4.2	GMNIA analyse: lege buis	35
4.2.1	Moment-kromming	35
4.2.2	Ovalisatie lege buis.....	39
4.2.3	Momentcapaciteit.....	43
4.3	GMNIA analyse: lege buis met uitwendige gronddruk	45
4.3.1	Ovalisatie ten gevolge van gronddruk	46
4.3.2	Verdeling van passieve gronddruk op de buispaal.....	47
5	Conclusie en aanbevelingen	49
5.1	Conclusie	49
5.2	Aanbeveling	49
6	Reflectie	50
6.1	Reflectie op het vooronderzoek.....	50
6.2	Reflectie op de gehanteerde onderzoeksmethodologie	50
6.3	Reflectie op de uitkomsten	50
Bijlage 1	Plooiweerstand conform Eurocode (kritische spanning)	1-1
B 1.1	Karakteristieke plooiweerstand.....	1-1
B 1.2	Plooiactoren	1-1
Bijlage 2	Plooiweerstand conform CUR Dolphins (kritische rek)	2-1
B 2.1	Onrondheid	2-1
B 2.2	Ovalisatie ten gevolge van uitwendige gronddruk	2-1
B 2.3	Ovalisatie ten gevolge van tweede-orde effecten	2-2
B 2.4	Effecten van (zand)vulling	2-2
Bijlage 3	Interface elementen	3-1
Bijlage 4	Elementen.....	4-1
Bijlage 5	Model B python script	5-1
Bijlage 6	Diana invoer.....	6-1
B 6.1	Project eigenschappen	6-1
B 6.2	Materiaaleigenschappen	6-2
B 6.3	Element geometrie.....	6-4
B 6.4	Opleggingen en symmetrie voorwaarden.....	6-4
B 6.5	Belastingen	6-7
B 6.6	Connecties.....	6-10
B 6.7	Mesh	6-11
B 6.8	Analyse	6-12
Bijlage 7	Momentcapaciteit conform EC3-1-6; bijlage E	7-1
Bijlage 8	Grondrukfactoren.....	8-1

1 Introductie

1.1 Achtergrond

In de Rotterdamse haven bevinden zich diverse ligplaatsen voor grote zeeschepen. Deze ligplaatsen zijn opgebouwd uit afmeerpalen en trospalen. De afmeer- en trospalen worden belast door een horizontale (stoot)belasting welke resulteert in een dwarskracht en buigend moment in de palen.

Vanwege de geometrie van deze palen zijn dit vaak doorsnede klasse 4 profielen en dienen daarom gecontroleerd te worden op plooistabiliteit.

In NEN-EN 1993-1-6 zijn rekenregels gegeven voor het controleren van plooistabiliteit van lege stalen buisprofielen. Daarnaast zijn in CUR211 Handboek kademuren en CUR Flexible Dolphins rekenregels gegeven in aanvulling op de rekenregels van de NEN-EN 1993-1-6 voor de plooistabiliteit van een open stalenbuispaal in de bodem. Voor het bepalen van de doorsnede capaciteit van de open stalen buispalen wordt onderscheidt gemaakt in drie zones, te weten:

Zone 1: lege stalen buispaal boven de bodem;

Zone 2: deels gevulde buis met uitwendige gronddruk, inclusief het effect van ovalisatie;

Zone 3: volledig gevulde buis met uitwendige gronddruk waarbij het effect van ovalisatie wordt verwaarloosd.

Voor de paalsecties in zone 2 wordt het effect van ovalisatie in rekening gebracht. Een doorsnede met een grote D/t-verhouding heeft de neiging om een ovale vorm aan te nemen ten gevolge van het buigend moment en de horizontale gronddruk op de paal. Door het ovaliseren van de paal ontstaat een 'plat' bovengedeelte, met een grotere radius ten opzichte van de oorspronkelijke paal, wat de gevoeligheid van plooistabiliteit vergroot.

Palen in de grond, waarbij een grondplug aanwezig is, zijn minder gevoelig tegen ovaliseren en hebben daarom een grotere weerstand tegen plooi. Door de grondvulling in de buispaal ontstaat een interne druk welke het effect van ovalisatie (gedeeltelijk) teniet doet.

Volgens de rekenmethodiek van CUR Flexible Dolphins en Handboek kademuren wordt de externe gronddruk geschematiseerd als gelijkmatig verdeelde (externe) belasting. De grondplug in de paal, indien aanwezig, wordt geschematiseerd als lineaire veren. Het is onbekend in hoeverre deze schematisatie de werkelijke interactie tussen de horizontale gronddruk, ovalisatie van de paal en de effecten van de grondplug benaderen.

Aangezien de stijfheidsrelatie tussen de horizontale gronddruk, ovalisatie van de paal en de effecten van de grondplug van open stalen buispalen in de bodem een onderbelicht onderdeel is in de vigerende normen en richtlijnen, is de belangstelling ontstaan om onderzoek te doen naar de invloed van de (verlopende) horizontale gronddruk en de grondplug op het effect van ovalisatie van de paal.

Tenslotte is plooistabiliteit van een gekromde doorsnede (buisprofiel) een onderwerp wat niet direct is opgenomen in het curriculum van de opleiding Constructief Ontwerper BvBmS wat daarmee mooi aansluit bij het 'verdiepende' karakter van een afstudeeronderzoek..

1.2 Probleemstelling

In de vigerende normen en richtlijnen wordt de externe gronddruk geschematiseerd als gelijkmatig verdeelde (externe) belasting. De grondplug in de paal, indien aanwezig, wordt geschematiseerd als lineaire veren. Het is onbekend in hoeverre deze schematisatie de werkelijke interactie tussen de horizontale gronddruk, ovalisatie van de paal en de effecten van de grondplug benaderen.

Op basis van het voorgaande is de interesse ontstaan om praktijkgericht onderzoek te doen naar de plooistabiliteit van open stalen buispalen en de invloed van de horizontale gronddruk op het effect van ovaliseren.

In het praktijkgerichte onderzoek worden resultaten op basis vigerende normen en richtlijnen vergeleken met meer “geavanceerde” berekeningen. De meer “geavanceerde” berekeningen worden uitgevoerd met behulp van eindige elementen software om te onderzoeken hoe de resultaten op basis van de vigerende normen en richtlijnen zich verhouden tot een meer “geavanceerde” model, en of het uitvoeren van dergelijke berekeningen kansen biedt in de markt. Op dit moment is het in de markt niet duidelijk voor welke situaties de vigerende normen en richtlijnen resulteren in een veilig ontwerp en/of wanneer deze normen en richtlijnen te conservatief zijn.

Het praktijkgerichte onderzoek wordt uitgevoerd voor homogene gedraineerde grond wat onder andere veel voorkomt op de Maasvlakte. Hier zijn meerdere beweegredenen voor, te weten:

- Op de Maasvlakte bevinden zich diverse maritieme constructies welke zijn opgebouwd uit open stalen buispalen;
- De bodemopbouw van de Maasvlakte is relatief homogeen en bestaat voornamelijk uit goed gedraineerde grondlagen (zand) met een grote pakkingsdichtheid. Omdat CUR Dolphins, ongeacht de bodemopbouw, een relatief lage stijfheid voor de grondvulling voorschrijft lijkt dit een vrij conservatief uitgangspunt;
- Op de Maasvlakte is veel geotechnisch onderzoek uitgevoerd waardoor dit een geschikte locatie is.

1.3 Doelstelling

In dit afstudeeronderzoek wordt de plooistabiliteit van open stalen buispalen in de bodem onderzocht. De doelstelling van het onderzoek is om door middel van eindige elementenberekeningen, en op basis van literatuur en de verschillende vigerende normen en richtlijnen, inzage te krijgen in de effecten van (passieve) gronddruk op het ovaliseren van open stalen buispalen in de bodem.

1.4 Hoofd- en deelvragen

De hoofdvraag van het afstudeeronderzoek luidt als volgt:

“Op welke (alternatieve) manier kunnen de (verlopende) horizontale gronddruk, en de effecten van ovalisatie van een open stalen buispaal in de bodem, gemodelleerd worden zodat een veilig doch economisch ontwerp ontstaat?”

Om de bovenstaande hoofdvraag te beantwoorden dienen de volgende deelvragen beantwoord te worden:

- Welke (relevante) literatuur is beschikbaar binnen het vakgebied (e.g. welke materiaalmodellen zijn beschikbaar)?
- Welke symmetrievorwaarden zijn van toepassing op het model?
- Hoe kan de interactie tussen de stalen paal en het grondmodel gemodelleerd worden in Diana?
- Hoe ziet het moment-krommingsdiagram voor een lege buis eruit?
- Welke invloed hebben imperfecties op het ovaliseren van de paal?
- Is de uitwendige gronddruk gelijkmatig verdeeld over de diameter van de paal?
- Wat is de invloed van de uitwendige gronddruk op het ovaliseren van de paal?
- Wat is de invloed van de steundruk, en welke beddingsconstante is representatief voor het voorkomen van ovalisatie in van de paal?

Door de bovenstaande hoofd- en deelvragen te beantwoorden wordt getracht een constructief standpunt in te nemen inzake het ontwerp van open stalen buispalen in de bodem waarbij het effect van ovalisatie in rekening wordt gebracht (c.q. paalsecties in zone 2).



1.5 Leeswijzer

In deze rapportage is het afstudeeronderzoek gepresenteerd van de kandidaat Max van Splunter. Het betreft een onderzoek naar de plooi weerstand van open stalen buispalen in gedraineerde grondlagen. In hoofdstuk 2 wordt het theoretisch kader gepresenteerd. In hoofdstuk 3 wordt de methodologie behandeld. In hoofdstuk 4 worden de resultaten gepresenteerd. In hoofdstuk 5 worden, op basis van de resultaten, conclusies en aanbevelingen gepresenteerd. Tenslotte wordt het afstudeerrapport in hoofdstuk 6 afgesloten met een (persoonlijke) reflectie.

1.6 Symbolen

De volgende symbolen zijn van toepassing:

Hoofdletters

A	Doorsnede oppervlak	[m ²]
D	Middellijn van de buis	[m]
E	Elasticiteitsmodulus	[N/m ²]
E _{oed}	Oedometer stijfheid	[N/m ²]
E _{50;ref}	Secant stijfheid	[N/m ²]
E _{ur}	Ontlasting/ herbelasting stijfheid	[N/m ²]
E _M	De elasticiteitsmodulus volgens Ménard, $E_M = \beta \cdot q_c$	[N/m ²]
G	Glijdingsmodulus, $G = E/(2 \cdot (1 + \nu))$	[N/m ²]
I	Kwadratisch oppervlakmoment	[m ⁴]
R	Halvemiddellijn van de buispaal	[m]
R ₀	Referentiestraal van 0,3 meter	[m]

Kleine letters

c	Cohesie	[N/m ²]
f _{yd}	Vloeigrens	[N/m ²]
f _{ud}	Treksterkte	[N/m ²]
k _h	Horizontale beddingconstante	[m]
w	Zakking	[m]
q _c	Conusweerstand	[N/m ²]
z	niveau onder maaiveld	[m]

Griekse letters

α	Ovalisatie	[m]
α_R	Rheologische factor	[-]
β	Rheologische factor	[-]
δ	Wandwrijvingshoek	[°]
ε	Rek	
κ	Kromming	[1/m]
ν	Dwarscontractie	[-]
ρ	Soortelijke massa	[kg/m ³]
φ'	Hoek van inwendige wrijving	[°]

Eenheden

L	Lengte	[m]
ρ	Massa	[kg]
F	Kracht	[N]
t	Tijd	[sec]
θ	Hoek	[°]

2 Theoretisch kader

In dit hoofdstuk wordt het theoretisch kader gepresenteerd waarin de relevante literatuur voor het afstudeeronderzoek wordt beschouwd. Allereerst worden de definities en functies beschouwd. Vervolgens worden verschillende materiaalmodellen gepresenteerd welke relevant zijn voor het ontwerp van open stalen buispalen in gedraineerde grondlagen. Daarna worden verschillende methoden uit de literatuur behandeld waarmee de grondmechanische capaciteit kan worden bepaald ten behoeve van een Blum model en/of een verende ondersteuning. Tenslotte wordt in het theoretisch kader de controle van de stalen doorsnede beschouwd.

2.1 Definities en functies

In de navolgende paragraaf worden enkele relevante definitief en functies besproken.

2.1.1 Afmeerpaal

Een afmeerpaal is een maritieme constructie welke wordt toegepast in havens, waterwegen en andere plekken welke relevant zijn voor scheepvaart [8]. Conform [8] hebben afmeerpalen de volgende functies:

- Het veilig afmeren van schepen;
- Het beschermen van (maritieme) constructies achter de afmeerpalen (crash barrier);
- Navigatiehulpmiddel.

2.1.2 Constructieve elementen

2.1.2.1 Schaal

Een constructie of constructieonderdeel welke bestaat uit een gebogen dunne plaat.

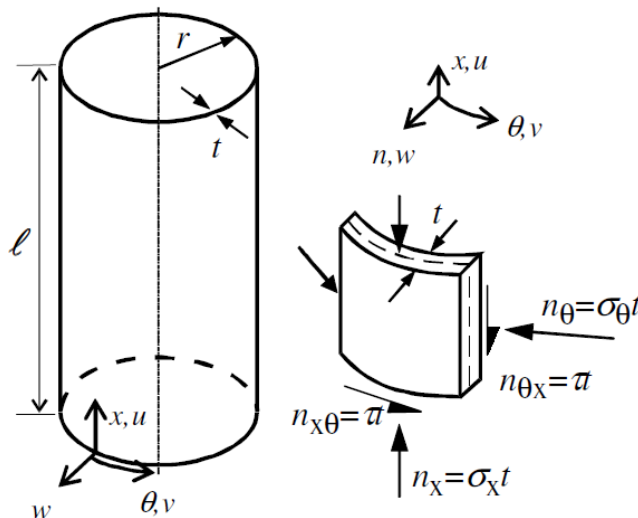
2.1.2.2 Buispaal

Een cilindrische schaalconstructie met een constante radius.

2.1.3 Spanningen en stijfheid

2.1.3.1 Membraankracht

De membraankracht is de kracht per eenheidslengte van de schaal die optreedt ten gevolge van de normaalspanningen en schuifspanningen parallel aan het midden van de schaal. De membraan-spanning wordt gedefinieerd als de membraankracht gedeeld door de schaaldikte. De membraan-spanning en membraankracht zijn illustratief weergegeven in figuur 2-1.



Figuur 2-1 Membraanspanning en membraankracht (bron: [13])



2.1.3.2 Kritische spanning

De membraanspanning behorende bij de laagste bifurcatie bij ideale condities zoals perfect elastisch materiaal, perfecte geometrie, perfect aangrijpende belasting, perfecte opleggingen, isotroop materiaalgedrag en geen restspanningen.

2.1.3.3 Deviatorspanningen

Distorsie (deviatorspanningen) is het gevolg van gedaanteverandering. De bezwijkwaarde van materiaal wordt vaak bepaald op basis van distorsie (Von Mises).

2.1.3.4 Isotrope spanningen

Compressie (isotrope spanningen) is het gevolg van volumeverandering.

2.1.3.5 Triaxiaal stijfheid E_{tr}

Stijfheid bepaald op basis van een triaxiaal proef waarbij op het monster zowel een verticale als horizontale spanning wordt aangebracht.

2.1.3.6 Ontlasting/herbelasting stijfheid E_{ur}

Ontlasting/herbelasting stijfheid op basis van een triaxiaalproef.

2.1.3.7 Oedometer stijfheid E_{oed}

Stijfheid bepaald op basis van een ééndimensionale samendrukkingsproef waarbij enkel verticale vervormingen optreden.

2.1.4 Grenstoestanden

2.1.4.1 Plastische grenstoestand

Een uiterste grenstoestand waarbij in de constructie vloeigebieden ontstaan van dusdanige aard dat de constructie onvoldoende restcapaciteit over heeft om de belasting verder te laten toenemen [13].

2.1.4.2 Elastische grenstoestand

Een uiterste grenstoestand waarbij de constructie belast wordt totdat de eerste vloeigebieden ontstaan.

2.1.4.3 Plooistabiliteit

Een uiterste grenstoestand waarbij de constructie plotseling instabiel wordt ten gevolge van membraan drukkrachten en/of schuifspanningen [13]. Het resulteert in grote verplaatsingen waardoor de constructie niet meer in staat is de optredende belasting te dragen.

2.1.4.4 Bezwijken van de passieve wig (GEO)

Een uiterste grenstoestand waarbij, ten gevolge van een overschrijding van de maximum horizontale korrelspanning, een afschuifvlak in de grond ontstaat.

2.1.4.5 Verticaal evenwicht(GEO)

Het verticaal evenwicht is afhankelijk van de verticale resultante van de mobilisatie van de passieve gronddrukken, de schachtwrijving, het gewicht van de paal en de grondplug en extern aangrijpende belastingen (bijvoorbeeld een bolderbelasting).

2.2 Materiaalmodellen

In deze paragraaf worden de relevante geotechnische- en staal materiaalmodellen besproken.

2.2.1 Geotechnische modellen

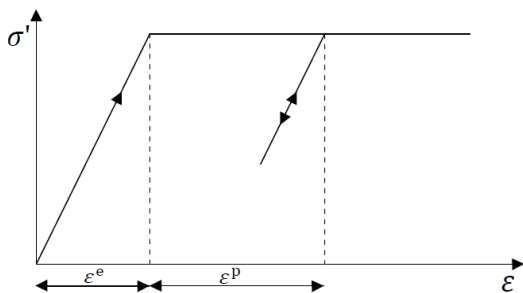
Voor een horizontaal belaste paal kunnen de volgende geotechnische materiaalmodellen worden aangehouden.

Tabel 2-1 Geotechnische parameters bij verschillende materiaalmodellen

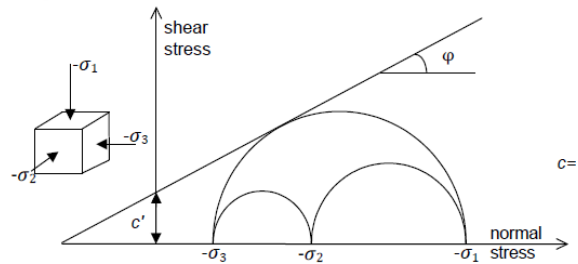
Materiaalmodel [-]	Parameters [-]
Blum-model	γ, ϕ, δ en c
Verende ondersteuning	γ, ϕ, δ, c en k_h
Eindige Elementen methode	$\gamma, \phi, \delta, c, E, \nu$ en ψ

2.2.1.1 Mohr-Coulomb (MC)

Het Mohr-Coulomb model is een elastisch perfect-plastisch materiaalmodel, waarbij de bezwijkwaarde wordt vastgelegd binnen de hoofdspanningsruimte. Met andere woorden, er wordt geen rekening gehouden met versteviging ten gevolge van plastische rekken. Daarnaast heeft Mohr-Coulomb een constante stijfheid over de diepte (onafhankelijk van de verticale korrelspanning).



Figuur 2-2 elastisch perfect-plastisch materiaalmodel
(bron: [20])



Figuur 2-3 Mohr-Coulomb materiaalmodel (bron: [20])

De bezwijkwaarde van Mohr-Coulomb is gebaseerd op basis van schuifspanningen in combinatie met normaalspanningen. Een grotere normaal (druk)spanning resulteert in een hogere toelaatbare schuifspanning en daarmee een hogere bezwijkwaarde, zie bovenstaande figuur.

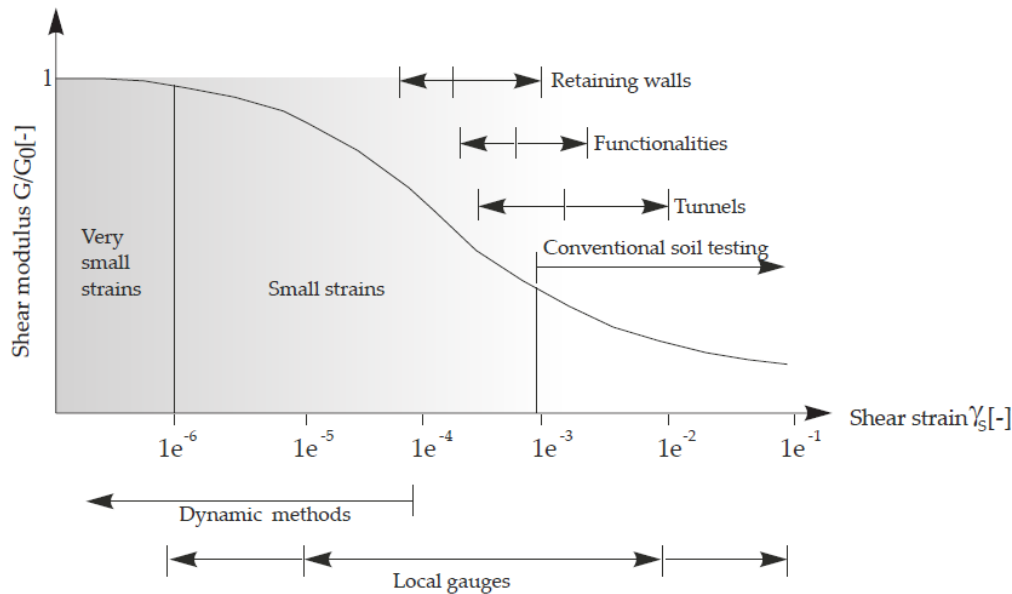
2.2.1.2 Hardening Soil (HS)

In tegenstelling tot het elastisch perfect-plastisch materiaalmodel van Mohr-Coulomb, wordt bij het Hardening Soil model rekening gehouden met plastische rekken buiten de hoofdspanningsruimte (plastische versteviging). Met andere woorden, het Hardening Soil model houdt rekening met een spanningsafhankelijke stijfheid [5]. Bij het Hardening Soil model zijn de volgende kenmerken van toepassing, te weten:

- Spanningsafhankelijke stijfheid ten gevolge van plastische rekken buiten de hoofdspanningsruimte;
- Plastische rek ten gevolge van deviatorische belasting en primaire samendrukking. Met andere woorden, er wordt rekening gehouden met de triaxiaalstijfheid en Oedometer stijfheid;
- Belastingsgeschiedenis (voorconsolidatiespanning);
- Onafhankelijke definitie van elastische gedrag in ontlasting en herbelasting;
- Gebaseerd op het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium.

2.2.1.3 Hardening Soil small-strain (HSS)

Het Hardening Soil small-strain model is een gemodificeerd model van Hardening Soil waarbij rekening wordt gehouden met een verhoogde stijfheid bij kleine rekken [5].



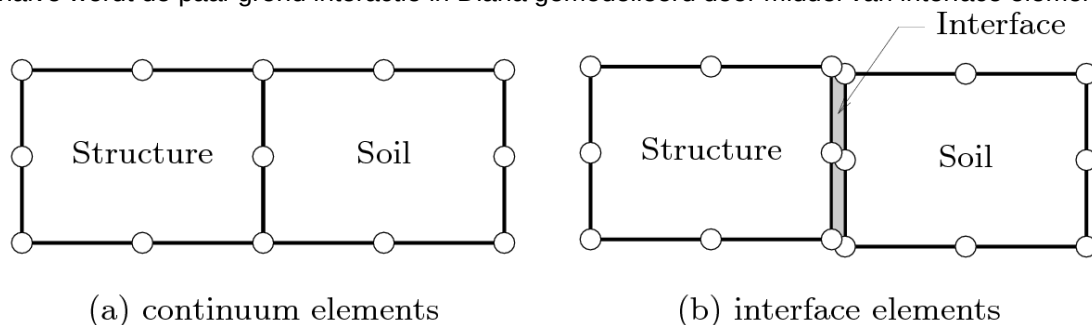
Figuur 2-4 stijfheid-rekgedrag van grond (bron: [20])

2.2.1.4 Soft Soil Creep Model (SSC)

Het Soft Soil Creep Model houdt rekening met de viscositeit van grond welke met name relevant zijn voor ongedraineerde grondlagen [5]. Het SSC model zal derhalve niet verder worden beschouwd.

2.2.1.5 Grond-paal interface

Bij de interactie tussen de grond en de paal kan een relatieve verplaatsing van de paal ten opzichte van de grond optreden. Indien enkel continuümelementen worden toegepast is het niet mogelijk dat een relatieve verplaatsing optreedt op het grensvlak van de paal en de grond, zie figuur 2-5. Derhalve wordt de paal-grond interactie in Diana gemodelleerd door middel van interface elementen.



Figuur 2-5 Interface elementen (bron: [9])

Interface elementen zijn verbindings-elementen welke kunnen worden toegepast om de interactie tussen de paal en de bodem te modelleren. Door het toepassen van interface elementen is het mogelijk dat een relatieve verplaatsing van de paal ten opzichte van de grond kan plaatsvinden. Daarnaast bieden interface elementen de mogelijkheid om een (spleet)opening te creëren indien de interface wordt belast op trekspanningen. In Diana zijn er twee typen interface elementen waarbij dit mogelijk is, te weten:

- Niet-lineaire interface;
- Coulomb-friction interface.

Voor nadere toelichting voor de typen interfaces wordt verwezen naar bijlage 3.

2.2.2 Staal modellen

De volgende materiaal modellen en/of eigenschappen hebben invloed op het bezwijkcriterium van de stalen doorsneden.

2.2.2.1 Von Mises

De bezwijkwaarde van het Von Mises criterium is gebaseerd op basis van de gedaante-veranderingsenergie (dorsie). Het Von Mises criterium wordt gebruikt voor de staaldoorsnede, en wordt als volgt omschreven:

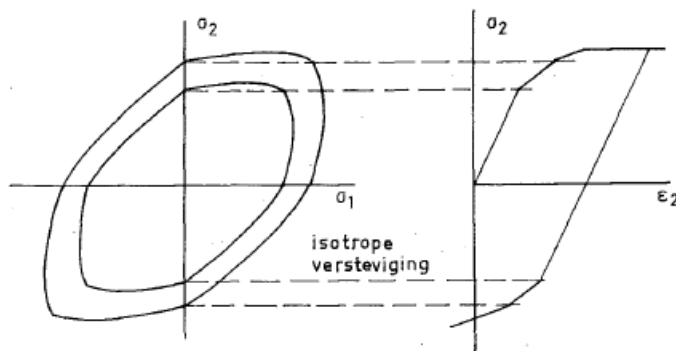
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz}-\sigma_{xx})^2] + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} \leq \sigma_v$$

Voor een 2D plaat (vlakke spanningstoestand) kan het Von Mises criterium vereenvoudigd worden tot:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 3\sigma_{xy}^2} \leq \sigma_v$$

2.2.2.2 Isotrope versterking

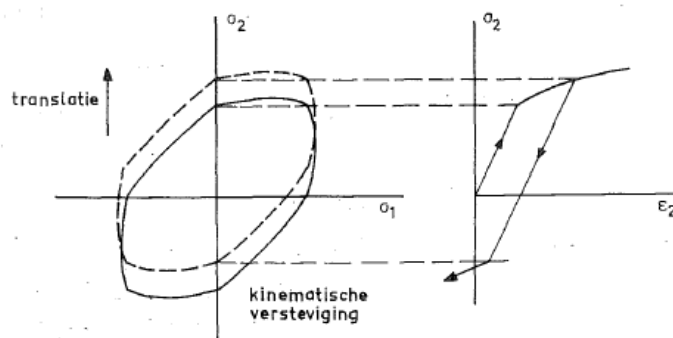
Isotrope versterking is gebaseerd op het 'uitdijen' van de vloeifunctie. Doordat isotrope versterking is gebaseerd op het 'uitdrijven' van de vloeifunctie wordt geen rekening gehouden met het Bauschinger – effect. Isotrope versterking gaat uit van ideale plasticiteit.



Figuur 2-6 Isotrope versterking (bron: [21])

2.2.2.3 Kinematische versterking

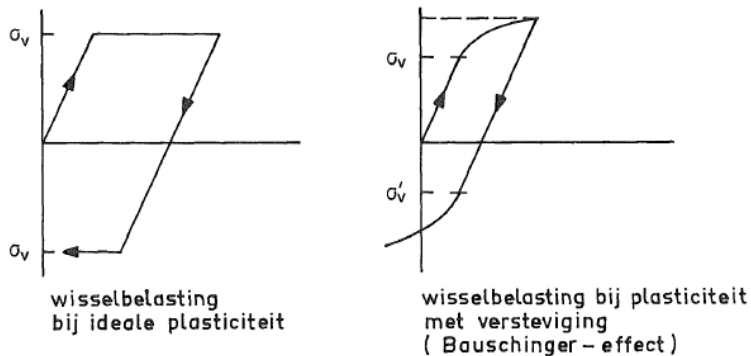
Kinematische versterking is gebaseerd op het transleren van de vloeifunctie in het $\sigma_1 - \sigma_2$ vlak. Doordat de vloeifunctie getransleerd wordt in het $\sigma_1 - \sigma_2$ vlak zal bij een spanning in een tegengestelde richting het niet mogelijk zijn dezelfde vloeispanning te behalen langs een lineair-elastische tak.



Figuur 2-7 Kinematische versterking (bron: [21])

2.2.2.4 Bauschinger – effect

Het Bauschinger – effect omschrijft het fenomeen dat, in tegenstelling tot een ideaal-plastisch materiaal, de vloeispanning bij een wisselbelasting in de andere richting niet even groot is als voorheen is behaald. Met andere woorden, na een wisselbelasting zal eerder vloeioptreden ten gevolge van een belasting in de andere richting.



Figuur 2-8 Bauschinger effect (bron: [21])

2.2.3 Lineair elastisch isotroop materiaal

De constitutieve vergelijking van de Wet van Hooke waarmee de spannings-rek relatie wordt omschreven bedraagt:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E} - \frac{\nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{E}$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\sigma_{yy}}{E} - \frac{\nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})}{E}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{E} - \frac{\nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{E}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \sigma_{xy}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \sigma_{yz}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \sigma_{zx}$$

De bovenstaande relaties wordt als volgt in matrixvorm geschreven.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix}$$

De bovenstaande vergelijking is opgebouwd uit 6 spanningscomponenten, 3 normaalspanningen en 3 schuifspanningen.



2.2.4 Lineair elastisch orthotroop materiaal

Voor orthotroop materiaal kan de constitutieve vergelijking als volgt worden omschreven in matrix-vorm.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{xy}}{E_y} & \frac{-\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xz}}{E_x} & \frac{-\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix}$$

Voor transversale isotrope elasticiteit geldt dat het materiaal in beide orthogonale richtingen dezelfde materiaaleigenschappen heeft. In de normaalrichting van het materiaal gelden andere stijfheidseigenschappen. Het aantal stijfheidsparameters wordt hierbij gereduceerd tot maximaal 5, te weten:

$$\begin{aligned} E_{\parallel} &= E_z \\ E_{\perp} &= E_x = E_y \\ G_{\parallel} &= G_{yz} = G_{zx} \\ G_{\perp} &= G_{xy} \\ \nu &= \nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} \end{aligned}$$

De relatie tussen de glijdingsmodulus G en de elasticiteitsmodulus E wordt hierin als volgt omschreven.

$$G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)}$$

Voor de constitutieve vergelijking geldt dat de determinant van de stijfheidsmatrix groter moet zijn dan 0 om tot een oplossing te komen. Voor transversale isotrope elasticiteit wordt daarom 1/10 van de normaalstijfheid in rekening gebracht ($E_{\perp} = 1/10 \cdot E_{\parallel}$).



2.3 Geotechniek

De optredende spanningen in de buispaal zijn afhankelijk van de bodemopbouw en de daarbij horende grondmechanische capaciteit van de bodem. In de navolgende paragraaf worden diverse analytische methoden beschreven waarmee de grondmechanische capaciteit kan worden bepaald ten behoeve van een Blum model en/of een verende ondersteuning. Bij een Blum model en/of een verende ondersteuning wordt rekening gehouden met elastisch perfect-plastisch materiaalgedrag.

2.3.1 Grondruk factoren: Brinch Hansen

De maximale passieve korreldruk kan worden bepaald door middel van de theorie van Brinch Hansen [4]. De theorie van Brinch Hansen gaat uit van rechte glijvlakken. Daarnaast zijn de diepte en breedte van de paal direct verdisconteerd in de bepaling van de maximaal passieve gronddruk.

De maximaal passieve gronddruk wordt als volgt bepaald:

$$\sigma'_p = K_q \cdot \sigma'_v + K_c \cdot c$$

Waarin:

$$K_p = \frac{K_q^0 + K_q^\infty \cdot \alpha_q \cdot \frac{D}{B}}{1 + \alpha_q \cdot \frac{D}{B}}$$

Waarin:

$$K_q^0 = e^{\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \cdot \tan(\varphi)} \cdot \cos(\varphi) \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \cdot \tan(\varphi)} \cdot \cos(\varphi) \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$K_q^\infty = K_c^\infty \cdot K_0 \cdot \tan(\varphi) = N_c \cdot d_c^\infty \cdot K_0 \cdot \tan(\varphi)$$

$$\alpha_q = \left(\frac{K_q^0}{K_q^\infty - K_q^0} \right) \cdot \left(\frac{K_0 \cdot \sin(\varphi)}{\sin\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)} \right)$$

Waarin:

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi)$$

$$K_c = \frac{K_c^0 + K_c^\infty \cdot \alpha_c \cdot \frac{D}{B}}{1 + \alpha_c \cdot \frac{D}{B}}$$

Waarin:

$$\alpha_c = \left(\frac{K_c^0}{K_c^\infty - K_c^0} \right) \cdot 2 \cdot \sin\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$K_c^0 = \left[e^{\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \cdot \tan(\varphi)} \cdot \cos(\varphi) \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) - 1 \right] \cdot \cot(\varphi)$$

$$K_c^\infty = N_c \cdot d_c^\infty$$

Waarin:

$$N_c = \left[e^{\pi \cdot \tan(\varphi)} \cdot \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) - 1 \right] \cdot \cot(\varphi)$$

$$d_c^\infty = 1,58 + 4,09 \cdot \tan^4(\varphi)$$

2.3.2 Gronddrukfactoren volgens DIN 4085

De maximale passieve gronddruk voor een horizontaal belaste paal kan ook worden bepaald door middel van schelpfactoren.

De grootte van de schelpfactor is afhankelijk van de grondsoort (hoek van inwendige wrijving), de dwarsafmeting van de paal en de diepte onder maaiveld en wordt voor gedraineerde grondlagen als volgt bepaald volgens (DIN 4085):

$$D_{pg}^{er}/D = 1 + 0,9 \cdot z/D \cdot \tan\varphi \quad \text{voor: } z/D \leq 3,33$$

$$D_{pg}^{er}/D = 0,69 \cdot (1 + 2 \cdot \tan\varphi) \cdot \sqrt{z/D} \quad \text{voor: } z/D > 3,33$$

Waarin:

D = dwarsafmeting van de paal [m];
z = niveau onder maaiveld [m];
 φ = hoek van inwendige wrijving [°].

De actieve, neutrale en passieve gronddruk, op basis van rechte glijvlakken (Müller-Breslau), worden als volgt bepaald [6]:

$$K_{y;a;k} = \frac{\cos^2(\varphi' + \alpha)}{\cos^2(\alpha) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi' + \delta_a) \cdot \sin(\varphi' - \beta_a)}{\cos(\alpha - \delta_a) \cdot \cos(\alpha + \beta_a)}} \right]^2}$$

$$K_{y;p;k} = \frac{\cos^2(\varphi' - \alpha)}{\cos^2(\alpha) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi' - \delta_p) \cdot \sin(\varphi' + \beta_p)}{\cos(\alpha - \delta_p) \cdot \cos(\alpha + \beta_p)}} \right]^2}$$

$$K_{y;n;k} = 1 - \sin(\varphi')$$

De actieve en passieve gronddruk coëfficiënt, op basis van een log-spiraalvormig glijvlak (Kötter), wordt als volgt bepaald [7]:

$$K_a = \frac{1 - \sin(\varphi') \cdot \sin(2 \cdot \alpha + \varphi')}{1 + \sin(\varphi')} \cdot \exp\left\{ \left(-\frac{\pi}{2} + \varphi' + 2 \cdot \alpha \right) \cdot \tan(\varphi') \right\}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin(\varphi') \cdot \sin(2 \cdot \alpha' - \varphi')}{1 - \sin(\varphi')} \cdot \exp\left\{ \left(\frac{\pi}{2} + \varphi' - 2 \cdot \alpha' \right) \cdot \tan(\varphi') \right\}$$

Waarin:

$$\alpha: \quad \cos(2 \cdot \alpha + \varphi' - \delta) = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varphi')}$$

$$\alpha': \quad \cos(2 \cdot \alpha' - \varphi' + \delta) = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varphi')}$$

Om de extra gemobiliseerde gronddruk, ten gevolge van de grondwig achter de paal, in rekening te brengen wordt de schelpfactor verdisconteerd in de actieve, neutrale en passieve gronddrukfactoren.

$$K_a^* = K_{y;a;k} / (D_{pg}^{er}/D)$$

$$K_p^* = K_{y;p;k} \cdot D_{pg}^{er}/D$$

$$K_n^* = K_{y;n;k}$$



2.3.3 Beddingsconstante

De horizontale beddingsconstante kan worden bepaald door middel van een empirische formule (theorie van Ménard). De beddingsconstante wordt als volgt bepaald:

$$\frac{1}{k_h} = \frac{1}{3 \cdot E_M} \left[1,3 \cdot R_0 \cdot \left(2,65 \cdot \frac{R}{R_0} \right)^\alpha + \alpha_R \cdot R \right] \quad \text{indien } R \geq R_0$$

$$\frac{1}{k_h} = \frac{2 \cdot R}{E_M} \cdot \frac{4 \cdot (2,65)^\alpha + 3 \cdot \alpha_R}{18} \quad \text{indien } R < R_0$$

Waarin:

k_h = De horizontale beddingconstante;

R_0 = Referentiestraal van 0,3 meter;

R = Halvemiddellijn van de buispaal;

α_R = Rheologische factor volgens Ménard, zie tabel 2-2;

E_M = De elasticiteitsmodulus volgens Ménard; $E_M = \beta \cdot q_c$;

Waarin:

β = Rheologische factor volgens Ménard, zie tabel 2-2;

q_c = conusweerstand.

