

MASTER

De sterkte en stabiliteit van Layher-Allround systeemsteigers : een numerieke analyse

Brouwer, Paul

Award date:
2001

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

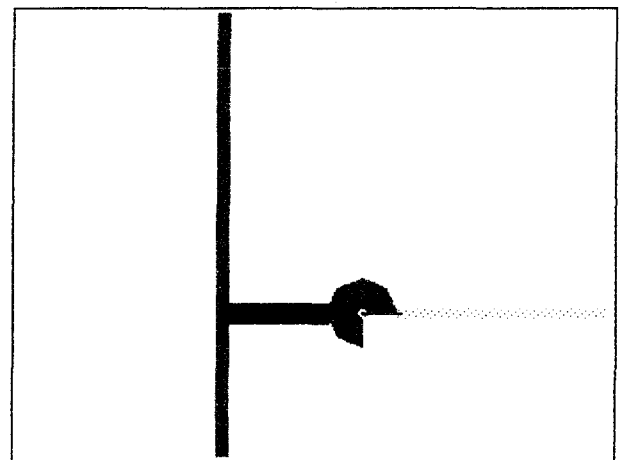
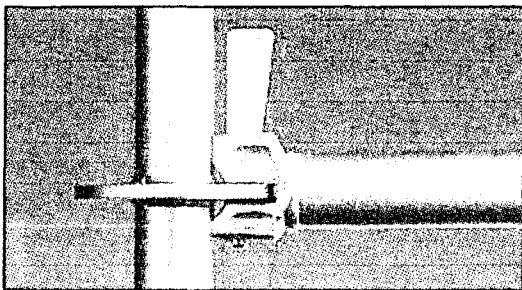
General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

De sterkte en stabiliteit van Layher-Allround systeemsteigers

een numerieke analyse



Paul Brouwer

De sterkte en stabiliteit van Layher-Allround systeemsteigers

een numerieke analyse

Afstudeercommissie:

Voorzitter: Prof.ir. H.H.Snijder
mw. Dr. ir. M.C.M. Bakker
Dr. ir. J.C.D. Hoenderkamp

Afstudeerverslag:

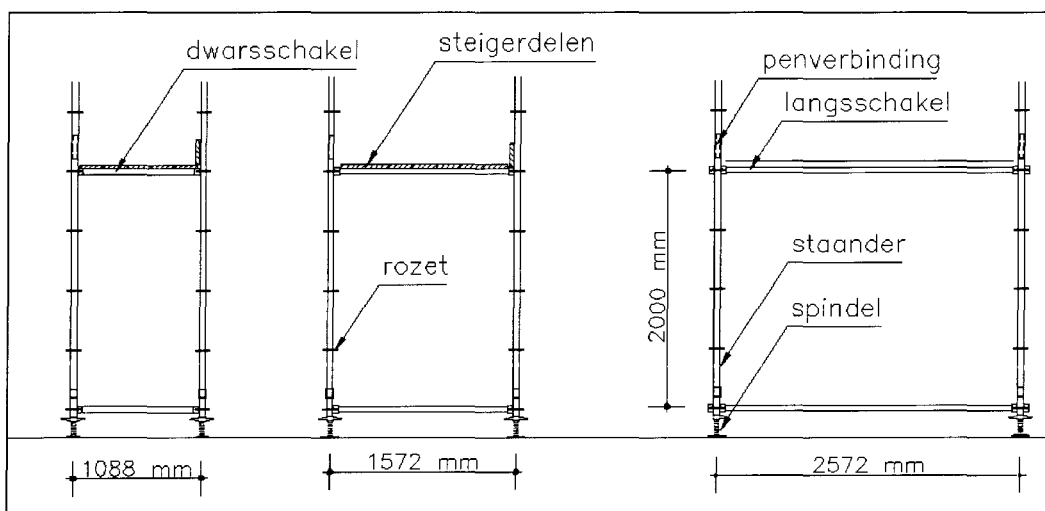
Student: Paul Brouwer
Id. nr: 437972

Technische Universiteit Eindhoven
Capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen

Samenvatting

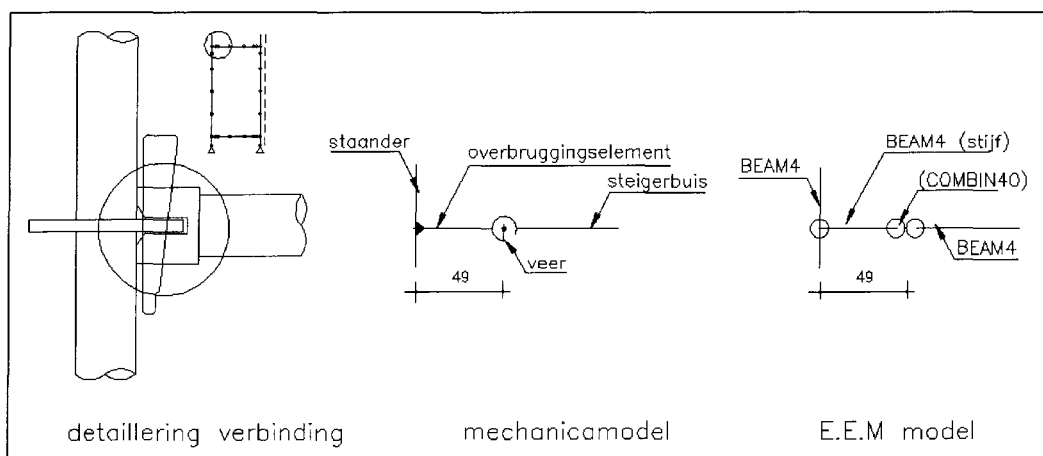
De Layher-Allround steiger is de meest toegepaste systeemsteiger in Nederland. In dit onderzoek wordt de steiger in de toepassing van onderhoudssteiger onderzocht. Dit is gedaan door een *rekenmethodiek* te ontwikkelen, waarmee bij 8 steigerconfiguraties de maatgevende bouwhoogte is bepaald. Er is uitgegaan van steigers met diepten van 1088 mm en 1572 mm, alsmede een (constante) hart op hart afstand van de staanders van 2572 mm. In afbeelding 1 zijn deze dimensies geïllustreerd.

Bij het model is uitgegaan van een steiger met een breedte van acht vakken, waarbij het eerste en het laatste vak worden geschoord. Bij de configuraties is eveneens de invloed van het bekleden van de steiger geanalyseerd.



Afbeelding 1: Dimensies steigerconfiguraties

De karakteristieke eigenschappen van de steigerconfiguraties zijn vertaald in driedimensionale eindige elementen modellen. Als voorbeeld is in afbeelding 2 een verbindingaansluiting geïllustreerd. Hierbij is uitgegaan van het moment-rotatiediagram volgens de documentatie van Layher.



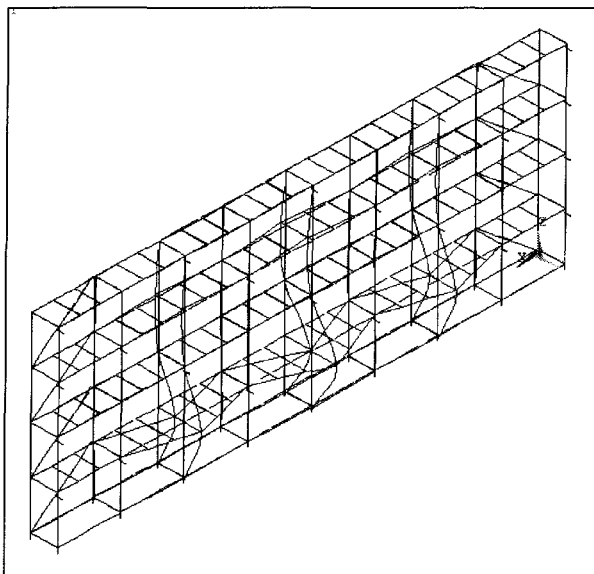
Afbeelding 2: Detaillering spieaansluiting

De rekenprocedure gaat uit van de *classificatie* van de steigerconstructie in star of flexibel geschoord. Bij alle configuraties bleek de steiger weg te knikken ter plaatste van de onverankerde werkvloer (zie afbeelding 3). De configuraties zijn dus te classificeren als flexibel geschoord. De hieruit volgende *imperfecties* (scheefstand) zijn op het steigermodel geplaatst.

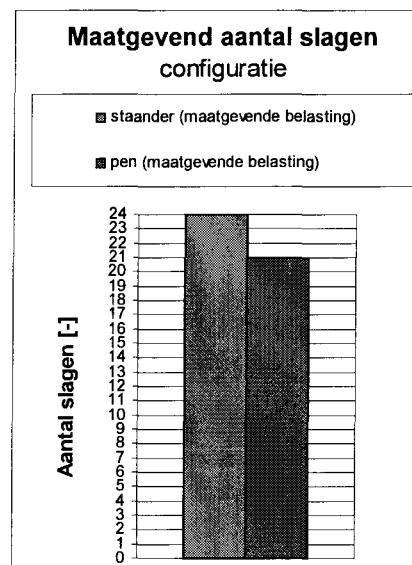
Bij het berekenen van de steigerconstructie is uitgegaan van een *tweede-orde-berekening*. Het materiaalgedrag van de buizen is aangenomen als lineair. Doordat voor verbindingkarakteristieken het multi-lineaire moment-rotatiediagram van Layher is gebruikt, wordt het karakter van de berekening (gedeeltelijk) fysisch niet-lineair. Bij het berekenen van de steiger wordt het benodigd aantal slagen gemodelleerd.

De maatgevende bouwhoogte wordt gevonden als één van de *bezwijkcriteria* overschreden wordt. De bezwijkcriteria zijn (o.a): de penverbinding tussen de staanders, de staander zelf, de verankering, en de begrenzing van het moment-rotatiediagram van de verbindingen. Bij onbeklede steigers blijkt de penverbinding tussen de staanders maatgevend te zijn.

Om toch de bouwhoogte te bepalen als de staander maatgevend is, wordt het pencriterium genegeerd. Uit de bouwhoogteberekeningen zijn grafieken ontwikkeld met de maatgevende bouwhoogte. Afbeelding 4 illustreert een dergelijke grafiek. De maatgevende bouwhoogte is hierbij geïllustreerd als het maximum aantal slagen.



Afbeelding 3: Knikpatroon



Afbeelding 4: Maatgevend aantal slagen

Bij beklede steigers bleek bij toepassing van een twee-slag-verankeringspatroon dat de verankeringen en de steiger bij een gering aantal slagen al bezweken. De steigers zijn beerekend met een één-slag-patroon (iedere knooppunt wordt hierbij verankerd). Doordat de verankeringen maatgevend blijven, is de bouwhoogte sterk afhankelijk van de geografische locatie (en dus het windgebied) waar de steiger gebouwd wordt.

Voorwoord

Voordat ik aan dit afstudeerproject begon, was ik reeds twee jaar werkzaam als steigerconstructeur. Hierdoor kon ik de beroepspraktijk combineren met de studie constructief ontwerpen.

Opvallend is de sterke dynamiek tussen praktijk en theorie in dit project. Uitgangspunten en resultaten moesten worden ontleend aan, en resultaten moesten worden vertaald naar de praktijk.

Het project werd vanuit de praktijk begeleid door Technisch Commercieel Adviesburo Vogels B.V. Dankbaar heb ik gebruik gemaakt van de jaren lange ervaring die binnen het adviesburo aanwezig is op het gebied van het construeren van steigers. Bij deze wil ik de dhr. F. Vogels (directeur) bedanken voor de afstudeeropdracht.

Voorts wil ik iedereen bedanken die zich gedurende het afstuderen hebben ingezet voor het welslagen van dit project.

Paul Brouwer

Inhoud

Samenvatting	2
Voorwoord	4
Hoofdstuk 1 Inleiding	7
1.1 <u>Probleemstelling</u>	7
1.2 <u>Doelstelling</u>	8
1.3 <u>Aanpak</u>	9
Hoofdstuk 2 Steigersystemen	10
2.1 <u>Opbouw van steigers en begrippen</u>	10
2.2 <u>Classificatie steigers</u>	12
2.2.1 <u>Classificatie naar toepasbaarheid</u>	13
2.2.2 <u>Classificatie naar belastingen</u>	16
2.2.3 <u>Classificatie naar systeem</u>	18
2.3 <u>Verankeren steigerconstructie</u>	21
Hoofdstuk 3: Layher-Allround steiger	24
3.1 <u>Montagebeschrijving</u>	24
3.2 <u>Vloeropbouw</u>	29
3.2.1 <u>Systeemvlonder</u>	29
3.2.2 <u>Vloer met systeemkortelingen</u>	30
3.2.3 <u>Vloer met kortelingen (traditioneel)</u>	30
3.2.4 <u>Gecombineerde vloeropbouw</u>	32
3.3 <u>Verbindingen</u>	33
3.3.1 <u>Schakel-staanderverbinding</u>	33
3.3.2 <u>Staander-staanderverbinding</u>	35
3.3.3 <u>Schoorconstructie</u>	36
3.3.4 <u>Verankering</u>	37
3.4 <u>Overzicht configuraties onderzoek</u>	38
Hoofdstuk 4: Rekenmodellen en toetsingscriteria	40
4.1 <u>Rekenmodellen</u>	40
4.2 <u>Toetsingscriteria</u>	42
Hoofdstuk 5: Modelling	48
5.1 <u>Modelling</u>	48
5.2 <u>Elementen en materiaaleigenschappen</u>	49
5.3 <u>Globaal model</u>	50
5.4 <u>Verbindingen</u>	55
5.4.2 <u>Modelling aansluiting schoor-rozet</u>	60
5.4.3 <u>Verankering</u>	62
Hoofdstuk 6: Richtlijnen en belastingen	65
6.1 <u>Inleiding</u>	65
6.2 <u>Belastingen en combinaties</u>	65
6.2.1 <u>Eigen gewicht constructie</u>	66
6.2.2 <u>Nuttige belasting (werkbelasting)</u>	67
6.2.3 <u>Windbelasting</u>	69
6.2.3.1 <u>Windbelasting volgens de NEN-EN 12811</u>	70
6.2.3.2 <u>Windbelasting volgens NEN 6702</u>	72
6.3 <u>Belastingcombinaties</u>	75
Hoofdstuk 7: Imperfecties	78
7.1 <u>Inleiding</u>	78
7.2.1 <u>Systemischeefstanden</u>	78

7.2.2	<u>Normen en richtlijnen m.b.t. systeemscheefstand</u>	81
7.2.3	<u>Conclusie systeemscheefstand</u>	82
7.3	<u>Rekenimperfecties (NEN 6771)</u>	83
7.3.1	<u>Star-geschoorde raamwerken</u>	83
7.3.2	<u>Ongeschoorde en flexibel-geschoorde raamwerken</u>	86
7.4	<u>Knikpatronen</u>	87
7.4.1	<u>Locale knik in het y-z vlak</u>	88
7.4.2	<u>Locale en globale knik in het x-z vlak</u>	91
7.5	<u>Combinatie aanwezige en rekenimperfecties</u>	93
7.5.1	<u>Star-geschoord</u>	93
7.5.2	<u>Flexibel geschoord</u>	95
Hoofdstuk 8: <u>Classificatie</u>		96
8.1	<u>Inleiding</u>	96
8.2	<u>Eigenwaarde-onderzoek configuratie 1</u>	98
8.2.1	<u>Nuttige belasting onderin</u>	98
8.2.2	<u>Nuttige belasting bovenin</u>	105
8.3	<u>Conclusie met betrekking tot classificatie</u>	108
8.4	<u>Scheefstand</u>	109
Hoofdstuk 9: <u>Berekeningsresultaten</u>		111
9.1	<u>Berekeningsprocedure</u>	111
9.2	<u>Resultaten configuratie 1</u>	116
9.2.1	<u>Combinatie "nuttige belasting onderin"</u>	116
9.2.1.1	<u>Invloed moment-rotatiekarakteristieken</u>	117
9.2.1.2	<u>Tussentijdse conclusies</u>	131
9.2.2	<u>Combinatie "nuttige belasting bovenin"</u>	132
9.2.3	<u>Eigen gewicht extreem</u>	134
9.2.4	<u>Windbelasting</u>	136
9.2.5	<u>Resultaten configuratie 1</u>	138
9.3	<u>Resultaten configuratie 2</u>	140
9.4	<u>Resultaten configuratie 3</u>	143
9.5	<u>Resultaten configuratie 4</u>	145
9.6	<u>Resultaten configuraties 5 t/m 8</u>	147
9.7	<u>Beklede steigers (één-slag-patroon)</u>	149
9.7.1	<u>Imperfectiepatroon bij beklede steigers</u>	149
9.7.2	<u>Berekeningen</u>	151
Hoofdstuk 10 <u>Conclusies en aanbevelingen</u>		153
10.1	<u>Inleiding</u>	153
10.2	<u>Conclusies</u>	153
10.2.1	<u>Bouwhoogten onbeklede steigerconfiguraties</u>	153
10.2.3	<u>Bouwhoogte beklede steigers</u>	156
10.3	<u>Aanbevelingen</u>	157
10.3.1	<u>Rekenmethodiek</u>	157
10.3.2	<u>Beklede steigers</u>	157
Literatuur en verantwoording		158
Bijlage 1: <u>Modellering van normaalkrachtsveer en rotatieveer door balkelementen</u>		159
Bijlage 2: <u>Voorbeeld uitwerking rekenprocedure</u>		165
Bijlage 3: <u>Bouwhoogtebepaling (met Lk = 2000 mm)</u>		176

Hoofdstuk 1 Inleiding

Steigers staan bekend om de hulpfunctie tijdens verschillende fasen in de bouw. In de op tijd gerichte maatschappij is er de tendens om door het verbeteren van de werkomstandigheden het verlet te beperken. Door de steiger winddicht te maken wordt er een binnenklimaat gecreëerd, waardoor er 's winters gewerkt kan worden. Voor het berekenen van onbeklede steigerconstructies zijn summiere richtlijnen aanwezig. Tegenwoordig dient er bij het bouwen van een steiger veelal een tekening en berekening aan een controlerende instantie te worden overlegd. Het betreft dan een steiger met een hoogte van tenminste 30 m of een bijzondere steigerconstructie (zoals winddichte steigers). In het afstudeeronderzoek staat het Layher-Allround steigersysteem centraal. Dit is de meest toegepaste systeemsteiger in Nederland.

1.1 Probleemstelling

De probleemstelling luidt:

- Op welke wijze kan een Layher-Allround steiger worden gemodelleerd en hoe kan een berekeningsmethodiek worden ontwikkeld?

En daaruit afgeleid:

- Hoe hoog mag er met een (beklede) Layher-Allround steiger gebouwd worden?

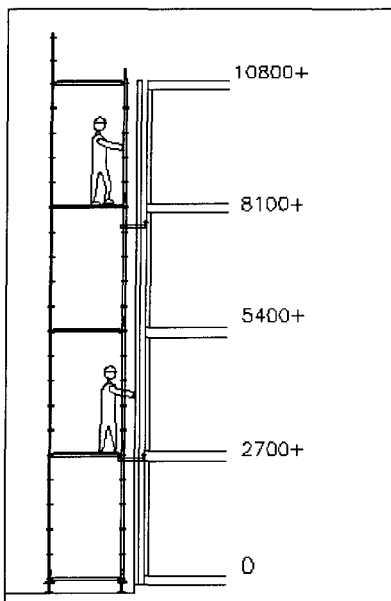
Door de vele varianten binnen de uitvoeringsmogelijkheden van het Layher-Allround steigersysteem in combinatie met uitvoeringstoepassingen wordt binnen de probleemstelling gekozen voor de Layher-Allround onderhoudssteiger. Met een dergelijke systeemsteiger wordt onderhoud aan gevels verricht. Op dit moment is er geen algemeen geaccepteerde rekenmethodiek voor steigers.

1.2 Doelstelling

Om de probleemstelling praktisch te verwezenlijken dient het onderzoek te resulteren in tabellen of grafieken waaruit de bouwhoogten van de onderzochte systemen volgen. Afbeelding 1.1 geeft een mogelijke uitvoering van een onderhoudssteiger. Samengevat komt de doelstelling op het volgende neer:

De doelstellingen luiden:

- De ontwikkeling van een rekenmethodiek om bouwhoogteberekeningen voor steigers te kunnen maken.
- Het verkrijgen van modellen van de Layher-Allround steiger.
- Het maken van grafieken met hierin het maximum aantal slagen waaruit een Layher-Allround steiger gebouwd kan worden.
- Het analyseren van de invloed van de bekleding op de bouwhoogte van de Layher-Allround steiger.



Afbeelding 1.1: Onderhoudssteiger

1.3 Aanpak

In dit onderzoek wordt de Layher-Allround steiger uitgaande van bestaande normen en richtlijnen gecontroleerd. De hoofdstukken 2 en 3 geven een algemene inleiding over steigers en systeembeschrijvingen van de Layher-Allround steiger, alsmede de uitgangspunten van het onderzoek. In hoofdstuk 4 worden rekenmodellen en de uitgangspunten en toetsingscriteria gepresenteerd. De berekening wordt geometrisch niet lineair en (gedeeltelijk) fysisch niet-lineair uitgevoerd.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 in gegaan op de drie-dimensionale modellering van de steigerconstructie en de modellering van karakteristieke onderdelen van de steiger. De belastingen die op het systeem komen, worden in hoofdstuk 6 bepaald.

In hoofdstuk 7 worden aanwezige en rekenimperfecties geanalyseerd. Aanwezige imperfecties (scheefstanden) worden aan de hand van speling tussen de systeemdelen beschouwd. Aan de hand van schetsmatige knikpatronen wordt geanalyseerd welke imperfectiepatronen toegepast dienen te worden.

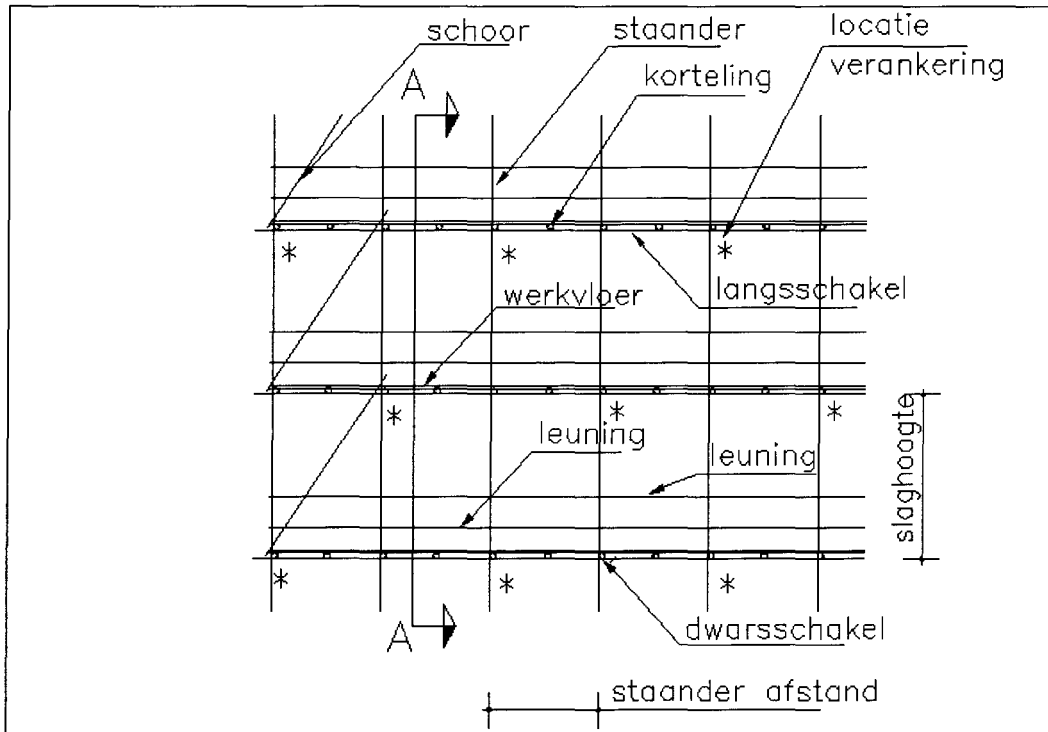
In hoofdstuk 8 worden aan de hand van eigenwaarde-berekeningen en knikpatronen de steigerconfiguraties geclassificeerd. De uiteindelijke bouwhoogtebepaling vindt plaats in hoofdstuk 9. Hierin worden van alle configuraties uitgaande van verschillende bezwijkcriteria de bouwhoogten bepaald. De conclusies uit het onderzoek worden gepresenteerd in hoofdstuk 10.

Hoofdstuk 2 Steigersystemen

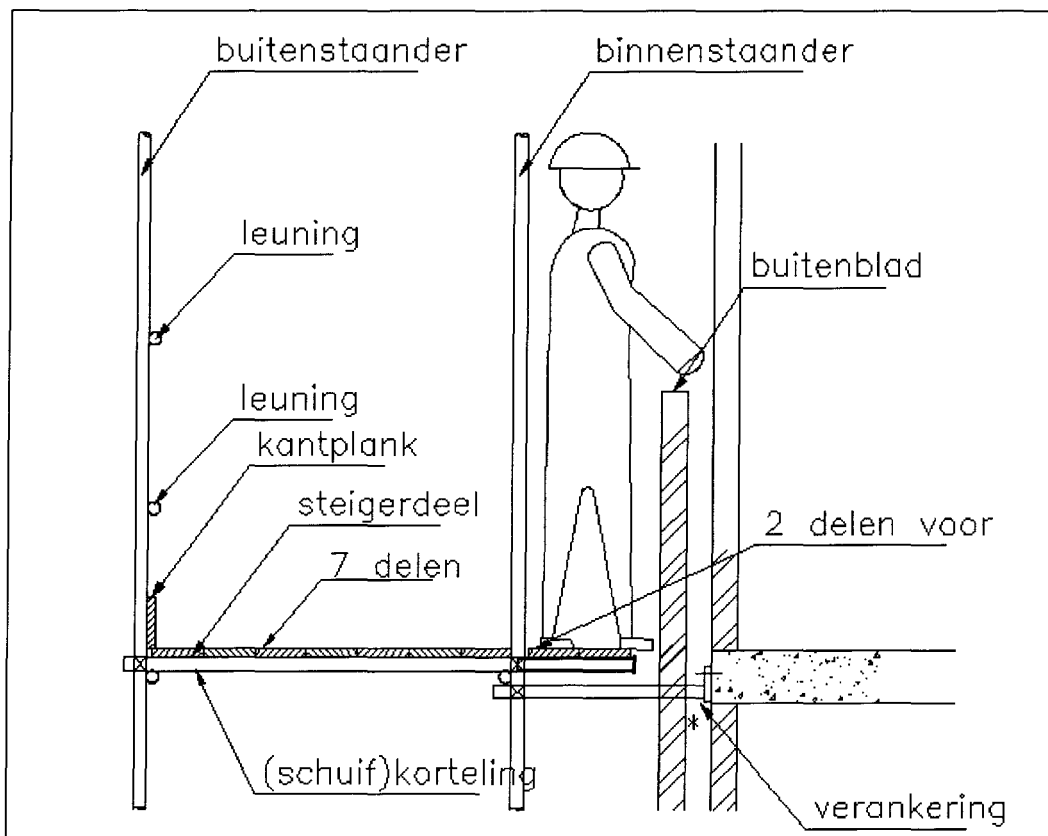
2.1 Opbouw van steigers en begrippen

Steigers worden geconstrueerd door het koppelen van buizen (of samengestelde buizen). Steigerbuis heeft een doorsnede van 48.3 mm en een dikte van 3.2 mm. Een steigerconstructie wordt geplaatst op steigerdelen (planken) of stelconplaten (betonplaten) naar gelang de draagkracht van de grond. De staanders worden geplaatst op een voetplaat of op een voetplaat en een spindel (stelmogelijkheden). De steiger wordt gebouwd door de staanders in langsrichting te verbinden door middel van liggers (langsschakels). De verbinding dwars vindt plaats door middel van dwarsschakels. Om de ca. 900 m wordt er op de langsschakel een extra schakel gelegd (korteling). De werkvloer wordt gemaakt door op de kortelingen en dwarsschakels steigerdelen (planken) te leggen. Afbeeldingen 2.1 a en b illustreren de begrippen, aan de hand van de opbouw van een traditionele steiger.

De afstand tussen de vloeren van de steiger (verticaal) wordt slaghoogte genoemd. Vroeger werd er veel gewerkt met slaghoogten van 2000 mm. Tegenwoordig wordt de slaghoogte aangepast aan de verdiepingshoogte van bijvoorbeeld 2700 mm. De hart op hart afstand van de staanders varieert naar toepassing en mogelijkheden van het steigersysteem. Deze varieert van 1800 mm tot 2500 mm. De steigerbreedte bepaalt de ruimte die de bouwvakker heeft. De werkruimte bestaat uit de opbouw tussen de binnen- en buitenstaander en een opbouw voor de binnenstaander. Als er planken ('steigerdelen') gebruikt worden bij een metselsteiger, dan is de breedte opgebouwd uit bijvoorbeeld 7 delen tussen de binnen- en buitenstaander en 2 delen voor de binnenstaander. De metselaar staat tijdens het metselen op de planken voor de binnenstaander (zie ook afbeelding 2.1 b), de stenen en de kuip staan tussen de binnenstaander en buitenstaander.



a:



b:

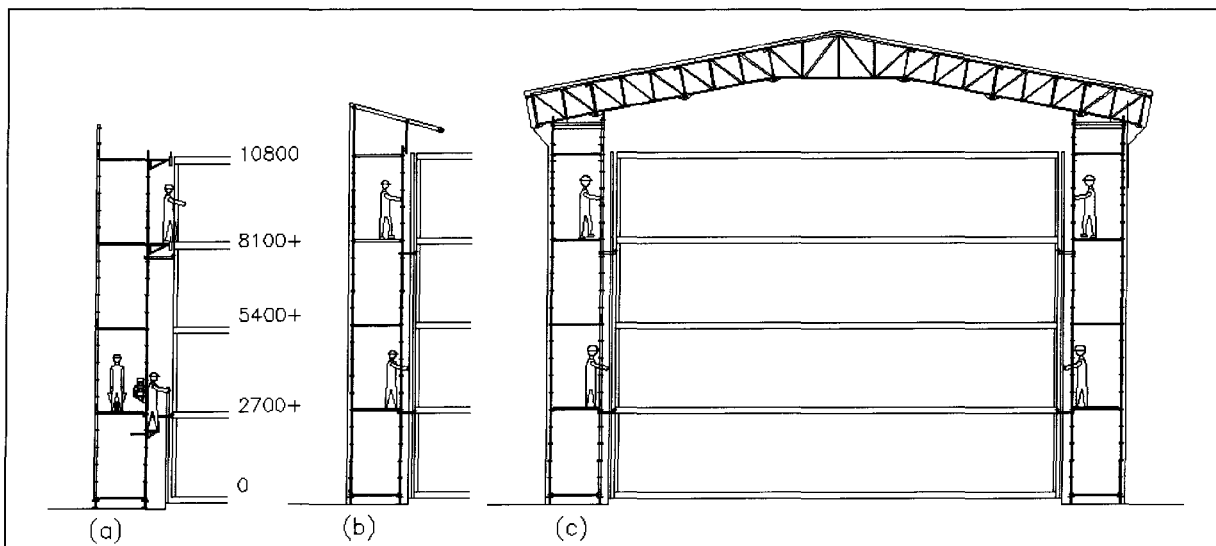
Afbeelding 2.1: Benamingen en overzicht steigerconstructie

2.2 Classificatie steigers

Steigers dienen er in hoofdzaak voor om het bouwproces te ondersteunen. Steigerconstructies kenmerken zich door het tijdelijke karakter, in combinatie met een snelle bouwtijd. Doordat een steigerconstructie onbekleed is, bepalen de weersomstandigheden het werkklimaat op de steiger (afbeelding 2.2 ((a)). Tegenwoordig is er de tendens om steigers te bekleden (afbeelding 2.2 (b)) of om volledig klimaatonafhankelijk te werken. Dit leidt tot beklede steigers die voorzien zijn van een overkapping. De functie van een steigerconstructie verschuift naar een tijdelijke werkplaats voor de gehele bouwplaats, waarbinnen een regelbaar klimaat mogelijk is (afbeelding 2.2(c)).

De classificatie kan worden bepaald door:

1. Toepasbaarheid van de steigerconstructie
2. Toelaatbare belasting op de steigerconstructie (toekennen belastingklasse)
3. Het toegepaste steigersysteem (traditioneel of systeem)



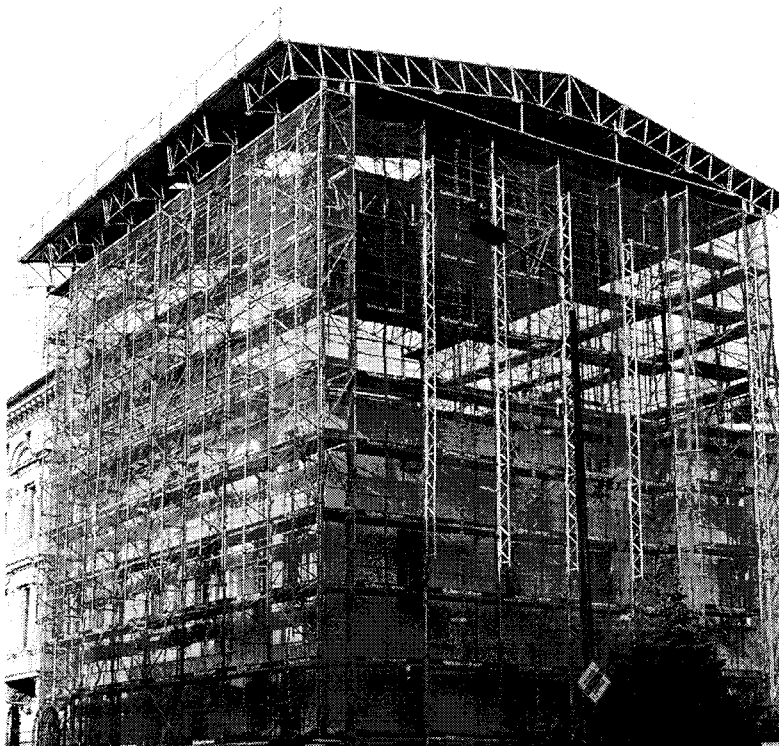
Afbeelding 2.2: Ontwikkeling steigers van onbekleed naar een beklede en overkapte constructie

2.2.1 Classificatie naar toepasbaarheid

- Gevelsteigers

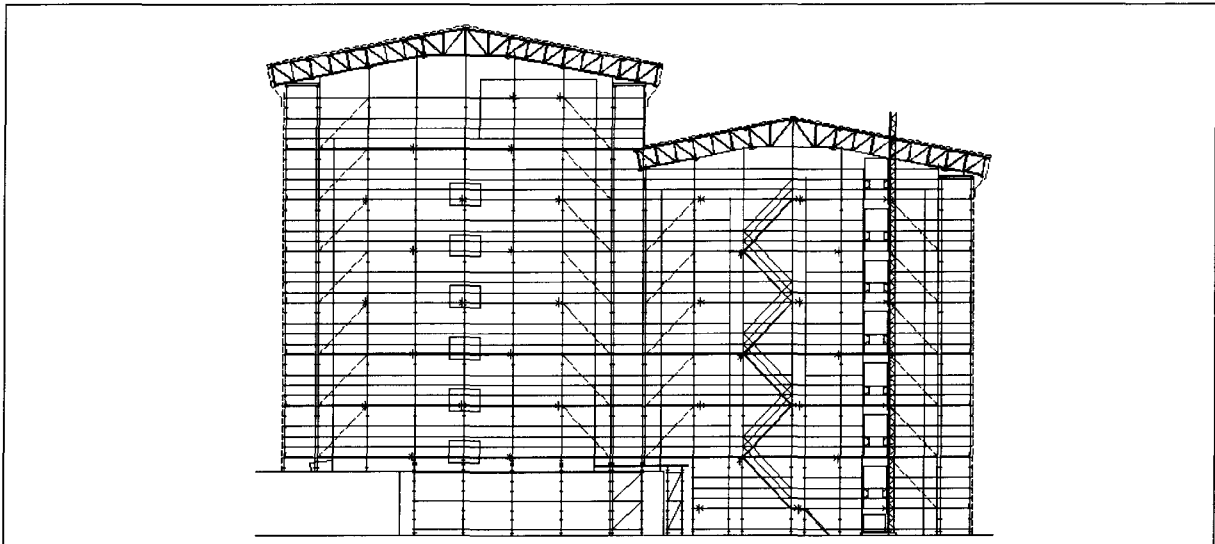
Gevelsteigers worden gebruikt voor verschillende werkzaamheden die aan de gevel plaatsvinden. Deze werkzaamheden zijn van uiteenlopende aard. Gevelsteigers zijn onder te verdelen in inspectiesteigers, onderhoudssteigers en metselsteigers. Steigers waarmee lichte montagewerkzaamheden kunnen worden verricht vallen onder de categorie onderhoudssteigers.

Door de schaarste aan arbeid en om het tijdverlies door vorstverlet te kunnen beperken, is er de tendens om de steiger te gebruiken om klimaatsonafhankelijk te kunnen bouwen. De steiger wordt bekleed met zeil (of plastic sealing) en wordt voorzien van een overkapping. Afbeelding 2.3 geeft een illustratie van een steiger ingepakt met winddoorlatend gaas. In dergelijke situaties wordt overigens steeds vaker het volledige bouwwerk overkapt en past men winddicht zeil toe (afbeelding 2.4).



Afbeelding 2.3: Steiger voorzien van winddoorlatend gaas

bron: Layher



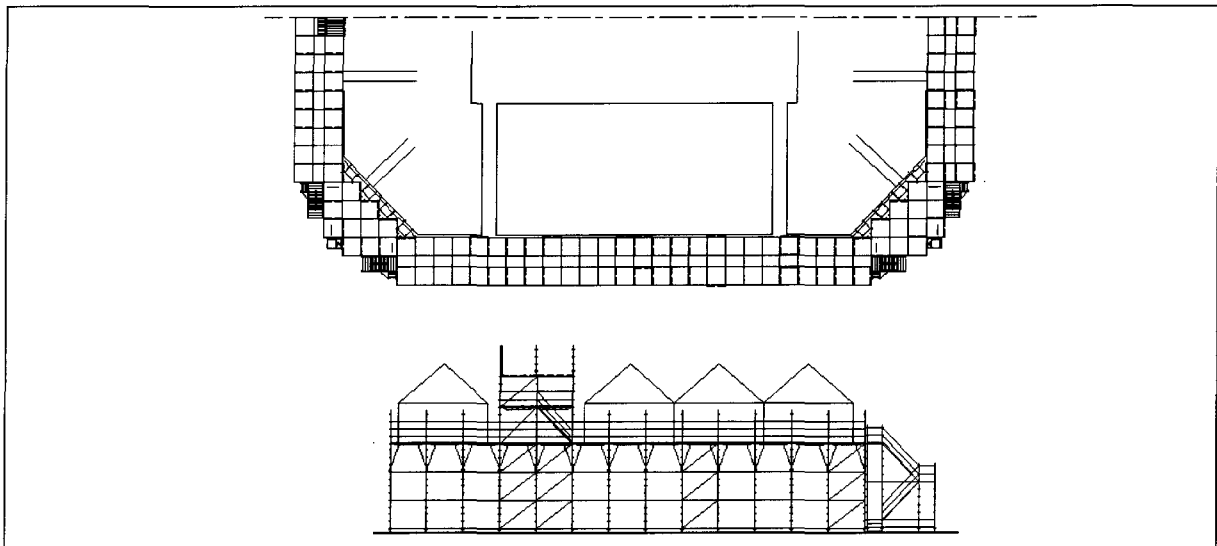
Afbeelding 2.4: Volledig overkapte constructie

- Ondersteuningssteigers

Ondersteuningssteigers worden toegepast als tijdelijke ondersteuning voor de bekisting. De steiger vormt een ondersteuningsframe voor de bekisting.

- Tijdelijke accommodaties

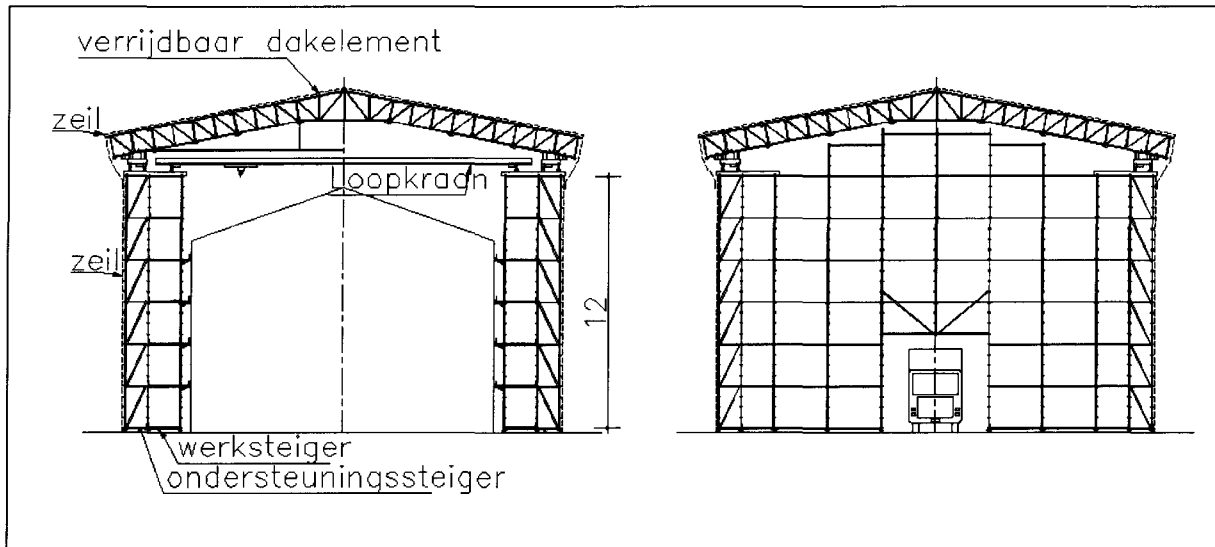
Steigerconstructies worden eveneens toegepast voor tijdelijke accommodaties. Bijvoorbeeld tijdens internationale tenniswedstrijden om de 'Heineken Trophy' te Rosmalen (afbeelding 2.5) wordt gebruik gemaakt van een steigerconstructie. Door het tijdelijke karakter van het evenement biedt een steigerconstructie voordelen.



Afbeelding 2.5: Tribuneconstructie t.b.v. 'Heineken trophy' te Rosmalen

- Doorwerkhal

De traditionele functie van de steiger als hulpconstructie voor de buitengevel verandert in de functie van werkplaats voor alle bouwwerkzaamheden. Bij het toepassen van een doorwerkhal wordt de steiger uitgevoerd als complete werkplaats met kraanbaan (afbeelding 2.6).



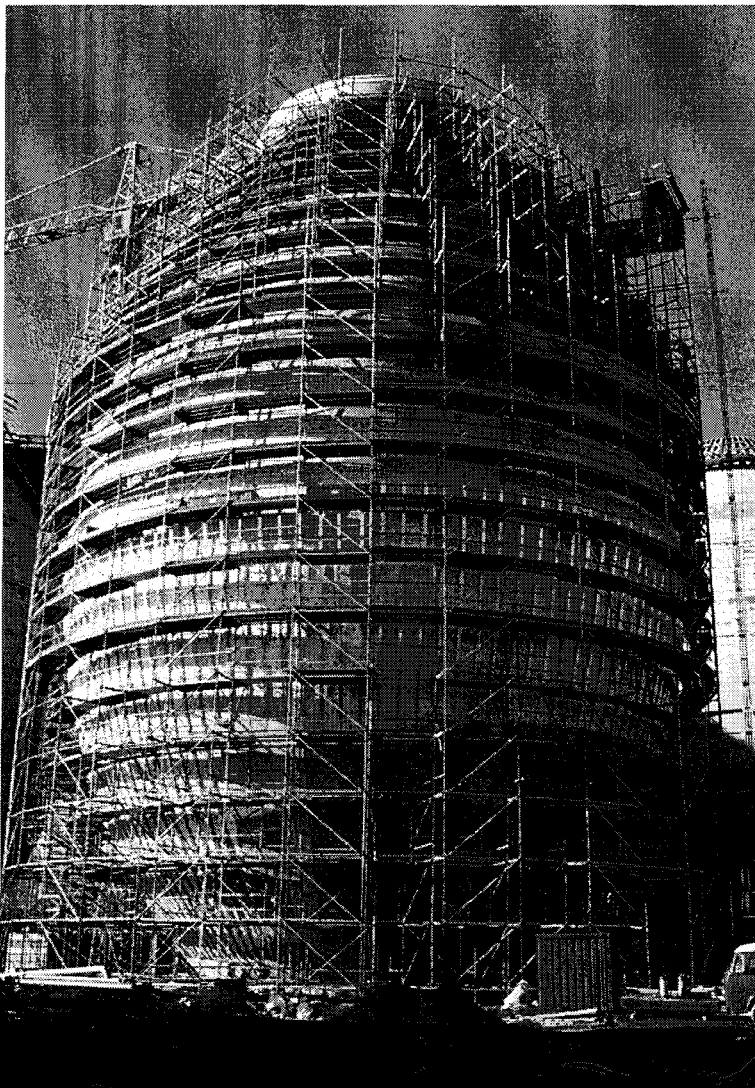
Afbeelding 2.6: Doorwerkhal

2.2.2 Classificatie naar belastingen

- Lichte gevelsteigers

Onder de categorie lichte gevelsteigers vallen steigers die gebruikt worden bij werkzaamheden aan de gevel waarbij de vloerbelasting (uit nuttige belasting) niet hoger is dan 1.5 kN/m^2 . Binnen deze categorie vallen onderhoudsteigers, inspectiesteigers en steigers ten behoeve van lichte montagewerkzaamheden (afbeelding 2.7).

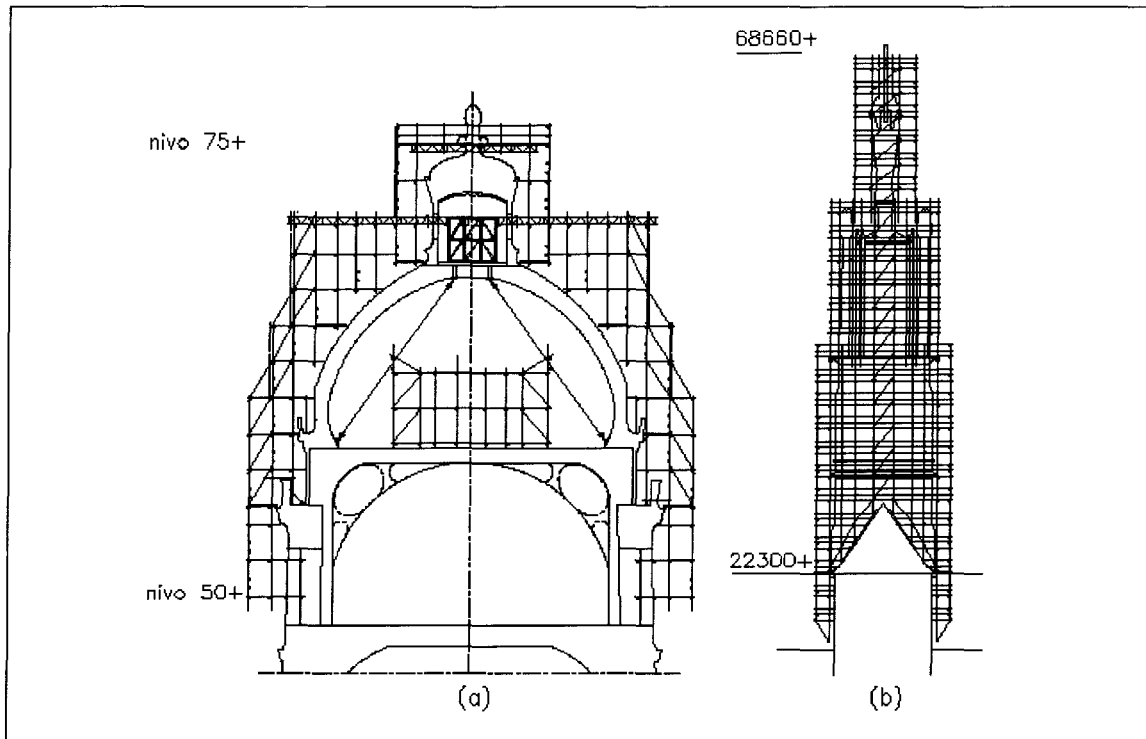
Onderhoudsteigers worden voornamelijk gebruikt voor voornamelijk restauratie- en renovatieprojecten (zie afbeelding 2.8 (b)). Inspectiesteigers (en onderhoudssteigers) dienen om de staat van de gevel te beoordelen. Bij deze steigers is het van belang dat de steigerconstructie makkelijk aanpasbaar is aan de bestaande gevel. Dergelijke steigers worden bijvoorbeeld toegepast om kerktorens te restaureren.



Afbeelding 2.7: Steiger t.b.v. montage gevelelementen bron: Layher

- Zware gevelsteigers

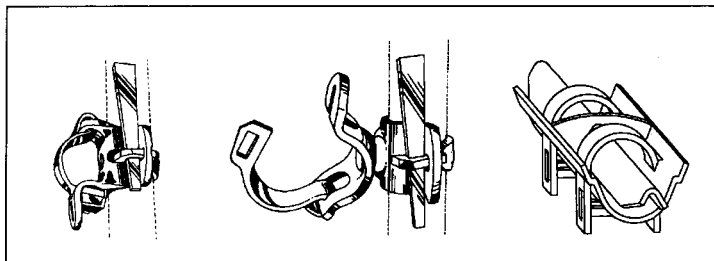
Zware steigers worden gekenmerkt door de relatief grote belastingen tijdens het gebruik (3 tot 6 kN/m² uit nuttige belasting) van de steiger. Metselsteigers worden ingezet bij het metselen van de buitengevel. Een zware steiger kan bijvoorbeeld gebruikt worden als opslagruimte voor stenen. Een voorbeeld van een zware onderhoudssteiger is de restauratiesteiger van het Paleis van Justitie te Brussel. De steiger werd gebruikt voor de restauratie van de koepel (zie afbeelding 2.8 (a)).



Afbeelding 2.8: Zware restauratie- en onderhoudssteiger

2.2.3 Classificatie naar systeem

Steigersystemen kunnen worden ingedeeld in traditionele en systeemsteigers. Bij traditionele steigers wordt er gebruik gemaakt van steigerbuis en verbindingselementen, bij systeemsteigers vindt er veelal prefabricage plaats.



Afbeelding 2.9: Koppelingen

- **traditionele steigers**

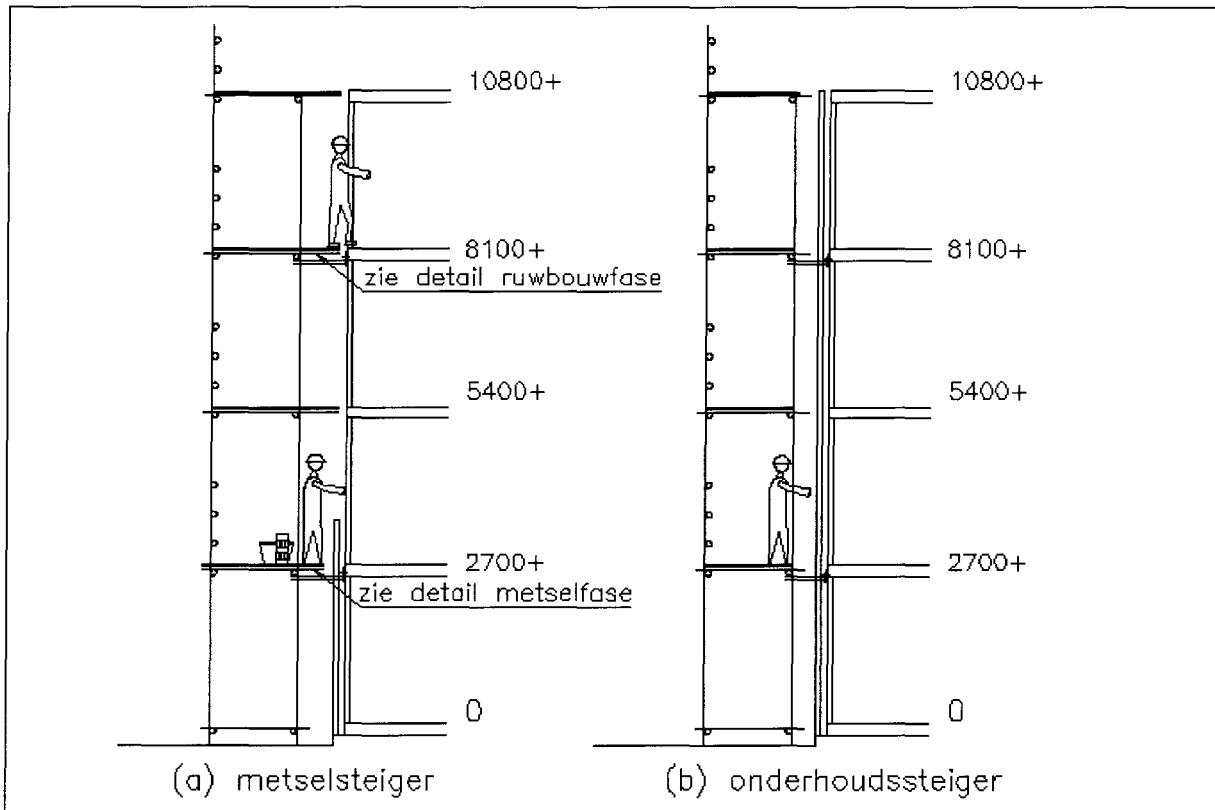
Traditionele steigers worden ook wel buis en koppelingen steigers genoemd. Ze worden gekenmerkt door de mecano-achtige opbouw. De steigers worden opgebouwd door het aan elkaar koppelen van buizen. Voor een ligger wordt een zelfde type buis gebruikt als voor een staander. Afbeelding 2.9 illustreert enkele onderdelen binnen dit systeem. Rechts op de afbeelding is een 'laskoppeling' afgebeeld, hiermee worden de staanders in lengterichting gekoppeld. De andere afbeeldingen zijn koppelingen. Het traditionele systeem heeft als voordeel dat het praktisch overal inpasbaar is. Een van de nadelen is de relatief langere montagetijd bij standaardbouwwerken.

Als voorbeeld is een traditionele metselsteiger afgebeeld (afbeeldingen 2.10 a en b). De steiger wordt opgetrokken met de ruwbouw. De vloeren van het gebouw hoeven niet te worden voorzien van extra veiligheidsvoorzieningen door de aanwezigheid van leuning aan de steiger. In het voorbeeld is om de afstand tussen de steiger en het gebouw te overbruggen, een uitschuifkorting afgebeeld. Tijdens de metselfase wordt het uitschuifbare deel teruggeschoven. Als slaghoogte is in dit voorbeeld de verdiepingshoogte aangehouden (2700 mm).

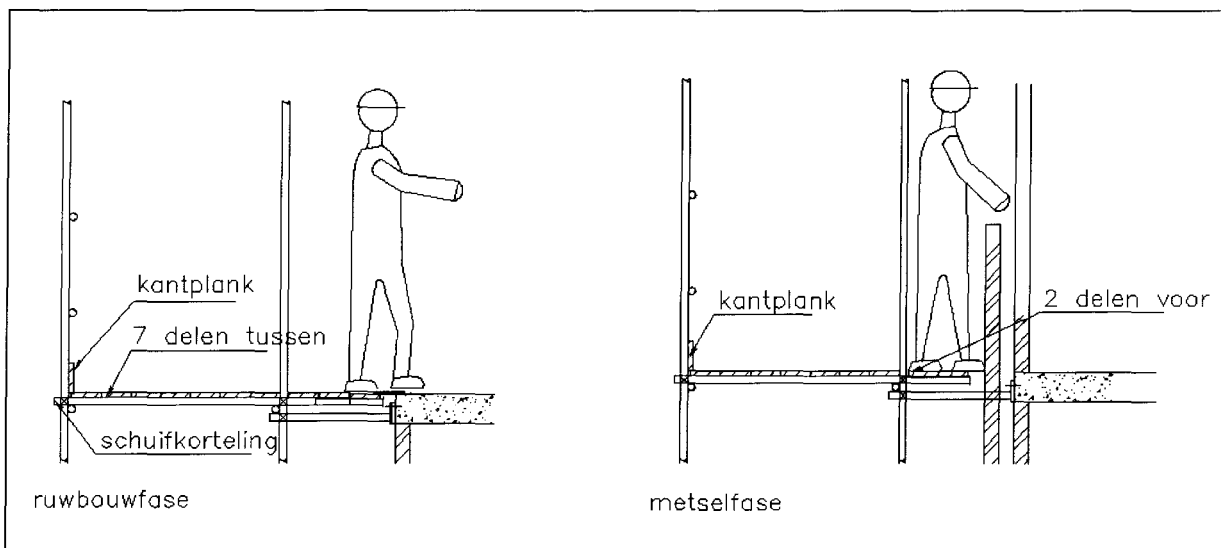
- **Systeemsteigers**

Systeemsteigers worden gekenmerkt door de prefabricage van aparte onderdelen. Door de standaardisering van de onderdelen is een systeemsteiger minder makkelijk aanpasbaar. De afmetingen van de steiger worden immers bepaald door de onderdelen van het systeem. Het steigersysteem verschilt per fabrikant. Door het gebruik van systeemsteigers kan de bouwtijd van een steiger versneld worden.

Als voorbeeld (afbeeldingen 2.11 a en b) is er een metselsteiger uitgewerkt waarbij de steiger met de ruwbouw wordt opgetrokken. Tijdens het metselen van de buitengevel staat de metselaar op een metselconsole.



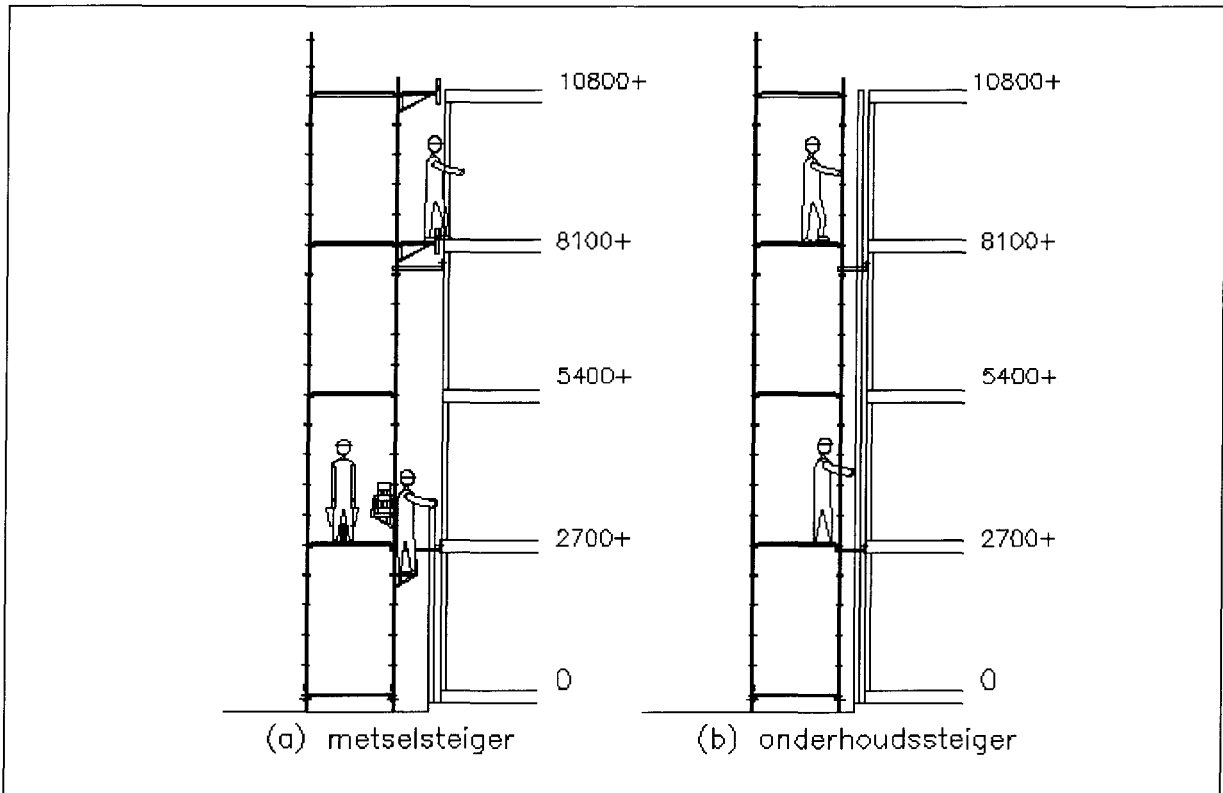
a:



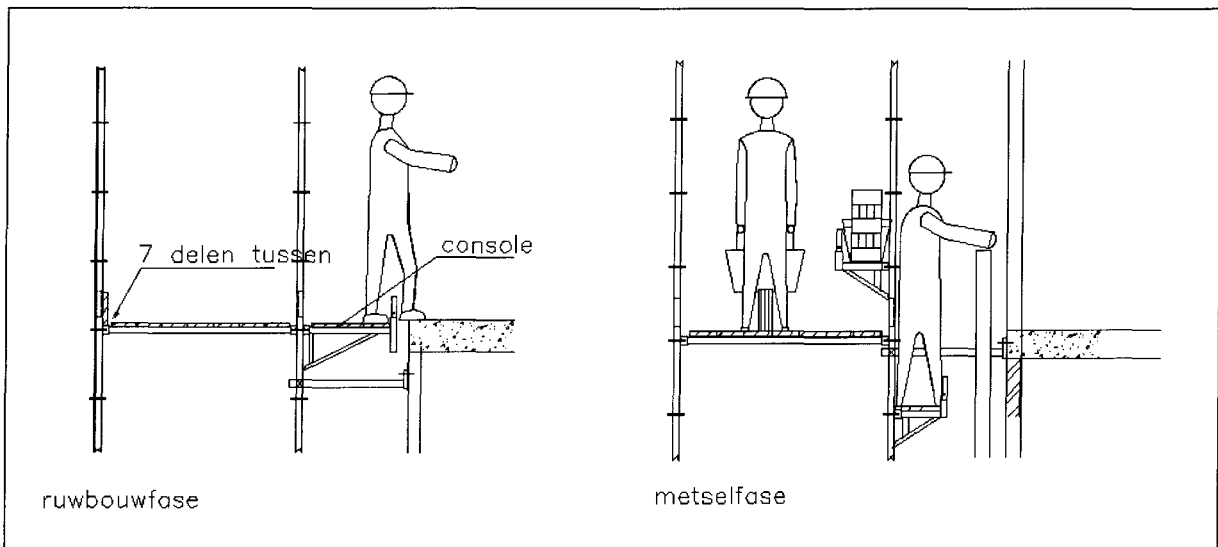
b:

Afbeelding 2.10:

Detailtering traditionele metsel- en ruwbouwsteiger



a:



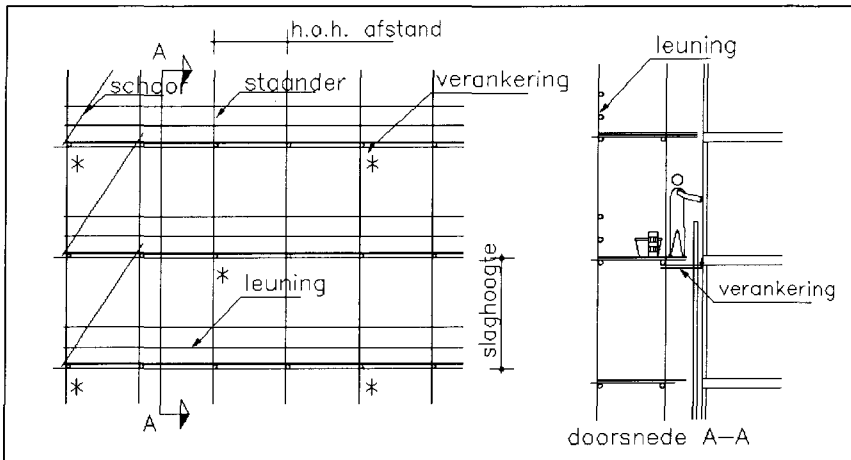
b:

Afbeelding 2.11: Systeemsteiger

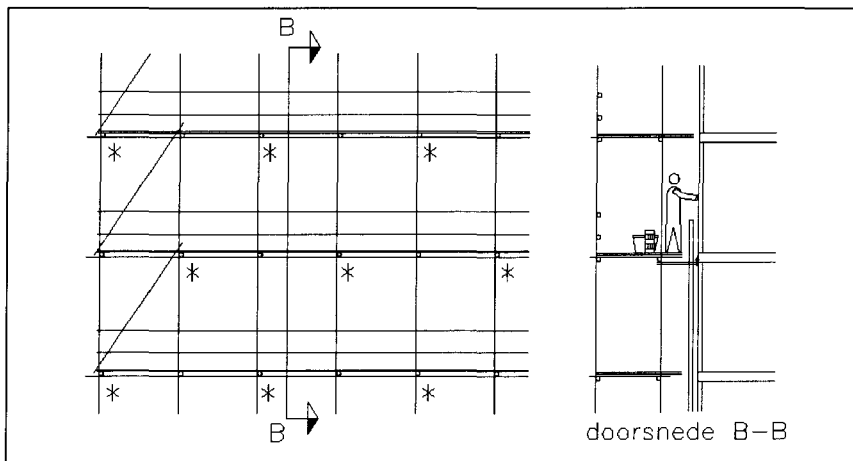
2.3 Verankeren steigerconstructie

Mede om de stabiliteit van de steiger te waarborgen wordt deze verankerd aan de gevel (zie afbeelding 2.12). De verankeringen worden aangebracht aan de binnenstaander en bevestigd aan de vloer of het binnenblad (afbeelding 2.13). In aanzicht vormen de verankeringen een bepaald patroon. Bij traditionele steigers werd vroeger vaak gewerkt met het 'P6 patroon' zie afbeelding 2.12 a ('P6' is de benaming van de oude praktijkrichtlijnen). Bij de meeste (metsel) steigers wordt uitgegaan van het "twee-slag-patroon" (afbeelding 2.12 b). Het één-slag-patroon 2.12 c wordt nagenoeg niet toegepast. Soms wordt het patroon gevarieerd over de hoogte.

