


POVM Kennisdocument

Controle op knik en 2^e orde effecten in stabiliteitsverhogende langsconstructies

POV

MACRO
STABILITEIT



april 2020

Versie: 1.0
Status: Definitief

De publicaties van de Projectoverstijgende Verkenning Macrostabieliteit (POVM) geven aanwijzingen en voorbeelden voor het ontwerp, de toepassing en het beheer van verschillende stabiliteitsverhogende technieken, evenals voor het scherper bepalen van de 'actuele sterkte'. Alle POVM-publicaties gaan vergezeld van een positief ENW advies.

In enkele aanvullende kennisdocumenten - waaronder ook het voorliggende document - vindt u uitwerkingen en/of toelichtingen voor onderwerpen:

1. die in de POVM-publicaties nog onvoldoende worden behandeld;
2. waarvoor sinds het opstellen van de publicaties nieuwe inzichten of rekenmogelijkheden beschikbaar zijn gekomen.

Elk kennisdocument is met zorg samengesteld en gecontroleerd, gevolgd door formele vaststelling door de redactieraad van het POVM-gebruikersplatform. Toch kan niet worden uitgesloten dat bij toepassing nog kennislacunes of onvolkomenheden worden ontdekt. Gebruik van de kennisdocumenten is vrij, maar het is aan de gebruiker zelf om te beoordelen of de kennis de project-specifieke toepassing dekt, en hoe de in elk document beschreven kennis wordt toegepast.

Een kennisdocument kan in de toekomst wijzigen wanneer inzichten veranderen of groeien. De meest recente versies zijn steeds te vinden op het POVM-gebruikersplatform (<https://publicwiki.deltares.nl/display/POVM/POVM+Gebruikersplatform>). Op dit platform vinden gebruikers van de POVM-publicaties ook aanvullende ondersteunende informatie.

Nijmegen, februari 2021,

(handtekening)

Ir. J. van der Schrier

Voorzitter Redactieraad POVM-gebruikersplatform

Kennisdocument

Controle op knik en 2e orde effecten in stabiliteitsverhogende langsconstructies

Opdrachtgever	WSRL
Contactpersoon	J. Schreurs
Referenties	Clusteropdracht POVM2019_Q4, RHDHV kenmerk T&P- BG8914-100-100-L001-F1.0

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	20 april 2020
Deltares Projectnummer	11204648-004
Pagina's	27
Status	Definitief

Auteur(s)
Mark Post (Deltares)

Controle
Marcel Visschedijk (Deltares)

Samenvatting

Het voorliggende kennisdocument gaat in op de controle op knik en tweede-orde-effecten bij verankerde stalen damwanden, zoals vereist binnen het ontwerp van stabiliteitsverhogende langsconstructies in dijken. Aanleiding daarvoor is dat in de conceptversie 1.1 van de POV-M publicatie langsconstructies (PPL, oktober 2019) alleen een controle werd voorgeschreven conform NEN-EN1993-5. Voor stabiliteitswanden is deze controle naar verwachting echter te conservatief, met een mogelijk te zware dimensionering als resultaat. In de definitieve PPL versie (maart 2020) wordt daarom ook een alternatieve controlemogelijkheid beschreven, die minder conservatief uitpakt. Aan toepassing daarvan zijn enkele pragmatische randvoorwaarden verbonden. Het document bevat de afleiding en onderbouwing voor zowel deze alternatieve controlemogelijkheid als voor de daarbij te hanteren randvoorwaarden. Verder bevat het document ook enkele illustratieve rekenvoorbeelden.

Inhoud

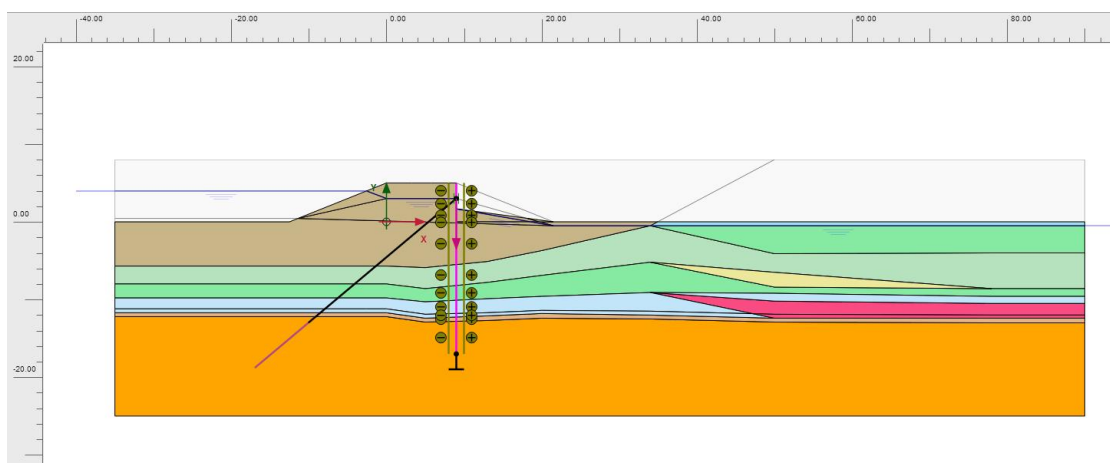
	Samenvatting	3
1	Inleiding	5
2	Achtergrond	6
2.1	Aanpak conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3.	6
2.2	Verificatie knik in PLAXIS 2D	9
3	Alternatieve aanpakken	10
3.1	Mogelijke alternatieve aanpakken	10
3.2	Verkenning alternatieve aanpak 1	10
3.3	Verkenning alternatieve aanpak 2	14
3.4	Uitwerking voor case Bergambacht	17
3.5	Conclusies	18
4	Resumé en aanbevelingen	19
4.1	Resumé	19
4.2	Aanbevelingen	20
	Referenties	21
A	Verificatie knik in PLAXIS	22
A.1	Inleiding	22
A.2	Rekenvoorbeeld Eulerse knik - geen bedding	22
A.3	Rekenvoorbeeld knik met bedding	25

1 Inleiding

In conceptversie 1.1 van de POV-M publicatie langsconstructies (POVM, 2019a) staat vermeld dat een knikcontrole conform NEN-EN1993-5 art.5.2.3. (NEN, 2008; NEN, 2012) dient te worden uitgevoerd voor verankerde stalen damwanden. De NEN staat in principe toe om bij de controle ook het positieve effect van de grondinbedding te kwantificeren:

- Voor het positieve effect van een eventuele inklemming van de wand in het diepe zand is in de NEN een concrete uitwerking gegeven, door middel van een gereduceerde kniklengte.
- Voor het positieve effect van de inbedding in de overige (slappe) lagen boven het diepe zand wordt geen verdere uitwerking gegeven. In de praktijk betekent dit dat het positieve effect van de inbedding (nog) niet wordt meegenomen.

Uit de praktijk is gebleken dat de knikcontrole in sommige gevallen maatgevend wordt voor het toe te passen profiel, bij een uitwerking conform NEN-EN1993-5 art.5.2.3. Als voorbeeld van een dergelijke situatie toont Figuur 1.1 het rekenvoorbeeld van een verankerde damwand (case Bergambacht), zoals gebruikt in de POV-M publicatie 'Eindige Elementen Toepassing' (POVM, 2019b). Onderbuikgevoel is daarbij dat de knikcontrole volgens de NEN te conservatief is en daarom tot een te zware dimensionering kan leiden.



Figuur 1.1 Geometrie van rekenvoorbeeld verankerde damwand (case Bergambacht) in fase 5 (STR) met restprofiel

In de voorliggende rapportage wordt de achtergrond van de knikcontrole conform NEN-EN1993-5 art.5.2.3. nader beschreven en worden twee alternatieven uitgewerkt die mogelijk minder conservatief zijn. Vervolgens wordt onderbouwd gekozen voor een van deze alternatieven. In de definitieve PPL versie (maart 2020) wordt deze alternatieve controlemogelijkheid beschreven.

De voorliggende beknopte Deltares rapportage zal naar verwachting de basis vormen voor een in de loop van 2020 te verschijnen POV-M 'kennisdocument'. In dergelijke POV-M 'kennisdocumenten' zullen door het POV-M rekencluster geaccordeerde uitwerkingen bevatten, op onderwerpen waar de POV-M publicaties bij praktijktoepassing nog onvoldoende handvatten blijken te geven of waar inmiddels nieuwe inzichten beschikbaar zijn.

In de vervolgttekst wordt de POV-M Publicatie Langsconstructies verder aangeduid met de afkorting PPL en de POV-M Publicatie 'Eindige Elementen Toepassing' met de afkorting PPE. Gezien het beknopte karakter van het uiteindelijk beoogde kennisdocument wordt in de vervolgttekst ten slotte enige voorkennis verondersteld voor wat betreft de gebruikte begrippen en symbolen.

2 Achtergrond

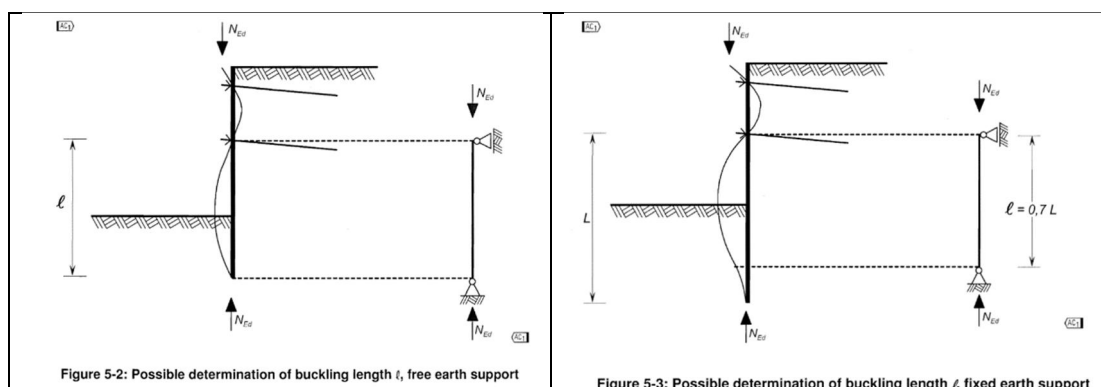
2.1 Aanpak conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3.