De Rheologische factoren zijn afhankelijk van de grondsoort. Een overzicht is gepresenteerd in onderstaande tabel (tabel 2-2).

Tabel 2-2 Rheologische factoren

Grondsoort [-]	α [-]	β [-]
Veen	1,0	3,0
Klei	2/3	2,0
Silt	1/2	1,0
Zand	1/3	0,7
Grind	1/4	0,5

2.4 Staaldoorsnede

In deze paragraaf wordt de literatuur ten behoeve van de controle van sterkte en stabiliteit van de stalen buis beschouwd.

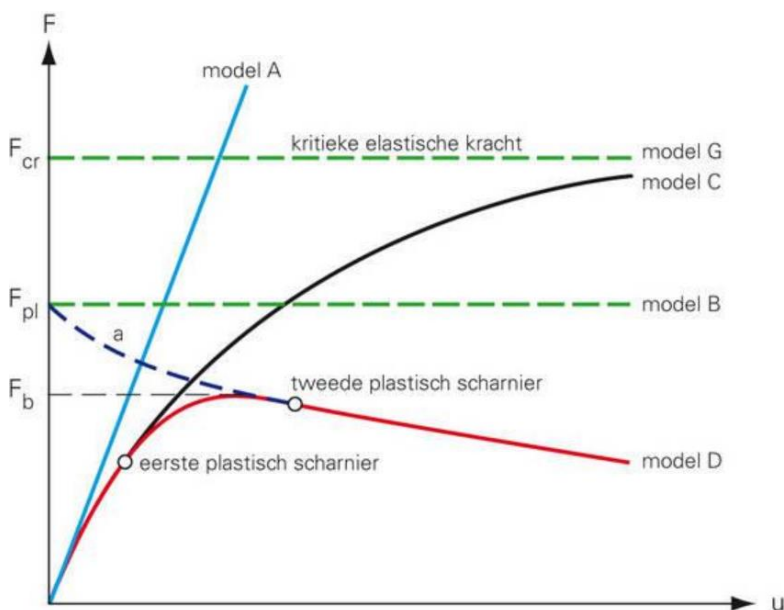
2.4.1 Doorsnede classificatie en rekenmodellen

De doorsnede classificatie van ronde buisprofielen is afhankelijk van de D/t ratio. Indien de D/t ratio toeneemt zal de plooi gevoeligheid van de paal toenemen. De doorsnede classificatie volgens [12] is weergegeven in tabel 2-3.

Tabel 2-3 Doorsnede classificatie conform [12]

Klasse [-]	Limiet [-]	Omschrijving [-]
1 – Plastisch	$D/t \cdot \epsilon^2 \leq 50$	Plastisch moment toelaatbaar Plastisch scharnier toelaatbaar Plastische herverdeling toelaatbaar
2 – Compact	$50 < D/t \cdot \epsilon^2 \leq 70$	Plastisch moment toelaatbaar
3 – Semi Compact	$70 < D/t \cdot \epsilon^2 \leq 140^1$	Elastisch moment (vloeispanning) toelaatbaar
4 – Slank	$D/t \cdot \epsilon^2 > 140^1$	Toelaatbare (moment)capaciteit wordt begrensd door plooi, toelaatbare spanning is kleiner dan de vloeispanning

Vanwege de geometrie van de afmeerpalen zijn dit vaak doorsnede klasse 4 profielen en dienen daarom gecontroleerd te worden op plooi stabiliteit, zie bovenstaande tabel.



Figuur 2-9 Rekenmodellen (afkomstig uit [23])

De volgende rekenmodellen kunnen worden gebruikt om de response van een constructie op een uitwendige belasting te kunnen beoordelen [23]:

- Model A: lineair elastische analyse (LA);
Een eerste-orde elastisch rekenmodel waarbij wordt uitgegaan van zowel geometrisch- als ook materiaal (fysisch) lineair gedrag. De berekening wordt uitgevoerd zonder imperfecties.

¹ Voor de limietwaarde van een ronde buis, belast op een buigend moment, wordt voor een slanke doorsnede een ondergrens van $D/t \cdot \epsilon^2 > 140$ voorzien in de nieuwe versie van de NEN-EN 1993.

- Model B: materiaal niet-lineaire analyse (MNA);
Een eerste-orde plastisch rekenmodel waarbij wordt uitgegaan van geometrisch lineair gedrag en niet-lineair materiaalgedrag. De berekening wordt uitgevoerd zonder imperfecties.
- Model C: geometrisch niet-lineaire elastische analyse inclusief imperfecties (GNIA);
Een tweede-orde elastisch rekenmodel gebaseerd op basis van evenwicht in de vervormde toestand inclusief imperfecties. Het materiaalgedrag is op basis van elastisch materiaalgedrag (wet van Hooke).
- Model D: geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse inclusief imperfecties (GMNIA);
Een tweede-orde plastisch rekenmodel waarbij wordt uitgegaan van zowel geometrisch- als ook materiaal (fysisch) niet-lineair gedrag inclusief de invloed van imperfecties.
- Model G: lineair-elastische bifurcatie analyse (LBA).
Een rekenmodel waarbij de laagste bifurcatie wordt bepaald bij ideale condities (geen imperfecties). De kritieke elastische kracht, de Eulerse knikkracht, wordt bepaald op basis van de lineair elastische theorie (kleine verplaatsingen).

In Diana wordt een “PHASED NONLIN” analyse toegepast om het grondgedrag en het tweede-orde effect ten gevolge van buiging in rekening te brengen (model D).

2.4.2 Doorsnede eigenschappen

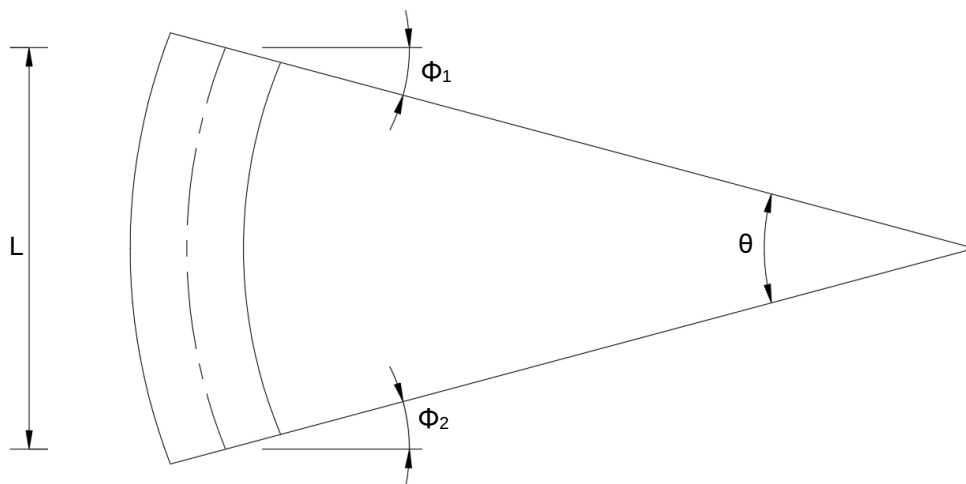
Voor het bepalen van de doorsnede eigenschappen wordt uitgegaan van een ronde buis. De relevante doorsnede eigenschappen worden als volgt bepaald:

$$\varepsilon_y = f_{yd} / E$$

$$I = \pi/64 \cdot (D^4 - d^4)$$

$$W_{el} = \pi/32 \cdot (D^4 - d^4)/D$$

$$W_{pl} = 4 \cdot r^2 \cdot t$$



Figuur 2-10 Definitie kromming

De kromming wordt als volgt berekend, zie ook figuur 2-10.

$$\kappa = (\phi_1 + \phi_2)/L$$

Waarin: ϕ_i = hoekverdraaiing; $\phi_i = u_z/r'$

L = lengte van de buis

Omdat, met name in het elastische gebied, de ovalisatie relatief klein is ten opzichte van de diameter van de buis wordt gemakshalve de onvervormde diameter in rekening gebracht.

2.4.3 Analytisch moment-krommingsdiagram

2.4.3.1 Moment-krommingsdiagram zonder restspanningen en ovalisatie

De constitutieve relatie voor een op buiging belaste buis in het elastische gebied is:

$$M = EI \cdot \kappa$$

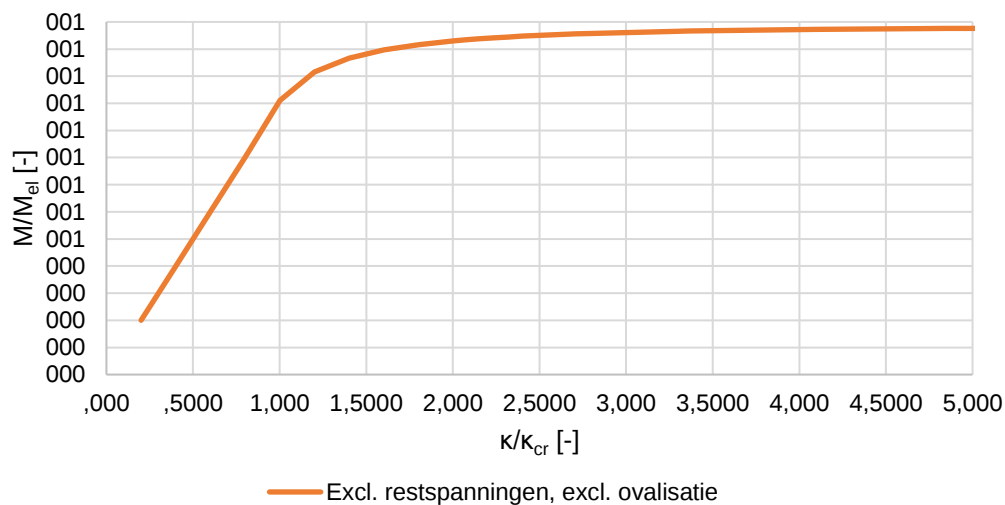
Voor een kromming ten gevolge van een spanning boven de vloeigrens geldt dat (plastisch gebied):

$$M = M_{pl,Rd} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\theta}{\sin(\theta)} + \cos(\theta) \right)$$

$$\text{Waarin: } M_{pl,Rd} = (D^3 - d^3)/6 \cdot f_{yd} / Y_{m0} \quad [Nm]$$

$$\theta = \sin^{-1}(c_y / c) \quad [rad]$$

Het moment-krommingsdiagram voor een perfect plastische buis is weergegeven in figuur 2-11.

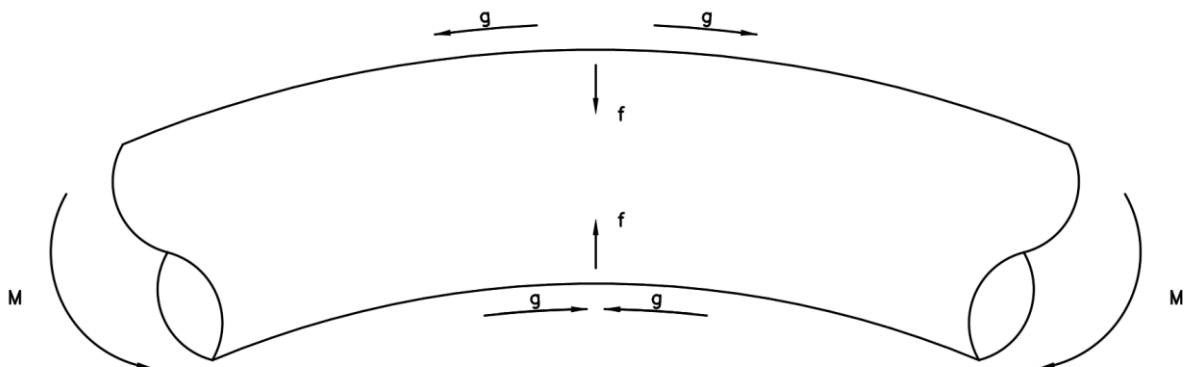


Figuur 2-11 Moment-krommingsdiagram (model: materiaal niet-lineaire analyse)

2.4.3.2 Moment-krommingsdiagram inclusief ovalisatie

Het plooien van (ronde) buispalen wordt gerelateerd aan het vermogen van de doorsnede om zijn cirkelvorm te behouden. Doorsnede met een grote D/t-verhouding hebben de neiging om een ovale vorm aan te nemen die een 'plat' bovengedeelte creëert, waarbij een grotere radius ontstaat, wat de gevoeligheid voor plooï vergroot [17].

Ten gevolge van een toenemende kromming in de buis neemt de verticale diameter van de paal af.



Figuur 2-12 Ovalisatie ten gevolge van tweede-orde effect



De (elastische) afname van de verticale diameter volgens Reissner en Weitschke wordt als volgt bepaald:

$$\alpha = \kappa^2 \cdot r^5 / t^2$$

Waarin: $\kappa = M_{Ed} / EI$ (Constitutieve relatie)

Voor een kromming ten gevolge van een spanning boven de vloeigrens bedraagt de afname van de verticale diameter conform [8] en [17]:

$$\alpha = \frac{f_{yd}}{E} \cdot \kappa \cdot r^4 / t^2$$

In de nieuwe versie van de NEN-EN 1993-5 wordt de afname van de verticale diameter, bij een spanning boven de vloeigrens, als volgt bepaald:

$$\alpha = \kappa^{1,5} \cdot \kappa_{el}^{0,5} \cdot \frac{r^5}{t^2}$$

Beide formules zullen worden opgenomen in deze rapportage.

De toename van de radius ten gevolge van ovalisatie wordt als volgt bepaald:

$$r' = \frac{r}{1 - \frac{3 \cdot \alpha}{r}}$$

De invloed op het moment-krommingsdiagram wordt als volgt omschreven [1]:

$$M_m = h \cdot M_p \cdot \left(\frac{c_1}{6} + \frac{c_2}{3} \right)$$

$$\text{Waarin: } h = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{r}$$

$$c_1 = \sqrt{4 \cdot 3 \cdot \left(\frac{n_y}{n_p} \right)^2 - 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{|m_y|}{m_p}}$$

$$c_2 = \sqrt{4 \cdot 3 \cdot \left(\frac{n_y}{n_p} \right)^2} \approx 2,0$$

$$\text{waarin: } n_y = 0,20 \cdot M_m \cdot \kappa / r \quad [N/m]$$

$$n_p = t \cdot f_{yd} \quad [N/m]$$

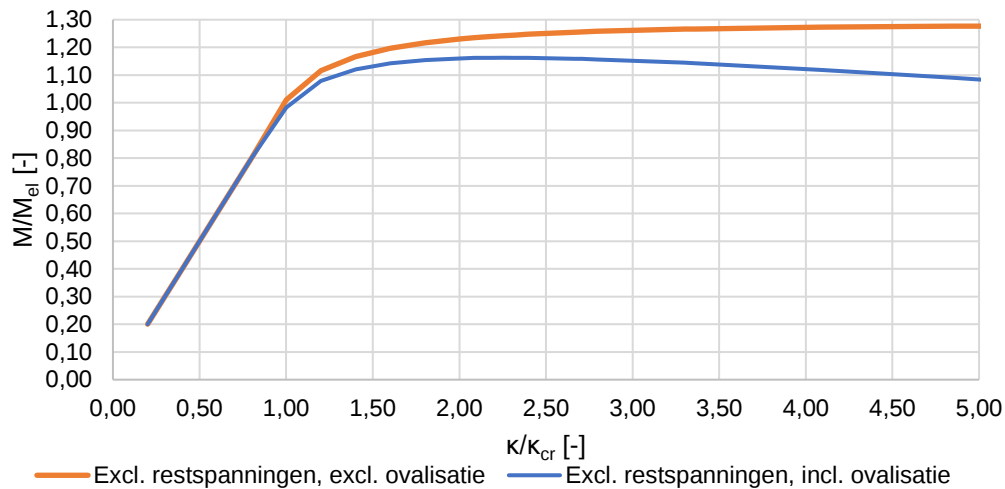
$$m_y = 0,071 \cdot M_m \cdot \kappa \quad [N]$$

$$m_p = \frac{1}{4} \cdot t^2 \cdot f_{yd} \quad [N]$$

Voor een kromming ten gevolge van een spanning boven de vloeigrens geldt dat (plastisch gebied):

$$M = M_m \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\theta}{\sin(\theta)} + \cos(\theta) \right)$$

Het moment-krommingsdiagram op basis van geometrisch en materiaal niet-lineaire gedrag is weergegeven in figuur 2-13.



Figuur 2-13 Moment-krommingsdiagram (Model: geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse)

2.4.3.3 Moment-krommingsdiagram inclusief restspanningen

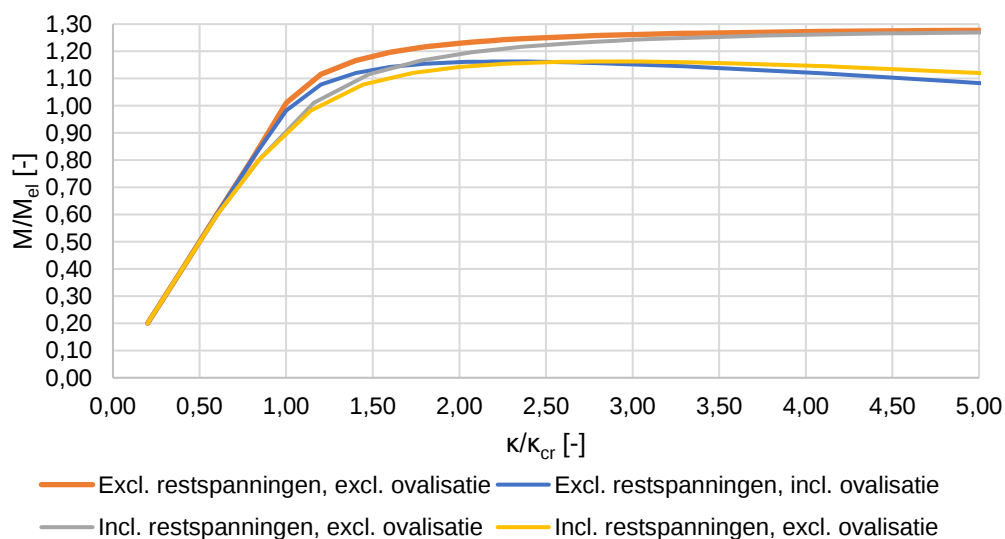
Restspanningen zijn afkomstig uit het productieproces van de stalen buispalen en zijn van invloed op het moment-krommingsdiagram van op buiging belaste buizen. De invloed van de restspanning wordt als volgt omschreven:

$$K_{res} = \alpha_{res} \cdot K$$

$$\alpha_{res} = 1,0 \quad \text{voor: } M < 0,50 \cdot M_y$$

$$\alpha_{res} = 1,0 + \left(\frac{M}{M_{pl,Rd}} - \frac{0,5 \cdot M_y}{M_{pl,Rd}} \right)^2 \quad \text{voor: } M \geq 0,50 \cdot M_y$$

Het moment-krommingsdiagram, inclusief de invloed van restspanningen, voor zowel geometrisch lineair als niet-lineair gedrag is weergegeven in figuur 2-14.



Figuur 2-14 Moment-krommingsdiagram incl. restspanning (Model: geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse)

Gezien de marginale invloed van de restspanningen worden deze niet verder beschouwd.

2.4.4 Plooi weerstand

De toelaatbare spanningen van een klasse 4 profiel is kleiner dan de vloeispanning van het materiaal. Om de toelaatbare spanning te bepalen, en inzicht te verkrijgen in de relevante parameters, wordt in deze paragraaf de relevante literatuur ten aanzien van de plooi weerstand van buisprofielen behandeld. De volgende onderwerpen worden beschouwd:

- Kritische spanning (Eurocode)
- Kritische rek (Gresnigt);
- Ovalisatie ten gevolge van tweede-orde effect;
- Ovalisatie ten gevolge van externe belasting (gronddruk);
- Initiële onrondheid (imperfectie)

2.4.4.1 Kritische spanning

De kritische spanning, de optredende spanning bij de laagste bifurcatie bij ideale condities, kan bepaald worden door middel van [13]:

$$\sigma_{cr} = 0,605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r}$$

De rekenregels conform de Eurocode (kritische spanning) zijn opgenomen in bijlage 1.

2.4.4.2 Kritische rek

De kritische rek, de optredende rek bij de laagste bifurcatie bij ideale condities, kan bepaald worden door middel van [1]:

$$\epsilon_{cr} = 0,25 \cdot \frac{t}{r} - 0,0025 \quad \text{voor } t/r' > 1/60$$

$$\epsilon_{cr} = 0,10 \cdot \frac{t}{r'} \quad \text{voor } t/r' < 1/60$$

De rekenregels conform handboek kademuren (kritische rek) zijn opgenomen in bijlage 2.

2.4.4.3 Ovalisatie ten gevolge van tweede-orde effect

De effecten van ovalisatie hebben een ongunstig effect op de plooi weerstand van de doorsnede. De invloed van ovalisatie is beschreven in §2.4.3.2.

2.4.4.4 Ovalisatie ten gevolge van externe belasting (gronddruk)

De ovalisatie ten gevolge van passieve gronddruk wordt als volgt bepaald:

$$\Delta D_i = \frac{1}{12} \cdot \frac{q \cdot r^4}{EI}$$

Waarin: M = buigend moment in de wand

$$r = \frac{1}{2} \cdot (D - t)$$

$$EI = \frac{1}{12} \cdot t^3 \cdot E$$

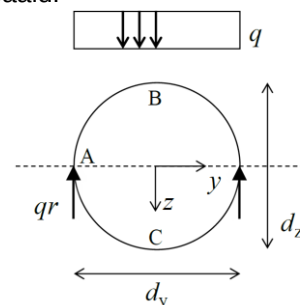
q = gronddruk

[N]

[m]

[Nm]

[N/m²]



Figuur 2-15 Passieve gronddruk

2.4.4.5 Initiële onrondheid (imperfectie)

Onrondheid van een buispaal is een imperfectie welke invloed heeft op de plooi capaciteit van de buispaal. Buisprofielen met een initiële onrondheid hebben een lagere plooi capaciteit dan een theoretisch perfecte buis. De genormeerde toleranties op onrondheid zijn gepresenteerd in §3.2.2.



2.4.4.6 Zand gevulde buispalen

Palen in de grond, waarbij een grondplug aanwezig is, zijn minder gevoelig tegen ovaliseren en hebben daarom een grotere weerstand tegen plooi. Door de grondvulling in de buispaal ontstaat een interne druk welke het effect van ovalisatie (gedeeltelijk) teniet doet.

De kritische rek, op basis van een interne- of externe druk, wordt als volgt bepaald [1].

$$\varepsilon_{cr} = 0,25 \cdot \frac{t}{r'} - 0,0025 + 3000 \cdot \left(\frac{P \cdot r}{E \cdot t} \right)^2 \cdot \frac{|P|}{P} \quad \text{voor } t/r' > 1/60$$

$$\varepsilon_{cr} = 0,10 \cdot \frac{t}{r'} + 3000 \cdot \left(\frac{P \cdot r}{E \cdot t} \right)^2 \cdot \frac{|P|}{P} \quad \text{voor } t/r' < 1/60$$

NB: De druk P is positief indien een positieve interne druk aanwezig is. Bij een positieve externe druk is de waarde P negatief.

Conform [8] wordt het effect van de grondvulling in de buispaal in rekening gebracht door het effect van ovalisatie te vermenigvuldigen met een stijfheidsfactor:

$$\alpha_{\text{gevuld}} = \alpha_{\text{leeg}} \cdot \frac{k_{\text{staal}}}{k_{\text{staal}} + k_{\text{zand}}}$$

$$\text{waarin: } K_{\text{staal}} = \frac{12 \cdot EI}{r^4} = \frac{E_{\text{staal}} \cdot t^3}{r^4}$$

$$K_{\text{zand}} = \frac{E_{\text{zand}}}{r}$$



3 Methodologie

In dit hoofdstuk wordt de methodologie besproken.

3.1 Algemeen

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden wordt gebruik gemaakt van een eindige elementen berekening in Diana FEA. Een eindige elementen berekening is een numerieke methode waarmee complexe modellen zoals: plasticiteit, geometrische niet-lineariteit maar ook complexe geometrieën kunnen worden berekend.

In een eindige elementen berekening worden de kinematische vergelijkingen en de constitutieve vergelijkingen gesubstitueerd in het stelsel evenwichtsvergelijkingen waarbij een partiële differentiaalvergelijkingen wordt opgesteld. Door het oplossen van de differentiaalvergelijkingen wordt een benadering verkregen van het complexe model.

Om de invloed van de uitwendige gronddruk op het ovaliseren van de buispaal te bepalen wordt gebruik gemaakt van een eindige elementen berekening. In deze eindige elementen berekening wordt uitgegaan van fysisch en geometrisch niet-lineair gedrag.

Allereerst wordt een lege buispaal belast op een constant buigend moment. Het berekende moment-krommingsdiagram, op basis van de eindige elementen berekening, wordt vergeleken met de resultaten van een analytische benadering om het model te verifiëren. Vervolgens wordt de ovalisatie van de paal vergeleken met de analytische resultaten.

Vervolgens wordt een eindige elementen berekening gemaakt van een lege buis met uitwendige gronddruk. De berekeningen worden uitgevoerd met lineair grondgedrag en geometrisch en fysisch niet-lineair materiaalgedrag voor de stalen buispaal. De optredende ovalisatie ten gevolge van gronddruk wordt vergeleken met de ovalisatie op basis van literatuur.

Tenslotte wordt onderzocht in hoeverre de stijfheid van de grond invloed heeft op de ovalisatie van de paal, de verdeling van de passieve gronddruk, en daarmee indirect op het plooigedrag van de buispaal.

3.2 Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn van toepassing:

- Staalkwaliteit volgens NEN EN 10219-1 en NEN EN 10219-2 (S235 t/m S460) of API-5L PSL1 (X42 t/m X70);
- Lineair elastisch grondgedrag wordt toegepast;
- Tolerantieklasse A, B en C;
- Vanwege de marginale invloed op het moment-krommingsdiagram (zie §2.4.3.3) worden restspanningen niet beschouwd;
- In de berekeningen wordt uitgegaan van een perfect elastisch-plastisch rekdiagram voor de stalen buispaal.

3.2.1 Mechanische (materiaal)eigenschappen

De volgende mechanische (materiaal)eigenschappen zijn van toepassing.

Tabel 3-1 Mechanische (materiaal)eigenschappen conform [15] en [2].

Staalkwaliteit				S235	S355	X70
Min. Vloeigrens	$t \leq 0.016 \text{ m}$	f_{yd}	$[\text{N/m}^2]$	$2,35 \cdot 10^8$	$3,55 \cdot 10^8$	$4,85 \cdot 10^8$
	$0.016 \text{ m} < t \leq 0.040 \text{ m}$	f_{yd}	$[\text{N/m}^2]$	$2,25 \cdot 10^8$	$3,45 \cdot 10^8$	
Min. Treksterkte	$t \leq 0.040 \text{ m}$	f_{ud}	$[\text{N/m}^2]$	$3,60-5,10 \cdot 10^8$	$4,70-6,30 \cdot 10^8$	$5,70 \cdot 10^8$
Elasticiteitsmodulus			E	$[\text{N/m}^2]$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$
Dwarscontractie			ν	$[-]$	0,30	0,30
Soortelijk gewicht			ρ	$[\text{kg/m}^3]$	7850	7850

3.2.2 Tolerantie op onrondheid

Onrondheid van een buispaal is een imperfectie welke invloed heeft op de plooi capaciteit van de buispaal. Buisprofielen met een initiële onrondheid hebben een lagere plooi capaciteit dan een theoretisch perfecte buis. De maximaal toelaatbare onrondheid is genormeerd in [16]. De verschillende fabricagekwaliteitsklasse zijn gepresenteerd in tabel 3-2.

Tabel 3-2 Maximaal toelaatbare onrondheid conform [16]

Tolerantie op fabricage-kwaliteitsklasse	Omschrijving	Bereik van de middellijn [mm]		
		$d \leq 500$	$500 < d < 1250$	$1250 \leq d$
Klasse A	Uitstekend	0,014	$0,007+0,0093 \cdot (1,25-d)$	0,007
Klasse B	Hoog	0,020	$0,010+0,0133 \cdot (1,25-d)$	0,010
Klasse C	Normaal	0,030	$0,015+0,020 \cdot (1,25-d)$	0,015

De onrondheid parameter wordt gedefinieerd als:

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}$$

De ovalisatie ten gevolge van een initiële onrondheid bedraagt:

$$\alpha = \frac{1}{4} \cdot U_r \cdot D$$



3.2.3 Imperfecties conform Eurocode

Conform [13] wordt een equivalente geometrische imperfectie in rekening gebracht bij de GMNIA berekening. De equivalente geometrische imperfectie is een omhullende imperfectie welke rekening houdt met de volgende aspecten:

- Geometrie imperfecties, zoals afwijkingen van de nominale dikte, geometrische vorm (bijv. onrondheid) en afwijkingen ter plaatse van lassen;
- Materiaalimperfecties, zoals restspanningen, inhomogeniteiten en anisotropieën.

De equivalente geometrische imperfectie is gebaseerd op basis van een eigenmode van de lineair-elastische bifurcatie analyse. De initiële vormafwijkingen loodrecht op het middelvlak van het schaalement is afhankelijk van de amplitude van de equivalente geometrische imperfectievorm.

Conform [13] wordt aanbevolen de eerste eigenmode te gebruiken als imperfectievorm, tenzij andere geometrische imperfecties leiden tot een lagere bezwijklast.

Zowel de geometrie van de buis, als de kwaliteitsklasse van de buis, bepalen de maximale amplitude van de imperfectievorm. De maximale amplitude van de imperfectievorm ten opzichte van de perfecte vorm is de grootste waarde van $\Delta w_{0,eq,1}$ en $\Delta w_{0,eq,2}$:

$$\Delta w_{0,eq,1} = l_g \cdot U_{n1}$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = n_i \cdot t \cdot U_{n2}$$

Waarin: n_i = vermenigvuldigingsfactor ten behoeve van tolerantieniveau; $n_i = 25$

t = dikte van het schaalement

l_g = $\max(l_{gx}; l_{gw})$

waarin: $l_{gx} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t}$

$l_{gw} = \min(25 \cdot t; 500 \text{ mm})$

De kwaliteitsklassen conform [13] zijn weergegeven in tabel 3-3.

Tabel 3-3 Imperfectie amplitude conform [13]

Kwaliteitsklasse buis	Omschrijving	Aanbevolen waarde U_{n1}	Aanbevolen waarde U_{n2}
A	Excellent	0,010	0,010
B	Hoog	0,016	0,016
C	Normaal	0,025	0,025

3.2.4 Geotechnische gegevens

De aangenomen karakteristieke grondparameters conform [14] zijn weergegeven in tabel 3-4.

Tabel 3-4 Karakteristieke grondparameters conform [14]

Laag	Omschrijving	$q_{c,tabel}$	Lage grondparameters			Hoge grondparameters		
			Y_{dr}/Y_{sat}	ϕ'	C'	Y_{dr}/Y_{sat}	ϕ'	C'
[-]	[-]	[MPa]	[kN/m ³]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]	[°]	[kN/m ²]
A	Zand, schoon los	5	17/19	30,0	0,0	18/20	32,5	0,0

Het Hardening Soil model (HS-model) maakt gebruik van drie rek- en spanningsafhankelijke stijfheidsparameters. De spanningsafhankelijkheid wordt berekend aan de hand van een machtsfunctie (m). Het spanning-rekgedrag op basis van een deviatorische belasting kan worden bepaald door middel van een triaxiaalproef. Het spanning-rekgedrag op basis van een ééndimensionale belasting wordt bepaald op basis van een ééndimensionale samendrukkingsproef (Oedometer stijfheid). Tenslotte wordt het spanningpad ten gevolge van ontlasten bepaald door de parameters E_{ur} en v_{ur} .

In de navolgende paragrafen worden correlaties gepresenteerd waarmee een inschatting kan worden gemaakt van de benodigde parameters ten behoeve van het HS-model.

3.2.4.1 Stijfheidsparameters

Voor de stijfheidsparameters ten behoeve van het HS-model kunnen de volgende waarde (vuistregels) aangehouden worden conform [22].

Oedometer stijfheid E_{oed}

$$E_{oed} \approx 3 \cdot q_c$$

Secant stijfheid

$$E_{50;ref} \approx E_{oed}$$

Ontlasting/ herbelasting stijfheid E_{ur}

$$E_{ur} \approx 4 - 5 \cdot E_{50;ref}$$

Bovenstaande stijfheidswaarden zijn gebaseerd op een referentiespanning van $1,0 \cdot 10^5$ N/m².

3.2.4.2 Dwarscontractiecoëfficiënt voor ontlasting/herbelasting

De dwarscontractiecoëfficiënt voor ontlasting/herbelasting bedraagt: $0,15 < \nu < 0,20$.

3.2.4.3 Dilatantiehoek

De dilatantiehoek wordt vastgesteld aan de hand van ervaringsgetallen. Daarnaast kan de dilatantiehoek worden gerelateerd aan de hoek van inwendige wrijving door middel van de volgende correlatie (zand):

$$\begin{aligned} \psi &= \phi' - 30^\circ && \text{voor } \phi' > 30^\circ \\ \psi &= 0^\circ && \text{voor } \phi' < 30^\circ \end{aligned}$$

3.2.4.4 Neutrale gronddruk coëfficiënt

De Neutrale gronddruk coëfficiënt kan als volgt bepaald worden voor normaal geconsolideerde grondlagen:

$$K_{NC} = 1 - \sin(\phi')$$

3.2.4.5 Machtsfunctie M

Indicatieve waarden voor de machtsfunctie (m) zijn weergegeven in tabel 3-5.

Tabel 3-5 Indicatieve waarden voor de machtsfunctie (m) conform [22]

Grondsoort	m [-]
Klei – silt	0,80 – 1,00
Klei	0,50
Veen	1,00
Zand	0,55 – 0,75
Grind	0,40 – 0,90

Voor zand en grind wordt een machtsfunctie (m) van $m = 0,50$ aangehouden conform [22] tabel 40.

3.2.4.6 Karakteristieke grondeigenschappen

Een samenvatting van de karakteristieke grondeigenschappen welke in dit onderzoek aangehouden worden is weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 3-6 Karakteristieke grondparameters FEM

Laag			A
Soortelijke massa	ρ	[kg/m ³]	1700
Conusweerstand	q_c	[N/m ²]	$10 \cdot 10^6$
Triaxiaal stijfheid	E_{trx}	[N/m ²]	$30 \cdot 10^6$
Ontlasting/ herbelasting stijfheid	E_{ur}	[N/m ²]	$135 \cdot 10^6$
Oedometer stijfheid	E_{oed}	[N/m ²]	$30 \cdot 10^6$
Dwarscontractie	ν	[-]	0,2
Cohesie	c	[N/m ²]	100
Hoek van inwendige wrijving	ϕ'	[°]	30,0
Dilatantiehoek	ψ	[°]	0,0
Exponent m	m	[-]	0,5
K-coëfficiënt normaal geconsolideerde grondmassief	K_{NC}	[-]	0,50
Neutrale gronddruk coëfficiënt	K_0	[-]	0,50

Om numerieke instabiliteit te voorkomen is een zeer lage treksterkte toegekend aan de grondparameters.



3.3 Onderzoeksgrenzen

De volgende onderwerpen worden beschouwd in dit onderzoek:

- Een LBA analyse voor een op buiging belaste buis;
- Een GMNIA analyse voor een op buiging belaste lege buis;
- Een GMNIA analyse voor een op buiging belaste lege buis met uitwendige gronddruk;
- De invloed van de steundruk op de zijwang van de buis;
- De verdeling van de passieve gronddruk op de buispaal.

De volgende onderwerpen worden niet beschouwd:

- De aanvaarenergie van een afmerend schip;
- De vormveranderingsarbeid van de constructie;
- De plooistabiliteit van een volledig gevulde buis waarbij het effect van ovalisatie wordt verwaarloosd (zone 3);
- De (verticale) draagkracht van de fundering.