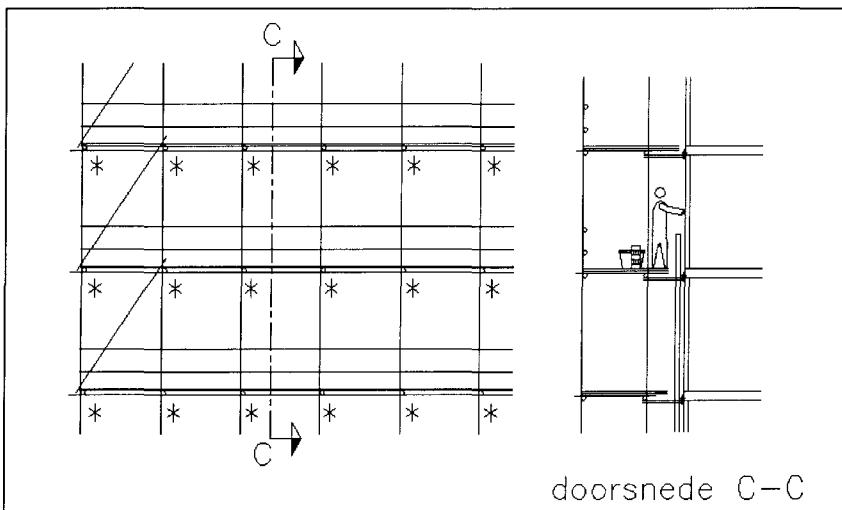
Afbeelding 2.13 geeft detailleringen van de verankering. Er wordt onderscheid gemaakt tussen (a) de bevestiging met een kopplaat en (b) de bevestiging met een schroefoog. De toepassing met het schroefoog wordt veelal bij stucwerk toegepast. Doorgaans wordt de verankeringsbuis met een kruiskoppeling (zie ook afbeelding 2.9) aan de staanders bevestigd. Om de stabiliteit van de steiger te verbeteren worden de verankeringen ook wel schuin geplaatst. Doordat de steiger doorgaans rondom een gebouw wordt geplaatst, wordt de steiger aan de zijvlakken doorgekoppeld (verankerd) aan de steiger loodrecht erop. Afbeelding 2.14 geeft een overzicht van de plaatsen waar de steiger is verankerd.



a:

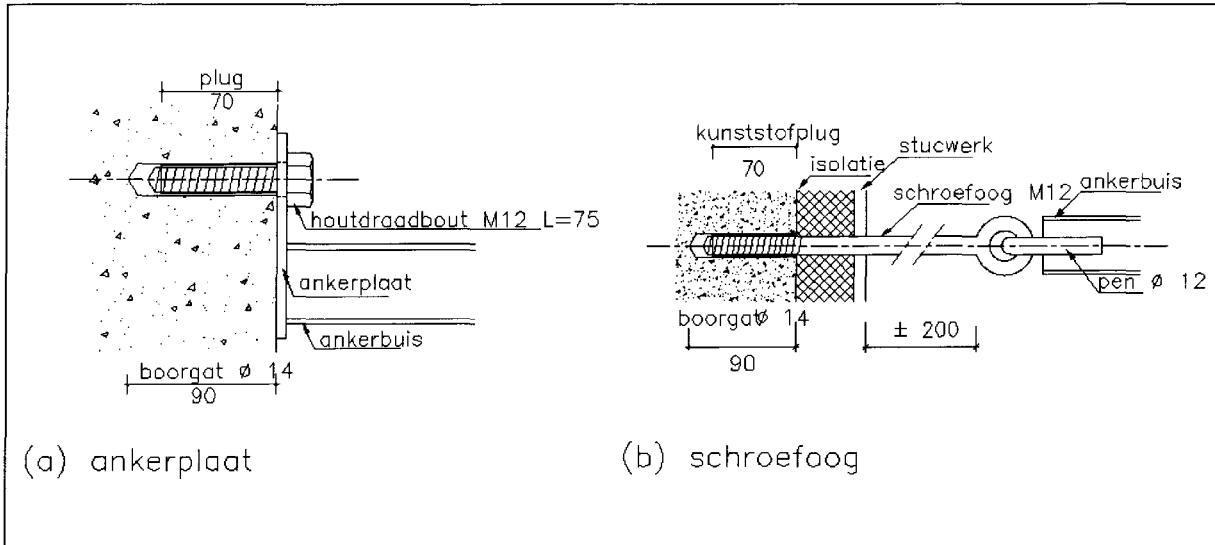


b:

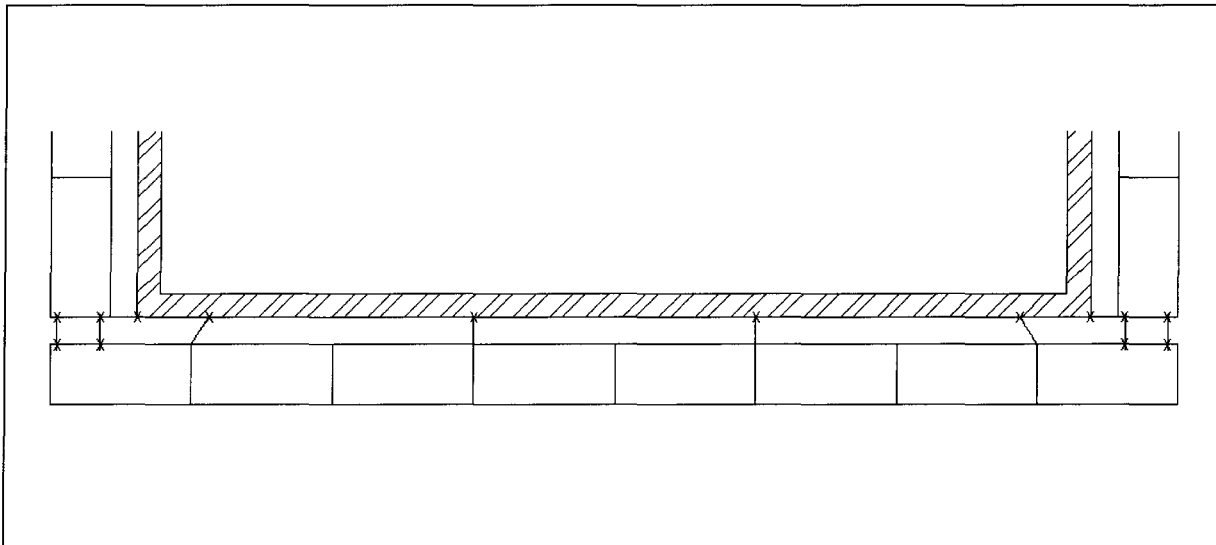


c:

Afbeelding 2.12: Verankeringspatronen



Afbeelding 2.13: Detaillering verankering

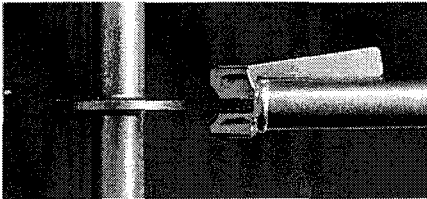


Afbeelding 2.14: Verankeringsoverzicht (horizontale doorsnede)

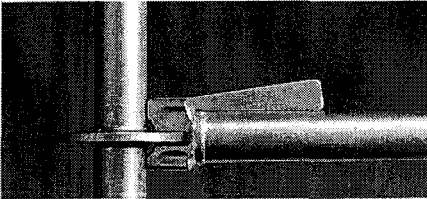
Hoofdstuk 3: Layher-Allround steiger

3.1 Montagebeschrijving

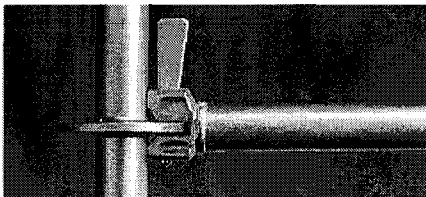
Een steiger wordt gebouwd door het koppelen van buizen tot een (driedimensionale) raamwerkstructuur. Layher-Allround systeemsteigers kenmerken zich (mede) door de aansluiting van staander aan schakel. De Layher-Allround steiger is de meest toegepaste systeemsteiger in Nederland. Afbeeldingen 3.1 a t/m e illustreren het principe.



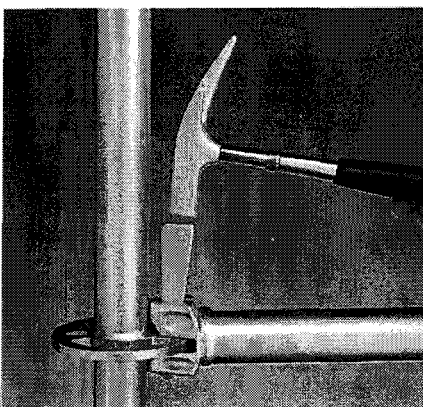
a:



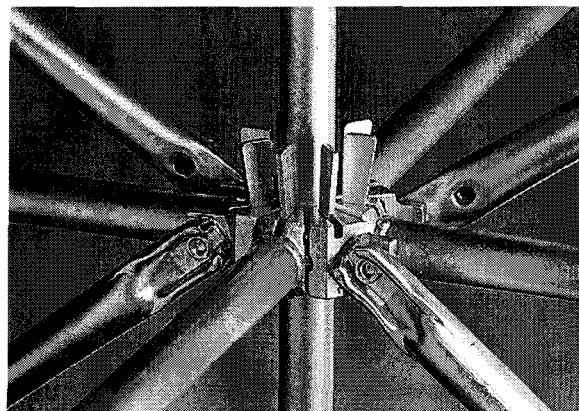
b:



c:



d:

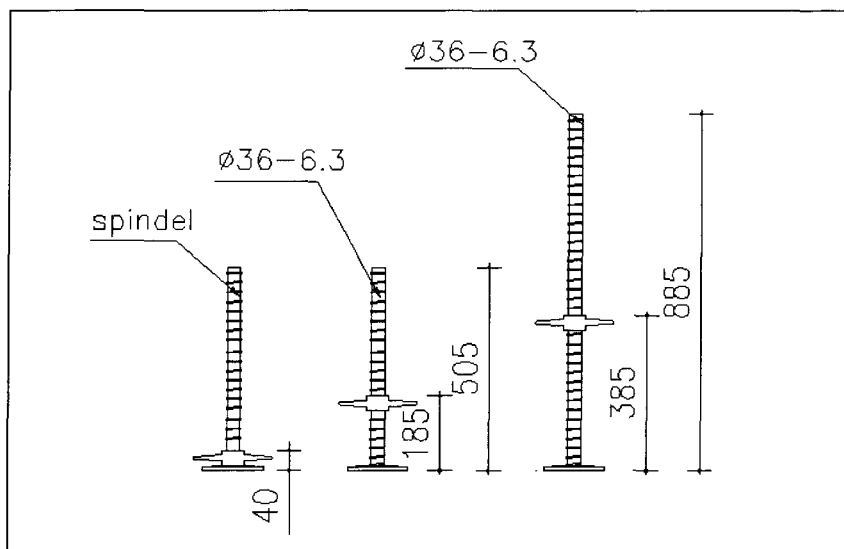


e:

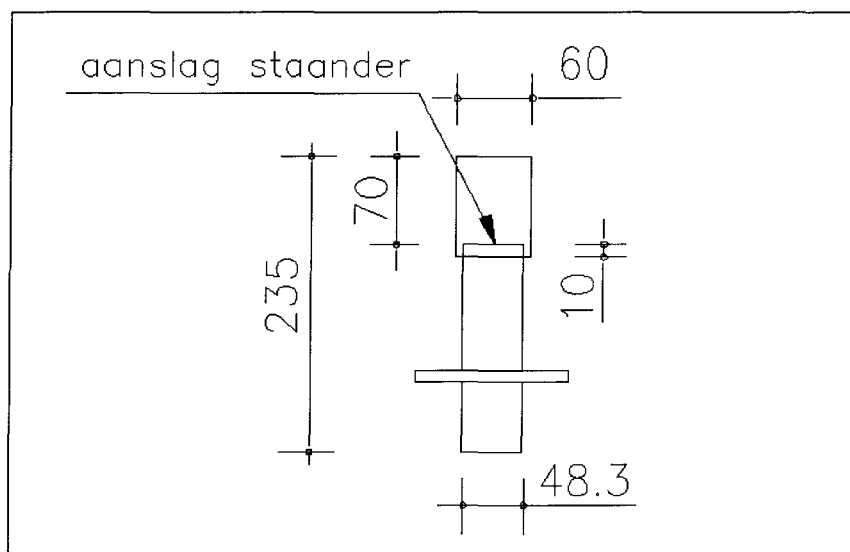
Afbeeldingen 3.1: Aansluitingen schakel-staander

(bron: Layher)

De opbouw begint bij het uitzetten van de spindels en voetplaten. Over de spindels (afbeelding 3.2) worden voetstukken geplaatst. Een voetstuk is een element met een hoogte van 235 mm (afbeelding 3.3). Het onderste gedeelte is steigerbuis, het bovenstuk (70 mm) een buis \perp 60 mm. Het voetstuk wordt over de spindel geschoven en op de stelmoer geplaatst. De constructie is maximaal 345 mm in hoogte verstelbaar.

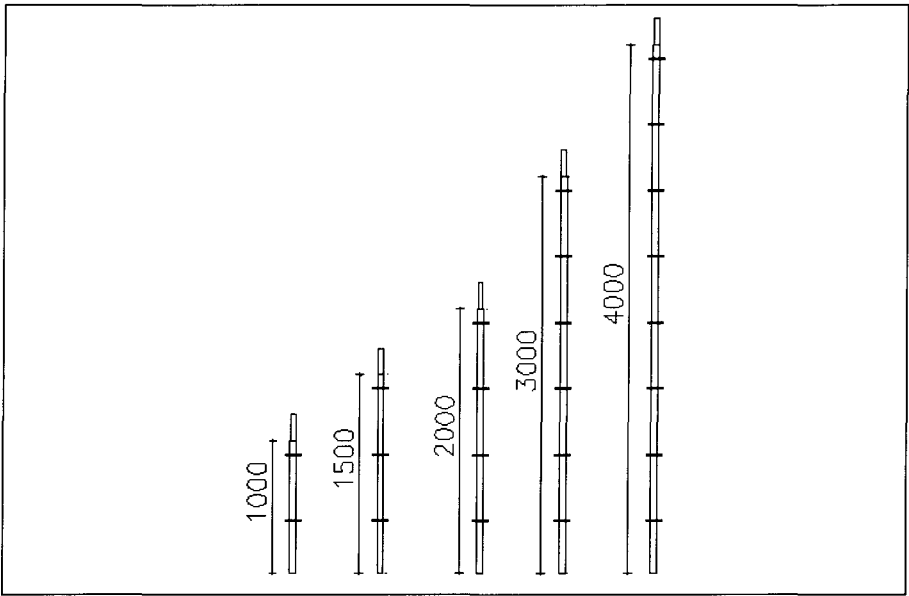


Afbeelding 3.2: Verstelbereik spindel

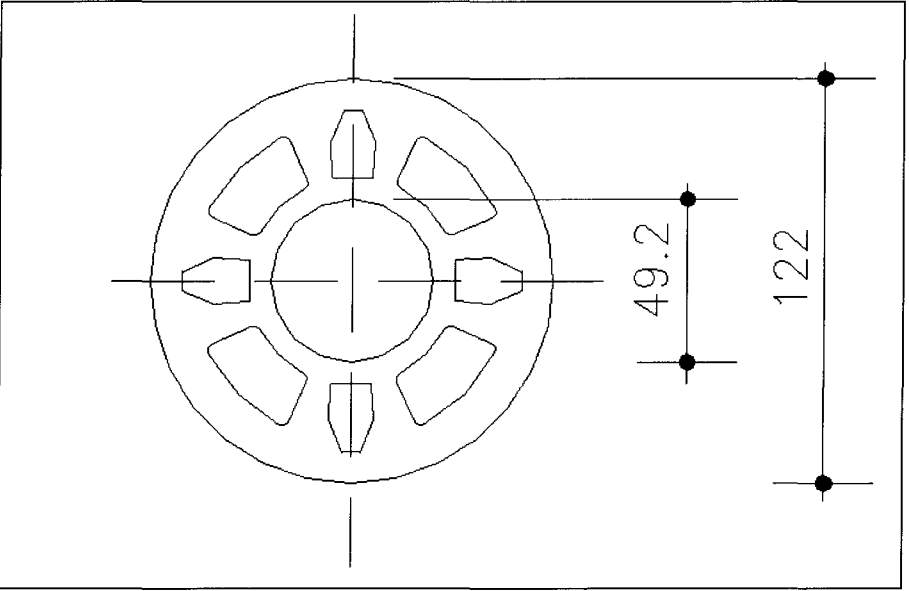


Afbeelding 3.3: Voetstuk

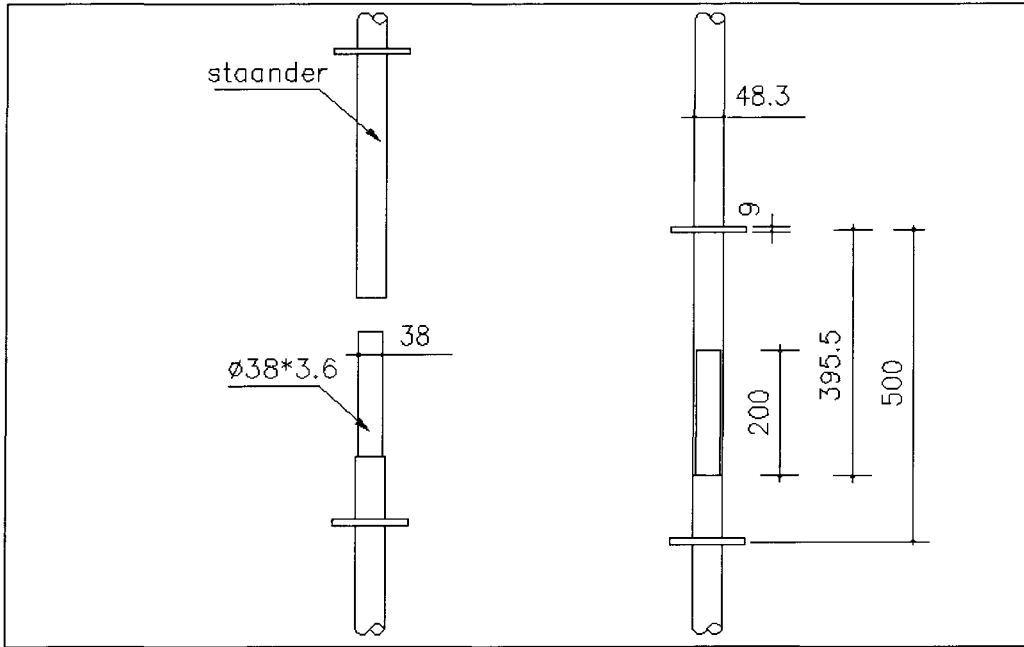
De staander wordt vervolgens eveneens over de spindel geschoven en rust op het voetstuk. Layher heeft standers van 1000 mm tot en met 4000 mm (oplopend in stappen van 500 mm zie afbeelding 3.4). Tevens zijn er standers verkrijgbaar waarmee een verdiepingshoogte van 2700 mm te realiseren is. In de praktijk wordt vaak gewerkt met standers met een lengte van 3000 mm. De standers met een lengte van 4000 mm zijn relatief zwaar. De standers zijn voorzien van rozetten (afbeelding 3.5) en hebben aan de bovenkant een pen (afbeelding 3.6). De pen heeft een lengte van 200 mm en dient als verbindingsstuk tussen de standers. Het is in de praktijk mogelijk dat de staander halverwege een slag (van bijvoorbeeld 2000 mm) gekoppeld is. Het geheel wordt geïllustreerd in de afbeeldingen 3.6 en 3.7. Layher maakt gebruik van staal (St 37-2) met een verhoogde vloeigrens (320 N/mm^2).



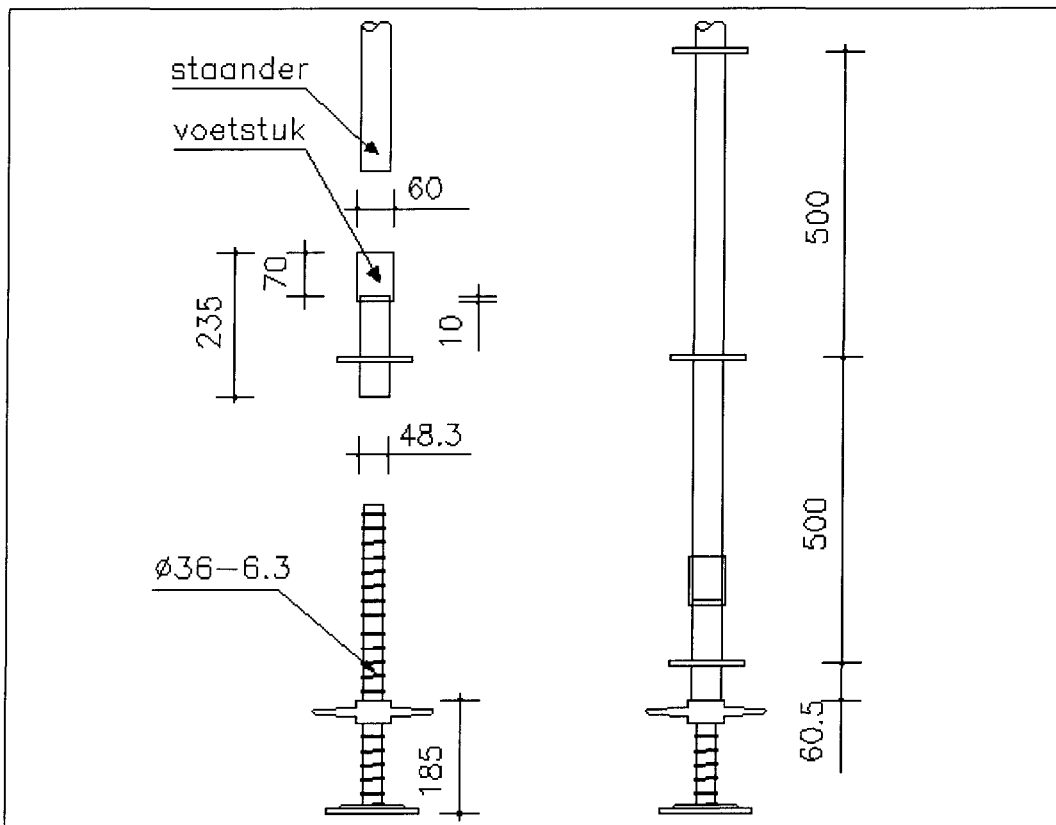
Afbeelding 3.4: Afmetingen standers



Afbeelding 3.5: Rozet

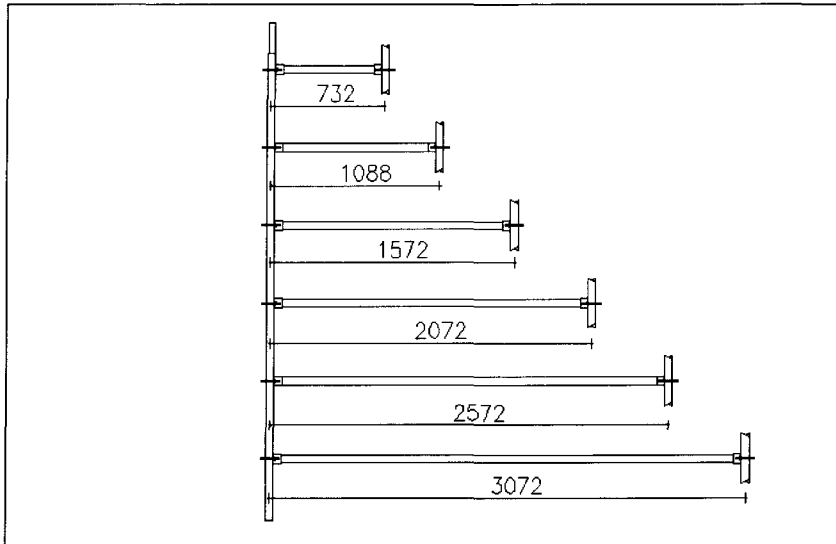


Afbeelding 3.6: Aansluiting staanders

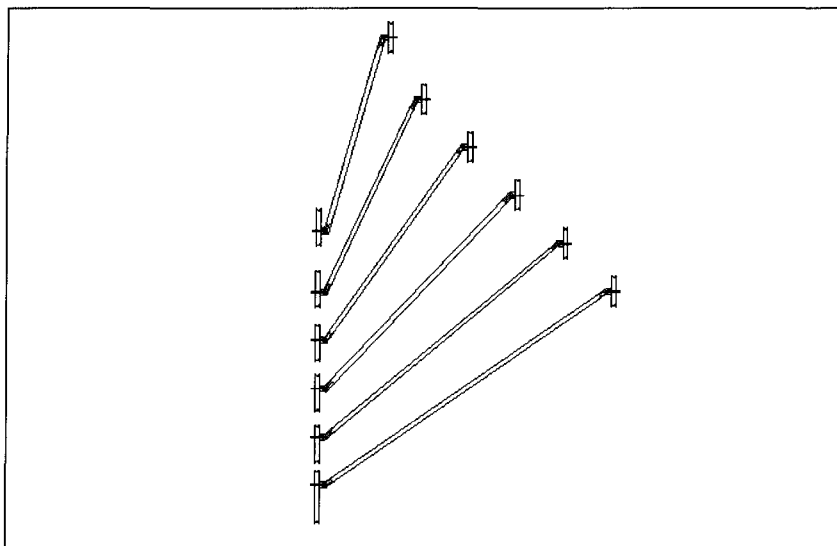


Afbeelding 3.7: Aansluiting spindel op voetstuk en staander

De rozetten hebben een hart op hart afstand van 500 mm. De rozet dient als aansluitpunt voor de koppeling van de verbindingselementen (schakels) met de staanders. Bij de schakels wordt ter plaatse van het begin en einde van de buis een verbindingselement gelast (afbeelding 3.8). De lengtes van de schakels variëren van 732 tot 3072 mm (zie de afbeelding voor tussenliggende maten). Met behulp van een spie wordt de schakel vastgemaakt aan de rozet (afbeeldingen 3.1 a t/m e). De mate waarin de spie aangeslagen wordt, bepaalt mede de stijfheid van de verbinding. Ter plaatse van het vlak van de buitenstaanders wordt de constructie om de zes vakken geschoord. Afbeelding 3.9 illustreert de schoren (waarmee vakken van verschillende dimensies kunnen worden geschoord).



Afbeelding 3.8: Afmeting schakels



Afbeelding 3.9: Schoren

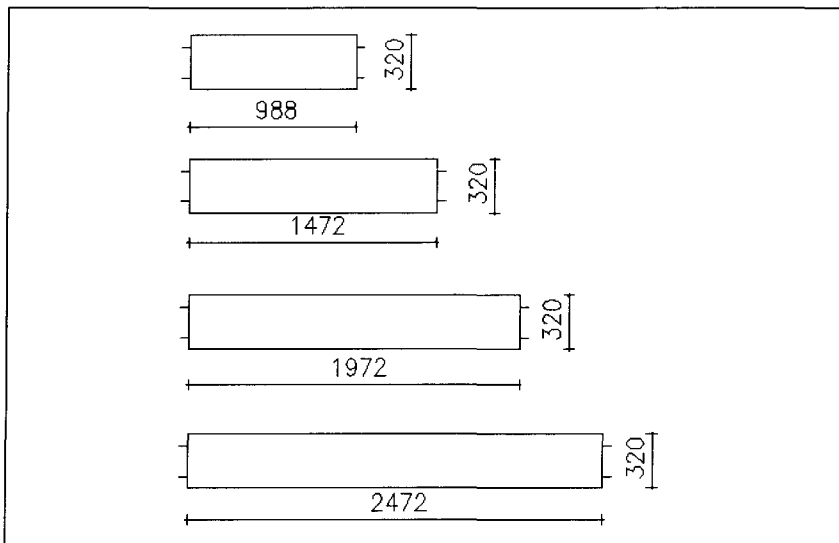
3.2 Vloeropbouw

De werkvloer kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. Binnen de opbouw wordt onderscheid gemaakt in de mate van prefabricering van de elementen. De keuze van de werkvloer heeft niet alleen gevolgen voor de snelheid waarmee de steiger gebouwd wordt, maar ook voor de toelaatbare bouwhoogte en de kosten van de steiger.

Binnen dit onderzoek wordt met betrekking tot de werkvloer het verschil geanalyseerd tussen een semi-traditionele vloer (paragraaf 3.2.2) en de traditionele vloer (paragraaf 3.2.3). De systeemvloer wordt niet verder geanalyseerd.

3.2.1 Systeemvloer

Bij een dek dat opgebouwd is uit systeemvlonder worden stalen of aluminium vlonder op de dwarschakels gelegd (afbeelding 3.10). Een van de voordelen kan een vermindering van de bouwtime zijn. Door het gebruik van aluminium vlonder daalt tevens het gewicht van de werkvloer.

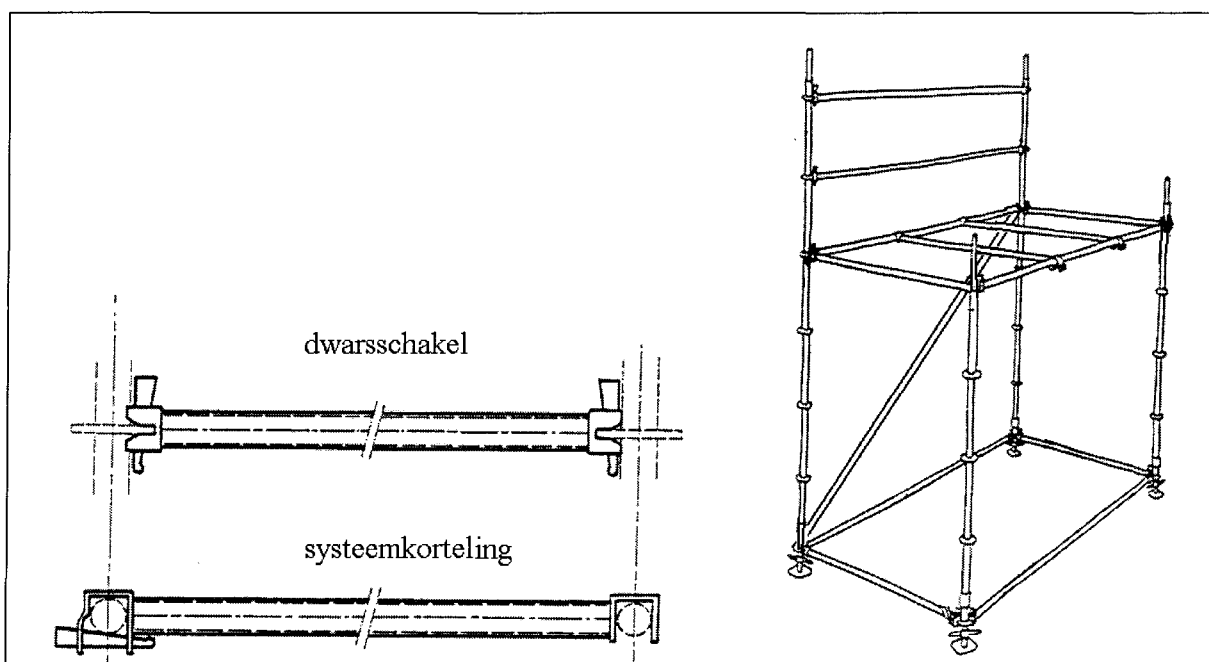


Afbeelding 3.10: Vlonder

3.2.2 Vloer met systeemkortelingen

Uitgaande van de standaardopbouw van het Layher systeem worden op de (langs)schakels door Layher gefabriceerde kortelingen gelegd (afbeelding 3.11). Indien dit steigerblok los moet kunnen staan dient het zijvlak ook geschoord te worden. De kortelingen komen op dezelfde hoogte te liggen als de dwarsschakel. Dit is Layher-steigerbuis met gelaste verbindingen. De werkvloer wordt uitgevoerd door op de dwarsschakel en kortelingen steigerdelen te leggen.

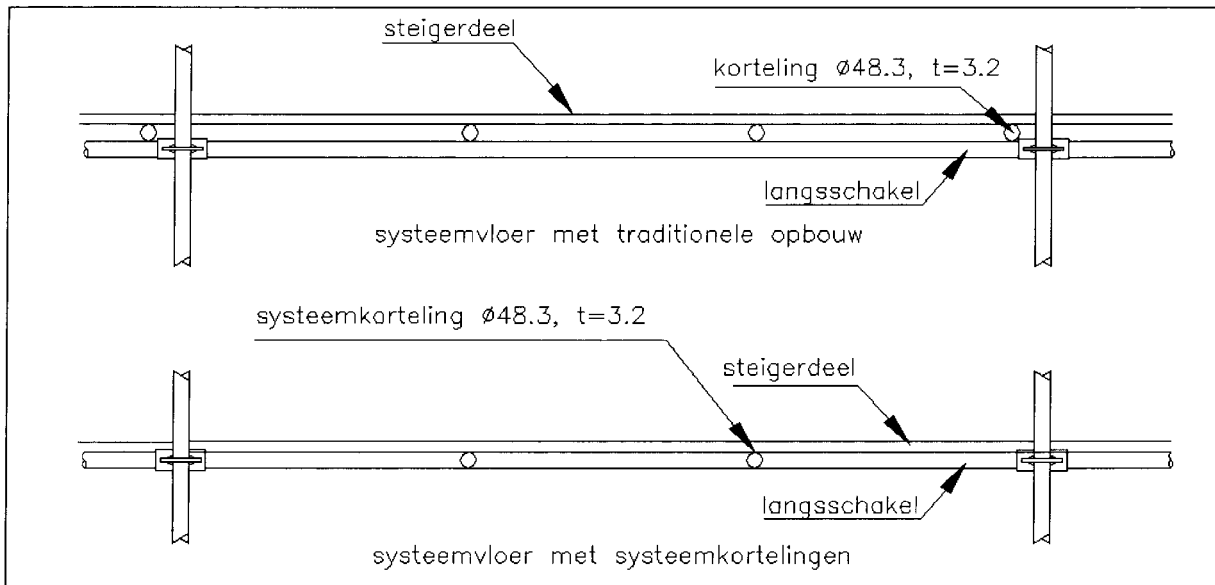
De belasting wordt via de dwarschakels en kortelingen afgedragen. Het grootste deel van de belasting wordt via de kortelingen afgedragen op de langsschakel en vandaar op de staander. Een klein deel echter wordt via de dwarschakel direct overgedragen aan de staander. Uitgaande van een stijve verbinding geven de dwarschakels een moment af aan de staanders (afbeelding 3.13).



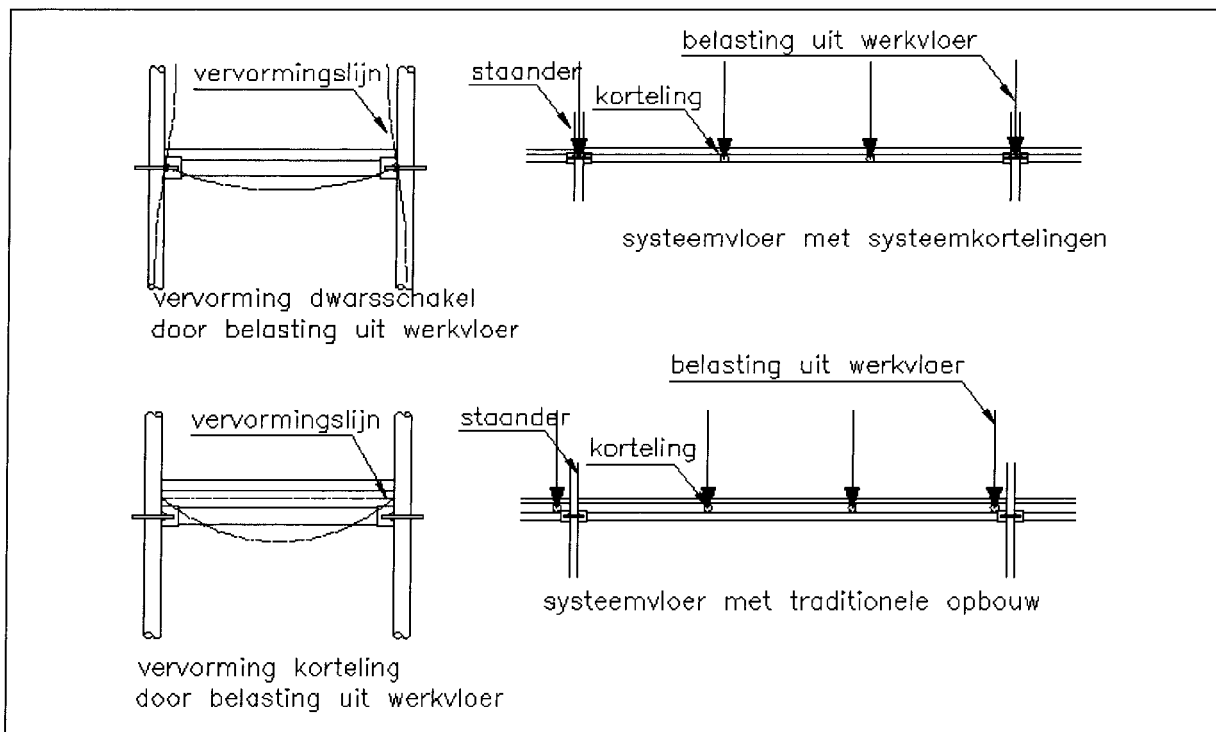
Afbeelding 3.11: Systeemopbouw met systeemkortelingen

3.2.3 Vloer met kortelingen (traditioneel)

Bij een traditionele vloerconstructie wordt er op het steigerframe (staanders en schakels) een traditionele werkvloer gemaakt. Afbeelding 3.12 geeft van beide vloertypen een illustratie. De kortelingen (gewone steigerbuis) worden met behulp van koppelingen op de schakels bevestigd. De werkvloer wordt uitgevoerd door op de kortelingen steigerdelen te leggen. Alle belasting op de werkvloer wordt via de kortelingen afgedragen aan de langsschakels en vandaar naar de staander (zie afbeelding 3.13). De dwarsschakel van het systeem maakt dus geen deel uit van de werkvloer. Een van de praktische voordelen van deze opbouw betreft de flexibiliteit van de werkvloer binnen het vaste raamwerk. Dit kan voordelen hebben als er bij onderhoudswerkzaamheden een of twee planken voor de binnenstaander van de steiger nodig zijn.



Afbeelding 3.12: Vloeropbouw



Afbeelding 3.13: Belastingafdracht bij vloeropbouw

3.2.4 Gecombineerde vloeropbouw

In de praktijk wordt er gewerkt met een combinatie van bovengenoemde systemen. Bij bijvoorbeeld een metselsteiger wordt er een vlonder gebruikt van waaraf gewerkt wordt, terwijl de vloeropbouw traditioneel kan zijn. De vlonder wordt op consoles gelegd die aan de binnenstaander bevestigd zijn.

3.3 Verbindingen

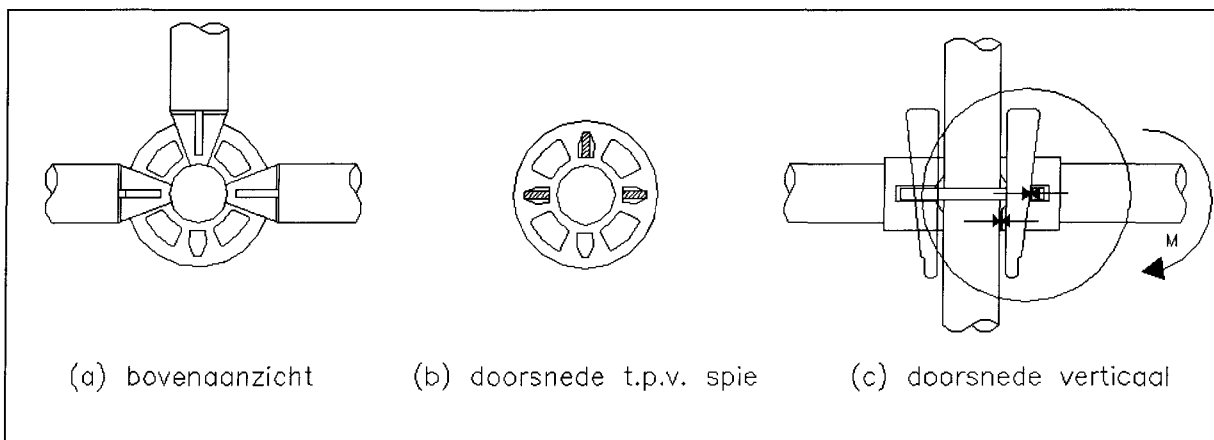
In deze paragraaf worden de sterkte en stijfheidseigenschappen van de verbindingen van de constructiedelen zoals deze door Layher zijn opgegeven gerapporteerd. Er is hierbij gebruik gemaakt van documenten van Layher [1]. De door Layher opgegeven waarden of waarden uit bestaande regels vormen een bovengrens in het systeem. De modellering van de verbindingen wordt beschreven in hoofdstuk 5, de toetsing van de verbindingen wordt beschreven in hoofdstuk 4.

3.3.1 Schakel-staanderverbinding

Van de schakel-staanderverbinding zijn de volgende gegevens bekend:

- Moment-rotatiekarakteristiek verbinding schakel-staander
- Maximaal opneembare dwarskracht

Van de aansluiting van de schakel en de staander zijn door Layher moment-rotatiediagrammen gegeven (afbeelding 3.15). Uit de drie geïllustreerde moment-rotatiediagrammen blijkt een duidelijke spreiding in veerstijfheid (afbeelding 3.15). In de curven is onderscheid gemaakt in een minimaal, maximaal en een gemiddelde veerstijfheid. Indien tot 0.30 kNm een lineair verloop wordt aangehouden, zal de veerstijfheid variëren van 52 tot 164 [kNm/rad]. Het verschil kan te maken hebben met de mate van vastslaan van de spie. In dit onderzoek wordt uitgegaan van de opgegeven (minimale) karakteristiek van Layher.

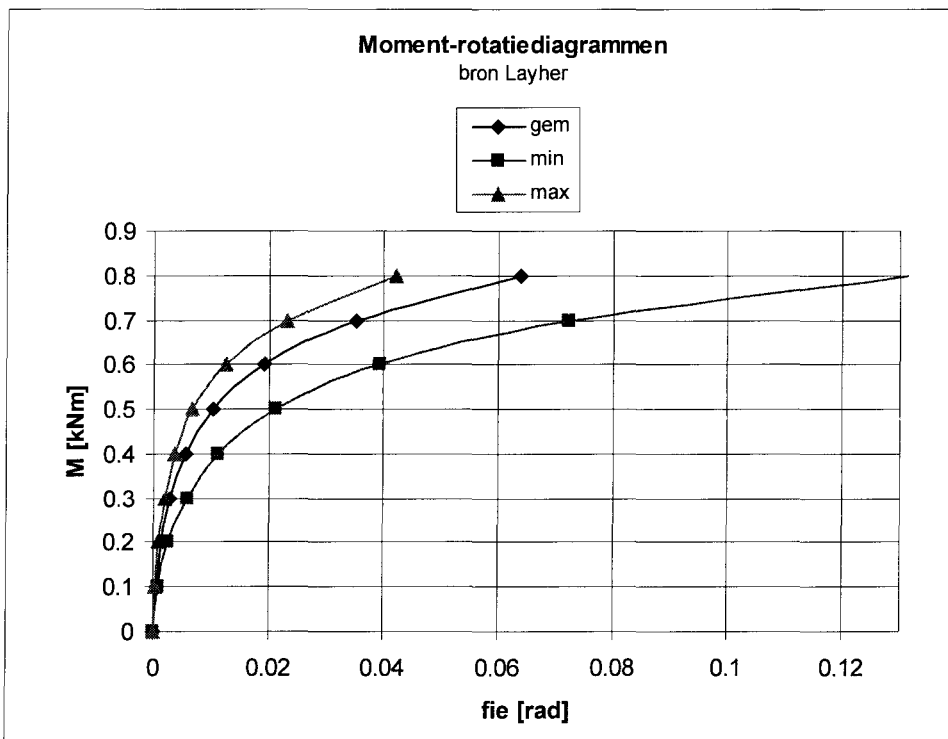


Afbeelding 3.14: Aanzichten schakel-staander

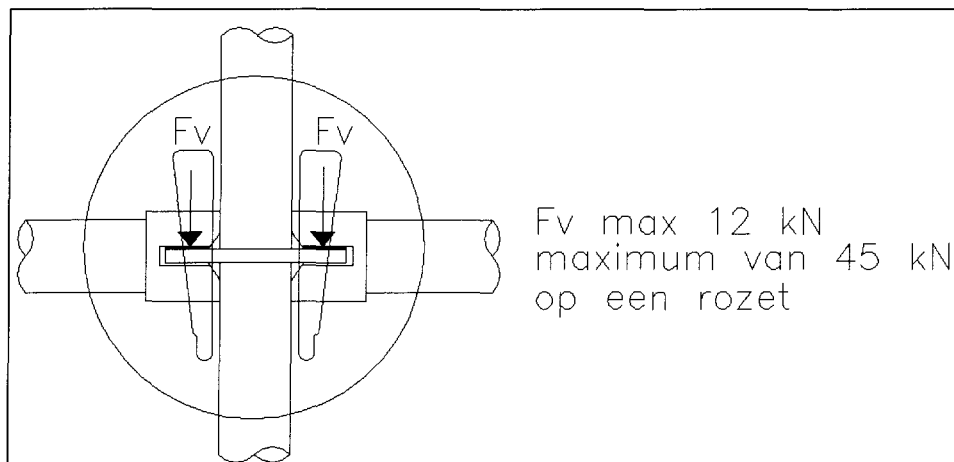
Deze curve wordt afgesnoten bij een hoekverdraaiing van 0.13 rad of een moment van 0.8 kNm. In het onderzoek wordt gerekend met de minst stijve curve. Van de aansluiting van de schakel en de staander in het vlak van werkvloer zijn geen moment-rotatiediagrammen voorhanden. In hoofdstuk 5 wordt bij de modellering van de aansluiting schakel-staander hierop teruggekomen.

De maximaal opneembare dwarskracht bedraagt 12 kN (of met een maximale rozetcapaciteit van 45 kN) en wordt bepaald door het rozet (3.16). Doordat de belasting bij de steigerconfiguraties gering is, blijkt dit criterium niet maatgevend.

Van de verbinding wordt de moment-rotiekarakteristiek als randvoorwaarde meegenomen. Dit komt bij de controles in hoofdstuk 4 ter sprake.



Afbeelding 3.15: Moment-rotatie diagram aansluiting schakel-staander

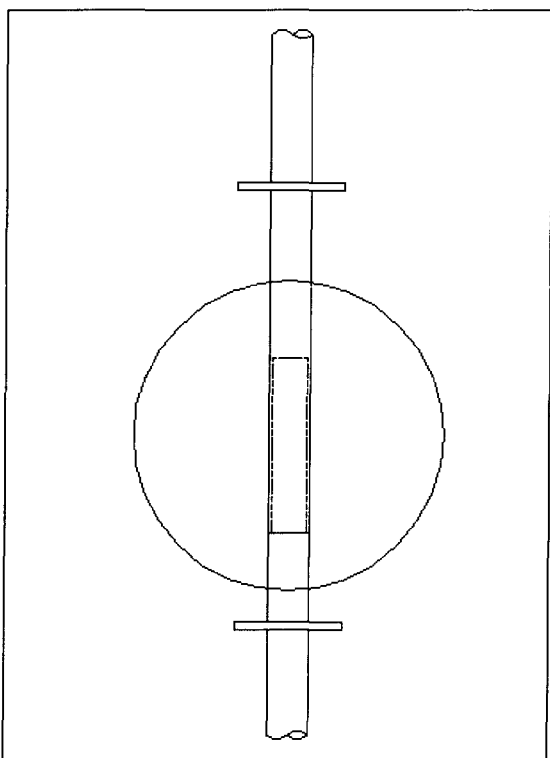


Afbeelding 3.16: Gebruiksbelasting rozet

3.3.2 Staander-staanderverbinding

De staander-staanderaansluiting wordt gekenmerkt door een penverbinding. Volgens NEN-EN 12811 [2] mag de verbinding worden geschematiseerd als een starre aansluiting, mits de verzwakking tussen de staanders door de pen gecontroleerd wordt. De norm stelt als voorwaarde een minimum overlapte lengte van 150 mm en een maximum speling van 4 mm. Systeemscheefstanden die uit de verbinding voortkomen worden in het model meegenomen (NEN-EN 12811 paragraaf 10.2.3.1). Afbeelding 3.17 illustreert de verbinding. De penverbinding kan een maximum moment overbrengen van 1.4 kNm (dimensies pen 38*3.6). De capaciteit van de penverbinding wordt een bezwijkcriterium van de steiger (zie hoofdstuk 4).

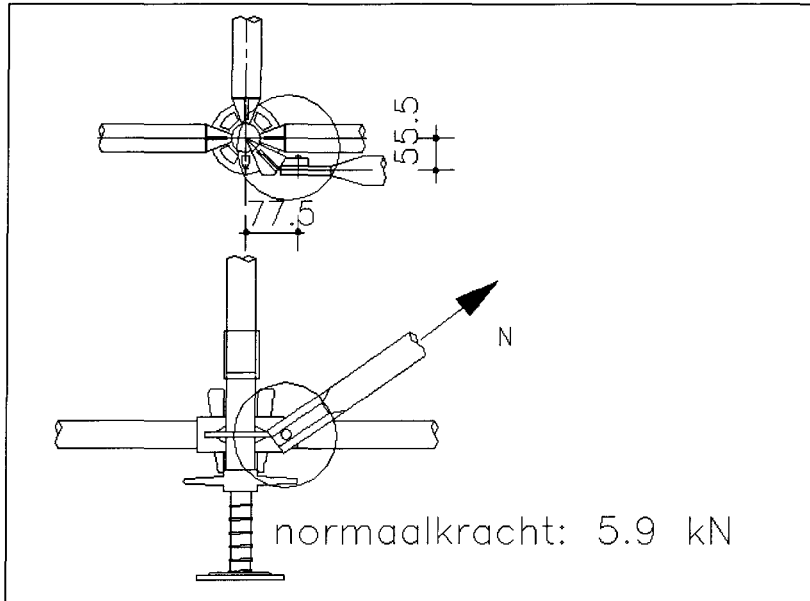
De capaciteit van de pen ondervindt geen hinder van de normaalkracht. Deze wordt door de contactvlakken overgebracht naar de onderliggende staander.



Afbeelding 3.17: Aansluiting staander-staander

3.3.3 Schoorconstructie

De schoor heeft een maximale gebruiksbelasting (de bezwijkbelasting licht hoger) van 5.9 kN (bron Layher). Deze wordt bepaald door de aansluiting bij de rozet (zie afbeelding 3.18).



Afbeelding 3.18: Aansluiting schoor aan staander

3.3.4 Verankering

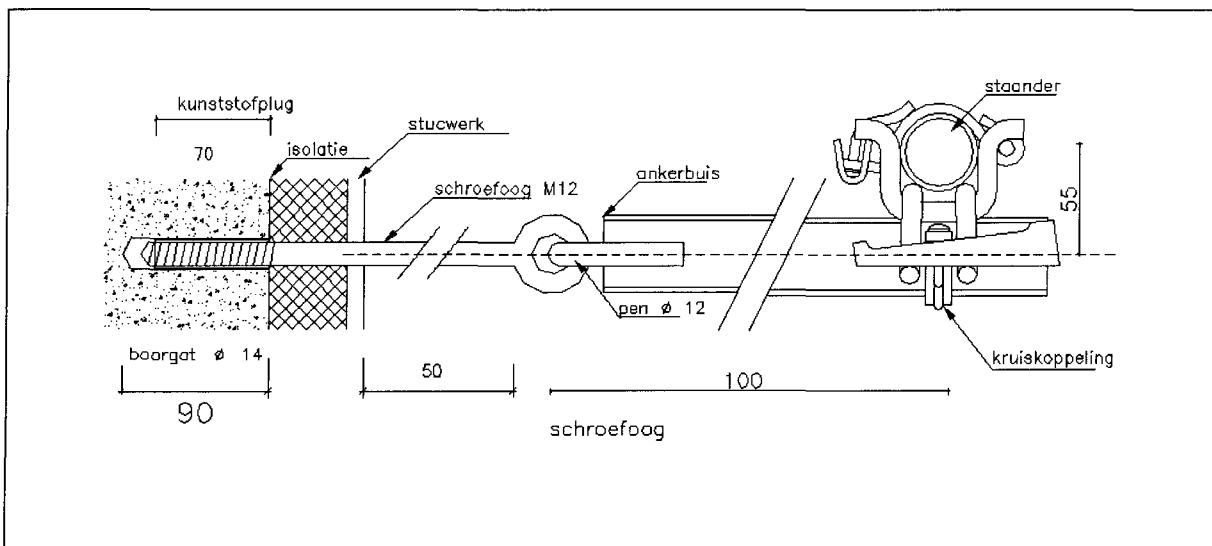
Bij de verankering wordt uitgegaan van een rekenbelasting van 6 kN. De waarde komt voor uit de bovengrens van de aansluiting van twee buizen. Deze waarde is gelimiteerd op 6 kN om wegschuiven tussen de buizen te voorkomen en te voorkomen dat de verankering uit de muur wordt getrokken.

Er zijn verschillende soorten verankeringen (zie hoofdstuk 2). In het onderzoek wordt uitgegaan van de verankering toegepast bij stucwerk. Afbeelding 3.19 illustreert de verankering alsmede de aansluiting met de staander.

Opmerking:

De bezwijkwaarde van 6 kN is gebaseerd op een vuistregel in de steigerbouw. Eventuele dwarskrachten worden hierbij niet beschouwd.

Er wordt hierbij impliciet ervan uitgegaan dat de gevel waaraan verankerd wordt 6 kN op kan nemen.



Afbeelding 3.19: Verankering

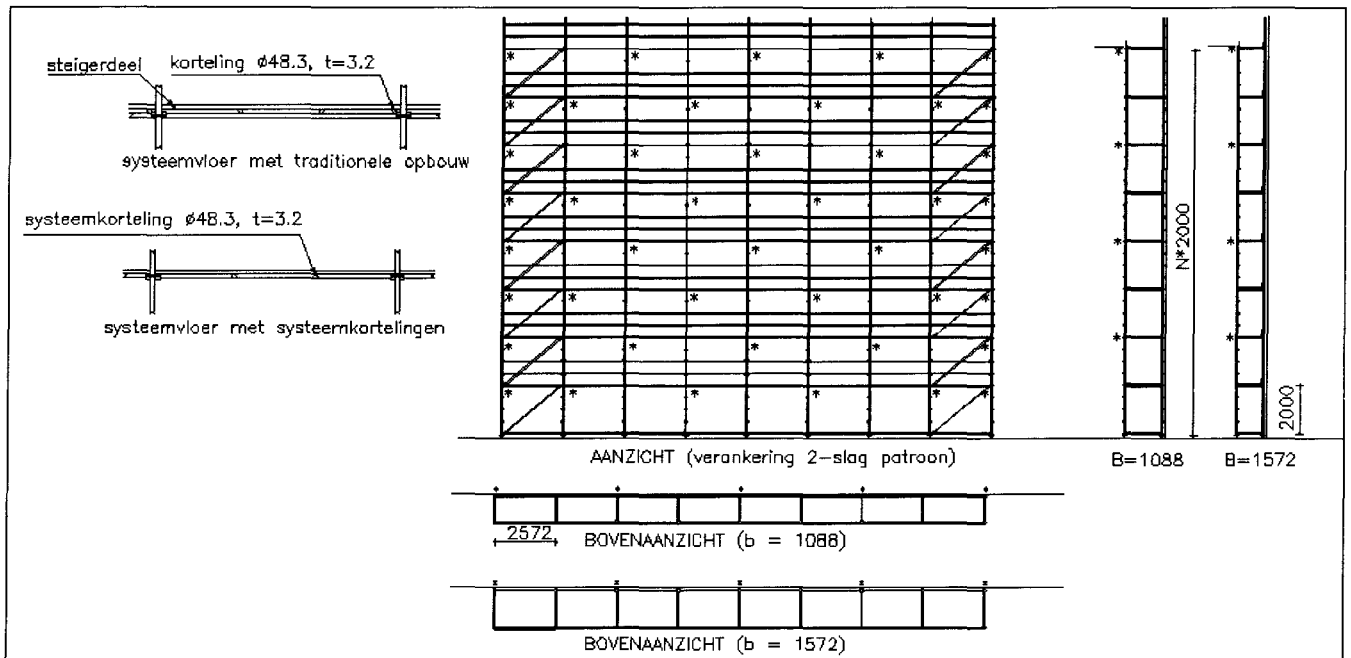
3.4 Overzicht configuraties onderzoek

In afbeelding 3.20 wordt een overzicht gegeven van de steigerconfiguraties die bij dit onderzoek behoren. Er wordt uitgegaan van de Layher-steiger met een slaghoogte van 2000 mm, een hart op hart afstand van 2572 mm.

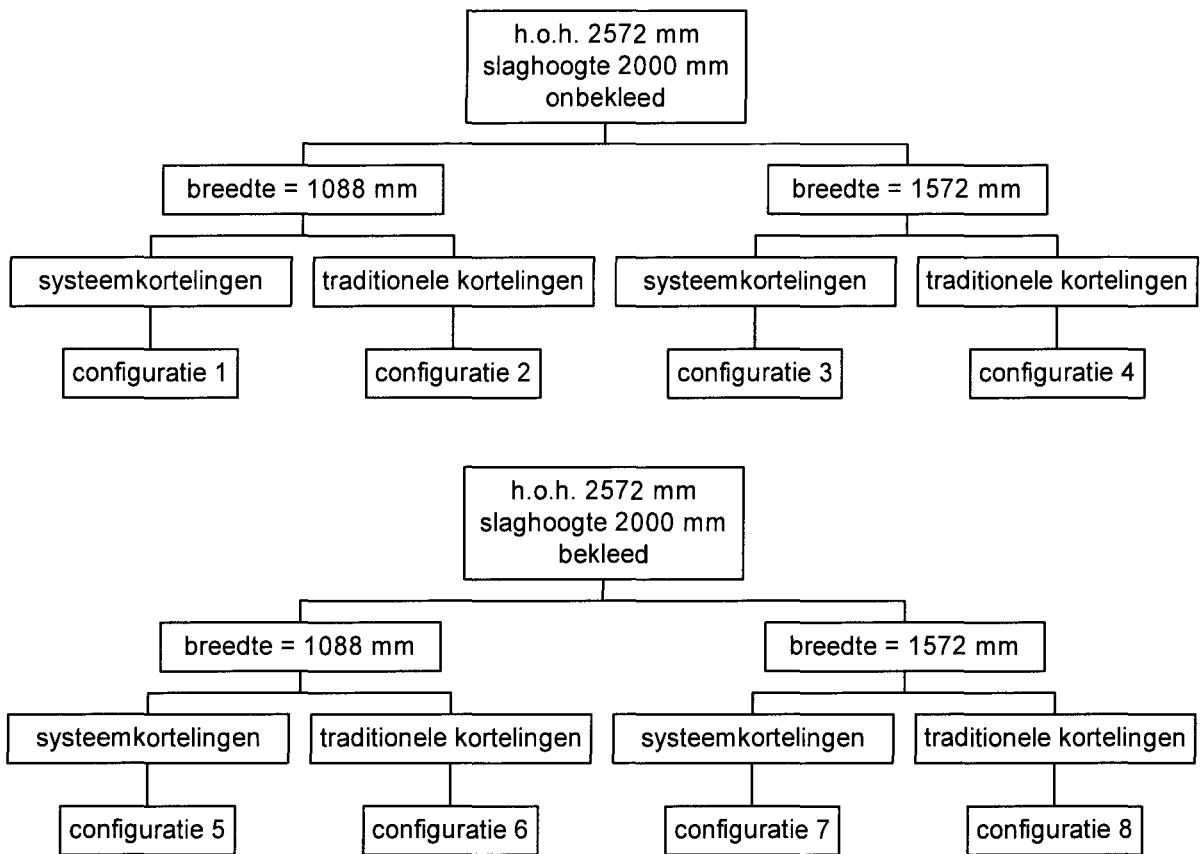
Er worden twee breedten onderzocht, namelijk: 1088 mm en 1572 mm.

Zowel de systeemvloeropbouw als de traditionele vloerbouw worden in het onderzoek betrokken. Voorts kan de steiger winddicht bekleed worden. Afbeelding 3.21 geeft een totaal overzicht van de 8 configuraties. Configuraties 1 tot en met 4 zijn onbekleed, 5 tot en met 8 zijn bekleed.

Als verankeringspatroon wordt het twee-slag-patroon gehanteerd.



Afbeelding 3.20: Steigerconfiguraties



Afbeelding 3.21: Overzicht configuraties

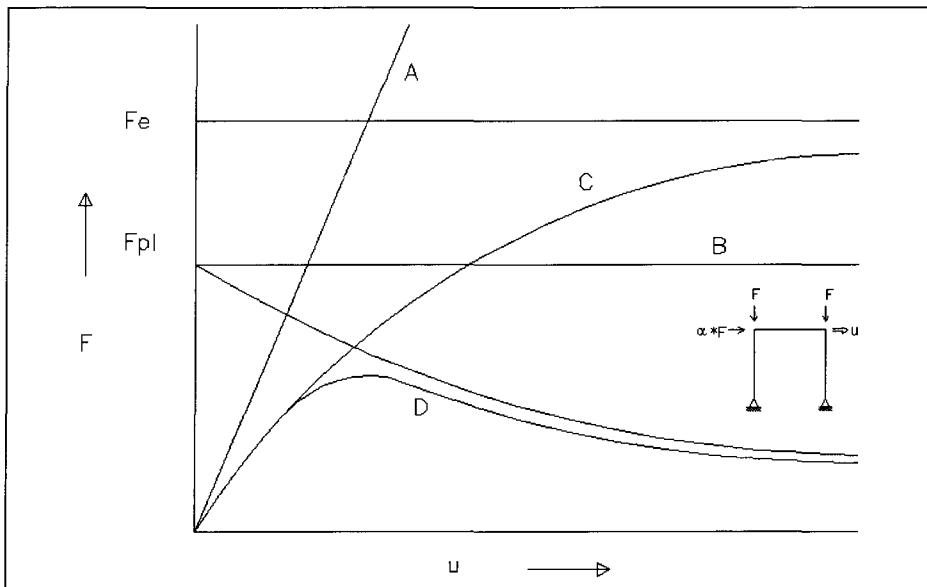
Hoofdstuk 4:

Rekenmodellen en toetsingscriteria

In dit hoofdstuk wordt de rekenprocedure opgesteld die in de hoofdstukken 7 en 8 nader uitgewerkt gaat worden. Voor alle berekeningen wordt gebruik gemaakt van het eindig elementen programma Ansys (versie 5.5.1).

4.1 Rekenmodellen

In NEN 6770 [3] wordt een aantal rekenmodellen gegeven (zie afbeelding 4.1).



Afbeelding 4.1: Rekenmodellen

De norm anticipeert op de volgende modellen:

- Lijn A: eerste-orde elastisch;
- Lijn B: eerste-orde plastisch;
- Lijn C: tweede-orde elastisch;
- Lijn D: tweede-orde elastisch-plastisch.

Bij de bovenstaande rekenmodellen behoren verschillende unity-checks. Afhankelijk van de classificatie van de doorsnede mag uit bovenstaande rekenmodellen worden gekozen. De buizen van Layher mogen conform art. 10.2.4.1.2 geclassificeerd worden in klasse 1: plastische doorsneden. Dit betekent voor de keuze van de rekenmodellen dat bovenstaande modellen gebruikt mogen worden.

In dit onderzoek wordt gekozen voor een geometrisch niet-lineaire (tweede-orde) berekening. De reden hiervoor is dat instabiliteit van steigerbuis van grote invloed is op de uiteindelijke draagkracht van de steiger. Hierdoor zal het krachtenspel sterk bepaald worden door de vervormde toestand van de constructie. Binnen Ansys wordt het geometrisch niet-lineaire rekenen (tweede-orde) gerealiseerd door met de optie "stress-stiffness on" te rekenen. In bijlage 2 wordt verder op de commando's ingegaan.

Er wordt uitgegaan van lineair elastisch materiaalgedrag van de steigerbuis. Afhankelijk van het te gebruiken moment-rotatiediagram van de verbindingen zal het karakter van de berekeningen fysisch lineair, dan wel niet-lineair zijn (zie tabel 4.1). Omdat er uitgegaan wordt van lineair elastisch materiaalgedrag van de steigerbuizen kan de draagkracht van de steiger niet bepaald worden als het maximum van de belasting in een belasting-vervorming diagram, maar moet getoetst worden bij welke belasting niet meer aan de uitgangspunten van de berekening wordt voldaan. Deze toetsen worden besproken in paragraaf 4.2. Wanneer niet meer aan de uitgangspunten van de berekening wordt voldaan wordt aangenomen dat de constructie zijn maximale draagkracht heeft bereikt.

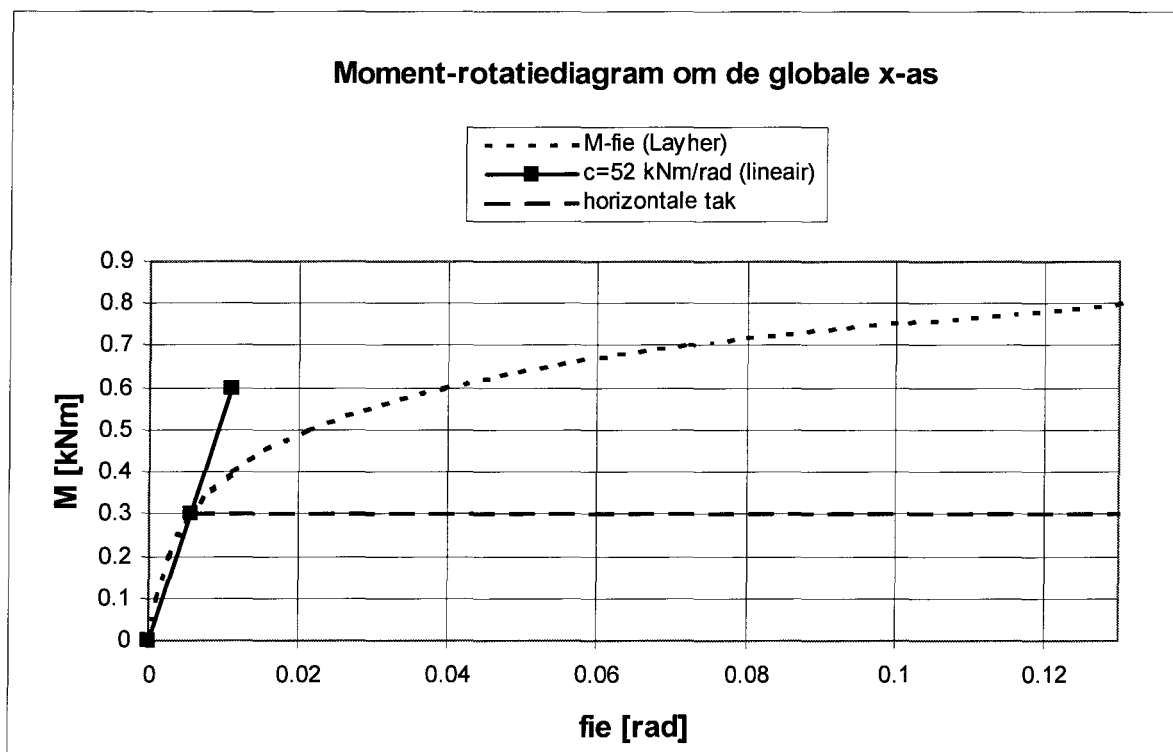
Het is echter mogelijk dat de belasting op de constructie nog kan toenemen. De voorgestelde belastingprocedure zal daarom leiden tot een conservatieve benadering van de maatgevende bouwhoogte.

Doordat bij een fysisch niet-lineair berekening (locale) plasticiteiten (uit de verbinding) worden meegenomen zal deze berekening minder conservatief zijn als wanneer er uitgegaan wordt van een lineair moment-rotatiediagram. In hoofdstuk 9 worden beide berekeningen gemaakt.

In afbeelding 4.2 is een lineair en een bi-lineair moment-rotatiediagram geïllustreerd.

Tabel 4.1: Berekeningstypologie en materiaalgedrag

berekeningstype	materiaalgedrag buizen	m-fie karakteristiek verbindingen
geometrisch niet-lineair, fysisch lineair (FL)	lineair	lineair
geometrisch en fysisch niet-lineair (FNL)	lineair	bi of multi-lineair



Afbeelding 4.2: Moment-rotatiekarakteristiek staander-schakel (bi)lineair

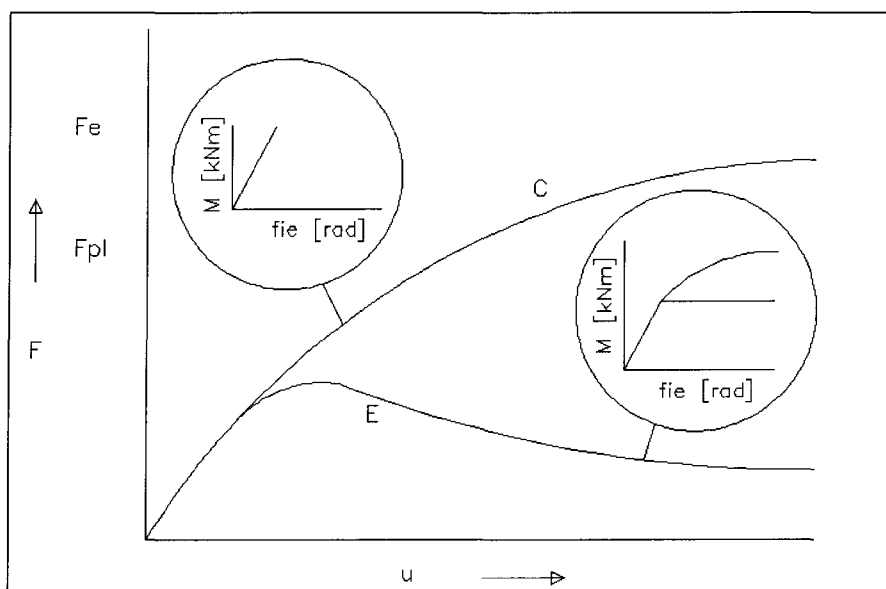
4.2 Toetsingscriteria

De maatgevende bouwhoogtes wordt bepaald aan de hand van een aantal criteria. Naar gelang het karakter van de berekening dienen de afzonderlijke criteria te worden getoetst. In hoofdstuk 9 wordt hierop verder ingegaan. De criteria zijn afgeleid van de verbindingskarakteristieken die in hoofdstuk 3 zijn besproken.