Een kopie van het eerste deel van artikel 5.2.3. is gegeven in Figuur 2.1 en Figuur 2.2. Samengevat stelt het artikel dat knik niet hoeft te worden beschouwd indien de rekenwaarde van de drukkracht (N_{Ed}) in de damwandplank minder dan 4 % is van de elastische kritische knikkracht van de damwandplank (N_{cr}).

Artikel 5.2.3. geeft als toelichting bij N_{cr} dat dit de elastische kritische kniklast is van de damwand, bepaald met een "appropriate soil model". Als alternatief mag de kritische kniklast worden bepaald volgens de formules van Euler, waarbij rekening dient te worden gehouden met een reductiefactor β_D voor U-piles. Voorgaande suggereert dat NEN-EN1993-5 toestaat dat de N_{cr} wordt bepaald aan de hand van een rekenmodel waarin de invloed van grond wordt meegenomen. Deze optie wordt in deze rapportage nader verkend.

<p>5.2.3 Sheet piling with bending, shear and axial force</p> <p>(1) For combined bending and compression, member buckling need not be taken into account if:</p> $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04 \quad (5.11)$ <p>where:</p> <p>N_{Ed} is the design value of the compression force;</p> <p>N_{cr} is the elastic critical load of the sheet pile, calculated with an appropriate soil model, taking into account only compression forces in the sheet pile.</p> <p>(2) Alternatively N_{cr} may be taken as:</p> $N_{cr} = EI \beta_D \pi^2 / \ell^2 \quad (5.12)$ <p>in which ℓ is the buckling length, determined according to Figure 5-2 for a free or partially fixed earth support or according to Figure 5-3 for a fixed earth support and β_D is a reduction factor, see 6.4.</p> <p>(3) If the criterion given in (1) is not satisfied, the buckling resistance should be verified.</p> <p>NOTE: This verification can be carried out using the procedure given in (4) to (7).</p>

Figuur 2.1. Sub (1) (2) en (3) van artikel 5.2.3. uit NEN-EN1993-5



Figuur 2.2. Toelichting op 'buckling length' in artikel 5.2.3. uit NEN-EN1993-5

Indien de rekenwaarde van de drukkracht groter is dan 4% van de elastische kritische knikkraft dient er een nadere beschouwing te worden uitgevoerd, conform “the simplified buckling check” in sub (4) van artikel 5.2.3. Zie Figuur 2.3. Deze nadere beschouwing komt feitelijk neer op een vergroting van de spanningen ten gevolge van de normaalkracht door reductie van de axiale sterkte aan de hand van een factor χ (een factor kleiner dan 1.0) en een vergroting van de buigspanningen met een vaste factor 1,15. De herkomst van deze factor 1,15 is voor dit moment onbekend.

Naast de “standaard” partiële factor van $\gamma_{M0} = 1,0$ wordt in artikel 5.2.3 ook een partiële factor γ_{M1} van 1,1 geïntroduceerd welke is gerelateerd aan geometrische instabiliteit.

(4) Provided that the boundary conditions are supplied by elements (anchor, earth support, capping beam etc.) that give positional restraint corresponding to the non-sway buckling mode, the following simplified buckling check may be used:

- for class 1, 2 and 3 sections:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}(\gamma_{M0}/\gamma_{M1})} + 1,15 \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}(\gamma_{M0}/\gamma_{M1})} \leq 1,0 \quad (5.13)$$

where:

- $N_{pl,Rd}$ is the plastic design resistance of the cross-section ($A f_y / \gamma_{M0}$);
- $M_{c,Rd}$ is the design moment resistance of the cross-section, see 5.2.2 (2);
- γ_{M1} is the partial factor according to 5.1.1 (4);
- γ_{M0} is the partial factor according to 5.1.1 (4);
- χ is the buckling coefficient from 6.3.1.2 of EN 1993-1-1, using curve d and a non dimensional slenderness given by:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$$

with:

- N_{cr} is the elastic critical load, which may be determined according to (5.12);
- A is the cross-sectional area;

- for class 4-sections: see Annex A.

NOTE: Buckling curve *d* also covers driving imperfections up to 0,5% of ℓ which is considered to be good practice.

Figuur 2.3. Sub (4) van artikel 5.2.3. uit NEN-EN1993-5.

Knik vs tweede-orde-effecten

Wat duidelijk wordt uit de aanpak van de NEN-EN1993-5 is dat het bij een knikcontrole niet zozeer gaat om een controle op het daadwerkelijk uitknikken van de damwand als wel om het bepalen van de tweede-orde-effecten in de krachtswerking van de constructie. Hoe knikgevoeliger een constructie is, des te makkelijk zullen de spanningen toenemen in de constructie als gevolg van (initiële) vervormingen. In de methodiek van de Eurocode zijn hiertoe ook zaken meegenomen als plaatsingstoleranties van de damwand, die ook een rol spelen in deze tweede-orde-effecten.

Verder wordt uit artikel 5.2.3. duidelijk dat een tweetal controles dient te worden uitgevoerd om aannemelijk te maken dat het gestelde in dit artikel mag worden gebruikt, zie sub (6) en (7) in Figuur 2.4.

(6) It may be assumed that a free earth support provides sufficient restraint for the simplified approach if the toe of the sheet pile wall is fixed in bedrock or if the toe of the sheet pile wall is able to resist an additional horizontal force $F_{Q,Ed}$ by passive earth pressure or by friction according to Figure 5-4. $F_{Q,Ed}$ is given by:

$$F_{Q,Ed} = \pi N_{Ed} \left(\frac{d}{\ell} + 0,01 \right) \quad (5.14)$$

where d is the maximum relative deflection of the sheet pile wall occurring between the supports according to a first order analysis. The force $F_{Q,Ed}$ can be resisted by providing $\left[\frac{d}{\ell} \right]$ an additional pile length Δh according to Figure 5-4 if the soil resistance is fully mobilised in the absence of friction.

(7) If the supplementary displacement of a horizontal support (anchor, waling) due to a support load of $N_{Ed}/100$ is less than $\ell/500$, the support may be assumed to provide enough restraint for the assumption of a non-sway buckling mode.

Figuur 2.4. Aanvullende controles in art.5.2.3.

Voorbeeld: case Bergambacht spanningsberekening conform EC

Uit het PPE v1.1 rekenvoorbeeld voor de verankerde damwand (case Bergambacht case) blijkt het grote effect van het meenemen van knikeffecten op de spanningscontrole. In Figuur 2.5 wordt de uitgewerkte "standaard" spanningsberekening getoond voor deze case, zonder knikeffecten. In Figuur 3.6 (§ 3.4) worden de resultaten van deze spanningscontrole getoond zonder en met knikeffecten conform Eurocode.

De rekenwaarden van het buigend moment en van de normaalkracht worden bepaald door de uit de EEM berekening gevonden waarden in fase 5 (Constructieve toets, bij een grondsterktereductiefactor 1,23) als volgt aan te passen.

$$M_{s;d} = f_{open} Y_{add;dw} Y_{b;str} M_{s,max;EEM} \Rightarrow 1,25 * 1,0 * 1,12 * 626 = 880 \text{ kNm/m}$$

$$N_{s;d} = f_{open} Y_{add;dw} Y_{b;str} N_{s,max;EEM} \Rightarrow 1,25 * 1,0 * 1,12 * 338 = 473 \text{ kN/m}$$

waarin:

- $M_{s;d}$ = rekenwaarde van het buigend moment [kNm/m]
- f_{open} = factor openingspercentage [-] (1/(opening per m in de wand=1/0,8=1,25)
- $Y_{add;dw}$ = belastingeffect factor buigend moment [-]
- $Y_{b;str}$ = schematiseringsfactor voor constructief falen [-]
- $M_{s,max;EEM}$ = maximaal buigend moment in wand uit de EEM berekening [kNm/m]
- $N_{s;d}$ = rekenwaarde van de normaalkracht in de damwand [kN/m]
- $N_{s,max;EEM}$ = maximale normaalkracht in wand uit de EEM berekening [kN/m]

De staalspanning wordt getoetst met onderstaande formule. Conform de PPL wordt voor het ontwerp van de damwanden en ankers uitsluitend rekening gehouden met de elastische capaciteit van de stalen onderdelen.

$$\sigma_{s;dw;d} = \frac{M_{s;d}}{W_{el;corr;open}} + \frac{N_{s;d}}{A_{corr}} \leq f_{y;dw;d} \Rightarrow \frac{880}{0,9 * 3292 * 10^{-6}} + \frac{473}{195 * 10^{-4}} = 321 * 10^3 \leq 390 * 10^3$$

Figuur 2.5. Berekening van spanningen t.g.v. M en N (overgenomen uit rekenvoorbeeld PPE v1.1.).

Noot bij Figuur 2.5: Conform PPL v1.1. dient voor het weerstandsmoment van een discontinue stalen damwand te worden uitgegaan van het (gecorrodeerde) elastisch weerstandsmoment vermenigvuldigd met een factor 0.9 ($W_{el;corr;open}$).

Uit de Eurocode berekening in Figuur 3.6 kan worden geconcludeerd dat bij overschrijding van de drempelwaarde $N_{Ed}/N_{cr} < 0.04$ de 'unity check' direct oploopt van 0.82 (geen knik effecten) naar 1.09 (wel knikeffecten). Dit geeft aan dat er een sterke discontinuïteit zit in de spanningsberekening bij de overschrijding van de drempelwaarde uit de NEN-EN1993-5 art.5.2.3.

2.2 Verificatie knik in PLAXIS 2D

In bijlage A is aangetoond dat het eindige-elementenprogramma PLAXIS 2D de theoretische kniklast voor een puur op druk belaste plaat goed kan benaderen met een geometrisch niet-lineaire ('updated mesh') berekening. Dit geldt zowel zonder als met elastische inbedding.

3 Alternatieve aanpakken

3.1 Mogelijke alternatieve aanpakken

In de voorliggende rapportage zijn de volgende twee alternatieve aanpakken onderzocht:

1. Gebruik maken van de mogelijkheid die in NEN-EN1993-5 art.5.2.3 wordt geboden om de elastisch kritische kniklast N_{cr} nader te bepalen met een “appropriate soil model” in plaats van met de formule van Euler;
2. Gewijzigde aanpak t.o.v. NEN-EN1993-5 art.5.2.3, waarbij de tweede-orde-effecten direct worden bepaald in het geometrisch niet-lineaire EEM model i.p.v. aan de hand van “the simplified buckling check”.