3.4 Randvoorwaarden

De volgende randvoorwaarden zijn van toepassing:

- Er wordt geen corrosie toeslag in rekening gebracht;
- De buispaal wordt belast door een uniform buigen moment. Er wordt geen normaal (druk)kracht en/of dwarskracht beschouwd in de doorsnede. Een (afmeer)energie beschouwing behoort niet tot de scope van dit onderzoek;
- De gronddrukfactoren worden gebaseerd op een horizontale bodem, er wordt geen talud in rekening gebracht;
- Er wordt uitgegaan van gedraineerd grondgedrag. Ongedraineerde schuifsterkte en stijfheid van de grond worden niet beschouwd.

3.5 Modellering

De kromming en ovalisatie van de op buiging belaste buis wordt berekend door middel van een eindige elementen berekening in Diana FEA. Vanwege de geometrie van de stalenbuispaal worden voor de paalsecties schaalementen toegepast. De in- en uitwendige grond wordt gemodelleerd door middel van 3D volume elementen ("solids").

De (relevante) invoer van de gemaakte Diana berekeningen zijn gepresenteerd in bijlage 6.

3.5.1 Belastingen, randvoorwaarden en symmetrie

In de navolgende paragrafen wordt de belastingen, randvoorwaarden en symmetrie van het eindige elementen model besproken.

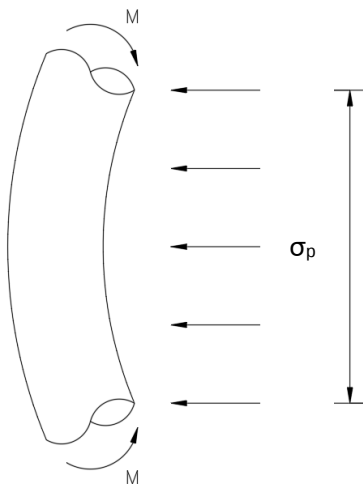
3.5.1.1 Belastingen

De belasting bestaat uit normaalspanningen in de paal en gronddruk ten gevolge van de passieve wig. Om de gronddruk te modelleren wordt, in de z-richting, een opgelegde oppervlakverplaatsing toegepast op de uitwendige grondlaag. Op de buispaal is een star steunpunt aangebracht, zodat de grondlaag een relatieve verplaatsing ondergaat ten opzichte van de buispaal.

De boven- en onderrand van de buispaal worden belast met een opgelegde vervorming in de x-richting. De oplegde vervorming heeft een lineair verloop wat resulteert in drukkracht aan de ene kant en trekkracht aan de andere kant van de buis en dus een constant buigend moment over de lengte van de paal.

Geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse inclusief imperfecties zijn berekeningen met een hoge mate van niet-lineariteit. Wanneer een GMNIA analyse gecombineerd wordt met niet-lineair grondgedrag en spanningsafhankelijke stijfheid wordt het model al snel buitengewoon complex.

Daarnaast is de kans op convergentie problemen, ten gevolge van de hoge mate van niet-lineariteit voor, groter waardoor meer iteraties benodigd zijn en daarmee de rekentijd aanzienlijk toeneemt. Derhalve wordt de grond gemodelleerd als lineair elastisch materiaal. De interface tussen de paal en de grondlaag wordt gemodelleerd door middel van coulomb-friction interface met een zeer lage cohesie vanwege numerieke instabiliteit. Vanwege de opgelegde vlakverplaatsing aan de bovenzijde van het model (drukkracht), gecombineerd met de niet-lineaire interface tussen de paal en de grond, zullen geen (noemenswaardige) trekspanningen ontstaan in het lineair elastisch grondmateriaal. De aanname is dat, bij relatief kleine verplaatsingen waarbij de gronddruk kleiner is dan de maximale passieve weerstand, het toepassen van lineair elastisch grondmateriaal een beperkte invloed heeft op de resultaten.



Figuur 3-1 Optredende belastingen

3.5.1.2 Randvoorwaarden

Om starre lichaamsverplaatsingen te voorkomen dienen voldoende vrijheidsgraden te worden beperkt. De paal-grond interactie wordt gemodelleerd met behulp van een 2D-model (vlakke vervormings-toestand) waarbij de belasting zowel in- als uit het vlak aangrijpt.

De translaties in de y- en z-richting, evenals de rotatie om de x-as, dient verhinderd te worden.

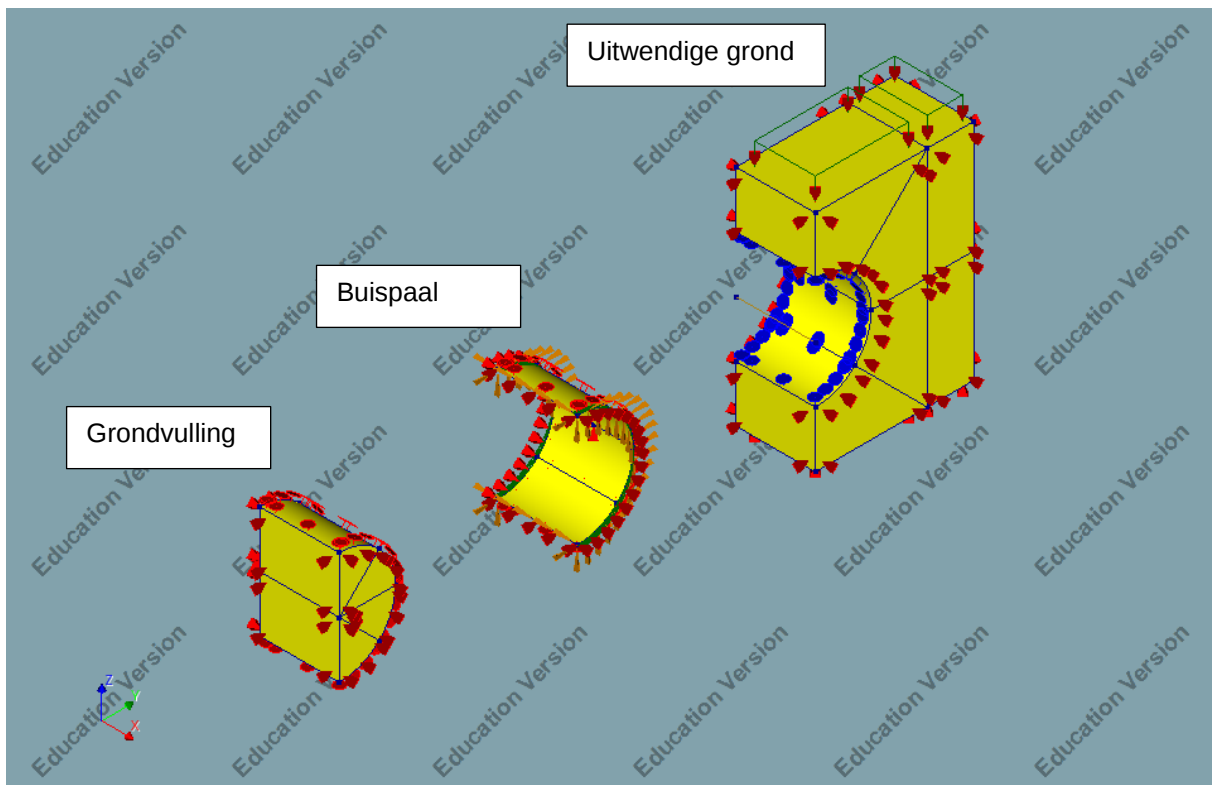
3.5.1.3 Symmetrie

Om het benodigd aantal elementen te beperken wordt gebruik gemaakt van symmetrie.

Toegepast wordt spiegelsymmetrie waarbij langs de symmetrieranden geen translaties loodrecht op het symmetrievlak kunnen optreden. Met andere woorden, het model wordt gehalveerd over de middenlijn, waarbij translaties loodrecht op dit vlak verhinderd worden.

Tenslotte wordt de rotatie van de buispaal rondom de globale X-as verhinderd ter plaatse van het symmetrievlak en worden de rotatie van de buispaal in het boven- en ondervlak van het model eveneens verhinderd.

Een overzicht van de randvoorwaarden is weergegeven in figuur 3-2.



Figuur 3-2 Opleggingen en symmetrie voorwaarden

3.5.2 Elementen en elementgrootte

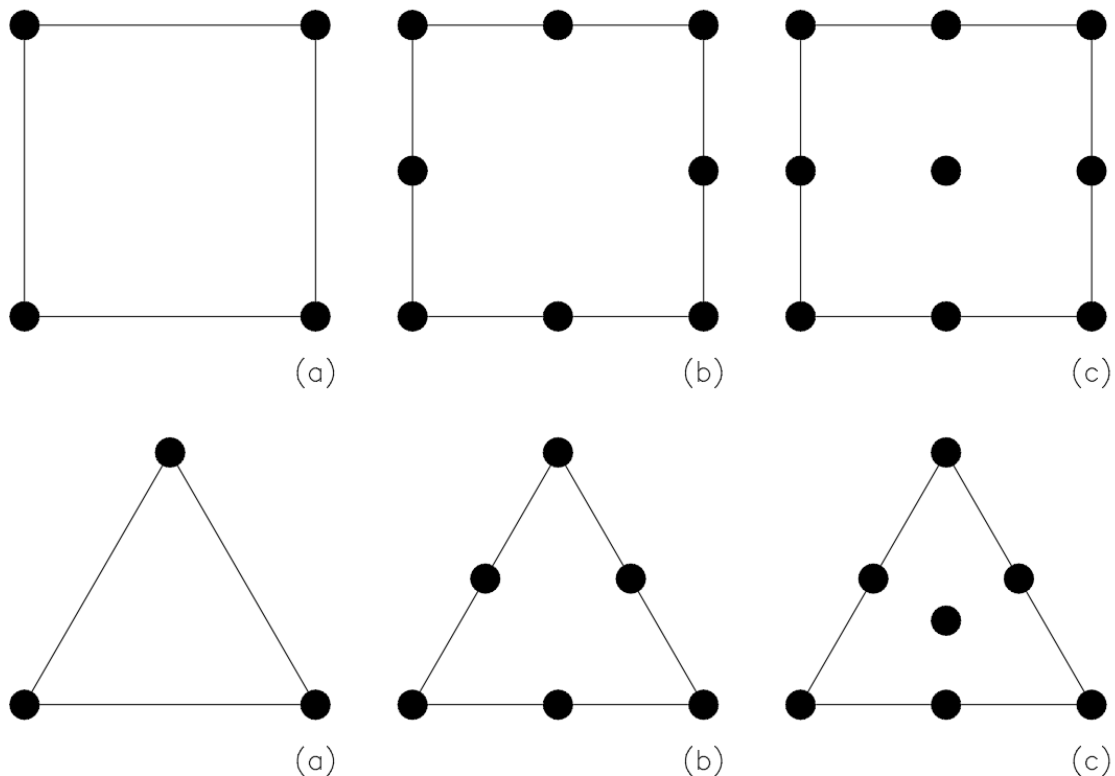
Het type element en de elementgrootte zijn van invloed op de (geometrische) kwaliteit van het model. De (geometrische) kwaliteit van het elementennet wordt beoordeeld op basis van de hoekafwijking- en gerektheid van de elementen. Met andere woorden, de afwijking van de oorspronkelijke vorm van het element.

3.5.2.1 Lineaire- en kwadratische elementen

Lineaire elementen (lagere-orde elementen) hebben enkel knopen in de hoekpunten van het element. Kwadratische elementen (hogere-orde elementen) beschikken over knopen tussen de hoekpunten van de elementen.

Voor hogere-orde elementen kunnen de volgende element type worden toegepast:

- Serendipity-elementen (b)
Serendipity-elementen zijn elementen waarbij de knopen enkel op de randen van het element aanwezig zijn.
- Lagrange-elementen (c)
Lagrange-elementen zijn elementen waarbij knopen binnen het element aanwezig zijn.



Figuur 3-3 Lagere- en hogere-orde elementen

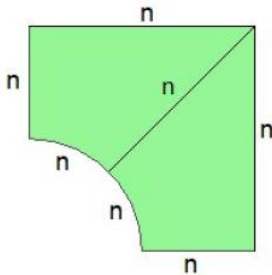
Doordat een hogere-orde element over meer knopen beschikt heeft een hogere-orde element meer vrijheidsgraden.

Voor nadere toelichting voor de typen elementen wordt verwezen naar bijlage 4.

3.5.2.2 Elementgrootte

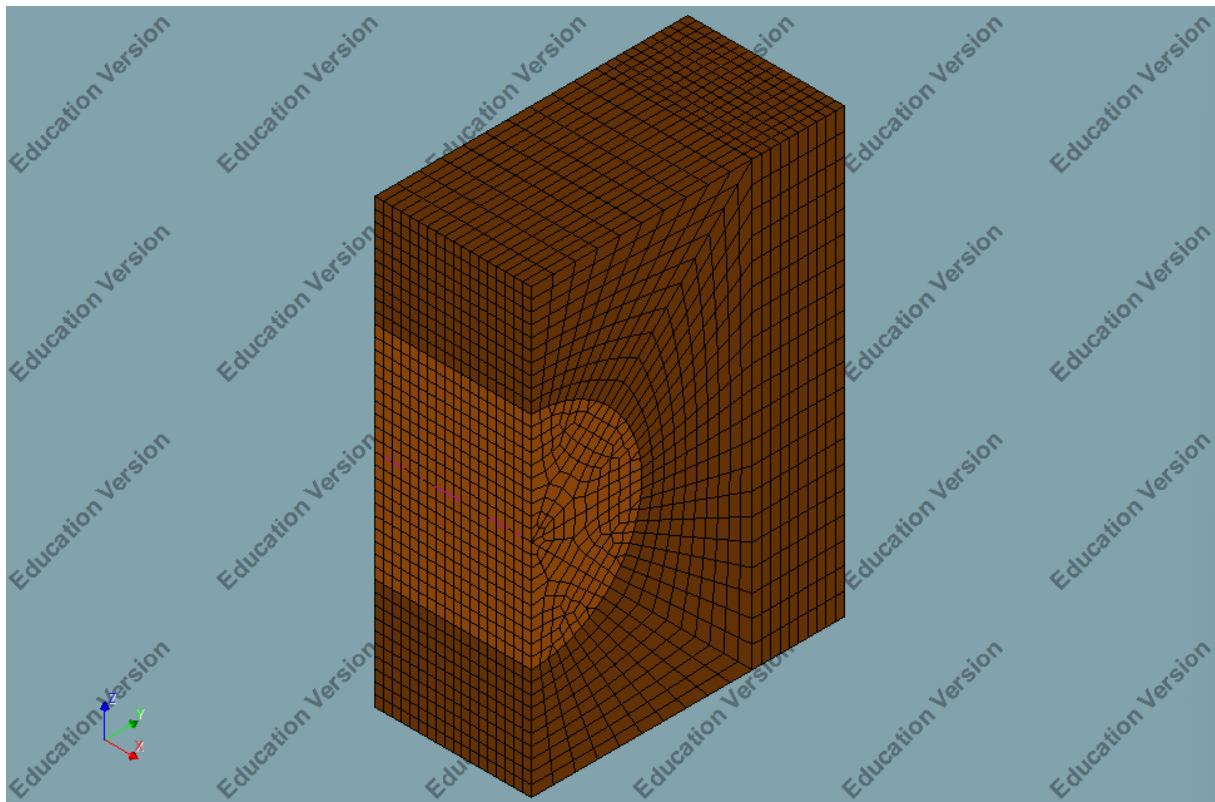
Op basis van een gevoeligheidsanalyse, waarbij de laagste eigenmode wordt bepaald, wordt de minimaal benodigde elementgrootte vastgesteld, zie §4.1. Vanwege de hoge mate van geometrische en fysische niet-lineariteit worden rechthoekige elementen toegepast.

Om de geometrische kwaliteit van het elementennet te waarborgen wordt de doorsnede van het model opgedeeld in meerdere vlakken met 4 zijden. Het aantal elementen bij tegenoverliggende randen wordt gelijk gehouden zodat de oorspronkelijke vorm van de elementen zoveel mogelijk gewaarborgd blijft. Een principe schets van de verdeling van het aantal elementen per zijde is weergegeven in figuur 3-4.



Figuur 3-4 Verdeling elementen per zijde

Het toegepaste elementennet is weergegeven in figuur 3-5.



Figuur 3-5 Elementennet

3.5.3 Materiaal

De verschillende materiaalmodellen zijn reeds beschouwd in §2.2. De aangehouden materiaalmodellen zijn in deze paragraaf kort samengevat.

De stalen buispaal wordt gemodelleerd op basis van het Von Mises criterium zonder versteviging. Voor de in- en uitwendige grond wordt uitgegaan van isotroop lineair elastisch grondmateriaal.



3.5.4 Niet-lineaire berekening

3.5.4.1 Iteratie proces

3.5.4.1.1 Newton-Raphson

De reguliere Newton-Raphson methode is een iteratieve methode welke binnen enkele iteraties convergeert naar de uiteindelijke oplossing. Een nadeel van deze methode is dat de stijfheidsmatrix bij elke iteratie opnieuw wordt opgesteld, waardoor elke iteratie relatief veel tijd kost. Tenslotte dient de oplossing van de iteratie grosso modo overeen te komen met de voorspelling om divergentie te voorkomen.

De gemodificeerde Newton-Raphson methode convergeert langzamer dan de reguliere Newton-Raphson. In tegenstelling tot de reguliere Newton-Raphson wordt niet bij elke iteratie opnieuw de stijfheidsmatrix opgesteld. De gemodificeerde Newton-Raphson-methode heeft meestal meer iteraties nodig, maar elke iteratie is sneller dan de reguliere Newton-Raphson methode. In situaties waar de reguliere Newton-Raphson methode niet meer convergeert, kan het gemodificeerde Newton-Raphson-proces soms toch convergeren.

3.5.4.1.2 Quasi-Newton (Secant methode)

De Quasi-Newton-methode gebruikt de oplossingsvector, krachtenvector en de onevenwichte krachten vector om voor elke stap een betere benadering te verkrijgen. In tegenstelling tot de reguliere Newton-Raphson methode, stelt de Quasi-Newton-methode niet voor elke iteratie een volledig nieuwe stijfheidsmatrix op.

3.5.4.1.3 Lineair en constante stijfheid

De lineaire en constante stijfheid-iteratiemethoden kunnen worden gebruikt als de andere methoden instabiel worden. Deze methode heeft potentieel de langzaamste convergentie, maar kost de minste tijd per iteratie omdat de stijfheidsmatrix maar één keer hoeft te worden opgesteld.

De lineaire stijfheidsmethode is meestal erg robuust, maar het is mogelijk dat divergentie optreedt na bifurcaties.

De constante stijfheid methode gebruikt de stijfheidsmatrix van het vorige increment. De constante stijfheid methode kan worden gebruikt als de methoden van Newton-Raphson of Quasi-Newton falen na een aantal succesvolle stappen.

Conclusie:

Vanwege numerieke stabiliteit wordt de Quasi-Newton-methode gebruikt.

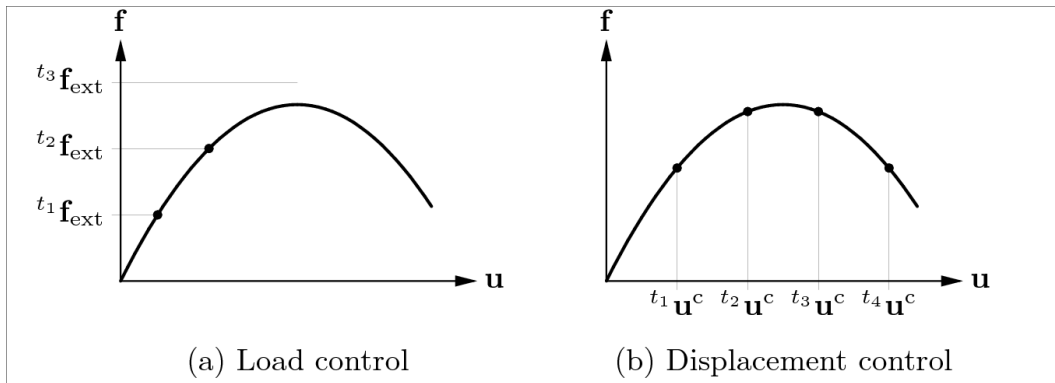
3.5.4.2 Convergentie criteria

3.5.4.2.1 Belasting gestuurd

Bij een belasting gestuurd iteratieproces wordt aan het begin van elk increment de externe kracht met een constante grootte verhoogd. Als de belasting te groot wordt divergeert het iteratieproces en wordt geen oplossing gevonden.

3.5.4.2.2 Verplaatsing gestuurd

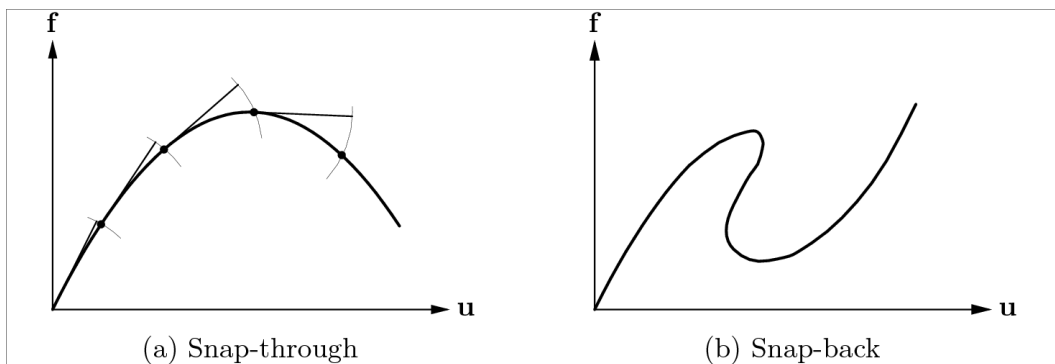
Bij een verplaatsing gestuurd iteratieproces wordt aan het begin van elk increment een opgelegde vervorming aangebracht. Het voordeel van een verplaatsing gestuurd iteratieproces is dat, indien de belasting te groot wordt, de oplossing niet direct divergeert, zie ook figuur 3-6.



Figuur 3-6 belasting- en verplaatsing gestuurd (bron: [10])

3.5.4.2.3 Booglengte sturing

Tenslotte kan booglengte sturing worden toegepast. Hierbij wordt op basis van een constante booglengte de vergroting van de inwendige knoopverplaatsingen in een belastingstap bepaald. Het voordeel van booglengte sturing is, dat in tegenstelling tot een verplaatsing gestuurd iteratieproces, ook “snap-back behavior” kan worden gemodelleerd. Een voorbeeld van booglengte sturing is weergegeven in figuur 3-7.



Figuur 3-7 Booglengte sturing (bron: [10])

In Diana wordt een “PHASED NONLIN” analyse toegepast om het grondgedrag en het tweede-orde effect ten gevolge van buiging in rekening te brengen (model D).

De afname van de verticale diameter ten gevolge van een toenemende kromming resulteert in een tweede-orde effect waarbij het moment, bij een kromming groter dan de maximale weerstand van de doorsnede, afneemt. Toegepast wordt een verplaatsing gestuurd iteratieproces om het geometrisch niet-lineaire gedrag bij grotere krommingen te kunnen modelleren.

3.5.4.3 Geometrisch niet-lineair gedrag

De kromming en ovalisatie van de op buiging belaste buis wordt berekend door middel van een fysische en geometrische niet-lineaire eindige elementen berekening in Diana FEA. Voor een geometrische niet-lineaire berekening kunnen in Diana twee verschillende analyses worden uitgevoerd, te weten:

- Total Lagrange;
- Updated Lagrange.

Bij de Total Lagrange worden de spanningen en rekken bepaald op basis van de onvervormde geometrie. De Updated Lagrange methode gebruikt, in tegenstelling tot de Total Lagrange, de vervormde geometrie. Derhalve wordt voor grote plastische rekken de Updated Lagrange methode aanbevolen [10]. Omdat in het model rekening wordt gehouden met zowel fysische en geometrisch niet-lineair gedrag wordt Updated Lagrange methode toegepast.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de gemaakte berekeningen besproken. De berekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende D/t-verhoudingen en staalkwaliteiten. De resultaten van de eindige elementenberekeningen voor een lege buis worden vergeleken met de resultaten op basis van analytische resultaten.

Een overzicht van de verschillende palen is gepresenteerd in de onderstaande tabel.

Tabel 4-1 Paal eigenschappen

	d [m]	t [m]	f_y [N/m ²]	d/t [-]	$d/(t \cdot \epsilon^2)$ [-]	ϵ_{cr} [-]
A1	0,711	0,005	$2,35 \cdot 10^8$	142,2	142	$1,42 \cdot 10^{-3}$
A2	0,711	0,005	$3,55 \cdot 10^8$	142,2	215	$1,42 \cdot 10^{-3}$
A3	0,711	0,005	$4,85 \cdot 10^8$	142,2	293	$1,42 \cdot 10^{-3}$
B1	0,508	0,005	$2,35 \cdot 10^8$	101,6	102	$2,47 \cdot 10^{-3}$
B2	0,508	0,005	$3,55 \cdot 10^8$	101,6	153	$2,47 \cdot 10^{-3}$
B3	0,508	0,005	$4,85 \cdot 10^8$	101,6	210	$2,47 \cdot 10^{-3}$
C1	0,508	0,010	$2,35 \cdot 10^8$	50,8	51	$7,54 \cdot 10^{-3}$
C2	0,508	0,010	$3,55 \cdot 10^8$	50,8	77	$7,54 \cdot 10^{-3}$
C3	0,508	0,010	$4,85 \cdot 10^8$	50,8	105	$7,54 \cdot 10^{-3}$

In verband met herleidbaarheid is voor één model, model B, het pythonscript toegevoegd aan de bijlage. De invoer van de gemaakte berekening is weergegeven in bijlage 5.

Allereerst wordt voor alle modellen een lineair-elastische bifurcatie analyse uitgevoerd om de eerste eigenmode te bepalen welke als input dient voor de equivalente geometrische imperfectie ten behoeve van de GMNIA analyse.

De initiële vormafwijkingen loodrecht op het middelvlak van de perfecte vorm is voor de buizen A, B en C weergegeven in tabel 4-2.

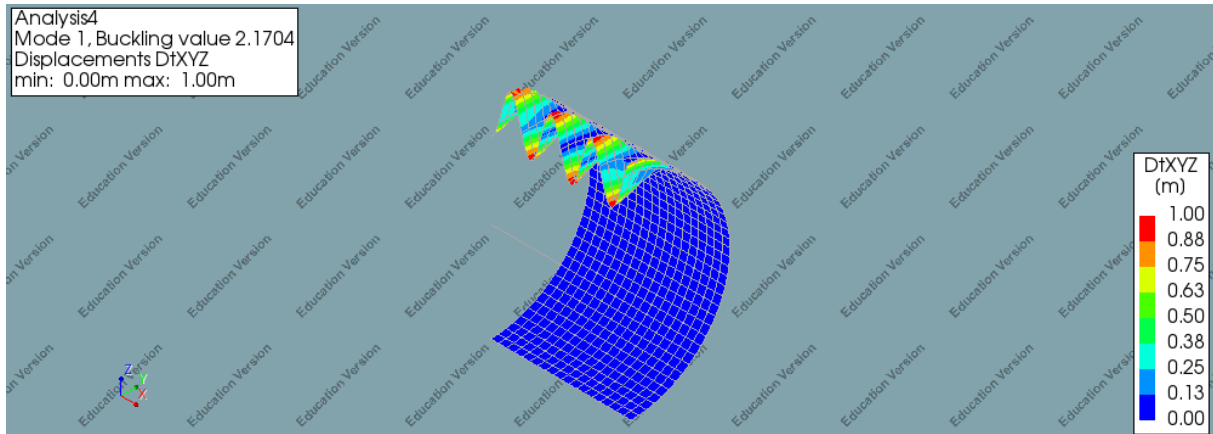
Tabel 4-2 Equivalente geometrische imperfectie conform [13]

r [mm]	t [mm]	Equivalente geometrische imperfectie conform [13]		
		Klasse A	Klasse B	Klasse C
353,0	5,0	1,68	2,69	4,20
251,5	5,0	1,42	2,27	3,55
249,0	10,0	2,50	4,00	6,25

Om de invloed van imperfecties te beschouwen zijn, voor de legen buispalen, de gemaakte berekeningen uitgevoerd in tolerantieklasse A, B en C. In de gemaakte berekeningen met uitwendige grondruk wordt uitgegaan van tolerantieklasse B.

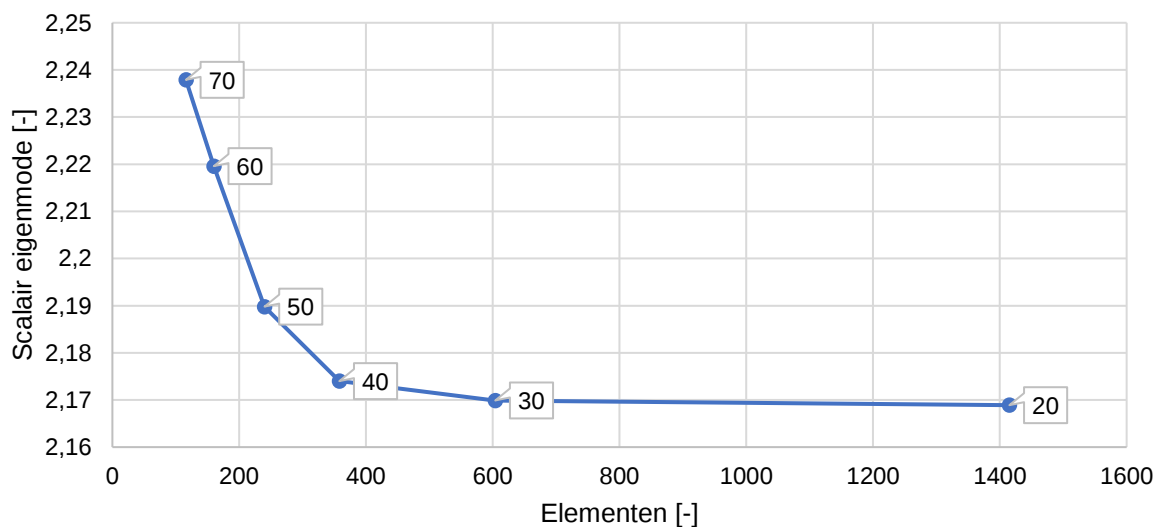
4.1 lineair-elastische bifurcatie analyse (LBA)

De initiële vormafwijkingen ten behoeve van de GMNIA analyse is gebaseerd op basis van de eerste eigenmode van de LBA analyse. Derhalve is voor alle modellen eerst een LBA analyse opgesteld. De aangehouden imperfecties zijn conform tabel 4-2. Tenslotte is de LBA analyse gebruikt om vast te stellen welke elementgrootte minimaal toegepast dient te worden, zie figuur 4-2. Een voorbeeld van een eigenmode op basis van de LBA analyse voor een lege buis is weergegeven in figuur 4-1.



Figuur 4-1 Voorbeeld eigenmode op basis van LBA analyse

Om de minimaal benodigde elementgrootte te bepalen, en daarmee de rekentijd zo beperkt mogelijk te houden, wordt de eerste eigenmode bepaald voor een verschillend aantal elementen.



Figuur 4-2 Eerste eigenmode model A (leeg)

Uit de bovenstaande figuur blijkt dat bij een elementgrootte van 30 mm het verder verkleinen van het elementennet een verwaarloosbare invloed heeft. Toegepast wordt een elementgrootte van 30 mm voor de schaalementen van de buis.

Op basis van de gemaakte LBA analyses kan het kritisch moment op basis van de numerieke resultaten vergeleken worden met de resultaten van de analytische formules.

Tabel 4-3 Kritisch moment

Model [-]	r [m]	t [m]	Eigenmode [-]	Kritisch moment M_{cr} [Nm]	
				Numeriek	Analytisch
A	0,3530	0,005	2,17	$3547 \cdot 10^3$	$3522 \cdot 10^3$
B	0,2515	0,005	3,03	$2492 \cdot 10^3$	$2509 \cdot 10^3$
C	0,2490	0,010	6,13	$9834 \cdot 10^3$	$9938 \cdot 10^3$

Het kritische moment uit het numerieke model komt overeen met het kritisch moment op basis van analytische formules. De bijbehorende eigenmode wordt bij de hierna uitgevoerde berekeningen als imperfectie meegenomen in de GMNIA berekeningen.

4.2 GMNIA analyse: lege buis

In deze paragraaf worden de resultaten voor een lege buispaal gepresenteerd.

Tabel 4-4 Instellingen solver

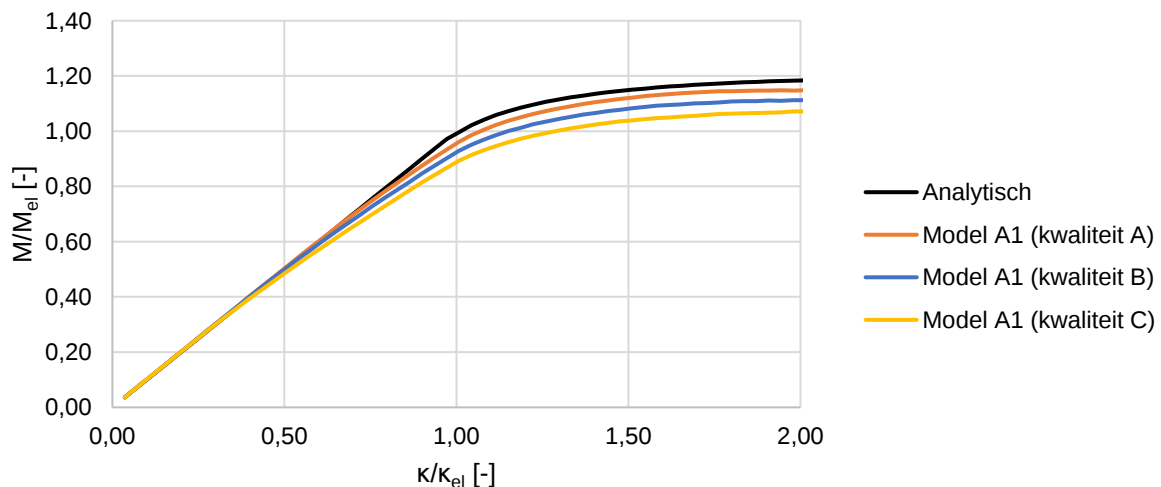
Model	Element Grootte	Belasting		Convergentie		Iteratie		
		Type	Stap grootte	Norm.	Tol.	Aantal	Stijfheid	Conver. schema
[-]	[m]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
A	0,03	Verpl.	1,00	Verpl., Energie	$1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-4}$	200	Secant	Line search
B	0,03	Verpl.	1,50	Verpl., Energie	$1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-4}$	200	Secant	Line search
C	0,03	Verpl.	2,00	Verpl., Energie	$1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-4}$	200	Secant	Line search

Het analytische moment-krommingsdiagram is bepaald inclusief de effecten van ovalisatie (geometrisch en fysisch niet-lineair gedrag).

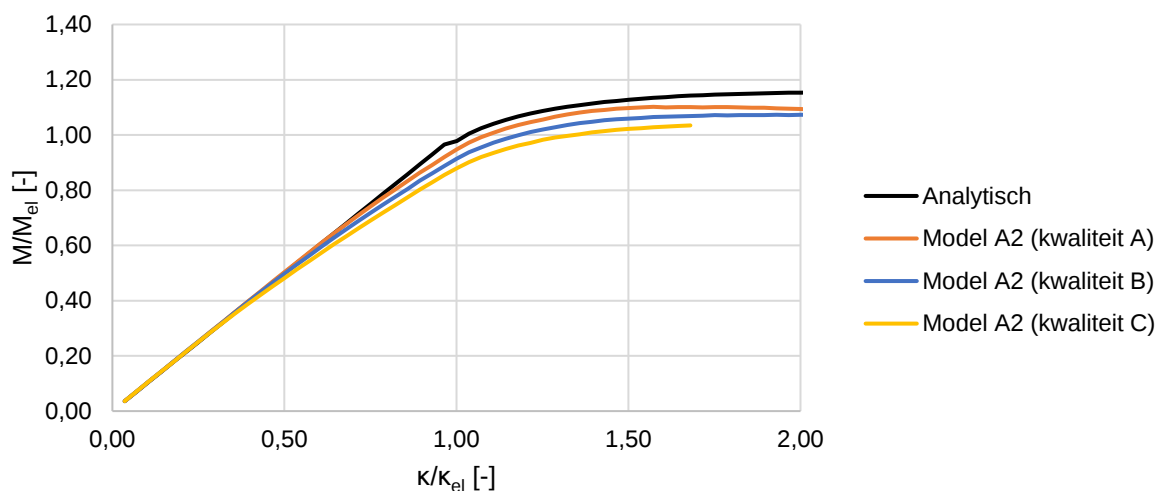
4.2.1 Moment-kromming

4.2.1.1 Model A Ø711-5 mm

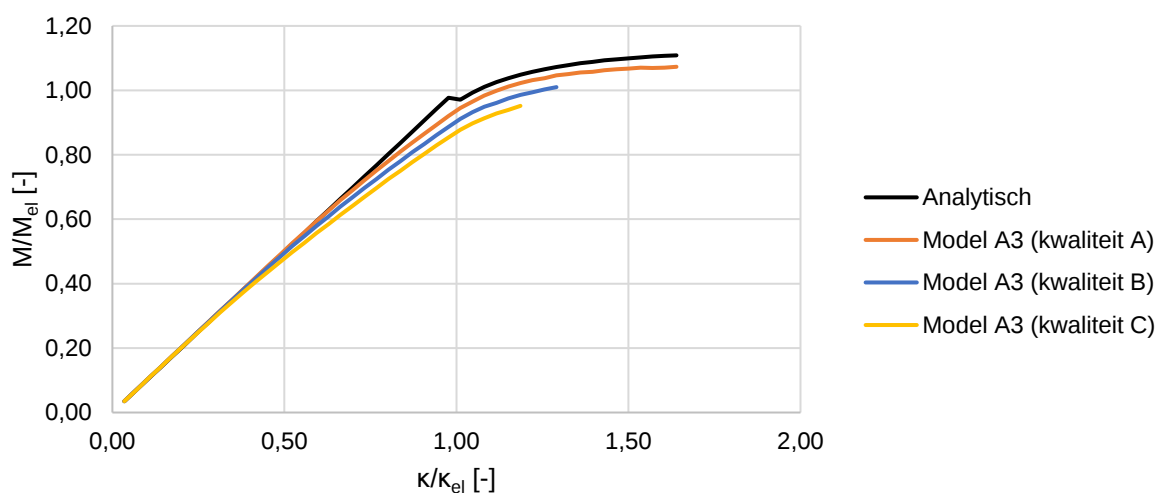
Het moment-kromming is berekend voor een lege buis Ø711-5 mm.