Aan de hand van het type berekening worden zeven controles verricht. In afbeelding 4.3 wordt het verband aangegeven tussen de krommen C en D (van afbeelding 4.1), en de moment-rotatiekarakteristiek van de verbindingen. De controles worden in deze paragraaf uitgewerkt.

Tabel 4.2: Berekeningstypologie en controle

controles	uit te voeren berekening	
	FL	FNL
1. moment dwarschakel-staander	■	
2. dwarskracht dwarschakel-staander	■	■
3. moment langschakel-staander	■	■
4. dwarskracht langschakel-staander	■	■
5. verankering	■	■
6. pen	■	■
7. staander	■	■
8. hoekverdraaiing (verbinding)		■
9. schoor	■	■



Afbeelding 4.3: F-u diagram bij berekeningstypen

1. Optredend moment in aansluiting dwarsschakel-staander

Alleen bij fysisch-lineair rekenen dient de aansluiting dwarsschakel-staander te worden onderzocht. Het optredend moment van de aangenomen lineaire moment-rotatiecapaciteit dient te worden vergeleken met de moment-rotatiekarakteristiek van Layher. In afbeelding 4.2 zou bij een stijfheid van 52 kNm/rad een moment van 0.3 kNm het maximaal toelaatbare moment zijn.

Dit leidt tot de volgende vergelijking:

$$M_d/M_{u,d} < 1 \quad \left[\quad 4.3 - 1 \quad \right]$$

Waarin:

M_d het moment op de aansluiting dwarsschakel-staander in rekenwaarde is

$M_{u,d}$ het uiterste optredende opneembare moment van de aansluiting dwarsschakel-staander is

2. Optredende dwarskracht in aansluiting dwarsschakel-staander

$$V_{rep}/V < 1 \quad \left[\quad 4.3 - 2 \quad \right]$$

Waarin:

V_{rep} de representatieve dwarskracht op de rozet is

V de opneembare dwarskracht van de rozet is en 12 kN bedraagt

De dwarskracht is bij onderhoudssteigers is in de praktijk laag. Hierdoor komt dit criterium te vervallen.

3. Optredend moment in aansluiting langsschakel-staander

De controle dient zowel bij fysisch lineaire als fysisch niet-lineaire berekeningen te worden verricht. In hoofdstuk 5 wordt uitgaande van het moment-rotatiediagram van Layher een lineaire veerconstante afgeleid. Het opneembaar moment van de aansluiting bedraagt 0.6 kNm. In hoofdstuk 9 wordt dit moment gecontroleerd. Het moment wordt nergens overschreden, waardoor dit criterium komt te vervallen.

4. Optredende dwarskracht in aansluiting langsschakel-staander

Evenals punt 2 is de dwarskracht bij de langsschakel laag. Hierdoor komt dit criterium te vervallen.

5. Verankering

De verankering kan een uiterste reactiekracht opnemen van 6 kN (rekenwaarde). Hierbij kan de verankeringsbuis afschuiven van de staander (drukbelasting) of kan de verankeringsaansluiting (plug) uit de gevel worden getrokken (trek). Dwarskrachten worden in de toetsing niet meegenomen.

Dit leidt dit tot de volgende vergelijking:

$$F_d/F_{u,d} < 1 \quad \left[4.3 - 3 \right]$$

Waarin:

F_d de belasting is op de verankering in rekenwaarde

$F_{u,d}$ de opneembare belasting is van de verankering of afschuifbelasting van de staander en 6 kN bedraagt

6. Penverbinding (tussen de staanders)

Het moment dat door de penverbinding overgebracht kan worden (1.4 kNm) is geringer dan het maximaal opneembare moment van de staander (2.1 kNm). Voor de controle hiervan zijn twee mogelijkheden. De penverbinding kan zich op willekeurige plaatsen bevinden waardoor de doorsnedecapaciteit verminderd (immers het opneembare moment door de pen is lager dan deze van de staander).

De locatie van de penverbinding wordt na afloop van de berekening bepaald. Uitgaande van de momentlijn wordt bepaald waar de penverbinding kan worden gesitueerd (bijvoorbeeld op een momentennulpunt).

In de praktijk kan de penverbinding, uitgaande van de systeemmaten van de staander, zich overal bevinden, en dient er dus wel degelijk rekening mee te worden gehouden.

Nadat de maatgevende bouwhoogte op basis van dit criterium bepaald is, wordt de maatgevende bouwhoogte op basis van de staander bepaald (het pen-criterium wordt dan genegeerd).

Dit leidt tot de volgende vergelijking:

$$M_d/M_{u,d} < 1 \quad \left(4.3 - 4 \right)$$

Waarin:

M_d het optredend moment op de pen in rekenwaarde
 $M_{u,d}$ het uiterst opneembaar moment van de pen (1.4 kNm)

Opmerking:

Indien de maatgevende bouwhoogte wordt bepaald door de pen-verbinding, wordt de maatgevende bouwhoogte door de staander (zie volgend punt) ook vermeld. Dit wordt mede gedaan om het verschil tussen de beide bezwijkcriteria te bekijken.

In vergelijking (4.3-3) zijn geen normaalkrachten opgenomen. De normaalkrachten worden via het oplegvlak tussen de staanders afgevoerd.

7. De staanders

De steigerbuis van de staander dient te worden gecontroleerd.

De controle van de sterkte vindt plaats met behulp van de volgende vergelijking (NEN 6770, artikel 11.3.2, vergelijking 11.3-31):

$$\beta_0 \left(\frac{M_{y;s;d}}{M_{N;V;y;u;d}} \right)^{\alpha_1} + \beta_1 \left(\frac{M_{z;s;d}}{M_{N;V;z;u;d}} \right)^{\alpha_2} \leq 1 \quad \left[\text{4.3 - 5} \right]$$

Waarin:

$M_{y;s;d}$ de rekenwaarde is van het buigend moment om de y-as

$M_{z;s;d}$ de rekenwaarde is van het buigend moment om de z-as

$\beta_0 = \beta_1 = 1$ (doorsnede klassen 1 en 2 (NEN 6770 vergelijking 11.3-46)

$\alpha^1 = \alpha^2 = 2$

$$M_{N;V;y;u;d} = 1.04 * M_{y;pl;d} \left(1 - \left(\frac{N_{s;d}}{N_{pl;d}} \right)^{1.7} \right) \quad \left[\text{4.3 - 6} \right]$$

Waarin:

$M_{y;pl;d}$ de rekenwaarde is van het buigend moment om de y-as met betrekking tot de plastische capaciteit.

$$M_{y;pl;d} = f_{y;d} * W_{y;pl} \quad \left[\text{4.3 - 7} \right]$$

Bij Layher steigerbuis bedraagt $M_{y;pl;d}$ $6.53 * 10^3 * 320 = 2.1$ kNm

$W_{y;pl}$ is het plastisch weerstandsmoment om de y-as ($6.53 * 10^3$ mm³);

$N_{s;d}$ is de rekenwaarde van de normaalkracht ten gevolge van de belasting;

$N_{pl;d}$ is de rekenwaarde van de normaalkracht met betrekking tot de plastische capaciteit;

$$N_{pl;d} = A * f_{y;d} \quad (N_{pl;d} = 453 * 320 = 145 \text{ kN}) \quad \left[\text{4.3 - 8} \right]$$

Vergelijking (4.3-6) mag worden toegepast als:

$$V_{z;s;d} < 0.25 * V_{z;pl;d} \quad \left[\text{4.3 - 9} \right]$$

$$V_{pl;d} = 0.368 * A * f_{y;d} \quad \left[\text{4.3 - 10} \right]$$

Uitgaande van een oppervlak van 453 mm² en de verhoogde vloeispanning van 320 N/mm² bedraagt de dwarskrachtscapaciteit ($V_{pl;d}$) $0.368 * 453 * 320 = 53$ kN. Vergelijking (4.3-8) dient gecontroleerd te worden.

$$M_{N;V,z,u;d} = M_{z;pl;d} \quad \left[\begin{array}{l} 4.3 - 11 \end{array} \right]$$

Mits er aan de volgende vergelijkingen worden voldaan:

$$V_{y;s;d} < 0.25 * V_{y;pl;d} \quad \left[\begin{array}{l} 4.3 - 12 \end{array} \right]$$

$$\text{en} \quad N_{s;d} < 1,0 * a_1 * N_{pl;d} \quad \left[\begin{array}{l} 4.3 - 13 \end{array} \right]$$

Uitgaande van $a_1 = 0.5$ leidt dit tot de vergelijking
 $N_{s;d} < 72.5 \text{ kN}$ (dit zal in de praktijk zeker het geval zijn)

De voorwaarden (4.3-11) en (4.3-12) moeten worden gecontroleerd.

Als aan deze voorwaarden wordt voldaan wordt vergelijking (4.3-4):
(Let op: deze vergelijking invullen in kNm).

$$\left(\frac{M_{y;s;d}}{1.04 * 2.1 * \left(1 - \left(\frac{N_{s;d}}{N_{pl;d}}\right)^{1.7}\right)} \right)^2 + \left(\frac{M_{z;s;d}}{M_{z;pl;d}} \right)^2 \leq 1 \quad \left[\begin{array}{l} 4.3 - 14 \end{array} \right]$$

8. De hoekverdraaiing (fie)

Indien gerekend wordt met een bi- of multi-lineair moment-rotatiediagram bedraagt de maximaal opneembare hoekverdraaiing 0.08 rad. Daarna wordt ervan uitgegaan dat de verbinding bezwaken is.

De moment-rotatiediagrammen (zoals deze door Layher) gegeven zijn, tolereren een maximale hoekverdraaiing van 0.13 rad.

Opmerking:

Uit de berekening van hoofdstuk 9 blijkt dat de hoekverdraaiing beperkt blijft tot ca. 0.05 rad. Er wordt van uitgegaan dat bij dergelijke geringe rotaties een tweede-orde berekening nauwkeurig genoeg is.

Bij deelanalyses zijn berekeningen gemaakt met de optie "nlgeom on" (bij het niet-lineair rekenen worden rotaties meegenomen). De resultaten waren nagenoeg hetzelfde.

9. Schoor

Bij de schoor dient de optredende axiaalkracht alsmede de aansluitingskarakteristiek te worden onderzocht. Uit de berekeningen blijkt dat de belasting in de schoor zeer gering is. Het criterium wordt derhalve niet meegenomen.

Hoofdstuk 5:

Modellering

5.1 Modellering

Voor het bouwen van het elementenmodel zijn onder meer de volgende punten van belang:

1. De keuze van het elementtype voor het modelleren van steigerbuizen en verbindingen en de benodigde netfijnheid.
2. Het modelleren van excentriciteiten in de verbindingen.
3. Het inbrengen van het imperfectiepatroon aan de hand van de bepaalde knikvorm (na het maken van de eigenwaarde-berekening).

De elementverdeling van de te modelleren onderdelen is van belang voor de berekeningen. Er dienen voldoende elementen aanwezig te zijn om de betreffende berekeningen nauwkeurig te maken. Het onnodig toepassen van elementen kan leiden tot een onnodig lange rekentijd.

Als eerste worden de te gebruiken elementen besproken die toegepast gaan worden in het model.

5.2 Elementen en materiaaleigenschappen

Bij het modelleren worden er twee typen elementen toegepast: balk- en veerelementen.

3 Balkelementen:

Het BEAM 4 – element wordt gebruikt voor het modelleren van de spindel, de steigerbuis en “oneindig” stijve stukjes in de verbindingen (er wordt van uitgegaan dat de statische eigenschappen vijf maal groter zijn als deze van steigerbuis). Tabel 5.1 geeft een overzicht van de gebruikte elementeigenschappen.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de gebruikte balkelementen.

Tabel 5.1: Balkelementen

	element	d	t	A	$I_{y/z}$	I_t
spindel	BEAM 4	36.00	6.30	589.00	82447.96	164895.92
steigerbuis	BEAM 4	48.30	3.20	453.00	114600.00	229200.00
stijf element	BEAM 4	241.50	16.00	2265.00	580000.00	1160000.00

eenheden [mm; mm²; mm⁴]

▪ Veerelementen:

1. Het *COMBIN 40 - element* is een veerelement dat een veer karakteristiek van één vrijheidsgraad weergeeft (rotatie of translatie). De veer karakteristiek kan worden gelimiteerd door een bovengrens (hierdoor ontstaat een bi-lineaire veer karakteristiek). Bij een aansluiting waarbij er in meerdere vrijheidsgraden een veer moet worden gemodelleerd, dient dus per vrijheidsgraad een veer te worden gemodelleerd.

In het onderzoek wordt het *COMBIN 40* element gebruikt als rotatie- en translatieveer, echter alleen bij eigen-waarde-berekeningen. De waarde van de veerconstante is ontleend aan het niet-lineaire moment-rotatiediagram van Layher.

2. Een *COMBIN 39* element kan een multi-lineaire moment-rotatiediagrammen worden ingevoerd. Dit element is gebruikt bij alle sterkte berekeningen.

In het onderzoek is aanvankelijk gebruik gemaakt van het *COMBIN 40* element, en pas bij de sterkteberekeningen gebruik gemaakt van het *COMBIN 39* element. Het verdient aanbeveling om bij het gebruik van veerelementen het *COMBIN 39* elementen toe te passen.

Voor de modellering van het element zijn twee knopen nodig, die op identieke plaats gesitueerd zijn (het element heeft derhalve een lengte van 0 mm). Indien tussen de knopen meerdere vrijheidsgraden doorgesloten worden, wordt dit aangegeven. Er wordt van uitgegaan dat bij toepassing als rotatieveer, de verplaatsingen in x, y, en z-richting tussen de knopen van het *COMBIN* element altijd worden gekoppeld. De rotaties worden weergegeven volgens de betreffende karakteristiek.

De veren kunnen eveneens door *BEAM 4* elementen worden gemodelleerd, mits op de juiste wijze toegepast (zie bijlage 1). De keuze om *COMBIN* - elementen toe te passen berust op de relatieve eenvoud van de modellering en de mogelijkheid om niet-lineair moment-rotatiediagrammen aan te brengen.

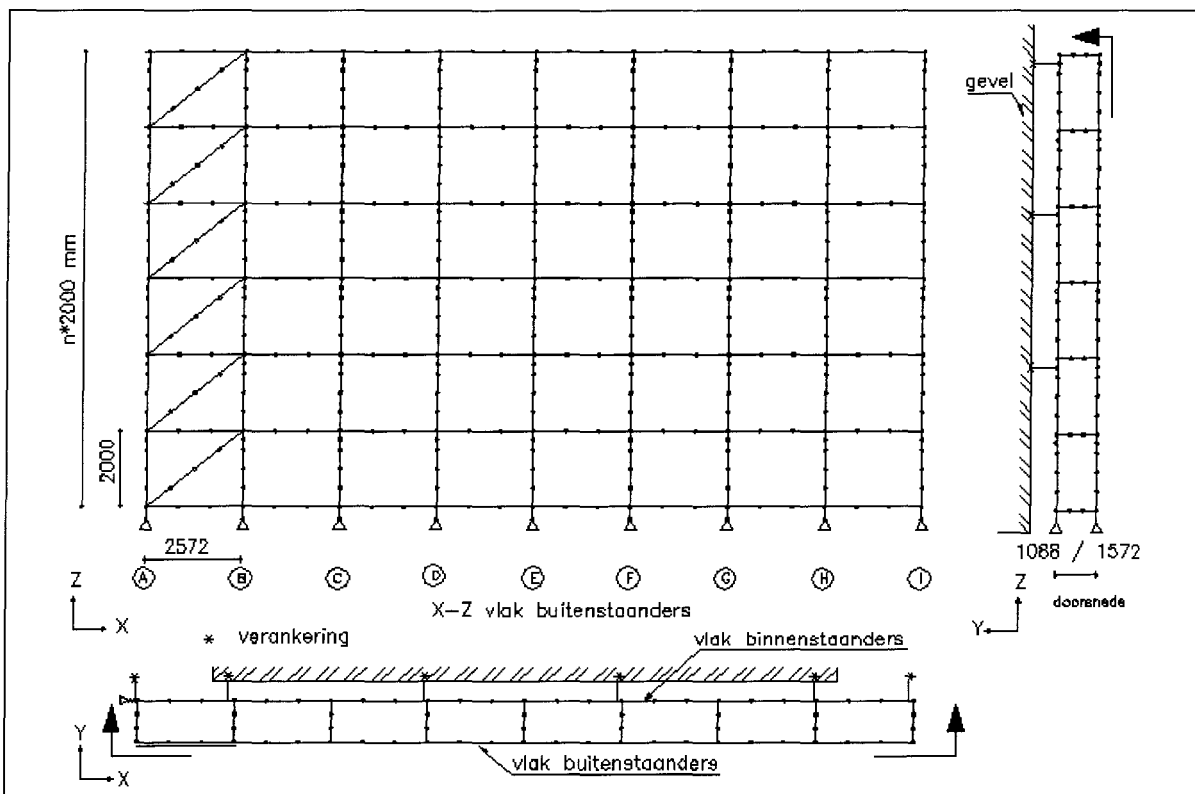
5.3 Globaal model

De afbeeldingen 5.1 en 5.2 geven een overzicht van de aanzichten van de steiger. In afbeelding 5.1 is het vlak van de buitenstaanders afgebeeld, in afbeelding 5.2 het vlak van de binnenstaanders.

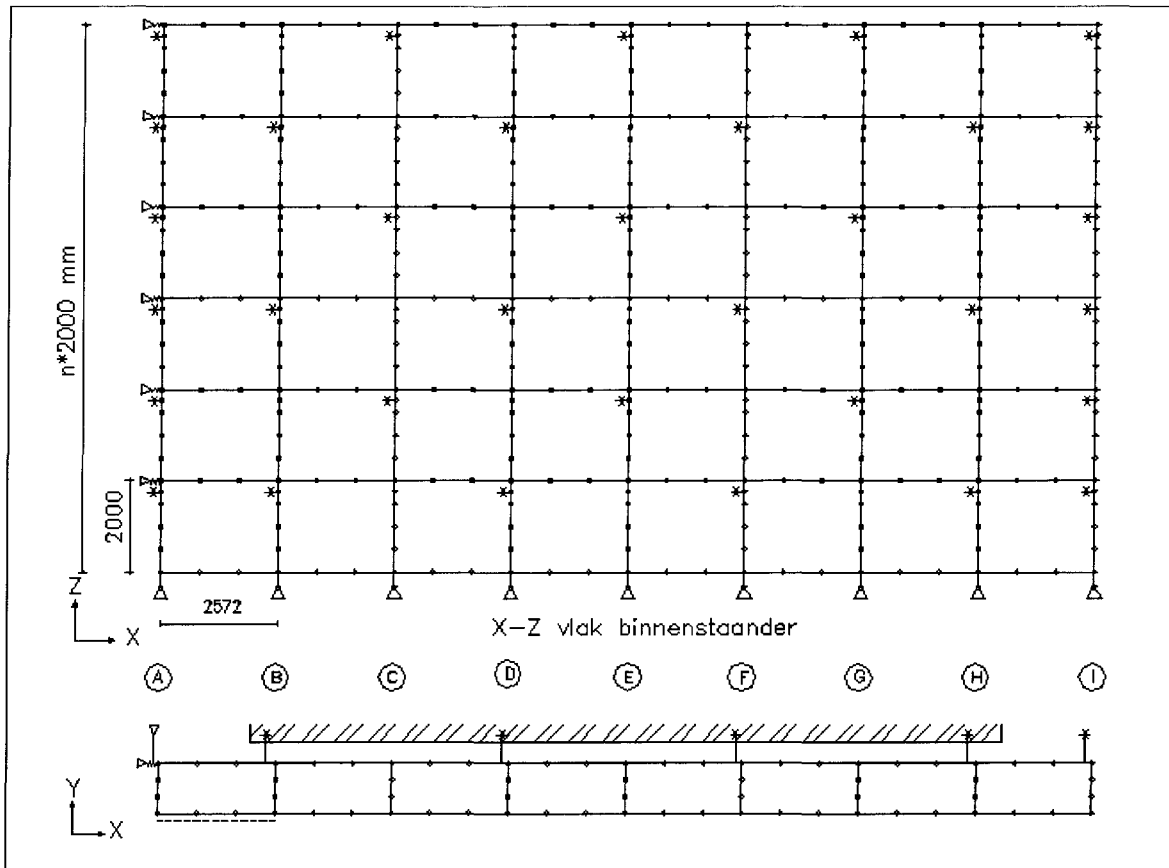
Het model is opgebouwd uit acht vakken van 2572 mm. Doordat hiermee circa 20 m gevel in de steigers kan worden gezet, wordt deze breedte beschouwd als acceptabel. Het eerste vak is aan de kant van de buitenstaanders geschoord (deze schoren dienen voor het stabiliseren van het buitenvlak). Bij de diepte van het steigermodel wordt uitgegaan van diepten van 1088 mm en 1572 mm. De slaghoogte bedraagt 2000 mm, het aantal slagen (de totale hoogte van het model) dat wordt gemodelleerd is variabel en wordt bepaald in overeenstemming met het type en het doel van de berekening.

De steiger wordt conform het 2-slagpatroon verankerd (zie paragraaf 2.5). Ter plaatse van de assen A en I wordt de staander iedere slag verankerd. Er wordt van uitgegaan dat de steiger op deze plaats gekoppeld is aan de steiger dwars op de getekende steiger.

Het steigerraamwerk wordt opgebouwd uit BEAM 4 elementen, met de karakteristiek van steigerbuis. Achtereenvolgens wordt de modellering van de staanders, spindels, schakels, dwarsschakels en kortelingen alsmede de specifieke aansluitingen besproken.



Afbeelding 5.1: Steigervlak buitenstaanders

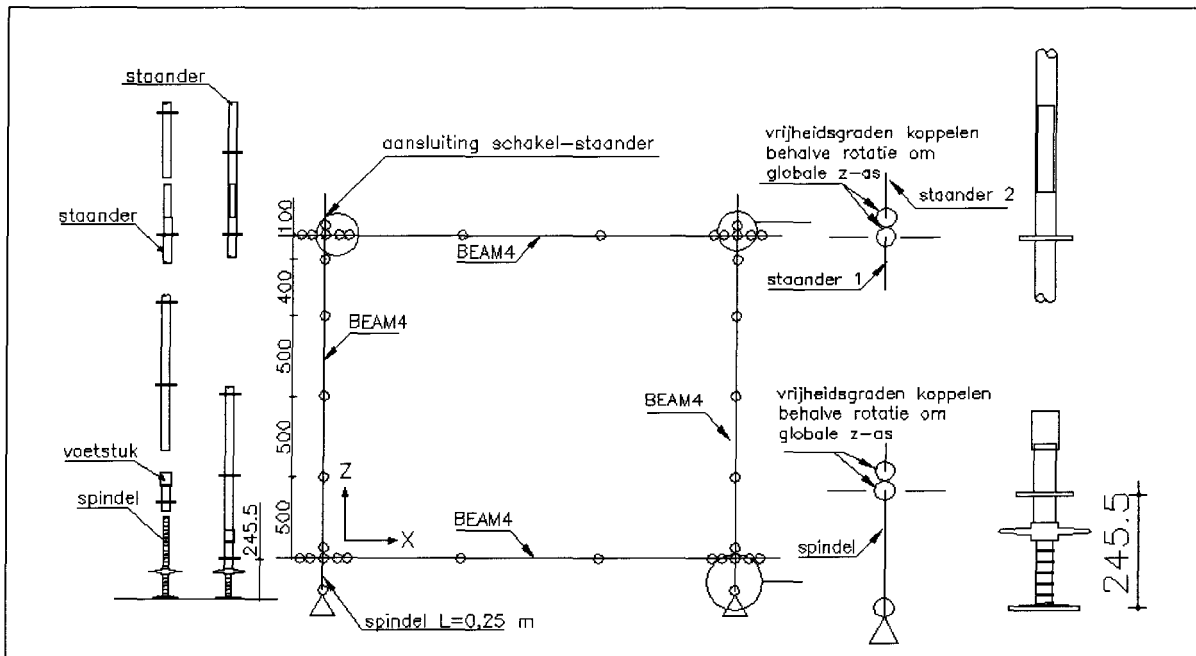


Afbeelding 5.2: Steigervlak binnenstaanders

3 Spindels

De spindels worden gemodelleerd als balkelementjes BEAM 4 met een lengte van 245 mm (variabel van 50 tot 245 mm) en een doorsnede van 36*6.3 mm (zie afbeelding 5.3 en 3.7). De oplegging ter plaatse van het grondvlak wordt geschematiseerd tot een driedimensionaal bolscharnier. Het voetstuk, dat de verbinding vormt tussen de spindel en de staander, wordt als een geheel beschouwd met de spindel.

In de verbinding tussen de spindel en de bovenliggende staander worden alle vrijheidsgraden gekoppeld, met uitzondering van de rotatie om de globale z-as.



Afbeelding 5.3: Spindel, staander en schakel

3 Staanders

De staanders zijn opgebouwd uit steigerbuis en worden verbonden door een penverbinding (een starre verbinding waarin alle vrijheidsgraden behalve rotatie om de globale z-as (torsie) zijn gekoppeld, zie ook paragraaf 3.2.2).

De staanders worden opgebouwd uit vijf knopen en gemodelleerd met *BEAM 4* elementen (zie afbeelding 5.3). De binnen- en buitenstaanders zijn opgebouwd uit vier balkelementen. De knoop onder de slaghoogte dient om de binnenstaanders desgewenst te verankeren. Doordat er bij de geometrisch niet-lineaire berekeningen een imperfectiepatroon moet worden aangebracht worden alle staanders (gemakshalve) met hetzelfde aantal knopen gemodelleerd. Er wordt van uitgegaan dat de verdeling van de staander in minstens vier elementen zowel voor een eigenwaarde als een tweede-orde-berekening tot een aanvaardbaar kleine discretisatiefout leidt.

De aansluiting tussen verschillende staanders wordt gemodelleerd door het eindpunt van de ene staander en het beginpunt van de andere staander met twee knopen te modelleren. In deze knopen worden alle vrijheidsgraden gekoppeld, uitgezonderd de rotatie om de globale z-as.

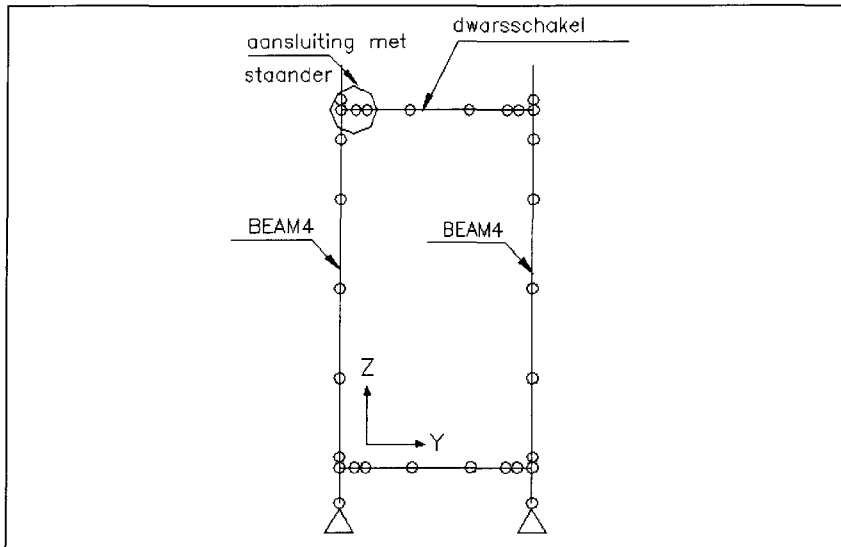
3 Langsschakels

De langsschakels zijn opgebouwd uit balkelementen met de karakteristiek van steigerbuis en aan de uiteinden verbindingselementen (zie ook afbeelding 5.3).

De balkelementen zijn zodanig geplaatst, dat de plaats van de knopen overeenkomt met de ligging van de kortelingen.

- Dwarsschakel

De dwarsschakels zijn opgebouwd uit drie balkelementen met de karakteristiek van steigerbuis en aan de uiteinden verbindingaansluitingen. De twee middelste knopen van de dwarsschakel zijn primair bedoeld om een voldoende nauwkeurige oplossing te krijgen (zie ook afbeelding 5.4).



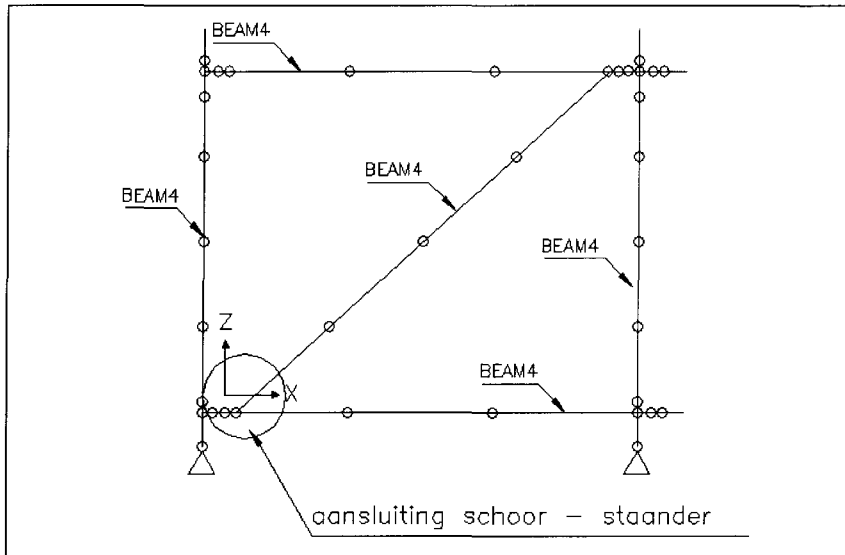
Afbeelding 5.4: Opbouw steiger z-y vlak

- Kortelingen

De kortelingen worden gemodelleerd door pendelstaafjes. Hiervoor worden BEAM 4 elementen genomen. De scharnieren worden gemodelleerd door de vrijheidsgraden tussen de knopen selectief door te koppelen (alle vrijheidsgraden behalve de vrijheidsgraden om de x-as dus niet).

3 Schoor

De schoor bestaat uit steigerbuis dat aan de uiteinden scharnierend verbonden is met verbindingselementen. De schoor is opgebouwd uit vier elementen (zie afbeelding 5.5).



Afbeelding 5.5: Opbouw geschoord vak

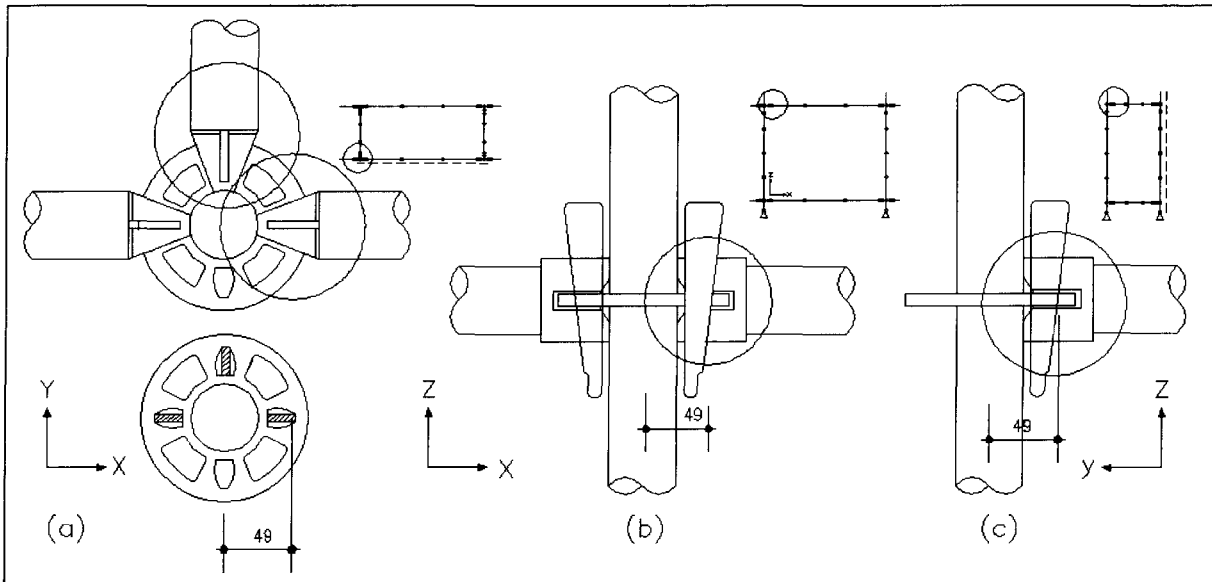
Het hout van de werkvloer en de leuningen worden buiten de modellering gehouden. De motivatie hiervoor is dat het hout van de werkvloer slechts door wrijving invloed kan uitoefenen op de stabiliteit en deze factor derhalve moeilijk te kwantificeren is. Leuningen leveren voor het langsvlak een wezenlijk deel van de stijfheid, mits de aansluiting voldoende stijf is. Voor het model wordt in het langsvlak deze additionele stijfheid niet meegenomen.

5.4 Verbindingen

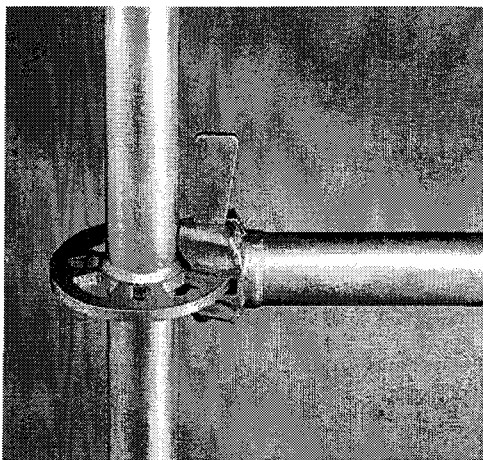
5.4.1 Modelling van de verbinding schakel-staander

Omschrijving

De aansluiting van de schakel met de staander komt tot stand door de langsschakel met een spie vast te slaan aan de rozet. De spie bevindt zich in het aansluitelement dat gelast is aan de langsschakel (afbeelding 5.6). Afbeelding 5.7 geeft een foto van de aansluiting weer.



Afbeelding 5.6: Aanzichten aansluiting schakel-staander



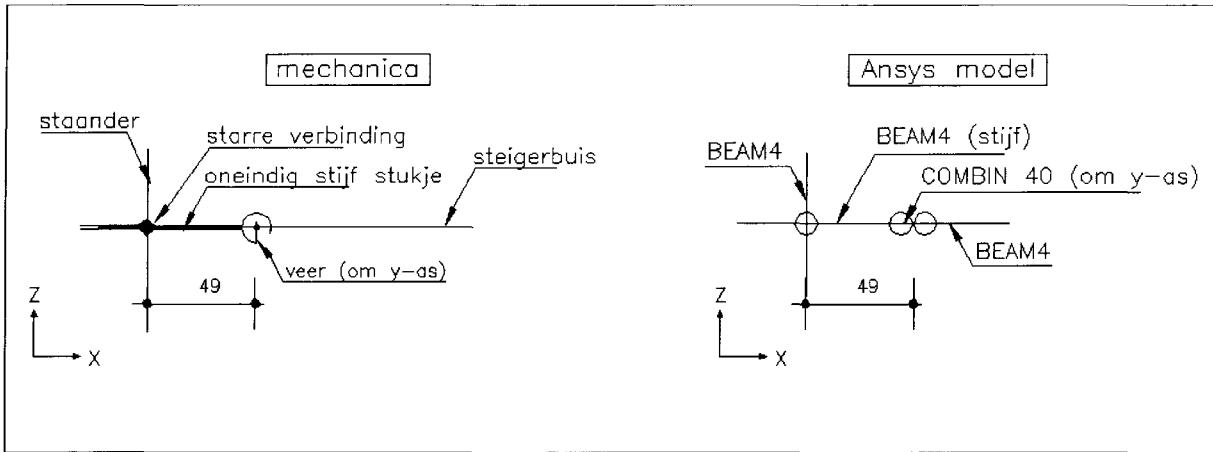
Afbeelding 5.7: Aansluitingsdetail (bron: Layher)

Afbeeldingen 5.8 a t/m c geeft een overzicht van de verbindingen.

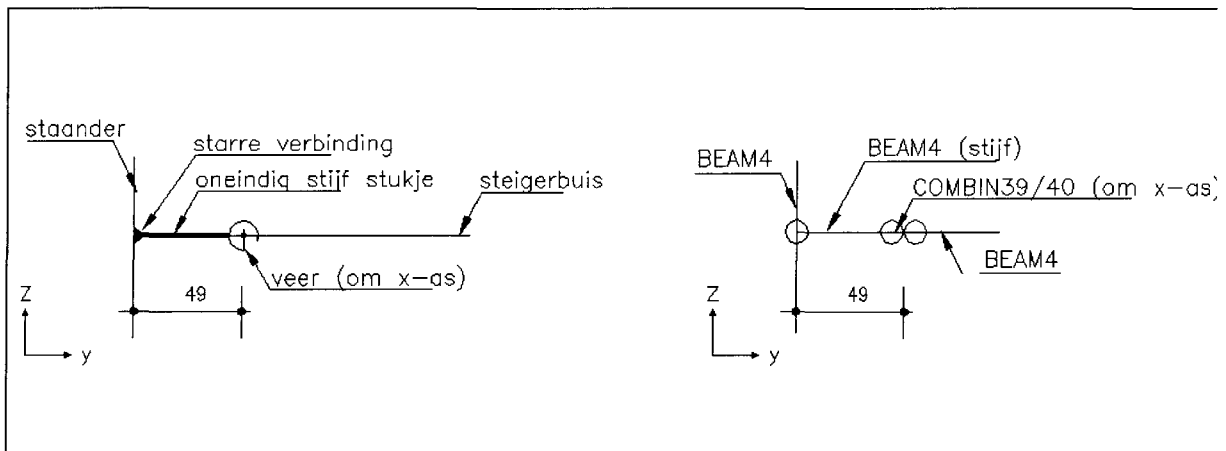
Afbeelding 5.8 a geeft de detaillering van de modellering van de aansluiting langsschakelstaander, afbeelding 5.9 b de aansluiting dwarsschakelstaander en afbeelding 5.9 c een bovenaanzicht van de modellering.

De verbinding wordt gekarakteriseerd door een afstand van het hart van de staander naar de verende aansluiting en een veerelement, met de veer karakteristiek voor de betreffende vrijheidsgraad. De afstand van het hart van de staander tot de plaats van de veer, wordt overbrugd door een stijf elementje.

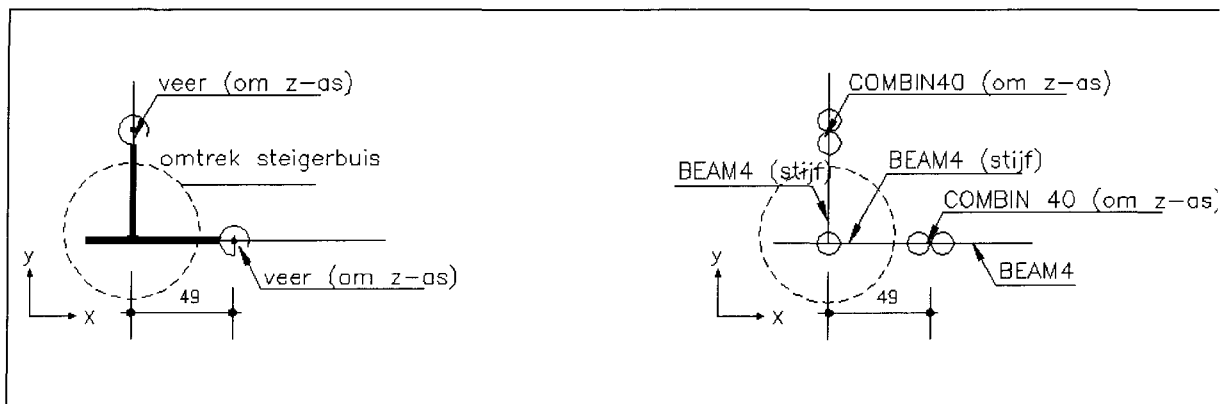
Er worden twee veerelementen gemodelleerd, één voor de rotatie om de globale y-as (bij de langsschakel) of de globale x-as (bij de dwarsschakel) en één voor rotatie om de globale z-as. Tussen de knopen wordt de torsie gekoppeld (rotatie om de globale x-as bij de langsschakels en globale y-as bij dwarsschakels). De plaats van de veerelementen is gelijk aan de locatie waar Layher zijn opgegeven veer karakteristiek voor bepaald heeft, waardoor de moment-rotatiediagrammen van Layher gebruikt kunnen worden (zie afbeelding 3.17). Dit komt overeen met de werkelijke rand van het verbindingsgat (gemeten in het bovenvlak).



a: Modelling lansschakel-staander



b: Modelling dwarsschakel-staander



c: Bovenaanzicht modellering

Afbeelding 5.8: Modelling aansluiting schakel-staander

Aan de hand van het niet-lineaire moment-rotatiediagram van Layher zijn (bi) lineaire moment-rotatiediagrammen afgeleid. In afbeelding 5.9 is de door Layher bepaalde (minst stijve) curve gegeven.

Veerstijfheid verbinding dwarsschakel-staander

Bij de moment-rotatiekarakteristiek van de dwarsschakel wordt uitgegaan van de moment-rotatiekarakteristiek van Layher. Alle veerstijfheden die worden toegepast worden hiervan afgeleid (zie afbeelding 5.9). Dit hangt af van het type berekening dat wordt gedaan. Bij een eigenwaarde-berekening zijn de verbindingskarakteristieken lineair. Bij de niet-lineaire berekening kan er uit worden gegaan van zowel bi- als multi-lineaire momentrotatiediagrammen.

Er wordt hierbij van uitgegaan dat de instabiliteit loodrecht op het steigervlak optreedt (dit wordt in hoofdstukken 8 en 9 nader uitgewerkt) waardoor de invloed van de veerstijfheid om de globale x-as bepalend is.

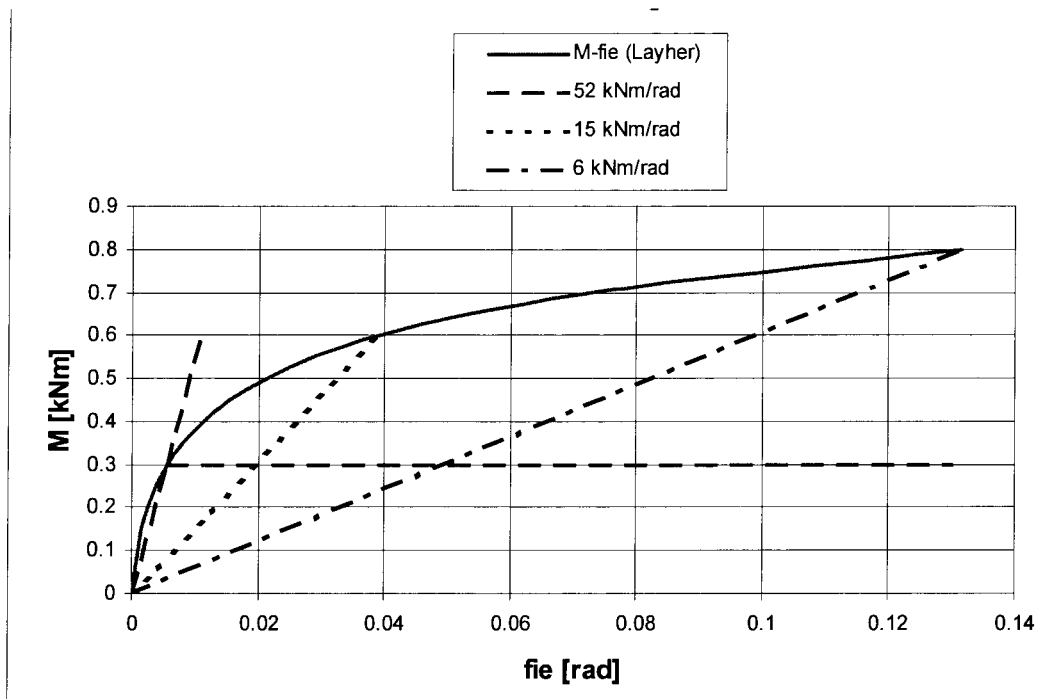
Veerstijfheid verbinding langsschakel-staander

Bij het bepalen van de rotatiestijfheid van de verbinding van de langsschakel wordt ervan uitgegaan dat de verbinding maximaal belast wordt met een moment van 0.6 kNm (afbeelding 5.9). De rekensom is gemaakt bij een volledige inklemming ($1/12 \cdot q \cdot L^2$), een breedte van 1.0 m en een belasting van 1.5 kN/m^2 , met een veiligheid van 1.5 ($1/12 \cdot 1.5 \cdot 0.5 \cdot 1.5 \cdot 2.57^2$). Indien de (niet-)lineaire stijfheden van Layher aan worden gehouden, bedraagt het lineaire stijfheidsverloop bij een moment van 0.6 kNm 15 kNm/rad . In hoofdstuk 9 is gecontroleerd dat het moment de waarde 0.6 kNm niet overschrijdt. De stijfheden zijn uitgezet in afbeelding 5.9.

Het moment-rotatiediagram om de globale z-as voor beide aansluitingen is niet bekend. In tabel 5.2 is een overzicht van lineaire veerconstanten gegeven, voor de waarde van de stijfheid om de z-as wordt 1 kNm/rad aangenomen. Om een stabiel model te krijgen mag deze waarde geen 0 kNm/rad zijn.

Tabel 5.2: Afgeleide (lineaire) veerconstanten

	vrijheidsgraad	lineaire veerconstanten (kNm/rad)
langsschakel	om y-as	6 tot 52
dwarsschakel	om x-as	6 tot 52
schakels	om z-as	1



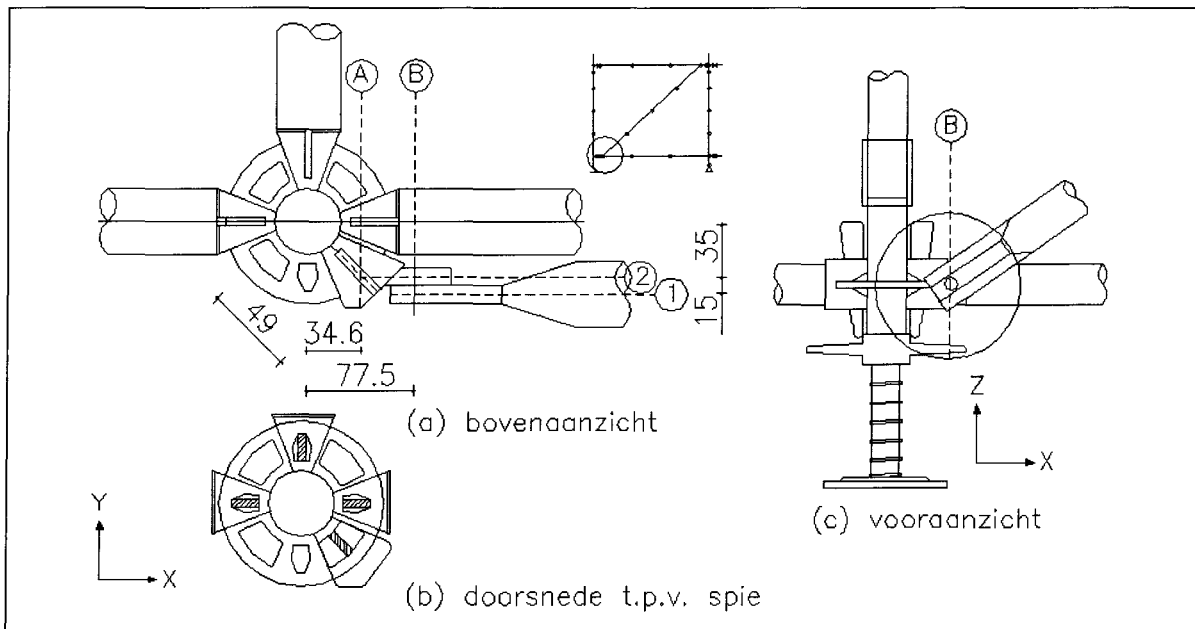
Afbeelding 5.9: Moment-rotatie diagrammen

5.4.2 Modelling aansluiting schoor-rozet

Bij de bevestiging van de schoor worden de verbindingselementen aan de rozet gekoppeld (zie afbeelding 5.10).

Het verbindingselement is opgebouwd uit een element voor de aansluiting met de spie, met aangekoppeld verbindingsdeel waaraan de schoor scharnierend is bevestigd. De verbinding met de rozet bevindt zich onder een hoek van 45° ten opzichte van de globale x-as (zie ook punt A2). Er wordt van uitgegaan dat de belasting op de schoor gering is. De schoor mag uiterlijk worden belast met een gebruiklast van 5.9 kN).

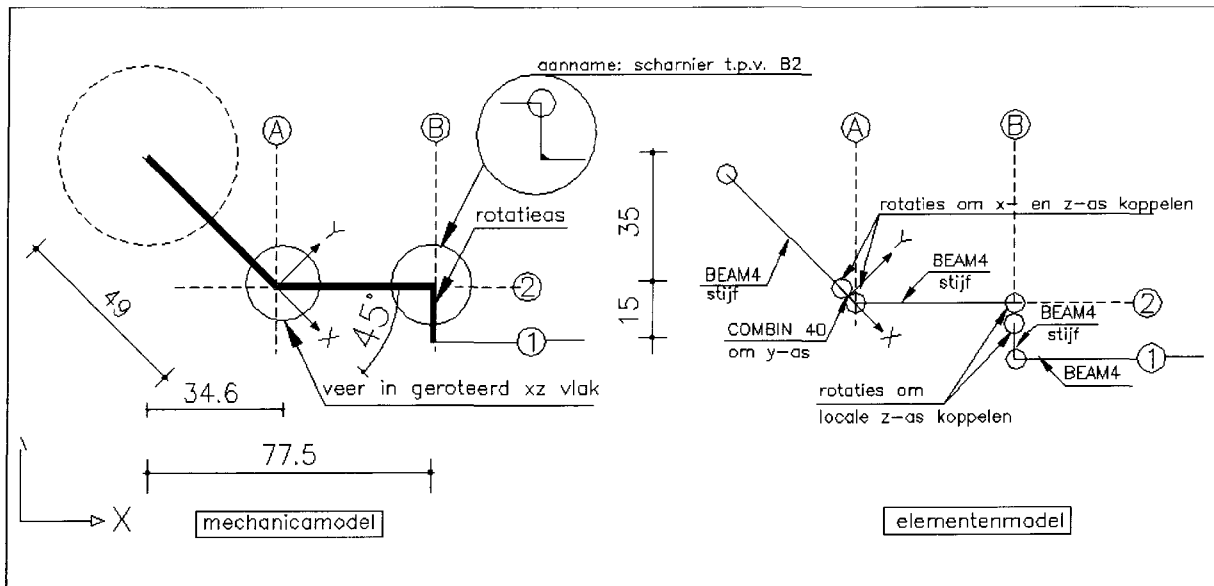
Doordat de spie-verbinding in principe hetzelfde is als de verbinding van de schakel met de staander wordt ervan uitgegaan dat de karakteristiek van de rotatieveer overeenkomstig is met de verbindingskarakteristiek van de schakel-staander aansluiting.



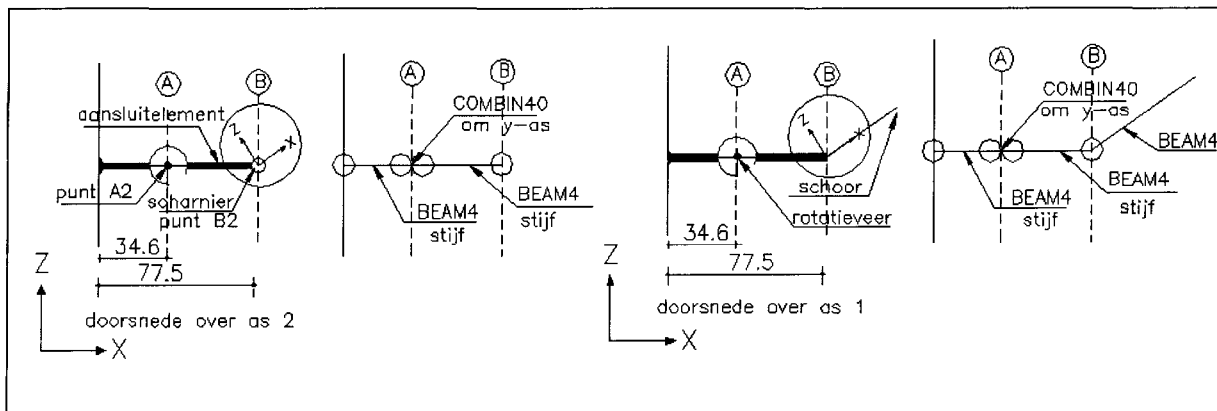
Afbeelding 5.10: Aanzichten aansluiting schoor

Bij de modellering wordt het verbindingselement met de staander derhalve op nagenoeg identieke wijze gemodelleerd als bij de langsschakel (het lokale assenstelsel wordt ter plaatse van de beide knopen 45° gedraaid). Afbeelding 5.11 en 5.12 illustreren de modellering. Er wordt een veerelement gemodelleerd (ter plaatse van punt A2) ten behoeve van rotatie om de lokale y-as in het geroteerde x-y vlak). De rotaties om de overige lokale vrijheidsgraden (x- en z-as) worden gekoppeld.

In tegenstelling tot de aansluiting van de schakels met de staander wordt er geen rotatieveer gemodelleerd om de globale z-as. Er wordt van uitgegaan dat de krachten in de schoor laag zijn. Bij geringe belasting in de globale x-richting zal aanwezige speling uit de aansluiting verdwijnen, waardoor de schoor vastgedrukt wordt tegen de staander.



Afbeelding 5.11: Modelling schoor (bovenaanzicht)



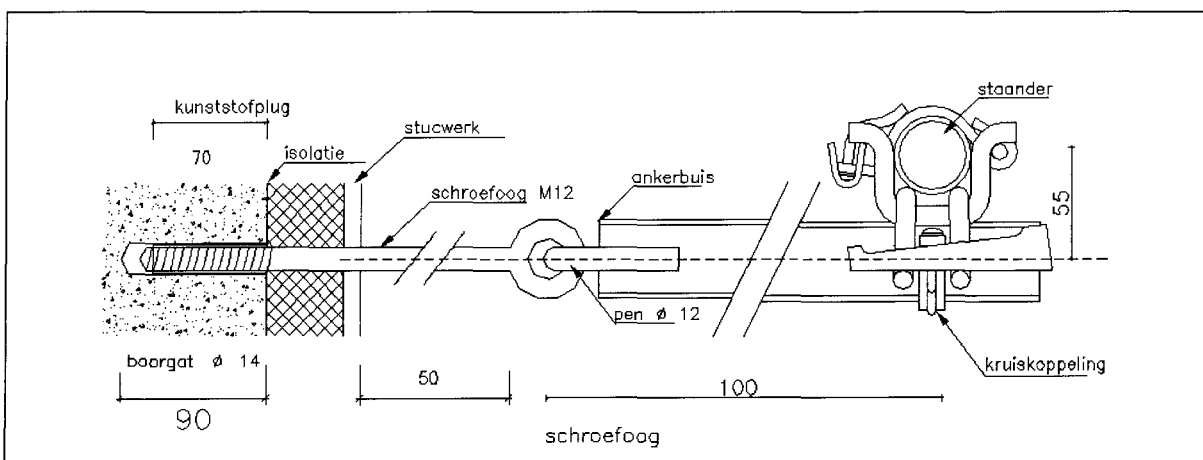
Afbeelding 5.12: Modelling schoor (zij-aanzichten)

Van de rotatieveer naar het aangrijppunt van de schoor wordt een stijf elementje gemodelleerd, waar het element van de schoor excentrisch aan wordt bevestigd. De excentriciteit van 15 mm (van het aansluitpunt van de schoor naar het element van punt B2 naar B1) wordt eveneens overbrugd met een stijf elementje. De scharnierende aansluiting van de schoor wordt gecreëerd door een extra knoop ter plaatse van het aansluitpunt te modelleren (ter plaatse van punt B2, op het aansluitingspunt zijn dus twee knopen gemodelleerd). Van de beide knopen wordt het lokale assenstelsel geroteerd om de y-as onder een hoek van 36° (conform de hoek van de schoor ten opzichte van de lokale x-as). Van de knopen worden alleen de translatie- en de rotatievrijheidsgraden om de globale x-as doorgekoppeld (door de aansluitingsvoorwaarden resteert er dus een scharnier om de lokale y en z-as). Het scharnier om de lokale (=globale) y-as correspondeert met de constructie, het scharnier om de lokale (=globale) z-as is een aanname.

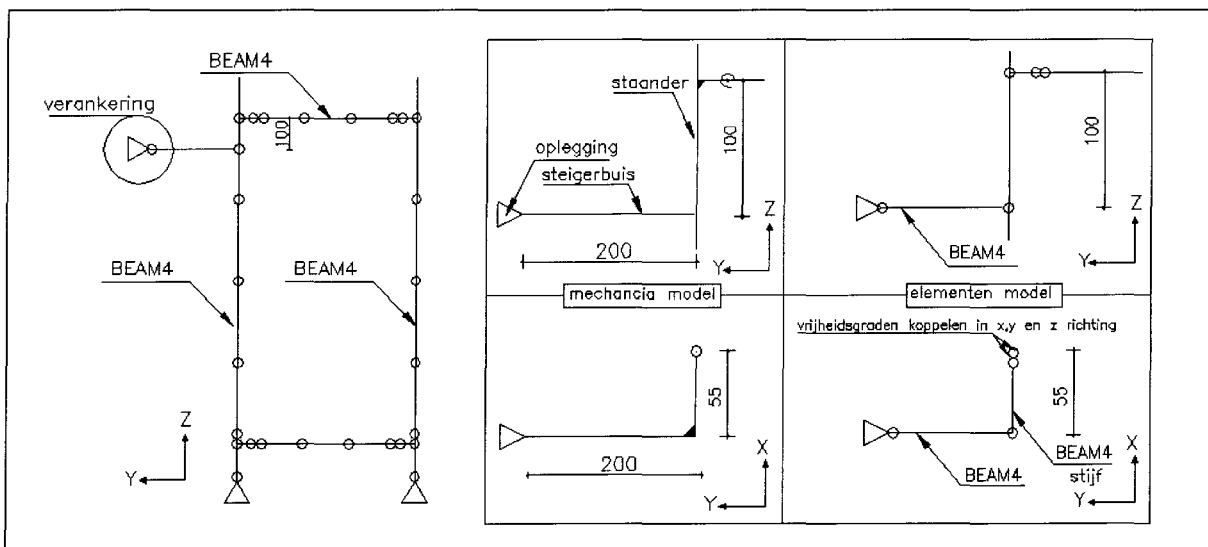
5.4.3 Verankering

Bij de verankering van de steiger wordt op een afstand van 100 mm onder de werkvloer aan de staander een verankeringsbuis met een kruiskoppeling gekoppeld. De verankeringsbuis wordt aan de gevel bevestigd (afbeelding 5.13).

De modellering vindt plaats door een balkelement (BEAM 4) excentrisch te verbinden met het balkelement van de staander met behulp van een stijf elementje (afbeelding 5.14). Er wordt een extra knoop gemodelleerd op de plaats waar het stijve elementje aan de staander wordt gemodelleerd (er worden geen rotaties doorgelaten, waardoor de aansluiting om alle richtingen scharnierend is). De oplegreacties ter plaatse van de gevel dienen na afloop van de berekening te worden gecontroleerd. De oplegging ter plaatse van de gevel is in het model torsiestijf aangenomen (dit mede om een slecht geconditioneerde matrix te voorkomen).



Afbeelding 5.13: Bovenaanzicht verankering

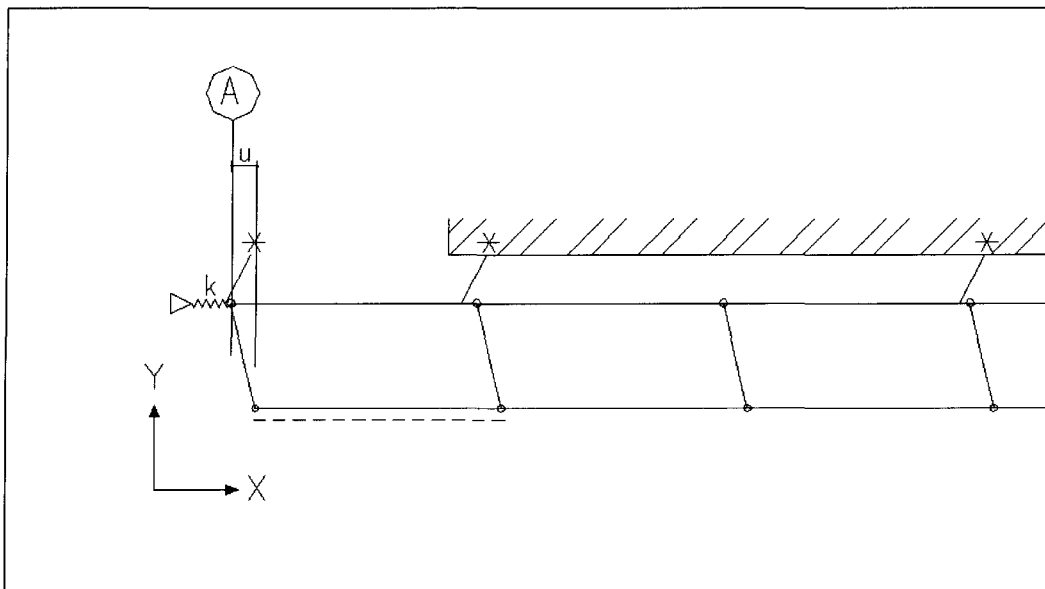


Afbeelding 5.14: Modellering verankering

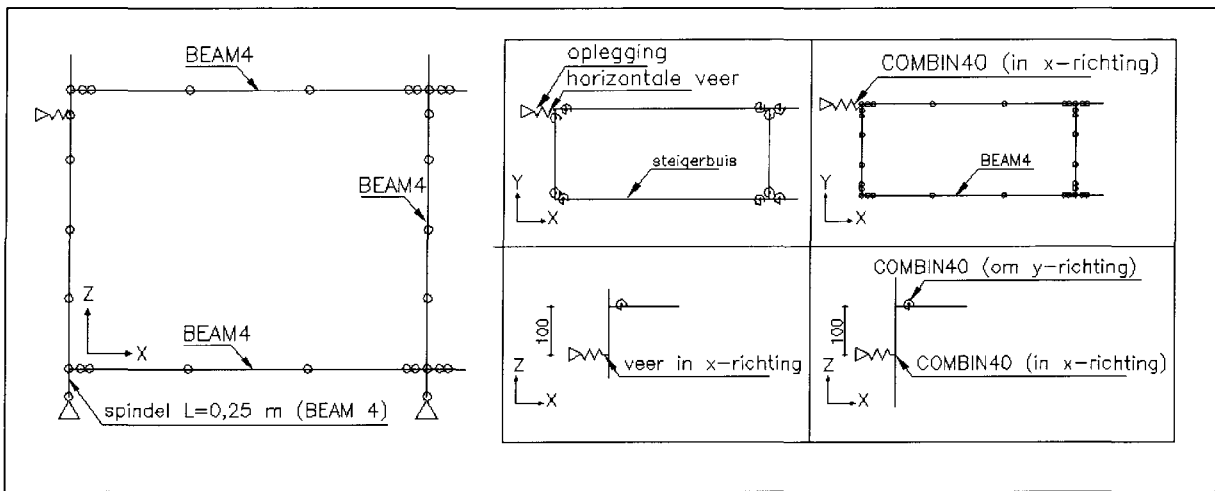
Het vlak van de binnenstaanders ontleent zijn stijfheid aan de volgende onderdelen:

1. De stijfheid van de verbinding van de verankering met de staander. Deze stijfheid is afhankelijk van de kruiskoppeling. Deze waarde is variabel en hangt af van kwaliteit en de toestand van de koppeling (de stijfheid van de aansluiting van de verankeringen wordt in het onderzoek niet direct gemodelleerd).
2. De stijfheid die ontstaat doordat de steiger (zie afbeelding 5.1 as A) gekoppeld wordt aan de steiger die er loodrecht op staat.
3. Het vlak kan verstijfd worden door de verankeringen bijvoorbeeld schuin te plaatsen.

De stijfheid die opgesomd is in bovenstaande punten wordt verdisconteerd in een additionele translatieveer in x-richting (met constante k). In de afbeelding 5.15 worden de aansluitpunten voorgesteld als scharnieren, waardoor de stabiliteit van het vlak afhangt van de veer. Deze veer wordt per slag eenmalig aangebracht ter plaatse van as A en wel 100 mm onder de slag (zie afbeelding 5.16), ter plaatse van het aangrijpen van de verankeringen. De veerconstante (k) is aangenomen als 40 kN/mm (stijfheid berekend conform de verplaatsing uit 2572 mm steigerbuis bij een belasting F). Uit deelanalyses bleek dat het vlak van de binnenstaanders bij kleine veerstijfheden uitknikte. Reeds bij een veerstijfheid van 50 N/mm bleek het vlak van de binnenstaanders niet meer uit te knikken. De invloed van de veerconstante wordt niet nader onderzocht.



Afbeelding 5.15: Stijfheid additionele veer



Afbeelding 5.16: Modelling additoele veer

Hoofdstuk 6:

Richtlijnen en belastingen

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van normen, waaruit belastingen worden bepaald die specifiek op steigers zijn gericht, de te bepalen belastingen geanalyseerd. Normen waarmee belastingen kunnen worden opgesteld zijn onder andere:

NEN-EN 12811 Steigers – Prestatie-eisen en algemeen ontwerp

NEN 6702 Belastingen en vervormingen

6.2 Belastingen en combinaties

De belastingen en belastingcombinaties worden besproken aan de hand van de volgende normen: NEN-EN 12811 [2] en NEN 6702 [3]. Doordat er geen wettelijke norm voorhanden is, wordt van de beschikbare normen besproken wat de betreffende norm vermeldt over belastingen en combinaties.

NEN-EN 12811 [2] is een voorlopige Europese norm voor systeemsteigers. De norm richt zich mede op beklede systeemsteigers. Evenals de richtlijnen voor traditionele steigers geeft de norm ontwerprichtlijnen voor systeemsteigers tot een hoogte van 30 m.

Bij de belastingcombinaties wordt onderscheid gemaakt in:

- 3 de gebruikstoestand (hierbij wordt er op steiger gewerkt)
- 3 de buiten-gebruikstoestand (hierbij wordt er niet op de steiger gewerkt)

Bij de belastingen wordt er onderscheid gemaakt in:

- 3 eigen gewicht
- 3 nuttige belasting
- 3 windbelasting

De belastingfactoren verschillen per norm (of richtlijn).

6.2.1 Eigen gewicht constructie

Het eigen gewicht wordt berekend door de belasting ten gevolge van het toegepaste materiaal te berekenen. Voor de bepaling van het gewicht van de constructieonderdelen van Layher is gebruik gemaakt van [5].

Tabel 6.1 geeft van een Layher systeemsteiger een overzicht van de belastingen. In tabel 6.2 wordt het gewicht van het hout verrekend naar lijnlasten op de kortelingen of systeemschakels. Bij de belaste breedte is uitgegaan van een derde van de systeemmaat ($1/3 \cdot 2572 \text{ mm} = 860 \text{ mm}$).

Het eigen gewicht van de stalen constructiedelen wordt meegegeenerd met het model (door het materiaal een gewicht mee te geven). Dit geldt eveneens voor het gewicht van de aansluitingsonderdelen (spie etc).