Voor de snelle lezer: na uitwerking en evaluatie in § 3.2 tot en met § 3.4 wordt in § 3.5 geconcludeerd dat ‘aanpak 2’ de voorkeur heeft.

3.2 Verkenning alternatieve aanpak 1

Onderzocht wordt in welke mate het mogelijk is om de elastisch kritische kniklast N_{cr} te bepalen aan de hand van het op basis van de PPE opgestelde PLAXIS model. Idealiter kan worden aangetoond dat N_{cr} zo groot is dat daarmee kan worden aangetoond dat volgt $N_{Ed} / N_{cr} = < 0.04$ en dus dat tweede-orde-effecten verwaarloosbaar zijn.

Hier toe wordt gebruik gemaakt van het volgende stappenplan:

1. De basisaanpak is conform NEN_EN1993-5 art. 5.2.3.
2. Indien knik maatgevend wordt voor het ontwerp bij aanpak conform 1) dan is het toegestaan om het bestaande PLAXIS model uit te breiden met een fase waarin de elastisch kritische knikkracht N_{cr} in meer detail wordt geanalyseerd.
3. De volgende stappen zijn doorlopen bij deze aanpak:
 - a. PLAXIS model opslaan onder andere naam.
 - b. Aanbrengen van ‘vertical prescribed point displacement’ ter plaatse van ankerniveau.
 - c. Eventueel verwijderen van verkeersbelasting achter damwand indien deze aanleiding geeft tot numerieke problemen. Verwijderen is acceptabel omdat deze geen significante invloed heeft op bepaling van de theoretische kniklast.
 - d. Remesh.
 - e. Verwijderen alle bestaande fasen na fase 5 “constructieve toets”.
 - f. Aanmaken nieuwe fase na fase 5 genaamd “bepaal N_{cr} ”. Indien restprofiel aanwezig is deze ook aanhouden. In deze fase activeren van ‘prescribed point displacement’ ter plaatse van ankerniveau, verplaatsing in x-richting ‘fixed’, opgelegde verplaatsing in negatieve y-richting welke dusdanig groot is dat N_{cr} kan worden bereikt. Voor case Bergambacht is gekozen voor 1m verticale opgelegde verplaatsing.
 - g. *Reset displacement* activeren in fase MHW, *updated mesh* activeren in deze fase en alle navolgende fasen.
 - h. Activeer optie ‘ignore undrained behavior’ in fase “bepaal N_{cr} ”.
 - i. Het anker dient geen drukkrachten te kunnen opnemen, dit betekent effectief dat het anker als elasto-plastisch element dient te worden gemodelleerd, waarbij de ‘max compression force’ op ca. 0 kN dient te worden gesteld.
 - j. Ten behoeve van de ‘load-displacement curve’ een knoop selecteren op de constructie waar de maximale horizontale uitbuiging (u_x) wordt verwacht.
 - k. Alle fasen doorrekenen, uitlezen van ‘load-displacement curve’ van laatste fase “bepaal N_{cr} ” (u_x van knoop op constructie vs. reactiekracht F_y) voor de bepaling van N_{cr} .
4. De berekende N_{cr} mag in de aanpak conform NEN-EN1993-5 worden meegenomen.

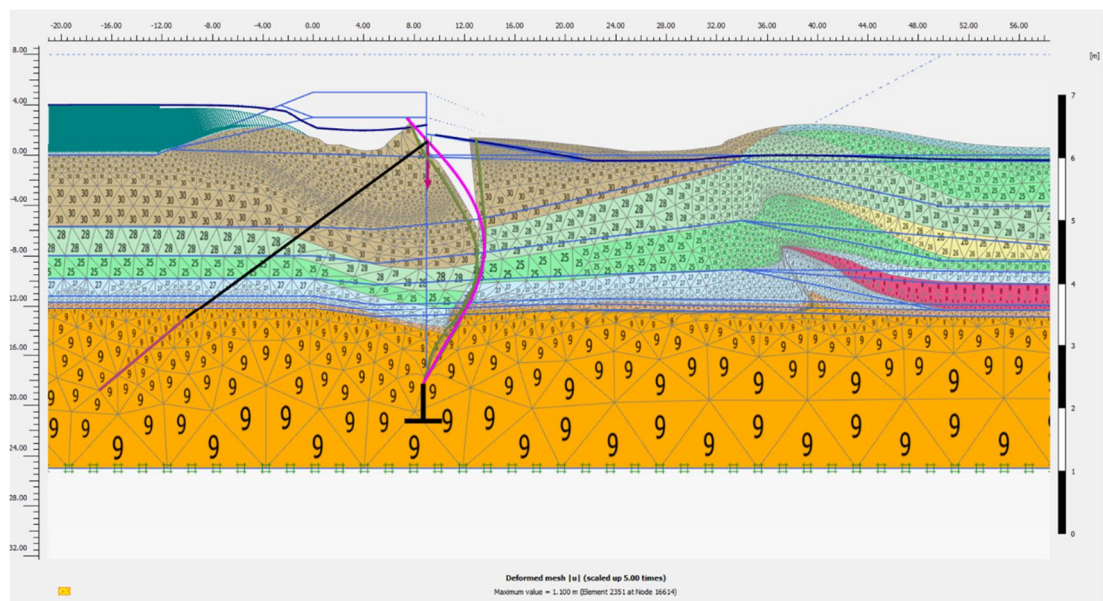
De hierboven voorgestelde methode wordt toegepast op het rekenvoorbeeld verankerde damwand Bergambacht. Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat initiële excentriciteiten (zoals b.v. plaatsingstoleranties) geen rol spelen in deze beschouwing. Het draait hier slechts om het bepalen van de theoretische elastische kniklast N_{cr} . In deze bepaling spelen de initiële excentriciteiten geen rol.

Ter informatie een herhaling van de uitgangspunten voor case Bergambacht:

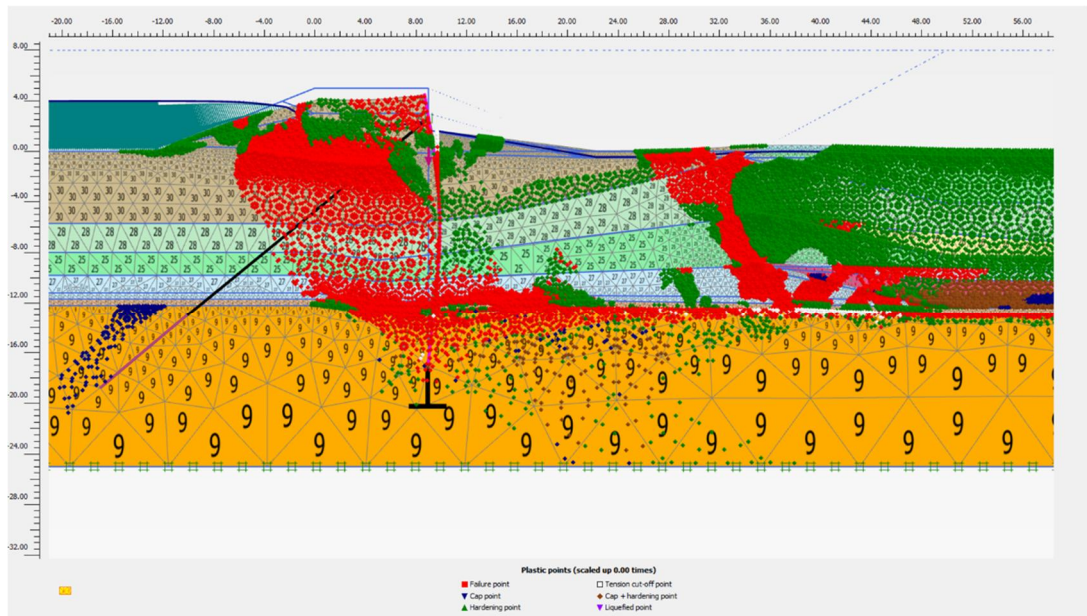
- Damwand lengte van ankerniveau (NAP + 3 m) naar puntniveau (NAP -17 m) = 20 m.
- Damwand lengte in zand is ca. 4 m.
- Damwand type wordt aangenomen als AZ28-700. Noot: op dit moment is knik maatgevend in de som en zorgt ervoor dat een AZ38-700 dient te worden toegepast. Aanname is dus dat als knik niet meer maatgevend is een AZ28-700 voldoet aan de gestelde eisen. Gehanteerde buigstijfheid $EI = 90160 \text{ kNm}^2/\text{m}$ uitgaande van 2.4mm corrosie totaal en wand is 20% open.
- O.b.v. restprofiel volgt dat boven NAP 0 m geen grond aanwezig is.

In Figuur 3.1 t/m Figuur 3.3 zijn respectievelijk de 'deformed mesh', de 'plastic points' en de 'incremental deviatoric shear strains' geplot van de fase "bepaal N_{cr} ". In deze fase is 1 m verticale verplaatsing opgelegd aan de damwand ter plaatse van het ankerpunt. Op basis van deze plots wordt duidelijk dat de passieve wig afglijdt over het diepe zand.