Figuur 4-3 M- κ diagram model A1: lege buis



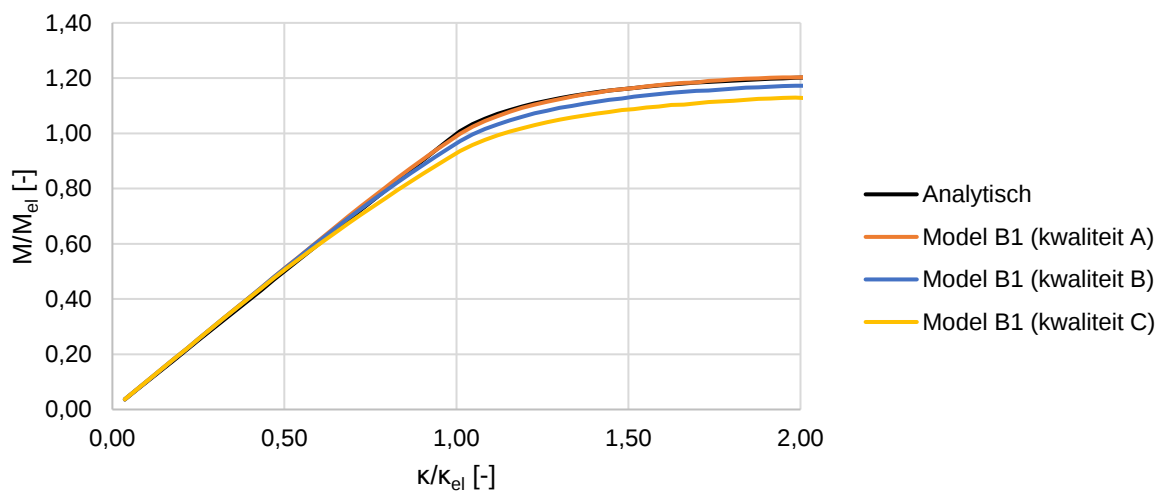
Figuur 4-4 M-k diagram model A2: lege buis



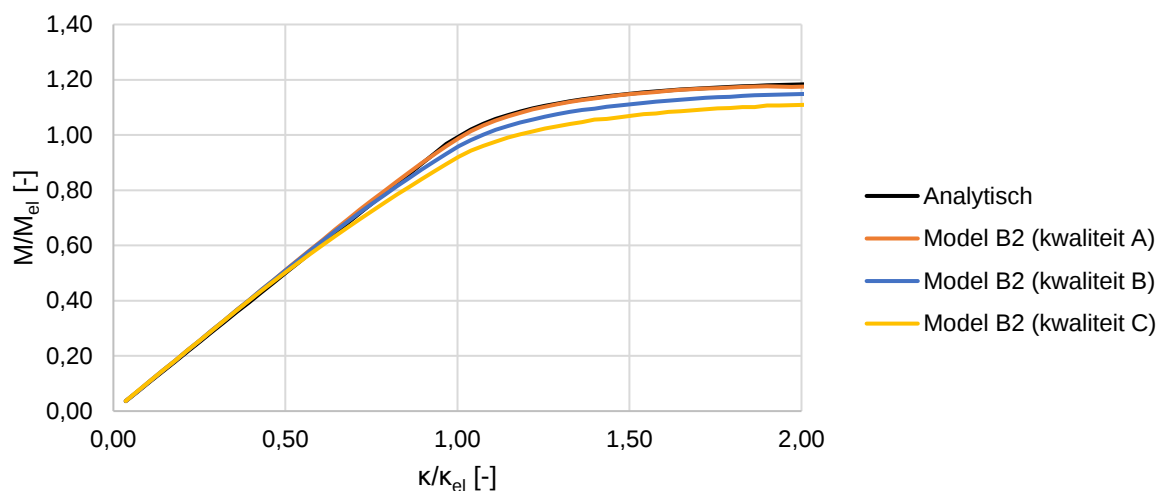
Figuur 4-5 M-k diagram model A3: lege buis

4.2.1.2 Model B: Ø508-5 mm

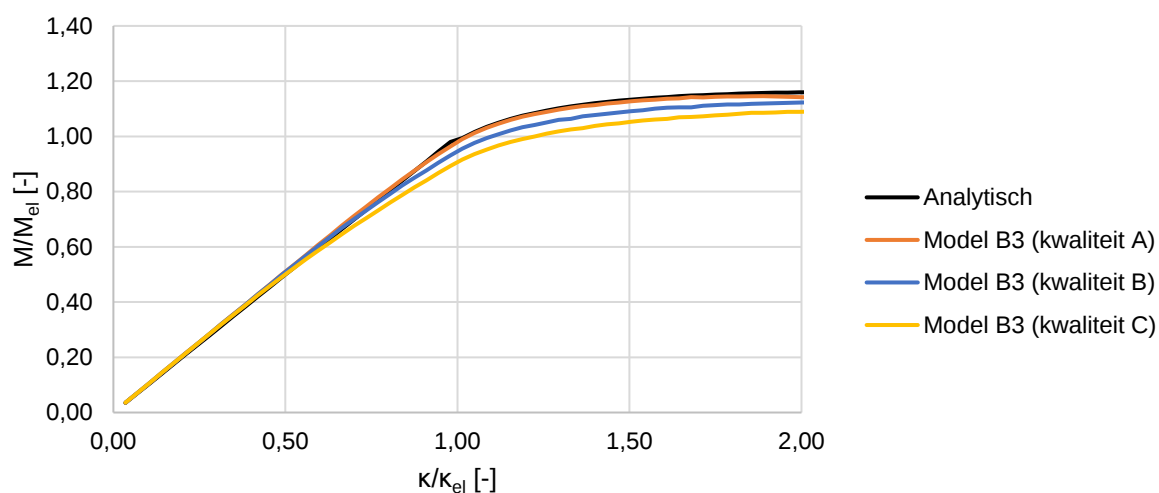
Het moment-kromming is berekend voor een lege buis Ø508-5 mm.



Figuur 4-6 M-k diagram model B1: lege buis



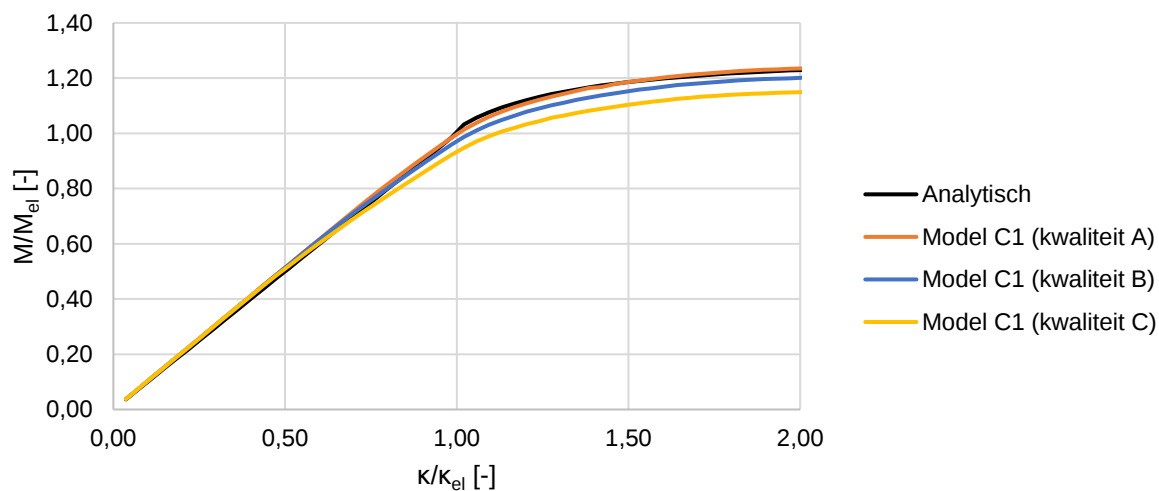
Figuur 4-7 M-k diagram model B2: lege buis



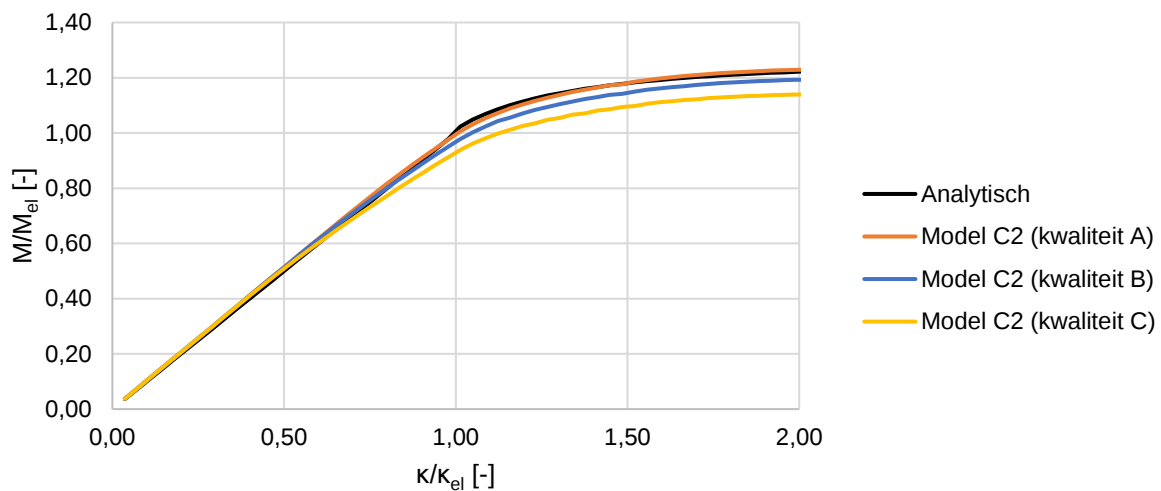
Figuur 4-8 M-k diagram model B3: lege buis

4.2.1.3 Model C: Ø508-10 mm

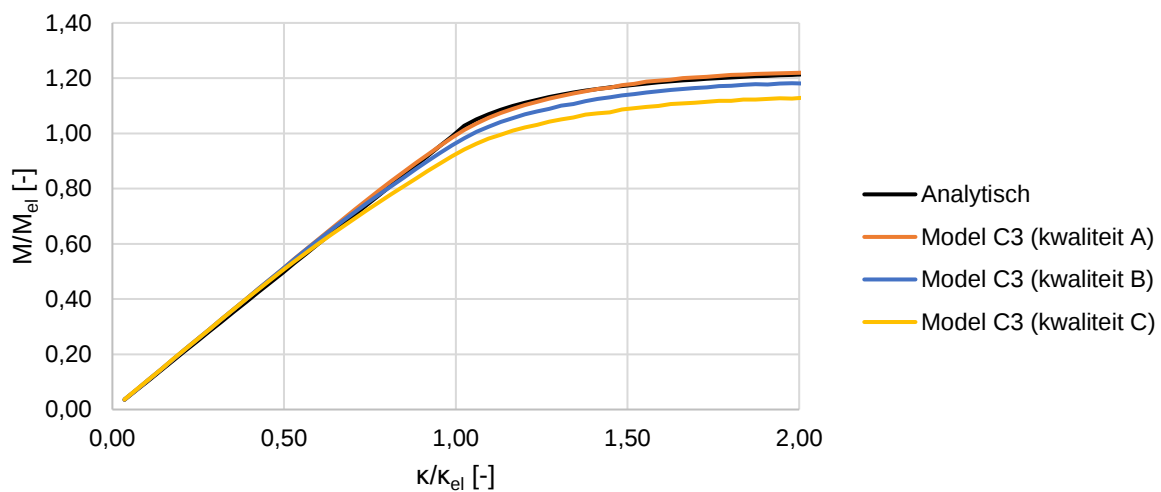
Het moment-kromming is berekend voor een lege buis Ø508-10 mm.



Figuur 4-9 M-k diagram model C1: lege buis



Figuur 4-10 M- κ diagram model C2: lege buis



Figuur 4-11 M- κ diagram model C3: lege buis

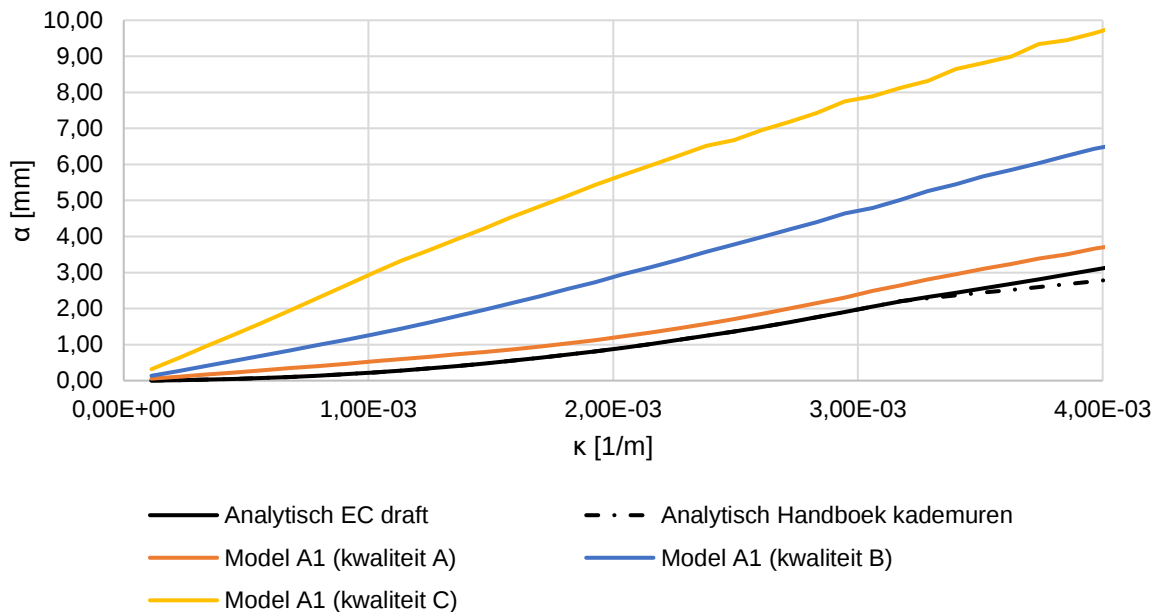
De moment-krommingsdiagrammen op basis van de numerieke modellen komen grosso modo overeen met de analytische resultaten. Wanneer een grotere equivalente geometrische imperfectie wordt toegepast neemt het maximale moment af en begint, voordat het elastisch moment bereikt wordt, het M- κ diagram af te buigen.

4.2.2 Ovalisatie lege buis

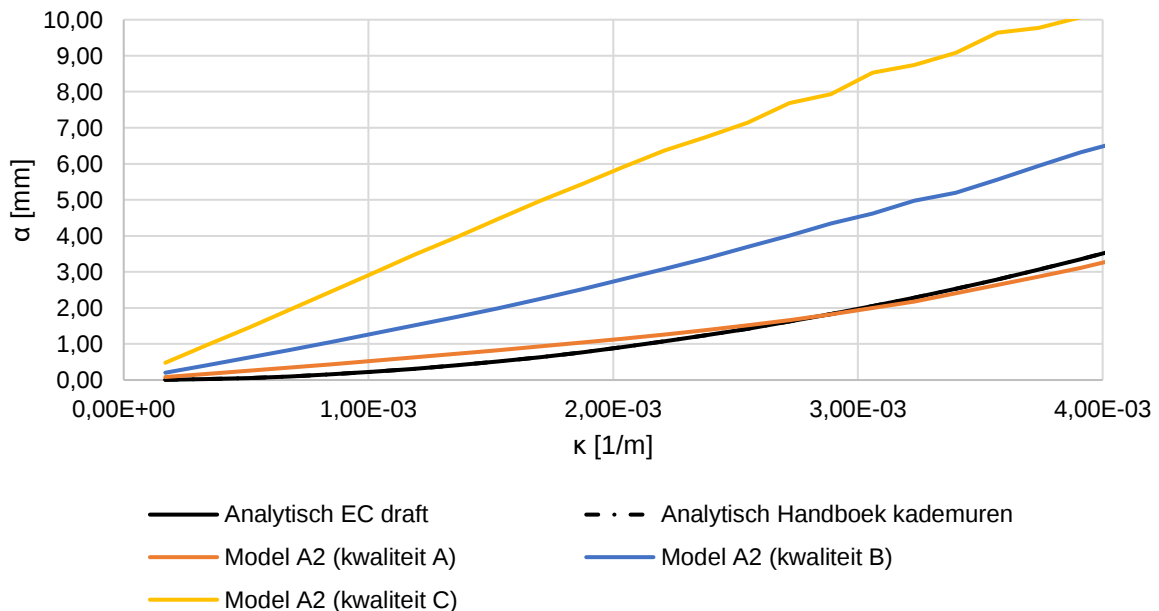
Vervolgens wordt de ovalisatie van de buispaal in het eindige elementen model vergeleken met de resultaten op basis van de analytische formules.

4.2.2.1 Model A Ø711-5 mm

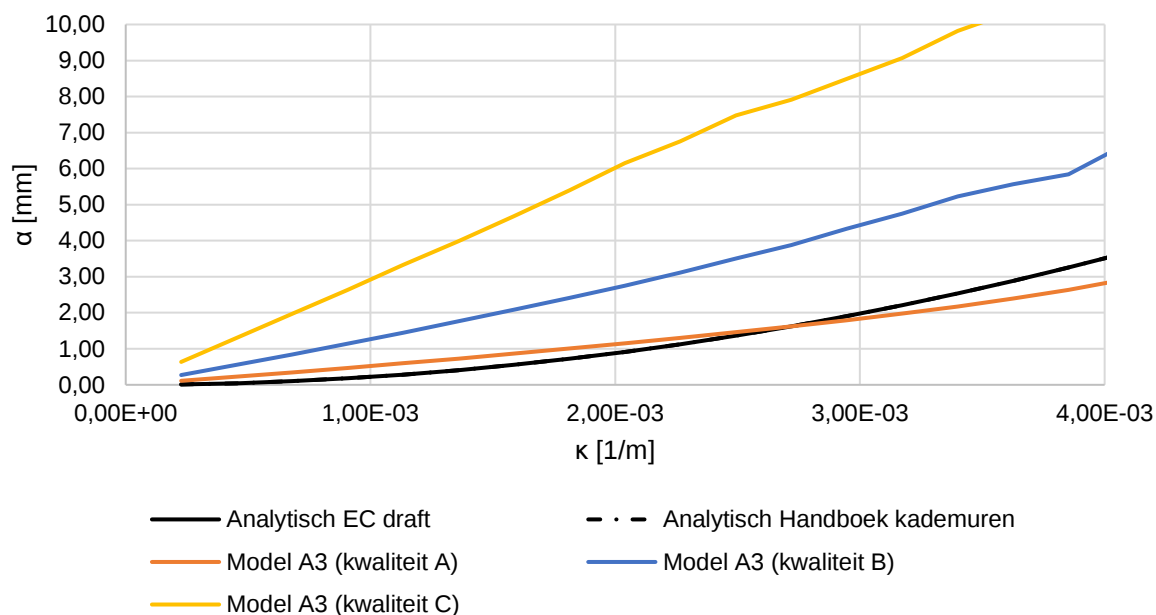
De berekende ovalisatie, op basis van de GMNIA analyse en analytische modellen, voor een buispaal Ø711-5 is weergegeven in figuur 4-12, figuur 4-13 en figuur 4-14.



Figuur 4-12 Ovalisatie model A1: lege buis



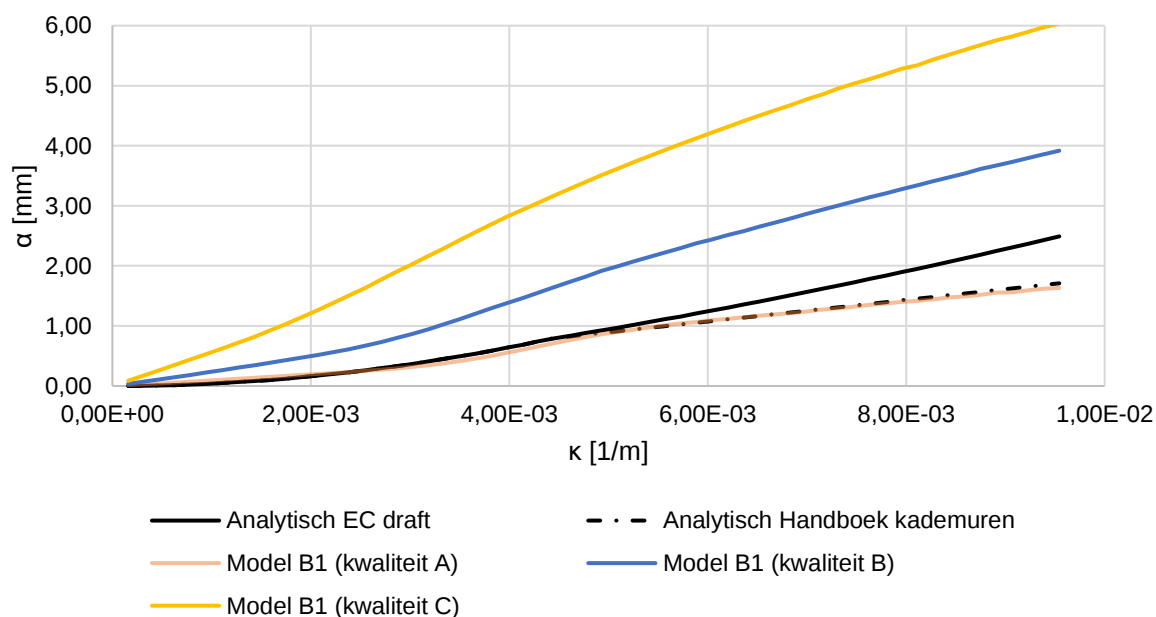
Figuur 4-13 Ovalisatie model A2: lege buis



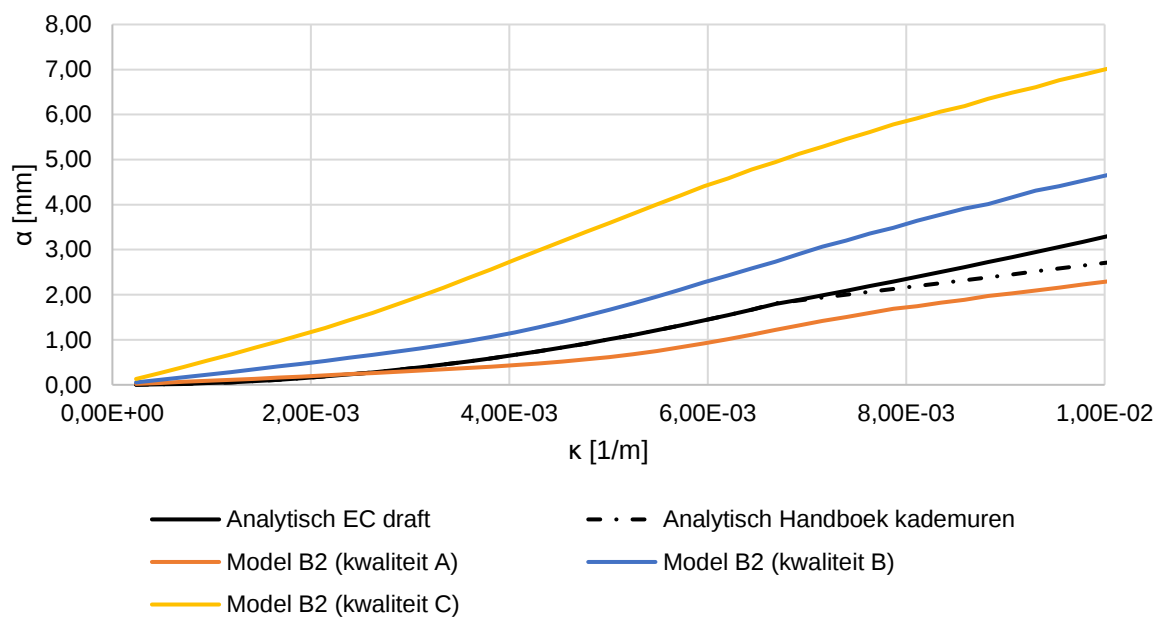
Figuur 4-14 Ovalisatie model A3: lege buis

4.2.2.2 Model B Ø508-5 mm

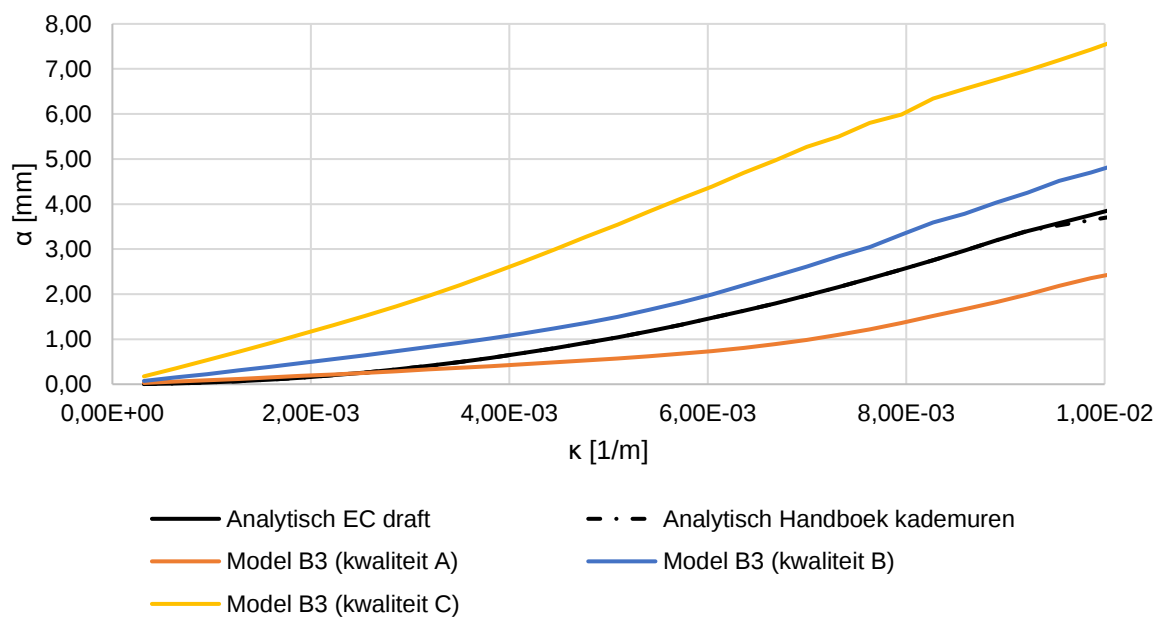
De berekende ovalisatie, op basis van de GMNIA analyse en analytische modellen, voor een buispaal Ø508-5 is weergegeven in figuur 4-15, figuur 4-16 en figuur 4-17.



Figuur 4-15 Ovalisatie model B1: lege buis



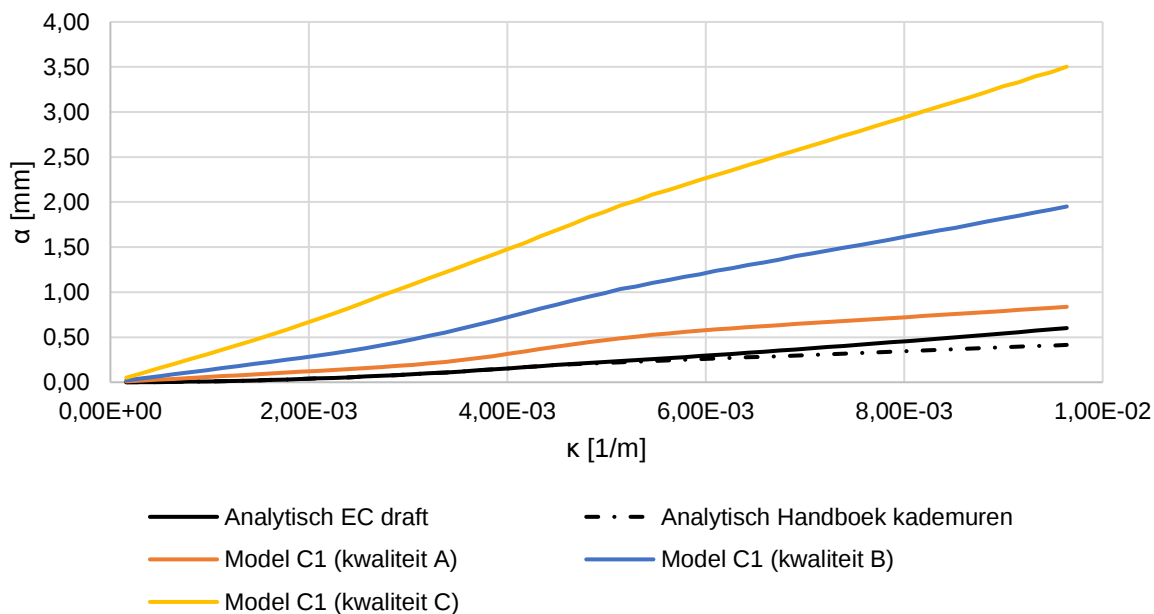
Figuur 4-16 Ovalisatie model B2: lege buis



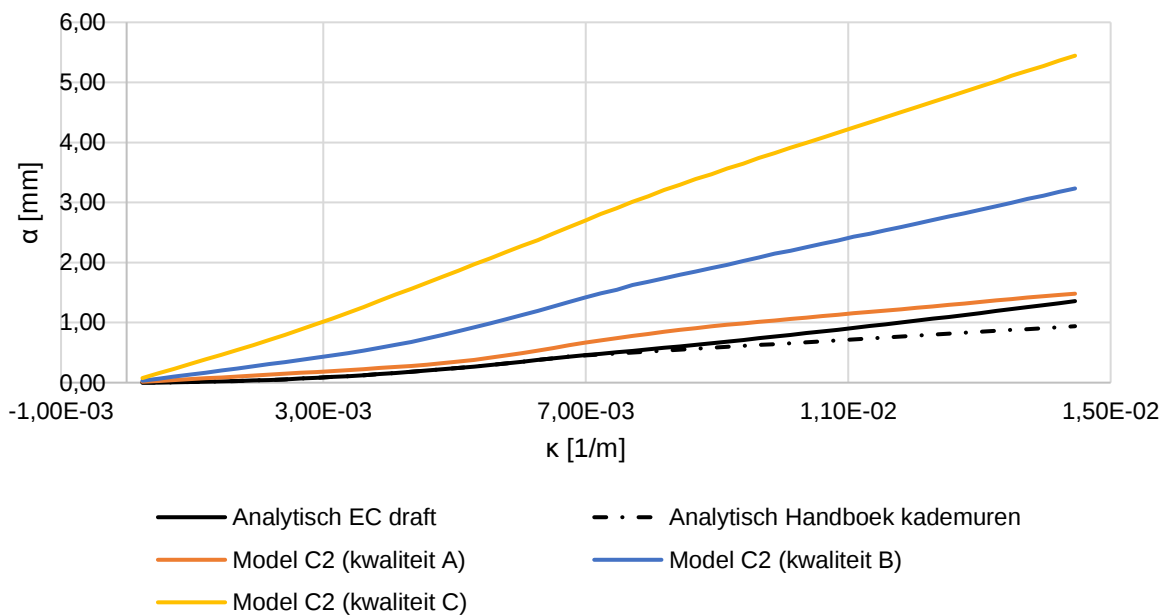
Figuur 4-17 Ovalisatie model B3: lege buis

4.2.2.3 Model C Ø508-10 mm

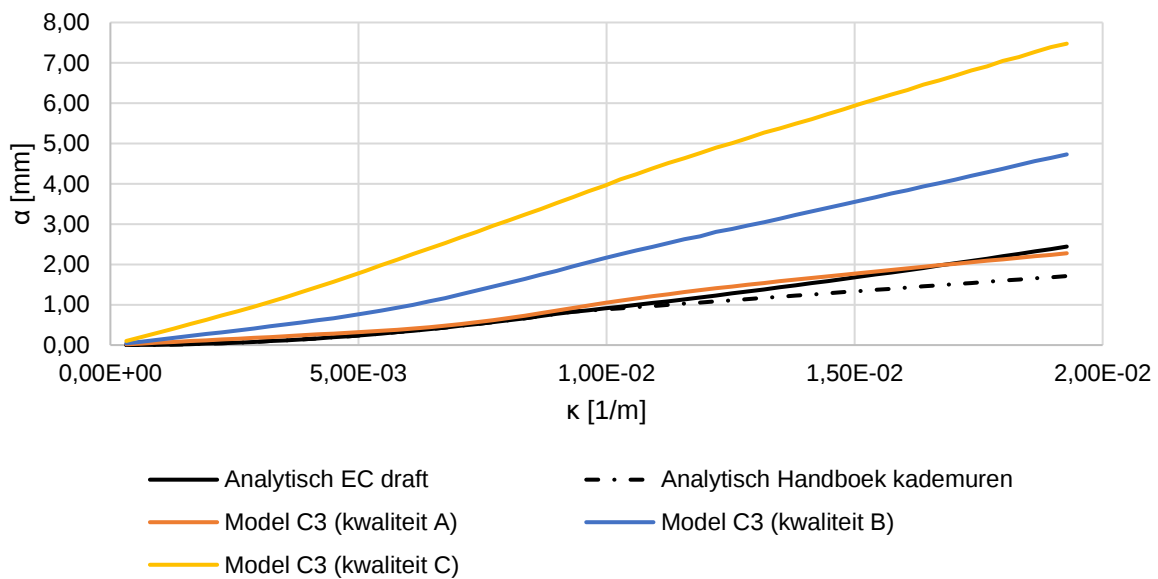
De berekende ovalisatie, op basis van de GMNIA analyse en analytische modellen, voor een buispaal Ø508-10 is weergegeven in figuur 4-18, figuur 4-19 en figuur 4-20.



Figuur 4-18 Ovalisatie model C1: lege buis



Figuur 4-19 Ovalisatie I model C2: lege buis



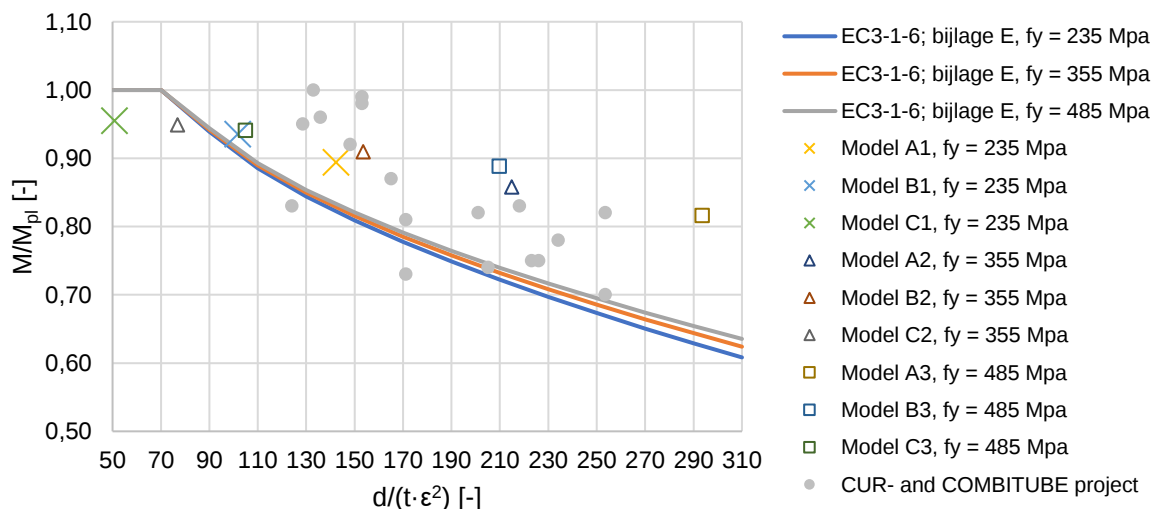
Figuur 4-20 Ovalisatie model C3: lege buis

De berekende ovalisatie op basis van kwaliteitklasse C komt nagenoeg overeen met de analytische resultaten. Wanneer een grotere equivalente geometrische imperfectie wordt toegepast neemt de ovalisatie toe. Met andere woorden, wanneer de grotere imperfectie wordt toegepast zal de ovalisatie van de paal toenemen en daarmee de (moment)capaciteit afnemen. De ovalisatie is sterk afhankelijk van de aangehouden imperfectie.