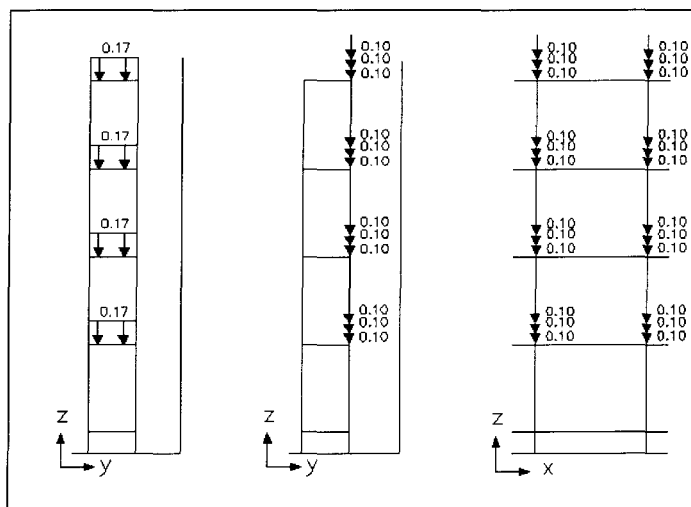
Afbeelding 6.1 geeft de gewichtsverdeling op het model weer. Er is een gelijkmatig verdeelde belasting van 0.17 kN/m afgebeeld ter plaatse van de kortelingen (en dwarsschakel). Het gewicht van de leuning en een kantplank is verdisconteerd in een puntlast van 0.1 kN .

Tabel 6.1: Eigen gewicht

Eigen gewicht constructiedelen		
staander	0.0487	kN/m
schakel	0.0356	kN/m
spiekop (gelast aan schakel)	0.005	kN
korteling	0.0356	kN/m
systeemaansluiting (gelast aan korteling)	0.013	kN
kruis koppeling	0.013	kN
hout	0.2	kN/m ²
zeil	0.05	kN/m ²

Tabel 6.2: Lijnlast op kortelingen en systeemschakels

hout [kN/m ²]	belaste breedte [m]	belasting [kN/m] op korteling / systeemschakel
0.20	0.86	0.17



Afbeelding 6.1: Permanente belasting (op model)

6.2.2 Nuttige belasting (werkbelasting)

De nuttige belasting wordt bepaald door de steiger klasse (1 t/m 6 zie tabel 6.3). Meestal bedraagt de belasting 1.5 kN/m^2 (bij een onderhoudssteiger) of 3 kN/m^2 bij een metselsteiger. In tabel 6.4 zijn belasting verrekend naar lijnlasten.

Bij de belastingcombinaties wordt een extra veiligheid aangebracht uitgaande van de nuttige belasting. Bij de "in gebruik" situatie wordt de belasting geteld over extra werkvloeren (dit ondanks de opgave dat slechts één werkvloer belast mag worden). Dit aantal is afhankelijk van de toepassing van de steiger of de eisen die aan de steiger gesteld worden.

Indien een steiger buiten gebruik is, wordt er doorgaans gerekend met een deel van de nuttige belasting waarin het gewicht van tijdelijk opgeslagen materialen verrekend is. Dit wordt uitgedrukt in het percentage van de belasting (behorende bij de belastingklasse).

Tabel 6.5 geeft een overzicht van de toe te passen nuttige belasting uitgaande van de normen. NEN-EN 12811 gaat bij de situatie waarbij de steiger buiten gebruik is uit van een percentage van de nuttige belasting conform de belastingklasse. Bij een onderhoudssteiger (klasse 2) zou 35% van de nuttige belasting gerekend moeten worden.

Tabel 6.3: Nuttige belasting per klasse

klasse	Q (kN/m^2)
1	0.75
2	1.50
3	2.00
4	3.00
5	4.50
6	6.00

Tabel 6.4: Nuttige belasting over een werkvloer

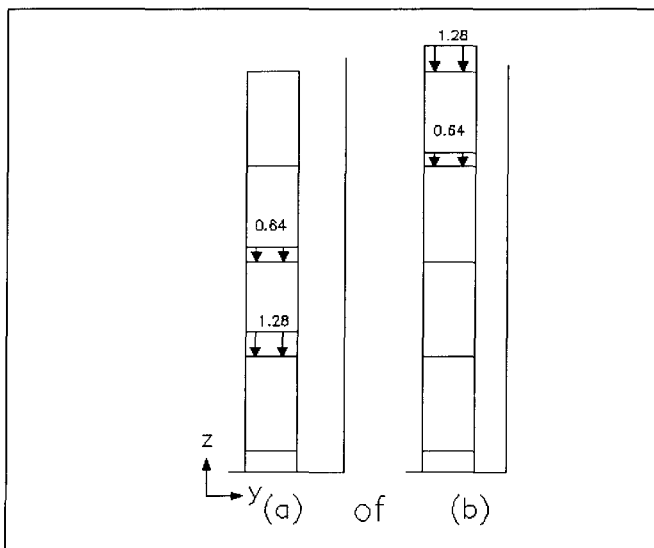
werkbelasting [kN/m^2]	belaste breedte [m]	belasting [kN/m] op korteling / systeemschakel
1.50	0.86	1.29

NEN 6702 geeft een algemene beschouwing over veranderlijke belastingen en momentane waarden (reductiefactoren) van deze belastingen. Indien één vloer als extreem wordt aangemerkt, dient de momentane waarde over de belasting op de resterende vloeren te worden genomen. Indien er voor de veranderlijke waarde geen waarde wordt gegeven, mag voor de momentaanfactor nul worden aangehouden (paragraaf 8.1 van NEN 6702). Er worden in het betreffende hoofdstuk geen waarden gegeven voor de belasting op steigervloer of tijdelijke constructies in combinatie met een momentaanfactor.

In het onderzoek wordt uitgegaan van anderhalve werkvloer (één werkvloer volbelast, en de werkvloer daaronder (of daarboven) gelegen met de helft van de belasting) in de gebruikssituatie en een volledig belaste werkvloer (met een gereduceerde veiligheid) in de niet-gebruikssituatie (zie ook tabel 6.5). Afbeelding 6.2 illustreert de nuttige belasting uitgaande van een steiger met 4 slagen.

Tabel 6.5: Nuttige belasting

		nuttige belasting	belasting factoren
NEN 6702	buiten gebruik	nvt	>1.2
	gebruik	nvt	>1.2
NEN-EN 12811 <i>systeemsteigers</i>	buiten gebruik	0% (klasse 1) 35%(2,3) 70%(4,5,6)	1.5
	gebruik		1.5
Onderzoek	buiten gebruik	1 vloer	1.2
	gebruik	1.5 vloer	1.5



Afbeelding 6.2: Nuttige belasting op steiger

6.2.3 Windbelasting

In de normen wordt onderscheid gemaakt in windbelasting in de gebruikssituatie en de niet-gebruikssituatie. Bij de situatie waarin de steiger in gebruik is kan ervoor gekozen worden om met een sterk gereduceerde stuwdruk (0.2 kN/m^2) te rekenen. Hierbij wordt dus gerekend met een waarschijnlijk optredende windbelasting tijdens het werk. In het onderzoek wordt deze belasting niet meegenomen, er wordt van de uitgangspunten van artikel 8.6.1.2 alsmede 8.6.2 van NEN 6702 uitgegaan waarin vermeld staat dat de waarde van ψ nul is. Dat betekent dat indien de vloerbelasting als extreme wordt meegerekend, de windbelasting niet meegenomen wordt.

Bij de situatie waarin de steiger buiten gebruik is, wordt met de extreme windbelasting gerekend. De berekening van de windbelasting zal per norm worden behandeld. Het betreft hierbij de windbelasting loodrecht op de gevel. In hoofdstukken 8 en 9 wordt nader uitgewerkt dat deze richting maatgevend is. In de vergelijking tussen de normen wordt de windbelasting berekend tot een hoogte van 30 m.

6.2.3.1 Windbelasting volgens de NEN-EN 12811

Bij de windanalyse van NEN-EN 12811 is rekening gehouden met het toepassen van netten en bekleding. De windbelasting wordt als volgt bepaald:

$$F_{\perp} = c_s \cdot \sum (c_{f,i} \cdot A_i \cdot P_w) \quad \left[6.2.3.1 - 1 \right]$$

Hierin is:

- F_{\perp} de extreme windbelasting in kN loodrecht op de constructie
- c_s de totale aërodynamische drukcoëfficiënt voor alle krachten loodrecht op de steiger
- $c_{f,i}$ de aërodynamische drukcoëfficiënt behorend bij de doorsnede van de desbetreffende bouwelementen
- A_i het geprojecteerde oppervlak in m^2
- P_w de stuwdruk in kN/m^2

- 3 Coëfficiënt c_s (afbeelding 6.3)
Bij het berekenen van de coëfficiënt c_s wordt onderscheid gemaakt in dichtheid van de bekleding. De waarde van c_s wordt bepaald aan de hand van afbeelding 6.3 (er wordt geen verschil gemaakt in loodrechte richting of evenwijdige richting). Hierin is de factor c_s tegen de dichtheid uitgezet (variabel tussen 1.0 en 0.25). Bij een dichtheid van 1 (steiger volledig bekleed) bedraagt de factor c_s 1. In de grafiek wordt onderscheid gemaakt tussen bekleding met netten en dichtere bekleding (zeil). Als grens wordt een verhouding van de oppervlakten van 80% aangehouden. In afbeelding 6.3 wordt de mogelijkheid geboden iedere oppervlakedichtheid te verdisconteren in de windbelasting. In het onderzoek wordt de belasting aangenomen op een onbekte steiger en wel op de buizen en kantplanken.

De dichtheid wordt als volgt berekend:

$$\varphi_B = A_{B,n} / A_{B,g} \quad \left[6.2.3.1 - 2 \right]$$

Hierin is:

- $A_{B,n}$ de netto oppervlakte van de netten, kantplanken en steigerbuis
 - $A_{B,g}$ het volledige oppervlak van de steiger
- 3 Coëfficiënt c_f
De waarde voor de coëfficiënt c_f bedraagt 1.3 (dit geldt eveneens voor een beklede steiger).
- 3 Het geprojecteerde oppervlak A_i
Het geprojecteerde oppervlak van de kantplanken en buizen. Indien er gerekend wordt met de gebruikstoestand dient er een denkbeeldig windscherm van 0.4 m vanaf de rand van de vloer aangebracht te worden. In het onderzoek wordt hier niet mee gerekend.
- 3 De stuwdruk P_w
De stuwdruk dient bepaald te worden aan de hand van de nationale norm (NEN 6702). De NEN-EN 12811 schrijft een maximale reductie voor van 30% voor tijdelijke bouwwerken.

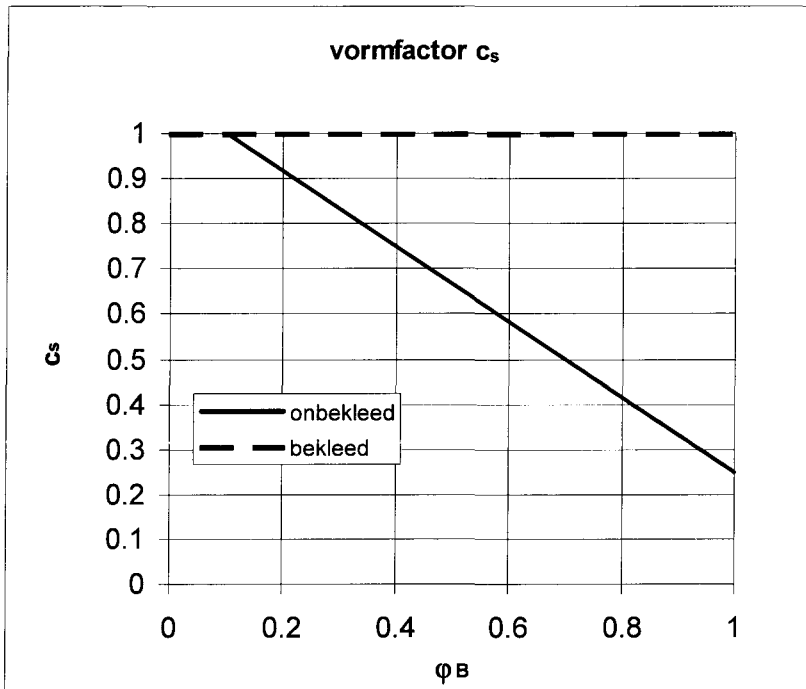
In het onderzoek wordt de windbelasting als gelijkmatig verdeelde belasting op de buizen geplaatst. De belasting uit de leuning en kantplanken wordt door middel van puntlasten op het frame geplaatst. In het onderzoek wordt de windanalyse per m² verricht.

Voor zowel een onbeklede als een beklede steiger bedraagt de belasting per m²:

$$P_{rep} = c_{fi} \cdot P_w \quad \left[6.2.3.1 - 3 \right]$$

Uitgaande van een P_w van 1.43 kN/m² leidt dit tot een representatieve belasting van $1.3 \cdot 1.43 \cdot 0.7 = 1.30$ kN/m².

($c_{fi} = 1.3$; $P_w = 1.43$; 0,7 (reductie = 30%))



Afbeelding 6.3: De vormfactor c_s als functie van de dichtheid

6.2.3.2 Windbelasting volgens NEN 6702

In de opzet van de NEN 6702 wordt uitgegaan van een statistiek die gebaseerd is op een referentieperiode van 50 jaar. De norm biedt de mogelijkheid om zowel open als gesloten constructies te berekenen.

De windbelasting wordt als volgt bepaald:

$$P_{rep} = c_{dim} * c_{index} * c_{eq} * \phi_1 * P_w \quad \left(6.2.3.2 - 1 \right)$$

Waarin:

P_{rep} de windbelasting (loodrecht of evenwijdig) is door winddruk, windzuiging, windwrijving en over- of onderdruk in kN/m^2

c_{dim} een factor is die de afmetingen van een bouwwerk in rekening brengt

c_{index} de windvormfactoren zijn

c_{eq} een drukvereffeningsfactor is

ϕ_1 een factor voor dynamische invloeden is

P_w de extreme waarde van de stuwdruk is

- 3 De factor c_{dim}
De factor reduceert de wind ten einde in rekening te brengen dat de windbelasting niet gelijktijdig optreedt over het hele oppervlak (vlaagfactor). Bij een hoogte van 30 m varieert de waarde van 0.86 tot 0.96 [kN/m^2]. Doordat de windbelasting op een steiger louter lokaal plaatsvindt wordt er met een vlaagfactor van 1.0 gerekend.
- 3 De factor c_{index}
Indien wordt uitgegaan van windbelasting op steigerbuis bedraagt de totale vormfactor 1.2 (de buis is volkomen glad), anders 1.3 (acht- of tienhoek). De factor voor een schijf is 1.2. Deze factor komt overeen met de factor c_f .
Bij een beklede steiger kan de waarde van c_{index} worden berekend door de combinatie van onder- of overdruk (0.3) met druk of zuiging (0.8). De totale factor bedraagt dan 1.1. Het is twijfelachtig er van deze situatie uit mag worden gegaan.
Er wordt gekozen voor de c-waarde van een schijf ($c_{index} = 1.2$). Er wordt uitgegaan van zowel winddruk als windzuiging.
- 3 De factor c_{eq}
De vormfactoren moeten zijn vermenigvuldigd met een drukvereffeningsfactor indien het onderdeel van het bouwwerk bestaat uit twee of meer lagen met daarin ingesloten een of meer luchtlagen. Tenzij door nader onderzoek een andere waarde bepaald is, moet voor c_{eq} de waarde 1 zijn aangehouden. Er wordt derhalve 1,0 aangehouden.
- 3 De factor ϕ_1
Is de vergrotingsfactor die de dynamische invloed van wind in de windrichting van het bouwwerk in rekening brengt. Voor de factor mag de waarde 1 worden aangehouden indien het bouwwerk kleiner dan 50 m en de verhouding h/b minder is dan 5.
Doordat een steiger in de hoogterichting geschoord is wordt er van uitgegaan dat er geen dynamische factoren optreden.

- De stuwdruk P_w

De P_w is de extreme waarde van de stuwdruk, deze is afhankelijk van de hoogte van het gebouw en het windgebied, alsmede de bebouwdheid.

Indien de stuwdruk wordt bepaald aan de hand van de windgebieden van de NEN 6702:

*	Gebied 1:	0.64 – 1.43	[kN/m ²]
	Gebied 2:	0.54 – 1.24	[kN/m ²]
	Gebied 3:	0.46 – 1.06	[kN/m ²]

De extreme windbelasting mag worden gereduceerd (zie artikel 6.6.2 en 5.5.2 NEN 6702) indien het bouwwerk voor de duur van minder dan een jaar gebruikt wordt. De ψ_t factor bedraagt 0.57 (er wordt hierbij uitgegaan van een ψ waarde van 0). Dit leidt tot de volgende stuwdrukken:

*	Gebied 1:	0.36 – 0.80	[kN/m ²]
	Gebied 2:	0.30 – 0.70	[kN/m ²]
	Gebied 3:	0.26 – 0.60	[kN/m ²]

In dit onderzoek wordt ervoor gekozen om uit te gaan van windgebieden I (onbebouwd) en III (bebouwd). Hiervan uitgaande kunnen de verschillen tussen de maximale en minimale windbelasting worden geanalyseerd.

3 Resultaten voor P_{\perp}

Indien de belasting voor een *onbeklede* steiger berekend wordt met een factor c_{dim} met waarde 1.0 en vormfactoren voor een steigerbuis, ($c_{index} = 1.2$) alsmede een stuwdruk van 0.8 kN/m² wordt de vergelijking voor P_{\perp} :

$$P_{\perp} = 1.0 * 1.2 * 1.43 * 0.565 = 0.97 \text{ kN/m}^2$$

($c_{dim} = 1.0$; $c_{index} = 1.2$; $P_w = 1.43 \text{ kN/m}^2$; reductie 0.565)

Indien van een *beklede* steiger wordt uitgegaan:

$$P_{\perp} = 1.0 * 1.2 * 1.43 * 0.565 = 0.97 \text{ kN/m}^2$$

($c_{dim} = 1.0$; $c_{index} = 1.2$; $P_w = 1.43 \text{ kN/m}^2$; reductie 0.565)

De windbelasting per m² blijft derhalve gelijk, bij een onbeklede steiger grijpt de belasting echter alleen op het oppervlak van buizen aan.

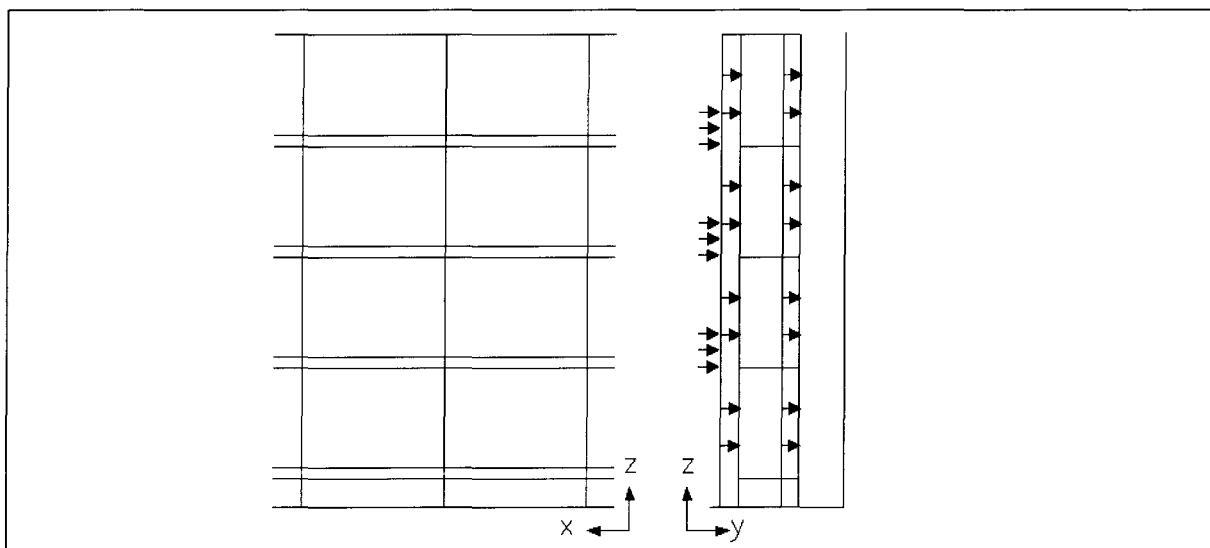
Conclusie

De windbepaling verschilt voornamelijk door het gebruik van een andere tijdelijkheidsfactor. NEN-EN 12811 heeft een tijdelijkheidsfactor van 0.70, NEN 6702 geeft een tijdelijkheidsfactor van 0.57.

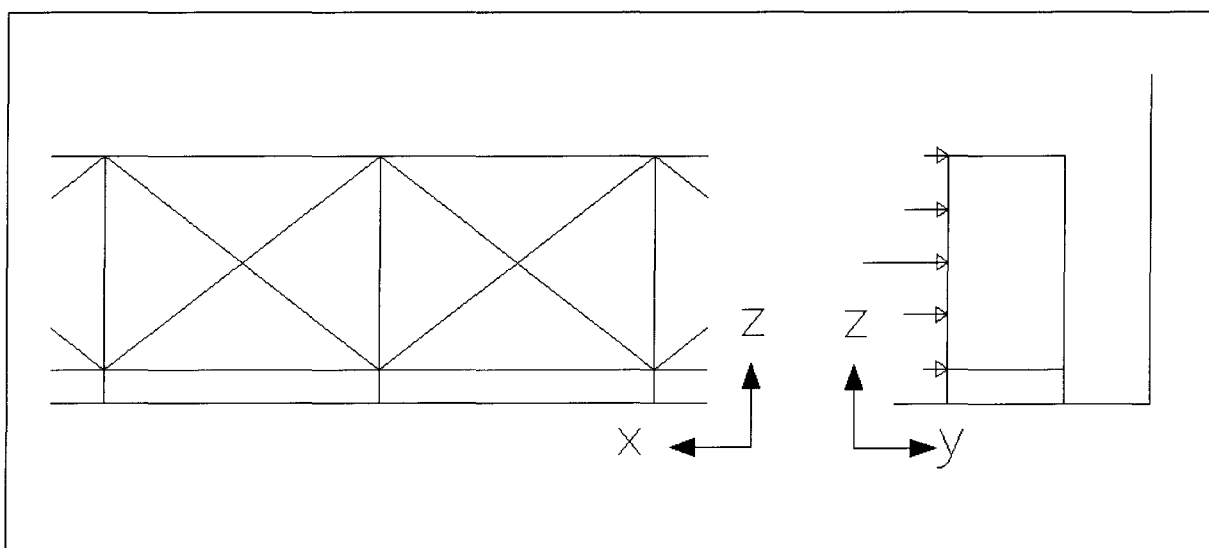
Bij het onderzoek wordt van NEN 6702 uitgegaan (dit komt omdat NEN-EN 12811 als concept uitgegeven is). Afbeelding 6.4 geeft het belastingschema bij een onbeklede steiger.

De belasting grijpt als lijn- en puntlasten aan op de steiger.

Afbeelding 6.5 geeft de belasting bij een beklede steiger. De belasting grijpt als puntlasten aan op het voorvlak.



Afbeelding 6.4: Windbelasting bij onbeklede steiger



Afbeelding 6.5: Windbelasting bij beklede steiger

6.3 Belastingcombinaties

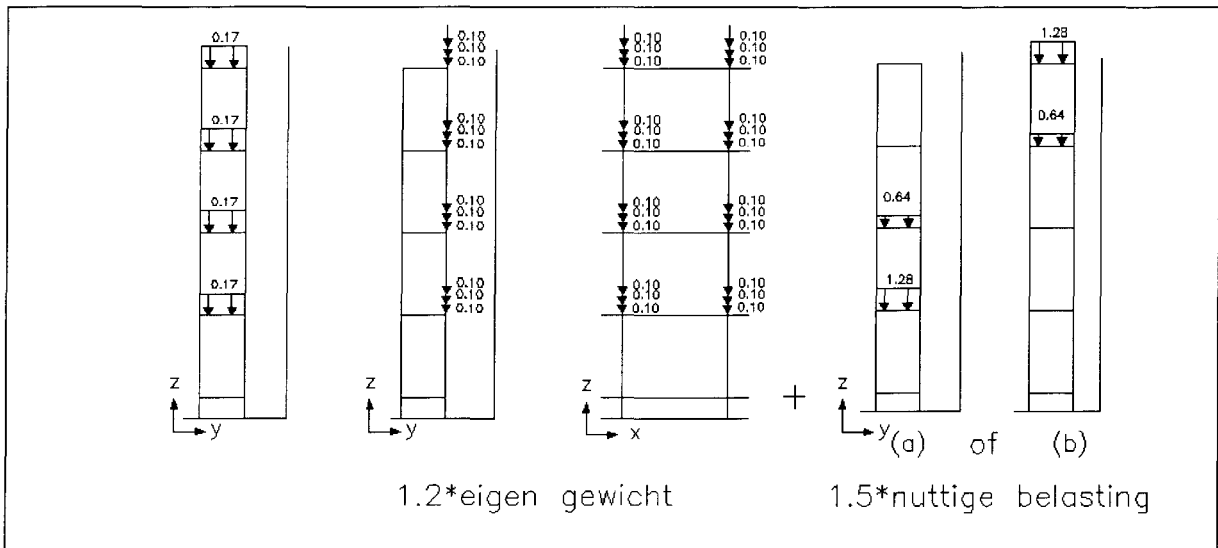
In deze paragraaf worden de representatieve belastingen bepaald (de veiligheidsfactoren zijn 1.0). De veiligheidsfactoren worden bij de berekening toegevoegd.

De combinaties waarmee gerekend wordt verschillen voornamelijk in grootte van de toe te passen belasting. De onderverdeling van gebruik- en niet-gebruiktoestand wordt overal gehandhaafd. Tabel 6.6 geeft de invulling van de belastingcombinaties met betrekking tot dit onderzoek. De veiligheidsfactoren zijn bepaald conform NEN 6702. Bij de gebruikssituatie is er voor een veiligheidsfactor van 1.5 gekozen.

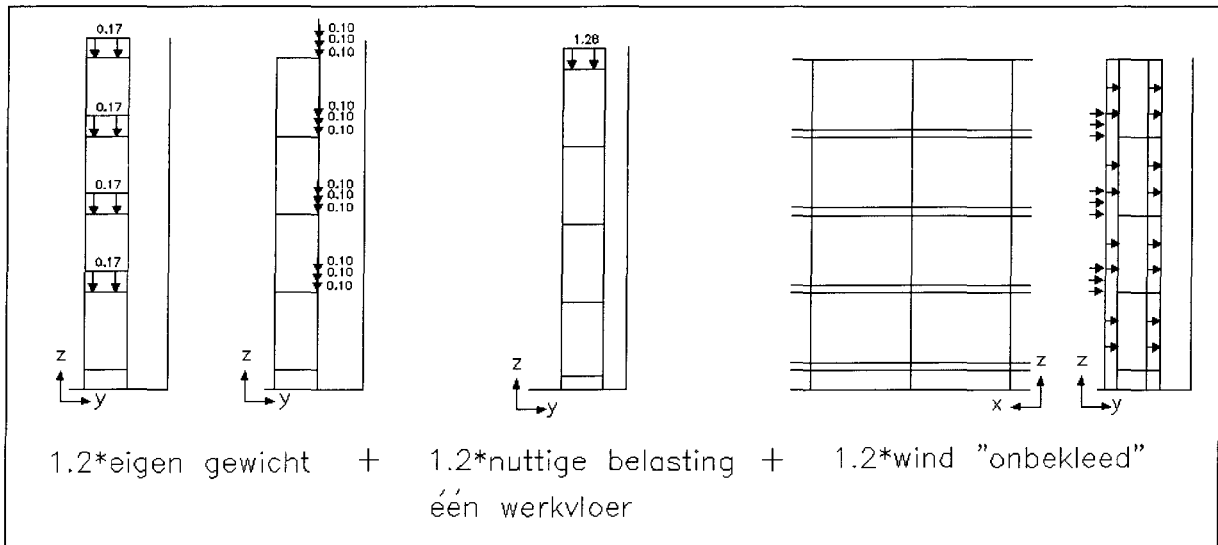
De combinaties zijn in afbeeldingen 6.6 tot en met 6.9 afgebeeld.

Tabel 6.6: Combinaties en belastingen ten behoeve van het onderzoek

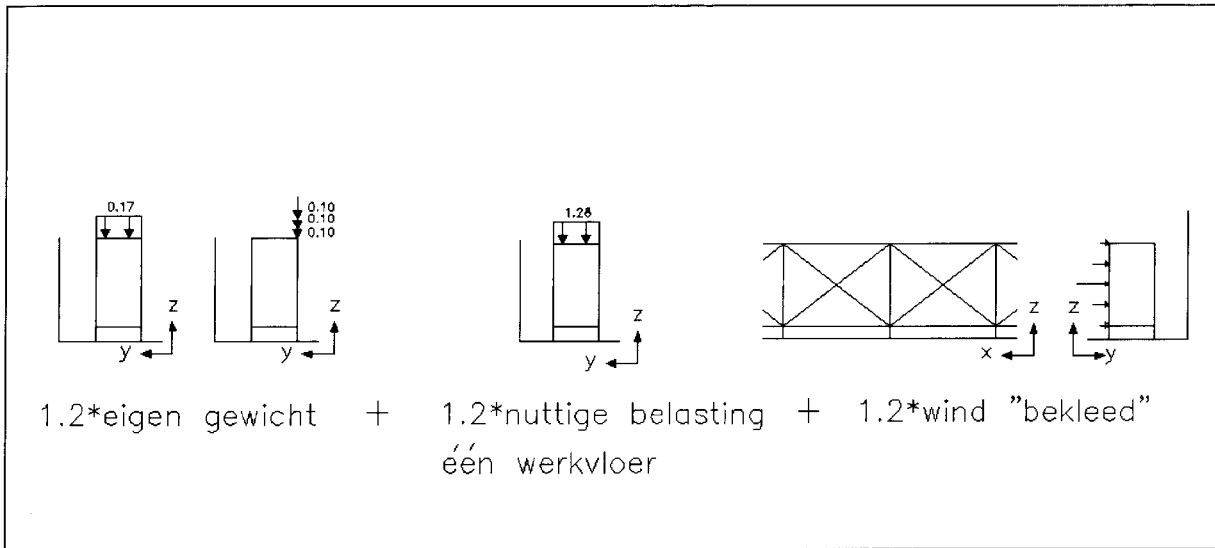
belastingcombinatie	eigen gewicht	γ_g	nuttig	γ_g	veranderlijk	typering	γ_g
gebruikssituatie	gewicht constructie	1.2	1.5 werkvloer	1.5	-	-	-
niet-gebruikssituatie	gewicht constructie	1.2	1 werkvloer	1.2	wind	bekleed / on-bekleed	1.2
gewicht max	gewicht constructie	1.35	-	-	-	-	-



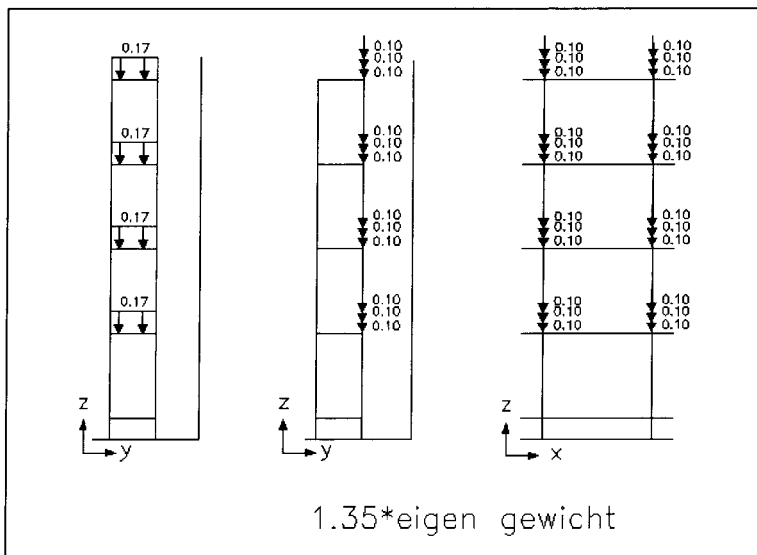
Afbeelding 6.6: Combinatie "nuttige belasting"



Afbeelding 6.7: Combinatie "windbelasting onbekleed"



Afbeelding 6.8: Combinatie "windbelasting bekleed"



Afbeelding 6.9: Combinatie "permanent extreem"

Hoofdstuk 7: Imperfecties

7.1 Inleiding

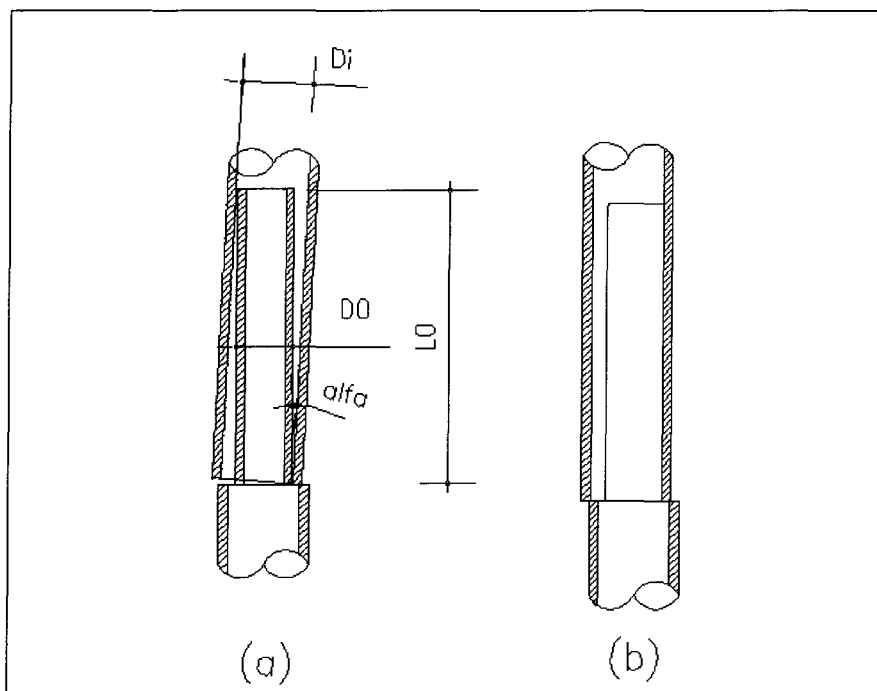
Imperfecties zijn onder te verdelen in aanwezige imperfecties en rekenimperfecties. Aanwezige imperfecties (systeemscheefstanden) ontstaan door speling in de aansluitingen en worden geanalyseerd aan de hand van de aansluitingsgeometrie van de staanders. Rekenimperfecties verdisconteren initiële vooruitbuiging en restspanningen. Aan de hand van de uitgangspunten uit NEN 6771 wordt geanalyseerd in hoeverre de steigerconstructie te beschouwen valt als star of flexibel geschoord of ongeschoord. Hierna worden equivalente belastinggevallen vermeld waarmee de steiger doorgerekend moet worden om beide imperfecties te verdisconteren.

7.2.1 Systeemscheefstanden

Systeemscheefstanden (aanwezige imperfecties) worden onder andere door speling in de aansluitingen gevormd. Bij steigers zal de speling voornamelijk tot uitdrukking komen bij de aansluiting tussen de staanders. Bij Layher staanders wordt de aansluiting gekenmerkt door een penverbinding. De basisscheefstanden (uit de verbinding) zijn onder te verdelen in scheefstanden uit rotatie (afbeelding (7.1 (a)) of translatie (afbeelding 7.1(b)) of een combinatie van beide.

Scheefstanden worden in de richtlijnen verdisconteerd door het voorschrijven van een vooruitbuiging of een equivalente belasting. De richtlijnen die hierbij gehanteerd worden zijn: NEN-EN 12811, (Steigers – Prestatie-eisen en algemeen ontwerp).

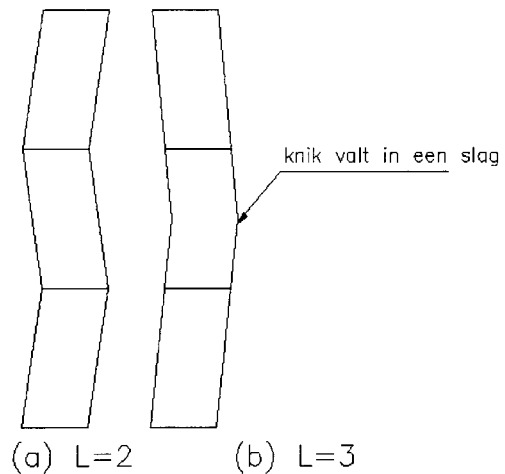
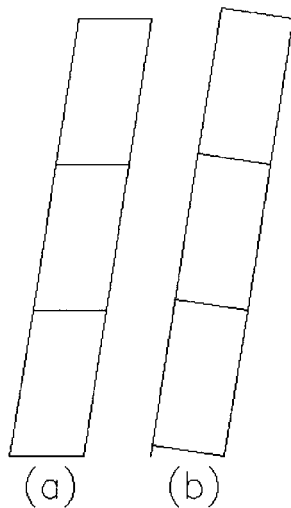
De scheefstandpatronen hangen samen met de staanderlengte, de verankeringen en de stijfheid van de verbindingen en de geometrie van de verbinding.



Afbeelding 7.1: Scheefstanden

Niet verankerde steiger

De steigerconstructie kan bij een niet verankerde steiger volledig scheef gaan staan (afbeelding 7.2(a)). De scheefstand hangt onder meer af van de stijfheid van de verbindingen, en de rotatie bij de basis. De patronen van afbeelding 7.2 (a en b) geven een schets van een doorsnede en kunnen voorkomen bij niet verankerde steigers. Het patroon van afbeelding 7.2 (a) gaat uit van enigszins scharnierende verbindingen. Afbeelding 7.2 (b) laat een patroon zien uit een constructie met stijve verbindingen. Tevens kunnen dergelijke patronen in de beginfase ontstaan als tijdens de bouw van de steiger de eerste slagen pas verankerd worden, als de steiger reeds een aantal slagen is opgetrokken. Bij het plaatsen van de verankeringen kan de scheefstand verminderd worden.



Afbeelding 7.2: Scheefstand totale steiger

Afbeelding 7.3: Scheefstand bij staander lengte (L) van 2000 en 3000 mm

Verankerde steigerconstructie met $L = 2000$ en 3000 mm

Steiger met een staanderlengte van 2000 mm (afbeelding 7.3 (a)).

De scheefstand kan veroorzaakt worden door zowel rotatie als translatie ter plaatse van de slag (afbeelding 7.3 (b)). Bij het monteren van de schakels aan de staanders wordt de verbindingsspie vastgeslagen, waardoor de verbinding stijver wordt. Hierdoor kan de scheefstand worden vereffend.

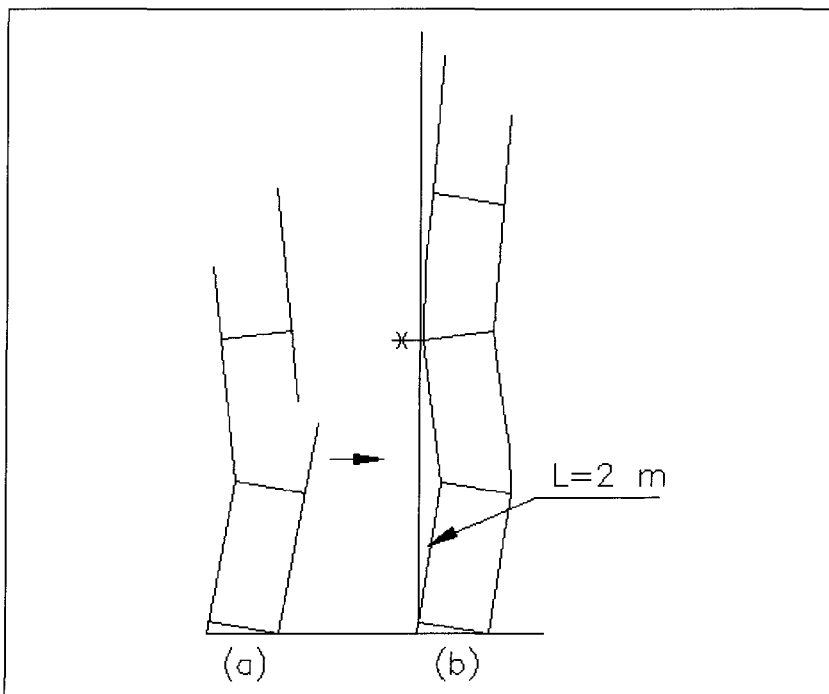
Steiger met staanderlengte van 3000 mm (afbeelding 7.3 (b)).

Indien er staanders toegepast worden met een lengte van 3 m heeft dit tot gevolg dat de aansluiting tussen de staanders plaats vindt op een niveau in het midden van de slag (in de illustratie tussen de 1^e en de 2^e slag).

Verankerde steigerconstructie met $L = 3000 \text{ mm}$

((afbeelding 7.4) alleen bij de 1^e slag wordt t.p.v. de binnenstaander $L = 2000 \text{ mm}$ gehanteerd).

Bij deze wijze van uitvoeren wordt ter plaatse van de binnen- of buitenstaander begonnen met een staander met een lengte van 2 m. De overige staanders hebben een lengte van 3 m. Door dit patroon wordt voorkomen dat de beide aansluitingen zich op een niveau halverwege een slag bevinden. In afbeelding 7.4(a) is het systeem geschetst bij stijve hoekaansluitingen tussen de dwarschakel en de staander. Het geïllustreerde patroon zal in de praktijk niet optreden. Bij het geschetste patroon in afbeelding 7.4(b) ontstaat door het koppelen van de staanders buiging in de staanders.



Afbeelding 7.4: Scheefstand bij staanderlengte van 3 m

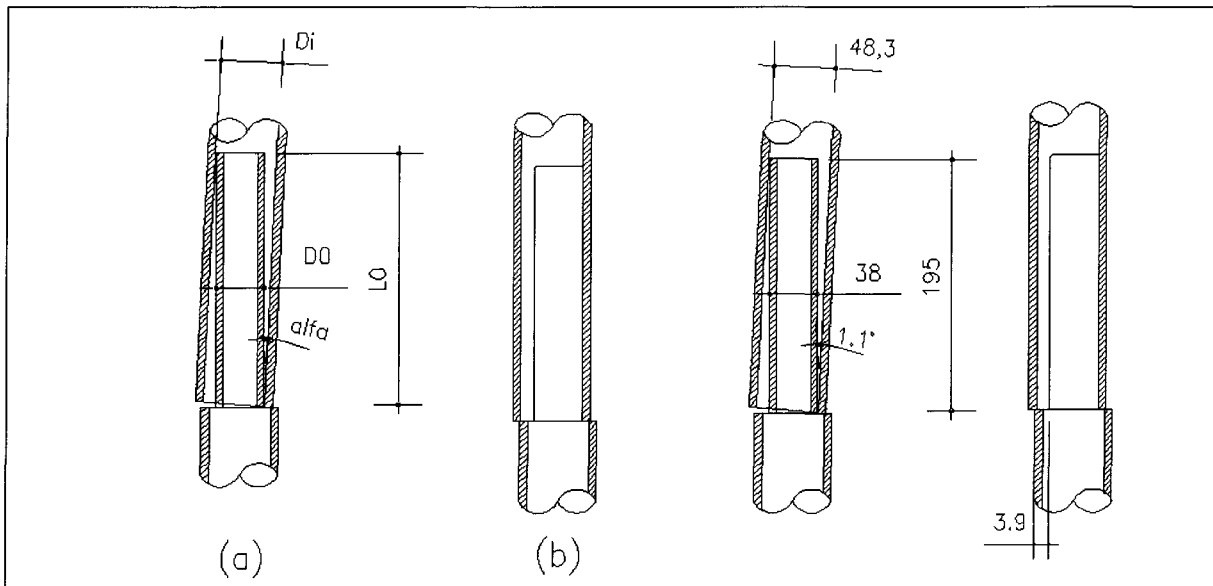
Uitvoeringsafhankelijkheid

In de praktijk zal het imperfectiepatroon sterk worden bepaald door de uitvoering van de steigerconstructie. Deze wordt onder meer bepaald door de volgende punten: de ervaring van de steigerbouwer, de maatvastheid waarmee er gewerkt wordt, het vastslaan van verbindingselementen alsmede het signaleren van maatafwijkingen bij het te plaatsen materiaal. In de steigerbouw wordt voornamelijk gewerkt met staanders van 3000 mm (met 2000 mm bij de eerste slag). Hierdoor wordt voorkomen dat beide aansluitingen op één niveau in het midden van de slag plaats vinden. De methoden van uitvoering zijn niet eenduidig en worden mede bepaald door de steigerbouwer. Zo kan de steiger gedeeltelijk worden opgetrokken zonder verankerungen, waarna na bijvoorbeeld vijf slagen de steiger verankerd wordt.

7.2.2 Normen en richtlijnen m.b.t. systeemscheefstand

scheefstand volgens NEN-EN 12811

NEN-EN 12811 gaat uit van een geometrisch bepaalde scheefstand (zie afbeelding 7.5 (a)), zonder directe consequenties aan te geven voor de scheefstandvorm. Translatie wordt niet beschreven (afbeelding 7.5 (b)).



Afbeelding 7.5: Scheefstand bij aansluiting

De scheefstand wordt beschreven uitgaande van de geometrische verdraaiing:

$$\tan \alpha = \frac{D_i - D_0}{L_0} \quad \left[7.2.2-1 \right]$$

Met $\tan \alpha < 0.01$

Waarin:

D_i = de nominale binnen diameter van de buis
 D_0 = de buitendiameter van de pen
 L_0 = de minimale overlap lengte

Bij de Layher staander zou dit op het volgende neerkomen:

$$\tan \alpha = (48.3 - 2 \cdot 3.2 - 38) / 195 = 0.02 \quad \alpha = 1,1^\circ$$

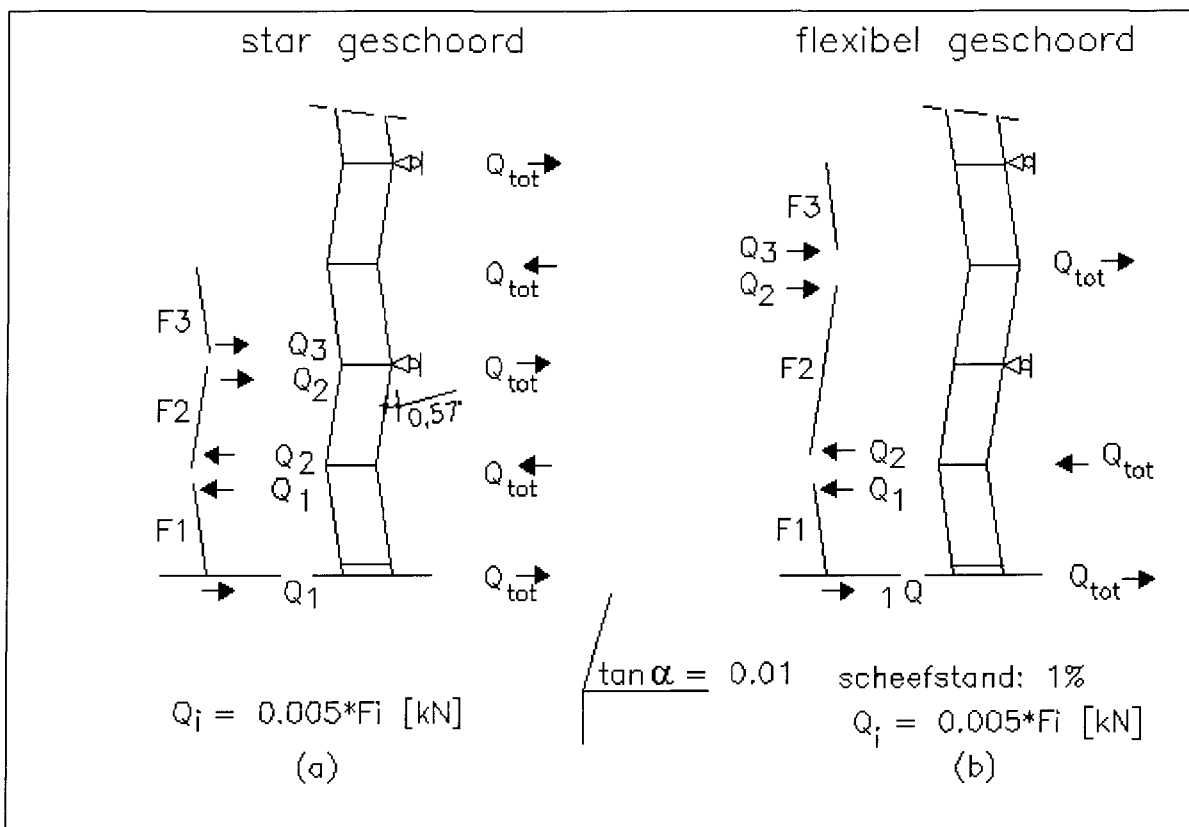
(de bovengrens van $\tan \alpha = 0.01$ wordt aangehouden)

Indien de scheefstand vertaald wordt in een equivalente belasting, zou dit leiden tot de volgende vergelijking:

$$F_h = 0.005 \cdot F_v \quad \left[7.2.2-2 \right]$$

De scheefstand berekende scheefstand is slechts de scheefstand over een staander die 0.5% scheef staat (zie ook afbeelding 7.6).

Afbeelding 7.6 geeft de equivalente belasting behorende bij 2 verschillende scheefstandspatronen.



Afbeelding 7.6: Vooruitbuiging equivalente belasting bij systeemscheefstand (NEN-EN 12811)

7.2.3 Conclusie systeemscheefstand

In de praktijk wordt meestal gewerkt met standers met een lengte van 3000 mm. Bij de eerste slag wordt er bij een van de standers een stander met een lengte van 2000 mm toegepast. Uitgaande van de beschreven scheefstanden zou de vervorming minimaal zijn. Toch is het niet reëel om de scheefstand te verwaarlozen. Mede door de diversiteit in uitvoeringsmogelijkheden zal er voor de scheefstand een tussenvorm gekozen worden.

De scheefstandanalyse uit NEN-EN 12811 is door de meetkundige beschouwing goed toepasbaar.

In afbeelding 7.6 worden er uitgaande van de zig-zag vorm twee mogelijke interpretaties gegeven. Afbeelding 7.6 (a) geeft een zig-zag vorm die wisselt per slag, afbeelding 7.6 (b) geeft een zig-zag vorm die halverwege de slagen wisselt. In paragraaf 7.3.2. wordt er verder ingegaan op afbeelding 7.6 (b).

7.3 Rekenimperfecties (NEN 6771)

De imperfectie bij de systeemsteiger verdisconteert initiële vooruitbuiging en restspanningen. In NEN 6771 wordt bij het bepalen van het patroon onderscheid gemaakt tussen star-geschoorde raamwerken en ongeschoorde of flexibel-geschoorde raamwerken.

Bij geschoorde raamwerken wordt er onderscheid gemaakt tussen locale en globale (scheefstand) vervangende vooruitbuiging. Er wordt bij het bepalen van de rekenimperfecties uitgegaan van tweede-orde elastische rekenmodellen.

Imperfectiepatronen kunnen worden verdisconteerd met vervangende vooruitbuiging of met een equivalente belasting die de vervangende vooruitbuiging compenseert.

7.3.1 Star-geschoorde raamwerken

Locale vooruitbuiging

1. De vooruitbuiging wordt van tevoren aangebracht door een vervangende vooruitbuiging w_0 (zie ook afbeelding 7.7 (a) en NEN 6771 10.2.5.1.3).

$$w_0 = \alpha_k (\lambda_{rel} - 0,2) * \frac{M_{y;u;d}}{N_{c;u;d}} \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-1 \end{array} \right]$$

Waarin:

w_0 is de imperfectieparameter, die het gecombineerde effect in rekening brengt van alle imperfecties, zoals initiële vooruitbuiging, restspanningen en inhomogeniteiten;

α_k is de factor in de instabiliteitskromme
Layher maakt gebruik van steigerbuis met een verhoogde vloeigrens, waardoor instabiliteitskromme C moet worden gebruikt, α_k bedraagt 0.49.

λ_{rel} is de relatieve slankheid volgens art. 12.1.1.2
Voor de relatieve slankheid geldt:

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{N_{pl;d}}{F_{y;E}}} \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-2 \end{array} \right]$$

$$\text{met: } N_{pl;d} = A * f_{y;d} \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-3 \end{array} \right]$$

(bij steigerbuis: $453 * 320 = 145$ kN)

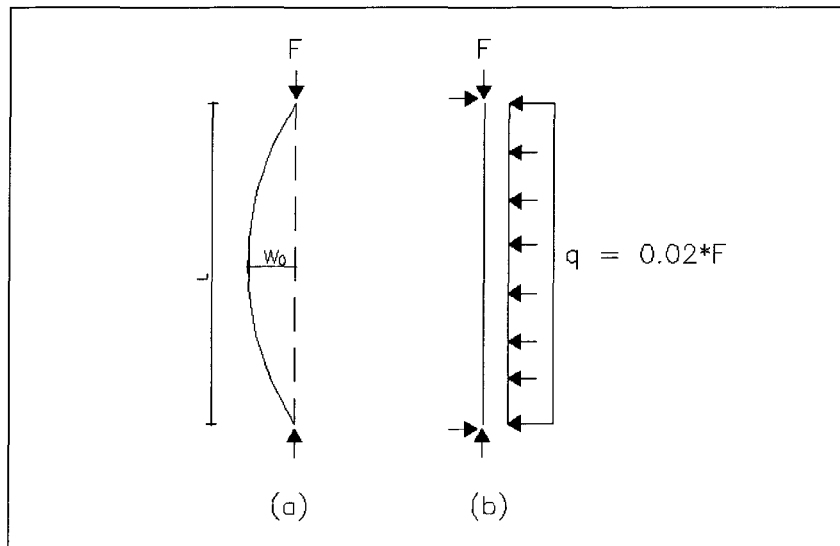
$$F_e = \frac{\pi^2 E_d I}{L_k^2} \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-4 \end{array} \right]$$

Uitgaande van de volgende waarden en een kniklengte van 2000 mm:

$E_d = 2.1 * 10^5$ N/mm², $I = 11.6 * 10^4$ mm⁴ bedraagt de Eulerse knikkracht: 60.1 kN. De waarde van λ_{rel} bedraagt dus 1.55.

$M_{y,u;d}$ is de rekenwaarde van het buigend moment om de y-as m.b.t. de capaciteit in de uiterste grenstoestand, in dit geval $M_p = W_p \cdot f_{y,d} = 6.52 \cdot 10^3 \cdot 320 = 2.10 \text{ kNm}$.
 $N_{c,u;d}$ is de rekenwaarde van de druknormaalkracht met betrekking tot de capaciteit in de uiterste grenstoestand, in dit geval $N_p = A \cdot f_{y,d} = 453 \cdot 320 = 145 \text{ kN}$

Indien de kniklengte 2000 mm bedraagt leidt dit tot een waarde voor w_0 van:
 $w_0 = 0.49(1.55-0.2) \cdot 2.09 \cdot 10^3 / 145 = 9.53 \text{ mm}$



Afbeelding 7.7: Vooruitbuiging bij star-geschoorde steiger

of

- De vooruitbuiging wordt met een equivalente belasting aangebracht. Deze equivalente belasting geeft eenzelfde vervormingspatroon w_0 .

$$q = \frac{8Fw_0}{l^2} \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-5 \end{array} \right]$$

Hierin is:

F de normaalkracht in de betreffende staander.
L de systeemplengte (2000 mm)

Uitgaande van de waarde van $w_0 = 9.53$ wordt de vergelijking:
 $q = 8 \cdot F \cdot 9.53 \cdot 10^{-3} / 2^2 = 0.02 \cdot F \text{ [kN/m]}$
(zie ook afbeelding 7.7 (b)).

Globale vooruitbuiging

Conform artikel 10.2.5.1.3 van NEN 6771 dient bovenstaande lokale vooruitbuiging gecombineerd te worden met globale vooruitbuiging. Globale vooruitbuiging wordt door de norm beschouwd als scheefstand van het raamwerk.

1. De vooruitbuiging wordt aangebracht op de constructie onder een hoek ψ .
(zie afbeelding 7.8).

$$\psi = \psi_0 * k_1 * k_2 \quad \text{doch tenminste } 1/400 \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-6 \end{array} \right]$$

Waarin:

$$\psi_0 = 1/250 \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-7 \end{array} \right]$$

$$k_1 = \sqrt{0.2 + \frac{1}{n_s}} \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-8 \end{array} \right]$$

k_1 bedraagt ten hoogste 1.0

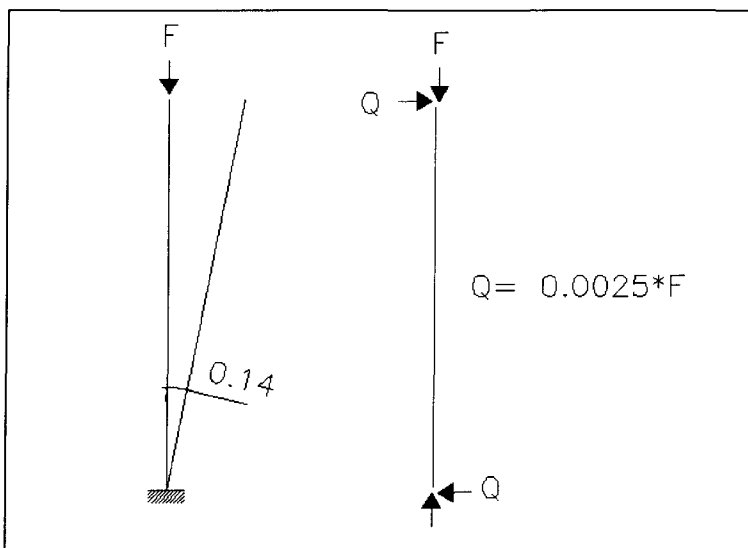
$$k_2 = \sqrt{0.5 + \frac{1}{n_k}} \quad \left[\begin{array}{l} 7.3.1-9 \end{array} \right]$$

k_2 bedraagt ten hoogste 1.0

Waarin:

n_s Is het grootste aantal verdiepingen van het raamwerk;

n_k Is het aantal belaste kolommen waarin een normaalkracht (druk) heerst van tenminste 50% van de gemiddelde normaalkracht in de kolommen in het beschouwde vlak. De waarde van de factor n_k mag niet groter genomen zijn dan het aantal kolommen dat over het grootste aantal verdiepingen doorloopt.



Afbeelding 7.8: Vooruitbuiging bij flexibel-geschoorde steiger

Indien er uit wordt gegaan van een steiger die opgebouwd is uit 30 slagen bedraagt k_1 0,48 ($\sqrt{0.2+1/30}$). Indien over 12-slagen de drukkracht tenminste 50% bedraagt, wordt de factor k_2 : 0.76 ($\sqrt{0.5+1/12}$).

De factor ψ bedraagt dan: $1/250 * 0.48 * 0.76 = 0.0014$.

Er dient dus uitgegaan te worden van de minimale waarde van 1/400 (0.0025). Doordat de meeste steigers hoger zullen zijn dan 30 slagen (60 m) en waarschijnlijk tenminste 15 slagen tenminste 50% van de belasting krijgen, mag er uit worden gegaan van de minimale waarde van 0.0025 (1/400).

of

2. Een equivalente belasting Q .

$$Q_i = F_i \cdot \psi \quad \left(7.3.1-10 \right)$$

F is hierbij de normaalkracht in de betreffende staander in kN en verschilt per slag. Er wordt wederom van de minimale waarde uitgegaan, de vergelijking wordt:

$$Q_i = F_i / 400 \quad \left(7.3.1-11 \right)$$

7.3.2 Ongeschoorde en flexibel-geschoorde raamwerken

Zowel de vooruitbuiging als de equivalente belasting wordt op dezelfde wijze berekend als bij de vooruitbuiging van de star-geschoorde raamwerken, de factor $\psi_0 = 1/250$ bedraagt hier echter $1/200$. De factor ψ (scheefstand) wordt nu $1/200 \cdot 0.48 \cdot 0.83 = 0.0018$.

Ook hier wordt uitgegaan van de minimale waarde van 0.0025 waardoor vergelijking (7.3.1-11) ongewijzigd blijft:

$$Q_i = F_i / 400$$

Doordat de NEN 6771 in haar beschouwing een indirecte verwijzing geeft naar globale scheefstand dient van de scheefstand in paragraaf 7.2.2 (scheefstand die specifiek bij systeemsteiger bepaald is) en de scheefstand van NEN 6771 de grootste waarde te worden genomen. Dit betekent dat er bij een flexibel-geschoorde constructie met een scheefstand van 1% gerekend moet worden.

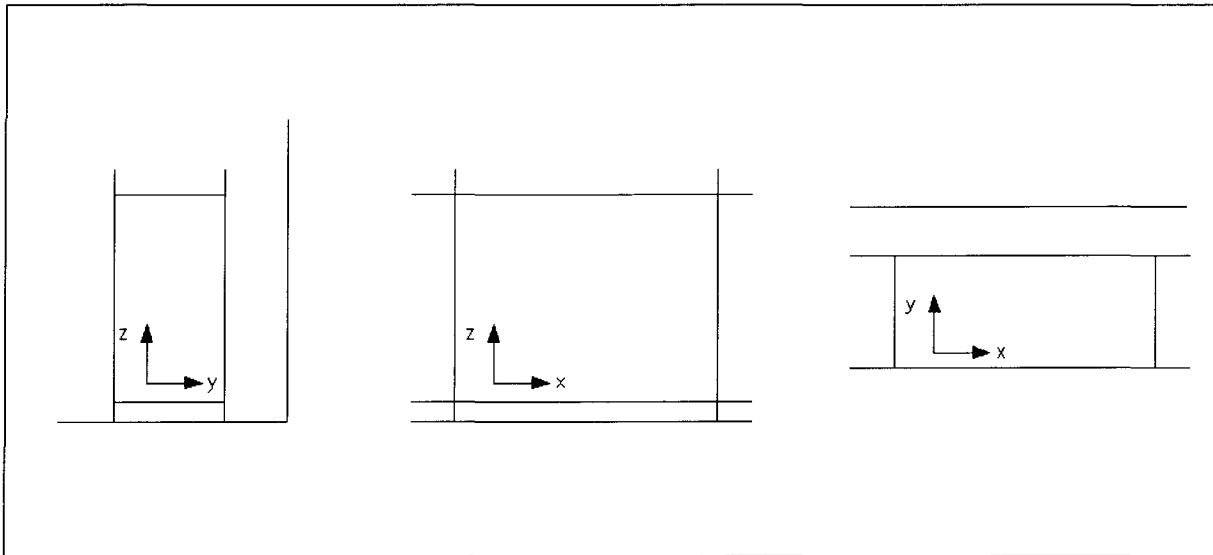
$$F_h = 0.005 \cdot F_v \quad (\text{vergelijking 7.2.2-2})$$

In de volgend paragrafen zal aan de hand van het knikpatroon duidelijk worden gemaakt in welke gevallen een steiger als star-geschoord wordt beschouwd en wanneer een steiger als flexibel-geschoord wordt beschouwd.

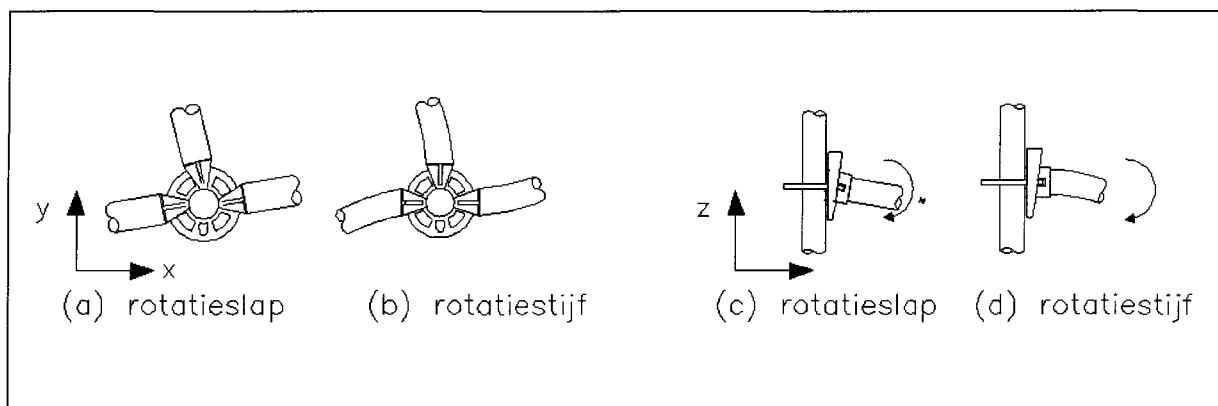
7.4 Knikpatronen

Uitgangspunten

Er wordt bij de knikpatronen onderscheid gemaakt in locale- en globale knikpatronen. De knikpatronen kunnen hierbij optreden in het y-z of x-z vlak (afbeelding 7.9), en zijn louter schetsmatig. De verbindingskarakteristiek tussen staander en schakels wordt teruggebracht naar een scharnierende of een stijve verbinding (afbeelding 7.10).



Afbeelding 7.9: Aanduiding vlakken



Afbeelding 7.10: Knoopstijfheden

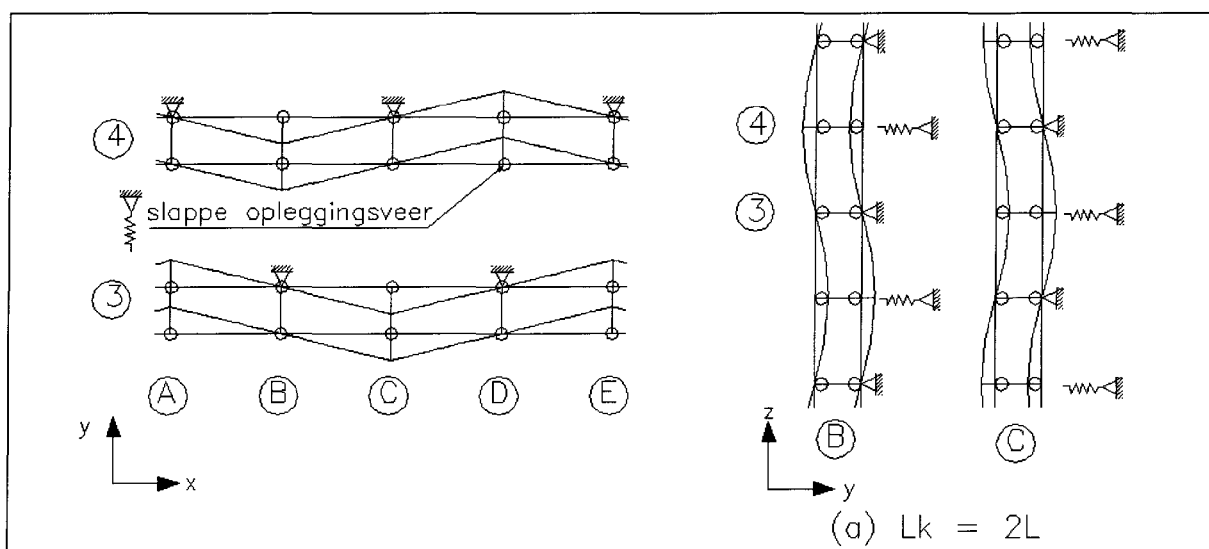
7.4.1 Locale knik in het y-z vlak

Bij de analyse van mogelijke knikpatronen wordt de invloed van de verbindingstijfheden van de steigervloer (x-y vlak met verbindingstijfheden om de z-as) en het raamwerk (y-z vlak met stijfheden om de x-as) gecombineerd en de combinaties hiervan vergeleken. Op de locaties waar het raamwerk in het y-z vlak niet verankerd is, wordt een denkbeeldige opleggingsveer aangenomen. De grootte van deze veer hangt samen met de stijfheid van de werkvloer (x-y vlak). Bij scharnierende aansluitingen in de werkvloer (x-y vlak) wordt er met een slappe opleggingsveer gerekend, bij stijve aansluitingen met een stijve opleggingsveer. Er wordt uitgegaan van een twee-slag-verankering (om en om zie ook paragraaf 2.5).