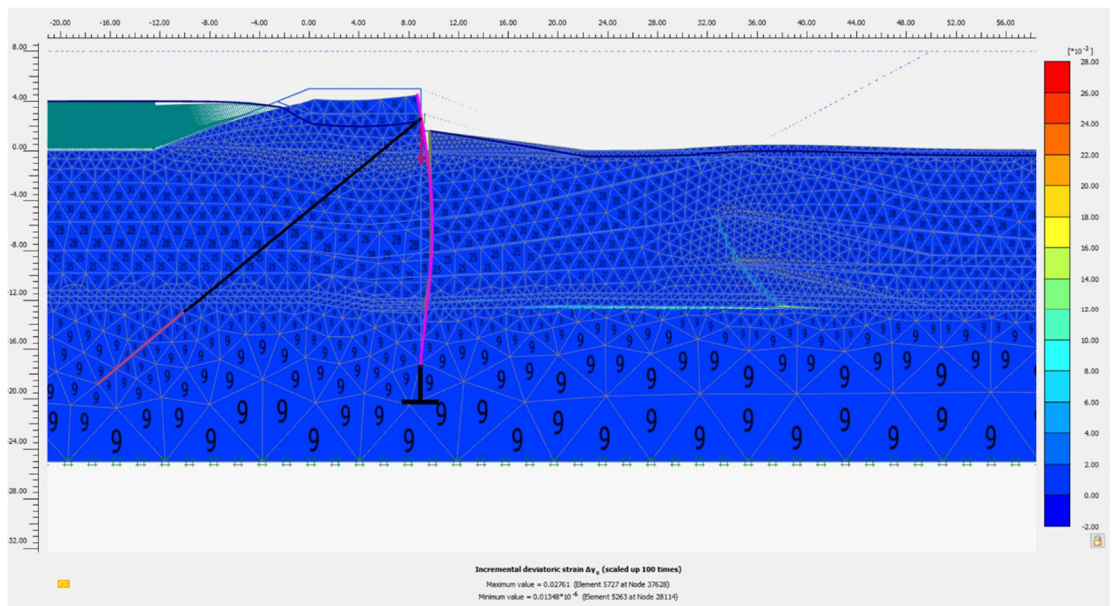
Uit het kracht-verplaatsing diagram in Figuur 3.4 wordt duidelijk dat de berekende elastische kritische kniklast lager is dan op voorhand zou worden verwacht. Dit heeft een duidelijke relatie met de afglijdende passieve wig over het diepe zand. Punt van discussie is hoe realistisch het berekende glijvlak is. De discussie relateert aan de zeer lage spanningen boven in de zandlaag als gevolg van de grote stijghoogte in het diepe zand en de daardoor sterk gereduceerde sterkte en stijfheid (beiden zijn spanningsafhankelijk in het 'hardening soil' model).



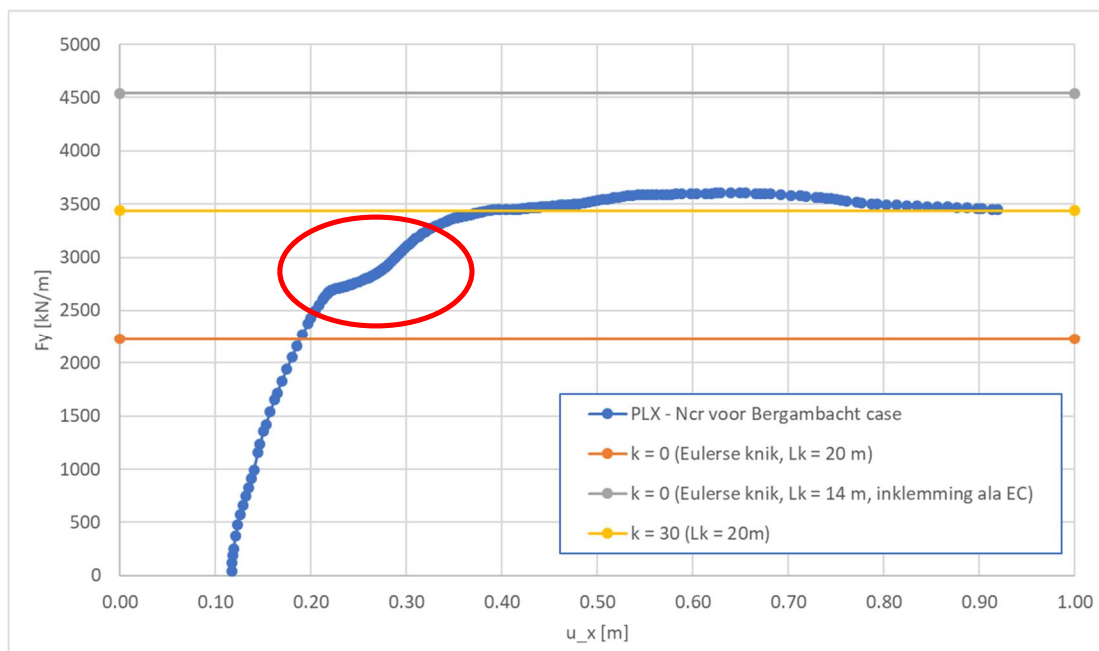
Figuur 3.1. 'Deformed mesh' bij het aanbrengen van 1m opgelegde verticale damwandverplaatsing ter plaatse van het ankerpunt.



Figuur 3.2. 'Plastic point plot' na het aanbrengen van 1m opgelegde verticale damwandverplaatsing ter plaatse van het ankerpunt.



Figuur 3.3. 'Incremental deviatoric strain plot' na het aanbrengen van 1m opgelegde verticale damwandverplaatsing ter plaatse van het ankerpunt.



Figuur 3.4. Reactiekracht (F_y) vs. horizontale uitwijking van de damwand (u_x). Als referentie zijn opgenomen de theoretische knikkraft voor deze situatie uitgaande van: (1) geen elastische bedding ($k = 0$) en een kniklengte van 20m; (2) een kniklengte van 14m ($=0.7 \cdot 20m$ uitgaande van een inklemming in het diepe zand); (3) de theoretische knikkraft voor de situatie met een elastische bedding van 30 kN/m³ en een kniklengte van 20m. In rood omcirkeld een punt waar de EEM berekening van oplossing/knikvorm lijkt te veranderen.

Opmerkingen bij Figuur 3.4

In Figuur 3.4 zijn als referentie een drietal theoretische knikkraften opgenomen. Uit deze vergelijking kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De met PLAXIS berekende knikkraft (ca. 3500 kN/m) is groter dan de theoretische knikkraft voor een kniklengte van 20 m (ca. 2200 kN/m), zoals verwacht.
- Opvallend is dat de berekende knikkraft met het PLAXIS model (ca. 3500 kN/m) lager uitvalt dan de theoretische knikkraft welke wordt berekend conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3. (ca. 4500 kN), uitgaande van een inklemming aan de teen van de damwand en daarmee een gereduceerde kniklengte van $0.7 \cdot 20 \text{ m} = 14 \text{ m}$. Vermoedelijke verklaring: in eerste instantie volgt de berekening ook de "lijn" van de ingeklemde ligger, de passieve wig in het zand wordt dan echter zo slap dat daarna de "lijn" van de tweezijdig opgelegde scharnierende ligger (met bedding 30 kN/m³) wordt gevolgd voor de uiteindelijke knikkraft.
- De met PLAXIS berekende knikkraft (ca. 3500 kN/m) komt grofweg overeen met de theoretische kniklast van een ligger met een kniklengte van 20 m met een elastische bedding over de volle lengte van 30 kN/m³. Deze bedding komt overeen met een spanning van ca. 30 kN/m² bij een horizontale verplaatsing van 1m, hetgeen inderdaad wordt gevonden in de slappe lagen in het PLAXIS model bij deze uitbuiging.

Conclusies bij aanpak 1

De aanpak om N_{cr} te bepalen met PLAXIS is werkbaar gebleken voor de Bergambacht case. Kleine aanpassingen aan de geometrie waren daarbij echter nodig om de berekening voldoende ver door te kunnen zetten en de theoretische kniklast te kunnen bepalen. Voorgaande suggereert dat deze aanpak in de praktijk mogelijk niet geheel eenduidig is.

Verder wordt opgemerkt dat de berekende N_{cr} relatief laag is voor deze case en daarmee nog geen verdere optimalisatie geeft t.o.v. de aanpak conform NEN-EN1993-5. De lage N_{cr} hangt hier samen met het afschuiven van de passieve wig over de diepe zandlaag.

In generieke zin wordt ook geconcludeerd dat het aantonen van een hogere N_{cr} met PLAXIS ten opzichte van de NEN-EN1993-5 aanpak waarschijnlijk minder evident is dan verwacht. Dit hangt samen met de voorgestelde aanpak waarbij grote verplaatsingen worden opgelegd: in deze theoretische situatie zal de grondstijfheid (de bedding) steeds slapper worden waardoor de dempende invloed afneemt en de knikkraft relatief laag is. Beter lijkt het om de invloed van de initieel hogere grondstijfheid te kwantificeren met behulp van een 'updated mesh' berekening, zoals bij aanpak 2 in de volgende paragraaf.

3.3 Verkenning alternatieve aanpak 2

Aanpak 2 betreft een geoptimaliseerde berekening in de lijn van NEN-EN1993-5 art.5.2.3, waarbij de tweede-orde-effecten direct worden bepaald in het geometrisch niet-lineaire EEM model. Om gevoel voor het verschil te krijgen zijn voor de case Bergambacht enkele berekeningen gemaakt met én zonder 'updated mesh'. De resultaten zijn gepresenteerd in Tabel 3.1.

Geconcludeerd wordt dat de invloed op de buigende momenten voor de case AZ28-700 oploopt tot -1% voor het veldmoment (558/563) en tot +5% voor het inklemmingsmoment (-257/-244). Voor de case AZ24-700 is de invloed +1% voor het veldmoment en +8% voor het inklemmingsmoment. De maximale horizontale vervormingen nemen in alle gevallen iets af bij gebruik van 'updated mesh'. Als variant is voor de case AZ28-700 ook nog een keer de optie 'ignore undrained behavior' aangezet in de fase 5, het veldmoment blijft vrijwel gelijk (573/571), het inklemmingsmoment neemt toe met 9% (-262/-240).

Case (*)	EI [kNm ² /m]	geen UM – fase 5				wel UM – fase 5			
		M_veld [kNm/m]	M_inkl [kNm/m]	ux_max [m]	F_an [kNm/m]	M_veld [kNm/m]	M_inkl [kNm/m]	ux_max [m]	F_an [kNm/m]
AZ38-700	138000	613	-207	0.110		618	-220	0.109	
AZ28-700	90160	563	-244	0.151	1160	558	-257	0.144	1145
AZ28-700 Ign undr AAN		571	-240	0.145	1076	573	-262	0.141	1069
AZ24-700	76940	535	-252	0.166		541	-272	0.161	

Tabel 3.1 Resultaten van gevoeligheidsanalyse met en zonder UM voor case Bergambacht

(*) in alle gevallen met 2,4mm corrosie en 20% openingspercentage, arc-length ON in fase 5
 Noot: updated pore pressures niet geactiveerd, reset displacements in fase 4a MHW, ignore undrained behavior staat standaard UIT in fase 5

Bovenstaande resultaten zijn daarmee in lijn met de knikberekening gemaakt in voorgaande paragraaf, zie Figuur 3.4. Bij een reactiekracht c.q. normaalkracht (F_y) van ca. 400 a 500 kN/m is te zien dat de bijkomende horizontale uitwijking gering is. Hier wordt de invloed van de grond zichtbaar. De grond gedraagt zich in eerste instantie stijf onder de belasting (kleine tweede-orde-effecten) en pas bij doorgaande belasting neemt de stijfheid (sterk) af waarmee ook de tweede-orde-effecten sterk toenemen.