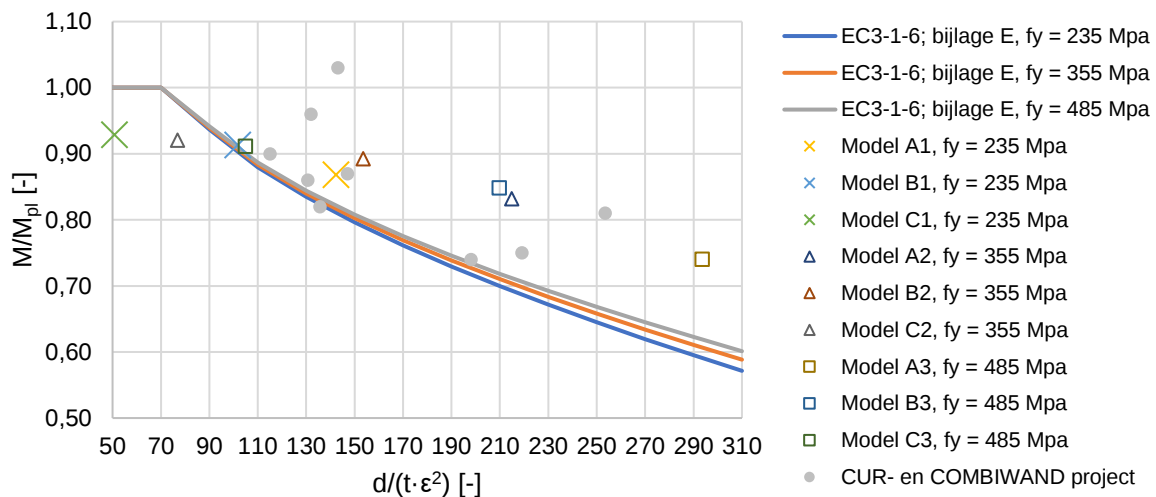
4.2.3 Momentcapaciteit

De genormaliseerde karakteristieke momentcapaciteit op basis van het numerieke model wordt vergeleken met de genormaliseerde karakteristieke momentcapaciteit conform [13] bijlage E. De resultaten van het eindige elementen model, en de resultaten op basis van de rekenmethodiek uit [13], zijn weergegeven in figuur 4-21, figuur 4-22 en figuur 4-23.

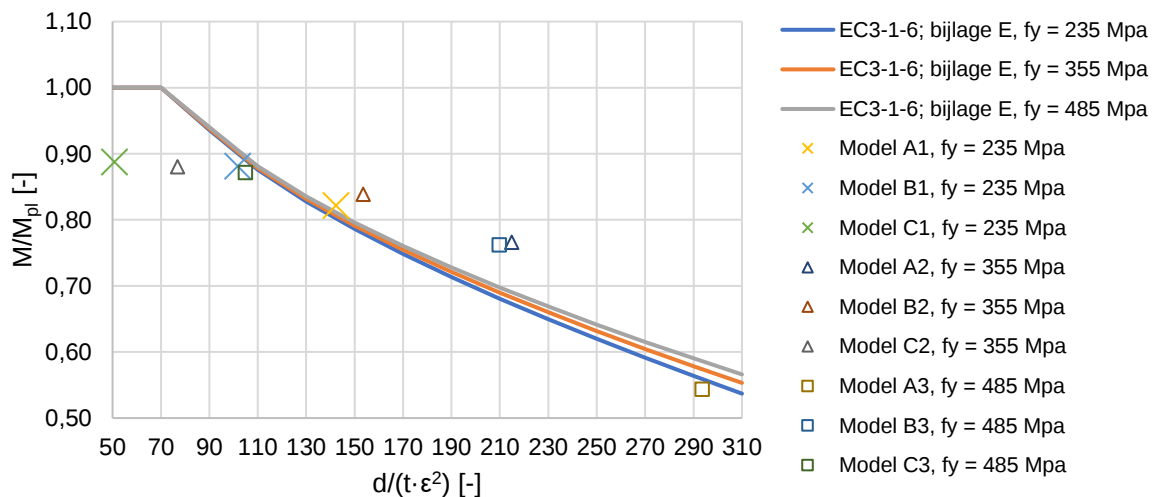
In 2012 zijn, als onderdeel van een CUR onderzoek naar de plooistabiliteit van zandgevulde en lege buispalen [19], verschillende experimenten uitgevoerd. Verder zijn tussen 2012 en 2014 zijn, als onderdeel van het COMBITUBE project, verschillende experimenten uitgevoerd bij de universiteiten van Karlsruhe en Delft [3]. Beide onderzoeken zijn ter vergelijking toegevoegd aan de onderstaande resultaten.



Figuur 4-21 Karakteristieke momentcapaciteit (kwaliteit A)



Figuur 4-22 Karakteristieke momentcapaciteit (kwaliteit B)



Figuur 4-23 Karakteristieke momentcapaciteit (kwaliteit C)

NB: In [3] en [19] is voornamelijk tolerantiekwaliteit A en B beschouwd. Derhalve zijn proefresultaten voor tolerantiekwaliteit C niet opgenomen in figuur 4-23.

De momentcapaciteit op basis van de rekenmethodiek uit [13] is voor verschillende slankheden bepaald met behulp van een spreadsheetberekening. In verband met herleidbaarheid is voor één doorsnede de berekening uitgeschreven. Deze berekening is weergegeven in bijlage 7.

Uit de bovenstaande figuren blijkt dat, met name voor buizen in kwaliteit A en B, de momentcapaciteit op basis van de GMNIA analyse bij slankere buizen (significant) verschilt ten opzichte de resultaten conform de rekenmethodiek uit [13] bijlage E. De momentcapaciteit voor buizen in kwaliteit C komt daarentegen een stuk beter overeen. Verwacht wordt dat de correlatie tussen de aangehouden imperfecties in de GMNIA analyse, met name voor kwaliteit A en B, en de imperfecties conform [13] bijlage E onjuist is.

Het is onbekend in hoeverre de aangehouden equivalente geometrische imperfectie overeenkomt met de imperfecties voor open stalen buispalen zoals beschreven in [13]. Ondanks het voorgaande lijkt de aangehouden equivalente geometrische imperfectie te klein ten opzichte van de imperfecties conform de rekenmethodiek uit conform [13] bijlage E en [17]. Een mogelijke oorzaak is het onderschatten van de invloed van walsspanningen en lasonvolkomenheden in de aangehouden imperfectie.

4.3 GMNIA analyse: lege buis met uitwendige gronddruk

Het numerieke model van een lege buis met uitwendige gronddruk wordt in deze paragraaf beschouwd.

Vanwege de buitengewone complexiteit van een GMNIA analyse voor de stalen buispaal, in combinatie met niet-lineair grondgedrag en spanningsafhankelijke stijfheid, is de grond gemodelleerd als lineair elastisch materiaal. Om de gronddruk te modelleren wordt, in de z-richting, een opgelegde oppervlakverplaatsing toegepast op de uitwendige grondlaag.

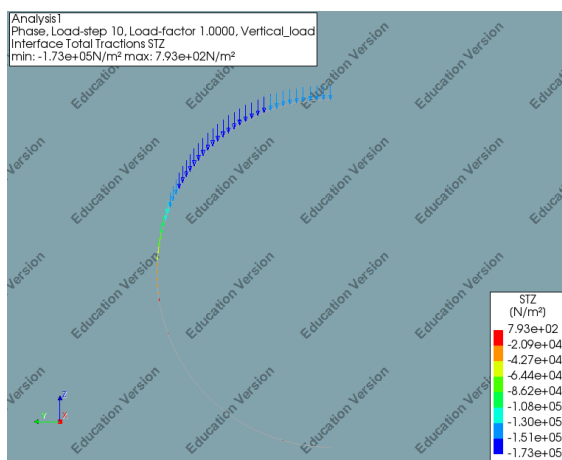
De translatie van de buispaal in de Z-richting wordt verhinderd door middel van een star steunpunt in het midden van het model. De reactiekracht in dit steunpunt is gelijk aan de aangebrachte passieve gronddruk op het schaalement. De maximale passieve gronddruk is bepaald door middel van grond-drukfactoren volgens DIN 4085 (inclusief schelfactoren) op basis van (droog) schoon zand. Het zand heeft een losse tot matige pakking met een conusweerstand van 10 MPa. De elasticiteitsmodulus van de grond is arbitrair gekozen als 3 keer de conusweerstand (= Oedometer stijfheid).

De uiteindelijk aangebrachte gronddruk is grosso modo gelijk aan de maximale passieve gronddruk. Met andere woorden, het model is belast tot aan de passieve weerstand van de grond. De berekening van de passieve gronddruk is weergegeven in bijlage 8.

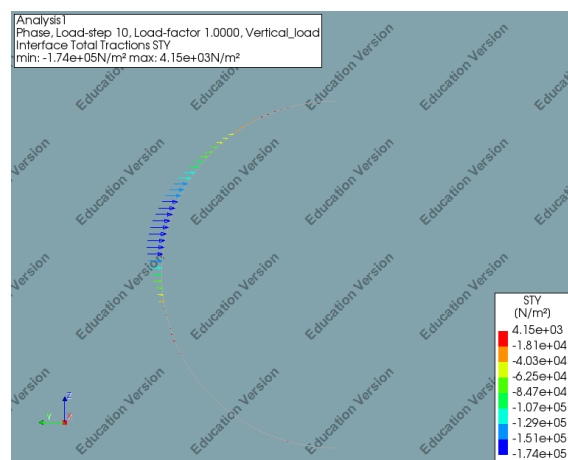
Tabel 4-5 Instellingen solver

Model	Element Grootte	Belasting		Convergentie		Iteratie		
		Type	Stap grootte	Norm.	Tol.	Aantal	Stijfheid	Conver. schema
[-]	[m]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
A stap 1	0,03	Verpl.	10,00	Verpl., Energie	$1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-4}$	50	Secant	Line search
A stap 2			1,00			200		
B stap 1	0,03	Verpl.	10,00	Verpl., Energie	$1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-4}$	50	Secant	Line search
B stap 2			1,50			200		
C stap 1	0,03	Verpl.	10,00	Verpl., Energie	$1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-4}$	50	Secant	Line search
C stap 2			2,00			200		

De (lokale) gronddruk op het schaalement wordt bepaald op basis van de (globale) spanning in de interface tussen het lineaire grondmodel en het schaalement van de buispaal. In respectievelijk figuur 4-24 en figuur 4-25 is een voorbeeld gepresenteerd van de passieve gronddruk op de buispaal (spanning in globale Z-richting) en de steundruk tegen de zijwang van de buispaal (spanning in globale Y-richting).



Figuur 4-24 Passieve gronddruk



Figuur 4-25 Steundruk

4.3.1 Ovalisatie ten gevolge van gronddruk

De ovalisatie ten gevolge van gronddruk resulteert in een grotere D/t verhouding waardoor de gevoeligheid van plooistabiliteit toeneemt. De ovalisatie ten gevolge van gronddruk is bepaald door middel van de eindige elementen berekening in Diana Fea. In het numerieke model is de zakking bepaald op basis van de (extreme) gronddruk zoals is vastgesteld in bijlage 8. De resultaten van de gemaakte berekeningen zijn weergegeven in tabel 6.

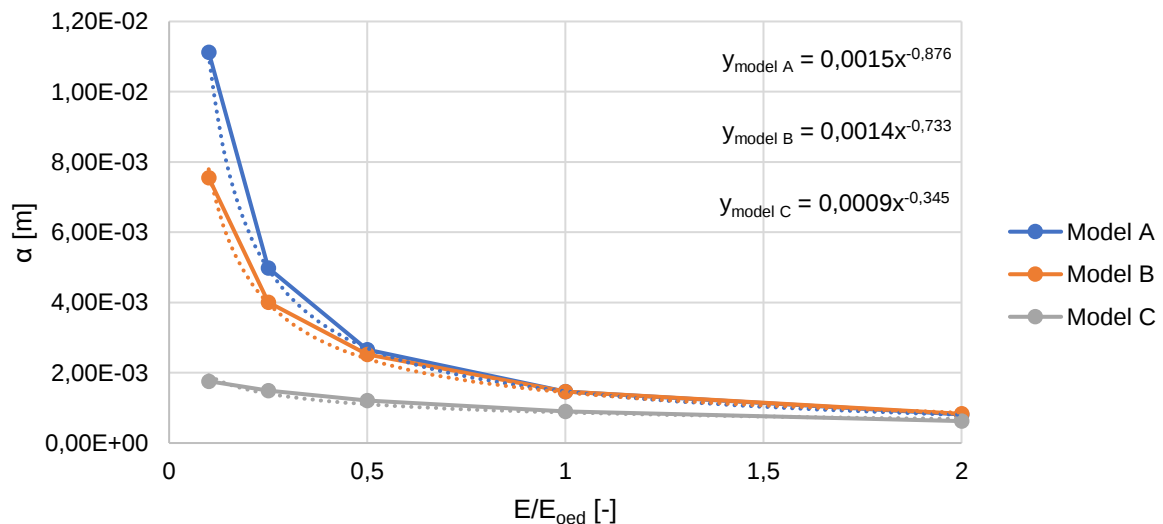
Tabel 6 Ovalisatie ten gevolge van gronddruk

Model [-]	d/t [-]	FBZ ¹⁾ [N]	q [N/m ²]	TDtZ [m]
A	142	39,9·10 ³	112·10 ³	-1,50·10 ⁻³
B	102	29,2·10 ³	115·10 ³	-1,10·10 ⁻³
C	51	30,5·10 ³	120·10 ³	-0,71·10 ⁻³

¹⁾ De berekende passieve gronddruk is op basis van een halve paal welke gehalveerd over de middenlijn.

Ongeacht de (extreem) hoge gronddruk is de ovalisatie ten gevolge van de passieve gronddruk, en daarmee de invloed op de plooiveerstand, marginaal.

De ovalisatie, ten gevolge van gronddruk, wordt verhinderd door de steundruk op de zijwang van de buispaal. Om de invloed van de elasticiteitsmodulus van de grond te beschouwen zijn, voor model A, model B en model C, meerdere berekeningen uitgevoerd waarbij respectievelijk 10%, 25%, 50%, 100% en 200% van de Oedometer stijfheid wordt beschouwd. Bij alle berekeningen is de passieve gronddruk, zoals bepaald in bijlage 8, aangebracht als belasting. De daarbij optredende ovalisatie, als functie van de genormaliseerde elasticiteitsmodulus van de grond, is weergegeven in figuur 4-26.



Figuur 4-26 Invloed elasticiteitsmodulus op ovalisatie

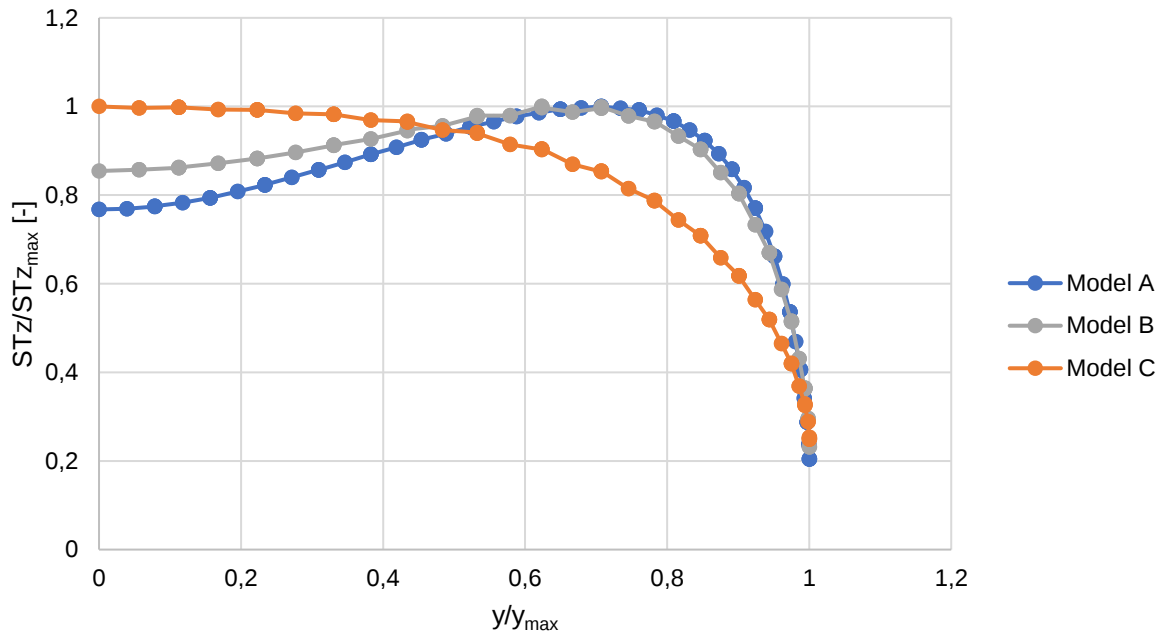
Uit figuur 4-26 blijkt dat het effect van de steundruk bij slanken buizen, en daarmee de optredende ovalisatie ten gevolge van de gronddruk, sterk afhankelijk is van de elasticiteitsmodulus van de grond. Daarnaast valt op dat, bij een beperkte elasticiteitsmodulus al een zeer grote reductie van de ovalisatie behaald wordt.

Voor stijvere buizen (bijvoorbeeld doorsnede klasse 1 profielen) heeft de elasticiteitsmodulus een beperkte invloed op de ovalisatie ten gevolge van gronddruk.

4.3.2 Verdeling van passieve gronddruk op de buispaal

Tenslotte wordt de verdeling van de passieve gronddruk op de buispaal beschouwd. De verticale normaalspanning op de interface in het globale assenstelsel, en de horizontale afstand loodrecht op de middenlijn, zijn genormaliseerd om de resultaten voor de verschillende d/t ratio's te vergelijken.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor model A, B en C. De resultaten zijn weergegeven in figuur 4-27.



Figuur 4-27 Verdeling passieve gronddruk op de buispaal

Uit de gemaakte berekening volgt dat de passieve gronddruk voor, met name slanke buizen, niet gelijkmatig verdeeld is over de breedte van de buis. Naarmate de slankheid afneemt wordt relatief meer passieve gronddruk afgedragen via de zijwangen van de buis. Uit figuur 4-28 blijkt dat voor een buispaal met een d/t ratio van ca. 140 de optredende passieve grondspanning in het hart van de paal ca. 20% lager is dan de maximaal optredende passieve grondspanning.

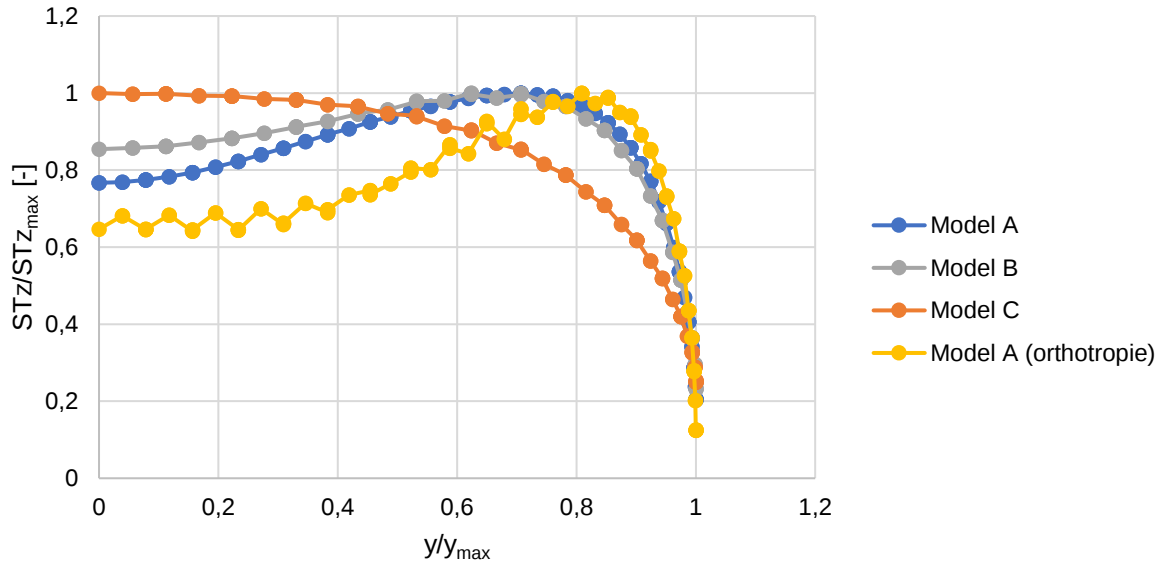
Voor zeer stijve ronde buisprofielen (bijvoorbeeld doorsnede klasse 1 profielen) bevindt de maximaal optredende gronddruk zich, in tegenstelling tot de slankere palen, in het hart van de buis.

4.3.2.1 Orthotropie

Aangezien de ovalisatie ten gevolge van gronddruk in grootte mate afhankelijk is van de effectiviteit van de steundruk wordt een extra beschouwing gemaakt waarin orthotroop lineair grondgedrag is voorzien. In de gemaakte berekening wordt, voor model A, transversale isotrope elasticiteit toegepast. Met andere woorden, in de x- en y-richting worden dezelfde materiaaleigenschappen (lage stijfheid) toegepast. In de z-richting wordt opnieuw de Oedometer stijfheid aangehouden (3x conuswaarde). In de x- en y-richting wordt 10% van de Oedometer stijfheid toegepast.

	Isotroop materiaalgedrag	Orthotroop materiaalgedrag	Vershil
TDtZ [m]	$39,9 \cdot 10^3$	$33,2 \cdot 10^3$	-16,8%
FBZ [N]	$-1,50 \cdot 10^{-3}$	$-5,59 \cdot 10^{-3}$	+272,7%

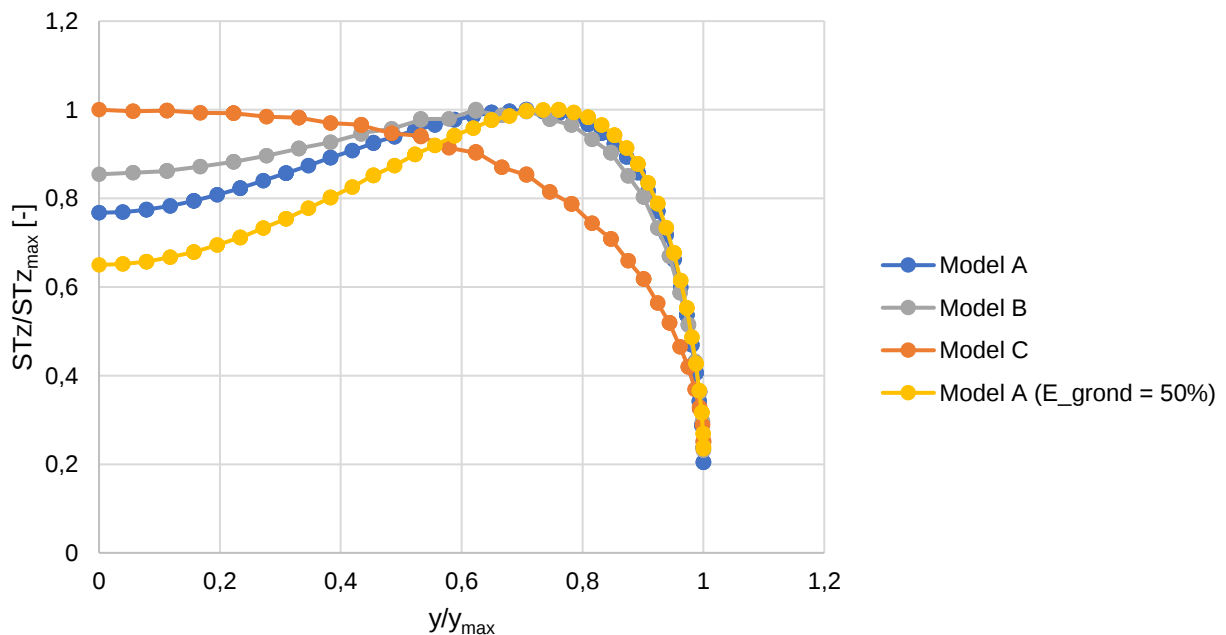
Uit de gemaakte berekening volgt dat het positieve effect van de steundruk in sterke mate afhangt van de stijfheid in (met name) de y-richting. Door het toepassen van orthotroop lineair grondgedrag is de ovalisatie toegenomen. Bij een (effectieve) gronddruk welke 16,8% lager is neemt de ovalisatie met 272,7% toe. Doordat de buis gemakkelijker kan ovaliseren neemt de gronddruk in het hart van de buis af. Dit is weergegeven in figuur 4-28.



Figuur 4-28 Verdeling passieve gronddruk op de buispaal inclusief orthotropie

4.3.2.2 Variatie beddingsconstante

Tenslotte is het effect van de elasticiteitsmodulus van de grond op de verdeling van de passieve gronddruk onderzocht. Uit §4.3.1 blijkt dat, bij een lagere stijfheid van de grond, de buis gemakkelijker kan ovaliseren. Net als bij orthotroop lineair grondgedrag resulteert dit in een lagere passieve gronddruk in het hart van de buis. De genormaliseerde gronddruk, bij een 50% lagere stijfheid, is voor model A toegevoegd in figuur 4-29.



Figuur 4-29 Verdeling passieve gronddruk op de buispaal bij variatie bedding



5 Conclusie en aanbevelingen

In dit afstudeerverslag is, op basis van eindige elementenberekeningen, de invloed van uitwendige gronddruk op het ovaliseren van open stalen buispalen beschouwd. Het betreffen open stalen buispalen zonder grondvulling (zone 2; los zand).

5.1 Conclusie

Op basis van de resultaten uit hoofdstuk 4 worden de volgende conclusies getrokken:

- De moment-krommingsdiagrammen, op basis van de gemaakte eindige elementenberekening in §4.2.1, komen goed overeen met de analytische resultaten voor een lege buis;
- De momentcapaciteit van een lege buis op basis van de gemaakte eindige elementenberekening is significant hoger dan verwacht mag worden volgens de vigerende normen en richtlijnen. Daarnaast liggen de resultaten hoger dan de gemiddelde waarde afkomstig uit de experimenten, welke zijn uitgevoerd als onderdeel van het COMBITUBE project en het CUR onderzoek. Een mogelijke oorzaak is het onderschatten van de invloed van bijvoorbeeld walsspanningen en lasonvolkomenheden in de aangehouden imperfectie waardoor een te kleine equivalente geometrische imperfectie in rekening is gebracht;
- Ten gevolge van de horizontale steundruk is het effect van ovalisatie ten gevolge van gronddruk aanzienlijk lager dan volgt uit de rekenmethodiek uit [8] en [17], waarin de effecten van horizontale steundruk niet zijn beschouwd;
- Het positieve effect van de steundruk is in sterkte mate afhankelijk van de transversale stijfheid. Bij een lagere transversale stijfheid neemt de ovalisatie in grote mate toe. Ongeacht het voorgaande is deze ovalisatie nog altijd aanzienlijk lager dan verwacht mag worden op basis van een buispaal zonder steundruk;
- De verdeling van de passieve gronddruk is (sterk) afhankelijk van de stijfheidsratio tussen de buiswand en de grond. Bij buispalen welke relatief gemakkelijk ovaliseren, neemt de gronddruk in het hart van de buis af en treedt de maximale gronddruk op ter plaatse van de zijwang van de buispaal. Voor relatief stijve buispalen ten opzichte van de stijfheid van de grond zal de maximale gronddruk in het hart van de buis optreden;
- Het toepassen van steundruk draagt positief bij aan het verhinderen van ovalisatie en vergroot daarmee de plooiweerstand van de buis.

5.2 Aanbeveling

De volgende aanbevelingen worden gedaan voor een vervolgstudie aangaande dit onderwerp:

- Voor de in- en uitwendige grond is uitgegaan van isotroop lineair elastisch grondmateriaal. Hierdoor is de stijfheid in alle richtingen gelijk waardoor een aanzienlijke steundruk ontstaat ten opzichte van de passieve mobilisatie van de grond buiten de paal. Daarnaast zijn enkele berekeningen uitgevoerd met een variërende stijfheid van de grond en met orthotroop materiaalgedrag. Om meer inzicht te verkrijgen in het positieve effect van steundruk wordt geadviseerd om een vervolgstudie uit te voeren waarin representatieve parameters worden onderzocht om de steundruk te kunnen modelleren (bijvoorbeeld door middel van orthotroop materiaalgedrag en/of spanningsafhankelijk niet lineair grondgedrag);
- Het uitvoeren van een praktijkonderzoek om het eindige elementenmodel te valideren aan de hand van experimenten. Hierbij zou bijvoorbeeld een stuk buispaal in een bak grond geplaatst kunnen worden waarbij één wand kan transleren en door middel van hydraulische cilinders de grond buiten de paal mobiliseert. De translatie van de buispaal, in de richting waarin de gronddruk wordt aangebracht, dient verhinderd te worden;
- Vanwege stijfheidsverschillen van de buispaal ontstaat een ongelijkmatige spanningsverdeling in de interface tussen de paal en de grond (boogwerking). Hierdoor treden, ter plaatse van de zijwangen van de paal, lokaal hogere spanningen op dan op basis van de analytische formules mag worden verwacht. Indien deze spanningen hoger zijn dan de passieve weerstand zal plasticiteit optreden in de grond en zullen de spanningen zich herverdelen over de doorsnede van de buis. Het is aan te bevelen om de invloed van (lokale) plasticiteit aan de passieve zijde nader te onderzoeken omdat, ten gevolge van herverdeling in de grond, de ovalisatie groter kan zijn dan verwacht mag worden op basis van het isotroop lineair elastisch grondmateriaal;

- Een “realistisch” spannings-rekdiagram toepassen in plaats van een perfect elastisch-plastisch rekdiagram, gecombineerd met initiële spanningen door koud-vervormen.

6 Reflectie

Het afstudeeronderzoek wordt afgesloten met een reflectie. De reflectie is driedelig en bestaat uit een reflectie op het vooronderzoek, de gehanteerde onderzoeksmethodologie en de uitkomsten van het onderzoek.

6.1 Reflectie op het vooronderzoek

In het vooronderzoek zijn de vigerende normen en richtlijnen, literatuur en overige bronnen onderzocht welke betrekking hebben op plooi stabiliteit van stalen buizen en de geotechnische capaciteit van de grond. Daarnaast is de draftversie van de nieuwe Eurocode geraadpleegd om de laatste stand van zaken te verwerken in dit afstudeerrapport. Tenslotte is veel (persoonlijk) onderzoek gedaan naar het maken van 3D (volume) berekeningen in Diana FEA en het maken van een geometrisch en fysisch niet-lineaire berekening inclusief de invloed van imperfecties.

Bij nader inzien heeft het onderzoeken van geotechnische modellen als Mohr-Coulomb en Hardening Soil geen (noemenswaardige) meerwaarde gehad aangezien uiteindelijk een lineair elastisch materiaalgedrag is aangehouden voor de grond.

Tenslotte heeft het maken van de eindige elementenberekeningen (aanzienlijk) meer tijd gekost dan vooraf gepland. Met terugwerkende kracht had in het vooronderzoek meer aandacht besteed kunnen worden aan het modelleren van een op buiging belaste paal. Bijvoorbeeld in [3] worden diverse aanbevelingen gedaan voor het modelleren van op buiging belaste buizen.

6.2 Reflectie op de gehanteerde onderzoeksmethodologie

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden is gebruik gemaakt van een eindige elementen berekening in Diana FEA. In de eindige elementenberekening is voor de buispaal uitgegaan van geometrisch en fysisch niet-lineair gedrag inclusief de effecten van imperfecties. Voor het grondmodel is een vereenvoudiging toegepast door het toepassen van lineair elastisch materiaalgedrag. Door het toepassen van lineair elastisch materiaalgedrag kon de invloed van de passieve mobilisatie van de grond beschouwd worden.

Terugblikkend zijn de aangehouden equivalente geometrische imperfecties te klein aangenomen ten opzichte van de resultaten op basis van de vigerende normen en richtlijnen en de uitgevoerde experimenten tijdens het CUR onderzoek en het COMBITUBE project. Het in rekening brengen van bijvoorbeeld initiële spanningen door koud-vervormen had mogelijk tot een resultaat geleid wat beter overeenkomt met de bekende resultaten uit de literatuur.

6.3 Reflectie op de uitkomsten

Uit de gemaakte berekeningen volgt dat het ovaliseren ten gevolge van de passieve mobilisatie van de grond in grote mate afhankelijk is van de (zijdellingse) steundruk op de paal. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat bij een beperkte stijfheid al een aanzienlijke reductie van ovalisatie optreedt. Derhalve zijn, ondanks dat diverse “versimpelingen” zijn toegepast zoals bijvoorbeeld het toepassen van lineair elastisch materiaalgedrag voor de grond, de resultaten relevant voor het onderzoeken van plooi stabiliteit van open stalen buispalen in de bodem.

Vanwege de toenemende complexiteit, en de beperkte tijd waarbinnen het afstudeeronderzoek moet worden uitgevoerd, is geen spanningsafhankelijke stijfheid en/of niet lineair grondgedrag in rekening gebracht zoals bijvoorbeeld een Hardening Soil model. In een vervolgstudie wordt aanbevolen de invloed van niet lineair grondgedrag mee te nemen om zo de effecten van (lokale) plasticiteit aan de passieve zijde, en de geotechnische capaciteit van de steundruk, nader te onderzoeken.

Bijlage 1 Plooiweerstand conform Eurocode (kritische spanning)

De onderstaande rekenregels, op basis van NEN-EN 1993-1-6², gelden binnen het volgende geldigheidsgebied:

$$25 \leq r / t \leq 3000$$

B 1.1 Karakteristieke plooiweerstand

De karakteristieke plooiweerstand kan als volgt worden bepaald:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} \cdot f_{yk}, \quad T_{x\theta,Rk} = \chi_T \cdot f_{yk} / \sqrt{3}$$

De elasto-plastische plooi factoren χ_x , χ_{θ} en χ_T worden als volgt bepaald op basis van de relatieve slankheid van de schaal:

$$\begin{aligned} \chi &= \chi_h \cdot \left(\frac{\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}_0} \right) \cdot (\chi_h - 1) && \text{voor } \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \\ \chi &= 1 - \beta \cdot \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^{\eta} && \text{voor } \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p \\ \chi &= \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} && \text{voor } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \end{aligned}$$

waarin: $\bar{\lambda}$ = relatieve slankheid; $\bar{\lambda} = \sqrt{(M_{pl} / M_{R,cr})}$;

$\bar{\lambda}_0$ = 'squash limit' slankheid (waarde voor λ waarbij de stabiliteitsafname ten gevolge van slankheid begint); $\bar{\lambda}_0 = 0,30^3$ (conform [13]);

$\bar{\lambda}_p$ = plastische limietwaarde voor de relatieve slankheid; $\bar{\lambda}_p = \sqrt{(\alpha / (1 - \beta))}$;

χ_h = verhardingslimiet; $\chi_h = 1,0^4$ (conform [13])

α = elastische plooi reductiefactor;

β = plastische range factor;

η = interactiefactor;

B 1.2 Plooi factoren

De plooi factoren worden bepaald op basis van een dimensieloze lengte.