Scharnierende aansluitingen

Er wordt uitgegaan van scharnierende verbindingen van de werkvloer (de aansluiting van de staander naar de schakel in het x-z vlak is dus scharnierend) en scharnierende verbindingen van het steigerraamwerk (dwarschakel – staander in y-z vlak). De knikvorm is schetsmatig bepaald en waarbij een kniklengte aangenomen is van 4000 mm ($2 \cdot L_{\text{sys}}$). De kniklengte zal dus worden gevormd door de afstand van verankering naar verankering (zie ook afbeelding 7.11).

Een steiger wordt beschouwd als flexibel-geschoord indien de kniklengte meer dan 2 en minder dan 4 m bedraagt ($L_{\text{sys}} < L_k < 2 \cdot L_{\text{sys}}$) en de steiger uitknikt ter plaatse van de onverankerde werkvloer.

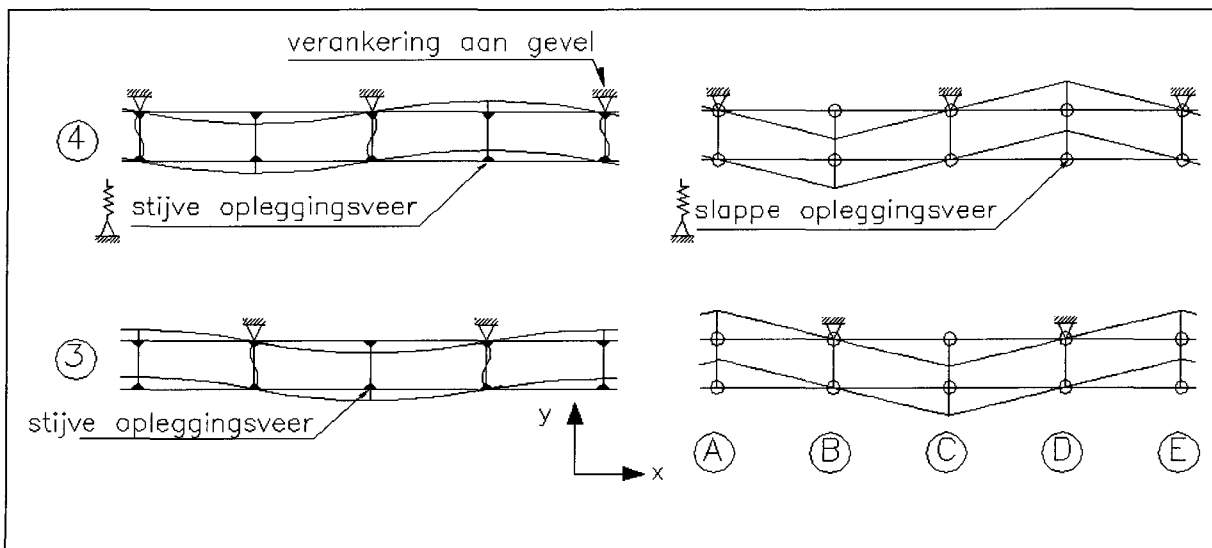


Afbeelding 7.11: Knikpatroon "flexibel-geschoord"

Overige aansluitingen

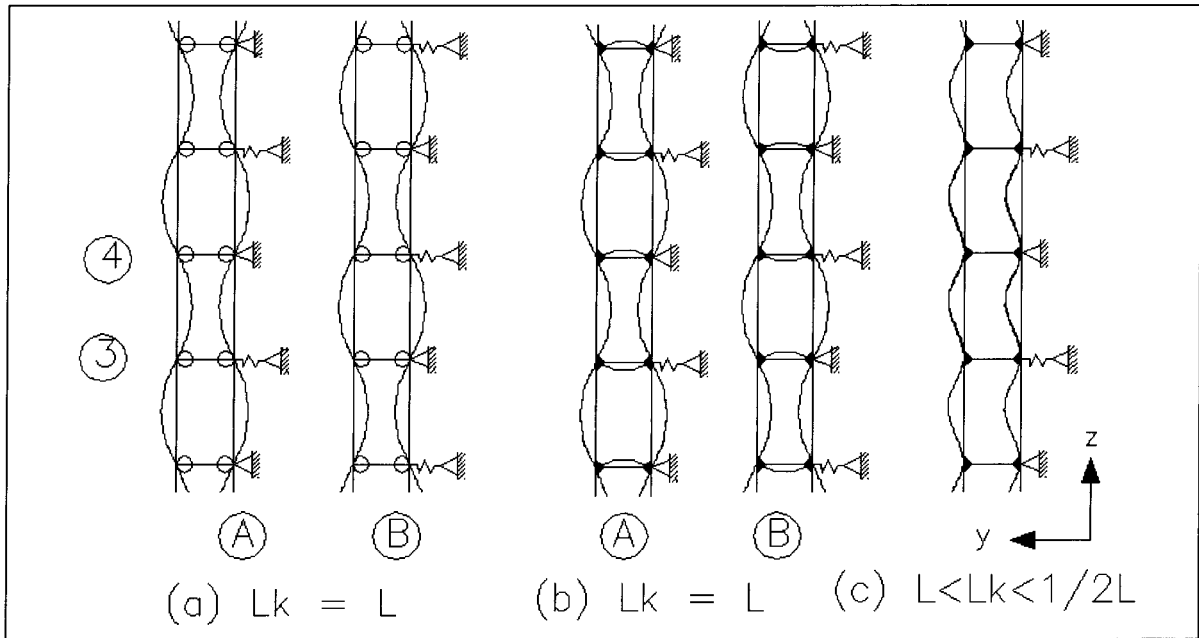
Bij het tweede vergelijk worden alle aansluitingen vergeleken behalve die uit punt 1. Het constructieschema van de werkvloer in x-y vlak van afbeelding 7.12 wordt gecombineerd met het raamwerk (in y-z vlak) van afbeelding 7.13. Hieruit volgt schetsmatig dat combinaties ertoe kunnen leiden dat de kniklengte gelijk is aan de systeemplengte. Bij afbeelding 7.13 (a) wordt uitgegaan van scharnierende aansluitingen van het raamwerk in y-z richting gecombineerd met starre aansluitingen bij de werkvloer in het x-y vlak.

Afbeelding 7.13 (b) combineert starre aansluitingen van het raamwerk in y-z richting met de starre en scharnierende aansluitingen van de werkvloer (in x-y richting). Uitgaande van deze knikvorm (b) is de stijfheid van het x-y vlak niet van belang, de kniklengte is in beide beschouwde gevallen de systeemplengte. De achtergrondgedachte hierbij is dat de stijfheid uit het raamwerk in y-z richting moet komen. Indien de steiger een kniklengte heeft die gelijk is aan de systeemplengte wordt deze beschouwd als star-geschoord.



Afbeelding 7.12:

Stijfheid in y-z vlak



Afbeelding 7.13:

Knikpatroon bij een star-geschoorde steiger in het y-z vlak

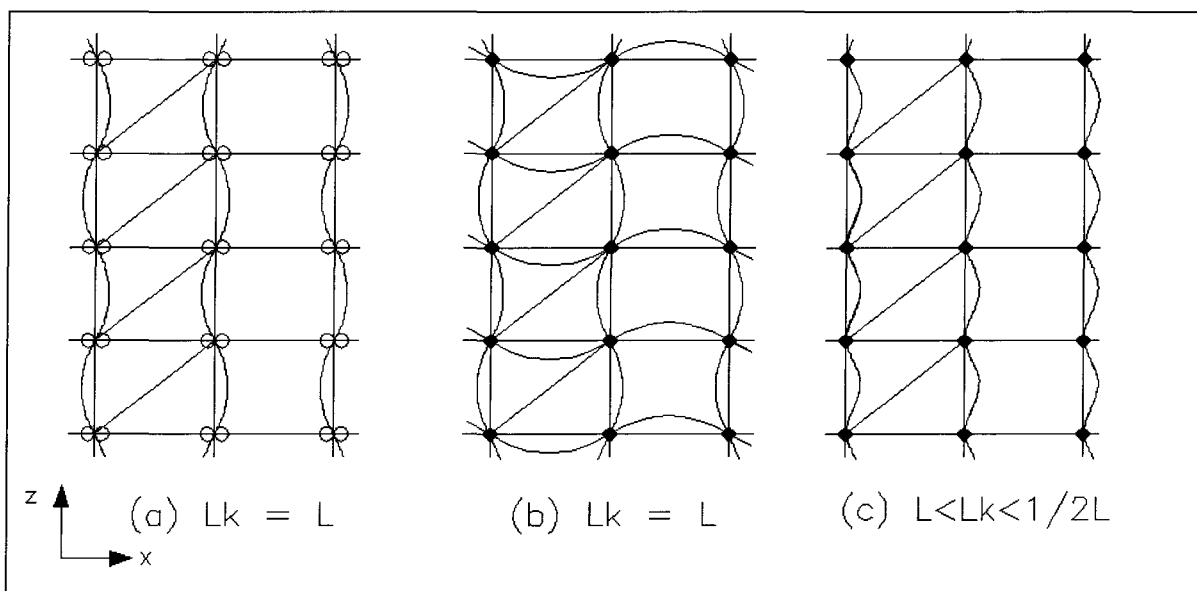
Indien het raamwerk en de werkvloer een stijf geheel vormen kan de kniklengte variëren tussen $\frac{1}{2}L_{sys}$ en $1 \cdot L_{sys}$ (afbeelding 7.13 (c)). Deze steiger wordt eveneens bestempeld als star-geschoord. Om het patroon te krijgen van afbeelding 7.13 (c) dient de dwarschakel oneindig stijf te zijn. In de praktijk zal dit patroon niet voorkomen.

7.4.2 Locale en globale knik in het x-z vlak

Locale knik

Bij locale knik in het x-z vlak wordt de stabiliteit van het vlak van de buitenstaanders verzorgd door de schoor, en het x-z vlak van de binnenstaanders door de verankering. Het knikpatroon wordt gevormd door het lokaal knikken van de staanders waarbij de kniklengte varieert tussen $\frac{1}{2}L_{\text{sys}}$ en L_{sys} .

Indien wordt uitgegaan van afbeelding 7.14 heeft de verbindingstijfheid nagenoeg geen invloed op de kniklengte. Afbeelding (c) zou op kunnen treden indien de schakels oneindig stijf zijn. Naar verwachting treedt dit patroon niet op (de schakels zijn niet oneindig stijf).



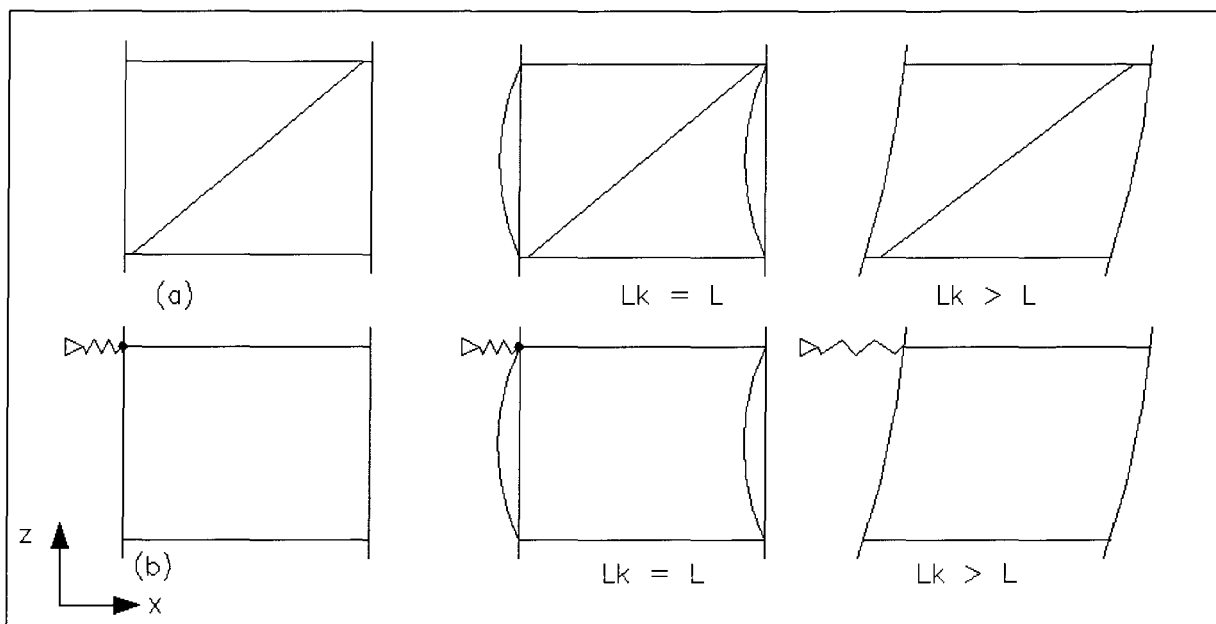
Afbeelding 7.14:

Knikpatroon bij locale knik in het x-z vlak

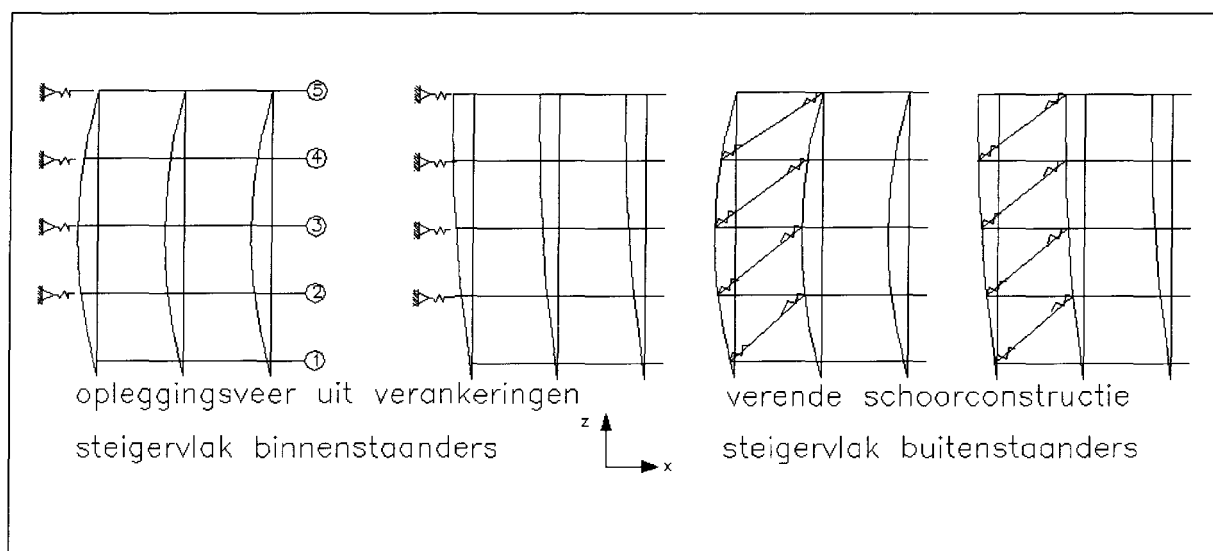
Globale knik

Globale knik is onder te verdelen in de globale knik van één slag (afbeelding 7.15) en het complete voor- of achtervlak (afbeelding 7.16). Bij het y-z vlak was hiervan geen sprake omdat het raamwerk in dit vlak voorzien is van verankeringen.

De globale knik van het complete voor- of achtervlak treedt waarschijnlijk pas bij grotere hoogten op.



Afbeelding 7.15: (in)Stabiliteit één slag



Afbeelding 7.16: Globale instabiliteit x-z vlakken

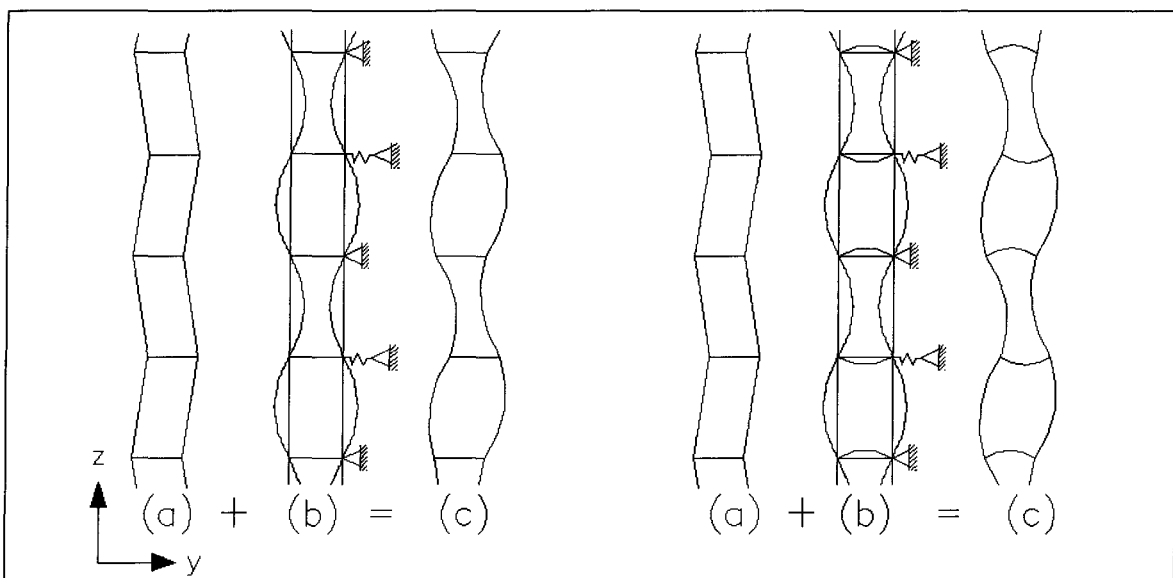
7.5 Combinatie aanwezige en rekenimperfecties

7.5.1 Star-geschoord

Indien er uit een knikberekening volgt dat er aan de voorwaarde van een star-geschoorde constructie is voldaan, dient de combinatie van aanwezige en rekenimperfecties te worden bepaald.

Bij het bepalen van de totale vooruitbuiging bij star-geschoorde steigers dienen aanwezige en rekenimperfecties samen in rekening te worden gebracht, doordat de beide imperfecties elkaar versterken (afbeelding 7.17). Beide patronen kunnen met equivalente belastingen worden aangebracht. Afbeelding 7.18 beperkt zicht tot de equivalente belastingen op het raamwerk in het y-z vlak.

Er wordt gekozen voor het aanbrengen van equivalente belastingen omdat dit efficiënter werkt bij het modelleren in vergelijking tot voorgeschreven vooruitbuiging.



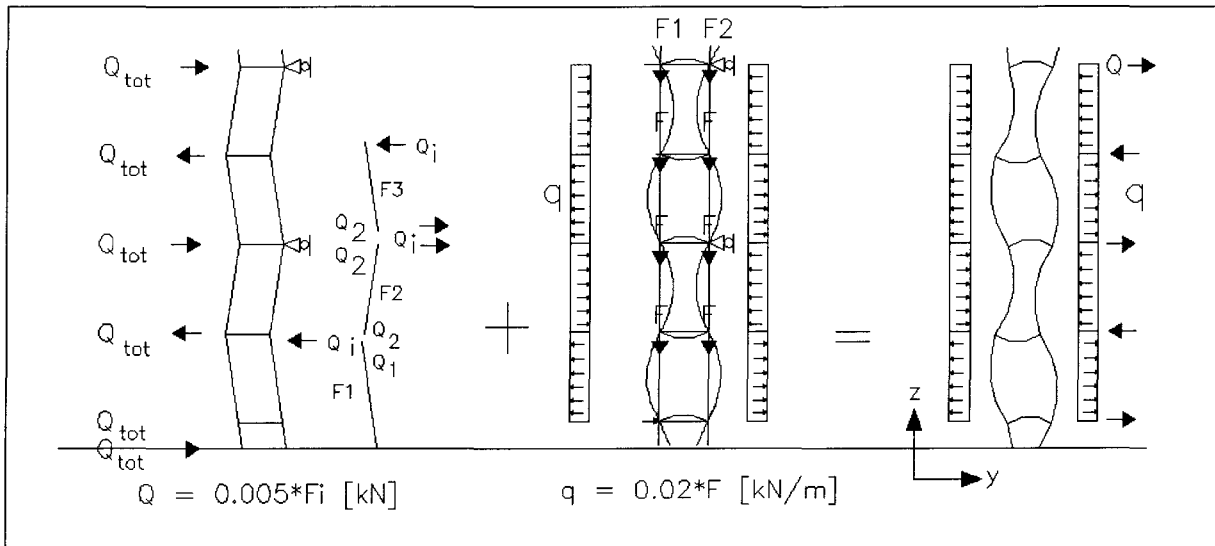
Afbeelding 7.17:

Sommatie aanwezige en rekenimperfecties

Dit leidt tot de volgende equivalente belastingen:

1. Belasting uit aanwezige imperfecties $Q = 0.005 \cdot F$ [kN]
De belasting grijpt op iedere slaghoogte aan.
(vergelijking 7.2.2-2)
2. Belasting uit rekenimperfecties: $q = 0.02 \cdot F$ [kN/m]
(vergelijking 7.3.1-5)

Uitgaande van een kniklengte van 2000 mm (w_0 bedraagt dan 9.53 mm) wordt de vergelijking: $q = 8 \cdot F \cdot 9.53 \cdot 10^{-3} / 2^2 = F \cdot 0.02$ [kN/m]. Zie ook afbeelding 7.18.



Afbeelding 7.18:

Equivalente belastingen bij een "star" geschoorde steiger

7.5.2 Flexibel geschoord

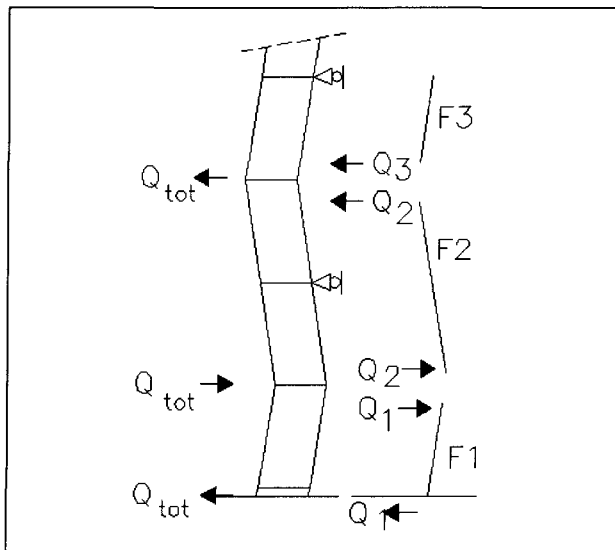
Indien de kniklengte groter is dan 2000 mm (en kleiner dan 4000 mm) wordt er bij het imperfectiepatroon uitgegaan van aanwezige imperfecties (scheefstand).

Er wordt derhalve van het volgende belastinggeval uitgegaan:

Belasting uit rekenimperfecties: $Q_i = 0.005 \cdot F_i$ [kN] (zie ook vergelijking (7.2.2-2))

De belasting grijpt aan op de knooppunten waar geen verankeringen zijn, zie ook afbeelding 7.19.

De scheefstand dient op de ongunstigste manier aangebracht te worden, naar het knikpatroon. Hiervoor kan de vervorming uitgaande van een lineaire berekening genomen worden. Een andere manier is om op de maatgevende hoogte een aantal scheefstand vormen te analyseren (de vorm met de ongunstigste invloed geeft het minst aantal slagen). Dit wordt in hoofdstuk 8 nader uitgewerkt.

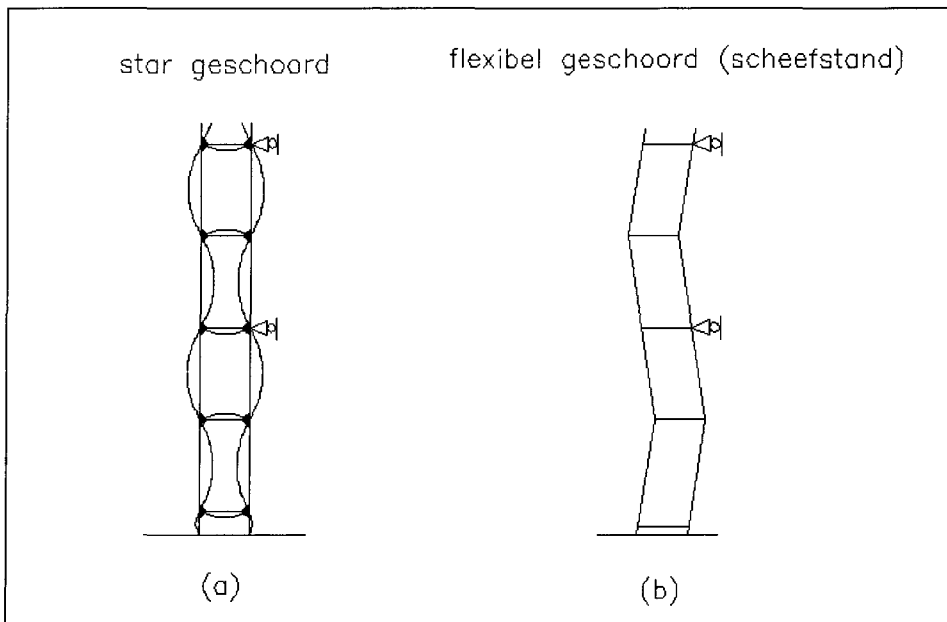


Afbeelding 7.19: Equivalente belastingen bij "flexibel-" geschoorde steiger

Hoofdstuk 8: Classificatie

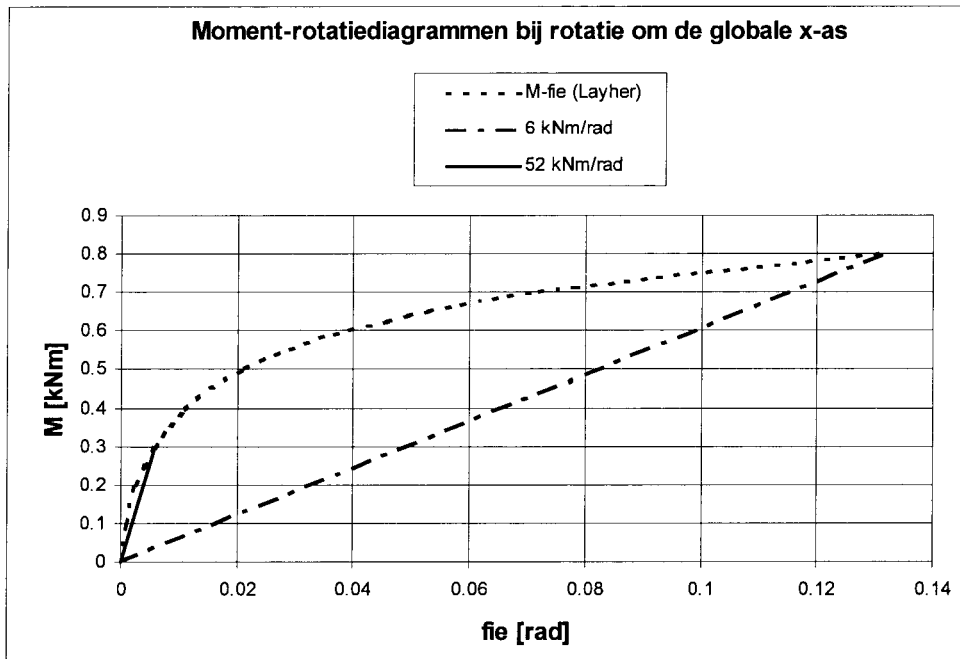
8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de classificatie van de steigerconfiguraties behandeld. De classificatie wordt bepaald om de equivalente belasting te bepalen, waarna de maximale bouwhoogte bepaald kan worden (zie hoofdstuk 9). Conform de resultaten van hoofdstuk 7 kan de steiger worden geclassificeerd in "star-" of "flexibel-"geschoord (zie ook afbeelding 8.1 (a) en 8.1 (b)). Bij een star-geschoorde steiger wisselt de knikvorm van de steiger om de slag, de werkvloer knikt niet weg. Bij een flexibel-geschoorde steiger knikt de steiger uit ter plaatse van de werkvloer. Het knikpatroon wisselt hierbij om de twee slagen.



Afbeelding 8.1: Classificaties "star" en "flexibel" geschoord

In een eigenwaarde-berekening wordt altijd uitgegaan van lineaire moment-rotatiekarakteristieken. Indien gebruik wordt gemaakt van de mogelijkheid van een niet-lineair moment-rotatiediagram moet van tevoren de lineaire stijfheid worden afgeleid. Afbeelding 8.2 geeft het gebruikte moment-rotatiediagram weer. Hierin zijn twee lineaire stijfheden uitgezet, namelijk een stijfheid van 52 kNm/rad en van 6 kNm/rad.



Afbeelding 8.2: Moment-rotatiediagrammen t.b.v. de eigenwaarde-berekeningen

De classificatie (het knikpatroon) hangt (mede) af van de volgende punten:

- Het aantal slagen
- De stijfheid (de moment-rotatiekarakteristiek) van de verbindingsonderdelen
- De belastingcombinatie

Bij deelanalyses bleek dat de steigerconfiguraties allemaal een knikpatroon hadden dat valt onder de categorie "flexibel geschoord".

Om werk te besparen wordt aangetoond dat alle configuraties geassocieerd kunnen worden als "flexibel-geschoord". Er mag dan uit worden gegaan van zowel lineair, bi-lineaire als multi-lineaire moment-rotatiediagrammen.

Dit wordt gedaan door bij 4 en 30 slagen en stijfheden van 52 kNm/rad en 6 kNm/rad de steigerconstructie te classificeren. Als blijkt dat het knikpatroon bij alle stijfheden geassocieerd wordt als "flexibel-geschoord", is aan de voorwaarde voldaan. De configuraties worden dan voorzien van de specifieke classificatie "flexibel geschoord".

8.2 Eigenwaarde-onderzoek configuratie 1

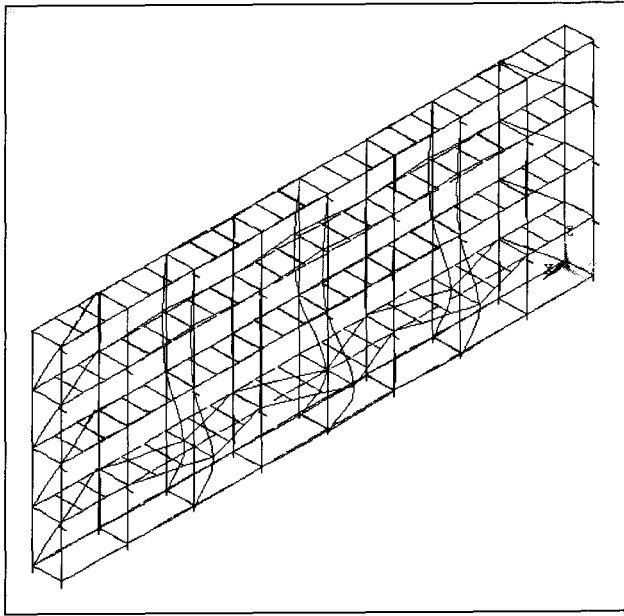
Bij het eigenwaarde-onderzoek worden er bij configuratie 1 knikberekeningen gemaakt bij de belastingcombinatie “nuttige belasting” (zie hoofdstuk 6, afbeelding 6.2 (a) en (b)). De anderhalve belaste werkvloer wordt aanvankelijk onder aan de steiger geplaatst. Deze belastingcombinatie wordt gehanteerd omdat hieruit de gunstigste (grootste) knikkracht komt. Indien het knikpatroon overeenkomt met dat van een flexibel geschoorde steiger, wordt gesteld, dat de resultaten uit de overige combinaties (één of anderhalve vloer uit nuttige belasting bovenin) altijd ongunstiger zijn. Dit wordt geïllustreerd door daarna de sommen te maken met anderhalve werkvloer boven in de steiger.

Bij dit onderzoek wordt de steiger van configuratie 1 genomen. In configuratie 1 wordt de steiger doorgerekend met een breedte van 1088 mm, in combinatie met gebruik van systeemkortelingen (zie hoofdstuk 3).

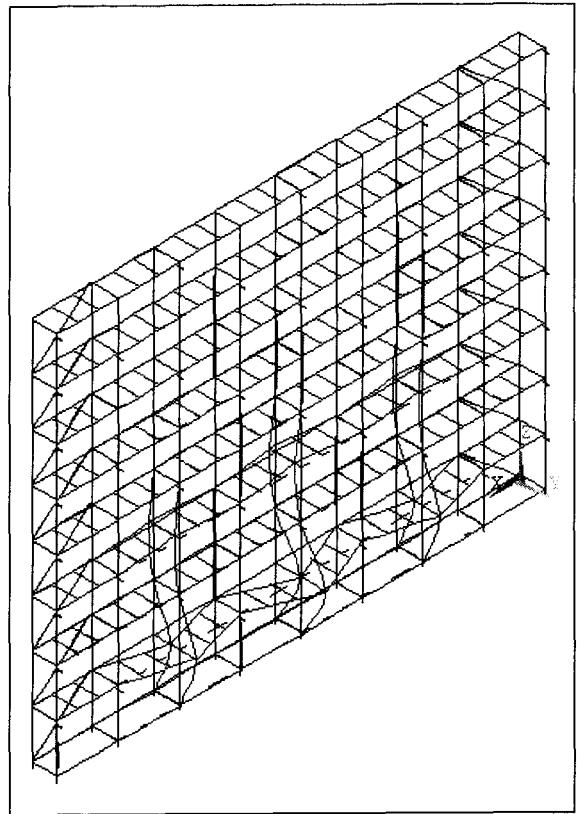
8.2.1 Nuttige belasting onderin

Om het knikgedrag te onderzoeken worden bij steigers met een hoogte van 2, 4, 8, 20, 30 en 40 slagen eigenwaarde-berekeningen gemaakt. In afbeeldingen 8.3 a t/m e wordt het knikpatroon geïllustreerd bij 4, 8, 20 en 40 slagen. Het knikpatroon vindt plaats bij alle staandergroepen die pas bij de tweede slag worden verankerd. De knik vindt plaats ter hoogte van de werkvloer. Dit zou betekenen dat de steiger tot een hoogte van 40 slagen geclassificeerd kan worden als “flexibel geschoord”.

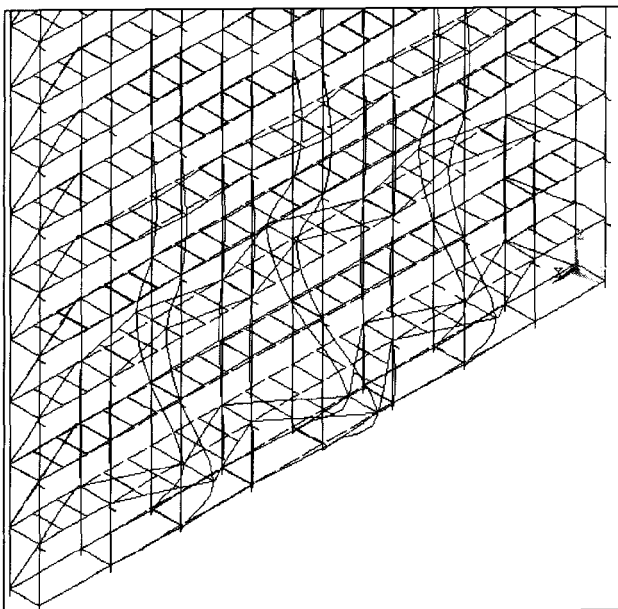
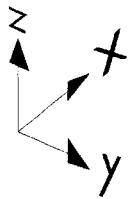
Afbeeldingen 8.3 e en f geven respectievelijk een zij- en bovenaanzicht weer van het knikpatroon van de steiger met een hoogte van 40 slagen.



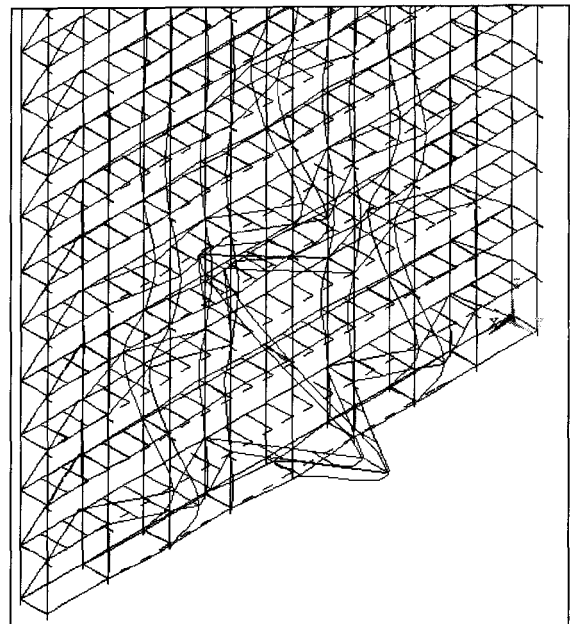
a: Isometrie (4 slagen)



b: Isometrie (8 slagen)

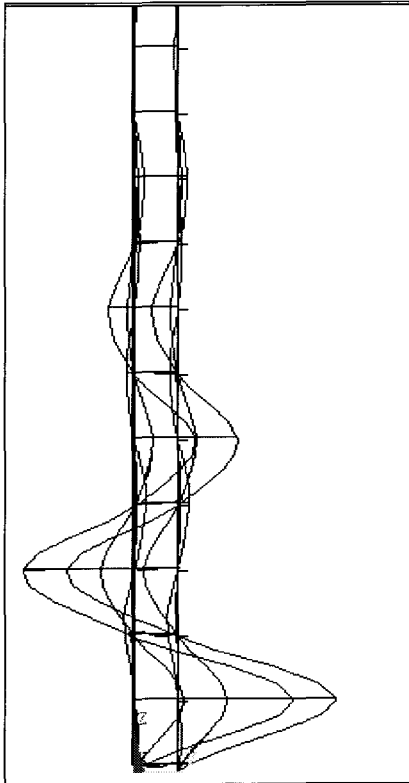


c: Isometrie (20 slagen)

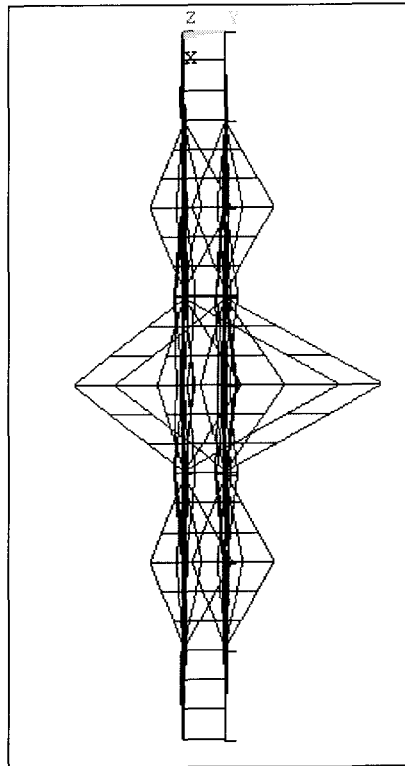
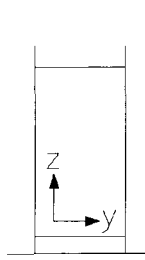


d: Isometrie (40 slagen)

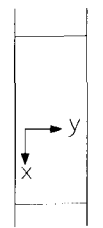
Afbeelding 8.3: Knikpatronen bij verschillende aantallen slagen (configuratie 1)



e: Zijaanzicht (40-slagen)



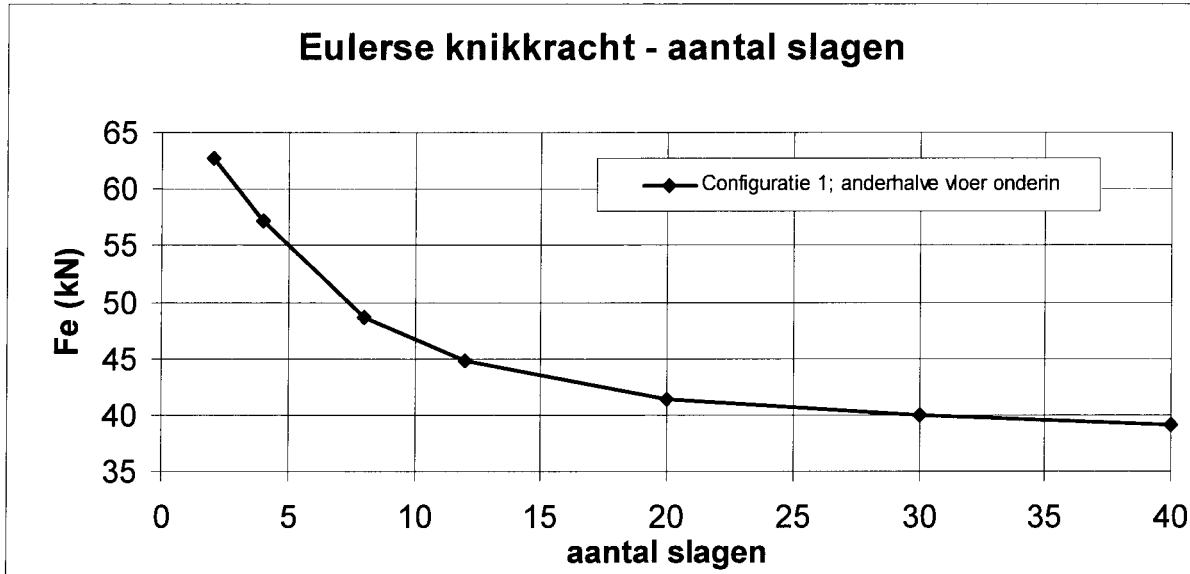
f: Bovenaanzicht (40-slagen)



Afbeelding 8.3: Knikpatronen (vervolg)

In afbeelding 8.4 is een grafiek afgebeeld waarin de Eulerse knikkraft (F_e) uitgezet is tegen het aantal slagen. Dit overzicht wordt getalmatig gepresenteerd in tabel 8.1.

De Eulerse knikkraft (F_e) is bepaald door bij de knikkende staandergroepen de laagste reactiekrachten te bepalen en deze met de factor n te vermenigvuldigen (wordt bepaald binnen Ansys). De factor n wordt met behulp van de eigenwaarde-berekening bepaald.

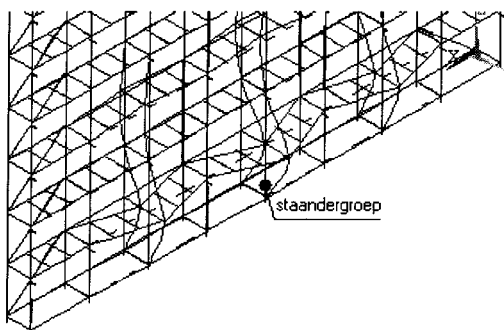


Afbeelding 8.4: De knikkraft uitgezet tegen het aantal slagen

Tabel 8.1

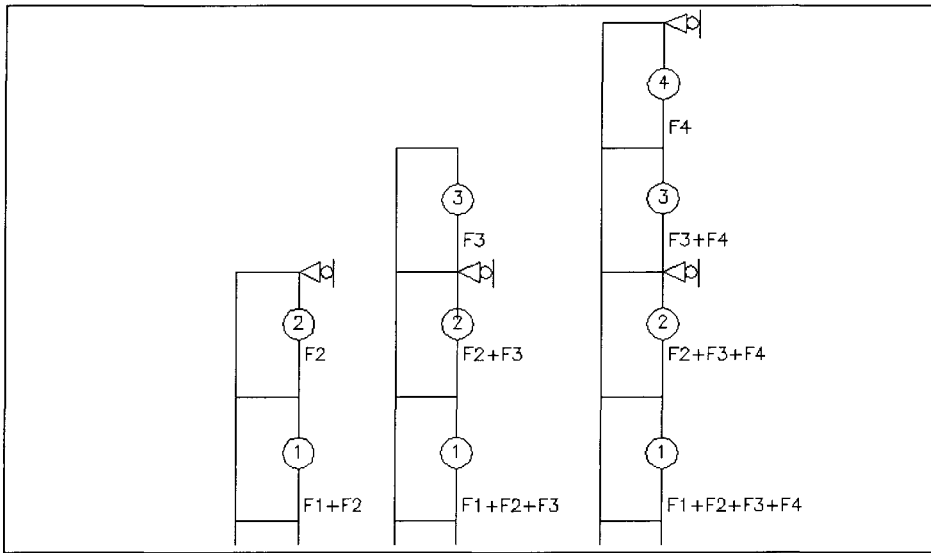
aantal slagen	n	F^* [kN]	$F_e (nF^*)$ [kN]
2	10.14	6.19	62.77
4	7.57	7.55	57.15
8	4.73	10.30	48.72
12	3.41	13.14	44.81
20	2.17	19.10	41.45
30	1.48	27.00	39.96
40	1.11	35.20	39.07

* De normaalkraft (F) is de kleinste reactiekracht t.p.v. de uitknikkende staandergroepen
De rotatiestijfheid (c) tussen de dwarschakel en staander (x -as) is constant 52 kNm/rad



Uit afbeelding 8.4 en tabel 8.1 volgt dat naarmate het aantal slagen toeneemt de Eulerse knikkracht daalt. Aan deze daling ligt de volgende invloed ten grondslag.

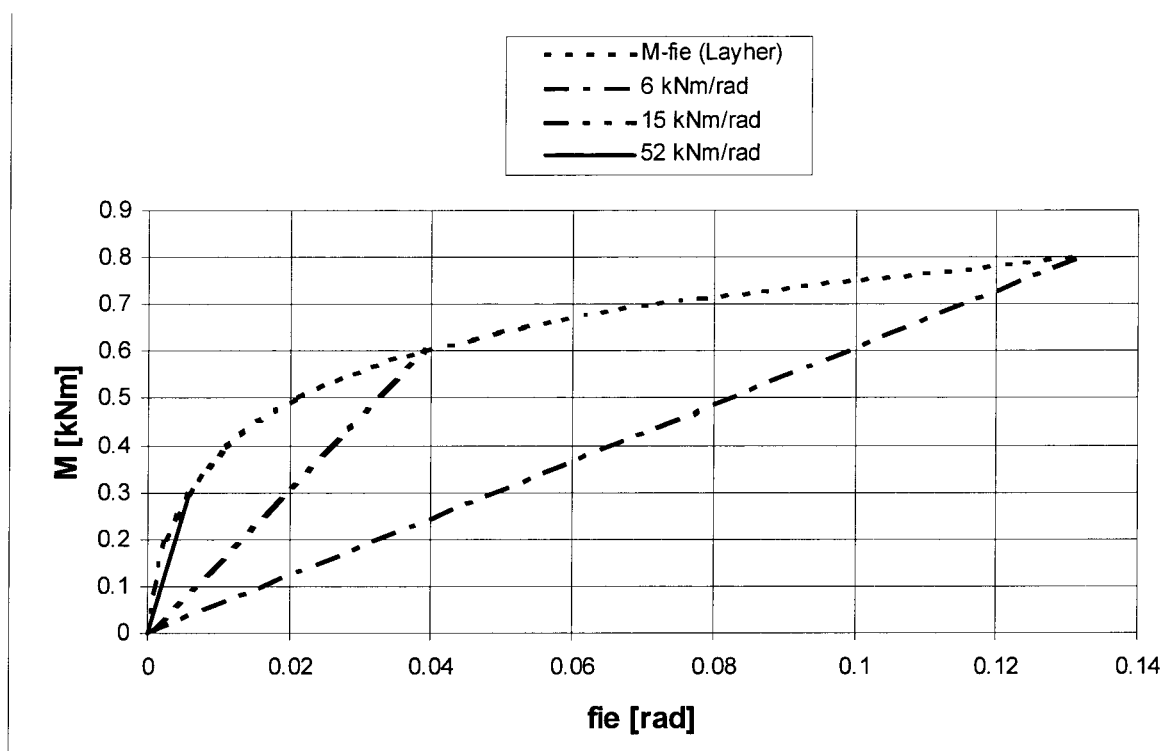
De onderste staander wordt mede gestabiliseerd door de erboven geplaatste staander. In afbeelding 8.5 zijn drie steigerhoogten geïllustreerd (van één, twee en drie slagen). Indien louter de permanente belasting wordt beschouwd, dan is het verschil in permanente belasting tussen staander 1 (F_1) en staander 2 (F_2) bij twee slagen de belasting uit één slag. Naarmate het aantal slagen toeneemt neemt de verhouding tussen de beide normaalkrachten af. Dat betekent dat de steungevende werking tussen de staanders minder wordt.



Afbeelding 8.5: Steungevende werking van de staanders

Bij bovenstaande eigenwaarde-berekeningen is uitgegaan van een lineair stijfheidverloop van 52 kNm/rad (rotatie om de x-as bij aansluiting dwarschakel en staander). Om de invloed van het stijfheidverloop op het knikpatroon (en de Eulerse knikkracht) nader te analyseren, worden bij 4 en 30 slagen (na 30 slagen is de Eulerse knikkracht nagenoeg constant) de Eulerse knikkracht bepaald bij een veerstijfheid van 52, 15 en 6 kNm/rad (zie ook afbeelding 8.6).

Uit de resultaten van tabel 8.2 blijkt dat de Eulerse knikkracht bij 4 slagen afneemt van 57 kN naar 39 kN naarmate de veerstijfheid (rotatie om de x-as) daalt. En bij 30 slagen (tabel 8.3) van 40 kN naar 26 kN. Afbeeldingen 8.7 a t/m c illustreren het knikpatroon bij de afnemende stijfheid bij 4 slagen, afbeeldingen 8.8 a t/m c illustreren het knikpatroon bij 30 slagen. Bij beide afbeeldingen breidt het knikpatroon zich naar boven toe uit. De constructie is dus flexibel-geschoord.



Afbeelding 8.6: Lineaire rotatiestijfheden om de x-as

Tabel 8.2: Eulerse knikkracht bij stijfheden (4 slagen)

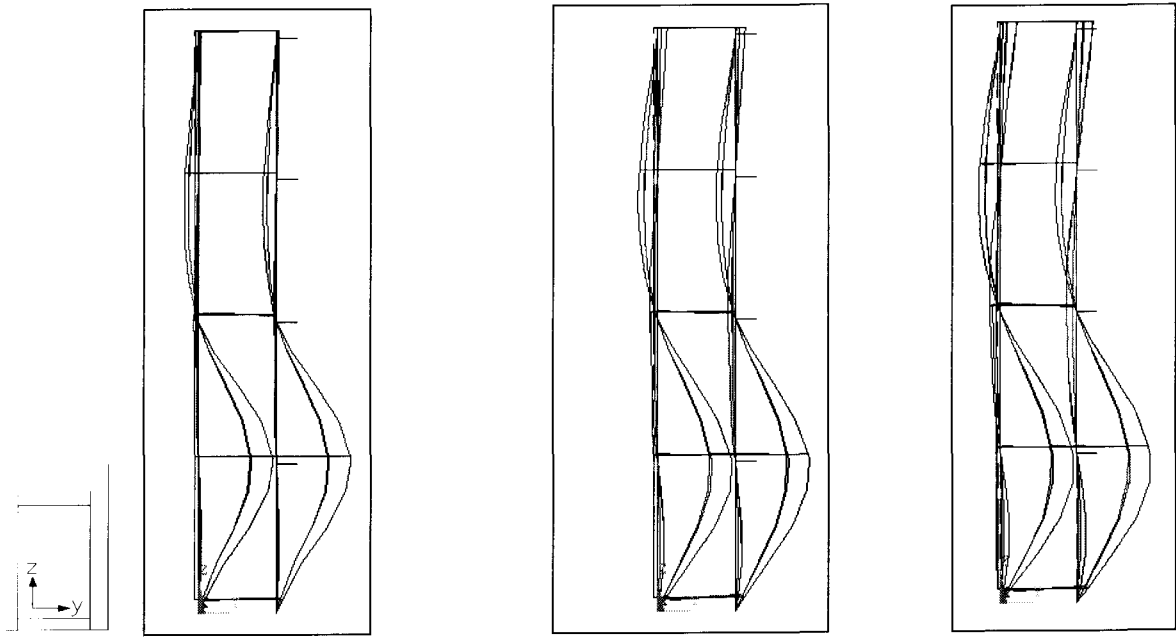
Eulerse knikkracht bij verlopende stijfheid (4 slagen)			
rotatiestijfheid (c [kNm/rad])	n	F* [kN]	Fe (nF*) [kN]
52.00	7.54	7.55	56.93
15.00	6.04	7.55	45.60
6.00	5.23	7.47	39.07

De veerstijfheid van de aansluiting dwarsschakel-staander is gevarieerd.

Tabel 8.3: Eulerse knikkracht bij stijfheden (30 slagen)

Eulerse knikkracht bij verlopende stijfheid (30 slagen)			
rotatiestijfheid (c [kNm/rad])	n	F* [kN]	Fe (nF*) [kN]
52.00	1.48	27.00	39.96
15.00	1.17	26.00	30.42
6.00	1.02	25.70	26.21

De veerstijfheid van de aansluiting dwarsschakel-staander is gevarieerd.

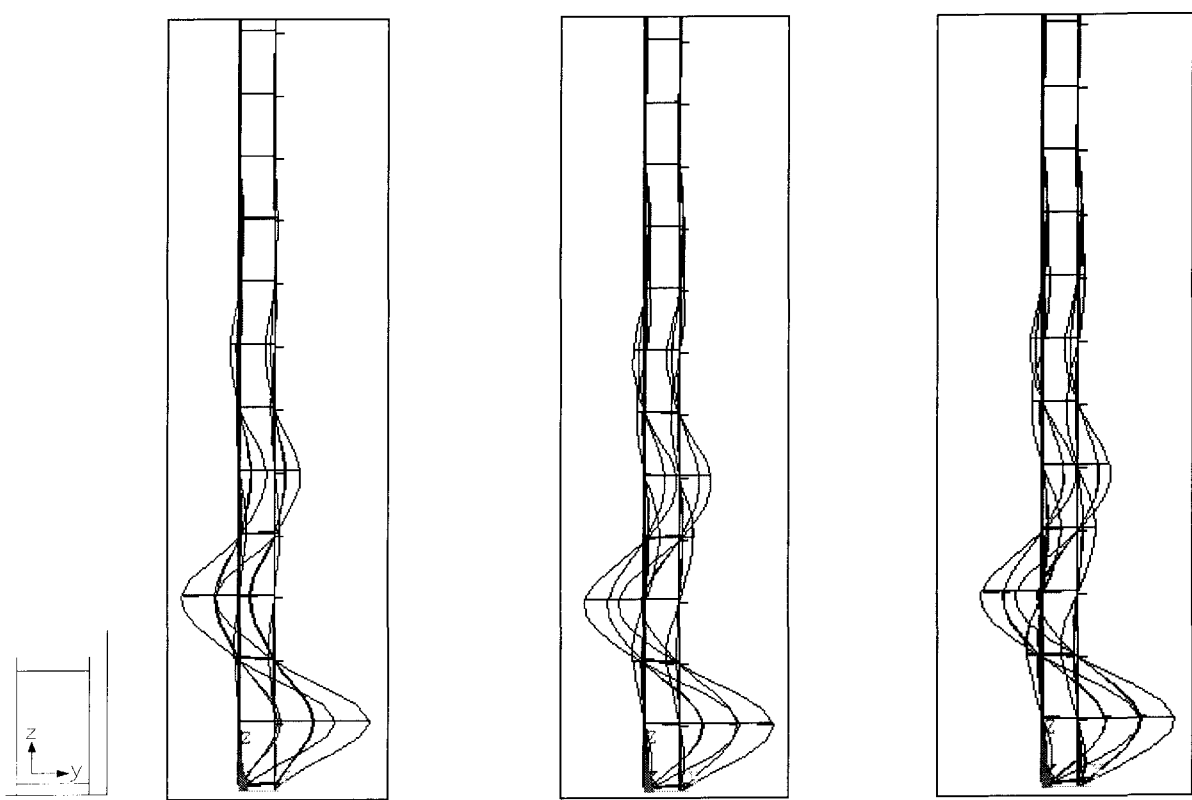


8.7 a ($c = 52 \text{ kNm/rad}$)

8.7 b ($c = 15 \text{ kNm/rad}$)

8.7 c ($c = 6 \text{ kNm/rad}$)

Afbeeldingen 8.7: Knikpatronen (4 slagen)



8.8 a ($c = 52 \text{ kNm/rad}$)

8.8 b ($c = 15 \text{ kNm/rad}$)

8.8 c ($c = 6 \text{ kNm/rad}$)

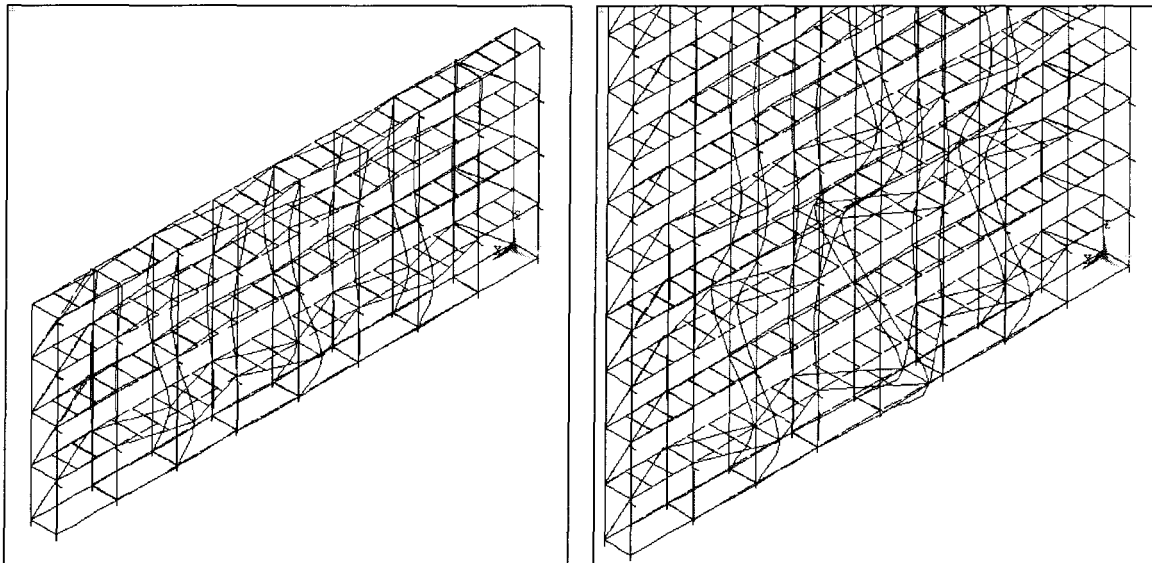
Afbeeldingen 8.8: Knikpatronen (30 slagen)

8.2.2 Nuttige belasting bovenin

Ter vergelijking wordt er een eigenwaarde-berekening gemaakt met de nuttige belasting boven in de steiger. Zie ook afbeelding 6.2 (b).

Bij de combinatie met nuttige belasting op anderhalve werkvloer boven in de steiger wordt het knikpatroon en de Eulerse knikkracht bij 4 en 30 slagen geanalyseerd. Uit afbeeldingen 8.9 a en b, blijkt wederom dat configuratie 1 in combinatie met de nuttige belasting boven in de steiger mag worden geclassificeerd als "flexibel-geschoord".

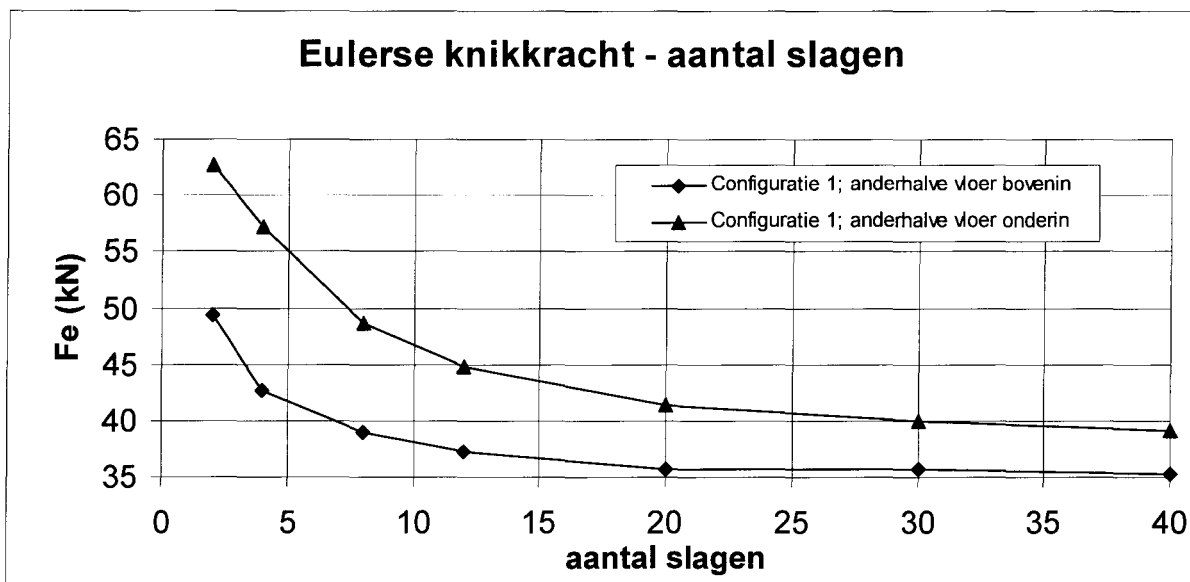
De Eulerse knikkracht heeft een zelfde dalend verloop als bij de combinatie met nuttige belasting onder in de steiger (zie afbeelding 8.10). Tabel 8.4 geeft de input van de grafiek in tabelvorm weer.



a: Knikpatroon (4 slagen)

b: Knikpatroon (30 slagen)

Afbeelding 8.9: Knikpatronen bij verschillend aantal slagen



Afbeelding 8.10: Grafiek knikkracht tegen het aantal slagen

Tabel 8.4: Knikkracht berekend bij nuttige belasting bovenin de steiger

aantal slagen	n	F^* [kN]	$F_e (nF^*)$ [kN]
2	7.95	6.20	49.29
4	5.66	7.55	42.73
8	3.78	10.30	38.93
12	2.84	13.10	37.20
20	1.88	19.00	35.72
30	1.32	27.00	35.64
40	1.01	35.00	35.35

* De normaalkracht (F) is de kleinste reactiekracht t.p.v. de uitknikkende staandergroepen
De rotatiestijfheid (c) tussen de dwarsschakel en staander (x-as) is constant 52 kNm/rad

Uit de grafiek van afbeelding 8.10 blijkt dat de Eulerse knikkrachten in beide krommen uiteindelijk naar een continue waarde gaan. Bij 30 slagen bedraagt de Eulerse knikkracht bij de combinatie met anderhalve vloer boven in 35 kN, bij anderhalve vloer onder in 39 kN.

Zoals in paragraaf 8.2.1 besproken is, is het dalende verloop het gevolg van de afnemende verhouding van de stijfheid. Indien de nuttige belasting bovenin geplaatst wordt, wordt dit effect nog versterkt (immers de normaalkracht uit nuttige belastingen is dan over alle staanders hetzelfde).

8.3

Conclusie met betrekking tot classificatie

Uit de voorafgaande resultaten kan worden geconcludeerd dat de steigerconfiguraties tot een hoogte van 40 slagen geclassificeerd mogen worden als "*flexibel-geschoord*". De veerstijfheid mag multi-lineair worden gekozen.

De conclusie wordt onderbouwd door de volgende punten:

1. De steigerconstructie knikt uit ter plaatse van de werkvloer (waar de steigerconstructie niet verankerd is) en wel in het y-z vlak.
2. Bij verlaging van de stijfheid (van 52 kNm/rad naar 6 kNm/rad) breidt het knikpatroon zich naar boven toe uit. Dit impliceert een lagere knikkracht, waarmee het "flexibel-" geschoorde patroon gehandhaafd blijft.

Bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op de eerste configuratie in combinatie met de belastingcombinatie waarbij er op anderhalve werkvloer onderin de steiger nuttige belasting wordt aangebracht bij een steiger met een breedte van 1088 mm. De nuttige belasting onderaan had een gunstige werking op de Eulerse knikkracht.

De overige combinaties met nuttige belasting bovenin de steiger zullen een lagere knikkracht geven waardoor het "flexibel-" geschoorde patroon gehandhaafd blijft (en versterkt wordt).

8.4 Scheefstand

De scheefstand die door middel van equivalente belasting op de steigerconstructie wordt gezet, wordt bepaald aan de hand van de classificatie van de steigerconstructie. Doordat de betreffende configuratie geclassificeerd is als "flexibel-geschoord" wordt ter plaatse van de staandergroepen ter hoogte van de slag een equivalente horizontaalkracht aangebracht.

Afbeelding 8.11 illustreert dat ter plaatse van staandergroepen A en B scheefstandpatronen worden aangebracht (F_i is de betreffende normaalkracht).

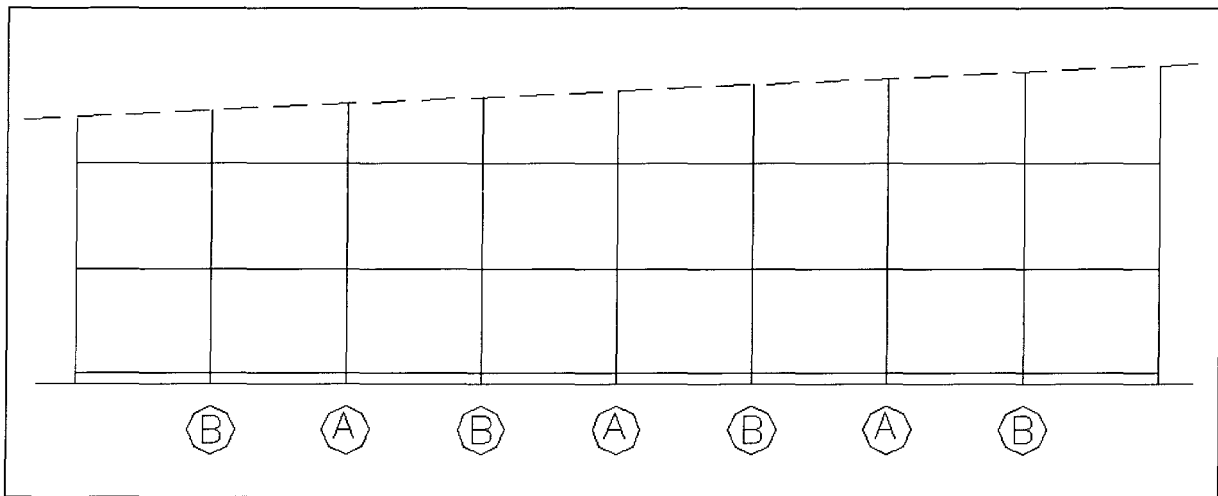
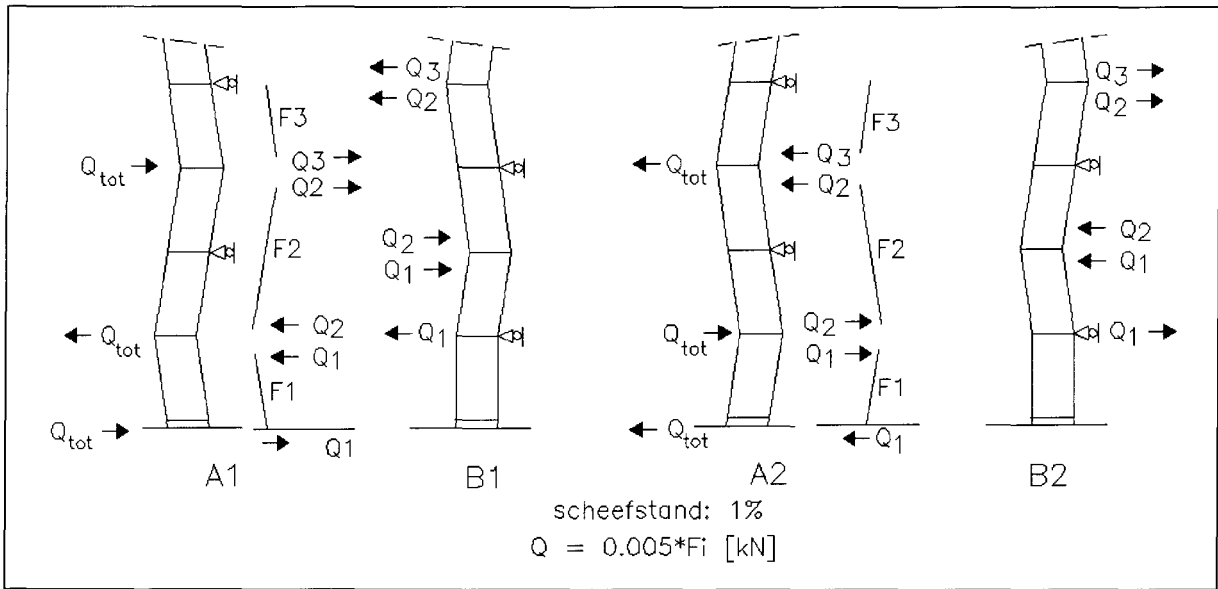
1. De scheefstand wordt aangebracht op de staandergroepen die uiknikken conform het knikpatroon (zie afbeelding 8.5 a). Dat houdt in de scheefstand op staandergroepen A wordt aangebracht, waarbij het patroon van A1 of A2 wordt aangehouden. Het patroon dat het ongunstigste (laagste) voor de bouwhoogte is, wordt hierbij aangehouden. Bij de uitwerking in paragraaf 9.1.1.1 worden de verschillende scheefstanden doorgerekend.
2. De scheefstand wordt op de alle staandergroepen aangebracht. Dat houdt in dat de patronen A1 of A2 gecombineerd worden met B1 of B2.