Principiële vragen bij de toepasbaarheid van deze aanpak zijn:

1. Hoe kunnen initiële excentriciteiten (o.a. wals -en installatie toleranties) worden meegenomen in de PLAXIS berekening?

2. Wat is de invloed van de horizontale vervormingen (t.g.v. grond- en waterdrukken) in de PLAXIS berekening op de tweede-orde-effecten (kunnen de tweede-orde-effecten worden onderschat indien de berekende horizontale uitwijking te klein is)?
3. Wat is de afhankelijkheid van de (numerieke) reken instellingen zoals *tolerated error* en *stapgrootte* op de berekende tweede-orde-effecten?

Op deze principiële vragen wordt hierna ingegaan.

Ad 1). Initiële excentriciteit van de wand

Met initiële excentriciteit wordt bedoeld de maat- en/of plaats-afwijking die initieel voor kan komen in de constructie. Daarnaast kunnen bijkomende (horizontale) wandvervormingen worden onderscheiden als gevolg van grond- en waterdrukken.

Beseft dient te worden dat deze initiële excentriciteiten niet standaard worden meegenomen in een PLAXIS berekening maar in werkelijkheid wel een (vergroten) invloed hebben op de tweede-orde-effecten. De initiële excentriciteiten zijn in de NEN-EN1993-5 aanpak verwerkt in de 'imperfectie factor' en de 'buckling curve'. Hierbij geeft NEN-EN199305 b.v. aan:

NOTE: Buckling curve *d* also covers driving imperfections up to 0,5% of ℓ which is considered to be good practice.

Het lijkt niet voor de hand te liggen om dergelijke initiële excentriciteiten direct mee te nemen in een PLAXIS model:

- Aanbrengen in de geometrie is in principe mogelijk maar roept vragen op over hoe dit exact te doen en het maakt het opbouwen en doorrekenen van het EEM model complexer.
- Forceren van een excentriciteit door middel van een extra kracht is mogelijk maar geeft onrealistische krachten in de constructie en beïnvloedt de grond-constructie-interactie.

Gegeven bovenstaande wordt voorgesteld om de invloed van deze initiële excentriciteiten als een bijkomend moment $M_{exc} = N_{Ed} * 0.5\% * \text{kniklengte}$ op te tellen bij de rekenwaarde van het buigend moment uit PLAXIS. Dit voorstel is pragmatisch in de zin dat:

- De gekozen geometrische initiële excentriciteit van 0,5% van de kniklengte is niet per se een bovengrens is van de werkelijke afwijking. Maar anderzijds is in de 'buckling curve' van de NEN-EN1993-5 geen rekening gehouden met de dempende invloed van de inbedding in grond.
- Het voorstel doet recht aan het idee dat er een effect is van initiële excentriciteiten en dat deze afhankelijk is van de drukkracht in de wand en de kniklengte.

Voorgaande pragmatische aanpak wordt hier acceptabel geacht voor relatief kleine verhoudingen van N_{Ed}/N_{cr} . Voor deze relatief kleine verhoudingen van N_{Ed}/N_{cr} (voorstel is kleiner/gelijk aan 0.2) kan namelijk aannemelijk worden gemaakt dat het bijkomend moment t.g.v. initiële excentriciteiten een lineaire superpositie is voor het beschouwde type wandconstructies. Voor grotere verhoudingen van N_{Ed}/N_{cr} gaat dit echter niet meer op en kunnen de wandmomenten sterk (niet-lineair) toenemen als gevolg van de initiële excentriciteiten.

Ad 2). Benodigde horizontale uitwijking (t.g.v. grond- en waterdrukken) om tot juiste inschatting tweede-orde-effecten te komen

In een PLAXIS 'updated mesh' berekening van een wandconstructie dient door grond- en waterdrukken al enige horizontale uitwijking van de wand op te treden om verdere tweede-orde-effecten te kunnen laten ontstaan. In het geval er door grond- en waterdrukken geen of te weinig horizontale uitwijking optreedt kan de theoretische kniklast "oneindig" groot worden (labiel evenwicht) en zullen er in PLAXIS geen verdere tweede-orde-effecten worden berekend.

Aan de hand van gevoeligheidsanalyses op een theoretische case met een buiglijger en een elastische bedding volgt dat voor situaties waar de buiglijger relatief stijf is t.o.v. de (elastische)

bedding slechts een minimale horizontale uitwijking benodigd is (orde mm's) om de juiste kniklast te vinden. Voorgaande suggereert dat tweede-orde-effecten in dit geval ook op de juiste wijze worden meegenomen in de berekening. In de situatie dat de buiglijger relatief slap is t.o.v. de (elastische) bedding zijn grotere horizontale uitwijkingen benodigd om de juiste kniklast te vinden, echter in praktische zin nog steeds kleine waarden (o.b.v. de gevoeligheidsanalyse volgt orde 0.2% van de kniklengte).

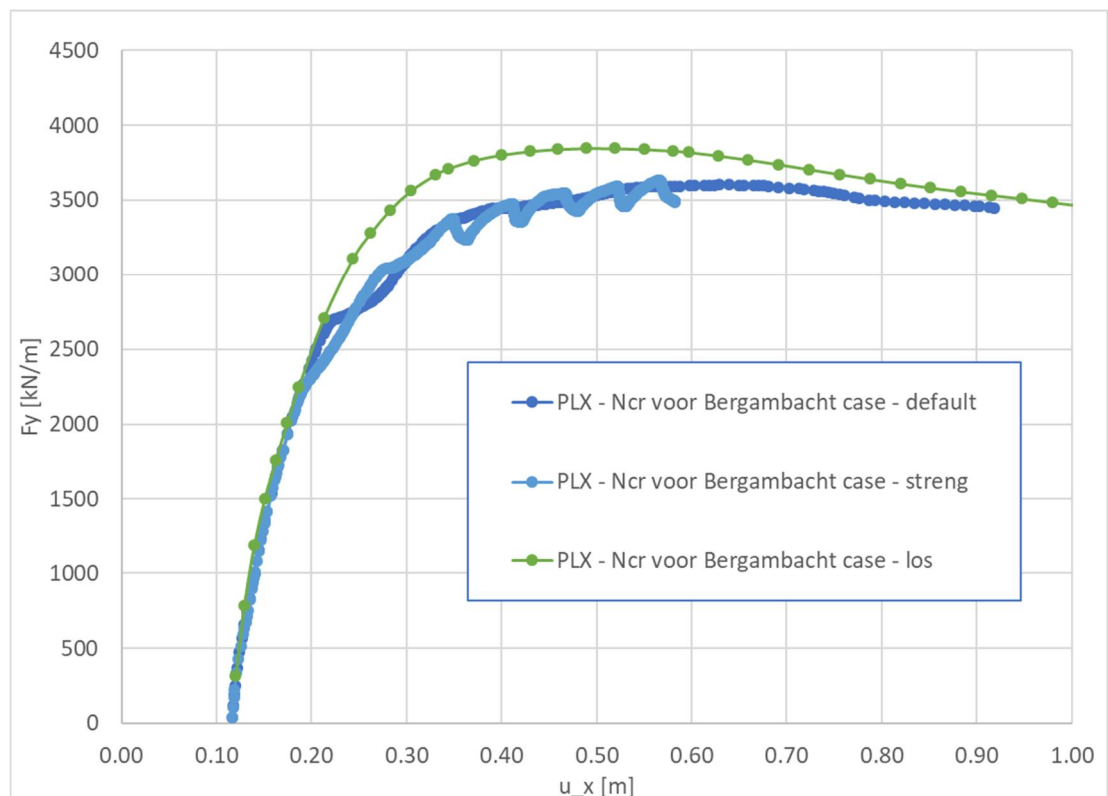
Naar aanleiding van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses wordt verwacht dat in praktijksituaties altijd voldoende horizontale uitwijking wordt berekend om tot een juiste inschatting van de tweede-orde-effecten te komen. In geval van twijfel kan een analyse van de theoretische knikkraft worden uitgevoerd zoals beschreven in § 3.2 om te zien of bij de gegeven geometrie en berekende horizontale uitwijking een realistische schatting voor de theoretische kniklast wordt verkregen.

Ad 3). Impact numerieke instellingen

Om gevoel te krijgen voor het effect van de numerieke instellingen zijn enkele variaties gemaakt, zie Figuur 3.5:

- Default: 'tolerated error' 1%, max. load fraction per step 0.1 [-].
- Streng: 'tolerated error' 0.5%, max. load fraction per step 0.05 [-].
- Los: 'tolerated error' 5%, max. load fraction per step 0.5 [-].

Geconcludeerd wordt dat de numerieke instellingen een rol gaan spelen zodra de ontwerpwaarde voor de normaalkraft N_{Ed} dicht bij de voor knik kritieke waarde N_{cr} komt. Bij voldoende lage verhoudingen van N_{Ed}/N_{cr} lijkt het effect niet significant. Hier wordt voorgesteld als praktische grens voor het mogen toepassen van een tweede-orde-berekening een waarde van N_{Ed}/N_{cr} kleiner/gelijk aan 0.2 te hanteren.



Figuur 3.5 Impact van de numerieke instellingen op de resultaten

3.4 Uitwerking voor case Bergambacht

Aanpak 2 wordt toegepast op de case Bergambacht met daarbij de volgende uitgangspunten:

- Spanningstoets uitvoeren conform art.5.2.3. sub (4), echter niet toepassen “buckling coefficient” χ bij bepalen spanningen normaalkracht en niet toepassen factor 1,15 op spanningen buigend moment. Overeenkomstig de PPL uitgaan van het elastisch weerstandsmoment i.p.v. het plastisch weerstandsmoment, inclusief reductiefactor 0.9 voor discontinue wanden. Bepalen van $N_{Ed,UM}$ en $M_{Ed,UM}$ aan de hand van een PLAXIS berekening met ‘updated mesh’ (UM). Voor de case Bergambacht leidt dit tot (vrijwel) dezelfde waarde als zonder UM. Wel toepassen factor γ_{M1} . Zie ook Figuur 3.6.
- Vergroten van de berekende $M_{Ed,UM}$ door optellen van een apart berekend moment t.g.v. initiële excentriciteiten gelijk aan $N_{Ed,UM} * 0.5\% * \text{kniklengte}$. In dit geval voor een AZ28-700: $473 \text{ kN/m} * 0.005 * 20\text{m} = 47 \text{ kNm/m}$.
- Methode toepasbaar voor $N_{Ed}/N_{Cr} \leq 0.2$. In dit geval volgt $473 \text{ kN/m} / 3500 \text{ kN/m} = 0.14$ (voor een AZ28-700, N_{Cr} conform PLX berekening zie paragraaf 3.2). Akkoord.