Tabel 7 Geometrische reductiefactoren conform [13]

Lengte klasse [-]	ω [-]	Ω [-]	α_g [-]
Kort	$3,0 \leq \omega \leq 4,8$	-,--	$1,93 - 0,5 \cdot (\omega - 3,8)^2 - 0,44 \cdot (\omega - 3,8)^3$
Medium	$4,8 \leq \omega \leq 8,6$	-,--	$0,85 + 0,029 \cdot (\omega - 7,1)^2$
	$8,6 \leq \omega \leq 1/2 \cdot (r / t)$	-,--	0,92
Overgangslengte	-,--	$0,5 \leq \Omega \leq 7,0$	$1,07 \cdot \left(\frac{1 - 0,22 \cdot \Omega + 0,061 \cdot \Omega^{2,94}}{1 + 0,12 \cdot \Omega^{2,94}} \right)$
Lang	-,--	$\Omega \geq 7,0$	0,516

² De limietwaarde volgens de nieuwe NEN-EN 1993-5 bedragen: $50 \leq d / t \leq 160$

³ Voor de limietwaarde van de slankheid wordt een waarde 0,27 aangehouden voor een semi-compacte doorsnede ($70 < D/t \cdot \epsilon^2$) conform de nieuwe versie van de NEN-EN 1993

⁴ De verhardingslimiet volgens NEN-EN 1993-5; draft 3 – 31/03/2021 bedraagt: $\chi_h = 1,1$

In de nieuwe versie van de Eurocode wordt de controle van plooi stabiliteit van open stalen buispalen in de bodem opgenomen in de NEN-EN 1993-5. De plooi factoren, volgens de nieuwe versie van de NEN-EN 1993-5, zijn weergegeven in tabel 8⁵.

Tabel 8 Geometrische reductiefactoren conform NEN-EN 1993-5; draft 3 – 31/03/2021

Lengte klasse [-]	Ω [-]	α_g [-]
Overgangslengte	$0,5 \leq \Omega \leq 7,0$	$0,90 \cdot \left(\frac{1 - 0,22 \cdot \Omega + 0,061 \cdot \Omega^{2,94}}{1 + 0,12 \cdot \Omega^{2,94}} \right)$
Lang	$\Omega \geq 7,0$	0,450

Waarin: $\omega = L / \sqrt{r \cdot t}$

$$\Omega = L / r \cdot \sqrt{t / r} = t / r \cdot \omega$$

De reductie ten gevolge van imperfecties wordt als volgt bepaald:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \cdot \sqrt{r \cdot t}$$

$$\alpha_i^6 = \frac{1}{1 + 2,00 \cdot (\Delta w_k / t)^{0,8}}$$

De elastische plooi reductie factor bedraagt:

$$\alpha = \alpha_G \cdot \alpha_i$$

De interactieparameters voor het elastisch-plastisch plooi gedrag worden als volgt bepaald:

$$\beta^7 = 1 - \frac{0,60}{1 + 1,20 \cdot (\Delta w_k / t)^{0,8}}$$

De interactie exponent η bedraagt:

$$\eta^8 = 0,65 + 0,2 \cdot (\Delta w_k / t)$$

⁵ Plooi factoren op basis van NEN-EN 1993-5; draft 3 – 31/03/2021

⁶ α_i volgens NEN-EN 1993-5; draft 3 – 31/03/2021: $\alpha_i = 1,2 / (1 + 2 \cdot (\Delta w_k / t)^{0,8})$

⁷ β volgens NEN-EN 1993-5; draft 3 – 31/03/2021: $\beta = 1,0 - 0,9 / (1 + (\Delta w_k / t)^{0,15})$

⁸ η volgens NEN-EN 1993-5; draft 3 – 31/03/2021: $\eta = 0,60 + 0,2 \cdot (\Delta w_k / t)$

Bijlage 2 Plooiweerstand conform CUR Dolphins (kritische rek)

De rekenregels, conform CUR Dolphins en Handboek kademuren, zijn hieronder opgenomen.

$$\varepsilon_{cr} = 0,25 \cdot \frac{t}{r'} - 0,0025 \quad \text{voor } D/t < 120$$

$$\varepsilon_{cr} = 0,10 \cdot \frac{t}{r'} \quad \text{voor } D/t > 120$$

waarin: $r' = \frac{1}{2} \cdot (D - t)$

$$\mu = \varepsilon_{cr} / \varepsilon_y$$

$$\sin \theta = 1 / \mu \quad \text{voor } \mu > 1$$

$$\theta = \pi / 2 \quad \text{voor } \mu < 1$$

Het buigend moment, op basis van een perfect plastisch moment – krommingsdiagram, bedraagt:

$$M_R = M_{pl,Rd} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\theta}{\sin(\theta)} + \cos(\theta) \right) \quad \text{voor } \mu > 1$$

$$M_R = \mu \cdot M_{el,d} \quad \text{voor } \mu < 1$$

Waarin: $M_{pl,Rd} = (D^3 - d^3) / 6 \cdot f_{yd} / Y_{m0}$

$M_{el,Rd} = \pi / 32 \cdot (D^4 - d^4) / D \cdot f_{yd} / Y_{m0}$

B 2.1 Onrondheid

Onrondheid van een buispaal is een imperfectie welke invloed heeft op de plooi capaciteit van de buispaal. Buisprofielen met een initiële onrondheid hebben een lagere plooi capaciteit dan een theoretisch perfecte buis. De genormeerd toleranties op onrondheid zijn gepresenteerd in §223.2.2.

De afname van de verticale diameter ten gevolge van een initiële onrondheid bedraagt:

$$\alpha = \frac{1}{4} \cdot U_r \cdot D$$

B 2.2 Ovalisatie ten gevolge van uitwendige gronddruk

De uitwendige gronddruk ten gevolge van de passieve wig resulteert in een toename van de ovalisatie en daarmee een verlaging van de plooiweerstand. De afname van de verticale diameter ten gevolge van de passieve gronddruk kan als volgt worden bepaald:

$$a_2 = \frac{1}{12} \frac{q \cdot r^4}{EI}$$

waarin: q = passieve gronddruk [N/m²]

r = $\frac{1}{2} \cdot (D - t)$ [m]

EI = $E \cdot 1/12 \cdot t^3$ [Nm]

B 2.3 Ovalisatie ten gevolge van tweede-orde effecten

De rekenwaarde van de momentweerstand, inclusief de effecten van ovalisatie ten gevolge van het tweede-orde effect, bedraagt:

$$M_{Rd} = g \cdot \beta_g \cdot \beta_s \cdot M_R$$

Waarin: $g = c_1/6 + 2/3$

$$c_1 = \sqrt{(4 - 2\sqrt{3} \cdot m_{eff,Sd}/m_{pl,Rd})}$$

$$m_{eff,Sd} =$$

$$m_{pl,Rd} = \frac{1}{4} \cdot t^2 \cdot f_y / Y_{m1}$$

$$\beta_g = 1 - 2 \cdot \alpha / (3 \cdot r)$$

β_s = elastische plooiparameter

Tabel 9 Elastische plooiparameter conform [8]

$\beta_s = 0,75$	$\mu \leq 1,0$
$\beta_s = 0,625 + 0,125 \cdot \mu$	$1,0 \leq \mu \leq 3,0$
$\beta_s = 1,00$	$\mu \geq 3,0$

B 2.4 Effecten van (zand)vulling

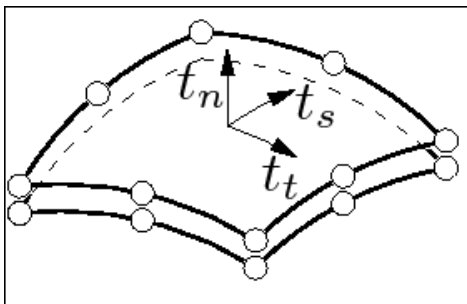
De effecten van de grondvulling in de buispaal worden in rekening gebracht door het effect van ovalisatie te vermenigvuldigen met een stijfheidsfactor. Deze stijfheidsfactor is gepresenteerd in §2.4.4.6.

Bijlage 3 Interface elementen

Om relatieve verplaatsingen tussen de paal en de grond mogelijk te maken wordt een interface toegepast. De stijfheid van de interface elementen worden als volgt omschreven (bron Diana Manual):

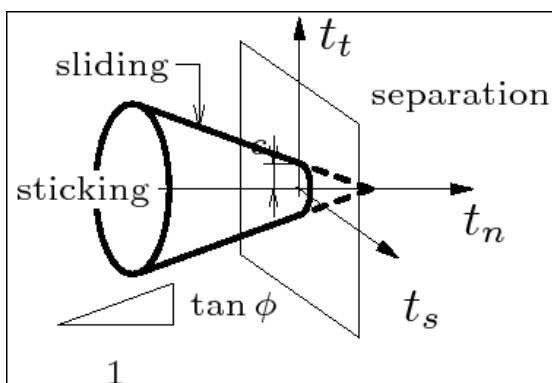
$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_t \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & D_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \\ \Delta u_s \end{Bmatrix}$$

De interface elementen zijn opgebouwd uit drie spanningscomponenten en drie verplaatsingscomponenten, respectievelijk één component loodrecht op het element en twee componenten evenwijdig aan het element.



Figuur B.6-1 Spanningscomponenten interface elementen (bron: [9])

De 3D spanningsruimte, voor een niet-lineaire interface, waarbij ruimte kan ontstaan tussen de paal en de grond is weergegeven in figuur b.6-2.



Figuur B.6-2 Spanningsruimte grond-paal interface (bron: [12])

De interface stijfheden D_{nn} , D_{tt} en D_{ss} kunnen als volgt worden bepaald (Diana)

$$D_{tt} = D_{ss} = \frac{A^2}{t} \cdot \frac{E_{soil}}{2(1+\nu_{soil})}$$

$$D_{nn} = f \cdot D_{tt}$$

- Waarin: A = Reductiefactor ($0,50 \leq A \leq 1,00$)
t = Fictieve dikte van de interface
 E_{soil} = Elasticiteitsmodulus grond
 ν_{soil} = Dwarscontractie grond
f = Vermenigvuldigingsfactor ($10 \leq f \leq 100$)

Indien de interface op druk wordt belast mag de interface geen grote vervormingen ondergaan. De interface elementen dienen dermate stijf te zijn dat 'indringen' van het interface element wordt voorkomen. Derhalve wordt een hoge elastische (dummy) stijfheid aangehouden.

De Coulomb eigenschappen, ten behoeve van de grond-paal interface, worden als volgt bepaald:

$$c = A \cdot c_{\text{soil}}$$

$$\tan(\varphi) = A \cdot \tan(\varphi_{\text{soil}})$$

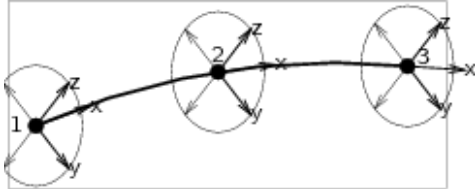
Om numerieke instabiliteit te voorkomen wordt een zeer lage cohesie toegekend aan de paal-grond interface.

Bijlage 4 Elementen

Toegepaste elementen zijn:

CL3CM elementen

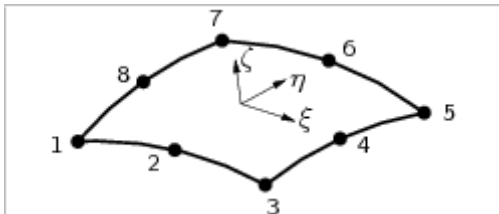
De CL3CM elementen zijn 3 knopige gekromde lijn elementen welke worden toegepast om een 'composed line' te maken. Met behulp van een 'composed line' wordt het optredende moment in de paal bepaald.



Figuur B.6-3 CL3CM elementen (bron: [11])

CQ40S elementen

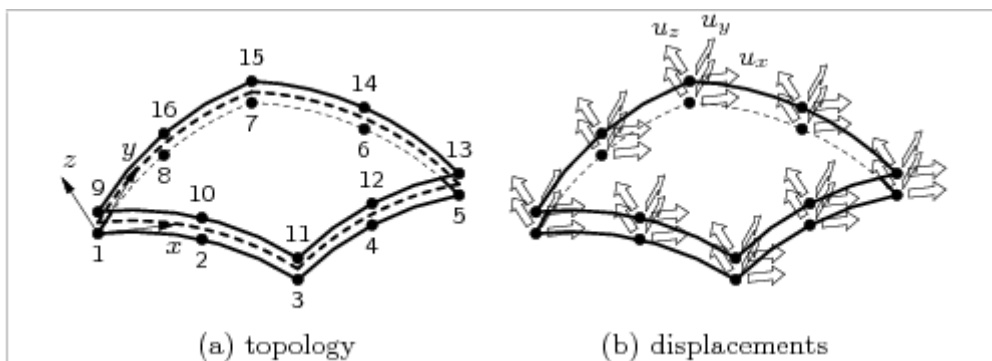
De SQ40S elementen zijn de rechthoekige schaalementen die worden toegepast om de buispaal te modelleren met 8 knopen per element (Serendipity elementen).



Figuur B.6-4 CQ40S elementen (bron: [11])

CQ48I elementen

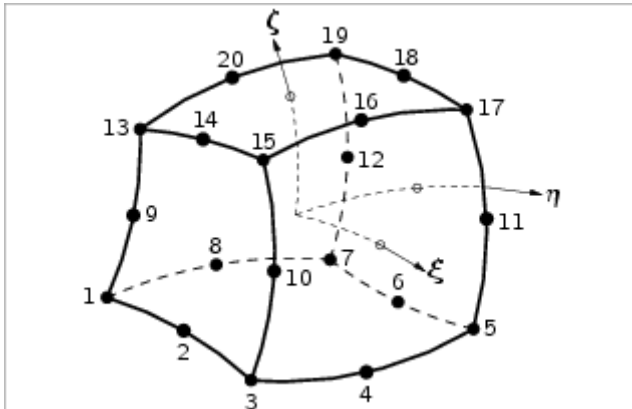
De CQ48I elementen zijn interface elementen welke worden toegepast om een relatieve verplaatsing tussen de paal en de grond mogelijk te maken. De eigenschappen van interface elementen zijn toegelicht in bijlage 3 zodat hiernaar verwezen wordt.



Figuur B.6-5 CQ48I elementen (bron: [11])

CHX60 elementen

Een CHX60 element is een kubusvormig Serendipity element met 20 knopen. De CHX60 elementen worden toegepast om de grondlaag te modelleren.



Figuur B.6-6 CHX60 elementen (bron: [11])

Bijlage 5 Model B python script

```
#####
# DianaIE 10.5 update 2021-10-27 07:30:25 rev 975
# Python 3.7.3
# Session recorded at 2022-07-13 19:54:44
#####
newProject( ".././SynologyDrive/CloudStation/School/COPPA001 Afstudeeronderzoek/
Berekeningen/Diana/220722-compleet model B/Model B", 1000, {} )
setModelAnalysisAspects( [ "STRUCT" ] )
setModelDimension( "3D" )
setDefaultMeshOrder( "QUADRATIC" )
setDefaultMesherType( "HEXQUAD" )
setDefaultMidSideNodeLocation( "ONSHAP" )
setUnit( "ANGLE", "DEGREE" )

# GEOMETRIE
createSheet( "Sheet 1", [ [ 0, 0, 0.706 ], [ 0, 0, -0.706 ], [ 0, 1, -0.706 ], [ 0, 1, 0.706
] ] )
createSheetCircle( "Circle 1", [ 0, 0, 0 ], [ 1, 0, 0 ], 0.2515 )
intersect( "Circle 1", [ "Sheet 1" ], True, False )
subtract( "Sheet 1", [ "Circle 1" ], True, False )
createLine( "Line 1", [ 0, 0, 0 ], [ 0, 1, 0 ] )
createLine( "Line 2", [ 0, 0.706, 0.706 ], [ 0, 0.706, -0.706 ] )
createLine( "Line 3", [ 0, 0, 0 ], [ 0, 0.706, 0.706 ] )
createLine( "Line 4", [ 0, 0, 0 ], [ 0, 0.706, -0.706 ] )
projection( "Sheet 1", [ "Line 1", "Line 2", "Line 3", "Line 4" ], [ 1, 0, 0 ], True )
projection( "Circle 1", [ "Line 1", "Line 2", "Line 3", "Line 4" ], [ 1, 0, 0 ], True )
removeShape( [ "Line 1", "Line 2", "Line 3", "Line 4" ] )
setEdgeMeshSeed( "Sheet 1", [ [ 0, 0.853, 0.706 ], [ 0, 0, 0.5295 ], [ 0, 0.2515, -0.706
], [ 0, 1, -0.2515 ], [ 0, 0, -0.5295 ], [ 0, 0.13508725, -0.32612947 ], [ 0, 0.32612947, 0
.13508725 ], [ 0, 0.13508725, 0.32612947 ], [ 0, 0.32612947, -0.13508725 ], [ 0, 0.853, -0
.706 ], [ 0, 1, 0.2515 ], [ 0, 0.2515, 0.706 ], [ 0, 0.5295, 0 ], [ 0, 0.853, 0 ], [ 0, 0.706
, 0.2515 ], [ 0, 0.706, -0.2515 ], [ 0, 0.47780435, 0.47780435 ], [ 0, 0.47780435, -0
.47780435 ] ], 7 )
setEdgeMeshSeed( "Circle 1", [ [ 0, 0.32612947, 0.13508725 ], [ 0, 0.13508725, -0.32612947
], [ 0, 0, 0.1765 ], [ 0, 0.13508725, 0.32612947 ], [ 0, 0, -0.1765 ], [ 0, 0.32612947, -0
.13508725 ], [ 0, 0.1765, 0 ], [ 0, 0.12480435, 0.12480435 ], [ 0, 0.12480435, -0.12480435
] ], 7 )
extrudeProfile( [ "Sheet 1", "Circle 1" ], [ [ 0.5, 0, 0 ] ] )
createSheetFromFaces( "Sheet 3", "Circle 1", [ [ 0.2132135, 0.1536964, 0.3177836 ], [ 0
.2132135, 0.3333867, 0.11602717 ], [ 0.2132135, 0.3177836, -0.1536964 ], [ 0.2132135, 0
.11602717, -0.3333867 ] ] )
splitEdge( [ ("SHAPEEDGE", "Sheet 3", [ 0.25, 0.2515, 0 ] ) ], "RATIO", [ 0.5 ] )
addSet( "SHAPESET", "Shapes 1" )
moveToShapeSet( [ "Sheet 3" ], "Shapes 1" )
rename( "SHAPESET", "Shapes 1", "Tube" )
setCurrentShapeSet( "Shapes" )
rename( "SHAPESET", "Shapes", "Soil" )
renameShape( "Circle 1", "tube_fill" )
renameShape( "Sheet 1", "soil" )
createLine( "Composed_line", [ 0, 0, 0 ], [ 0.5, 0, 0 ] )
addSet( "SHAPESET", "Shapes 1" )
moveToShapeSet( [ "Composed_line" ], "Shapes 1" )
rename( "SHAPESET", "Shapes 1", "Composed_line" )
addGeometry( "Element geometry 1", "LINE", "COMLIN", [] )
rename( "GEOMET", "Element geometry 1", "Composed_line" )
setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "DISTAN/THICK", 0.8 )
setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "LOCAXS", True )
setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "LOCAXS/ZAXIS", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "LOCAXS/ZAXIS", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "LOCAXS/ZAXIS", [ 1, 0, 0 ] )

setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "LOCAXS/ZAXIS", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "LOCAXS/ZAXIS", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Composed_line", "LOCAXS", False )

setElementClassType( "SHAPE", [ "Composed_line" ], "COMLIN" )
```

```

assignGeometry( "Composed_line", "SHAPE", [ "Composed_line" ] )
setCurrentShapeSet( "Soil" )
addMaterial( "sand", "SOLROC", "ELASTI", [ ] )
setParameter( "MATERIAL", "sand", "LINEAR/ELASTI/YOUNG", 30000000 )
setParameter( "MATERIAL", "sand", "LINEAR/ELASTI/POISON", 0.2 )
setParameter( "MATERIAL", "sand", "LINEAR/MASS/DENSIT", 1700 )
setParameter( "MATERIAL", "sand", "LINEAR/MASS/POROSI", 0.2 )
setElementClassType( "SHAPE", [ "soil", "tube_fill" ], "STRSOL" )
assignMaterial( "sand", "SHAPE", [ "soil", "tube_fill" ] )
addGeometry( "Element geometry 1", "SOLID", "STRSOL", [ ] )
rename( "GEOMET", "Element geometry 1", "sand_fill" )
setParameter( "GEOMET", "sand_fill", "AXIAL", True )
setParameter( "GEOMET", "sand_fill", "AXIAL/AXITYP", "CYLIN" )
setParameter( "GEOMET", "sand_fill", "AXIAL/CYLCEN", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "sand_fill", "AXIAL/CYLAX", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "sand_fill", "AXIAL/CYLAX", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "sand_fill", "AXIAL/CYLAX", [ 1, 0, 0 ] )
assignGeometry( "sand_fill", "SHAPE", [ "tube_fill" ] )
setCurrentShapeSet( "Tube" )

# MATERIAAL EIGENSCHAPPEN
addMaterial( "Steel S235", "MCSTEL", "TRESCA", [ ] )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S235", "LINEAR/ELASTI/YOUNG", 2.1e+11 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S235", "LINEAR/ELASTI/YOUNG", 2.1e+11 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S235", "LINEAR/ELASTI/POISON", 0.3 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S235", "LINEAR/ELASTI/POISON", 0.3 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S235", "LINEAR/MASS/DENSIT", 7850 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S235", "TREPLA/YLDSTR", 2.35e+08 )

addMaterial( "Steel S355", "MCSTEL", "TRESCA", [ ] )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S355", "LINEAR/ELASTI/YOUNG", 2.1e+11 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S355", "LINEAR/ELASTI/YOUNG", 2.1e+11 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S355", "LINEAR/ELASTI/POISON", 0.3 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S355", "LINEAR/ELASTI/POISON", 0.3 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S355", "LINEAR/MASS/DENSIT", 7850 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel S355", "TREPLA/YLDSTR", 3.55e+08 )

addMaterial( "Steel X70", "MCSTEL", "TRESCA", [ ] )
setParameter( "MATERIAL", "Steel X70", "LINEAR/ELASTI/YOUNG", 2.1e+11 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel X70", "LINEAR/ELASTI/YOUNG", 2.1e+11 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel X70", "LINEAR/ELASTI/POISON", 0.3 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel X70", "LINEAR/ELASTI/POISON", 0.3 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel X70", "LINEAR/MASS/DENSIT", 7850 )
setParameter( "MATERIAL", "Steel X70", "TREPLA/YLDSTR", 4.85e+08 )

addMaterial( "soil_int", "INTERF", "FRICTI", [ ] )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "LINEAR/ELAS6/DSNZ", 1.25e+10 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "LINEAR/ELAS6/DSNZ", 1.25e+10 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "LINEAR/ELAS6/DSSX", 1.25e+08 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "LINEAR/ELAS6/DSSX", 1.25e+08 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "LINEAR/ELAS6/DSSY", 1.25e+08 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "LINEAR/ELAS6/DSSX", 1.25e+08 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "COULOM/COHESI", 100 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "COULOM/PHI", 30 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "COULOM/PSI", 0 )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "COULOM/OPNTYP", "TECTOF" )
setParameter( "MATERIAL", "soil_int", "COULOM/TENSTR", 100 )

addGeometry( "Element geometry 1", "SHEET", "CURSHL", [ ] )
rename( "GEOMET", "Element geometry 1", "Tube" )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "THICK", 0.005 )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "SHAPE", True )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "SHAPE/SHSHAP", "CYLIN" )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "SHAPE/CYLCEN", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "SHAPE/CYLAX", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "SHAPE/CYLAX", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "SHAPE/CYLAX", [ 1, 0, 0 ] )

```

```

setParameter( "GEOMET", "Tube", "LOCAXS", True )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "LOCAXS/XAXIS", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "LOCAXS/XAXIS", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "Tube", "LOCAXS/XAXIS", [ 1, 0, 0 ] )

addElementData( "Layers" )
setElementClassType( "SHAPE", [ "Sheet 3" ], "CURSHL" )
assignMaterial( "Steel S235", "SHAPE", [ "Sheet 3" ] )
assignGeometry( "Tube", "SHAPE", [ "Sheet 3" ] )
assignElementData( "Layers", "SHAPE", [ "Sheet 3" ] )
hide( "SHAPESET", [ "Composed_line" ] )
setCurrentShapeSet( "Composed_line" )
hide( "SHAPE", [ "soil" ] )
setCurrentShapeSet( "Soil" )
hide( "SHAPESET", [ "Tube" ] )
setCurrentShapeSet( "Tube" )
setCurrentShapeSet( "Soil" )
hide( "SHAPE", [ "tube_fill" ] )
show( "SHAPE", [ "Sheet 3" ] )
setCurrentShapeSet( "Tube" )

# INTERFACE
addGeometry( "int", "SHEET", "STPLIF", [] )
setParameter( "GEOMET", "int", "SHAPE", True )
setParameter( "GEOMET", "int", "SHAPE/SHSHAP", "CYLIN" )
setParameter( "GEOMET", "int", "SHAPE/CYLCEN", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "int", "SHAPE/CYLAX", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "int", "SHAPE/CYLAX", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "int", "SHAPE/CYLAX", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "int", "SHAPE/CYLAX", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "int", "LOCAXS", True )
setParameter( "GEOMET", "int", "LOCAXS/XAXIS", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "int", "LOCAXS/XAXIS", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMET", "int", "LOCAXS/XAXIS", [ 1, 0, 0 ] )

createConnection( "fill_int", "INTER", "SHAPEFACE", "SHAPEFACE" )
setParameter( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "MODE", "CLOSED" )
setElementClassType( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "STPLIF" )
assignMaterial( "soil_int", "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int" )
assignGeometry( "int", "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int" )
setParameter( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "FLIP", False )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "SOURCE", "tube_fill", [ [ 0.2132135, 0.1536964,
0.3177836 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "SOURCE", "tube_fill", [ [ 0.2132135, 0.3333867,
0.11602717 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "SOURCE", "tube_fill", [ [ 0.2132135, 0.3177836,
-0.1536964 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "SOURCE", "tube_fill", [ [ 0.2132135, 0.11602717,
-0.3333867 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "TARGET", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.1536964, 0.
3177836 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "TARGET", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.3333867, 0.
11602717 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "TARGET", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.3177836, -
0.1536964 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "fill_int", "TARGET", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.11602717,
-0.3333867 ] ] )

createConnection( "soil_int", "INTER", "SHAPEFACE", "SHAPEFACE" )
setParameter( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "MODE", "CLOSED" )
setElementClassType( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "STPLIF" )
assignMaterial( "soil_int", "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int" )
assignGeometry( "int", "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int" )
setParameter( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "FLIP", False )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "SOURCE", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.11602717

```

```

, -0.3333867 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "SOURCE", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.3177836, -
0.1536964 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "SOURCE", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.3333867, 0
.11602717 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "SOURCE", "Sheet 3", [ [ 0.2132135, 0.1536964, 0
.3177836 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "TARGET", "soil", [ [ 0.2132135, 0.11602717, -0.
3333867 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "TARGET", "soil", [ [ 0.2132135, 0.3177836, -0.
1536964 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "TARGET", "soil", [ [ 0.2132135, 0.3333867, 0.
11602717 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYCONNECTION", "soil_int", "TARGET", "soil", [ [ 0.2132135, 0.1536964, 0.
3177836 ] ] )

# SUPPORTS
addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "SupX" )
createSurfaceSupport( "SupX", "SupX" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupX", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupX", "TRANSL", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupX", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "SupX", "soil", [ [ 0.5, 0.19040757, 0.54710763 ], [ 0.5, 0.
62300981, 0.39975504 ], [ 0.5, 0.87463046, 0.30105746 ], [ 0.5, 0.87463046, -0.40494254
], [ 0.5, 0.54710763, -0.19040757 ], [ 0.5, 0.39975504, -0.62300981 ], [ 0, 0.19040757, 0.
54710763 ], [ 0, 0.62300981, 0.39975504 ], [ 0, 0.87463046, 0.30105746 ], [ 0, 0.87463046, -
0.40494254 ], [ 0, 0.54710763, -0.19040757 ], [ 0, 0.39975504, -0.62300981 ] ] )

addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "SupY" )
createSurfaceSupport( "SupY", "SupY" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupY", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupY", "TRANSL", [ 0, 1, 0 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupY", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "SupY", "soil", [ [ 0.2867865, 0, 0.55547127 ], [ 0.2867865, 0, -
0.50352873 ], [ 0.2867865, 1, 0.30105746 ], [ 0.2867865, 1, -0.40494254 ] ] )

addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "SupZ" )
createSurfaceSupport( "SupZ", "SupZ" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ", "TRANSL", [ 0, 0, 1 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ", "soil", [ [ 0.2867865, 0.87463046, -0.706 ], [ 0.2867865
, 0.40494254, -0.706 ] ] )

createSurfaceSupport( "SupZ_top", "SupZ" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ_top", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ_top", "TRANSL", [ 0, 0, 1 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ_top", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "SupZ_top", "soil", [ [ 0.2132135, 0.87463046, 0.706 ], [ 0.
2132135, 0.40494254, 0.706 ] ] )

addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "fillX" )
hide( "SHAPE", [ "soil" ] )
show( "SHAPE", [ "tube_fill" ] )
createSurfaceSupport( "fillX", "fillX" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "fillX", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "fillX", "TRANSL", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "fillX", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "fillX", "tube_fill", [ [ 0.5, 0.064189515, 0.15052873 ], [ 0.5,
0.22528657, 0.061051045 ], [ 0.5, 0.20247127, -0.11613205 ], [ 0.5, 0.061051045, -0.22528657
], [ 0, 0.064189515, 0.15052873 ], [ 0, 0.22528657, 0.061051045 ], [ 0, 0.20247127, -0.
11613205 ], [ 0, 0.061051045, -0.22528657 ] ] )

addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "fillY" )
createSurfaceSupport( "fillY", "fillY" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "fillY", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "fillY", "TRANSL", [ 0, 1, 0 ] )

```

```

setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "filly", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "filly", "tube_fill", [ [ 0.2867865, 0, 0.20247127 ], [ 0.2867865
, 0, -0.15052873 ] ] )

addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "PileSym" )
createLineSupport( "PileSym", "PileSym" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "PileSym", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "PileSym", "TRANSL", [ 0, 1, 0 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "PileSym", "ROTATI", [ 1, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "PileSym", "Sheet 3", [ [ 0.25, 0, 0.2515 ], [ 0.25, 0, -0.2515
] ] )

addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "Deform" )
createLineSupport( "Deform_top", "Deform" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_top", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_top", "TRANSL", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_top", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_top", "Sheet 3", [ [ 0.5, 0.13508725, 0.32612947 ], [ 0.5
, 0.32612947, -0.13508725 ], [ 0.5, 0.32612947, 0.13508725 ], [ 0.5, 0.13508725, -0.32612947
] ] )

createLineSupport( "Deform_bottom", "Deform" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_bottom", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_bottom", "TRANSL", [ 1, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_bottom", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "Deform_bottom", "Sheet 3", [ [ 0, 0.13508725, 0.32612947 ], [ 0
, 0.32612947, 0.13508725 ], [ 0, 0.32612947, -0.13508725 ], [ 0, 0.13508725, -0.32612947
] ] )
addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "rot" )

createLineSupport( "rot", "rot" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "rot", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "rot", "TRANSL", [ 0, 0, 0 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "rot", "ROTATI", [ 0, 1, 1 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "rot", "Sheet 3", [ [ 0.5, 0.13508725, 0.32612947 ], [ 0.5, 0.
32612947, 0.13508725 ], [ 0.5, 0.32612947, -0.13508725 ], [ 0.5, 0.13508725, -0.32612947
], [ 0, 0.13508725, -0.32612947 ], [ 0, 0.32612947, -0.13508725 ], [ 0, 0.32612947, 0.
13508725 ], [ 0, 0.13508725, 0.32612947 ] ] )

addSet( "GEOMETRYSUPPORTSET", "pileZ" )
createPointSupport( "pileZ", "pileZ" )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "pileZ", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "pileZ", "TRANSL", [ 0, 0, 1 ] )
setParameter( "GEOMETRYSUPPORT", "pileZ", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attach( "GEOMETRYSUPPORT", "pileZ", "Sheet 3", [ [ 0.25, 0.2515, 0 ] ] )

# FUNCTIONS
setFunctionValues( "Moment", [], [], [ -0.2515, 0.2515 ], [ 1, -1 ] )

# TYING
addSet( "GEOMETRYTYINGSET", "Ty" )
createLineTying( "Ty", "Ty" )
setParameter( "GEOMETRYTYING", "Ty", "AXES", [ 1, 2 ] )
setParameter( "GEOMETRYTYING", "Ty", "TRANSL", [ 0, 0, 1 ] )
setParameter( "GEOMETRYTYING", "Ty", "ROTATI", [ 0, 0, 0 ] )
attachTo( "GEOMETRYTYING", "Ty", "SLAVE", "Sheet 3", [ [ 0.375, 0.2515, 0 ], [ 0.125, 0.2515
, 0 ] ] )
attachTo( "GEOMETRYTYING", "Ty", "MASTER", "Sheet 3", [ [ 0.25, 0.2515, 0 ] ] )

# LOADS
addSet( "GEOMETRYLOADSET", "Moment" )
createLineLoad( "Moment_top", "Moment" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "Moment_top", "LODTYP", "DEFORM" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "Moment_top", "DEFORM/SUPP", "Deform_top" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "Moment_top", "DEFORM/TR/VALUE", 0.001 )
attach( "GEOMETRYLOAD", "Moment_top", "Sheet 3", [ [ 0.5, 0.13508725, 0.32612947 ], [ 0.5, 0
.32612947, 0.13508725 ], [ 0.5, 0.32612947, -0.13508725 ], [ 0.5, 0.13508725, -0.32612947
] ] )

```

```

] ] )
setValueFunction( "GEOMETRYLOAD", "Moment_top", "Moment" )

createLineLoad( "moment_bottom", "Moment" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "moment_bottom", "LODTYP", "DEFORM" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "moment_bottom", "DEFORM/SUPP", "Deform_bottom" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "moment_bottom", "DEFORM/TR/VALUE", -0.001 )
attach( "GEOMETRYLOAD", "moment_bottom", "Sheet 3", [ [ 0, 0.13508725, -0.32612947 ], [ 0, 0.32612947, -0.13508725 ], [ 0, 0.32612947, 0.13508725 ], [ 0, 0.13508725, 0.32612947 ] ] )
setValueFunction( "GEOMETRYLOAD", "moment_bottom", "Moment" )

addSet( "GEOMETRYLOADSET", "Vertical_load" )
createSurfaceLoad( "Vertical_load", "Vertical_load" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "Vertical_load", "LODTYP", "DEFORM" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "Vertical_load", "DEFORM/SUPP", "SupZ_top" )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "Vertical_load", "DEFORM/TR/VALUE", -0.003 )
setParameter( "GEOMETRYLOAD", "Vertical_load", "DEFORM/TR/DIRECT", 3 )
attach( "GEOMETRYLOAD", "Vertical_load", "soil", [ [ 0.2132135, 0.87463046, 0.706 ], [ 0.2132135, 0.40494254, 0.706 ] ] )

# GENERATE MESH
setEdgeMeshSeed( "soil", [ [ 0.25, 0, 0.706 ], [ 0.25, 0, -0.706 ], [ 0.25, 0.706, -0.706 ], [ 0.25, 1, -0.706 ], [ 0.25, 1, 0 ], [ 0.25, 1, 0.706 ], [ 0.25, 0.706, 0.706 ] ], 17 )
setEdgeMeshSeed( "Sheet 3", [ [ 0.25, 0, 0.2515 ], [ 0.25, 0, -0.2515 ] ], 17 )
setEdgeMeshSeed( "Composed_line", [ [ 0.25, 0, 0 ] ], 17 )

generateMesh( [ ] )

# ANALYSIS
setParameter( "DATA", "Layers", "THINTE", 5 )

addAnalysis( "Analysis1" )
addAnalysisCommand( "Analysis1", "EULER", "Structural stability" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural stability", "EIGEN/IMPERF/TYPE", "BUCKLI" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural stability", "EIGEN/IMPERF/BUCKLI/MAX", [ 0.0023 ] )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural stability", "EIGEN/IMPERF/BUCKLI/MODE", [ 1 ] )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural stability", "EIGEN/EXECUT/NMODES", 10 )
addAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural stability", "EIGEN/STABIL/DISPLA" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural stability", "EIGEN/STABIL/DISPLA", True )
addAnalysisCommand( "Analysis1", "PHASE", "Phase" )
setActivePhase( "Analysis1", "Phase" )
moveAnalysisCommand( "Analysis1", "Phase", "Structural stability" )
setActivePhase( "Analysis1", "Phase" )
setActivePhase( "Analysis1", "Phase" )
setActiveInPhase( "Analysis1", "GEOMETRYCONNECTION", [ "fill_int" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis1", "SHAPE", [ "tube_fill" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis1", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "fillX" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis1", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "fillY" ], [ "Phase" ], False )

addAnalysisCommand( "Analysis1", "NONLIN", "Structural nonlinear" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "MODEL", False )
addAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "TYPE/GEOMET" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "TYPE/GEOMET", True )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "TYPE/GEOMET/GEOTYP", "UPDATE" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/LOAD/LOADNR", 2 )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/ITERAT/METHOD/METNAM", "SECANT" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/LOAD/STEPS/EXPLICIT/SIZES", "0.1(10)" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/ITERAT/MAXITE", 50 )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/ITERAT/CONVER/SIMULT", True )

```

```

setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/ITERAT/CONVER/
FORCE", True )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/ITERAT/CONVER/
ENERGY", True )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)/ITERAT/CONVER/
DISPLA", False )

setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/EXETYP", "LOAD" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/LOAD/STEPS/EXPLIC/
SIZES", "0.01" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/LOAD/STEPS/EXPLIC/
SIZES", "0.0100000(60)" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/METHOD/
METNAM", "SECANT" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/MAXITE",
200 )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/CONVER/
ENERGY/TOLCON", 1e-04 )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/CONVER/
FORCE/TOLCON", 0.01 )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/LINESE",
True )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/CONVER/
SIMULT", True )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/CONVER/
FORCE", True )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/CONVER/
ENERGY", True )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/ITERAT/CONVER/
DISPLA", False )
copyAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "OUTPUT(1)", "" )
renameAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "OUTPUT(2)", "User output"
)
setAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "OUTPUT(2)/SELTYP", "USER" )
addAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "OUTPUT(2)/USER" )
addAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "OUTPUT(2)/USER/DISPLA(1)/
TOTAL/ROTATI/LOCAL" )
addAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "OUTPUT(2)/USER/DISPLA(2)/
TOTAL/ROTATI/GLOBAL" )
addAnalysisCommandDetail( "Analysis1", "Structural nonlinear", "OUTPUT(2)/USER/STRESS(1)/
TOTAL/TRACTI/GLOBAL" )

copyAnalysis( "Analysis1", "Analysis2" )
assignMaterialForPhase( "Analysis2", "SHAPE", [ "Sheet 3" ], [ "Phase" ], "Steel S355" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis2", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/LOAD/STEPS/EXPLIC/
SIZES", "0.0150000(60)" )

copyAnalysis( "Analysis2", "Analysis3" )

assignMaterialForPhase( "Analysis3", "SHAPE", [ "Sheet 3" ], [ "Phase" ], "Steel X70" )
setAnalysisCommandDetail( "Analysis3", "Structural nonlinear", "EXECUT(2)/LOAD/STEPS/EXPLIC/
SIZES", "0.0200000(60)" )

copyAnalysis( "Analysis1", "Analysis4" )
copyAnalysis( "Analysis2", "Analysis5" )
copyAnalysis( "Analysis3", "Analysis6" )

setActiveInPhase( "Analysis4", "SHAPE", [ "soil" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis4", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupX" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis4", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupY" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis4", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupZ" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis4", "GEOMETRYCONNECTION", [ "soil_int" ], [ "Phase" ], False )
removeAnalysisCommandDetail( "Analysis4", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)" )

setActiveInPhase( "Analysis5", "SHAPE", [ "soil" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis5", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupX" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis5", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupY" ], [ "Phase" ], False )

```

```
setActiveInPhase( "Analysis5", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupZ" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis5", "GEOMETRYCONNECTION", [ "soil_int" ], [ "Phase" ], False )
removeAnalysisCommandDetail( "Analysis5", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)" )

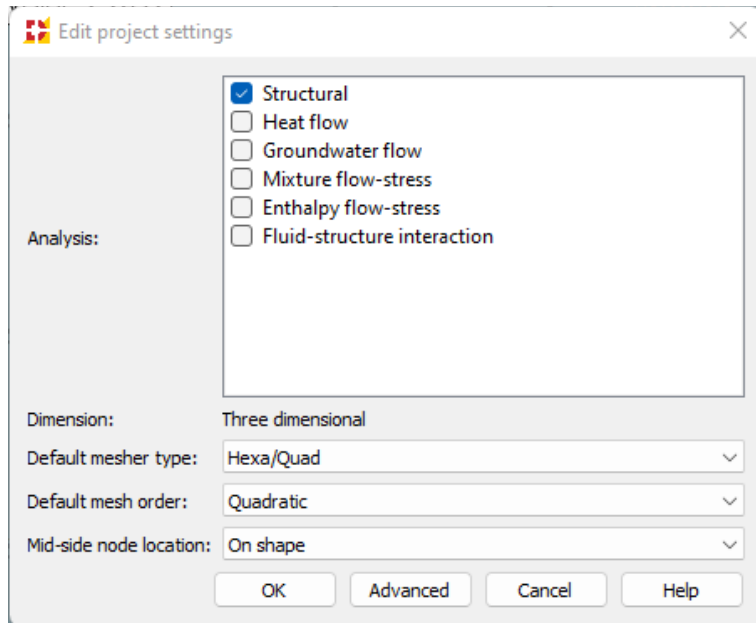
setActiveInPhase( "Analysis6", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupX" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis6", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupY" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis6", "GEOMETRYSUPPORTSET", [ "SupZ" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis6", "GEOMETRYCONNECTION", [ "soil_int" ], [ "Phase" ], False )
setActiveInPhase( "Analysis6", "SHAPE", [ "soil" ], [ "Phase" ], False )
removeAnalysisCommandDetail( "Analysis6", "Structural nonlinear", "EXECUT(1)" )
```

Bijlage 6 Diana invoer

In deze bijlage worden de (relevante) invoerparameters gepresenteerd.