Alleen bij windbelasting correspondeert de richting van de scheefstand met de richting van de windbelasting.

De combinatie van beide scheefstanden (A1 en B1 of A2 en B2) geeft het grootste moment in de staandergroepen (hierop wordt in paragraaf 9.1.1.3 op teruggekomen).

De waarde van de equivalente horizontaalkracht wordt bepaald uit de staanderbelasting. Hiervoor wordt een eerste-orde berekening gemaakt waaruit de maximale normaalkracht in de betreffende staanders F_1 , F_2 , F_3 enz. worden bepaald. Deze normaalkrachten worden vertaald in equivalente horizontale belastingen.

In hoofdstuk 9 staan de bouwhoogtebepalingen centraal. In bijlage 2 wordt deze stap voor stap uitgewerkt. Hierin wordt geïllustreerd hoe de equivalente belasting moet worden aangebracht.



Afbeelding 8.11: Scheefstand

Hoofdstuk 9: Berekeningsresultaten

9.1 Berekeningsprocedure

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de statische berekeningen gepresenteerd. Er wordt uitgegaan van twee rekenprocedures. Afbeelding 9.1 geeft een structuurdiagram weer van de procedure "tweede-orde en fysisch lineair". Afbeelding 9.2 geeft een diagram weer van de procedure "geometrisch en fysisch niet-lineair."

Bij de geometrisch niet-lineaire en fysisch lineaire berekening wordt er uitgegaan van een model met N slagen en een van tevoren geselecteerde belastingcombinatie. Met behulp van een eerste-orde berekening dient de equivalente belasting ten gevolge van de scheefstand te worden bepaald. Hierna dient een tweede-orde berekening te worden gemaakt waarna begonnen wordt met de controle van de *verankering* en het moment ter plaatse van de *aansluiting dwarsschakel-staander*. Volgens de rekenprocedure vindt er hierna voortgang plaats als aan beide toetsingscriteria voldaan is.

Hierna worden de *penverbinding* en de *staander* gecontroleerd. Beide criteria worden apart beschouwd omdat de plaatsing van de penverbinding afhankelijk is van de lengte van de toegepaste staander. Bij de controle wordt ervan uitgegaan dat de penverbinding op de ongunstigste plaats zit.

Als blijkt dat aan de criteria voldaan is, wordt bovenstaande procedure herhaald met één slag meer. Indien er aan een van de criteria niet meer voldaan wordt, bedraagt het maatgevend aantal slagen het aantal slagen van de berekening ervoor.

De berekeningsprocedure bij een fysisch niet-lineaire berekening is nagenoeg hetzelfde. Doordat het moment-rotatiediagram van de aansluiting dwarsschakel-staander ingevoerd wordt, is de controle hierin geïmpliceerd. De controle kan beperkt blijven tot de (maximale) hoekverdraaiing.

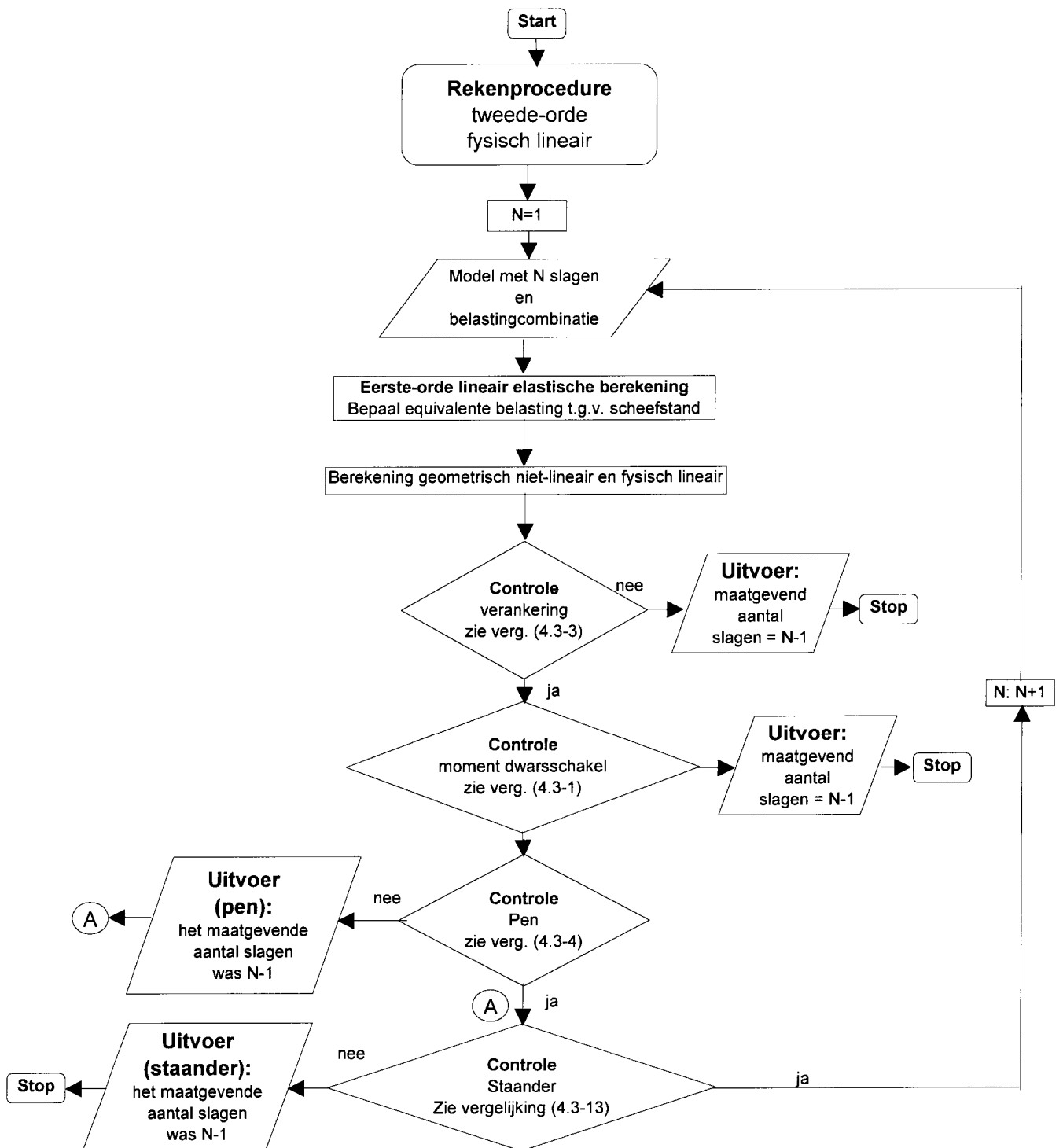
Pas als bij gebruik van een bi-lineair moment-rotatiediagram de horizontale tak benut wordt, is er sprake van een fysisch niet-lineaire berekening. Bij gebruik van het multi-lineaire diagram is de berekening altijd fysisch niet-lineair.

In het totaal wordt er van acht configuraties de maatgevende hoogte bepaald. Afbeelding 9.3 c geeft een overzicht van de configuraties. Afbeelding 9.3 d geeft de vloeropbouw gedetailleerd weer (beide afbeeldingen zijn in hoofdstuk 3 reeds gepresenteerd).

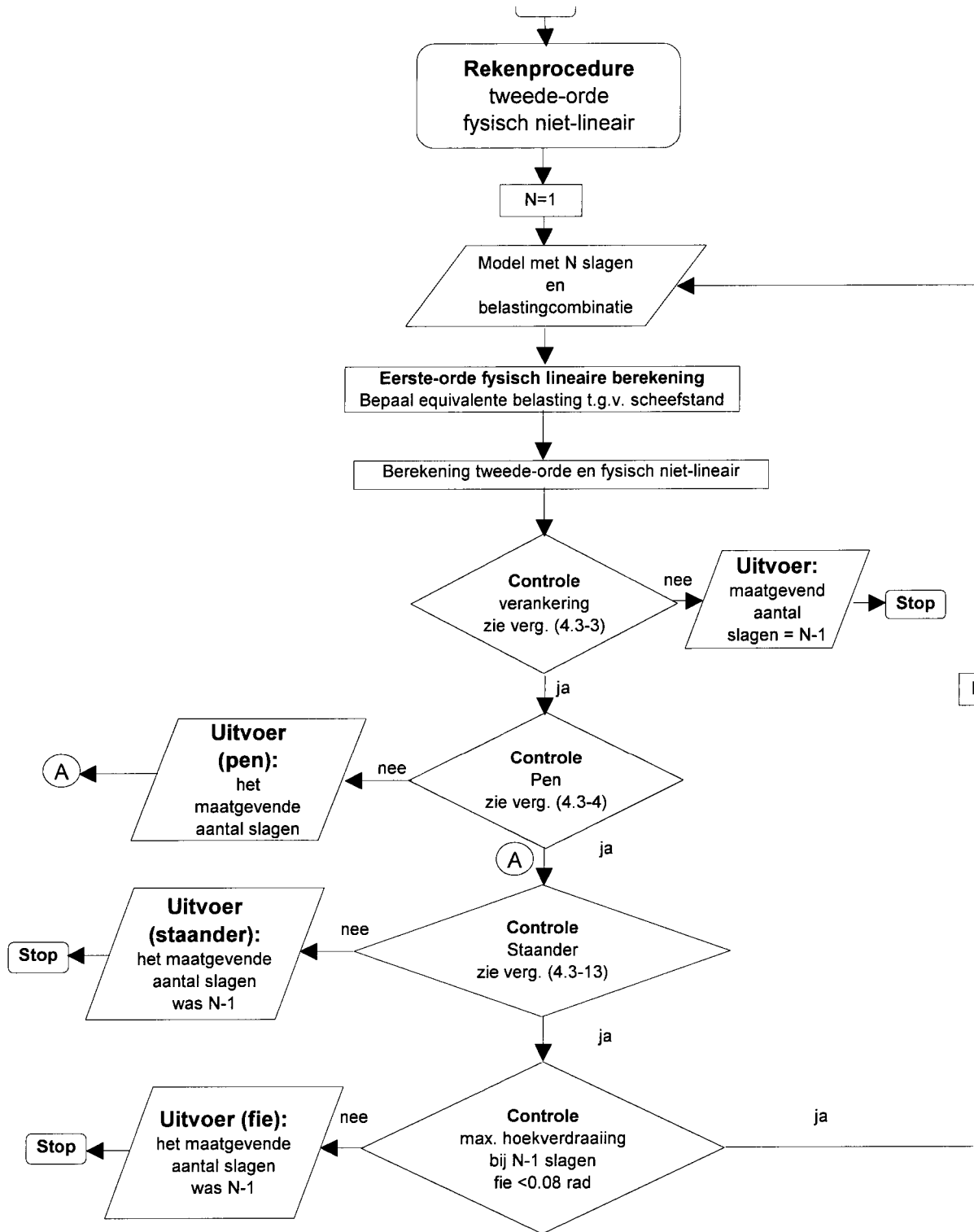
De berekeningsmethodiek wordt gevolgd tot de maatgevende bouwhoogte.

Als eerste zal de invloed van het moment-rotatiediagram op de bouwhoogte worden onderzocht. Dit gebeurt bij configuratie 1 door uitgaande van het moment-rotatiediagram van Layher de invloed van een lineair, bi-lineair en multi-lineair moment-rotatiediagram op de bouwhoogte te onderzoeken.

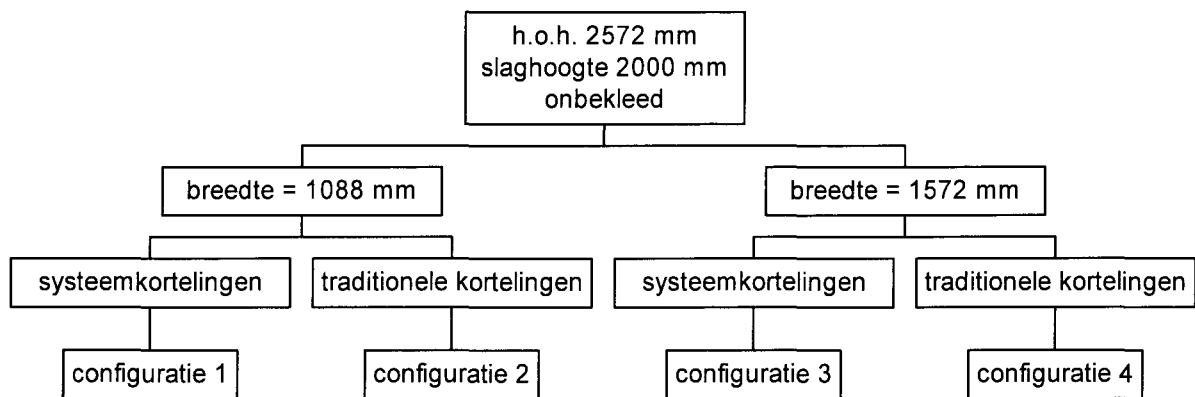
Hierna worden de overige configuraties met het multi-lineaire diagram doorgerekend. Het karakter wordt dan zowel geometrisch als fysisch niet-lineair.



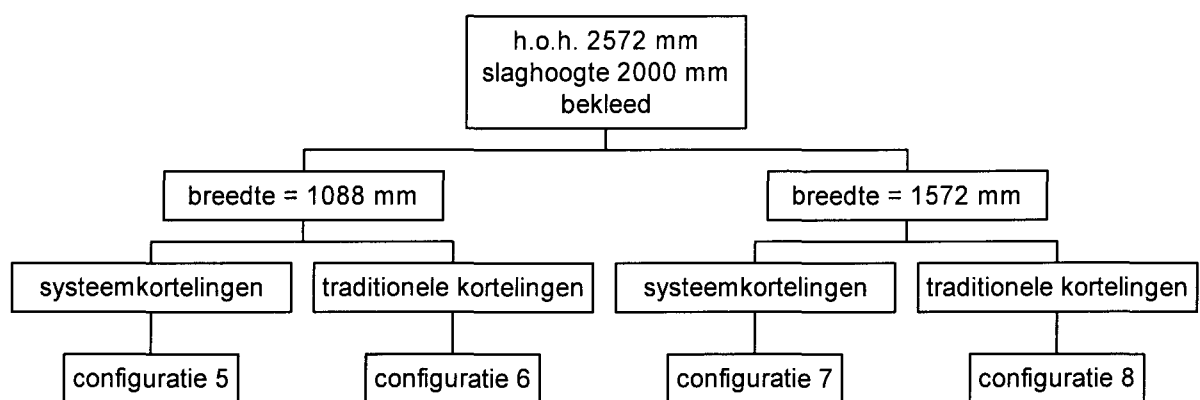
Afbeelding 9.1: Berekeningsprocedure tweede-orde en fysisch lineair



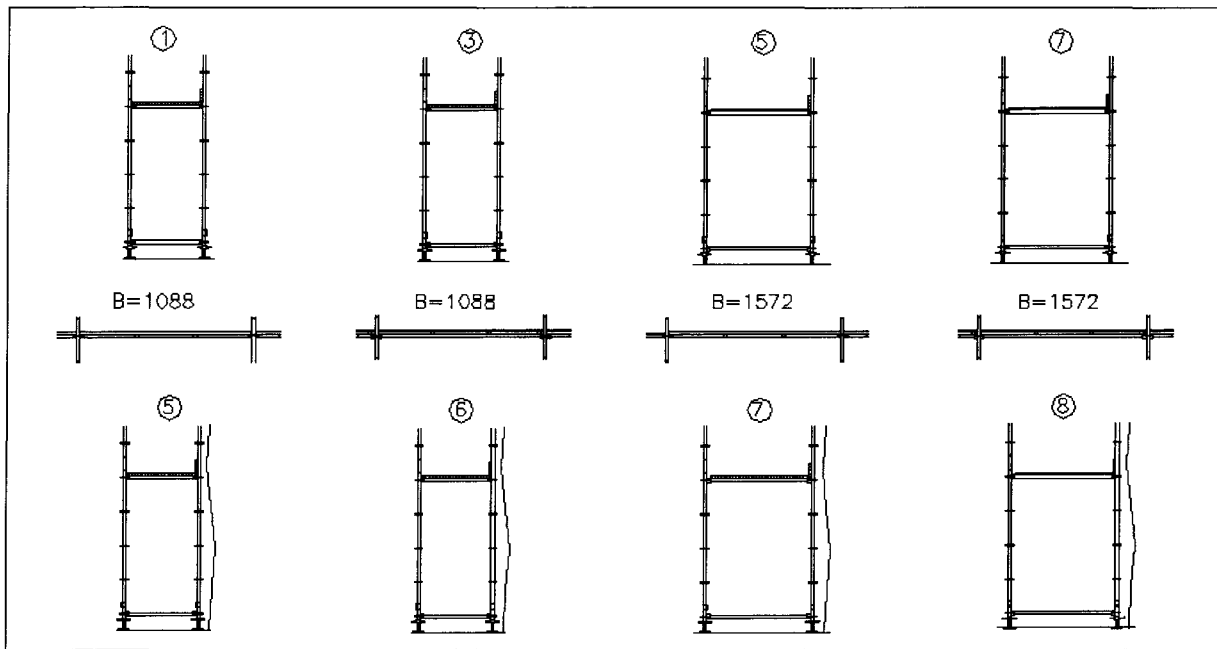
Afbeelding 9.2: Berekeningsmethode tweede-orde en fysisch niet-lineair



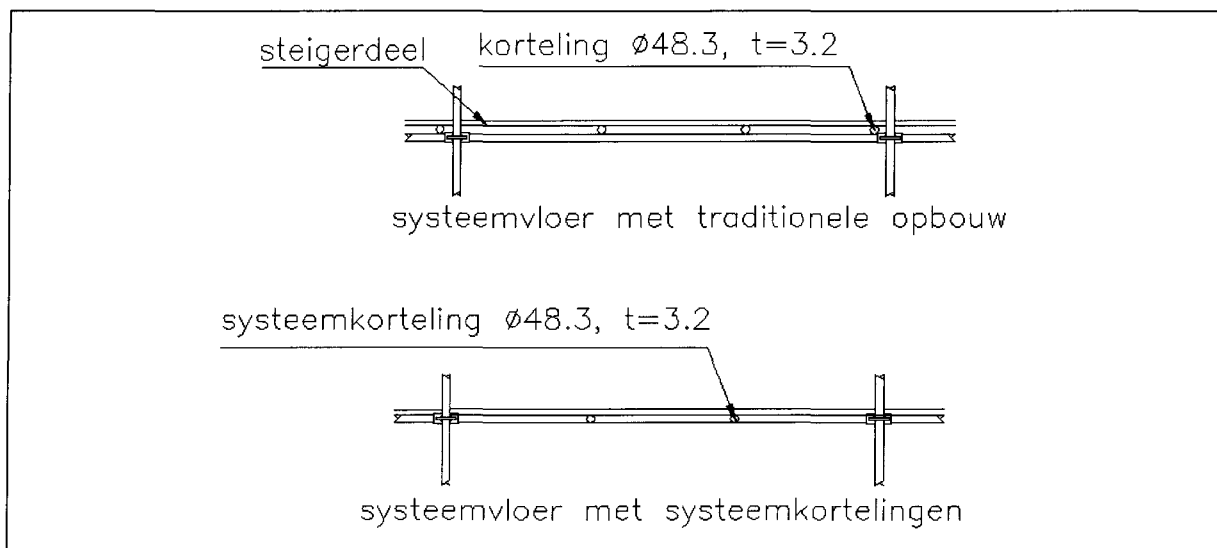
Afbeelding 9.3 a: Totaal overzicht configuraties (onbekleed)



Afbeelding 9.3 b: Overzicht configuraties (bekleed)



Afbeelding 9.3 c: Configuraties (grafisch)



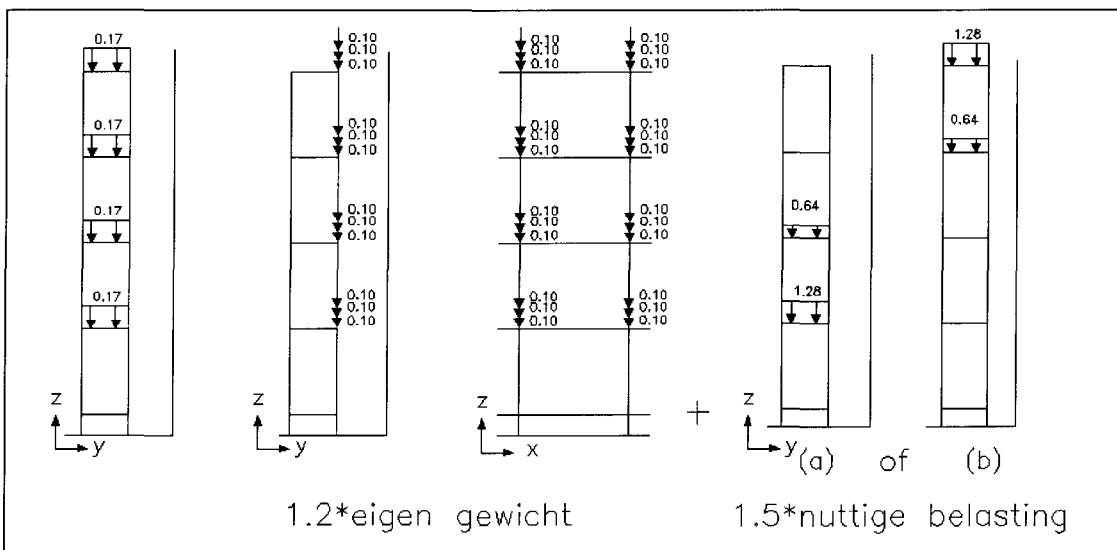
Afbeelding 9.3 d: Uitvoering vloeropbouw

9.2 Resultaten configuratie 1

9.2.1 Combinatie “nuttige belasting onderin”

In configuratie 1 wordt de steiger doorgerekend met een breedte van 1088 mm, in combinatie met gebruik van systeemkortelingen. Configuratie 1 is niet bekleed. De configuratie wordt doorgerekend met nuttige belasting uit anderhalve vloer.

Afbeelding 9.4 geeft een overzicht van de beschouwde belastingcombinaties met anderhalve werkvloer. In plaatje (a) is de nuttige belasting op anderhalve werkvloer onder in de steiger afgebeeld (ondanks dat de belastingen en combinaties in hoofdstuk 5 behandeld zijn, zullen bij de deelparagrafen worden gepresenteerd).



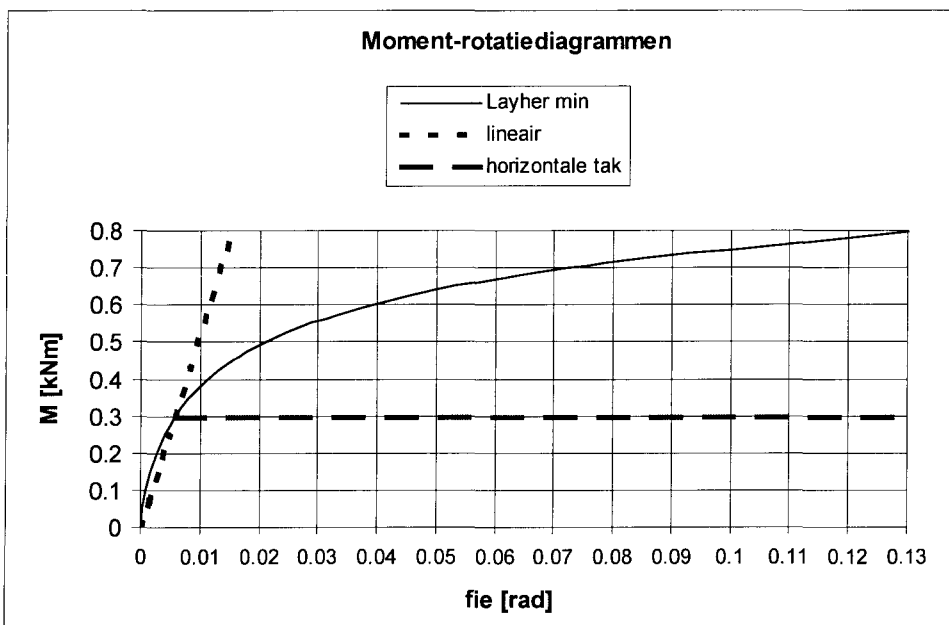
Afbeelding 9.4: Belastingcombinatie met nuttige belasting

9.2.1.1 Invloed moment-rotatiekarakteristieken

In deze paragraaf worden de bouwhoogten bepaald uitgaande van verschillende moment-rotatiekarakteristieken (van de verbinding dwarschakel-staander). De karakteristieken worden achtereenvolgend aangenomen als lineair, bi-lineair en multi-lineair.

1. Berekening geometrisch niet-lineair en fysisch lineair (met $c = 52 \text{ kNm/rad}$)

Bij deze berekening wordt uitgegaan van een lineair moment-rotatiediagram met een stijfheid van 52 kNm/rad . Afbeelding 9.5 illustreert het moment-rotatiediagram van de verbinding tussen de dwarschakel en de staander. In eerste instantie wordt het moment-rotatiediagram aangenomen als lineair (de doorgetrokken lijn die een lineaire stijfheid van 52 kNm/rad aangeeft). De verbinding kan dan een maximaal moment opnemen van 0.3 kNm (het snijpunt tussen de lijn en kromme). De berekening is geometrisch niet-lineair en fysisch lineair. De berekeningsprocedure is overeenkomstig afbeelding 9.1.



Afbeelding 9.5: Moment-rotatiediagram (rotatie om de x-as)

De scheefstand wordt aangebracht volgens de normaalkracht in de staanders (zie afbeelding 8.17). Bij 20 slagen blijkt de verbinding tussen de dwarschakel en de staander (om de globale x-as) te zijn overschreden. De steigerconfiguratie wordt gecontroleerd bij een bouwhoogte van 19 slagen. Afbeelding 9.6 illustreert het moment in de dwarschakel ter plaatse van de middelste staandergroep.

▪ Verankering

De krachten in de verankering blijven beperkt tot (ca.) 0.49 kN . Hetgeen leidt tot een unity-check: $0.49/6 = 0.1$.

Opmerking:

Bij de berekeningen van onbeklede steigers blijven de krachten in de verankering beperkt tot maximaal 3 kN , de unity-check bedraagt dan 0.5 (deze belasting geldt indien er van het belastinggeval "wind" wordt uitgegaan). Deze controle wordt in het vervolg alleen bij de belastingcombinatie "windbelasting" verricht.

▪ **Verbinding dwarsschakel-staander**

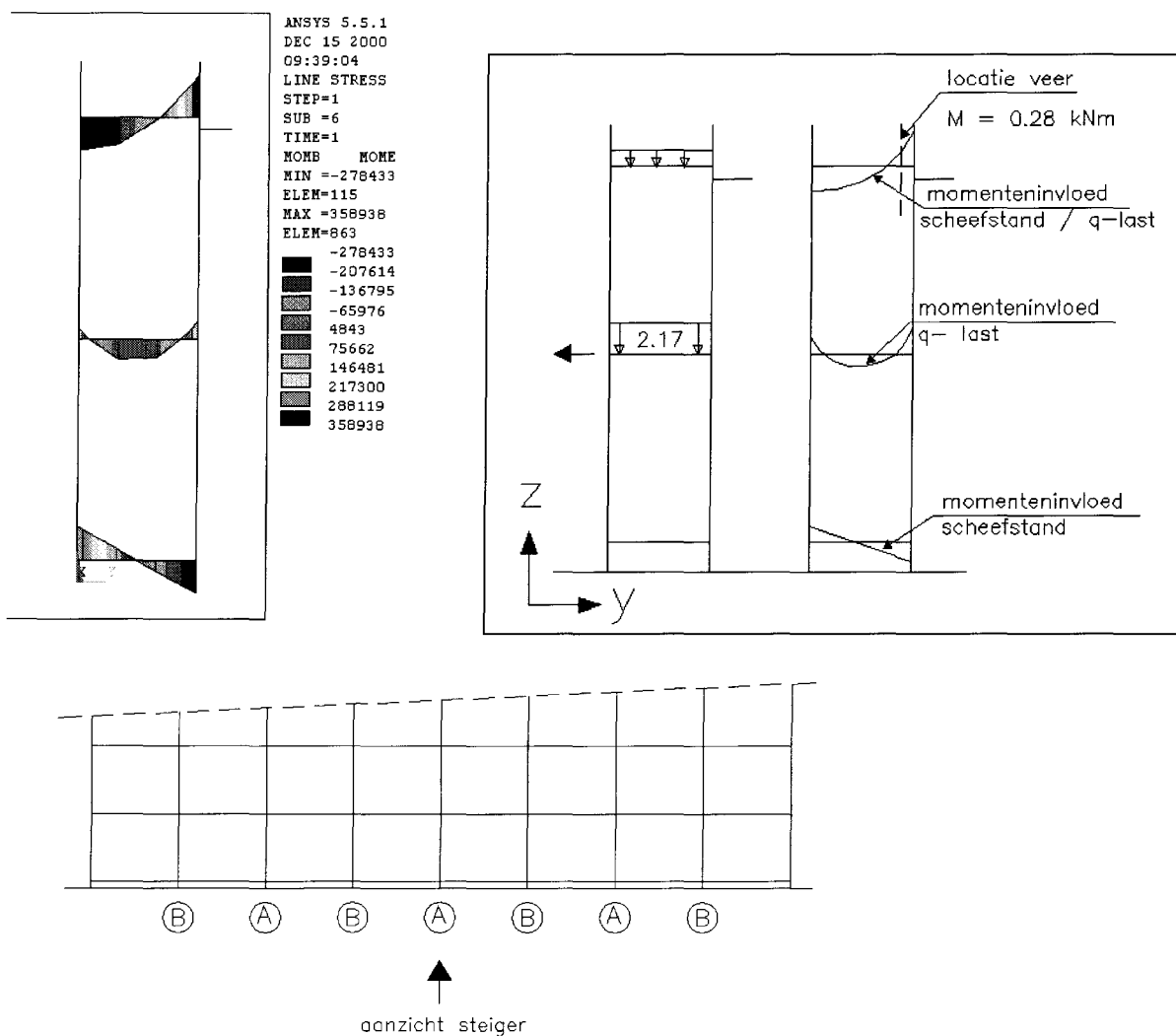
Het moment ter plaatse van de verbinding (veer) bedraagt 0.28 kNm. De unity-check bedraagt $0.28/0.3 = 0.93$.

De momentenlijn is geïllustreerd in afbeelding 9.6 a.

Opmerking:

Ter plaatse van de middelste dwarsschakel is in het midden geen knoop gemodelleerd, vandaar dat de momentenlijn geen paraboolvorm heeft.

De momentenlijn in het midden zou zonder scheefstand een maximaal moment krijgen van 0.32 kNm ($1/8 \cdot q \cdot 1.088^2$). Het afgebeelde momentenverloop wordt enigszins beïnvloed door scheefstand en heeft geen knoop in het midden waardoor het maximale moment niet afgebeeld is. Indien de som zonder scheefstand gemaakt wordt bedraagt het moment in het midden 0.20 kNm en aan de zijkanten 0.12 kNm (momentenverloop niet afgebeeld).

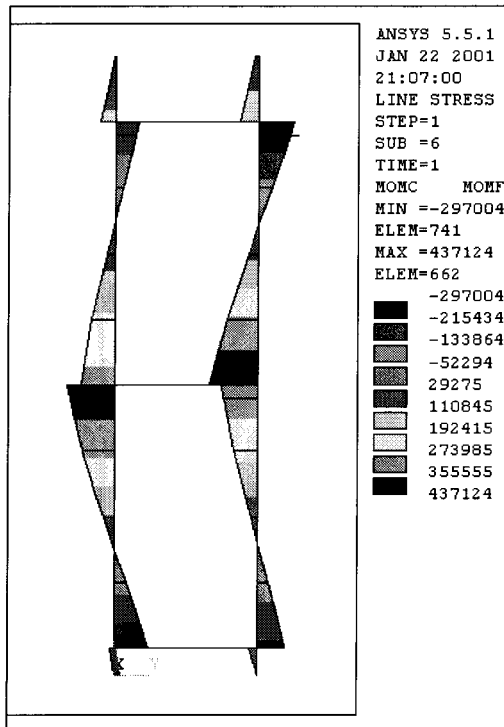


Afbeelding 9.6 a:

Momentenlijn diagram t.b.v. maatgevende dwarsschakel

- Pen / staander

Uitgaande van het maximaal optredende moment van 0.43 kNm (zie afbeelding 9.6 b) bedraagt de unity-check van de pen $0.43/1.4 = 0.3$.
Door het geringe moment blijft de controle van de staander achterwege.



Afbeelding 9.6 b: Momentenverloop (om de x-as)

- Langsschakel staander

Bij de aansluiting langsschakel-staander is uitgegaan van een lineaire veer met een stijfheid van 15 kNm/rad. Het maximaal toelaatbare moment is 0.6 kNm. Het optredende moment bedraagt 0.36 kNm (unity check $0.36/0.6 = 0.6$ verbinding voldoet).

Deze controle blijkt bij de overige configuraties geen problemen te geven en worden derhalve niet meer uitgevoerd.

2. Berekening geometrisch niet-lineair en fysisch niet-lineair ($c = 52 \text{ kNm/rad}$)

De berekening wordt opnieuw uitgevoerd, waarbij er uit wordt gegaan van een bi-lineair moment-rotatiediagram. Hierdoor kan de berekening een zowel geometrisch als fysisch niet-lineair karakter krijgen. De procedure van afbeelding 9.2 wordt doorlopen.

Indien de waarde van het moment 0.3 kNm overschrijdt, wordt de rotatieveer beschouwd als een plastisch scharnier (met een continue moment van 0.3 kNm). De grafiek wordt afgesneden bij een hoekverdraaiing van 0.13 rad (zie horizontale tak in afbeelding 9.5). Het uiteindelijke bezwijken vindt hierdoor of bij de staanders plaats of bij de verankering. Doordat de krachten op de verankering laag zijn (minder dan 1 kN), wordt er van uitgegaan dat bezwijken bij de staanders optreedt.

De berekening wordt gemaakt bij bouwhoogten van 24, 25 en 26 slagen. Afbeeldingen 9.7 a t/m c illustreren het momentenverloop in de middelste staandergroep bij de drie bouwhoogten. Het momentenverloop in de staander geeft bij 24 slagen een moment van 1.31 kNm , bij 25 slagen 2.03 kNm en bij 26 slagen 6.31 kNm . De controle van de pen vindt plaats bij 24 slagen, de staander bij 25 slagen.

▪ Pen

Indien het criterium van de pen wordt gehanteerd ($M_{y,u;d} = 1.4 \text{ kNm}$) bedraagt de maximale bouwhoogte 24 slagen. In afbeelding 9.7 a is de momentenlijn bij 24 slagen afgebeeld. Indien de pen boven de eerste slag zit, bedraagt het moment hierbij ca. 1.31 kNm . De unity-check (bij 24 slagen) bedraagt $1.31/1.4 = 0.94$.

▪ Staander

De unity-check werd bepaald volgens de volgende vergelijking (4.3-1):

$$\left(\frac{M_{y;s;d}}{1.04 * 2.1 * \left(1 - \left(\frac{N_{s;d}}{N_{pl;d}} \right)^{1.7} \right)} \right)^2 + \left(\frac{M_{z;s;d}}{M_{z;pl;d}} \right)^2 \leq 1$$

(hierbij wordt $M_{y;s;d}$ vervangen door $M_{x;s;d}$ of $M_{z;s;d}$ door $M_{x;s;d}$)

De vergelijking mag worden toegepast doordat de optredende dwarskracht circa 3 kN bedraagt en minder dan 13 kN (zie hoofdstuk 4).

De maatgevende factor in de vergelijking is het quotiënt van het optredend moment en het uiterst opneembaar moment ($M_{y,u;d} = 2.1 \text{ kNm}$).

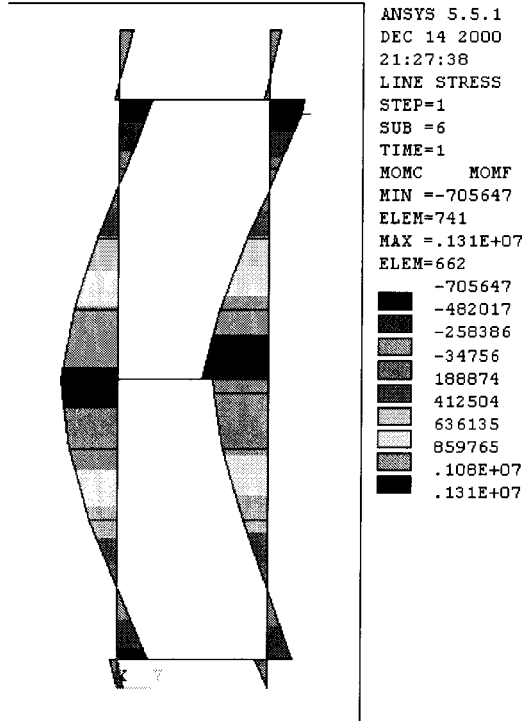
De invloed van het moment om de z-as is zeer gering ($0.003/2.1 = 0.0014$) en wordt verwaarloosd. Afbeelding 9.7 d geeft het krachtenverloop grafisch weer.

De unity-check (bij 25 slagen) bedraagt:

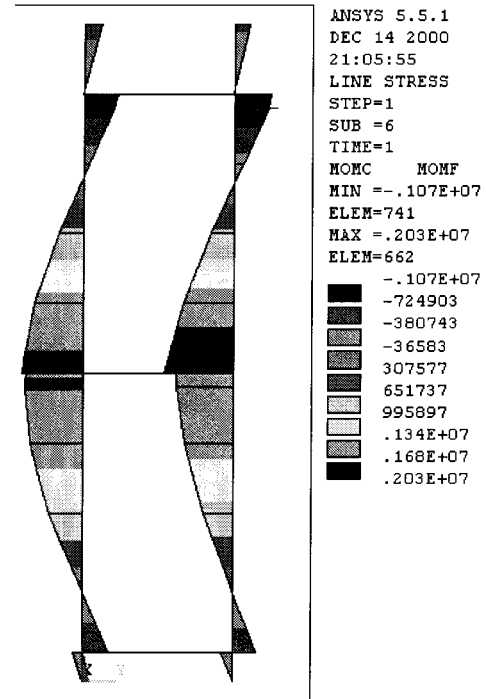
$$(2.03 / (2.1 * 1.04 * (1 - (19/145)^{1.7})))^2 = 0.92$$

of

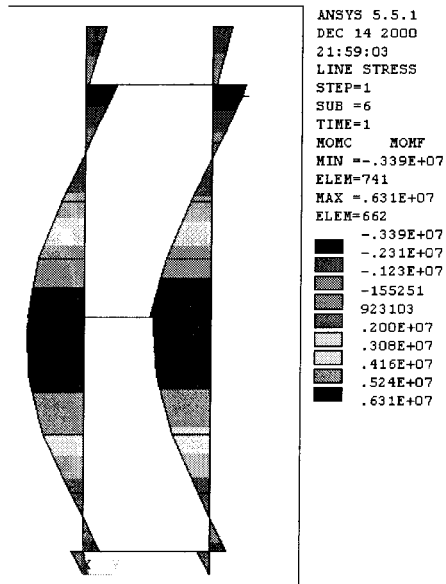
$$2.03/2.1 = 0.97$$



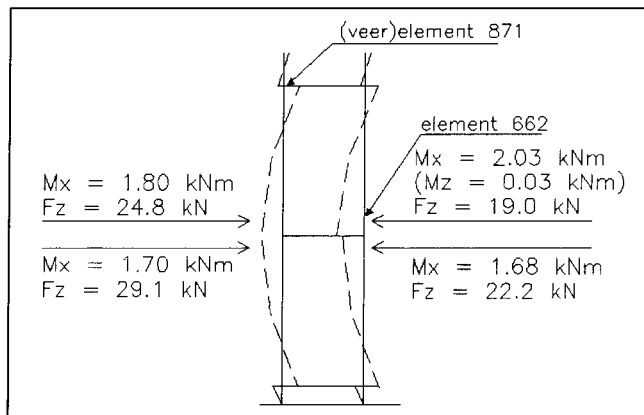
Afbeelding 9.7 a: Momentenlijn (24 slagen)



Afbeelding 9.7 b: Momentenlijn (25 slagen)



Afbeelding 9.7 c: Momentenlijn (26 slagen)

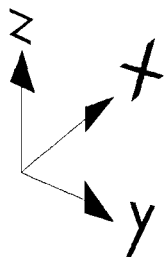
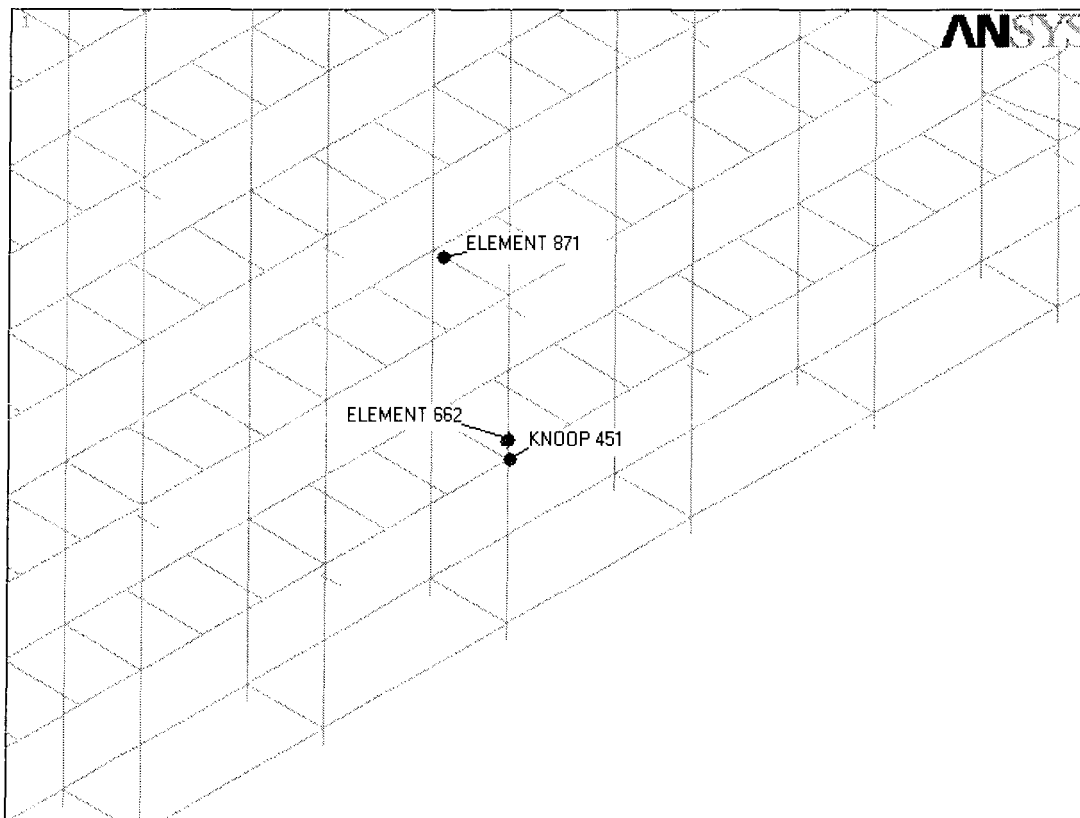


Afbeelding 9.7 d: Krachtenverloop 25 slagen

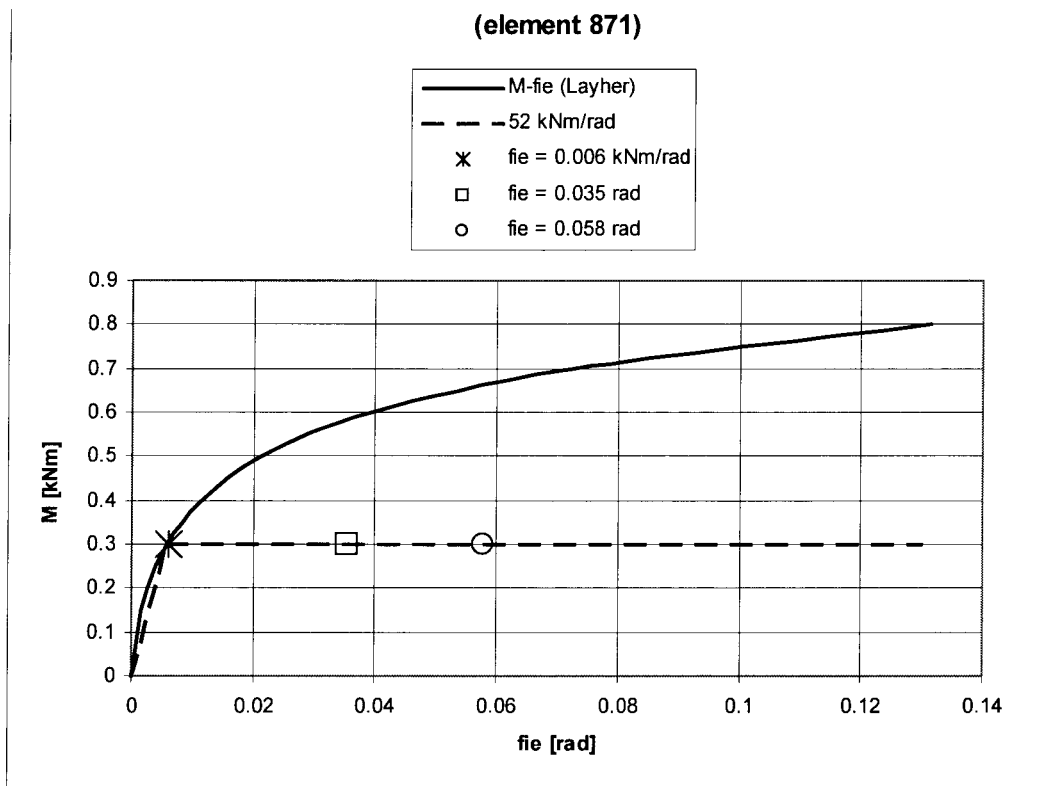
- Hoekverdraaiing (fie)

In afbeelding 9.9 is het moment-rotatiediagram gegeven met de bezwijkcriteria en de hoekverdraaiing ter plaatse van element 871 (zie afbeelding 9.8 voor de verwijzing). In afbeelding 9.5 was dit het veerelement dat de kritieke grens overschreed. Het optredend moment (0.28 kNm) komt overeen met een rotatie van 0.006 rad. Uitgaande van het bilineaire stijfheidsverloop bedraagt de maximale hoekverdraaiing 0.058 rad. Doordat beide kritieke onderdelen (pen en staander) pas in de horizontale tak van het moment-rotatiediagram maatgevend zijn, is er sprake van een fysisch niet-lineaire berekening.

Het moment-rotatiediagram van veerelement 871 is afgebeeld in afbeelding 9.9.



Afbeelding 9.8: Locatie elementen en knopen

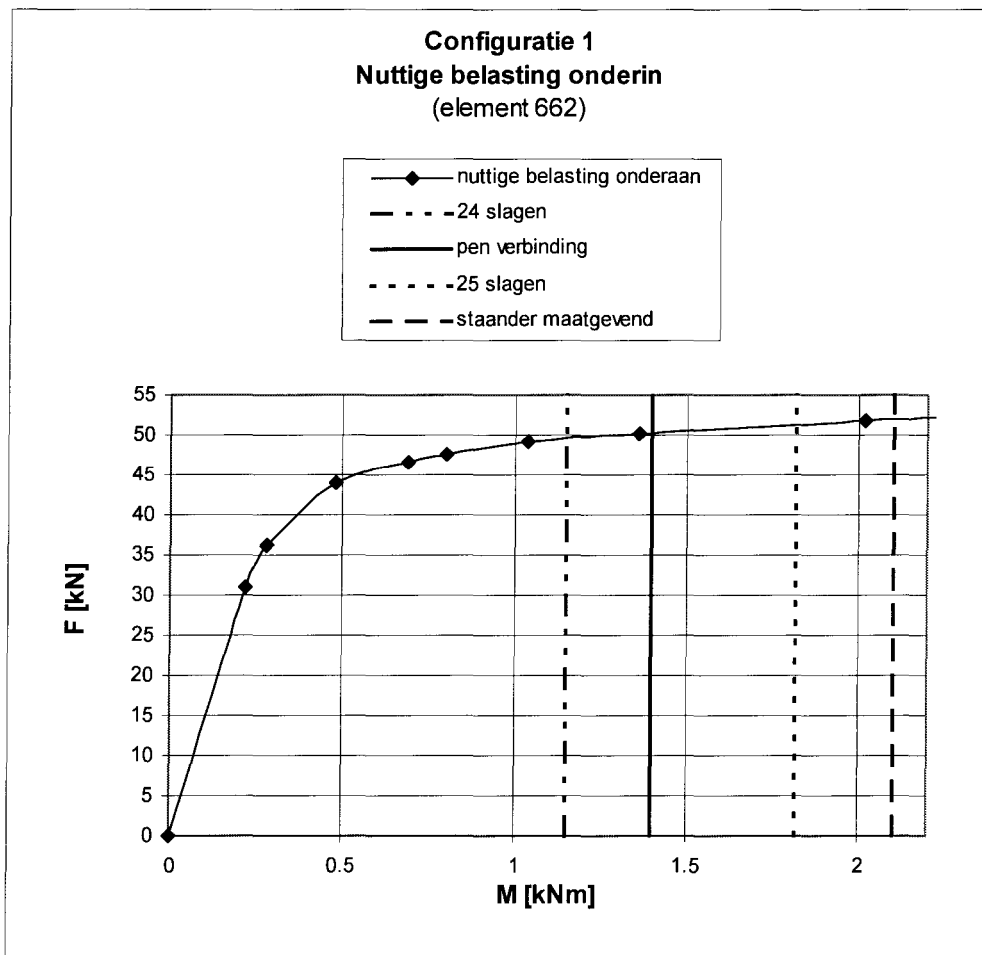


Afbeelding 9.9: Moment-rotatie diagram / rotatie bij maatgevend onderdeel

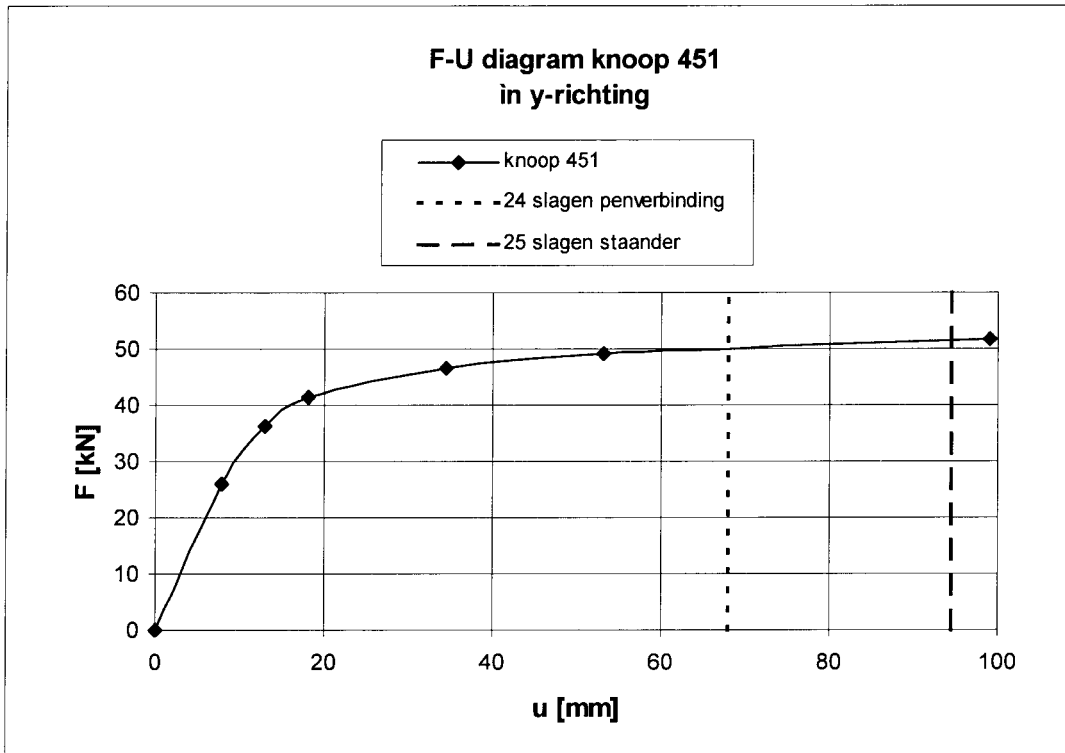
- Analyse belastingproces (nadere beschouwing krachtenverloop)

In afbeelding 9.10 is een grafiek geïllustreerd waar het plaatselijke krachtenverloop is geanalyseerd. Dit is gedaan door de totale belasting van de staandergroep bij 25 slagen te bepalen (deze bedraagt 51.8 kN), waarna deze totale belasting in deelstappen op het steigermodel is aangebracht. Per deelstap wordt het optredend moment bij element 662 bepaald (zie afbeelding 9.8). In de grafiek zijn het uiterst opneembare moment ter plaatse van de doorsnede (2.1 kNm) en het maximaal opneembare moment van de pen (1.4 kNm) uitgezet.

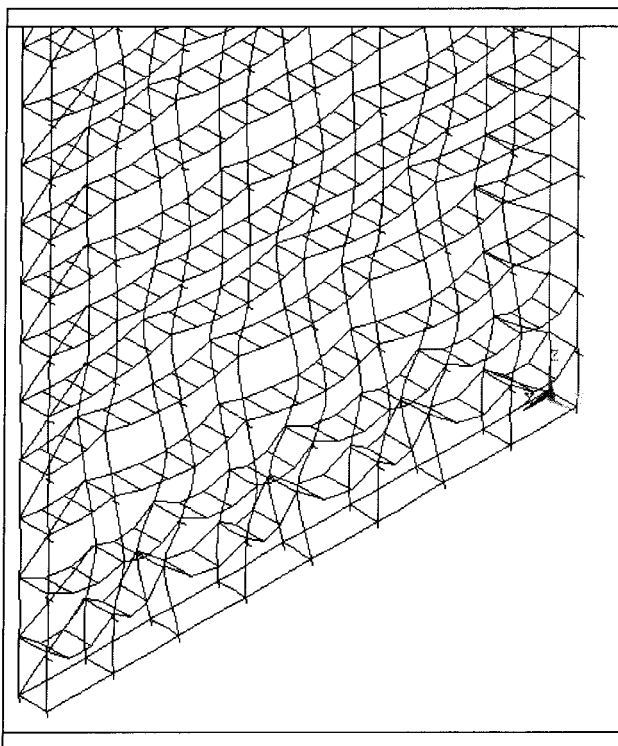
Ter informatie is in afbeelding 9.11 in knoop 451 de belasting als functie van de doorbuiging. Een isometrie en een zijaanzicht van de vervorming van de steiger zijn in afbeeldingen 9.12 a en b geïllustreerd.



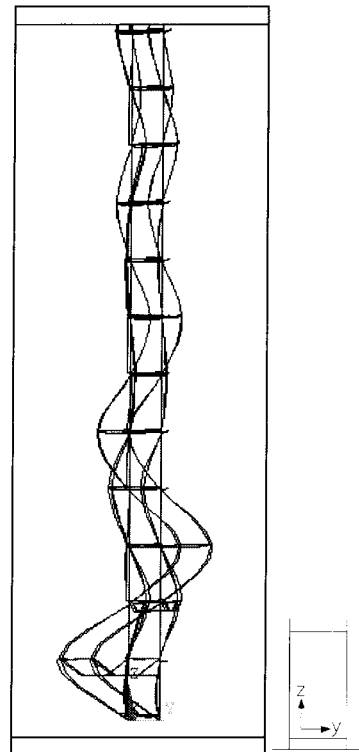
Afbeelding 9.10: De totale belasting als functie van het optredend moment (element 662)



Afbeelding 9.11: Belasting-verplaatsing t.p.v. knoop 451



9.12 a: Isometrie



9.12 b: Doorsnede

Afbeeldingen 9.12: Vervormingpatronen

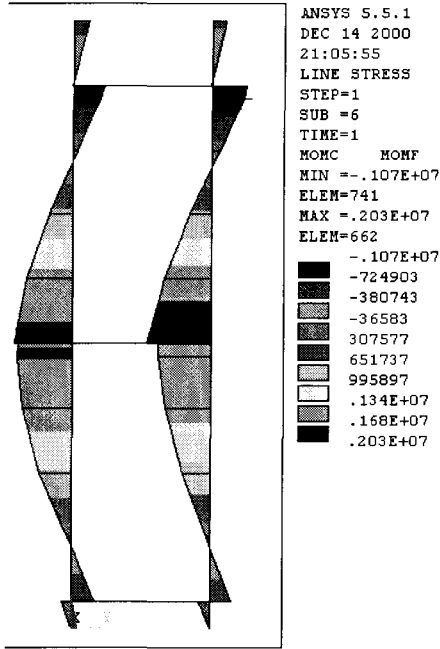
Opmerking

De scheefstand kan op verschillende manieren worden aangebracht. Er kan worden gekozen voor een scheefstand van de staandergroepen die zichtbaar uitknikken (zie paragraaf (8.4) afbeelding 8.11). Tevens kan dit patroon worden gecombineerd met een patroon uit tegengestelde scheefstand uit de overige staandergroepen. Indien deze uitgangspunten worden aangehouden kan de scheefstand op vier manieren op de constructie worden geplaatst.

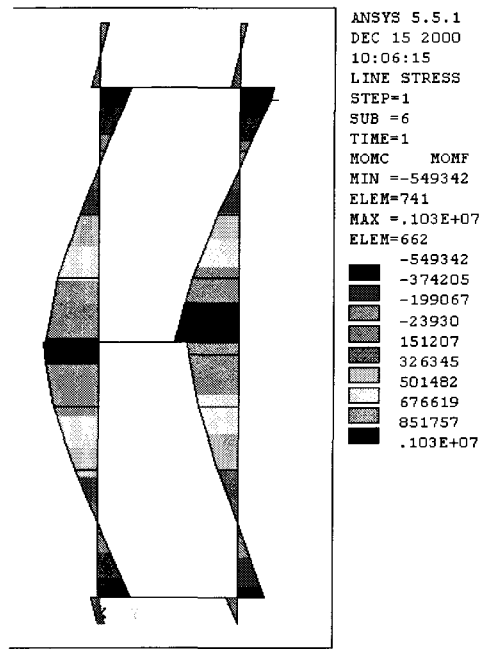
Afbeeldingen 9.13 a t/m d geeft de invloed van de verschillende manieren weer. In alle gevallen is de middelste staandergroep geïllustreerd. De momentenlijnen zijn bepaald bij een hoogte van 25 slagen. Het maximaal optredend moment bedraagt 2.03 kNm (afbeelding 9.13 a), uitgaande van scheefstand van alle staandergroepen. Indien louter uitgegaan wordt van enkelvoudige scheefstand van de staandergroepen A bedraagt het moment 1.03 kNm. Afbeeldingen 9.13 b en c geven ditzelfde weer als de middelste staandergroep een tegengestelde scheefstand krijgt. Het optredende moment heeft de waarde van 1.82 of 1.67 kNm.

Conclusie:

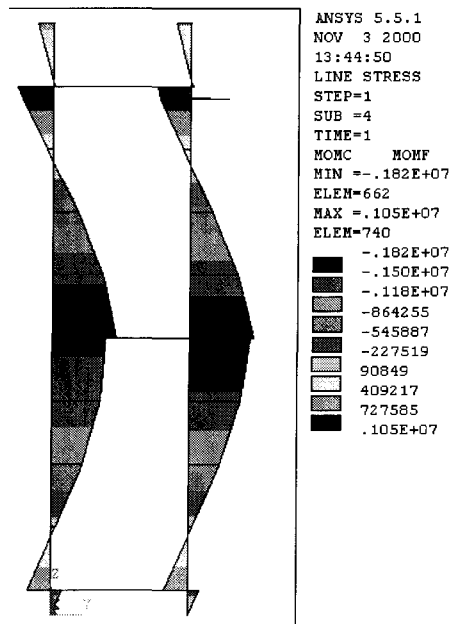
Per configuratie en belastingcombinatie dient van de maatgevende hoogte de scheefstand in twee richtingen te worden beschouwd. Met de ongunstigste scheefstand wordt gerekend. Hierbij worden alle staandergroepen voorzien van scheefstand. Uitgaande van windbelasting worden het scheefstandpatroon en de richting van de windbelasting aan elkaar gerelateerd.



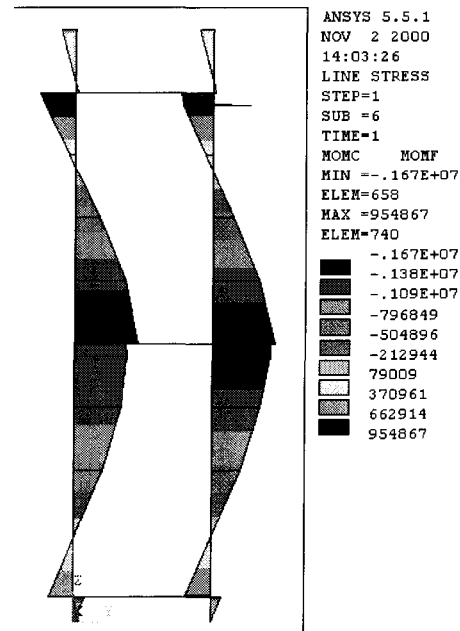
9.13 a: Tegengestelde scheefstand (1)



9.13 b: Enkelvoudige scheefstand (1)



9.13 c: Tegengestelde scheefstand (2)



9.13 d: Enkelvoudige scheefstand (2)

Afbeeldingen 9.13: Momentenlijnen bij scheefstand

3. Berekening geometrisch niet-lineair en fysisch lineair ($c = 15$ en 6 kNm/rad)

Om meer inzicht te krijgen in de aanname van (bi) lineaire moment-rotatiediagrammen bij de berekeningen wordt een bouwhoogteberekening gemaakt uitgaande van lagere stijfheid (en dus grotere opneembare momenten). De stijfheid wordt verlaagd van 52 kNm/rad naar 15 en 6 kNm/rad.

Afbeelding 9.14 toont de moment-rotatiediagrammen van genoemde stijfheden en de hierbij behorende bezwijk criteria. De bezwijkcriteria (pen en staander) liggen in het lineaire gedeelte. De unity-checks blijven hierbij achterwege, er wordt volstaan met het geven van bouwhoogte bij de bezwijkcriteria (pen en de staander).

- Verbinding (dwarsschakel-staander)

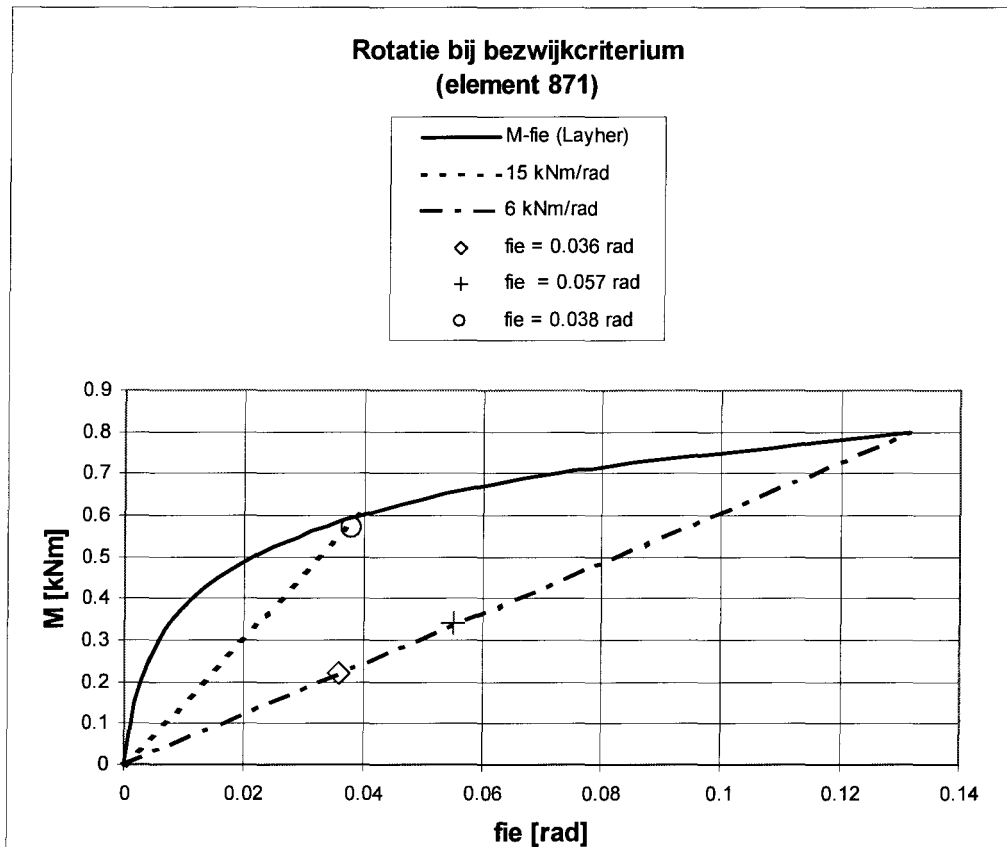
Bij beide lineaire verlopende stijfheden is de verbinding niet maatgevend (zie afbeelding 9.14).

- Pen

Uitgaande van een stijfheid van 15 kNm/rad kan de steigerconfiguratie met maximaal 26 slagen gebouwd worden (dan zijn zowel de penverbinding als de staander maatgevend). Uitgaande van 6 kNm/rad kan de steigerconfiguratie met maximaal 23 slagen gebouwd worden.

- Staander

Indien de staander maatgevend is kan bij 6 kNm/rad de configuratie tot 24 slagen gebouwd worden.



Afbeelding 9.14: Moment-rotatie diagram / rotatie bij maatgevende onderdelen

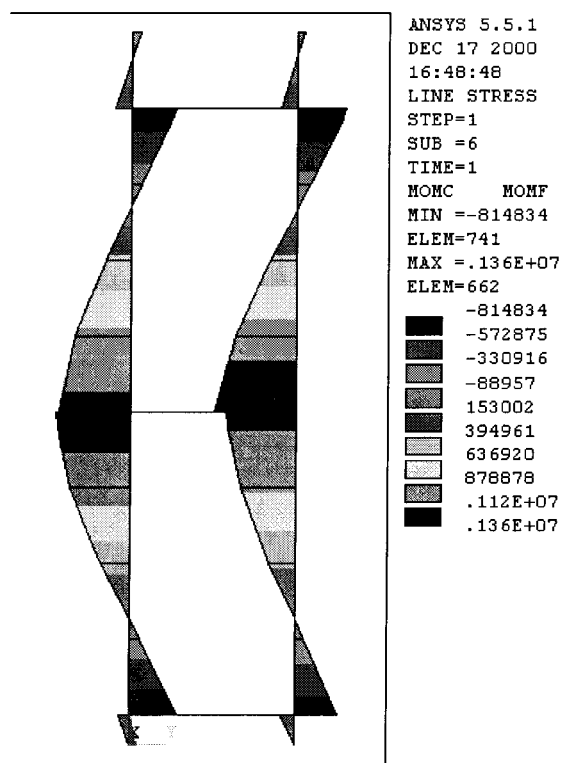
4. Berekening geometrisch niet-lineair en fysisch niet-lineair (stijfheid (c) conform kromme Layher)

Bij de berekening wordt uitgegaan van een niet-lineair moment-rotatiediagram (de kromme van Layher). De unity-checks worden gegeven bij een bouwhoogte van 27 slagen (voor zowel de pen als de staander).