In Figuur 3.6 is in tabelvorm de spanningscontrole opgenomen voor case Bergambacht. De linkerkolommen bevatten de controle voor een AZ38-700 plank, zoals initieel gekozen in het rekenvoorbeeld in PPE v1.1. Indien geen knikcontrole wordt uitgevoerd is de UC (‘unity check’) waarde op de spanningen gelijk aan 0.82. Bij een knikcontrole conform de NEN-EN1993-5 is de UC waarde 1.09 (profiel voldoet niet). Bij toepassing van de hier voorgestelde aanpak 2 is de UC waarde 0.95 (profiel voldoet wel). In de rechterkolommen wordt het resultaat gegeven voor een AZ28-700 plank. In dat geval wordt een UC waarde van 1.01 gevonden indien niet knik wordt gecontroleerd (AZ28-700 voldoet nog net) en een waarde van 1.17 bij toepassing van aanpak 2. Bij een knikcontrole volgens aanpak 2 voldoet een AZ28-700 plank dus niet. Een tussenliggend profiel zal mogelijk nog wel net voldoen.

AZ38-700			AZ28-700			
	Wel [cm3/m]	A [mm2/m]		Wel [cm3/m]	A [mm2/m]	
ongecorr	3795	229.7		ongecorr	2760	200.2
gecorr	3292	194.7		gecorr	2394	169.7
%	0.87	0.85		%	0.87	0.85
initial exc	0.10 m	(0.5% * kniklengte van 20m)				
ksi	0.50	(reductiefactor voor knikvorm in EC berekening)				
gamma_M1	1.10	(veiligheidsfactor voor stabiliteit in EC)				
M_{Ed}	876.4 kNm/m	(conform rekenb PPE v1.1, uitgaande van AZ38-700)				
N_{Ed}	467.6 kN/m	(conform rekenb PPE v1.1, uitgaande van AZ38-700)				
$M_{Ed,UM}$	788.2 kNm/m	(conform herberekening met UM, uitgaande van AZ28-700)				
M_{exc}	47.3 kNm/m	(tgv initiële excentriciteiten)				
$N_{Ed,UM}$	473.2 kN/m	(conform herberekening met UM, uitgaande van AZ28-700)				
knik meegenomen?	Nee	EC	Aanpak 2	knik meegenomen?	Nee	Aanpak 2
sigma M	295801	374189	342950 kN/m2	sigma M	365794	426530 kN/m2
sigma N	24016	52731	26418 kN/m2	sigma N	27885	30674 kN/m2
sum	319818	426919	369368 kN/m2	sum	393680	457204 kN/m2
max sigma	390000	390000	390000 kN/m2	max sigma	390000	390000 kN/m2
UC	0.82	1.09	0.95 [-]	UC	1.01	1.17 [-]
Alle units in kN en m						
Let op: inclusief factor 0.9 op de Wel						

Figuur 3.6 Spanningscontrole voor case Bergambacht

3.5 Conclusies

Aanpak 2 blijkt ten opzichte van aanpak 1 eenduidiger en beter werkbaar voor praktijktoepassing. Om aanpak 2 met voldoende vertrouwen te kunnen toepassen zijn tevens enkele pragmatische randvoorwaarden vastgelegd.

Voor de case Bergambacht is aan de hand van een rekenvoorbeeld toegelicht wat de winst van aanpak 2 is. De knikcontrole volgens aanpak 2 blijkt ten opzichte van controle volgens de NEN-EN1993-5 minder conservatief, waardoor een lichtere plank kan worden toegepast.

4 Resumé en aanbevelingen

4.1 Resumé

Wat duidelijk wordt uit de aanpak van de NEN-EN1993-5 is dat het bij een knikberekening niet zozeer gaat om (het voorkomen van) het daadwerkelijk uitknikken van de damwand als wel om het kwantificeren van de tweede-orde-effecten in de krachtswerking van de constructie. Dit betekent daarmee ook automatisch dat de knikberekening in principe altijd maatgevend zal zijn boven de “eerste-orde” spanningsberekening, omdat het gaat om de kwantificering van de extra spanningen bovenop de eerste-orde-berekening.

Voor het bepalen van de tweede-orde-effecten is de interactie met (de dempende invloed van) de omringende grond van belang. De dempende invloed van de grond is afhankelijk van o.a. de mate waarin de grondsterkte reeds is gemobiliseerd. Deze interactie kan goed worden berekend met een PLAXIS ‘updated mesh’ berekening.

In deze rapportage is een pragmatisch voorstel gedaan voor een alternatieve knikcontrole, die toepasbaar binnen het PPL en PPE raamwerk en die tot een minder conservatieve controle leidt.

- Er wordt gestart met de aanpak conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3. waarbij getoetst wordt op de conditie $N_{Ed}/N_{cr} \leq 0.04$. Hierbij dient N_{cr} te worden bepaald conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3. Of als alternatief mag N_{cr} met PLAXIS worden bepaald, conform de aanwijzingen in deze rapportage, indien dit tot een gunstigere waarde leidt.
- Indien niet wordt voldaan aan de 4% conditie mogen tweede-orde-effecten worden gekwantificeerd met een PLAXIS berekening met ‘updated mesh’ in plaats van met de “simplified buckling check” uit de NEN-EN1993-5. Daarbij worden de volgende eisen/randvoorwaarden gesteld:
 - Methode alleen toepasbaar voor een klasse 1, 2 of 3 damwand sectie. *Eis conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3.*
 - Er moet in de tweede-orde spanningsberekening gebruik worden gemaakt van de partiele materiaal factor γ_{M1} . *Eis conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3.*
 - Er moet in de tweede-orde spanningsberekening gebruik worden gemaakt van het elastische weerstandsmoment (W_{el}) in plaats van de plastische capaciteit. Voor discontinue constructies dient een extra reductiefactor van 0.9 te worden toegepast. *Eis in lijn met het gestelde in de PPL.*
 - de verhouding N_{Ed}/N_{cr} dient kleiner/gelijk te zijn aan 0.2. Hierbij dient N_{cr} te worden bepaald conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3. Als alternatief mag N_{cr} met PLAXIS worden bepaald, conform de aanwijzingen in deze rapportage, indien dit tot een gunstigere waarde leidt. *Eis gesteld om te sterke niet-lineaire effecten te voorkomen welke optreden voor hogere N_{Ed}/N_{cr} verhoudingen.*
 - Er moet rekening worden gehouden met een bijkomend buigend moment t.g.v. initiële excentriciteiten van $N_{Ed} * 0.5\% * \text{kniklengte}$, uitgaande van gangbare maatafwijkingen behorend bij de normale praktijk. *Eis gesteld om recht te doen aan het bijkomende tweede-orde effecten t.g.v. initiële excentriciteiten welke niet in een standaard PLAXIS model zijn meegenomen.*

Mocht niet worden voldaan aan één of meerdere van deze randvoorwaarden dan dient men terug te vallen op de berekeningsmethodiek conform NEN-EN1993-5 art. 5.2.3.

4.2 Aanbevelingen

In deze rapportage is een pragmatisch voorstel gedaan voor een alternatieve knikcontrole c.q. tweede-orde berekening waarin de positieve invloed van de grondinbedding wordt meegenomen. Hiermee kan gedeeltelijk tegemoet worden gekomen aan het onderbuikgevoel dat de knikcontrole conform NEN-EN1993-5 te conservatief is voor stabiliteitsverhogende langsconstructies. Naar verwachting kan met verder onderzoek een nog verdergaande optimalisatie worden bereikt.

Het POVM eindrapport van de Eemdijkproef (POVM, 2018) suggereert ten slotte dat de in de PPL 2020 voorgeschreven spanningscontrole in de toekomst verder ook zou kunnen worden geoptimaliseerd door het gebruik van de plastische momentcapaciteit voor klasse 1 en 2 profielen en door het niet langer reduceren van de buigstijfheid van discontinue wanden die bestaan uit minimaal 3 dubbele planken. Het zal duidelijk zijn dat de mogelijke toekomstige introductie van deze optimalisaties binnen de spanningscontrole ook voordeel zal opleveren in combinatie met tweede-orde effecten.

Referenties

- Hartsuijker, C., & Welleman, H. (2016). *CONSTRUCTIEMECHANICA 3, CTB2210, MODULE : STABILITEIT VAN HET EVENWICHT, Deel 1: Theorie*. TU Delft.
- NEN. (2008). *NEN-EN 1993-5:2008: Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 5: Palen en damwanden*.
- NEN. (2012). *NEN-EN 1993-5:2008/NB:2012: Nationale bijlage bij Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 5: Palen en damwanden*.
- POVM. (2018). *Eemdijkproef, Eindrapport proefprogramma, versie 2*.
- POVM. (2019a). *POVM Publicatie - Stabiliteitsverhogende Langsconstructies, conceptversie 1.1, oktober 2019*.
- POVM. (2019b). *POVM Publicatie - EEM toepassing binnen het ontwerp, conceptversie 1.1, juli 2019*.

A Verificatie knik in PLAXIS

A.1 Inleiding

Uit de hierna gegeven verificatie blijkt dat PLAXIS met hulp van een geometrisch niet-lineaire berekening ('updated mesh') goed in staat is om de theoretische kniklast van een buigligger te bepalen, met en zonder invloed van een beddingsstijfheid.