B 6.1 Project eigenschappen

De project eigenschappen en aangehouden eenheden zijn weergegeven in figuur b.6-7 en figuur b.6-8.



Figuur B.6-7 Project eigenschappen

Quantity	Unit	Symbol
Length	meter	m
Mass	kilogram	kg
Force	newton	N
Time	second	s
Temperature	kelvin	K
Angle	degree	°

↶ Reset to defaults

Figuur B.6-8 Eenheden

B 6.2 Materiaaleigenschappen

Toegepast wordt isotroop lineair elastisch grondmateriaal. De aangehouden materiaaleigenschappen zijn weergegeven in figuur b.6-9

The 'Edit material' dialog box for 'sand' shows the following settings:

- Name: sand
- Aspects to include:
 - ☐ Initial stress
 - ☐ Drainage
 - ☐ Damping
 - ☐ Thermal effects
 - ☐ Shear/Pressure capacity
 - ☐ Engineering creep
- Linear material properties (checked):
 - Young's modulus*: $3e+07 \text{ N/m}^2$
 - Poisson's ratio*: 0.2
 - Mass density specification: Dry density and porosity
 - Density*: 1700 kg/m^3
 - Porosity*: 0.2

Figuur B.6-9 Materiaaleigenschappen grond

De interface tussen de paal en de grondlaag wordt gemodelleerd door middel van coulomb-friction interface met een zeer lage cohesie vanwege numerieke instabiliteit. Om grote vervormingen van de interface te voorkomen wordt een hoge (dummy) stijfheid toegekend aan de interface, zie figuur b.6-10.

The 'Edit material' dialog box for 'soil_int' shows the following settings:

- Name: soil_int
- Aspects to include:
 - ☐ Thermal effects
 - ☐ Initial stress
 - ☐ Break connection for critical shear
 - ☐ Maturity effects
 - ☐ Strength Reduction
 - ☐ Damping
- Linear material properties (checked):
 - Type*: 3D surface interface
 - Normal stiffness modulus-z*: $1.25e+10 \text{ N/m}^3$
 - Shear stiffness modulus-x*: $1.25e+08 \text{ N/m}^3$
 - Shear stiffness modulus-y: $1.25e+08 \text{ N/m}^3$
- Coulomb friction (checked):
 - Cohesion*: 100 N/m^2
 - Friction angle*: 30°
 - Dilatancy angle*: 0°
 - Hardening diagram:
 - Cohesion: [Graph]
 - Friction: [Graph]
 - Interface opening model: Tension cut-off
 - Tensile cut-off value*: 100 N/m^2

Figuur B.6-10 Materiaaleigenschappen interface

Voor de stalen paal wordt uitgegaan van isotroop fysische niet-lineair materiaalgedrag volgens het Von Mises criterium. Er wordt geen rekening gehouden met verharding. Toegepast is staalkwaliteit

S235, S355 en X70. De aangehouden materiaaleigenschappen zijn weergegeven in figuur b.6-11, figuur b.6-12 en figuur b.6-13.

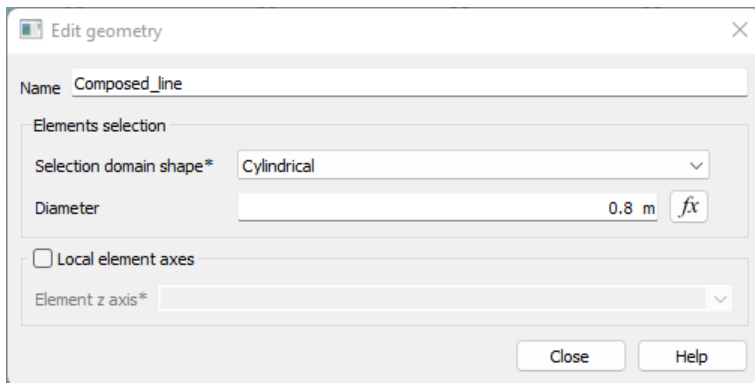
Figuur B.6-11 Materiaal eigenschappen staal S235

Figuur B.6-12 Materiaal eigenschappen staal S355

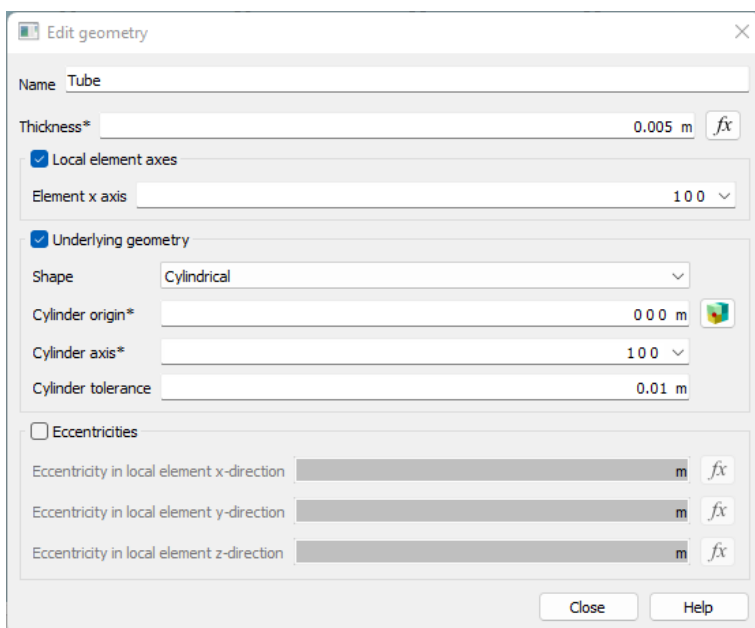
Figuur B.6-13 Materiaal eigenschappen staal X70

B 6.3 Element geometrie

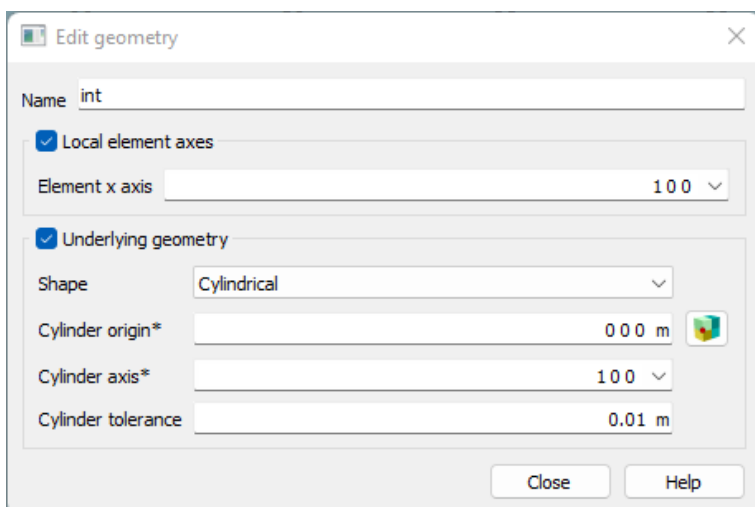
Met behulp van een 'composed line' wordt het moment in de paal bepaald.



Figuur B.6-14 Composed line geometrie



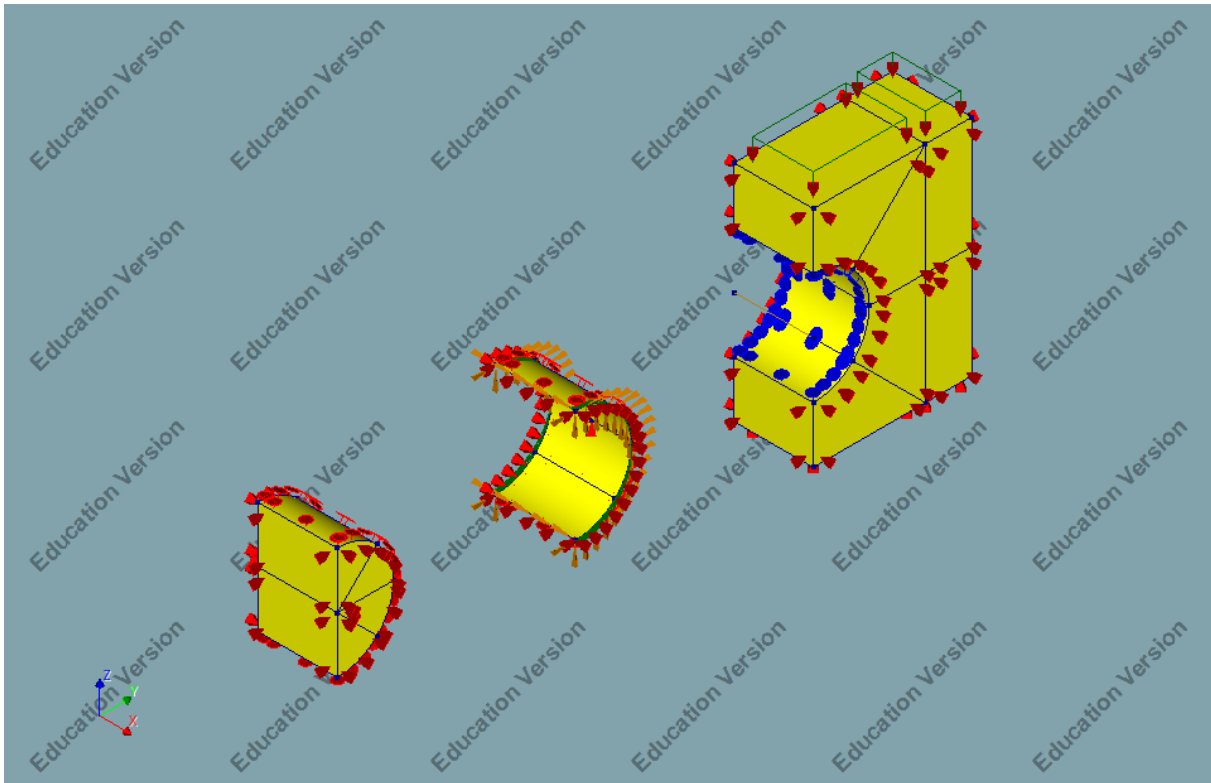
Figuur B.6-15 Buispaal geometrie



Figuur B.6-16 interface geometrie

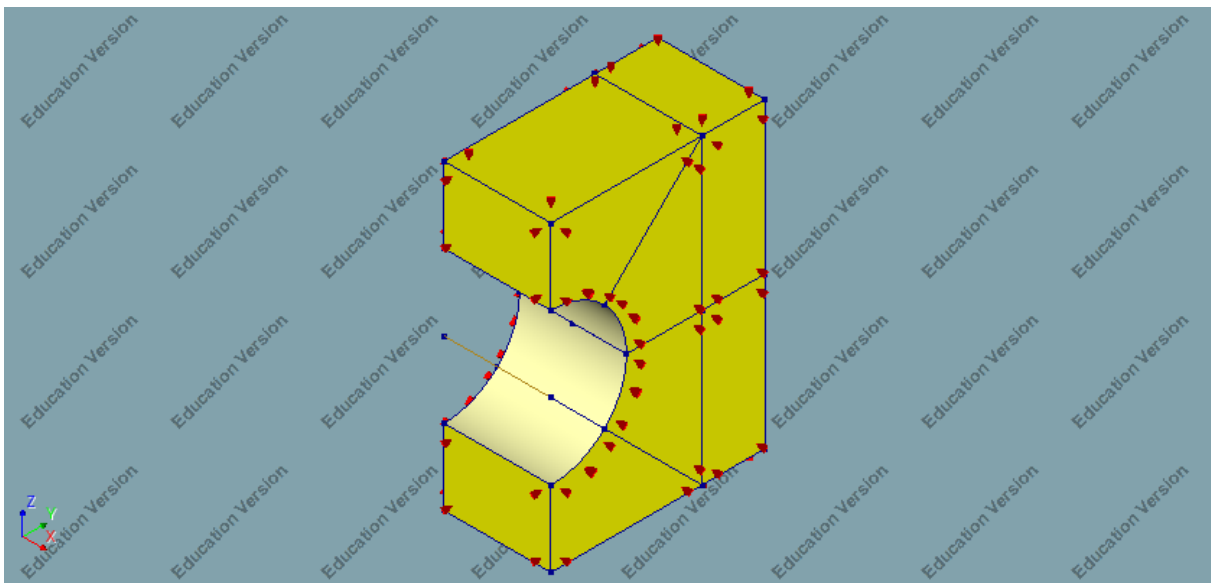
B 6.4 Opleggingen en symmetrie voorwaarden

Een overzicht van de oplettingen en symmetrie voorwaarden is weergegeven in figuur b.6-17.



Figuur B.6-17 Oplettingen en symmetrie voorwaarden

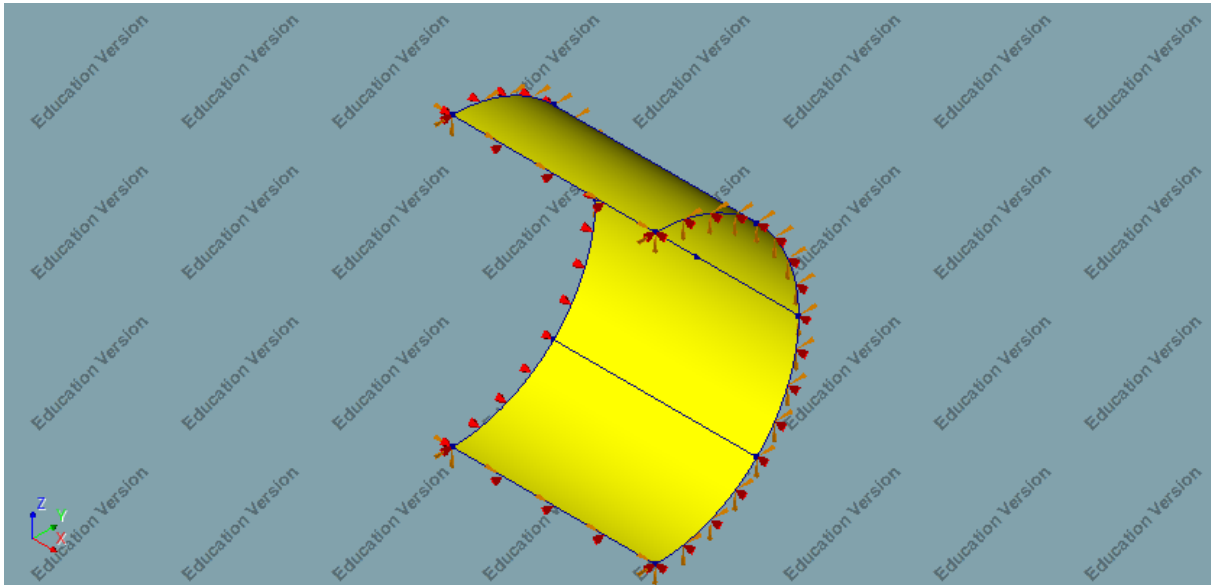
Voor de uitwendige grond worden de translaties in x, y en z-richting verhinderd door middel van starre steunpunten in de desbetreffende richting. Daarnaast is aan de bovenzijde van het model een vlakoplegging aangebracht ten behoeve van een opgelegde vervorming waarmee de passieve gronddruk wordt aangebracht. Een overzicht is weergegeven in figuur b.6-18.



Figuur B.6-18 Oplettingen uitwendige grond + opgelegde vervorming

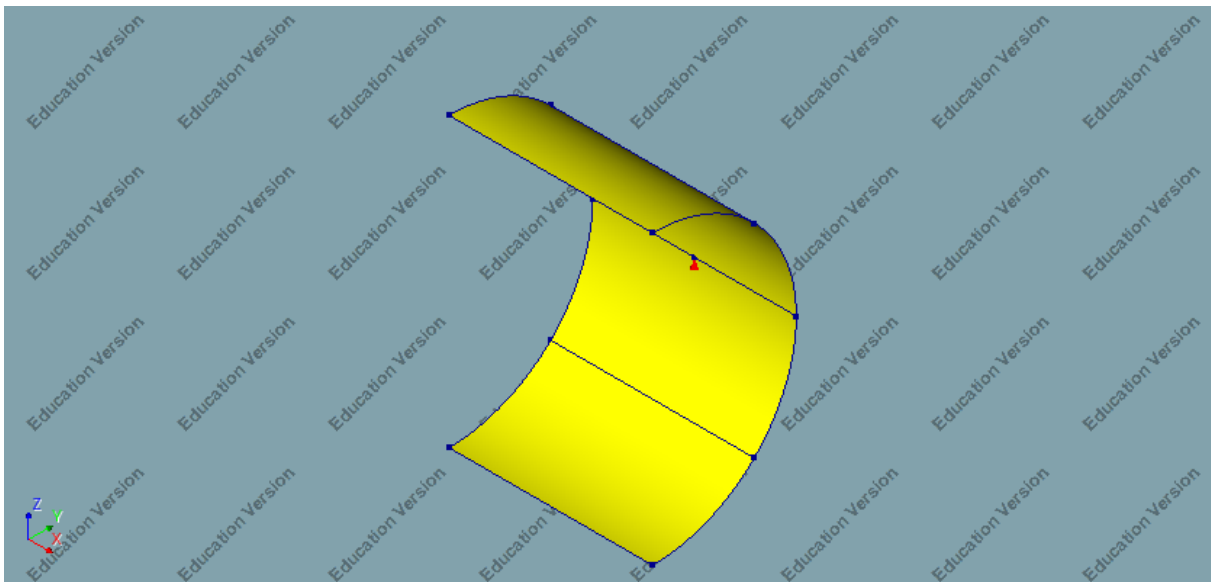
De buispaal wordt gemodelleerd met behulp van schaalelementen. De translaties loodrecht op de symmetrieranden van de schaalelementen worden verhinderd door middel van starre steunpunten.

Tenslotte wordt de rotatie van de buispaal rondom de globale X-as verhinderd ter plaatse van het symmetrievlak en worden de rotatie van de buispaal in het boven- en ondervlak van het model eveneens verhinderd.



Figuur B.6-19 Symmetrievoorwaarden schaalelement

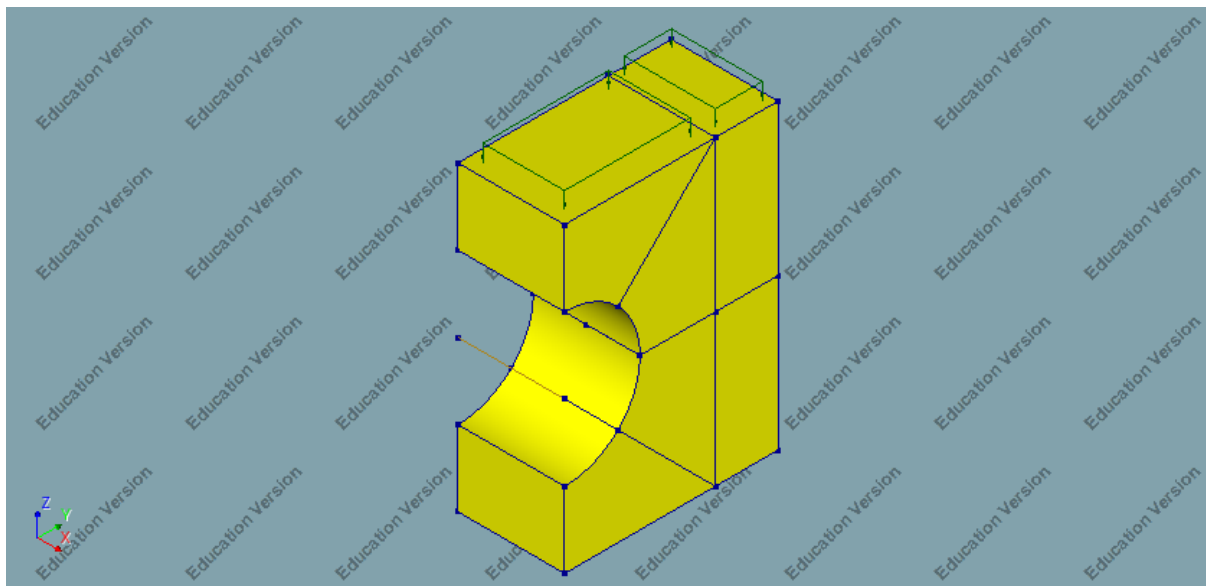
De translatie van het schaalelement in de Z-richting wordt verhinderd door middel van een star steunpunt in het midden van het model, zie Figuur B.6-20. Hierdoor ontstaat een relatieve verplaatsing tussen de grond en het schaalelement. Het starre steunpunt wordt door middel van een starre binding (tyings) verbonden aan de rand ter plaatse van de hartlijn van het schaalelement.



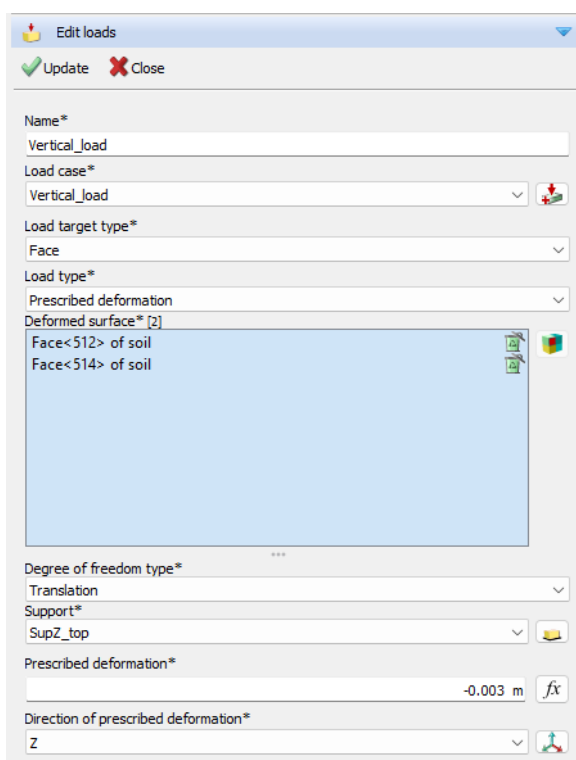
Figuur B.6-20 Oplegging Z-richting

B 6.5 Belastingen

Zoals reeds aangegeven wordt de passieve gronddruk aangebracht door middel van een opgelegde vlakvervorming aan de bovenzijde van het model.

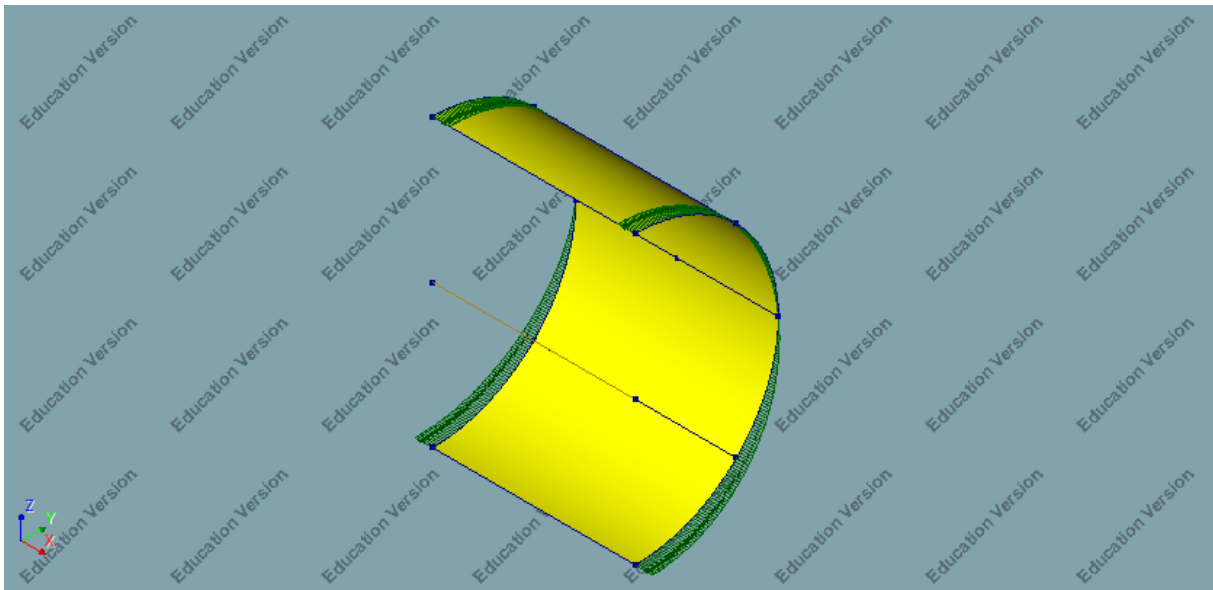


Figuur B.6-21 Opgelegde verplaatsing X-richting

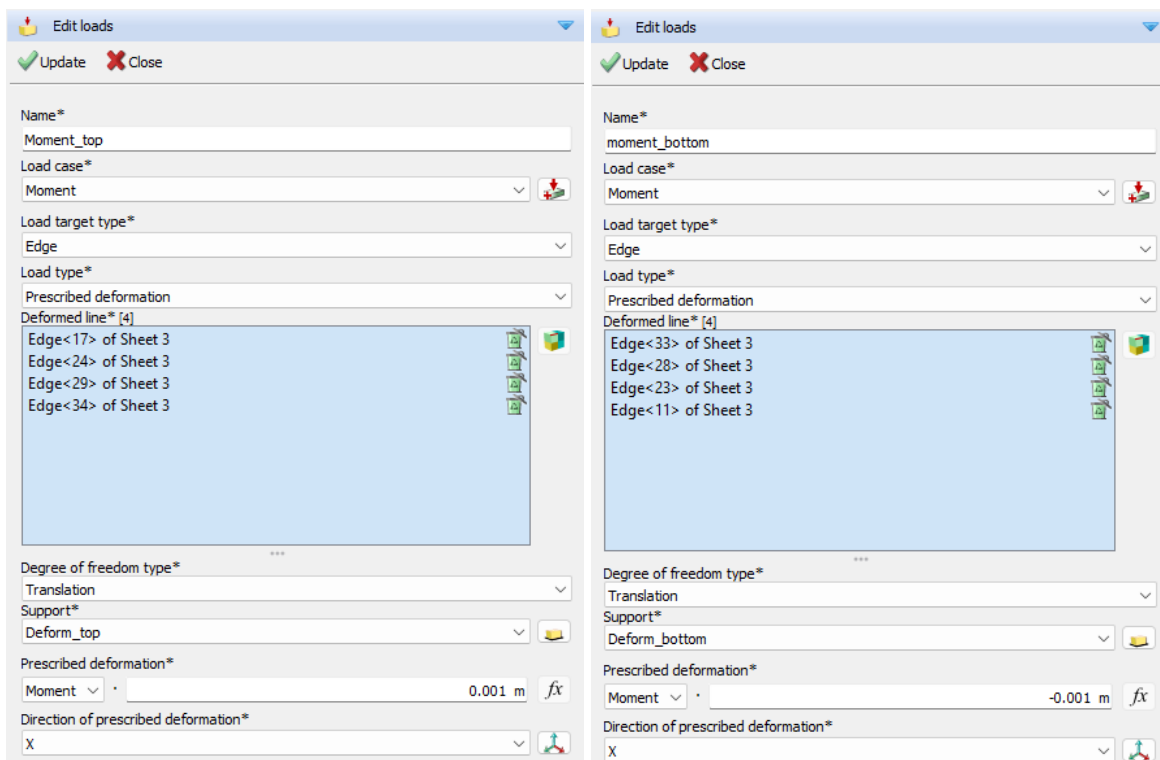


Figuur B.6-22 Instellingen vlakvervorming

De boven- en onderrand van de buispaal worden belast met een opgelegde vervorming in de x-richting. De oplegde vervorming heeft een lineair verloop wat resulteert in drukkracht aan de ene kant en trekkracht aan de andere kant van de buis en dus een constant buigend moment over de lengte van de paal.