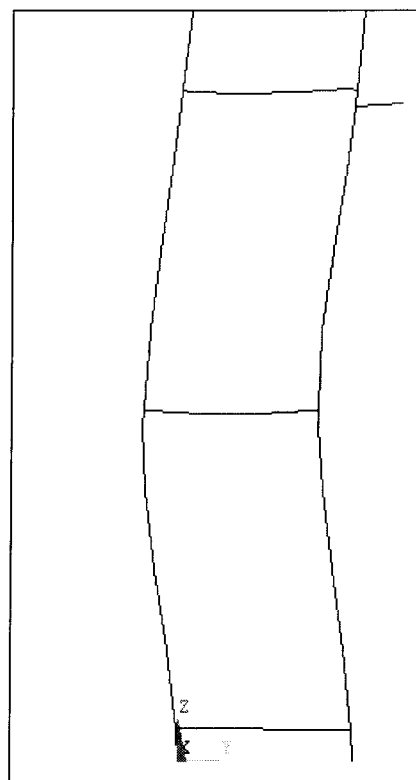
- Pen / staander

Bij beide criteria bedraagt de maatgevende bouwhoogte 27 slagen.

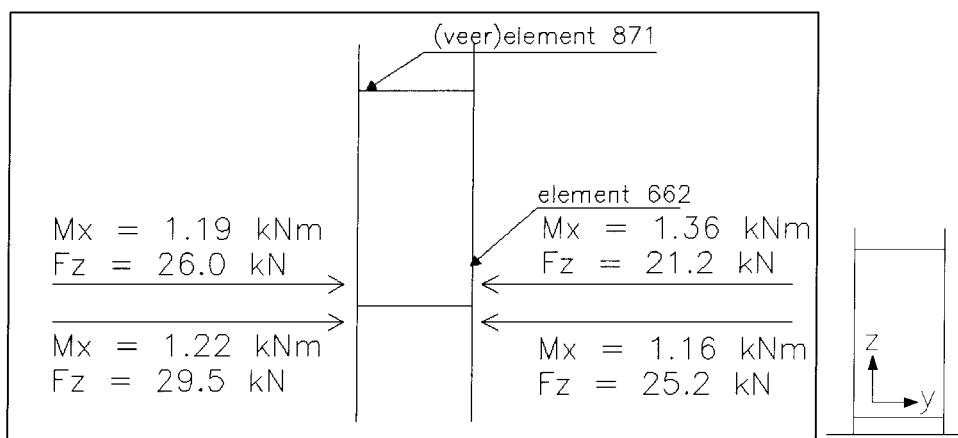
Er wordt volstaan met de unity-check van de staander. Het moment in de staander om de x-as bedraagt 1.36 kNm (om de y-as 0.003 kNm) en de staanderbelasting 21.2 kN (zie afbeelding 9.16). Dit leidt tot een unity-check van: $(1.36 / (2.1 * 1.04 * (1 - (21.2 / 145)^{1.7})))^2 = 0.42$. Afbeelding 9.15 a geeft de momentenlijn, afbeelding 9.15 b de bezwijkvorm.



Afbeelding 9.15 a: Momentenverloop in staander



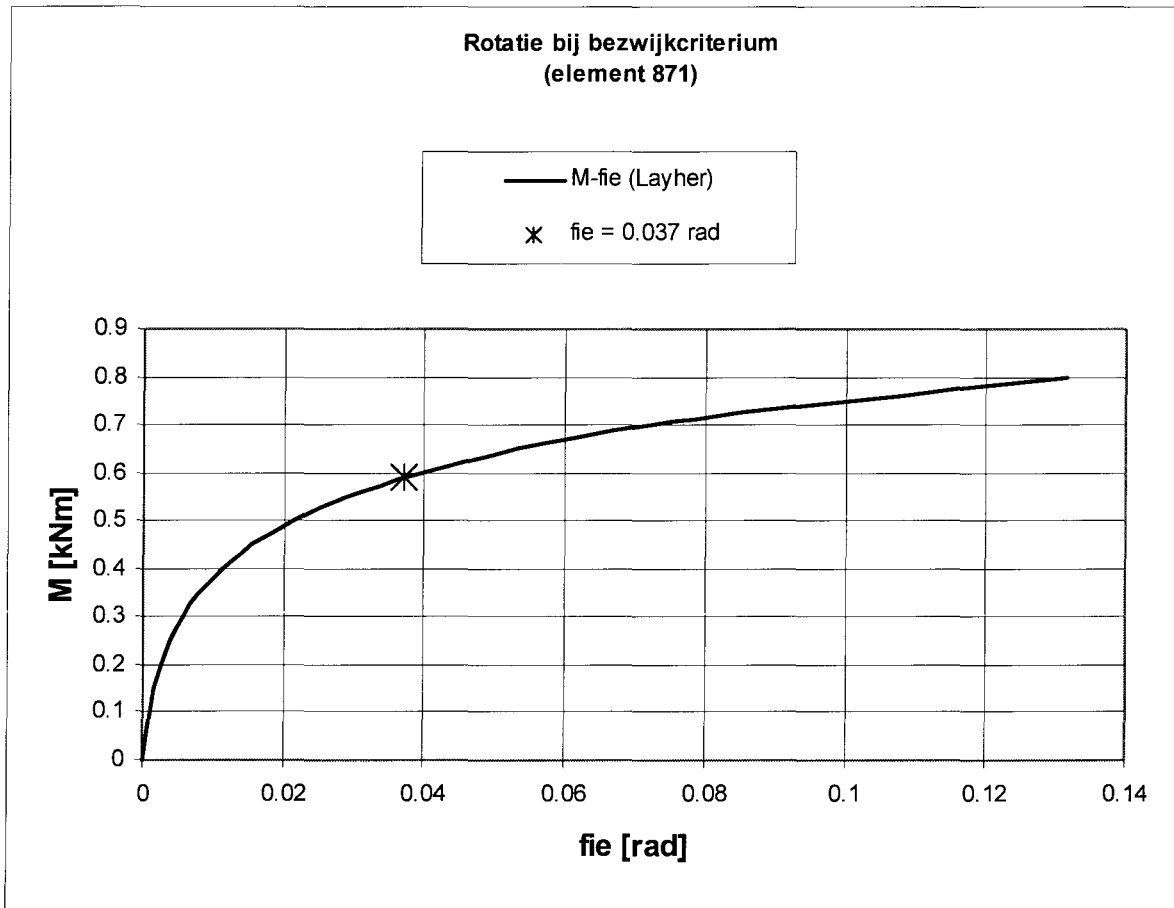
Afbeelding 9.15 b: Bezwijkvorm



Afbeelding 9.16: Krachtenverloop in de staanders

- Hoekverdraaiing (fie)

In afbeelding 9.17 is het moment-rotatiediagram afgebeeld met de aangegeven waarden voor fie (ter plaatse van veerelement 871). De maximale hoekverdraaiing bedraagt 0.037 rad (<0.13 rad).



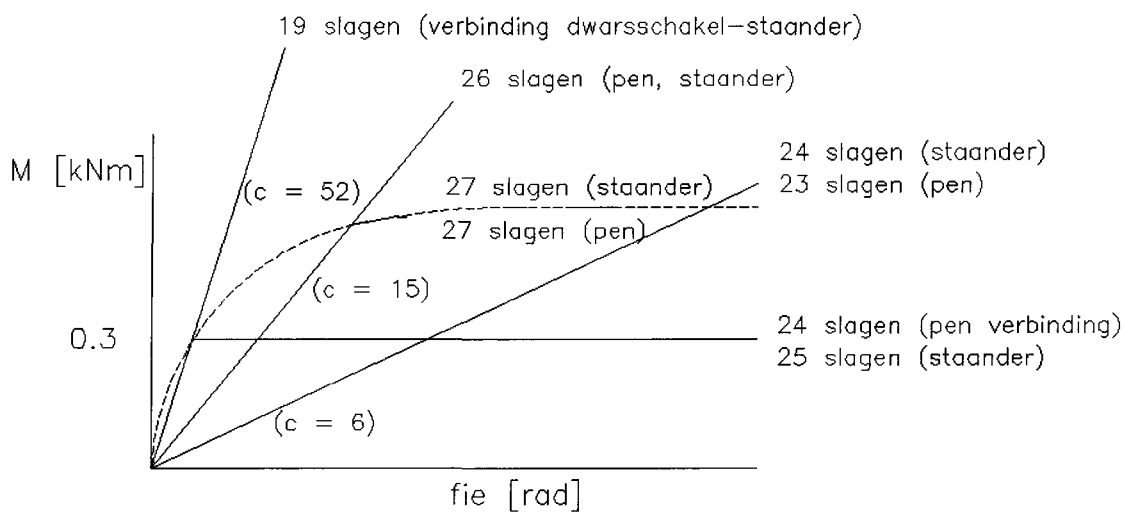
Afbeelding 9.17: Rotatie bij de maatgevende onderdelen

9.2.1.2 Tussentijdse conclusies

In afbeelding 9.18 is een overzicht van de bepaalde bouwhoogten uitgaande van de gebruikte moment-rotatiediagrammen. De bouwhoogte is maximaal 27 slagen als gebruik wordt gemaakt van de kromme van Layher. Hierbij zijn zowel de pen als de staander maatgevend.

Deze deelresultaten tonen aan dat schematisering van de verbindingaansluiting tussen de dwarschakel en de staander om de x-as met de kromme van Layher, het hoogste aantal slagen aangeeft. Dat betekent dat er verder gerekend wordt met het multi-lineaire diagram van Layher.

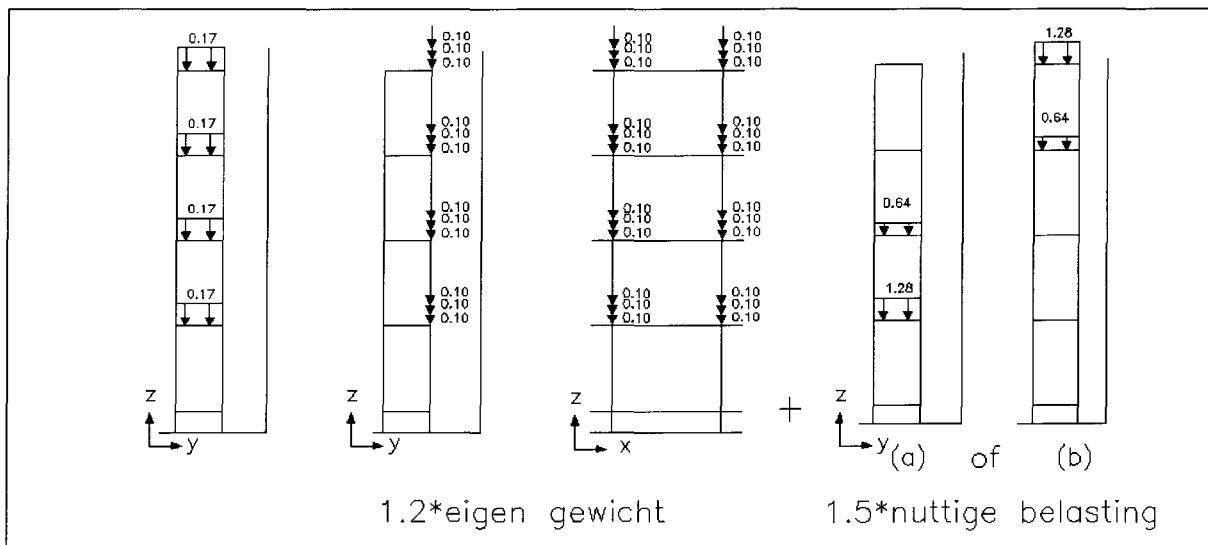
De rekenprocedure wordt gecontinueerd volgens de methode van afbeelding 9.2.



Afbeelding 9.18: Bouwhoogten in slagen

9.2.2 Combinatie “nuttige belasting bovenin”

De belastingcombinatie “nuttige belasting bovenin” is afgebeeld in afbeelding 9.19 (b). De nuttige belasting wordt op anderhalve werkvloer bovenin de steiger geplaatst.



Afbeelding 9.19: Belasting combinatie “Nuttige belasting”

▪ Pen en staander

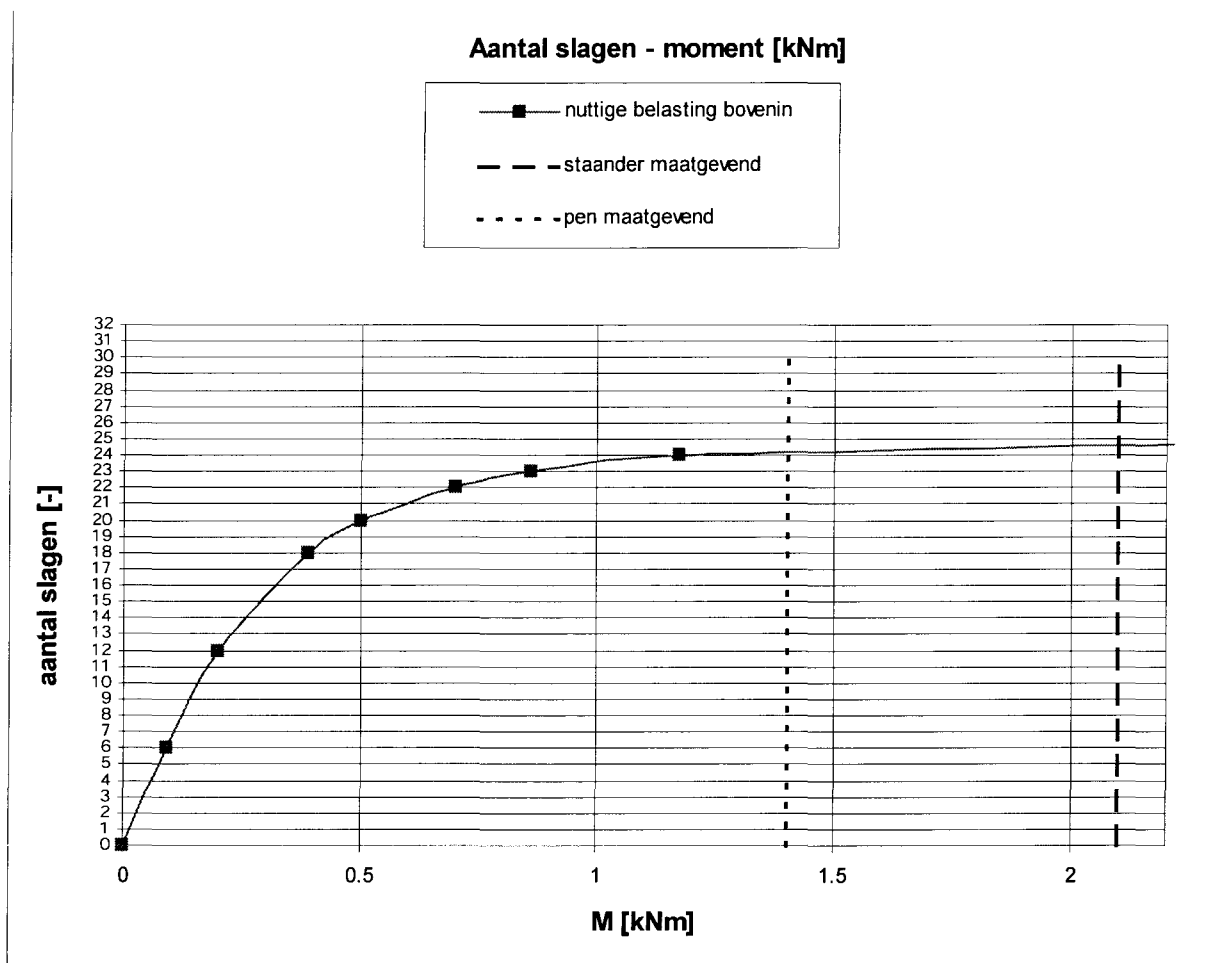
De maatgevende bouwhoogte bedraagt 24 slagen waarbij zowel de pen als de staander maatgevend zijn.

Het aantal slagen als functie van het momentverloop in element 662 (maatgevend element) is uitgezet in afbeelding 9.20. In deze afbeelding zijn twee grenzen aangegeven, namelijk de criteria van bezwijken van de penverbinding tussen de staanders en het bezwijken van de staander.

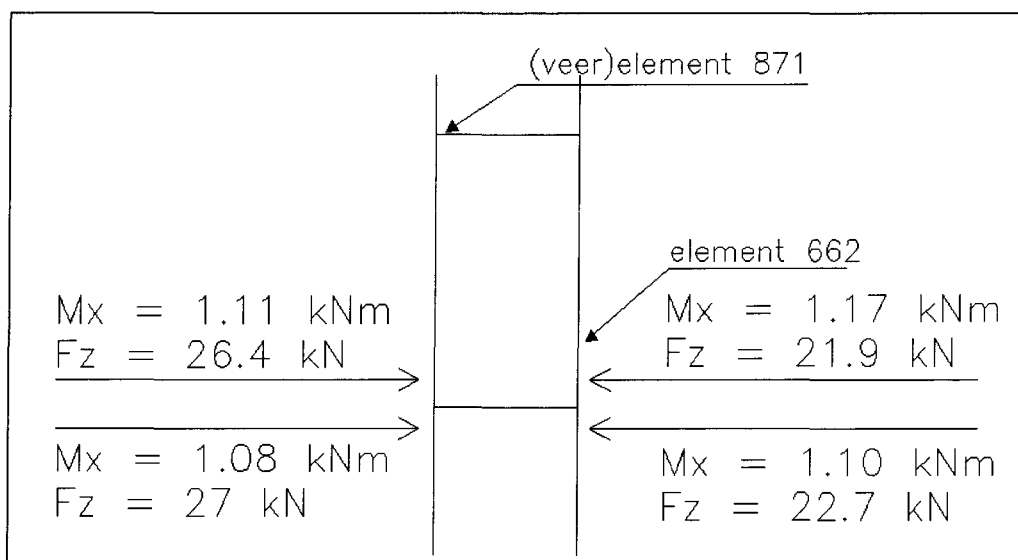
Het moment ter plaatse van de staander bedraagt 1.17 kNm, de normaalkracht in de staanders bedraagt 21.9 kN. Dit leidt tot een unity-check van 0.31. In afbeelding 9.21 is een overzicht van de krachten gegeven. Het betreft hierbij de middelste staandergroep.

De maximale hoekverdraaiing (veerelement 871) blijft beperkt tot 0.033 rad.

In bijlage 2 zijn de deelresultaten van afbeelding 9.20 als voorbeeld verder uitgewerkt.



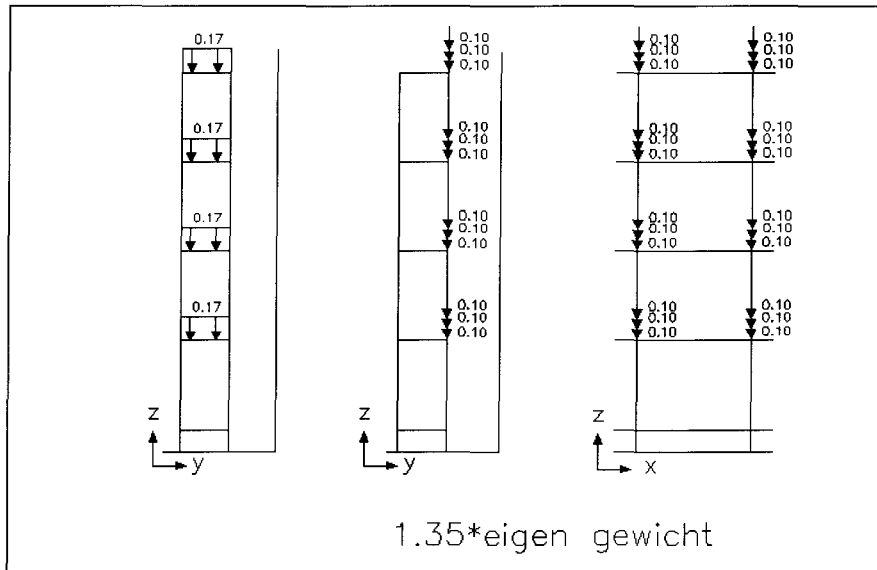
Afbeelding 9.20: Aantal slagen als functie van het momentenverloop bij nuttige belasting bovenin



Afbeelding 9.21: Maatgevend krachtenverloop (t.b.v. controle staander)

9.2.3 Eigen gewicht extreem

De berekening wordt hervat met het belastinggeval eigen gewicht (er wordt een veiligheidsfactor gehanteerd van 1.35, zie ook afbeelding 9.22).



Afbeelding 9.22: Eigen gewicht extreem

- Pen en staander

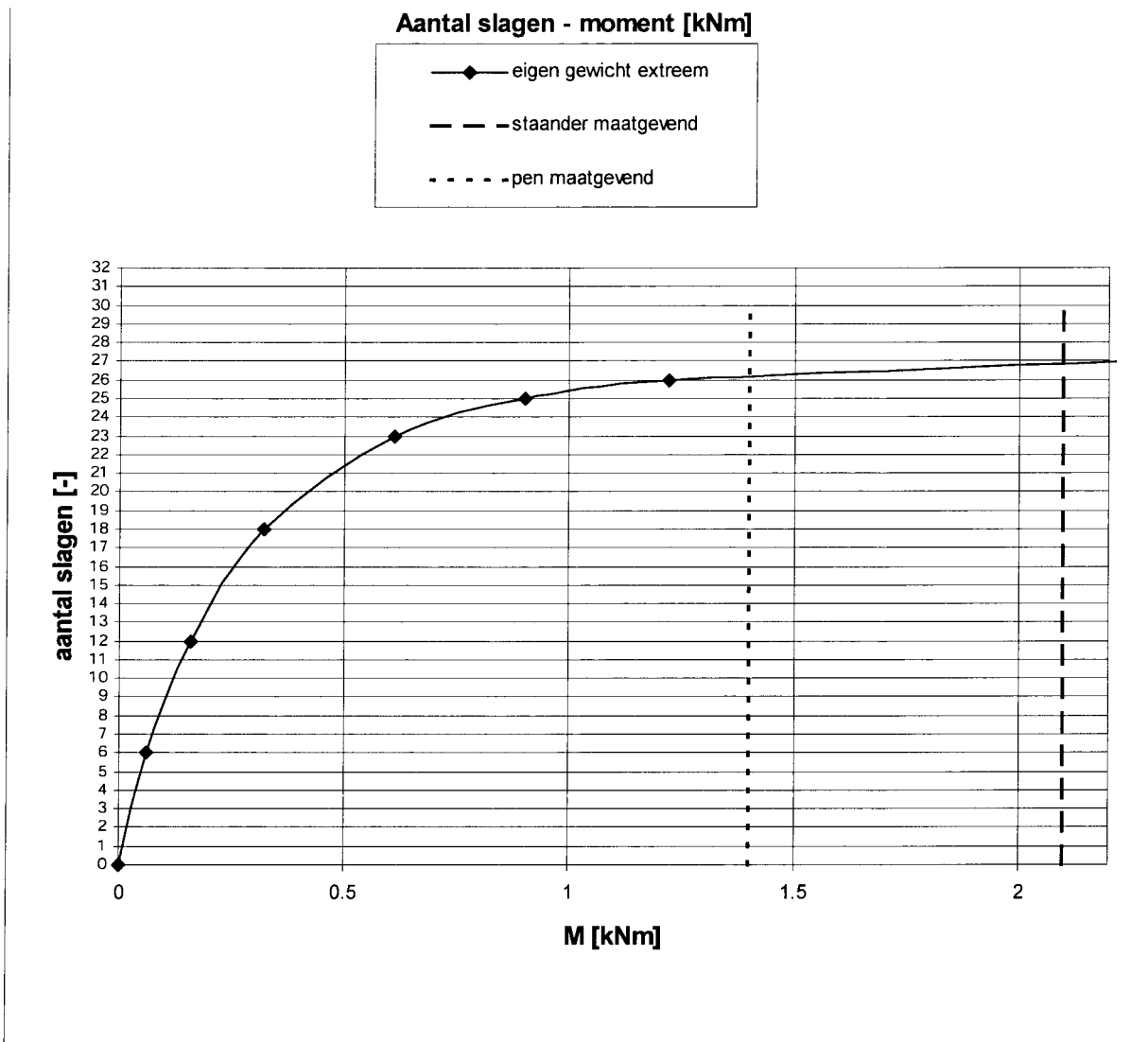
De maatgevende bouwhoogte bedraagt 26 slagen, hierbij zijn de staander en de pen maatgevend. Het aantal slagen als functie van het optredend moment in het maatgevende element is afgebeeld in afbeelding 9.23. Het optredende moment hierbij bedraagt 1.22 kNm, de plaatselijke normaalkracht 20.5 kN.

Dit leidt tot een unity-check van 0.34.

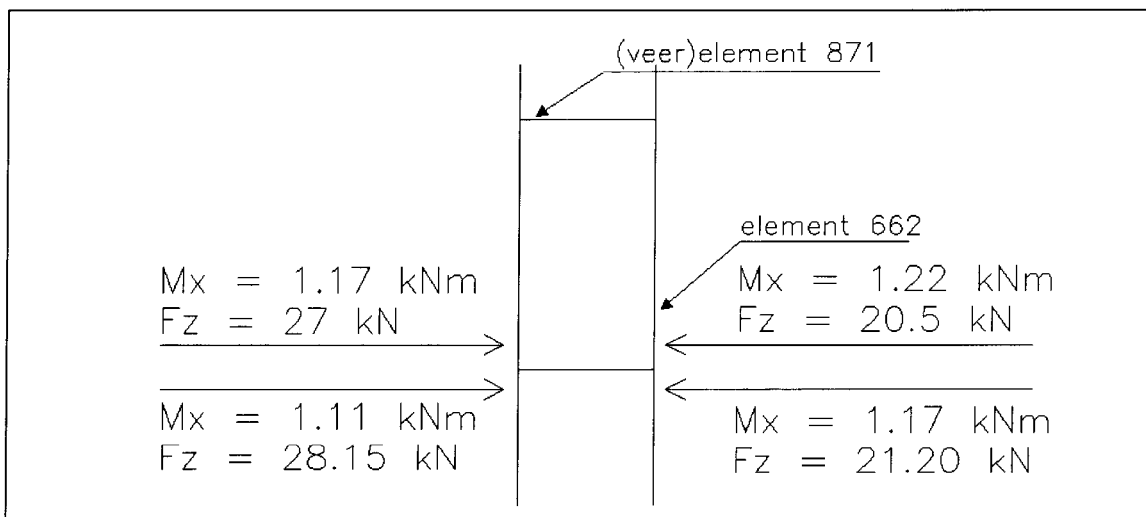
Voor een totaal beeld van de krachten wordt verwezen naar afbeelding 9.24.

- Rotatie

De maximale rotatie blijft beperkt tot ca. 0.024 rad.



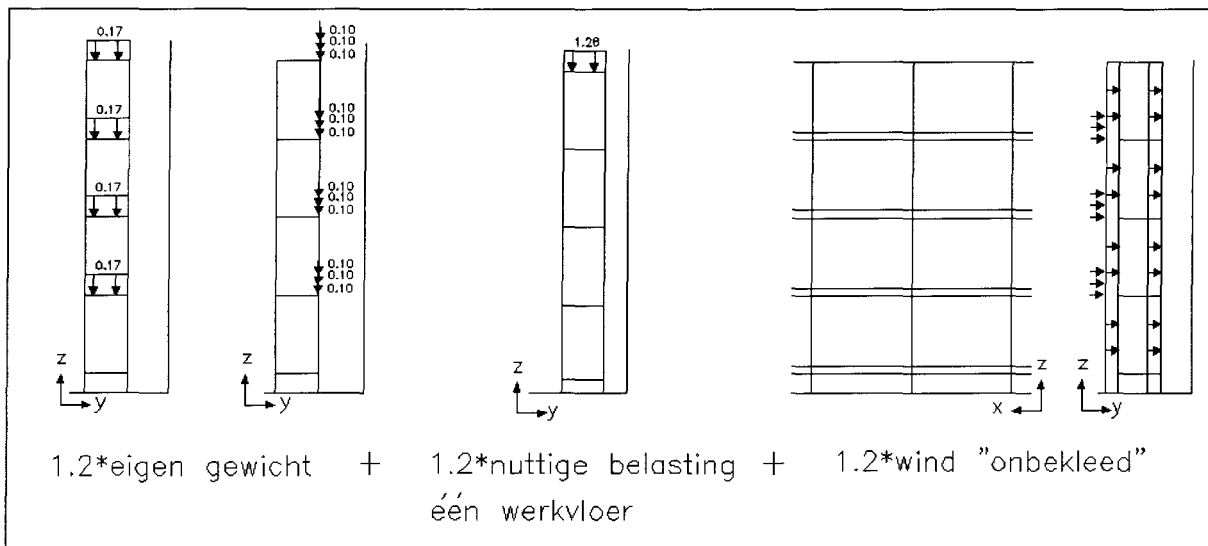
Afbeelding 9.23: Aantal slagen als functie van het momentenverloop bij eigen gewicht extreem



Afbeelding 9.24: Krachtenverloop in de maatgevende staander

9.2.4 Windbelasting

In deze paragraaf wordt windbelasting in combinatie met één volledig belaste werkvloer beschouwd (zie afbeelding 9.25). Zoals besproken in hoofdstuk 6 wordt de windbelasting bepaald in windgebied I (onbebouwd) of windgebied 3 (bebouwd) en grijpt de windbelasting op al het geprojecteerde oppervlakte aan (buizen en kantplanken).



Afbeelding 9.25: Belastingcombinatie "wind onbekleed"

- Reaktiekrachten

De reactiekrachten in de verankering blijven beperkt tot ca. 3 kN, waar 6 kN toegestaan is.

- Penverbinding

Het verloop van het aantal slagen als functie van het optredende moment is afgebeeld in afbeelding 9.26. Uitgaande van windgebied I (onbebouwd) is bij 21 slagen de penverbinding maatgevend.

Indien uitgegaan wordt van windgebied III (bebouwd) leidt dit tot 23 slagen als de pen maatgevend is.

- Staander

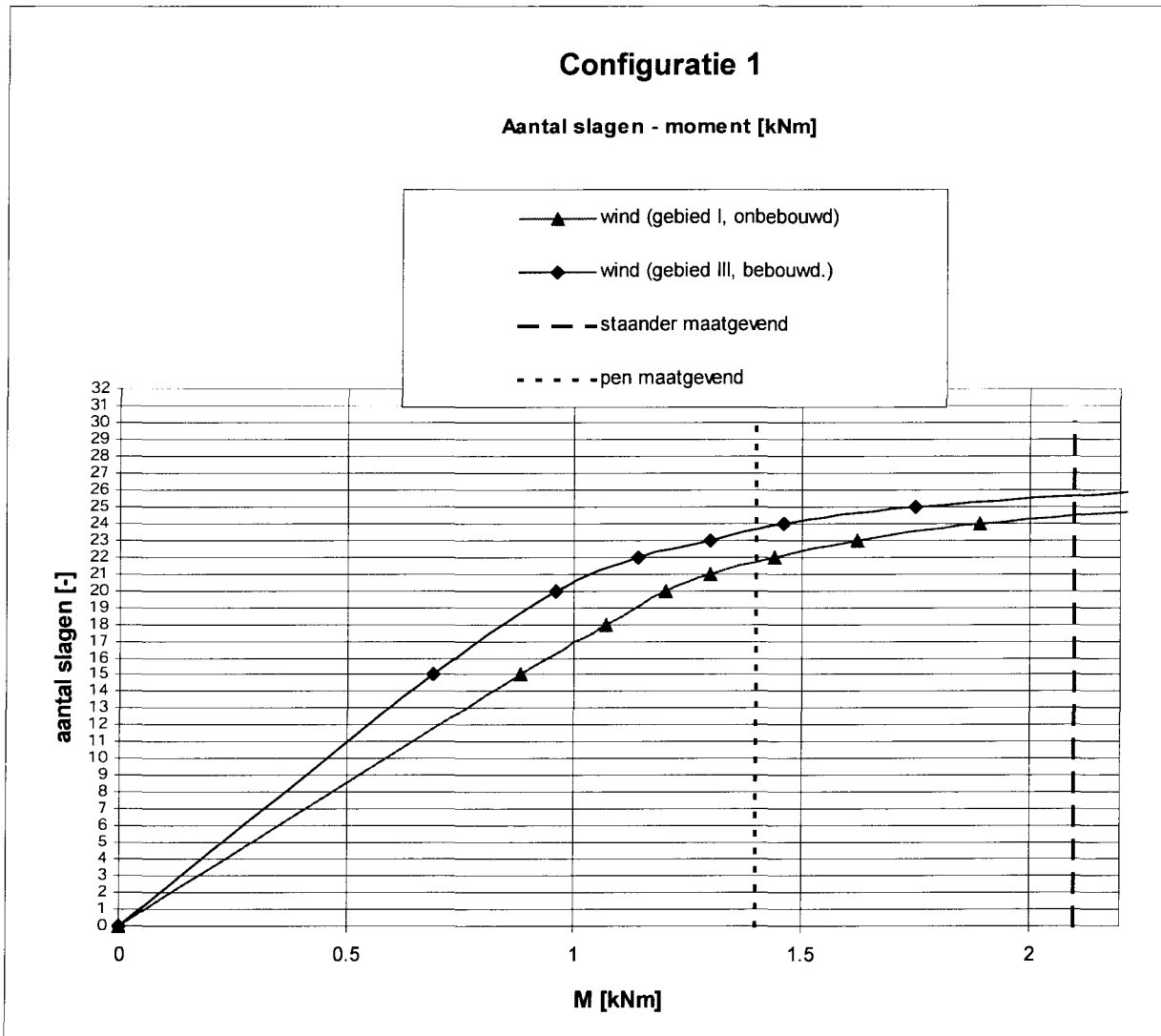
Bij 24 slagen (windgebied I, onbebouwd) bedraagt het moment in 1.89 kNm en de plaatselijke normaalkracht 19.6 kN.

De unity-check bedraagt $(1.89 / (1.04 * 2.1 + (19.6 / 145)^{1.7}))^2 = 0.81$ (zie ook afbeelding 9.27).

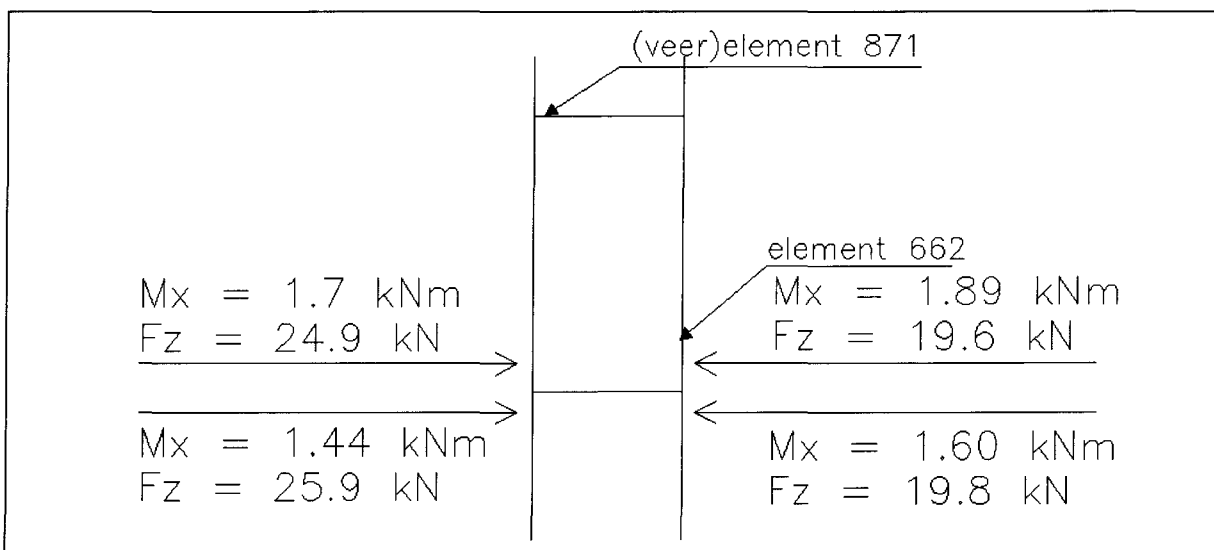
Indien uitgegaan wordt van windgebied III (bebouwd) leidt dit tot 25 slagen als de staander maatgevend is.

- Rotatie

De maximale rotatie blijft beperkt tot ca. 0.04 rad (windgebied I, onbebouwd).



Afbeelding 9.26: Aantal slagen als functie van het moment bij windbelasting



Afbeelding 9.27: Krachtenverloop t.p.v. de maatgevende staander

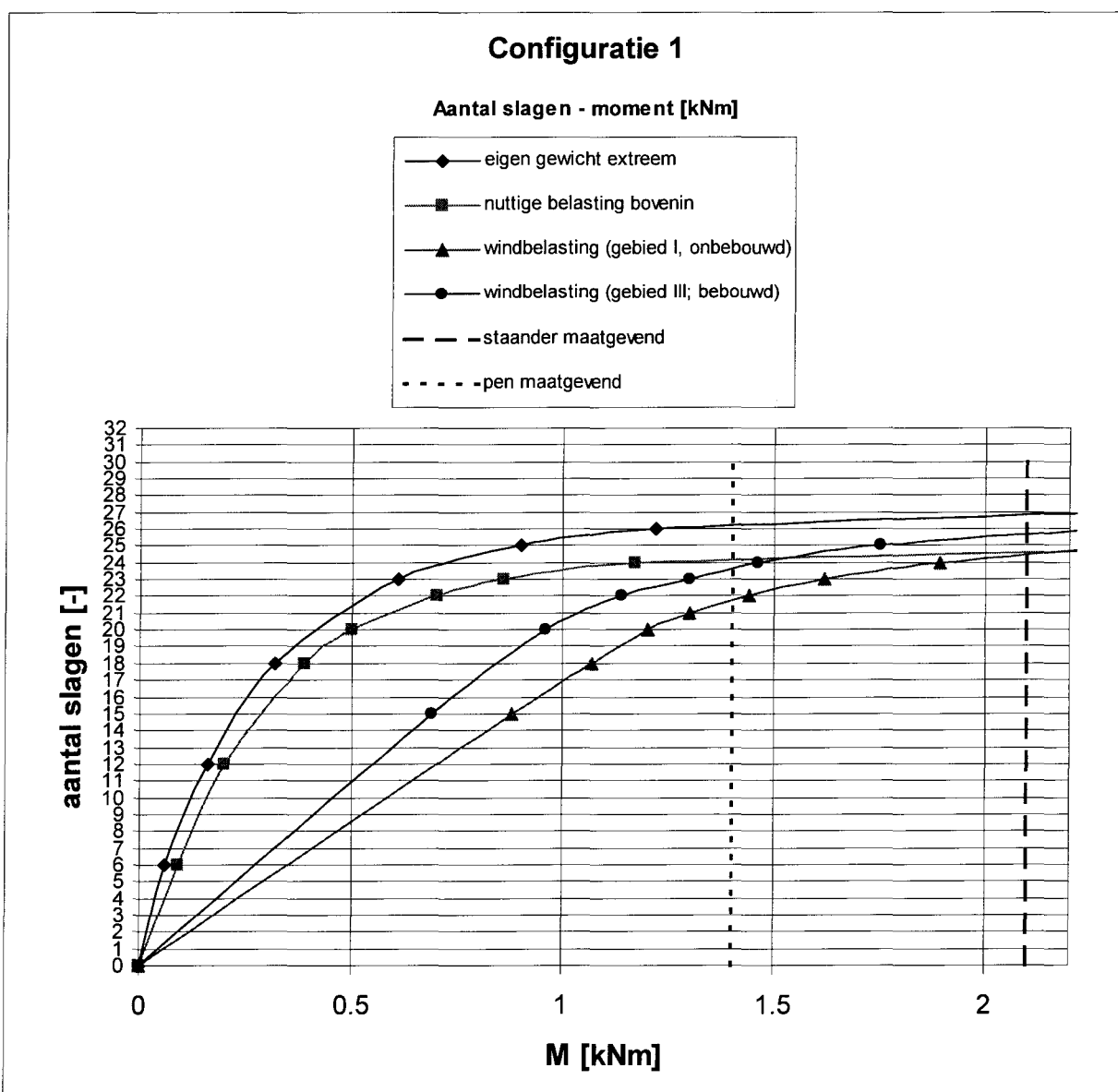
9.2.5 Resultaten configuratie 1

De bouwhoogten van de deelresultaten als functie van het grootste moment in element 662 zijn in afbeelding 9.28 in een grafiek gepresenteerd. De belastingcombinatie "windbelasting" is in alle gevallen maatgevend (indien uitgegaan wordt van gebied I, onbebouwd).

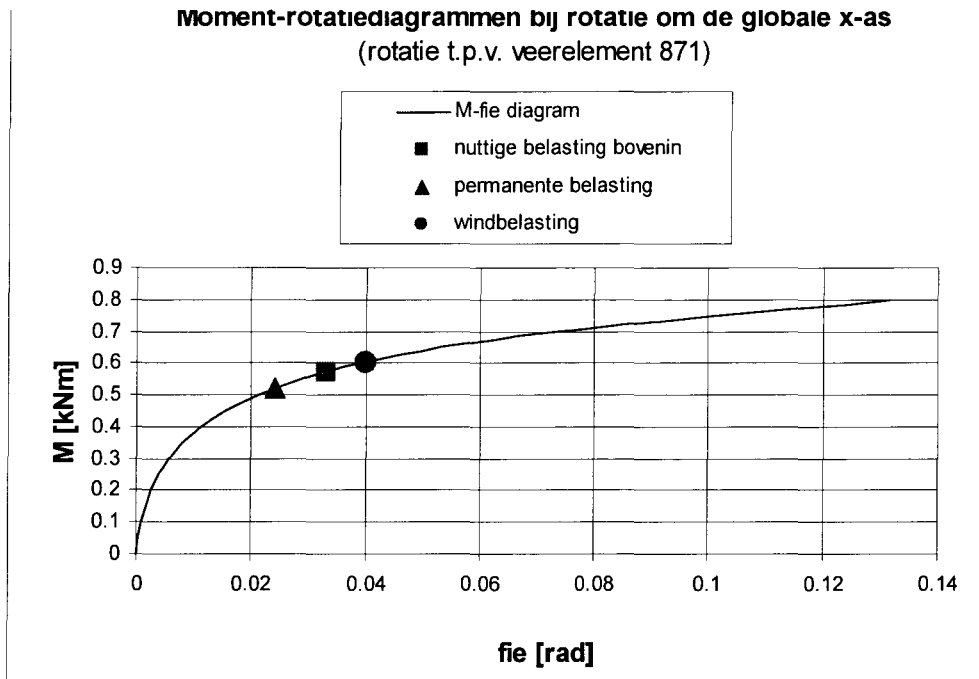
De maatgevende bouwhoogte bedraagt 21 slagen als de penverbinding tussen de staanders maatgevend is en 24 als de staander maatgevend is (dan zijn zowel de windbelasting als de combinatie nuttige belasting bepalend).

Als wordt uitgegaan van de combinatie "windgebied III (bebouwd)" bedraagt het aantal slagen 23 in het geval dat de penverbinding maatgevend is en 24 indien de staander maatgevend is (de belastingcombinatie "nuttige belasting" is dan maatgevend).

De maximale hoekverdraaiing bedraagt 0.04 rad, bij de belastingcombinatie "windbelasting". In afbeelding 9.29 is een overzicht gegeven waarin de maximale hoekverdraaiing per belastingcombinatie is afgebeeld.



Afbeelding 9.28: Aantal slagen uit belastingcombinaties



Afbeelding 9.29: Rotatie bij belastingcombinaties (element 871)

Tussentijdse conclusies

Bij de controle van de eerste configuratie blijkt dat er kan worden volstaan met drie belastingcombinaties ("nuttige belasting bovenin", "permanent extreem" en "windbelasting"). Van deze drie belastingcombinaties is bij configuratie 1 de combinatie "windbelasting" en "nuttige belasting bovenin" maatgevend.

Opmerking:

Indien er niet uit wordt gegaan van het knikpatroon en bijbehorende classificatie, kan de steiger foutief worden gedimensioneerd op een kolom met een kniklengte van 2000 mm. In bijlage 3 is uitgewerkt tot welke bouwhoogte een steiger als configuratie 1 dan gebouwd kan worden. Hieruit blijkt dat het bepalen van het knikpatroon van belang is.

9.3 Resultaten configuratie 2

Bij configuratie 2 wordt de vloer met systeemkortelingen vervangen door de vloer die traditioneel opgebouwd is. De dwarschakel krijgt geen belasting uit nuttige belasting, en het totaal gewicht zal iets toenemen.

Zie ook paragraaf 3.1.6 voor een overzicht van de configuraties.

- Pen

In afbeelding 9.31 is het aantal slagen tegen het moment weergegeven. Bij 20 slagen is de pen maatgevend (combinatie windbelasting gebied I, bebouwd).

Indien uit wordt gegaan van de combinatie “windbelasting” (gebied III, bebouwd) bedraagt het aantal slagen 22.

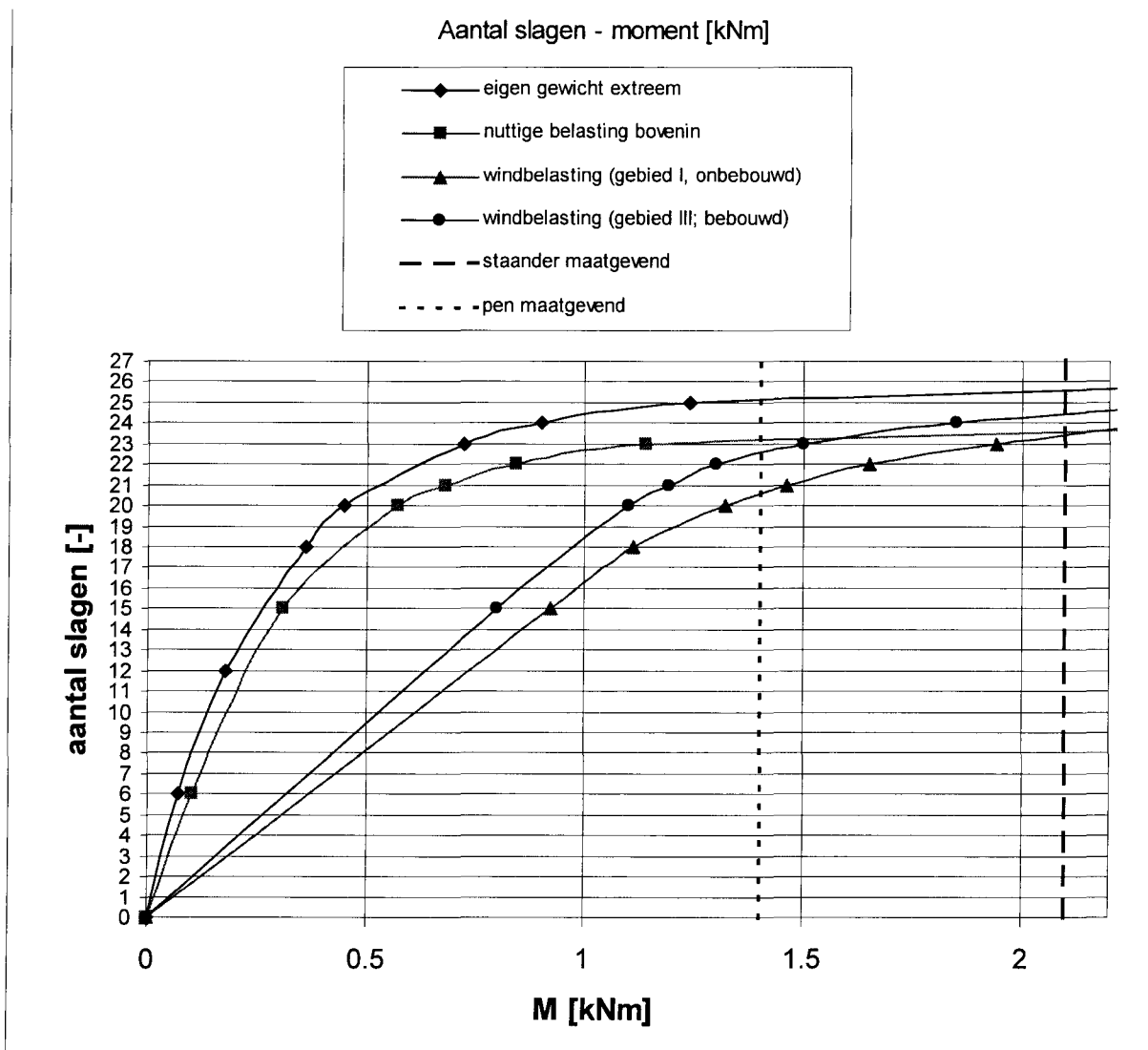
- Staander

De staander is maatgevend bij 23 slagen (combinaties “nuttige belasting” en “windbelasting” (gebied I, onbebouwd)). Afbeelding 9.32 geeft het krachtenverloop ter plaatse van de maatgevende staander weer. Het moment bedraagt 1.94 kNm, de normaalkracht 24.5 kN. De unity-check bedraagt derhalve 0.87.

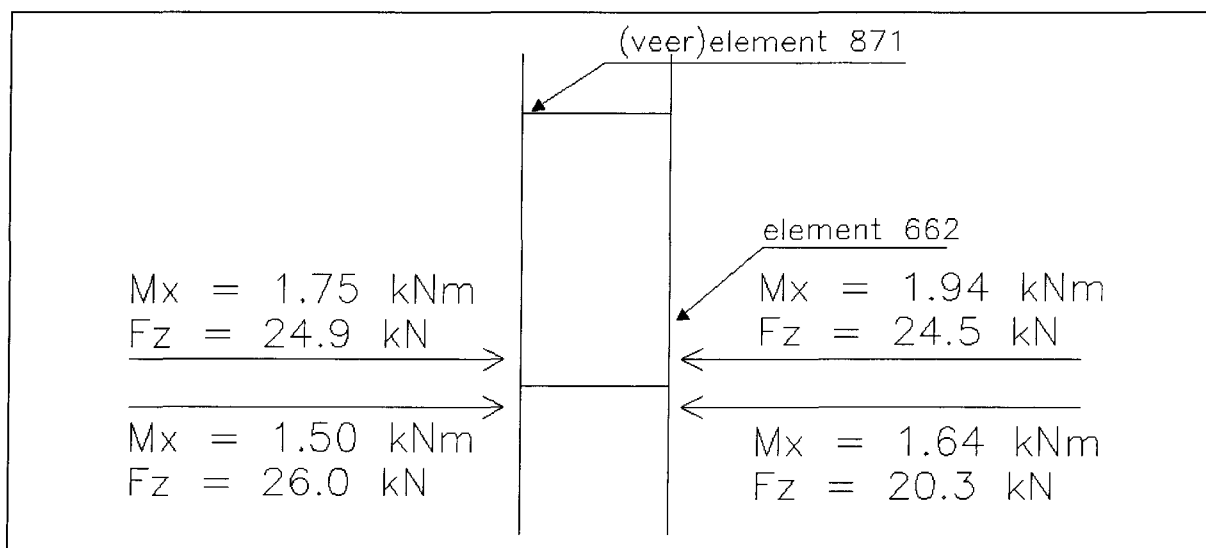
- Rotatie

De maximale rotatie bedraagt 0.038 bij de combinatie nuttige belasting bovenin (zie afbeelding 9.33).

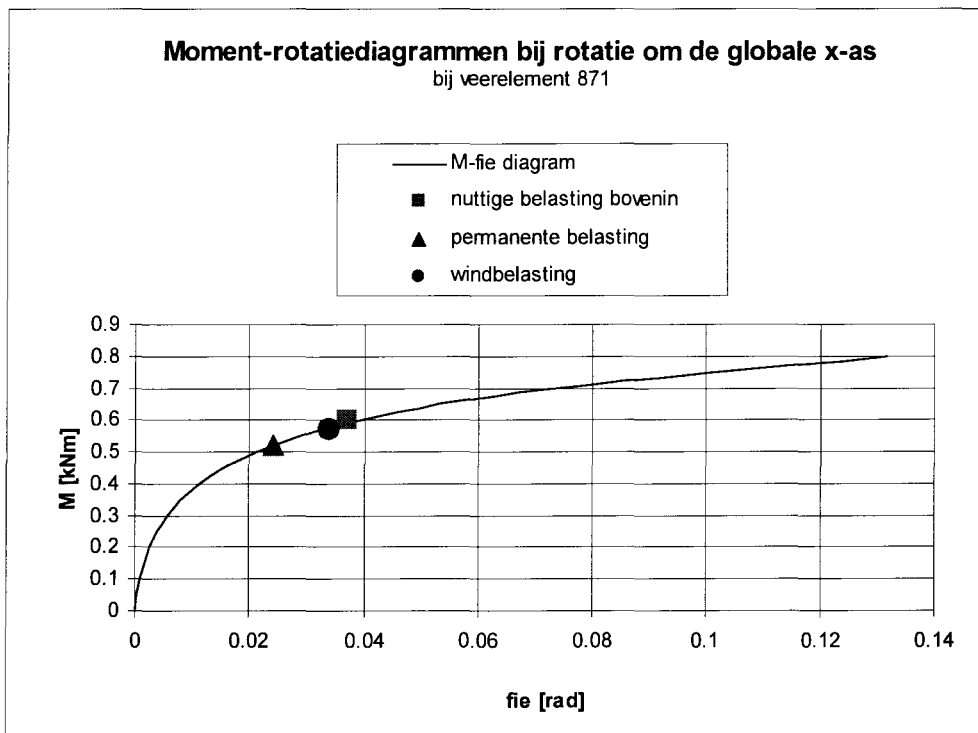
In vergelijking met configuratie 1 scheelt het toepassen van een traditionele werkvloer dus één slag.



Afbeelding 9.31: Het aantal slagen als functie van het maatgevend moment



Afbeelding 9.32: Krachten in standergroep



Afbeelding 9.33: Rotaties bij maatgevende onderdelen

9.4 Resultaten configuratie 3

Bij configuratie 3 wordt de breedte van de steiger vergroot tot 1572 mm. De steiger is onbekleed en de werkvloer wordt uitgevoerd met systeemkortelingen.

▪ Pen

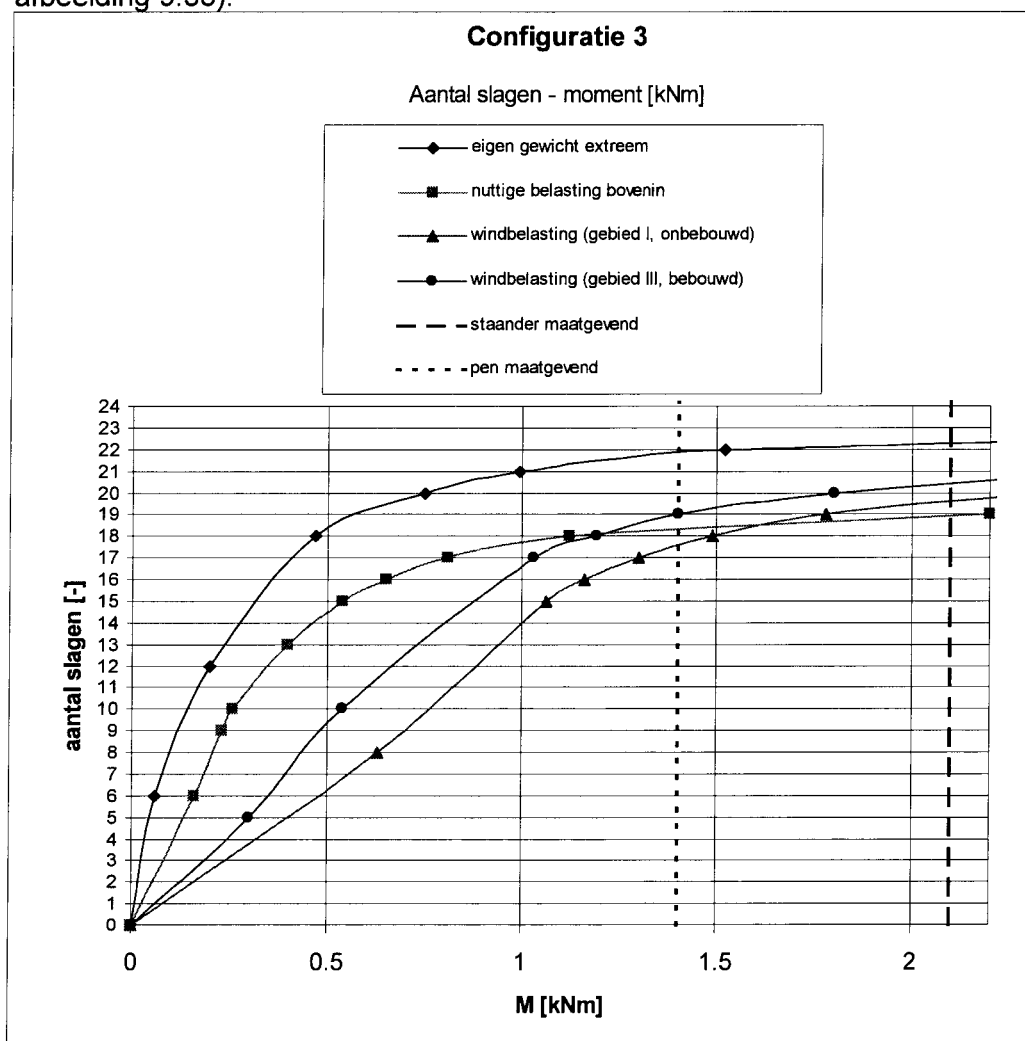
In afbeelding 9.34 is het aantal slagen tegen het moment weergegeven. Bij 17 slagen is de pen maatgevend (combinatie windbelasting gebied I).

▪ Staander

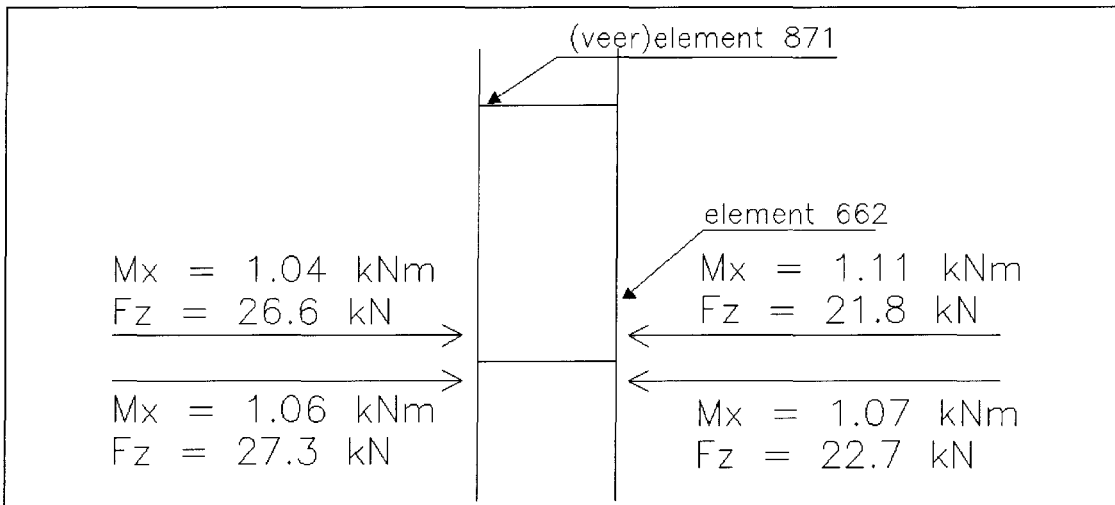
De staander is maatgevend bij 18 slagen (combinatie "nuttige belasting bovenin"). Afbeelding 9.35 geeft het krachtenverloop ter plaatse van de maatgevende staander weer. Het moment bedraagt 1.11 kNm, de normaalkracht 21.8 kN. De unity-check bedraagt derhalve 0.28.

▪ Rotatie

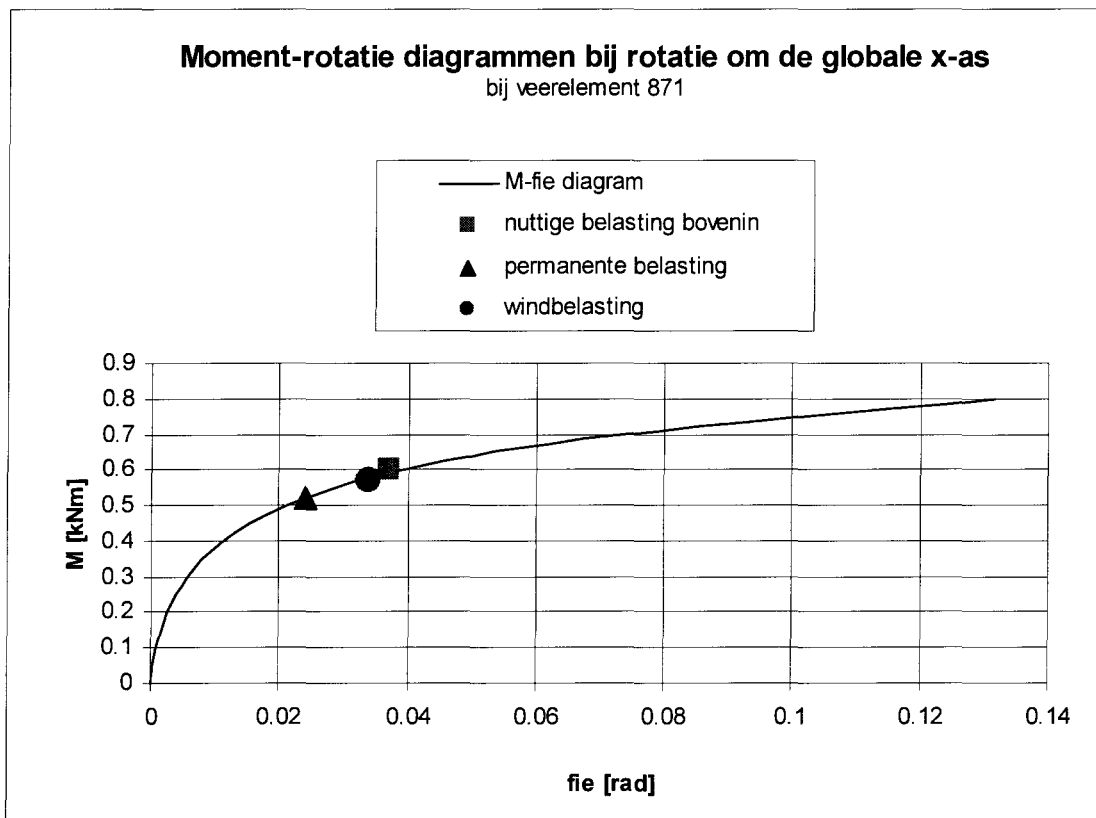
De maximale rotatie bedraagt 0.038 bij de combinatie nuttige belasting bovenin (zie afbeelding 9.36).



Afbeelding 9.34: Het aantal slagen als functie van het maatgevend moment



Afbeelding 9.35: Krachtenspel in de staandergroep



Afbeelding 9.36: Hoekverdraaiingen bij maatgevende onderdelen

9.5 Resultaten configuratie 4

Bij configuratie 4 wordt de werkvloer traditioneel opgebouwd.

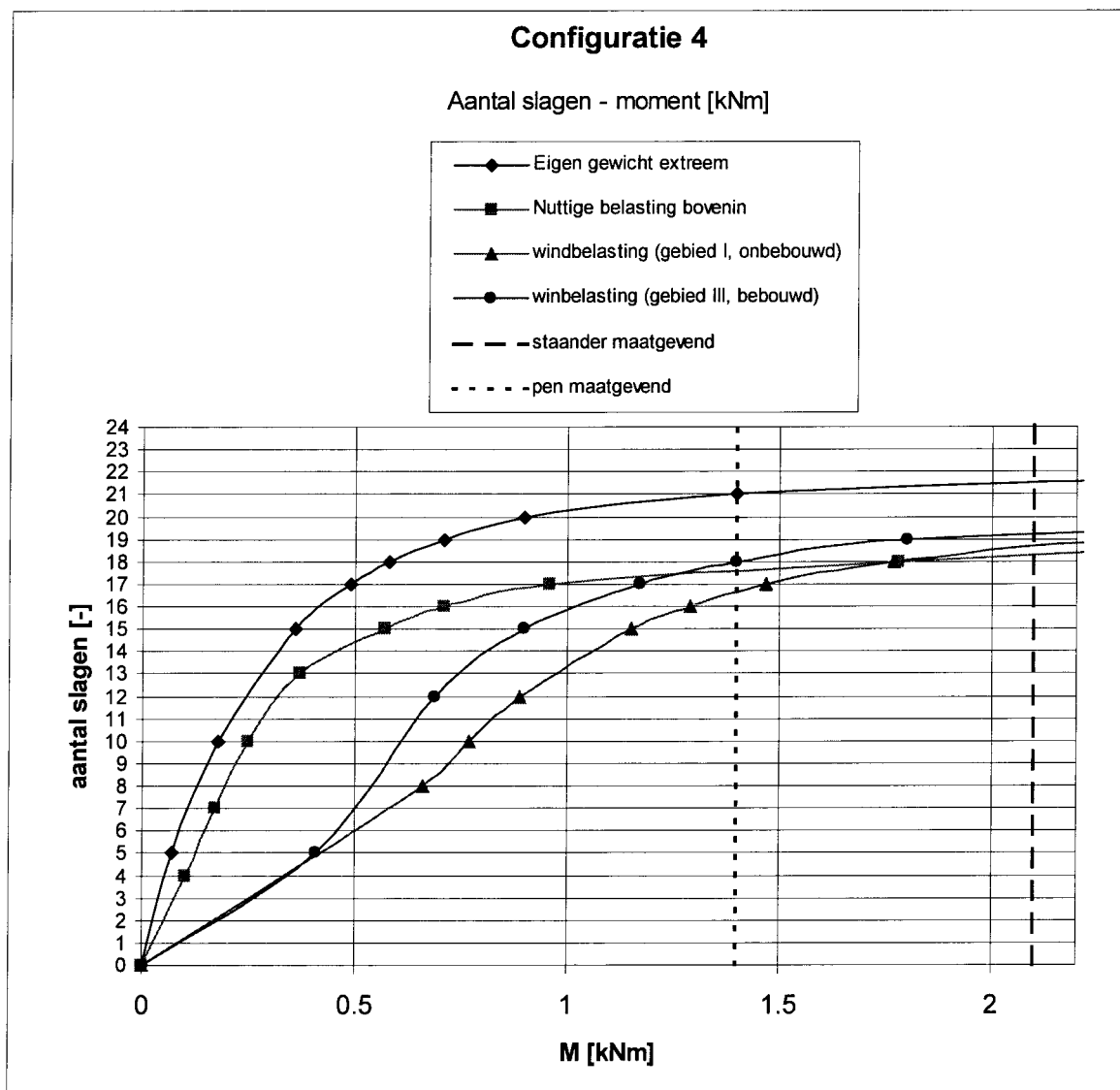
In afbeelding 9.37 is het aantal slagen als functie van het maatgevend moment uitgezet.

- Pen

In afbeelding 9.37 is het aantal slagen tegen het moment weergegeven. Bij 16 slagen is de pen maatgevend (combinatie windbelasting). Indien er met de combinatie "windbelasting" (gebied III) gerekend wordt, is de nuttige belasting maatgevend en bedraagt het aantal slagen 17.

- Staander

De staander is maatgevend bij 18 slagen (combinatie "nuttige belasting bovenin" en "windbelasting"). Afbeelding 9.38 geeft het krachtenverloop ter plaatse van de maatgevende staander weer. Het moment bedraagt 1.78 kNm, de normaalkracht 22.8 kN. De unity-check bedraagt derhalve 0.73.