A.2 Rekenvoorbeeld Eulerse knik - geen bedding

De volgende uitgangspunten worden gehanteerd:

- Damwandprofiel AZ26-700, gemodelleerd als een elastisch plaalement in PLAXIS.
- Lengte 10 m.
- Tweezijdig scharnierend opgelegd, onderste knoop heeft een translatie fixatie in x en y richting, bovenste knoop een translatie fixatie in x richting.
- Berekening is verplaatsingsgestuurd, opgelegde verticale verplaatsing is $u_y = -0.1$ m op bovenste knoop van het plaat element. Het programma geeft als output de benodigde kracht F_y om de opgelegde verplaatsing te realiseren.
- Stijfheid (E) van het materiaal is $2.1E8$ kN/m².
- PLAXIS 2D v2019.00.
- 15 knoops elementen.
- Optie "updated mesh" geactiveerd.

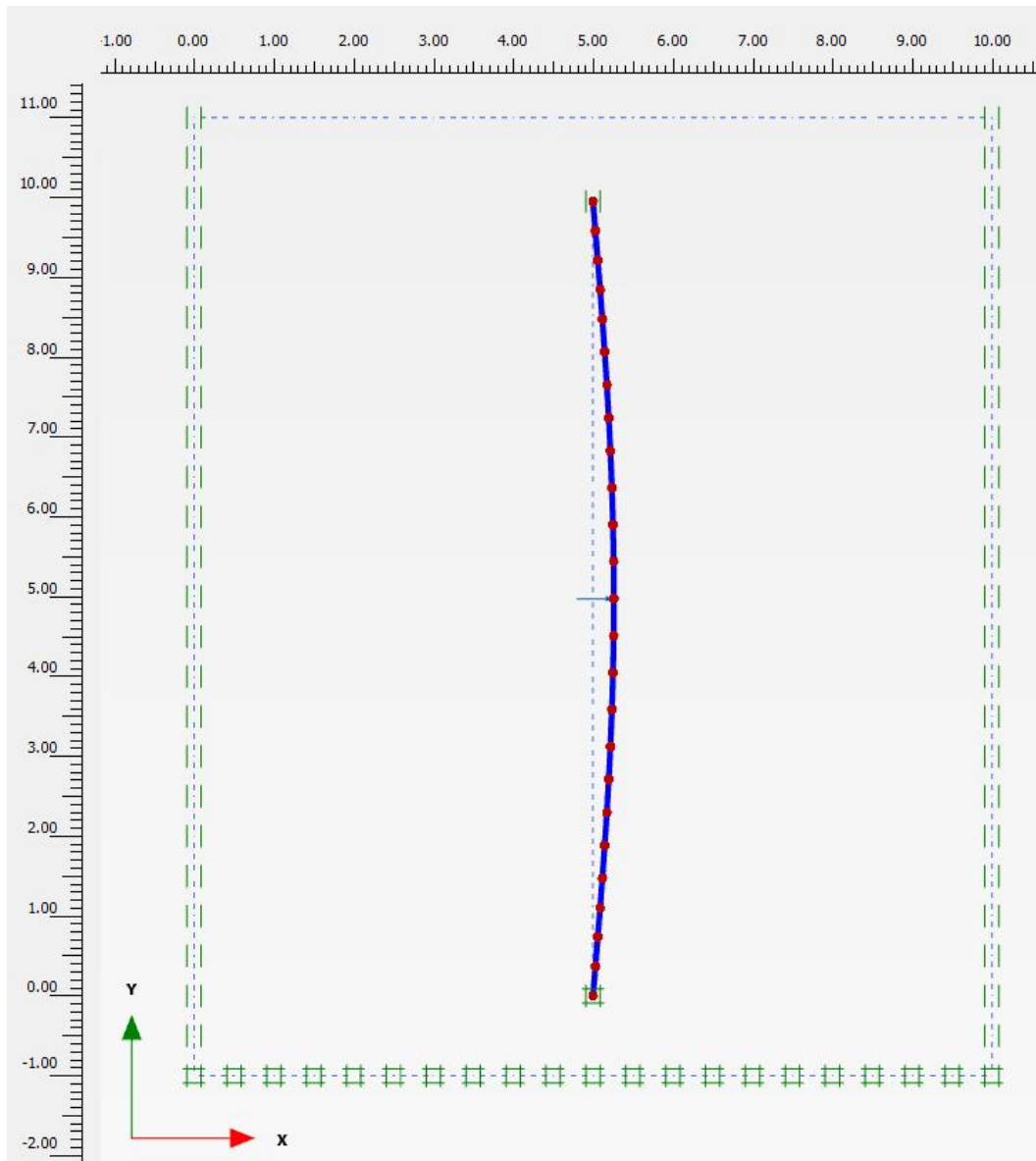
In de PLAXIS berekening worden de volgende stijfheden gehanteerd voor het plaalement.

Profiel	EA [kN/m]	EI [kNm ² /m]
AZ26-700	3.93E6	1.25E5

Het gewicht van de damwandplank (w) is niet relevant voor deze theoretische benadering en is op nul gesteld. De poisson ratio (ν) is voor dunwandige stalen constructies gelijk te stellen aan nul.

Om knik te kunnen initiëren dient een initiële zijdelingse uitwijking te worden gegenereerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van een horizontale puntlast in het midden van de buigligger. In de berekening is de waarde gevarieerd: 1 kN/m, 10 kN/m en 100 kN/m. Dit resulteert in een initiële horizontale uitwijking van ca. 0,16 mm, 1,6 mm en 16 mm.

In Figuur A.1 is het resulterende model getoond.



Figuur A.1 Modelopzet van de op druk belaste buigligger, 6 elementen over de hoogte, totaal 25 knopen (rode punten)

De theoretische Eulerse kniklast voor een tweezijdig scharnierend opgelegde buigligger is:

$$F_{Euler} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Waarin:

F_{Euler} = Eulerse kniklast [kN/m].

EI = buigstijfheid van de ligger [kNm²/m].

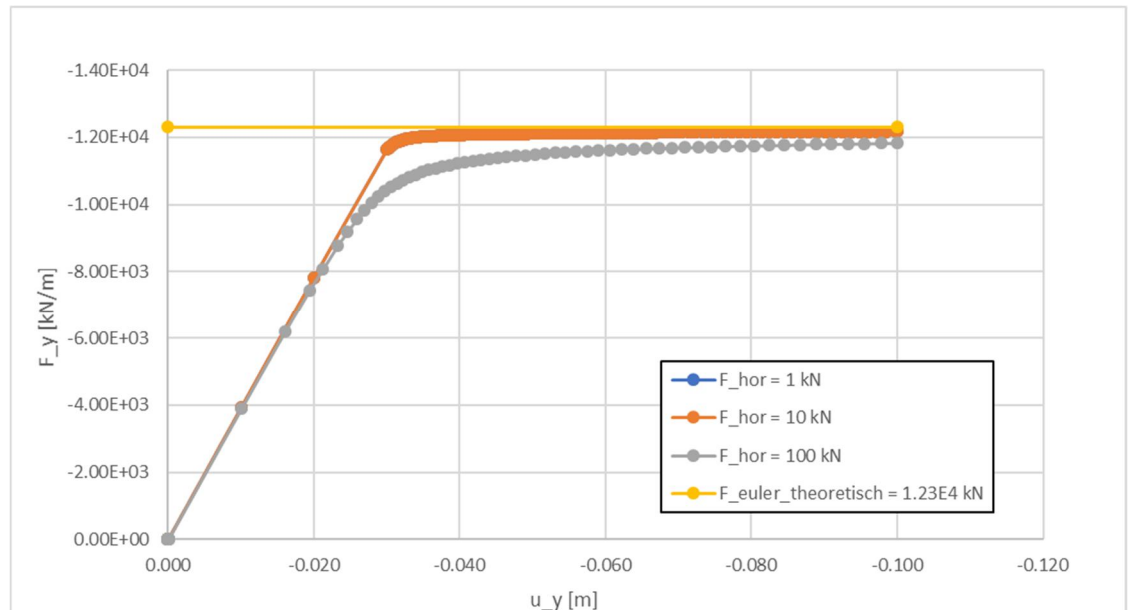
L = kniklengte van de ligger [m].

Voor de gestelde uitgangspunten volgt een theoretische kniklast van:

$$F_{Euler} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 \cdot 1.25E5}{10^2} = 12.3E3 \text{ kN/m}$$

Rekenresultaten Eulerse knik – geen bedding

De berekende verticale kracht F_y bij een verticale verplaatsing van -0.1 m van de bovenkant van de buigligger is gelijk aan $-12.17E3$ kN/m, $-12.17E3$ kN/m en $-11.83E3$ kN/m voor respectievelijk de situatie met een horizontale kracht van 1, 10 en 100 kN/m. De resulterende kracht-verplaatsings diagrammen zijn getoond in Figuur A.2 voor de bovenste knoop van het plaat element.



Figuur A.2 Berekende krachts-verplaatsingsdiagrammen voor de bovenste knoop van het plaat element, vergeleken met de theoretische eulerse knik kracht voor de gegeven situatie

Opgemerkt wordt dat voor een horizontale kracht van 1 en 10 kN/m dezelfde krachts-verplaatsings diagram wordt gevonden. Hier spelen de gehanteerde rekeninstellingen (o.a. de tolerated error, stap grootte, etc.) een rol. Bij aanscherping van de rekeninstellingen zullen wel (kleine) verschillen gaan optreden in de buurt van de theoretische kniklast. Het verschil tussen berekende en theoretische kniklast is ca. 1% voor deze twee situaties.

Voor grotere initiële horizontale uitwijkingen treden (in eerste instantie) grotere verschillen op tussen de berekende kniklast en de theoretische kniklast (hetgeen conform verwachting is). Bij voldoende grote vervormingen worden de verschillen echter kleiner. Opgemerkt wordt dat alleen voor deze theoretische elastische (oneindig sterke) situatie de constructie in staat is zoveel te vervormen dat uiteindelijk de theoretische kniklast wordt gevonden. In de praktijk komen elastische (oneindig sterke) constructies echter niet voor en zal de kniksterkte van een constructie (sterk) worden beïnvloed door de initiële afwijkingen. Hoe groter de initiële afwijkingen hoe lager de (knik)sterkte. Dit komt voort uit het feit dat de toenemende vervormingen, als gevolg van het knikken, zorgen voor een zeer snelle toename van de spanningen in de constructie welke de maximaal toelaatbare spanningen overschrijden waardoor de constructie bezwijkt.

Gevoeligheidsanalyse

Om verder gevoel te krijgen bij de invloed van enkele relevant geachte variabelen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de case met een horizontale kracht van 10 kN/m. Hierbij is gevarieerd over een voor de praktijk relevant geachte range. De resultaten zijn gepresenteerd in Tabel A.1.