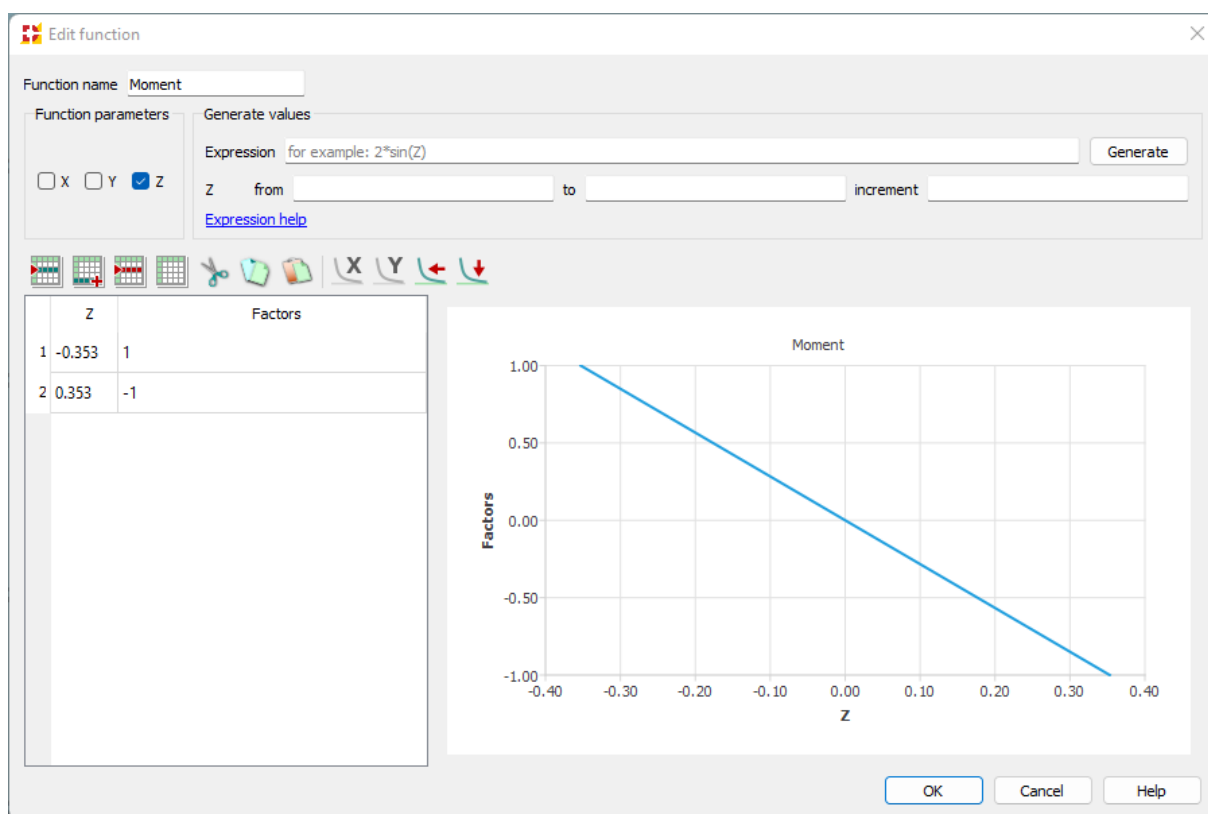


Figuur B.6-23 Oplegde verplaatsing X-richting



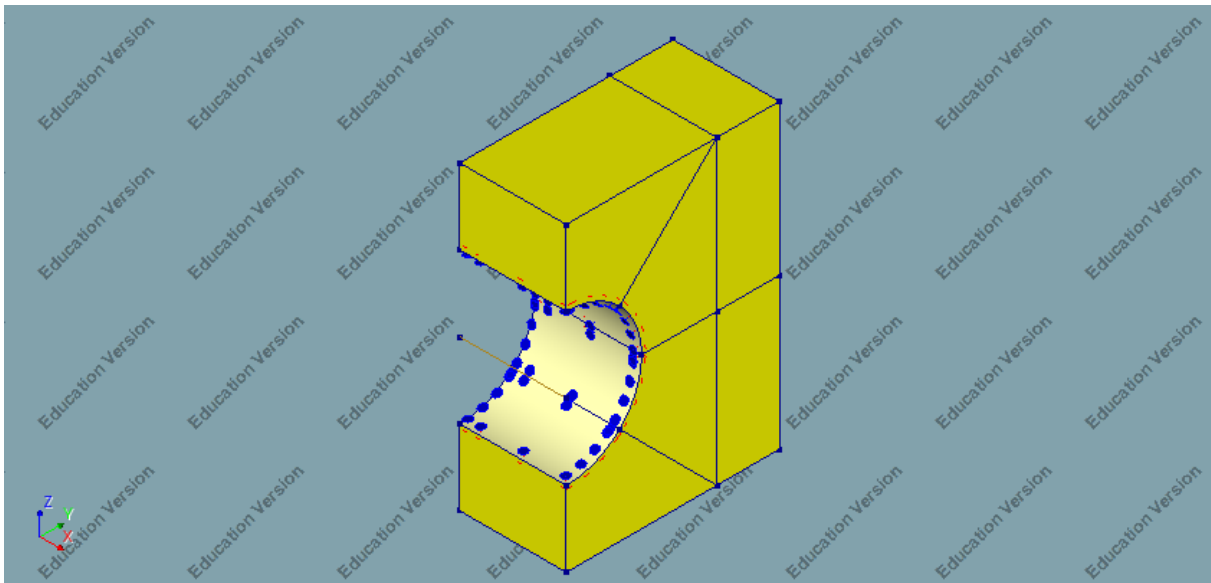
Figuur B.6-24 Instellingen oplegde verplaatsing X-richting

Het lineair verloop van de opgelegde vervorming wordt door middel van een 'functie' ingevoerd, zie

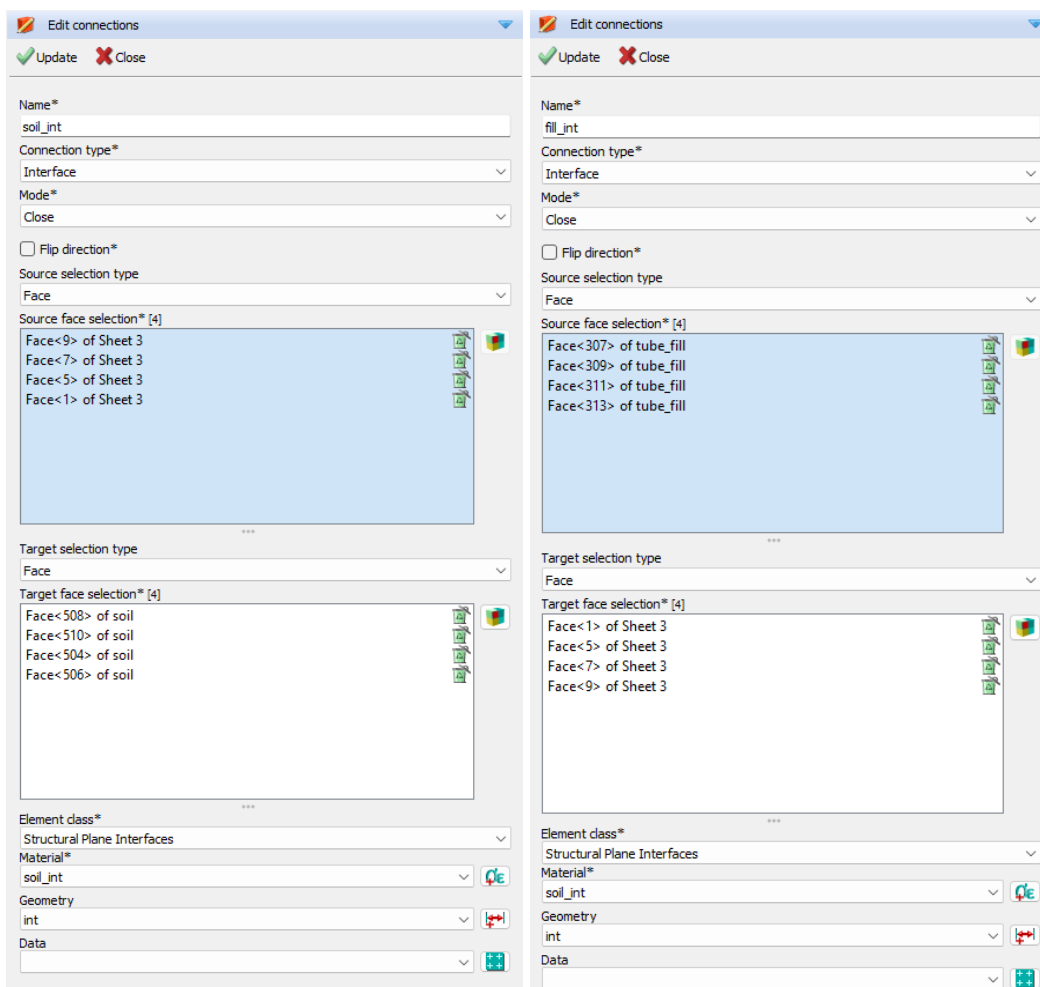


Figuur B.6-25 Functie t.b.v. lineair verloop opgelegde vervorming

B 6.6 Connecties

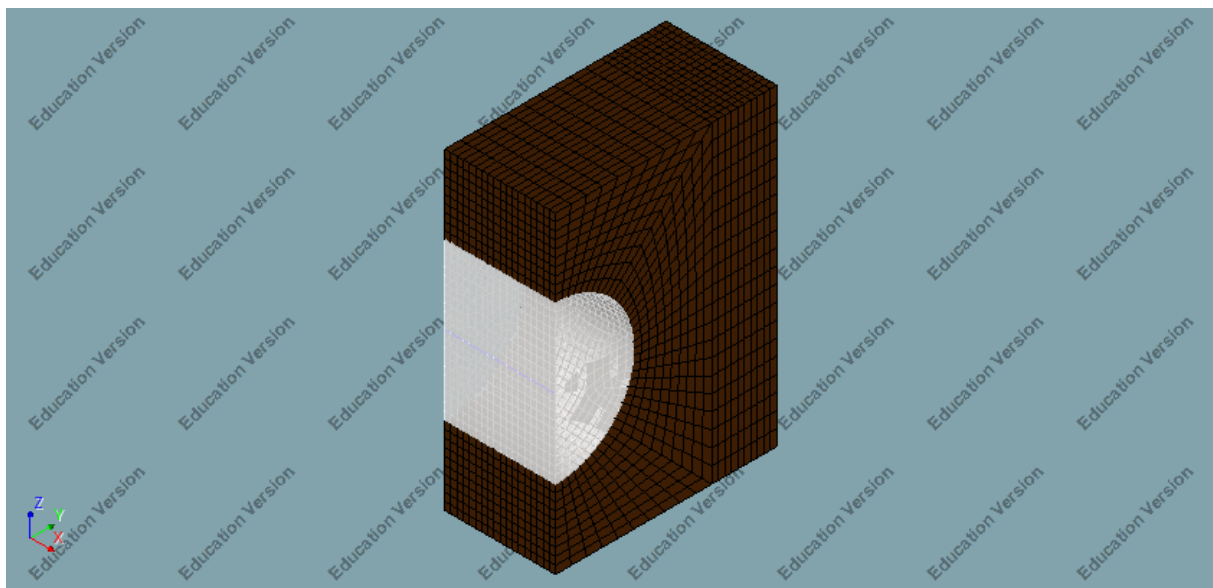


Figuur B.6-26 Interface tussen grond en paal

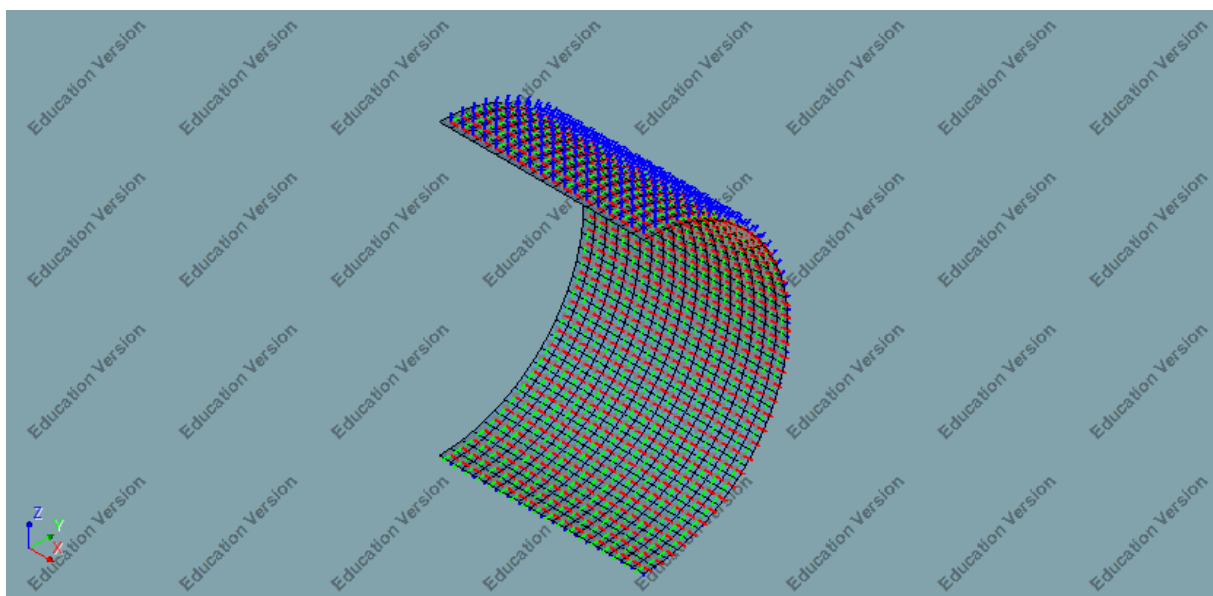


Figuur B.6-27 Interface: grond-paal

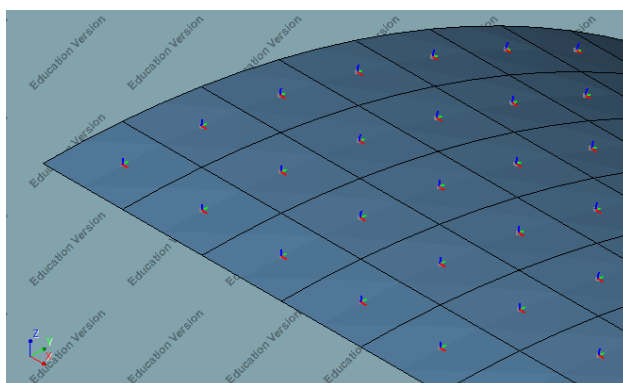
B 6.7 Mesh



Figuur B.6-28 Elementennet

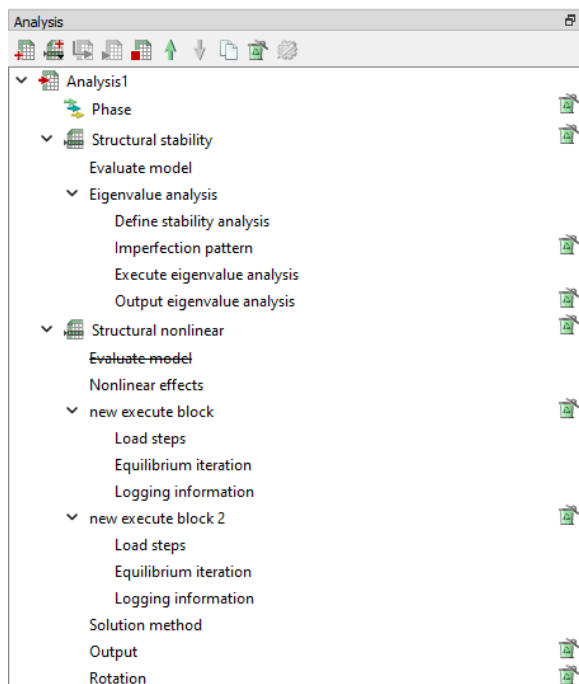


Figuur B.6-29 Lokale assen

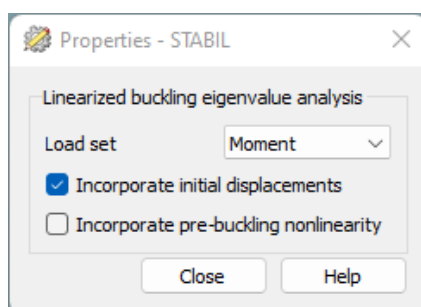


Figuur B.6-30 Lokale assen (gedetailleerd)

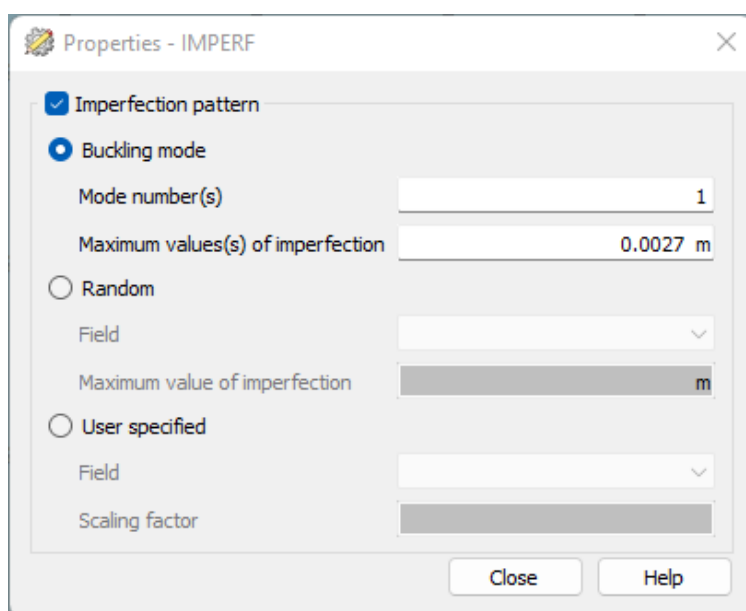
B 6.8 Analyse



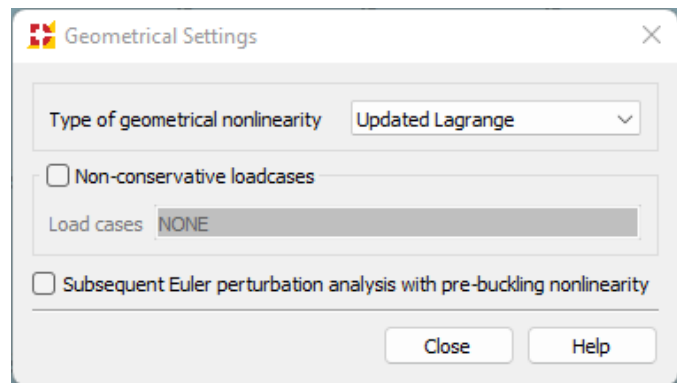
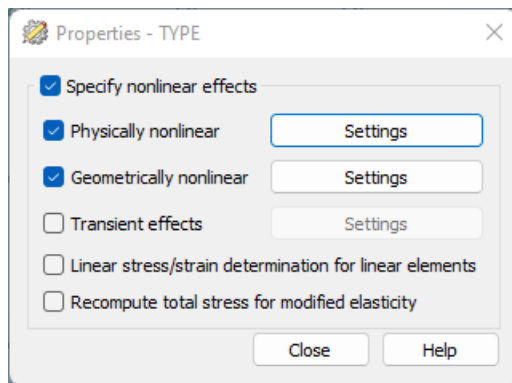
Figuur B.6-31 Analyse set-up



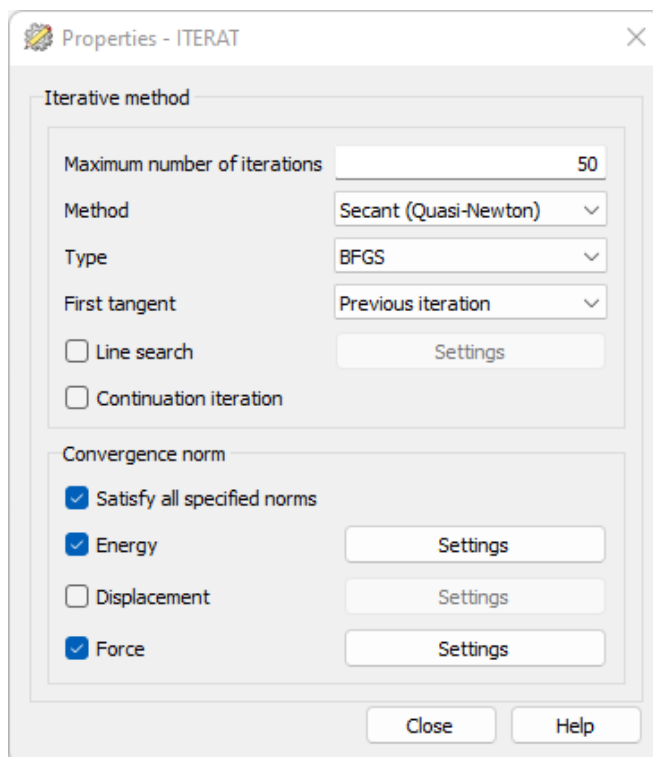
Figuur B.6-32 Lineair-elastische bifurcatie analyse



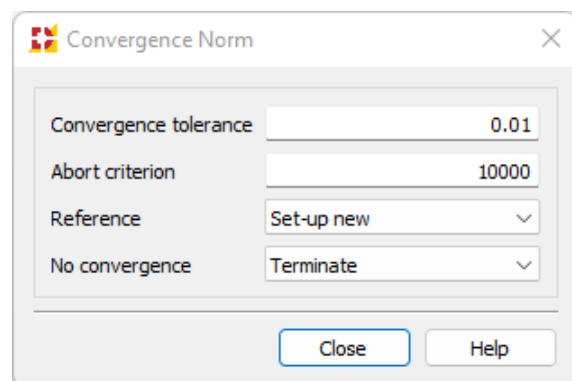
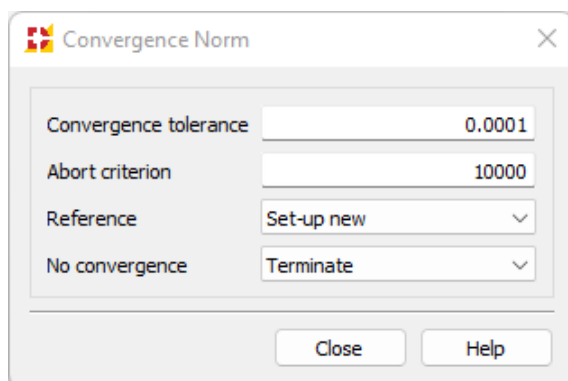
Figuur B.6-33 Amplitude geometrische imperfectie



Figuur B.6-34 Geometrische niet-lineariteit



Figuur B.6-35 Solver instellingen



Figuur B.6-36 Convergentie instellingen

Bijlage 7 Momencapaciteit conform EC3-1-6; bijlage E

In deze bijlage wordt voor één doorsnede de momencapaciteit bepaald. De overige doorsnedes zijn identiek uitgewerkt.

Toegepast wordt een buispaal Ø711-5 mm (S355). De buis wordt overwegend op buiging belast. De doorsnedeklasse van het profiel bedraagt:

$$\begin{aligned} \text{- buis: } d &= 711 \text{ mm} \\ t &= 5 \text{ mm} \\ d/t &= 711/5 = 142,2 > 90 \cdot 235/355 = 59,6: \text{klasse 4} \end{aligned}$$

Het profiel valt in doorsnedeklasse 4 en dient zodoende op plooiestabiliteit gecontroleerd te worden.

De plooiestabiliteit wordt gecontroleerd conform [13] bijlage E. De rekenregels uit [13] bijlage E zijn van toepassing voor het volgende geldigheidsgebied: $25 \leq r/t \leq 3000$

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{2} \cdot (d-t) = \frac{1}{2} \cdot (711-5) = 353 \text{ mm} \\ r/t &= 353/5 = 70,6 \\ \omega &= L/\sqrt{r \cdot t} = 30000/\sqrt{(353 \cdot 5)} = 714 \\ \Omega &= t/r \cdot \omega = 5/353 \cdot 714 = 10,1 \end{aligned}$$

De r/t verhouding valt binnen het geldigheidsgebied, immers: $25 \leq 70,6 \leq 3000$

NB: In het numerieke Diana fea model zijn de oplettingen zodanig gekozen dat de buis als "oneindig" lang kan worden gekarakteriseerd. Derhalve wordt uitgegaan van lange buizen ($\Omega \geq 7,0$). Een 'fictieve' lengte van 30 meter wordt aangehouden.

De plastische momenteerstand en het elastisch kritisch plooiemoment bedragen:

$$M_{R,pl} = 4 \cdot r^2 \cdot t \cdot f_{yd} = 4 \cdot 353^2 \cdot 5 \cdot 355 \cdot 10^{-6} = 885 \text{ kNm}$$

$$M_{R,cr} = 1,813 \cdot C_m \cdot \frac{E}{\sqrt{1-\nu^2}} \cdot r \cdot t^2 = 1,813 \cdot 1,0 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5}{\sqrt{1-0,3^2}} \cdot 353 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6} = 3522 \text{ kNm}$$

$$\text{Waarin: } C_m = 1 + 4/\omega^2 = 1 + 4/714^2 = 1,0$$

Voor lange buizen ($\Omega \geq 7,0$) bedraagt de geometrische reductiefactor (conform [13] tabel E.1):

$$\alpha_G = 0,516$$

De reductie ten gevolge van imperfecties bedraagt:

$$\alpha_l = \frac{1}{1+2,00 \cdot (\Delta w_k/t)^{0,8}} = \frac{1}{1+2,00 \cdot (2,63/5)^{0,8}} = 0,456$$

$$\begin{aligned} \text{Waarin: } \Delta w_k &= 1/Q \cdot \sqrt{r \cdot t} = 1/16 \cdot \sqrt{(353 \cdot 5)} = 2,63 \text{ mm} \\ Q &= 16 \text{ (klasse C)} \end{aligned}$$

De elastische plooiereductie factor bedraagt:

$$\alpha = \alpha_l \cdot \alpha_G = 0,456 \cdot 0,516 = 0,235$$

De plooi factor β bedraagt:

$$\beta = 1 - \frac{0,60}{1+1,20 \cdot (\Delta w_k/t)^{0,8}} = 1 - \frac{0,60}{1+1,20 \cdot (2,63/5)^{0,8}} = 0,65$$

De interactie exponent η bedraagt:

$$\eta = 0,65 + 0,2 \cdot (\Delta w_k / t) = 0,65 + 0,2 \cdot (2,63 / 5) = 0,76$$

De plooi reductiefactor bedraagt:

$$\lambda_0 = 0,30 \text{ (conform [13] E.12)}$$

$$\lambda = \sqrt{M_{pl} / M_{R,cr}} = \sqrt{885 / 3522} = 0,50$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,235}{1-0,65}} = 0,82$$

De elastisch-plastische reductiefactor wordt als volgt bepaald ($\lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_p$)

$$\chi = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^\eta = 1 - 0,65 \cdot \left(\frac{0,50 - 0,30}{0,82 - 0,30} \right)^{0,76} = 0,68$$

Bijlage 8 Gronddrukfactoren

In deze bijlage wordt de passieve gronddruk op de buispaal bepaald met behulp van gronddrukfactoren conform DIN 4085. De gronddruk wordt bepaald op basis van een niveau 1,50 m onder maaiveld niveau (2 – 3D).

NB: Conform [8] mag vanaf 1D onder maaiveld gerekend worden met een (deels) gevulde buis. Ongeacht het voorgaande wordt de gronddruk bepaald op een niveau van ca. 2 – 3D beneden maaiveld in combinatie met een lege buis.

De actieve, neutrale en passieve gronddruk, op basis van rechte glijvlakken (Müller-Breslau), bedragen:

$$K_{y,a;k} = \frac{\cos^2(\varphi' + \alpha)}{\cos^2(\alpha) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\varphi' + \delta_a) \cdot \sin(\varphi' - \beta_a)}{\cos(\alpha - \delta_a) \cdot \cos(\alpha + \beta_a)} \right]^2} = \frac{\cos^2(30+0)}{\cos^2(0) \cdot \left[1 + \frac{\sin(30+1/3 \cdot 30) \cdot \sin(30-0)}{\cos(0-1/3 \cdot 30) \cdot \cos(0+0)} \right]^2} = 0,304$$

$$K_{y,p;k} = \frac{\cos^2(\varphi' - \alpha)}{\cos^2(\alpha) \cdot \left[1 - \frac{\sin(\varphi' - \delta_p) \cdot \sin(\varphi' + \beta_p)}{\cos(\alpha - \delta_p) \cdot \cos(\alpha + \beta_p)} \right]^2} = \frac{\cos^2(30-0)}{\cos^2(0) \cdot \left[1 - \frac{\sin(30-1/3 \cdot 30) \cdot \sin(30+0)}{\cos(0-1/3 \cdot 30) \cdot \cos(0+0)} \right]^2} = 4,080$$

$$K_{y,n;k} = 1 - \sin(\varphi') = 1 - \sin(30^\circ) = 0,50$$

Buispaal Ø711 mm

De schelpfactor bedraagt:

$$z/D = 1,5/0,711 = 2,11 \leq 3,33$$

$$D_{\text{erpg}}/D = 1 + 0,9 \cdot z/D \cdot \tan\varphi = 1 + 0,9 \cdot 1,50/0,711 \cdot \tan(30^\circ) = 2,096$$

De gronddrukfactoren inclusief schelpfactor bedragen:

$$K_{y,a;k} = 0,304 \cdot 0,711/2,096 = 0,103$$

$$K_{y,p;k} = 4,080 \cdot 0,711 \cdot 2,096 = 6,081$$

$$K_{y,n;k} = 0,50 \cdot 0,711 = 0,356$$

De passieve gronddruk bedraagt:

$$\sigma_{v'} = 17 \cdot 1,5 = 25,5 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{p'} = 6,081 \cdot 25,5 = 155 \text{ kN/m}$$

$$F_{\text{ea;p}} = 155 \cdot 0,50 = 77,5 \text{ kN per halve meter}$$

Buispaal 508 mm

De schelpfactor bedraagt:

$$z/D = 1,5/0,508 = 2,95 \leq 3,33$$

$$D_{\text{erpg}}/D = 1 + 0,9 \cdot z/D \cdot \tan\varphi = 1 + 0,9 \cdot 1,50/0,508 \cdot \tan(30^\circ) = 2,534$$

De gronddrukfactoren inclusief schelpfactor bedragen:

$$K_{y,a;k} = 0,304 \cdot 0,508/2,534 = 0,061$$

$$K_{y,p;k} = 4,080 \cdot 0,508 \cdot 2,534 = 5,253$$

$$K_{y,n;k} = 0,50 \cdot 0,508 = 0,254$$

De passieve gronddruk bedraagt:

$$\sigma_{v'} = 17 \cdot 1,5 = 25,5 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{p'} = 5,253 \cdot 25,5 = 134 \text{ kN/m}$$

$$F_{\text{ea;p}} = 134 \cdot 0,50 = 67,5 \text{ kN per halve meter}$$



Tabellenlijst

De tabellen, welke in dit onderzoek worden weergegeven, zijn respectievelijk:

Tabel 2-1 Geotechnische parameters bij verschillende materiaalmodellen.....	6
Tabel 2-2 Rheologische factoren	13
Tabel 2-3 Doorsnede-classificatie conform [12]	14
Tabel 3-1 Mechanische (materiaal)eigenschappen conform [15] en [2].	22
Tabel 3-2 Maximaal toelaatbare onrondheid conform [16].....	22
Tabel 3-3 Imperfectie amplitude conform [13].....	23
Tabel 3-4 Karakteristieke grondparameters conform [14].....	24
Tabel 3-5 Indicatieve waarden voor de machtsfunctie (m) conform [22]	25
Tabel 3-6 Karakteristieke grondparameters FEM	25
Tabel 4-1 Paal eigenschappen.....	33
Tabel 4-2 Equivalente geometrische imperfectie conform [13]	33
Tabel 4-3 Kritisch moment.....	35
Tabel 4-4 Instellingen solver.....	35
Tabel 4-5 Instellingen solver.....	45
Tabel 6 Ovalisatie ten gevolge van gronddruk	46
Tabel 7 Geometrische reductiefactoren conform [13]	1-1
Tabel 8 Geometrische reductiefactoren conform NEN-EN 1993-5; draft 3 – 31/03/2021.....	1-2
Tabel 9 Elastische plooiparameter conform [8]	2-2

Figurenlijst

De figuren, welke in dit onderzoek worden weergegeven, zijn respectievelijk:

Figuur 2-1 Membraanspanning en membraankracht (bron: [13])	4
Figuur 2-2 elastisch perfect-plastisch materiaalmodel (bron: [20])	6
Figuur 2-3 Mohr-Coulomb materiaalmodel (bron: [20])	6
Figuur 2-4 stijfheid-rekgedrag van grond (bron: [20])	7
Figuur 2-5 Interface elementen (bron: [9])	7
Figuur 2-6 Isotrope versteviging (bron: [21])	8
Figuur 2-7 Kinematische versteviging (bron: [21])	8
Figuur 2-8 Bauschinger effect (bron: [21])	9
Figuur 2-9 Rekenmodellen (afkomstig uit [23])	14
Figuur 2-10 Definitie kromming	15
Figuur 2-11 Moment-krommingsdiagram (model: materiaal niet-lineaire analyse)	16
Figuur 2-12 Ovalizatie ten gevolge van tweede-orde effect	16
Figuur 2-13 Moment-krommingsdiagram (Model: geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse)	18
Figuur 2-14 Moment-krommingsdiagram incl. restspanning (Model: geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse)	18
Figuur 2-15 Passieve gronddruk	19
Figuur 3-1 Optredende belastingen	27
Figuur 3-2 Opleggingen en symmetrie voorwaarden	28
Figuur 3-3 Lagere- en hogere-orde elementen	29
Figuur 3-4 Verdeling elementen per zijde	30
Figuur 3-5 Elementennet	30
Figuur 3-6 belasting- en verplaatsing gestuurd (bron: [10])	32
Figuur 3-7 Booglengte sturing (bron: [10])	32
Figuur 4-1 Voorbeeld eigenmode op basis van LBA analyse	34
Figuur 4-2 Eerste eigenmode model A (leeg)	34
Figuur 4-3 M-k diagram model A1: lege buis	35
Figuur 4-4 M-k diagram model A2: lege buis	36
Figuur 4-5 M-k diagram model A3: lege buis	36
Figuur 4-6 M-k diagram model B1: lege buis	36
Figuur 4-7 M-k diagram model B2: lege buis	37
Figuur 4-8 M-k diagram model B3: lege buis	37
Figuur 4-9 M-k diagram model C1: lege buis	37
Figuur 4-10 M-k diagram model C2: lege buis	38
Figuur 4-11 M-k diagram model C3: lege buis	38
Figuur 4-12 Ovalisatie model A1: lege buis	39
Figuur 4-13 Ovalisatie model A2: lege buis	39
Figuur 4-14 Ovalisatie model A3: lege buis	40
Figuur 4-15 Ovalisatie model B1: lege buis	40
Figuur 4-16 Ovalisatie model B2: lege buis	41
Figuur 4-17 Ovalisatie model B3: lege buis	41
Figuur 4-18 Ovalisatie model C1: lege buis	42
Figuur 4-19 Ovalisatie I model C2: lege buis	42
Figuur 4-20 Ovalisatie model C3: lege buis	43
Figuur 4-21 Karakteristieke momentcapaciteit (kwaliteit A)	43
Figuur 4-22 Karakteristieke momentcapaciteit (kwaliteit B)	44
Figuur 4-23 Karakteristieke momentcapaciteit (kwaliteit C)	44
Figuur 4-24 Passieve gronddruk	45
Figuur 4-25 Steundruk	45
Figuur 4-26 Invloed elasticiteitsmodulus op ovalisatie	46
Figuur 4-27 Verdeling passieve gronddruk op de buispaal	47
Figuur 4-28 Verdeling passieve gronddruk op de buispaal inclusief orthotropie	48

Figuur 4-29 Verdeling passieve gronddruk op de buispaal bij variatie bedding.....	48
Figuur B.6-1 Spanningscomponenten interface elementen (bron: [9])	3-1
Figuur B.6-2 Spanningsruimte grond-paal interface (bron: [12]).....	3-1
Figuur B.6-3 CL3CM elementen (bron: [11])	4-1
Figuur B.6-4 CQ40S elementen (bron: [11])	4-1
Figuur B.6-5 CQ48I elementen (bron: [11]).....	4-1
Figuur B.6-6 CHX60 elementen (bron: [11]).....	4-2
Figuur B.6-7 Project eigenschappen	6-1
Figuur B.6-8 Eenheden	6-1
Figuur B.6-9 Materiaaleigenschappen grond	6-2
Figuur B.6-10 Materiaaleigenschappen interface.....	6-2
Figuur B.6-11 Materiaal eigenschappen staal S235	6-3
Figuur B.6-12 Materiaal eigenschappen staal S355	6-3
Figuur B.6-13 Materiaal eigenschappen staal X70	6-3
Figuur B.6-14 Composed line geometrie.....	6-4
Figuur B.6-15 Buispaal geometrie	6-4
Figuur B.6-16 interface geometrie	6-4
Figuur B.6-17 Opleggingen en symmetrie voorwaarden.....	6-5
Figuur B.6-18 Opleggingen uitwendige grond + opgelegde vervorming	6-5
Figuur B.6-19 Symmetrievoorwaarden schaalelement	6-6
Figuur B.6-20 Oplegging Z-richting	6-6
Figuur B.6-21 Opgelegde verplaatsing X-richting	6-7
Figuur B.6-22 Instellingen vlakvervorming	6-7
Figuur B.6-23 Opgelegde verplaatsing X-richting	6-8
Figuur B.6-24 Instellingen opgelegde verplaatsing X-richting.....	6-8
Figuur B.6-25 Functie t.b.v. lineair verloop opgelegde vervorming	6-9
Figuur B.6-26 Interface tussen grond en paal	6-10
Figuur B.6-27 Interface: grond-paal	6-10
Figuur B.6-28 Elementennet.....	6-11
Figuur B.6-29 Lokale assen.....	6-11
Figuur B.6-30 Lokale assen (gedetailleerd)	6-11
Figuur B.6-31 Analyse set-up	6-12
Figuur B.6-32 Lineair-elastische bifurcatie analyse	6-12
Figuur B.6-33 Amplitude geometrische imperfectie	6-12
Figuur B.6-34 Geometrische niet-lineariteit.....	6-13
Figuur B.6-35 Solver instellingen.....	6-13
Figuur B.6-36 Convergentie instellingen	6-13

Geciteerde werken

De geciteerde werken, welke in dit onderzoek worden toegepast, zijn respectievelijk:

- [1] Gresnigt A.M., Plastic Design of Buried Steel Pipelines in Settlement Areas, HERON, Volume 31, no 4, 1986.
- [2] API Specification 5L. Specification for Line Pipe. American Petroleum Institute, 2012.
- [3] Bijlaard, F.S.K., et al, "Bending resistance of steel tubes in combiwalls (COMBITUBE), Final report, 2014.
- [4] Brinch-Hansen, J., & Christensen, N. The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces. Copenhagen, 1961: The Danish geotechnical institute.
- [5] Broeken M.L., & Gijt J.G. CUR 211 Quay Walls, Second edition, Balkema, 2013.
- [6] Müller-Breslau, H. Erddruck auf Stützmauern. Stuttgart, 1906: Verlag Kröner.
- [7] Kötter, F. Die Bestimmung des Druckes an gekrümmten Gleitflächen. Berlin, 1903: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften.
- [8] Ontwerpmethodiek flexibele Dolphins; Standaardisatie van Flexible Dolphins. Delft, 2018: SBRCURnet.
- [9] Manie, J., & Schreppers G. Diana Geotechnical Analysis - release 9.6. Technical report, DIANA FEA B.V.
- [10] Manie, J., & Schreppers G. User's Manual - release 9.6. Theory, DIANA FEA B.V.
- [11] Manie, J., & Kikstra W.P. User's Manual - release 9.4.4. Element Library, DIANA FEA B.V.
- [12] NEN EN 1993-1-1, Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel: 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen. Brussel, C2+A1/NB:2016: CEN.
- [13] NEN EN 1993-1-6, Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel: 1-6: Sterkte en stabiliteit van schaalconstructies. Brussel, 2007/C1+A1:2017: CEN.
- [14] NEN-EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp – Deel: 1: Algemene regels. Brussel, 2005/C1:2009: CEN.
- [15] NEN-EN 10219-1, Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions. Brussel, 2006: CEN.
- [16] NEN-EN 10219-2, Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties. Brussel, 2006: CEN.
- [17] Publication 211E, 'Quay Walls, second edition'. Rotterdam, 2014 + Erratum 2018: SBRCURnet.
- [18] Peters, D.J., et al, Calibration of Eurocode design models of thin-walled cylinder under bending with full scale tests. Copenhagen, 2017.
- [19] Peters, D.J., et al, Local Buckling Resistance of Sand-filled Spirally Welded Tubes. The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE. 2015.
- [20] Plaxis connect edition V20; Material Models Manual.
- [21] Welleman, J.W. & Hoogenboom, P.C.J.. Materiaalmodellen. Januari 2008
- [22] CUR Rapport 2003-7, Bepaling geotechnische parameters. Gouda, 2003: Stichting CUR;
- [23] Snijder, H.H., & Steenberg, H.M.G.M. Krachtswerking. Zoetermeer, 2011: Bouwen met Staal.