Case	F_euler [kN/m]	Fy @ -0.1 m [kN/m]	Vershil [%]
EI en EA gedeeld door 4	3084	3019	2
EI en EA maal 4	49348	48790	1
Meshfijnheid / 2 (4 elementen over plaat lengte)	12300	12170	1
Meshfijnheid * 2 (10 elementen over plaat lengte)	12300	12170	1
Tolerated error / 5 = 0.002	12300	12170	1
Tolerated error * 5 = 0.05	12300	12170	1

Tabel A.1: Resultaten van gevoeligheidsanalyse voor case met $F_{hor} = 10 \text{ kN/m}$

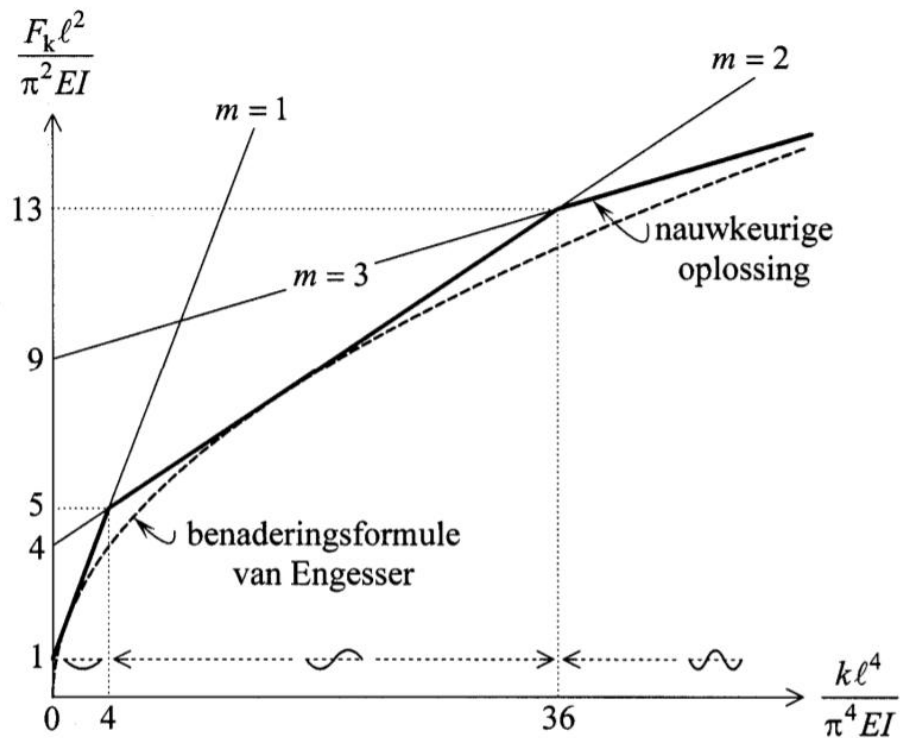
Geconcludeerd wordt dat de verschillen beperkt blijven tot slechts enkele procenten.

A.3 Rekenvoorbeeld knik met bedding

Zie het TU Delft dictaat Constructiemechanica 3 – Deel 1 Theorie van Hartsuijker en Welleman (Hartsuijker & Welleman, 2016):

http://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT2031/collegestof/stabiliteit/files/2016_deel1_Theorie.pdf.

In paragraaf 7.3 wordt de theorie van de elastisch ondersteunde knikstaaf besproken. De afgeleide theorie wordt uiteindelijk samengevat in Figuur A.3. Deze figuur toont de theoretische oplossing (“nauwkeurige oplossing”) en het resultaat van een benaderingsformule (“benaderingsformule van Engesser”). Op de y-as is een maat gegeven voor de verhouding van de knikkracht van de elastisch ondersteunde buigligger t.o.v. de Eulerse knikkracht van de buigligger zonder ondersteuning. Op de x-as is een maat aangegeven voor de verhouding van de beddingsstijfheid tov de stijfheid van de buigligger. Dit kan als volgt worden ingezien: hoe groter de bedding (k) hoe groter de benodigde knikkracht tov de Eulerse knikkracht. Hoe slapper de stijfheid van de buigligger (door grotere kniklengte en/of lagere buigstijfheid EI), hoe groter de benodigde knikkracht tov de Eulerse knikkracht.



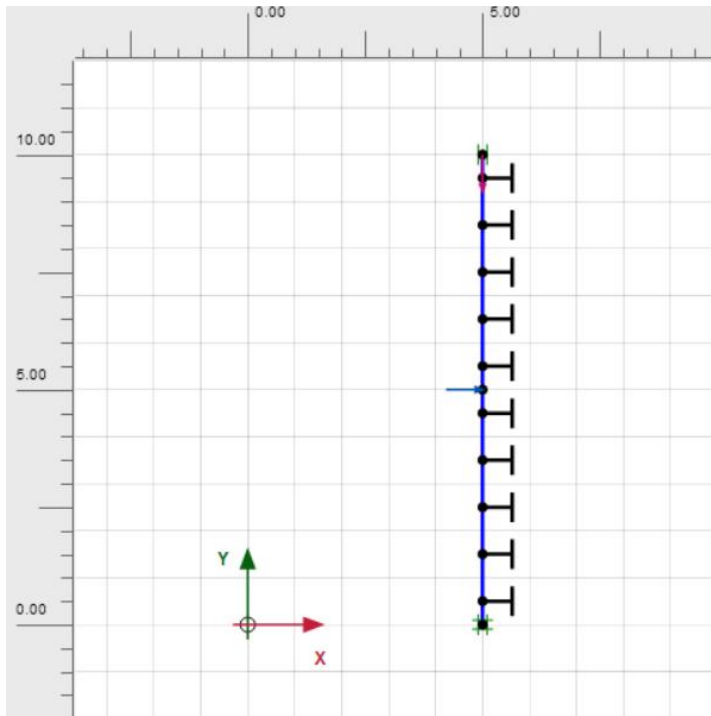
Figuur A.3 Relatie tussen twee dimensieloze grootheden, op de x-as een maat voor de onderlinge stijfheidsverhouding van de bedding (k) en de buigligger (l en EI), op de y-as een maat voor de knikkracht van de ligger met bedding (F_k) t.o.v. de ligger zonder bedding (Eulerse knikkracht). Overgenomen uit: (Hartsuijker & Welleman, 2016)

Aan de hand van het rekenvoorbeeld zoals eerder gegeven in deze rapportage wordt aannemelijk gemaakt dat PLAXIS in staat is de knikkracht van een elastisch ondersteunde buigligger te berekenen.

Hiertoe worden de volgende aanpassingen gemaakt. Langs de buigligger wordt om de meter een elastische veer aangebracht (een fixed end anchor). Zie ook Figuur A.4. De gehanteerde inputwaarden zijn getoond in Voor wat betreft de beddingwaarde (k) deze is gelijk aan de rekstijfheid van het anker (EA) in kN gedeeld door de lengte van het anker (default 1m), per m^1 wand, per m^1 modellengte haaks op het vlak, oftewel $kN/m/m/m$.

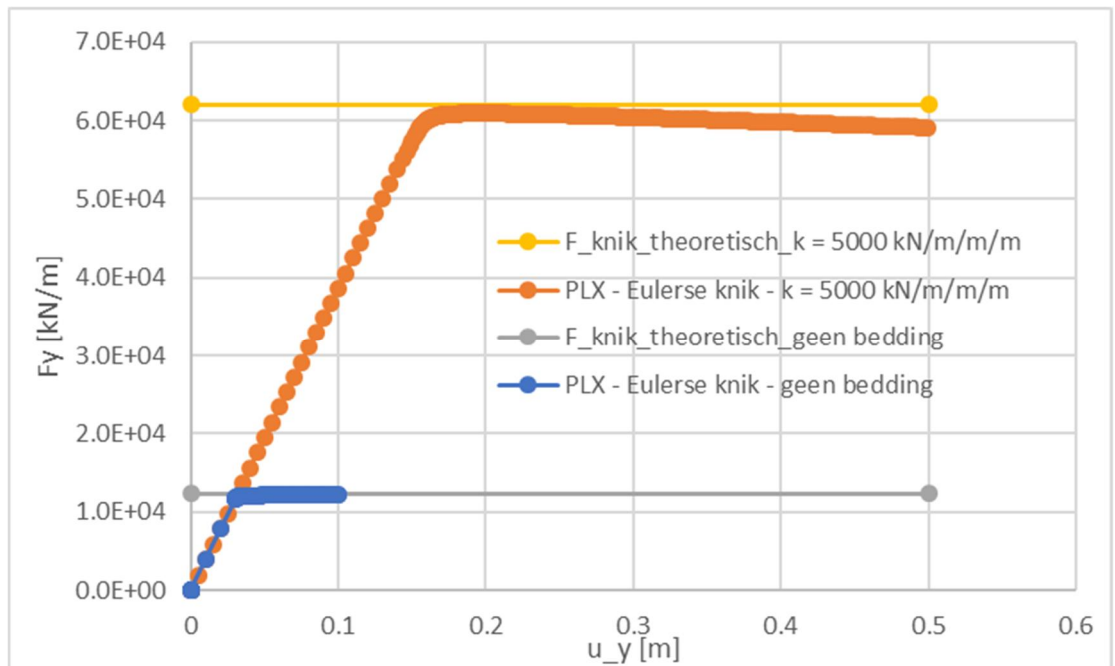
k	L	EI	F_{euler}	x-as	F_{k_theor}	y-as_theor	F_{k_Eng}	y-as_Eng
[kN/m/m/m]	[m]	[kNm ² /m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[-]
5000	10	125000	12337	4.1	62013	5.0	50000	4.1

Tabel A.2 Gehanteerde input voor verend ondersteunde buigligger



Figuur A.4 Opzet PLAXIS model verende ondersteunde buigligger

De berekeningsresultaten zijn getoond in onderstaand figuur. Geconcludeerd wordt dat de PLAXIS oplossing ($F_k_{PLX} = 60900 \text{ kN/m}$) goed aansluit bij de theoretische oplossing zoals gegeven in Figuur A.5 ($F_k_{theor} = 62013 \text{ kN/m}$).



Figuur A.5 Resultaten PLAXIS berekening voor case zonder en met bedding in relatie tot theoretische oplossingen