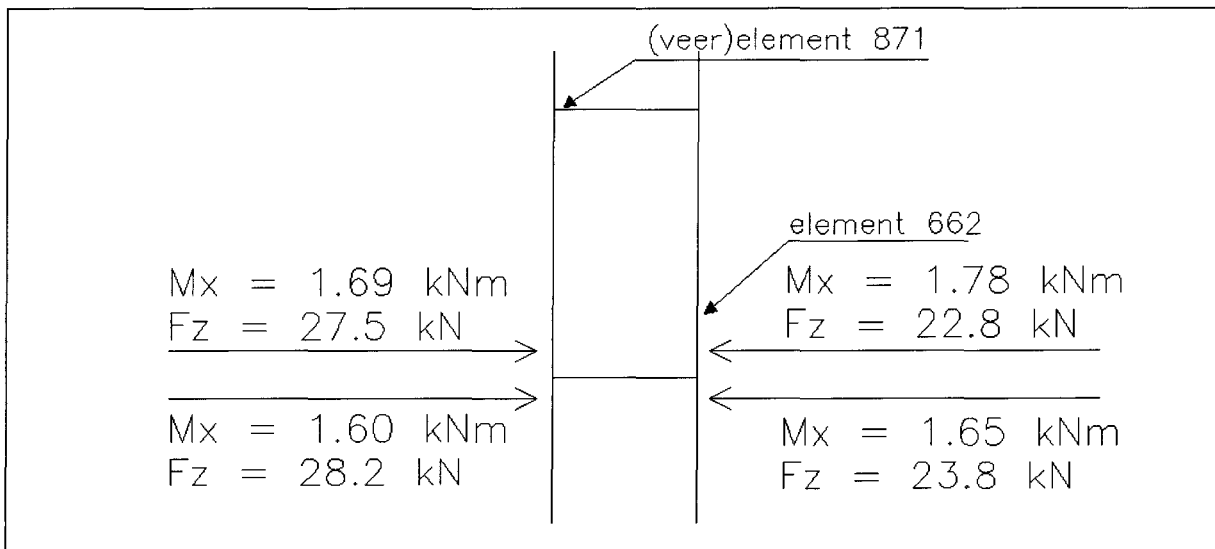


Afbeelding 9.37: Aantal slagen tegen het maatgevend moment

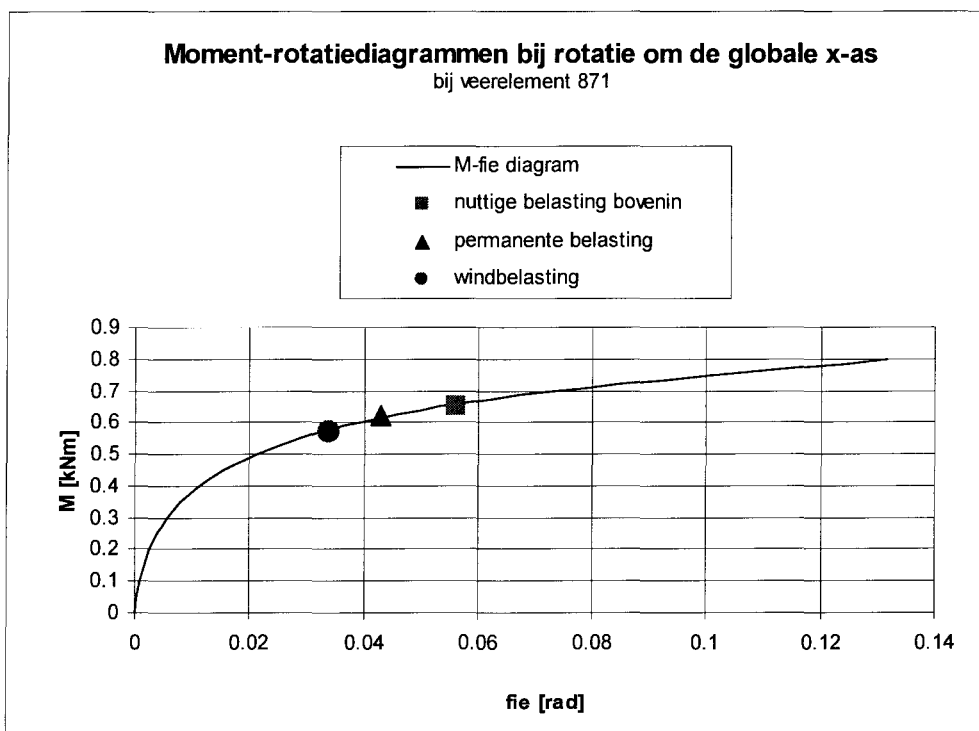
- Rotatie

De maximale rotatie bedraagt 0.058 bij de combinatie nuttige belasting bovenin (zie afbeelding 9.39).

Het aantal slagen is in vergelijking tot de systeemopbouw nauwelijks verschillend (maximaal een slag indien de pen maatgevend is).



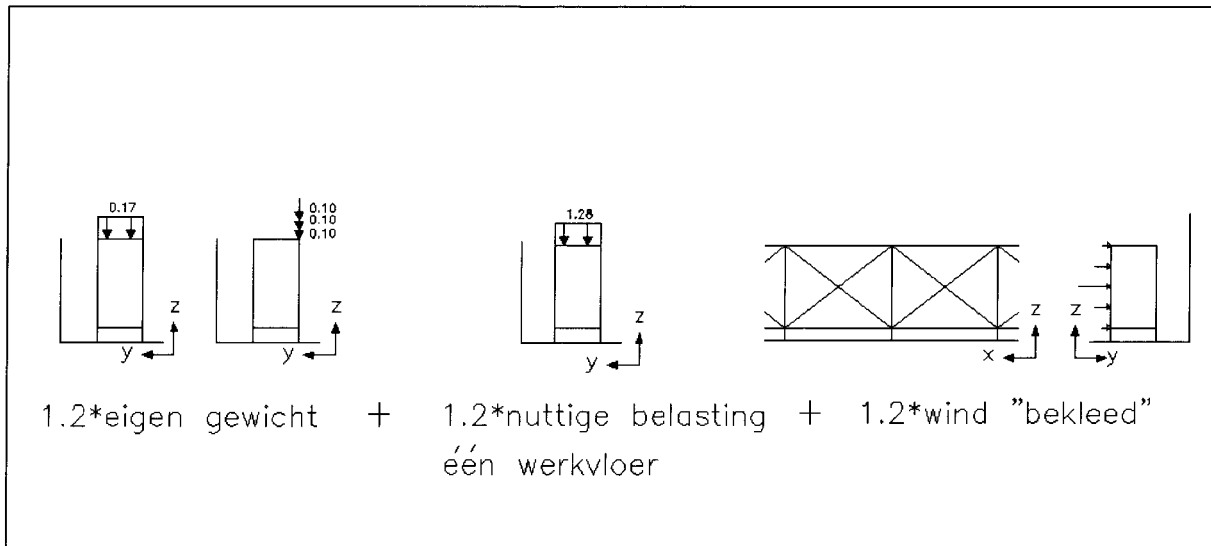
Afbeelding 9.38: Moment-rotatiediagram



Afbeelding 9.39: Krachtenverloop in de maatgevende staandergroep

9.6 Resultaten configuraties 5 t/m 8

In deze paragraaf worden de resultaten besproken van de beklede steigerconstructie. Afbeelding 9.40 geeft het belastingverloop weer. De belasting grijpt met puntlasten aan op de steiger.



Afbeelding 9.40: Belastingen op de steiger

De berekende constructie is opgebouwd uit precies één slag, en de constructie wordt belast met winddruk en zuiging. De momentenlijnen van configuratie 5 (of 6) en 7 (of 8) staan afgebeeld in afbeelding 9.41 en 9.42.

▪ Verankering

De maximale trek belasting op de verankering bedraagt 4 kN. De maximaal opneembare belasting bedraagt 6 kN (in rekenwaarde). De verankering voldoet dus.

▪ Pen

Bij het geïllustreerde momentenverloop (afbeelding 9.41) wordt er van uitgegaan dat de staanders voor de binnen- en buitenstaander uit een stuk worden genomen.

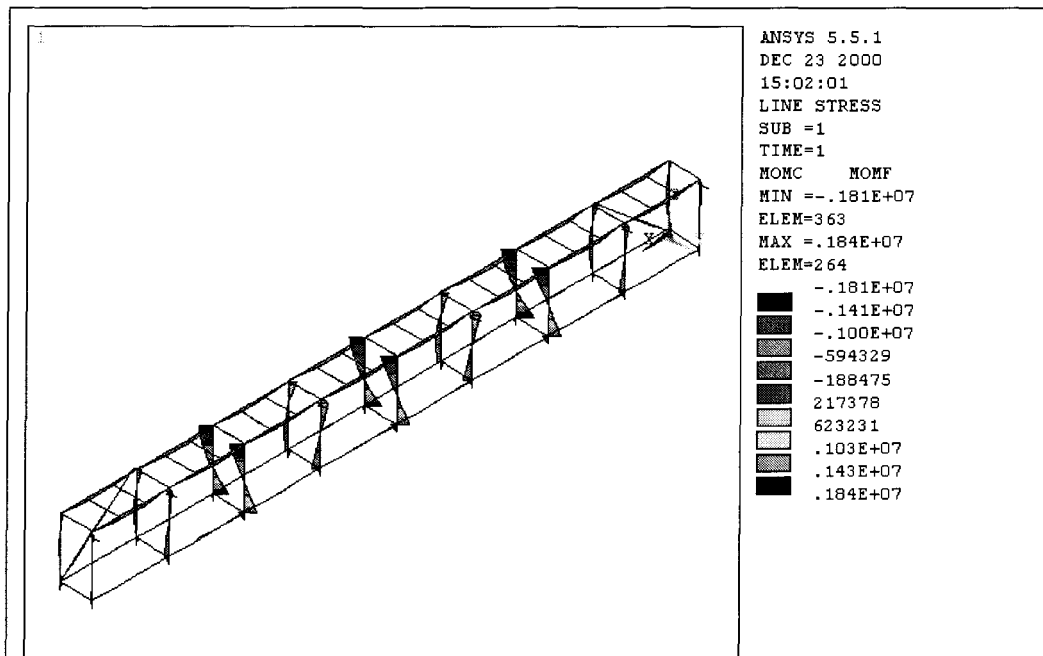
▪ Staander

Bij de geïllustreerde staander met 1 slag van *configuratie 5*, bedraagt het moment maximaal 1.94 kNm (druk). Het uiterst opneembaar moment bedraagt 2.1 kNm. De normaalkracht in de staander bedraagt hierbij 7,3 kN (unity-check 0.92).

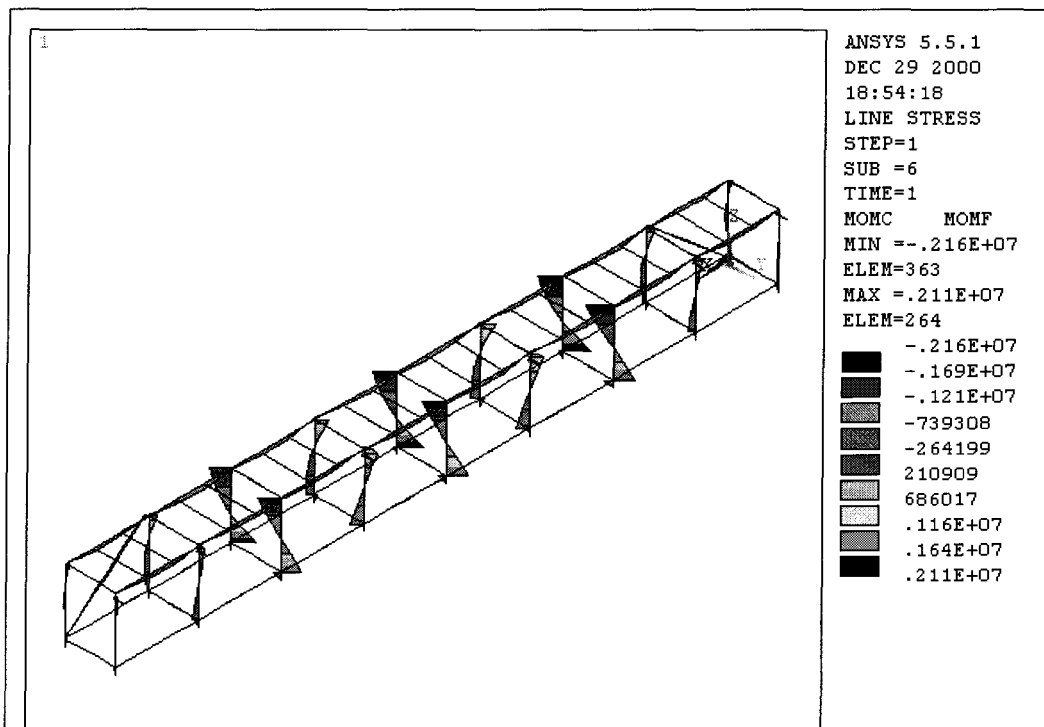
Afbeelding 9.42 geeft het momentenverloop weer van *configuratie 7* (of 8). Hieruit volgt dat al bij een slag het moment wordt overschreden (2.16 kNm). De constructie voldoet niet.

▪ Maximale rotatie

De maximale rotatie bedraagt 0.05 rad (bij bezwijken staander).



Afbeelding 9.41: Momentenverloop configuratie 5



Afbeelding 9.42: Momentenverloop configuratie 7

Opmerking:

De bepaalde bouwhoogte van één slag is een theoretisch bepaalde bouwhoogte. Dit houdt in dat in de praktijk of de configuratie aangepast zal moeten worden, of een ander systeem moet worden toegepast. Met betrekking tot de uitgangspunten in hoofdstukken 2 en 3 wordt gesteld dat het twee-slag-patroon vervalt. In paragraaf 9.6 wordt een alternatieve oplossing geboden.

9.7 Beklede steigers (één-slag-patroon)

In hoofdstuk 1 werd bij de probleemstelling reeds gesteld dat beklede steigerconstructies in de toekomst vaker voor gaan komen.

Om meer inzicht te krijgen in de problematiek van beklede steigerconstructies is er een rondvraag verricht onder steigerbouwers. Hierbij stonden twee vragen centraal:

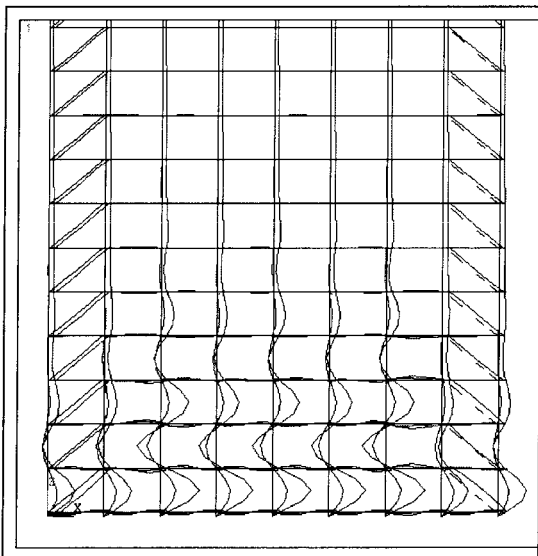
1. Worden beklede steigerconstructies frequent toegepast?
2. Op welke manier wordt de (Layher) steigerconstructie uitgevoerd?

Uit deze rondvraag kwam naar voren dat een beklede steiger weinig voorkomt (minder dan 10% van de steigerwerken). Als er een bekleed steigersysteem wordt gebruikt, wordt dit altijd toegepast met een één-slag-patroon. Een één-slag-patroon (zie afbeelding 2.12 c) betekent dat iedere staander, bij iedere slag moet worden verankerd. De toepassing van dit patroon impliceert dat er twee maal zoveel verankeringen in de steiger moeten. Dit maakt beklede steigers commercieel minder interessant.

9.7.1 Imperfectiepatroon bij beklede steigers

Classificatie

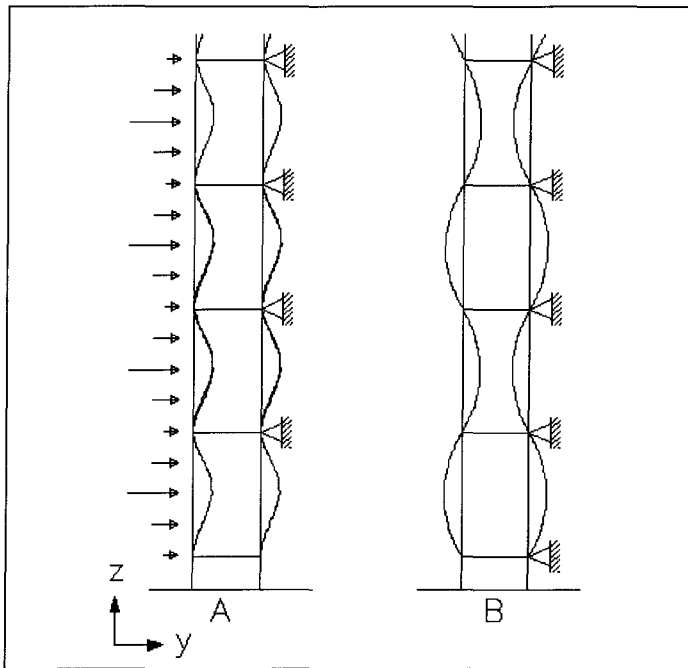
Steigers kunnen geclassificeerd worden in “star-” of “flexibel-” geschoord. De classificatie wordt verricht aan de hand van het gevonden knikpatroon. Bij een “flexibel-” geschoorde steiger knikt de werkvloer weg op de plaats waar deze niet verankerd is. Doordat bij een één-slag alle staanders ter plaatse van het knooppunt met de werkvloer verankerd zijn, wordt de steiger geclassificeerd als “star geschoord”. Dit wordt bevestigd door het knikpatroon in afbeelding 9.43. Het geïllustreerde knikpatroon knikt uit in het x-z vlak.



Afbeelding 9.43: Mogelijk knikpatroon (één-slag-patroon)

Imperfectiepatroon

Bij een één-slag-patroon wisselt het knikpatroon om de slag. In afbeelding 9.44 zijn twee mogelijke patronen geïllustreerd die als imperfectiepatroon kunnen worden gehanteerd. Afbeelding 9.44 (a) illustreert het imperfectiepatroon als de verankering maatgevend is. In deze afbeelding is de richting van de windbelasting ook geïllustreerd. Door de horizontale krachten uit het imperfectiepatroon zal de belasting op de verankering (trek of druk) maximaal zijn. Afbeelding 9.44 (b) geeft een ander mogelijk imperfectie patroon weer, waarbij de belasting op de staander (ter plaatse van het midden) groter is. De keuze van het imperfectiepatroon wordt dus gerelateerd aan het criterium dat maatgevend is.



Afbeelding 9.44: Imperfectiepatronen (bij het één-slag-verankeringspatroon)

9.7.2 Berekningen

Uit deelberekeningen bleek dat de krachten op de verankering maatgevend zijn. Dat wordt in deze paragraaf aangetoond. Dit wordt gecontroleerd door eerst de maatgevende hoogte te berekenen uitgaande van de windbelasting, en dan aan te tonen dat bij deze hoogte de overige criteria (pen en staander) niet maatgevend zijn.

Bij de controle van de verankering wordt uitgegaan van het imperfectiepatroon van afbeelding 9.44 (a).

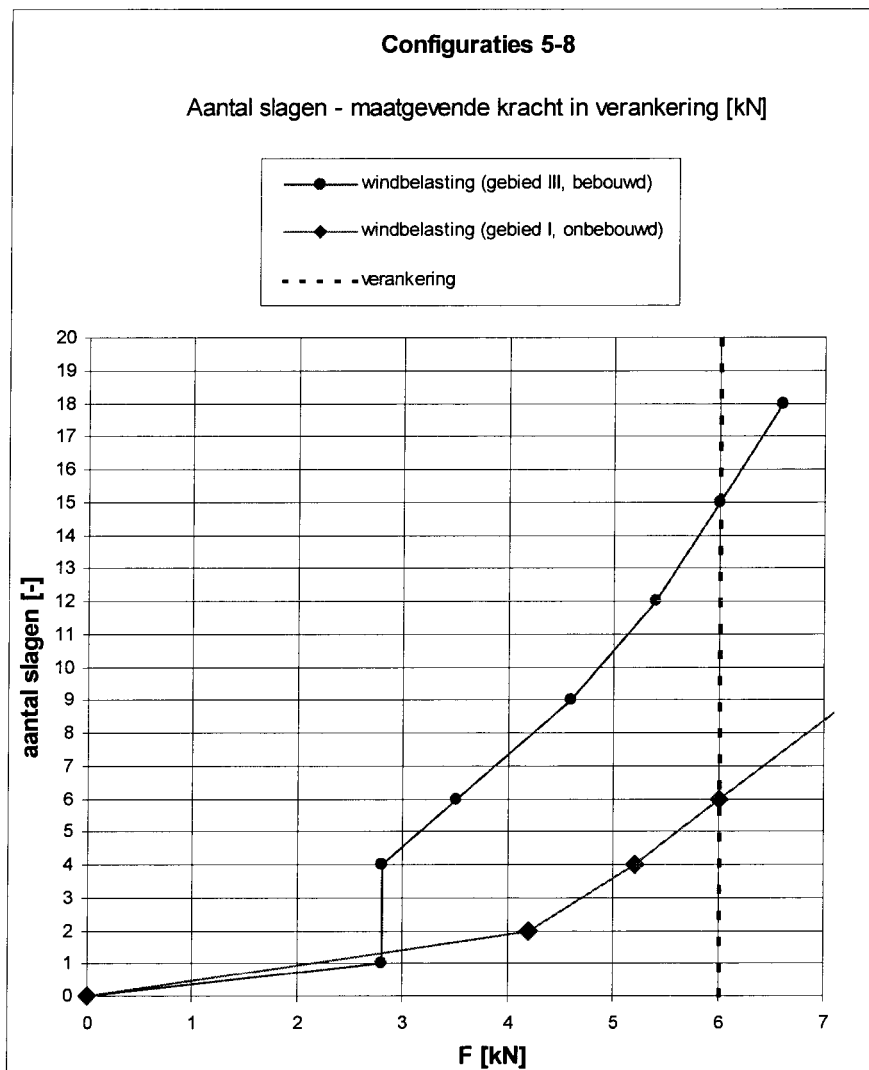
De verschillen tussen de configuraties onderling blijken niet significant te zijn. De belasting wordt hoofdzakelijk bepaald door het geprojecteerde oppervlak.

▪ Verankering

In afbeelding 9.45 zijn de bouwhoogten geïllustreerd. Deze bedragen bij windgebied I (onbebouwd) 6 slagen en bij windgebied III (bebouwd) 15 slagen.

De geografische locatie (waarmee het windgebied) samenhangt is dus van belang.

In de grafiek in afbeelding 9.45 vertoont de curve (windgebied III, bebouwd) tussen 1 en 4 slagen een sprong. Dit is het gevolg van de constante stuwdruk NEN 6702 welke bij gebied III tot 9 m constant is. Bij windgebied I (onbebouwd) is geen constante stuwdruk.



Afbeelding 9.45: Bouwhoogte grafiek beklede steigers

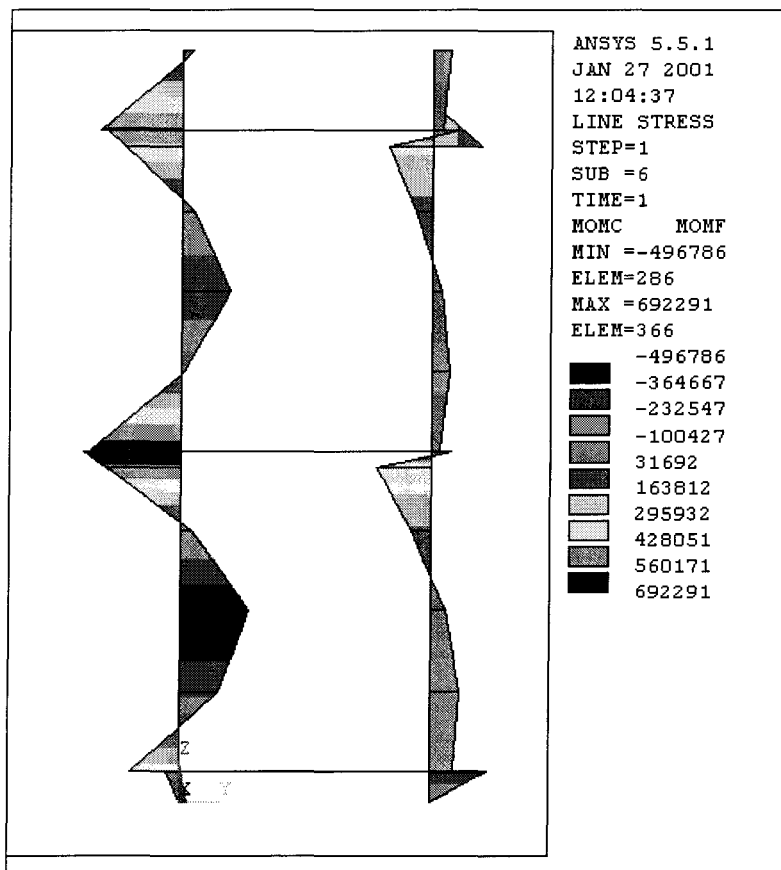
- Pen / staander

De controle van de steiger vindt plaats bij windgebied III (bebouwd) met een hoogte van 15 slagen. Bij de controle wordt configuratie 8 als uitgangspunt genomen doordat deze steiger het hoogste eigen gewicht heeft.

Deze steigerconfiguratie wordt gecontroleerd, waarbij aangetoond wordt dat de overige criteria (pen en staander) niet maatgevend zijn.

Het maximaal moment bedraagt 0.69 kNm (zie afbeelding 9.46), de normaalkracht 21.2 kN. (unity-check pen $0.69/1.4 = 0.49$).

Hiermee is aangetoond dat de verankering maatgevend is.



Afbeelding 9.46: Momentenlijn beklede steiger (15 slagen)

- Rotatie

De rotatie blijft beperkt tot 0.01 rad.

Opmerking:

De windvormfactoren kunnen lokaal berekend worden (NEN 6702 figuur 28a). Uitgaande van een hoekvlak van $(2.572 \cdot 2/2)$ 2.5 m^2 bedraagt de vormfactor $1.2+0.3$ (over- onderdruk) = 1.5. In het onderzoek is hier geen rekening mee gehouden (er is gerekend met 1.2).

Hoofdstuk 10

Conclusies en aanbevelingen

10.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden conclusies getrokken aan de hand van de resultaten van de hoofdstukken 8 en 9. Eveneens worden er aanbevelingen gegeven voor vervolgonderzoek. De conclusies zijn opgesteld in samenhang met de probleemstelling zoals deze in hoofdstuk 1 geponeerd is.

In hoofdstuk 1 is als hoofddoelstelling genoemd dat er een methodiek moet worden ontwikkeld om Layher-Allround steigers te kunnen berekenen. Met deze methodiek dienden voor enkele steigerconfiguraties de maatgevende bouwhoogten te worden bepaald. Basis van de rekenmethodiek is een fysisch en geometrisch niet-lineaire eindig elementenberekening.

Omdat er in de bouw de tendens is om steigers winddicht te bekleden, is ervoor gekozen om in het onderzoek ter vergelijking ook de bouwhoogte van de configuraties met 100% dichte bekleding te bepalen. De uitgangspunten van het onderzoek zijn gedefinieerd in de hoofdstukken 2 en 3. In afbeeldingen 3.20 en 3.21 zijn de configuraties grafisch gepresenteerd.

10.2 Conclusies

10.2.1 Bouwhoogten onbeklede steigerconfiguraties

Aan de hand van de resultaten van hoofdstuk 9 zijn in de afbeeldingen 10.1 a t/m d de maatgevende bouwhoogtes van de steigerconfiguraties (1 t/m 4) gepresenteerd. De bouwhoogte wordt bepaald op basis van twee criteria, te weten: de penverbinding tussen de staanders, en de steigerbuis van de staander. De penverbinding vormt een verzwakking van de steiger.

De grafieken in afbeelding 10.1 geven per bezwijkcriterium (pen of staander) de maatgevende bouwhoogte. Achter ieder criterium staat welke belastingcombinatie maatgevend is. Als afbeelding 10.1 a als voorbeeld wordt genomen, kan de steiger 21 slagen hoog gebouwd worden (uitgaande van het pen-criterium in windgebied I, onbebouwd). In windgebied III kan de steiger 23 slagen hoog gebouwd worden. Als van de staander uit wordt gegaan kan de steiger tot 26 slagen hoog gebouwd worden. Zowel de nuttige belasting bovenin de steiger als de windbelasting in gebied I zijn dan maatgevend.

Door de praktijk zou de maatgevende bouwhoogte moeten worden ontleend aan het pen-criterium. Er mag alleen van het staander-criterium worden gebruik gemaakt, indien vooraf aan de hand van de momentenlijn de locatie van de pen-verbindingen zodanig is bepaald dat ze niet maatgevend zijn.

Pen

Aan de hand van de grafieken van afbeelding 10.1, wordt geconcludeerd dat de windbelasting in gebied I (onbebouwd) bij alle configuraties maatgevend is.

Als er gerekend wordt met windbelasting uitgaande van windgebied III, kan de steiger maximaal 2 slagen hoger worden gebouwd. Uitgaande van configuratie 1 en 2 leidt dit tot een percentuele verhoging van ca. 10%. Bij configuratie 3 en 4 blijft deze verhoging beperkt

tot ca. 6 % (bij configuratie 3 is indien met windgebied III gerekend wordt, de nuttige belasting maatgevend).

Hieruit kan geconcludeerd worden dat als de maatgevende bouwhoogte louter wordt bepaald op grond van windgebied I (onbebouwd), dit leidt tot een acceptabele benadering van de maatgevende bouwhoogte.

Staander

Als het pen-criterium genegeerd wordt en van de staander als criterium uitgegaan wordt, kan de steiger maximaal drie slagen hoger gebouwd worden.

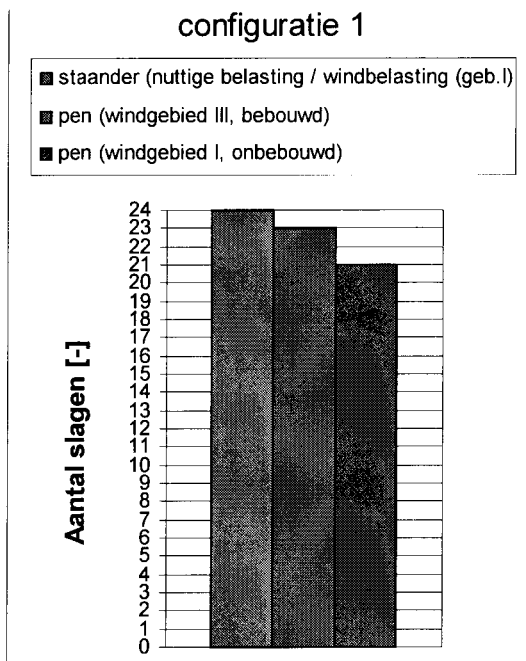
Er kan in alle gevallen uit worden gegaan van de belastingcombinatie "nuttige belasting" op anderhalve vloer bovenin de steiger. Het verschil tussen het staander-criterium en het pen-criterium komt hoofdzakelijk naar voren indien de steiger voor windgebied I ontworpen wordt. Een verzwaring van de pen kan bij de steigerconfiguraties 1 en 2 (relatief lichte steigers) leiden tot een toename van de bouwhoogte met 3 slagen (ca. 15%).

Uitvoering steigervloer

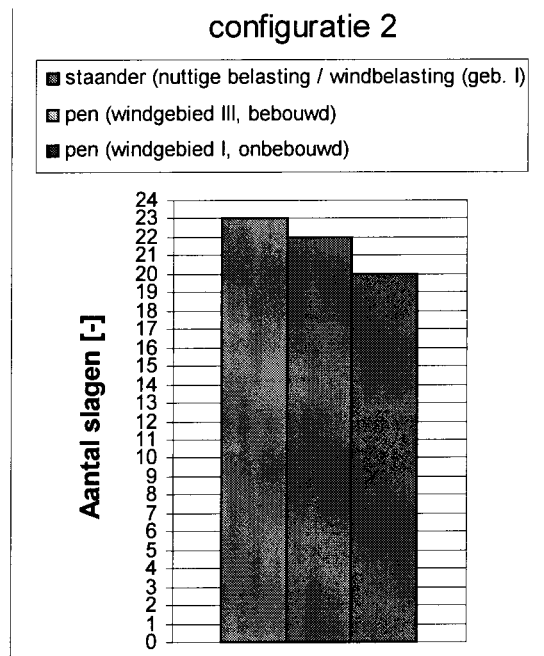
Configuraties 1 ten opzichte van 2 alsmede 3 ten opzichte van 4 onderscheiden zich door het toepassen van een vloer met steigerbuis als kortelingen in plaats van een vloer met systeemkortelingen. De bouwhoogteverschillen tussen de configuraties bedragen maximaal één slag. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de invloed van de uitvoering van de werkvloer op de bouwhoogte niet significant is. Bij de berekening dient uit te worden gegaan van het gewicht van de traditionele vloer.

Belastingcombinatie

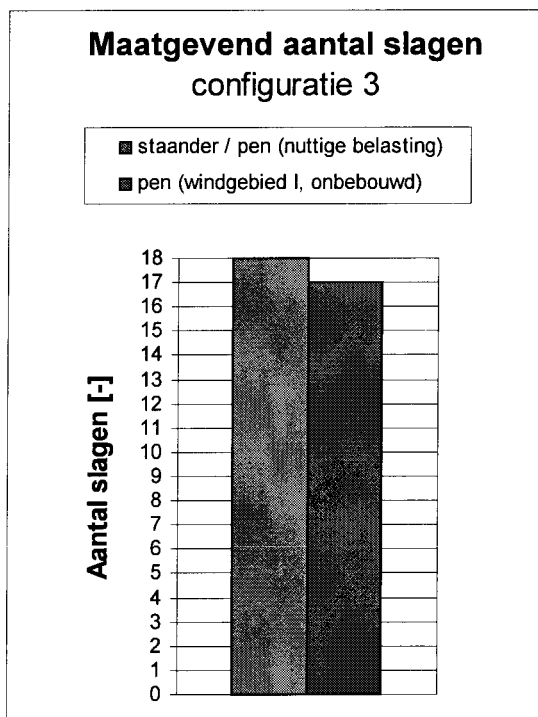
Naast de reeds aangegeven belastingcombinaties in dit onderzoek is ook gerekend met de combinatie 1.35 maal de permanente belasting. Deze combinatie bleek bij geen van de configuraties maatgevend te zijn.



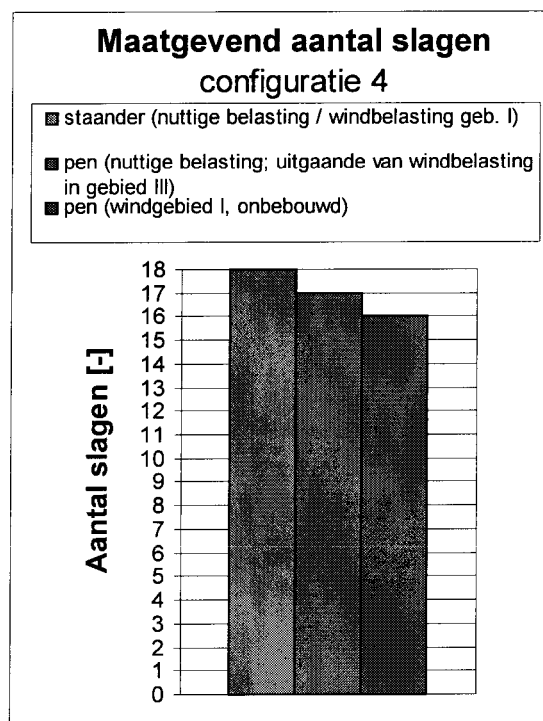
a: Configuratie 1



b: Configuratie 2



c: Configuratie 3



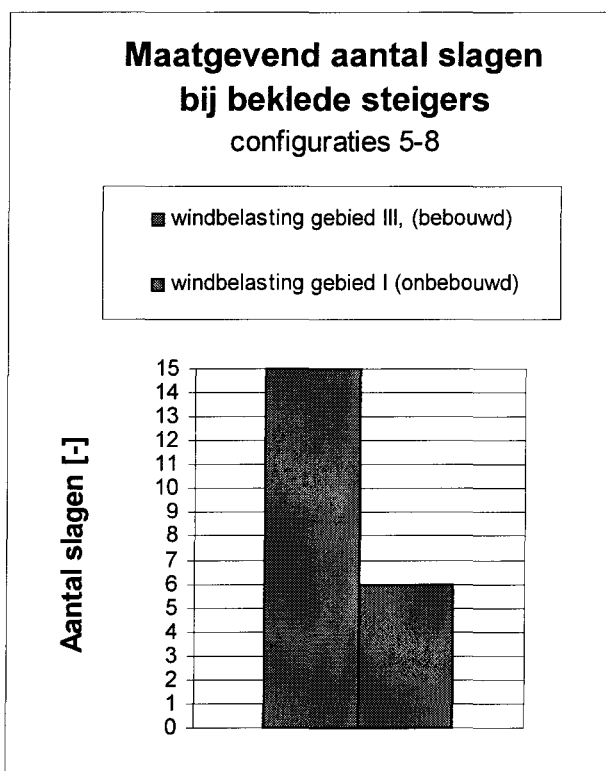
d: Configuratie 4

Afbeelding 10.1: Bouwhoogtes configuraties 1 t/m 4

10.2.3 Bouwhoogte beklede steigers

In hoofdstuk 9 (paragraaf 9.5) werd aangegeven dat uitgaande van het gangbare verankeringspatroon (een twee-slag-patroon) een beklede steigerconstructie praktisch gezien niet haalbaar is, doordat de krachten op de verankerung te hoog worden.

Een oplossing is om de steiger met behulp van een één-slag patroon (iedere staander, iedere slag) te verankeren. Uit afbeelding 10.2 wordt geconcludeerd dat de bouwhoogtes bij beklede steigers sterk afhankelijk zijn van het windgebied.



Afbeelding 10.2: Bouwhoogtes beklede steigers

10.3 Aanbevelingen

10.3.1 Rekenmethodiek

Ten behoeve van dit onderzoek is een rekenmethodiek ontwikkeld (zie ook hoofdstuk 9) die ook toepasbaar is voor andere steigerconfiguraties. De bouwhoogtes die in paragraaf 10.1 gepresenteerd zijn, zijn bepaald aan de hand van deze rekenmethodiek. De methode is gebaseerd op de classificatie van de steiger aan de hand van het driedimensionale knikpatroon. Aan de hand van dit patroon worden het imperfectiepatroon gemodelleerd. De rekenprocedure bestaat uit een geometrisch en fysisch niet-lineaire berekening. Het fysische niet-lineaire materiaalgedrag ontstaat door het toepassen van de multi-lineaire moment-rotatiediagrammen in de aansluiting van de schakels aan de staanders.

Aanbeveling:

In een vervolgonderzoek kan worden geanalyseerd of het knikpatroon verandert indien parameters, zoals bijvoorbeeld de hart op hart afstand van de staanders, wijzigen.

10.3.2 Beklede steigers

In het onderzoek is uitgegaan van 100% beklede steigers. Vervolgonderzoek kan zich richten op steigers die bekleed zijn met netten (of zijl) met een dichtheid van 50% tot 90%. Doordat bij onbekte steigers de pen en de staander als criteria maatgevend zijn en bij beklede steigers de verankering maatgevend is, zal er bij een mindere dichtheid een combinatie van criteria kunnen optreden.

Literatuur en verantwoording

- [1] Layher Allround-Gerüstknoten, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-8,22-64
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlijn, januari 1999
- [2] NEN-EN 12811 Steigers - Prestatie-eisen en algemeen ontwerp
Comité Européen de Normalisation, Brussel, 1999.
- [3] NEN 6770 Staalconstructies TGB 1990; Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies
Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 2^e druk mei 1997, (1^e druk 1991)
- [4] NEN 6702 Belastingen en vervormingen
Nederland Normalisatie Instituut, Delft, 1991
- [5] Layher Allroundsteiger Onderdelen catalogus en prijslijst, 1/8/1999
- [6] NEN 6771 Staalconstructies TGB 1990; Stabiliteit
Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 1991

Verantwoording

Voor de plaatsing van alle afbeeldingen waarbij als bron Layher genoemd is, is schriftelijk toestemming gegeven door Layher Nederland.

Bijlage 1: Modelling van normaalkrachtsveer en rotatieveer door balkelementen

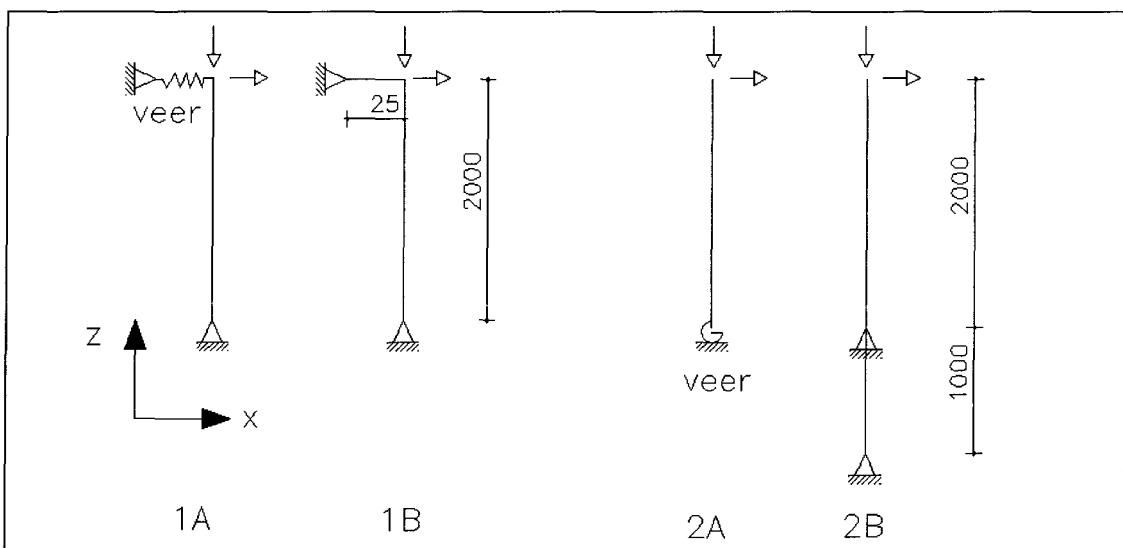
Algemeen

- In deze bijlage worden de resultaten van de berekeningen met twee mechanicamodellen besproken. De modellen hebben als doel de invloed van het vervangen van een veerelement door een balkelement te analyseren.

In de eerste twee modellen (zie afbeelding B.1.1 model 1A en 1B) wordt een normaalkrachtveer vervangen door een balkelement.

In de andere modellen (2A en 2B) wordt een rotatieveer vervangen door een balkelement (met scharnieroplegging).

In het vergelijk worden resultaten uit eerste- en tweede-orde-berekeningen met elkaar vergeleken. Voornamelijk de tweede orde berekeningen zijn van belang voor het vergelijk (de eerste-orde-berekeningen dienen identiek zijn).

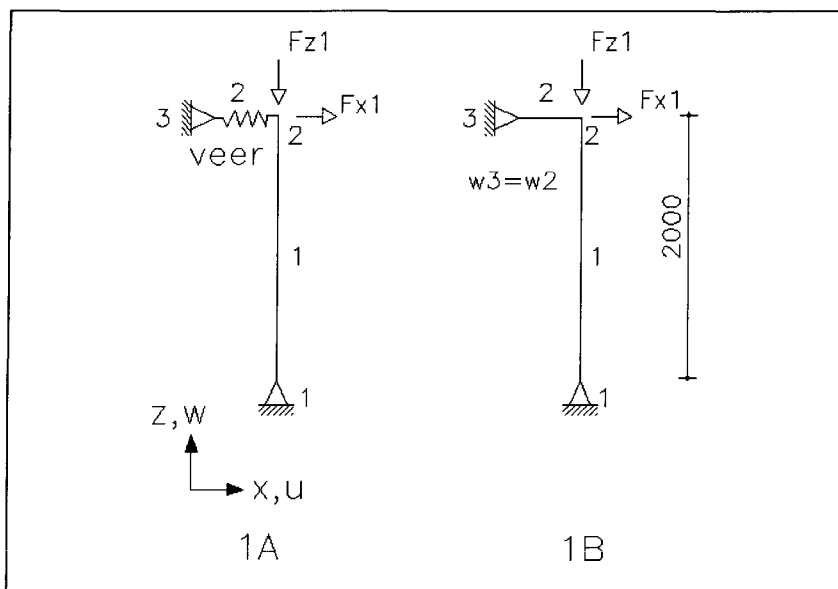


Afbeelding B.1.1:

Modellen 1 en 2

Modellen 1A en 1B

- Model 1A (zie afbeelding B.1.1)
Het model is opgebouwd uit een staafelement dat aan de onderkant opgelegd (in x, y en z) is en aan de bovenkant verend ondersteund (afbeelding B.1.1). Het staafelement is gemodelleerd als LINK element en heeft een lengte van 2000 mm. Het veerelement wordt als normaalkrachtsveer (COMBIN 40) gemodelleerd. De veerconstante (k) bedraagt 100 N/mm ($F_x = k \cdot u_x$). De knopen 1 en 3 zijn opgelegd in x, y en z- richting. (omdat in het onderzoek alle berekeningen drie-dimensionaal gemaakt worden, is dit in deze som ook gedaan).
- Model 1B (zie afbeelding B.1.2)
Bij model 1B is het veerelement vervangen door een balkelement met een veer karakteristiek conform de normaalkrachtsveer. Uitgaande van een oppervlak (A) en een lengte van het element (L) kan het verband tussen beide uitgedrukt worden in: de vergelijking $A = k \cdot L / E$. Knoop 1 is opgelegd in x, y en z richting, knoop 3 is opgelegd in x en y richting. Tussen knopen 2 en 3 zijn de verplaatsingen in z-richting gekoppeld.
- De belastingen op beide modellen bedragen: $F_z = 10000$ N en $F_x = 10000$ N (in knoop 2). Profielgegevens van de gebruikte elementen zijn te vinden in tabel 1.1.



Afbeelding B.1.2:

Modellen 1A en 1B

Tabel B.1.1

element	A [mm ²]	I [mm ⁴]	d [mm]	k [N/mm ²]
1	453			
2 (veer)				100
2 (balk)	1.19E-01			

- *Resultaten* (tabel B.1.2)

Volgens de verrekening van de veer karakteristiek zijn de resultaten voor de eerste-orde-berekening gelijk. In tabel B.1.2 zijn de waarden voor een eerste-orde-berekening van modellen 1A en 1B gegeven.

Als de tweede-orde-verplaatsing handmatig gecontroleerd wordt, dan leidt dit tot de volgende berekening.

De Eulerse knikkracht wordt berekend door $k \cdot L$ (k is de veerconstante en L is de lengte van de kolom).

Als het balkelement een lengte van 2000 mm heeft en een veerconstante van 100 N/mm leidt dit tot een knikkracht van 200000 N ($n = 20$). De vergrotingsfactor ($n/n-1$) bedraagt derhalve 1.052. Uitgaande van de doorbuiging in eerste orde van 100 mm, leidt dit tot een tweede-orde-doorbuiging van 105.26 mm. Beide modellen geven een tweede-orde-doorbuiging van 105.26 mm als einddoorbuiging.

Beide modelleringen geven dezelfde resultaten.

Tabel B.1.2: Resultaten model 2

1^e orde berekening model 1

	model 1A	model 1B
u_2	100.00	100.00
v_2	-0.21	-0.21
F_{v1}	10000.00	10000.00
F_{h1}	0.00	0.00
F_{v3}	0.00	0.00
F_{h3}	10000.00	10000.00

Eenheden: N; mm

2^e orde berekening

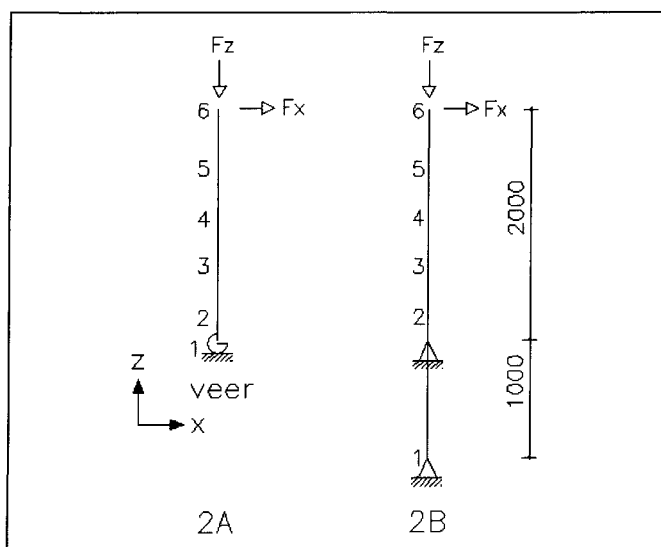
	model 1A	model 1B
u_2	105.26	105.26
v_2	0.21	0.21
F_{v1}	10000.00	10000.00
F_{h1}	526.00	526.00
F_{v3}	0.00	0.00
F_{h3}	-10526.00	-10526.00

- *Conclusie*

Een horizontale rotatieveer kan worden vervangen door een staaf- balkelement met overeenkomstige statische eigenschappen, mits er aan dezelfde modelleringuitgangspunten is voldaan.

Modellen 2A en 2B

- **Model 2A**
Het model is opgebouwd uit balkelementen (BEAM 4) en een rotatieveerelement (COMBIN 40). Knoop 1 is gemodelleerd als oplegging en inklemming in alle richtingen en om alle assen (x, y en z). van knopen 1 en 2 zijn alle vrijheidsgraden doorgelinkt behalve de rotatie om de y-as. Tabel B.1.3 geeft een overzicht van de gebruikte profieldimensies. Afbeelding B.1.3 illustreert de modellen.
- **Model 2B**
De rotatieveer van model 2A is vervangen door een balkelement met overeenkomstige statische eigenschappen. Bij de modellering is de rotatieveer ($c=100000 \text{ Nmm/rad}$) gemodelleerd door een roloplegging (in x en y- richting) en een balkelement dat aan de onderkant scharnierend is opgelegd. Er is uitgegaan van een balkelement met lengte van 1000 mm ($I = L^3C/3E$).
- De constructie wordt belast met een verticale belasting van 2 N en een horizontale belasting van 1 N (in knoop 6).



Afbeelding B.1.3: Model 2

Tabel B.1.3: Profieieigenschappen

element	A [mm ²]	I [mm ⁴]	d [mm]	C [N/mm ²]
1 (veer)				100000
1 (balk)		1587		
2-5	4.53E+02	1.16E+05	48.3	

- *Resultaten*

Uit de resultaten van tabel 1.4 blijkt dat de verplaatsing in knoop 6 voor beide modellen in een eerste en tweede-orde-berekening overeenkomen. De modellering van de rotatieveer (model 2A) kan worden vervangen door de modellering conform (2B). Het balkelement veroorzaakt uitsluitend de gewenste hoekverdraaiing.

Tabel B.1.4: Resultaten berekening

1^e orde berekening model 1

	model 2A	model 2B
u_6	40.10	40.10
F_{v1}	2.00	2.00
F_{h1}	-1.00	0.20
M_1	-2000.00	
F_{h2}		-1.20

Eenheden: N; mm

2^e orde berekening

	model 2A	model 2B
u_6	41.79	41.79
F_{v1}	2.00	2.00
F_{h1}	-1.00	0.20
M_1	-2000.00	
F_{h2}		-1.20

- *Conclusie*

Een rotatieveer kan worden vervangen door een balkelement met bijbehorende statische eigenschappen.

- *Opmerking*

Als er ter plaatse van knoop 2 een roloplegging wordt gemodelleerd en het balkelement dus door normaalkracht belast wordt, zijn er verschillen in uitkomsten tussen de tweede-orde-berekeningen. Het balkelement dat voor de rotatieveer zorgt wordt nu tevens belast met normaalkracht. In tabel B.1.5 zijn de verschillende resultaten in doorbuiging van knoop 6 geplaatst.

Tabel B.1.5: Verplaatsing knoop 6 (na aanbrengen van een roloplegging)

2^e orde verplaatsing U_6

F_v	model 2A	model 2B
1	40.39	41.78
2	41.79	43.61
5	44.85	50.26
10	50.17	67.80

Conclusie

Veelementen kunnen worden vervangen door balkelementen mits de modellering overeenkomt.

De reden om te kiezen voor veelementen heeft betrekking op de relatieve eenvoud van het model, en de mogelijkheid voor niet-lineaire veercharacteristieken.

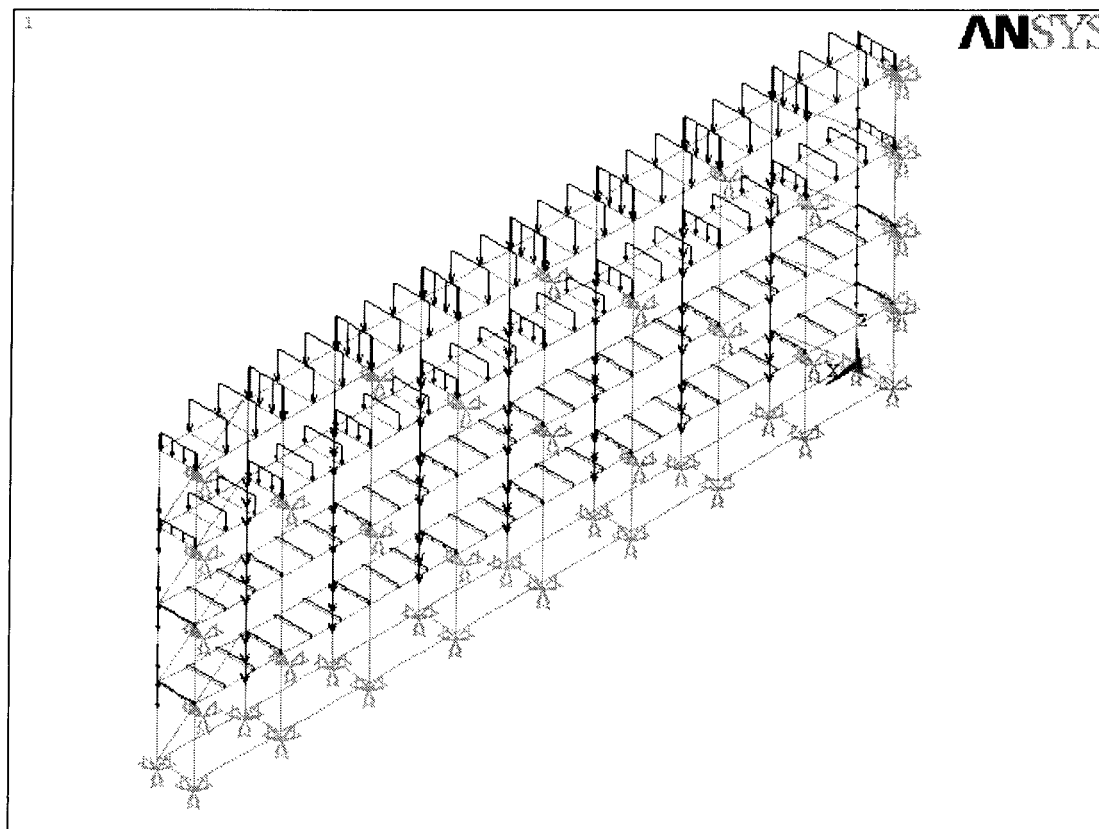
Bijlage 2: Voorbeeld uitwerking rekenprocedure

In hoofdstuk 9 is de rekenmethode schematisch uitgewerkt. In deze bijlage wordt als voorbeeld configuratie 1 (in combinatie met nuttige belasting boven aan de steiger) stap voor stap geanalyseerd. De bedoeling is dat met deze bijlage inzicht wordt verkregen in het te volgen stappenplan bij het berekenen van een steigerconfiguratie.

Voor deze bijlage wordt gebruik gemaakt van de rekenprocedure zoals deze in afbeelding 9.2 is opgesteld. In paragraaf 9.1.2 zijn van deze berekening de tussenresultaten in grafiekvorm weergegeven (afbeelding 9.20). Als eerste wordt de berekeningsmethodiek stap voor stap doorlopen. Daarna wordt de input behorende bij de berekening aangegeven en tot slot wordt de te verkrijgen uitvoer geïllustreerd.

1. Bouwen model met 4 slagen

Bij dit voorbeeld wordt begonnen met een bouwhoogte van 4 slagen. In de eerste plaats wordt het model gebouwd en worden hierop de belasting gezet (zie hoofdstuk 6). In afbeelding B.2.1 is dit model geïllustreerd.



Afbeelding B.2.1:

Model bij 4 slagen

Uitgaande van het model met 4 slagen is in afbeelding B.2.2 (a) de steigerdoorsnede schematisch weergegeven, met hierop de totale belasting per staander per slag. Bij deze configuratie bedraagt de rekenbelasting ten gevolge van het eigen gewicht van de constructie op de buitenstaander 1.1 kN, en de binnenstaander 0.7 kN. De nuttige belasting op één werkvloer bedraagt 6.2 kN (deze wordt over twee staanders verdeeld). (Bovenstaande belastingen kunnen uit hoofdstuk 6 herleid worden.)

2. Eigenwaarde-berekening

De eigenwaarde-berekening wordt uitgevoerd om het knikpatroon te analyseren. In dit onderzoek bleek dat het knikpatroon geclassificeerd kon worden als “flexibel” geschoord (zie hoofdstuk 8). Een invoerfile kan er (gedeeltelijk) als volgt uitzien:

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC
PSTRES,ON
SOLVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE,BUCKLE
BUCOPT,SUBSP,1
SUBOPT,,15
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,FIRST
PLDISP,1
```

Opmerkingen:

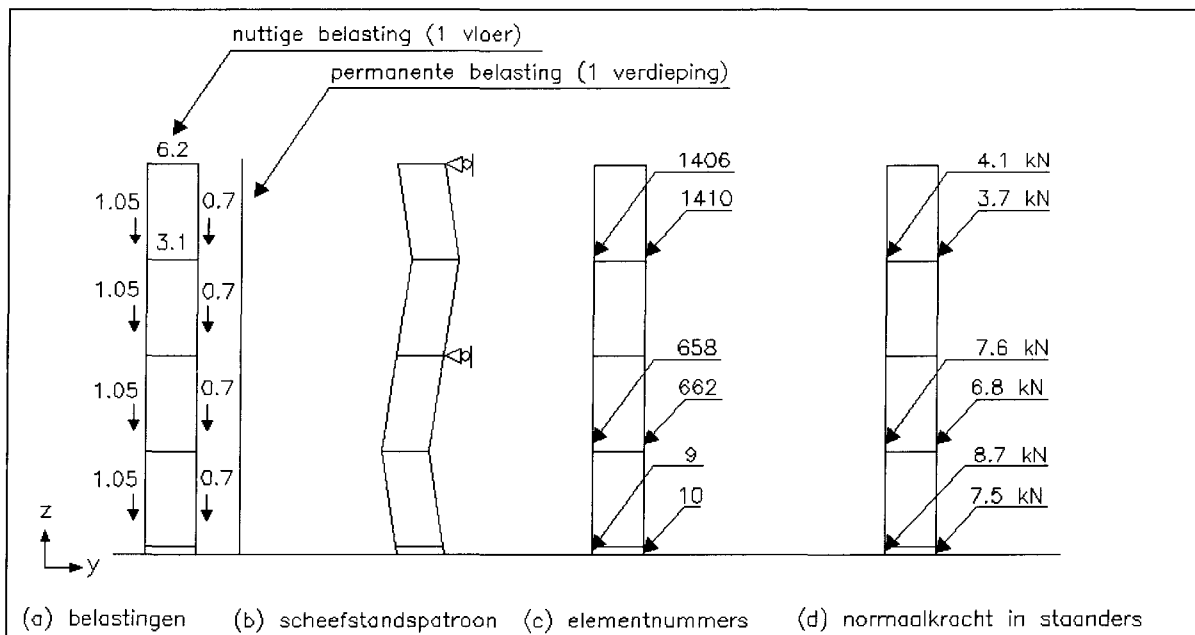
Bij de eigenwaarde-berekening wordt gewerkt met de “subspace” methode. Bij waarschuwingen als: “sturmnumber = 1” kan het nodig zijn het aantal vectoren te vergroten (d.m.v. het SUBOPT commando). Anders kan er een te gunstige knikkracht worden verkregen.

Van belang is dat bij een eigenwaarde-berekening met lineaire veerconstanten gerekend wordt.

3. Eerste-orde-berekening

De eerste-orde-berekening heeft tot doel de normaalkracht in de staanders te bepalen om zo de equivalente belasting ten gevolge van scheefstand te berekenen. Door het invoeren van equivalente belastingen wordt het scheefstandspatroom uit afbeelding B.2.2 (b) verkregen (de scheefstand wordt in punt 3 behandeld). Bij dit voorbeeld wordt de middelste staandergroep beschouwd. In hoofdstuk 8 is beschreven op welke staandergroepen scheefstand moet worden aangebracht.

Na het maken van de eerste-orde-berekening worden de belasting ter plaatse van de gewenste elementen opgevraagd. In afbeelding B.2.2 (c) zijn de elementnummers geïllustreerd. Van deze elementen is de uitvoerfile van de inwendige krachten geïllustreerd in afbeelding B.2.3. Een overzicht van de krachten is weergegeven in afbeelding B.2.2 (d).



Afbeelding B.2.2: Belastingen, scheefstand, elementnummers en uitvoerschema

PRINT FORC ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT NODE TOTAL FORCE LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z FORCES ARE IN GLOBAL COORDINATES

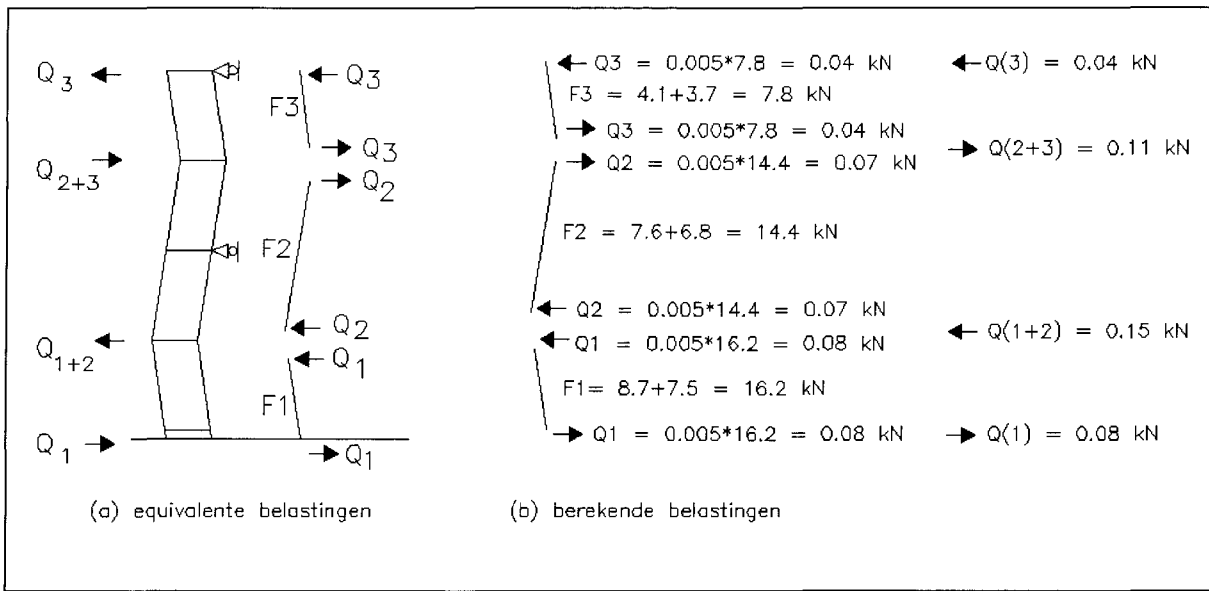
ELEM=		FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
9	0.69670	-55.559	<u>-8654.2</u>	-0.29104E-10	0.0000	0.0000	
114	-0.69670	55.559	8645.8	11112.	139.34	0.0000	
ELEM=	10	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
10	-1.1146	-53.506	<u>-7485.7</u>	-0.58208E-10	-0.68212E-12	0.0000	
107	1.1146	53.506	7477.3	10701.	-222.92	0.0000	
ELEM=	658	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
616	-0.14110	46.644	<u>-7636.2</u>	-54462.	-137.05	0.0000	
617	0.14110	-46.644	7607.5	31140.	66.497	0.0000	
ELEM=	662	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
621	0.26832	61.721	<u>-6751.0</u>	-71296.	324.22	0.0000	
622	-0.26832	-61.721	6722.3	40435.	-190.06	0.0000	
ELEM=	1406	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1304	-0.69892	-128.66	<u>-4111.1</u>	0.11386E+06	-651.20	0.0000	
1305	0.69892	128.66	4082.5	-49532.	301.75	0.0000	
ELEM=	1410	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1309	-1.3397	43.051	<u>-3743.2</u>	-18852.	-1230.9	0.0000	
1310	1.3397	-43.051	3714.5	-2673.3	561.02	0.0000	

Afbeelding B.2.3:

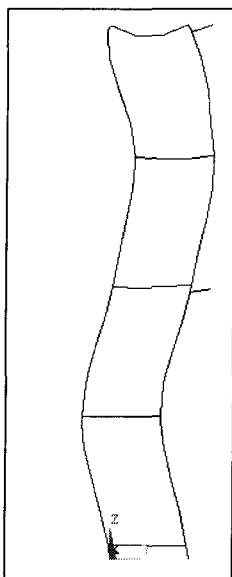
Uitvoerfile Ansys (eerste-orde-berekening)

3. Bepalen equivalente belasting

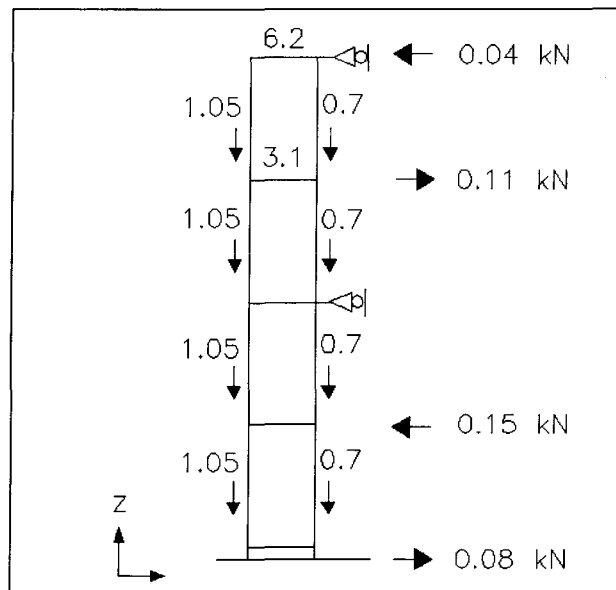
In afbeelding B.2.4 wordt geïllustreerd hoe aan de hand van de normaalkrachten uit de eerste-orde-berekening de equivalente belastingen worden berekend. De equivalente belasting wordt bepaald door de normaalkracht in de staander te vermenigvuldigen met 0.005 (zie ook vergelijking 7.2.2-2). Deze belasting moeten worden ingevoerd in het model (zie afbeelding B.2.4). De combinatie van de equivalente belasting en de overige belasting (permanent en nuttig) geeft het scheefstandspatroom van afbeelding B.2.5, en het volledige belastingschema van afbeelding B.2.6.



Afbeelding B.2.4: Equivalente belastingen



Afbeelding B.2.5: Scheefstandspatroom



Afbeelding B.2.6: Belastingschema

4. Tweede-orde-berekening

Hierna wordt met Ansys een tweede-orde-berekening gemaakt. De berekening wordt gemaakt met behulp van de Newton-Raphson methode. De berekening wordt gemaakt aan de hand van een iteratieproces van lineaire stappen. Aan het eind van ieder stapje worden de inwendige knooppunten vergeleken met de uitwendige krachten. Indien het verschil tussen beide krachten buiten het criterium valt, wordt er nog een iteratie uitgevoerd. Het proces stopt indien de uitkomst binnen een van te voren bepaald criterium valt.

Ter wille van de reproduceerbaarheid van de berekening worden een aantal commando's gerapporteerd.

```
/SOLU  
ANTYPE,STATIC  
SSTIF,ON  
NSUBST,1  
SOLVE  
FINISH
```

De tweede-orde-berekening wordt uitgevoerd door de berekening te maken, waarbij het commando "SSTIF,ON" geactiveerd is. Het fysisch-niet lineair gedeelte vindt plaats doordat de veerstijfheden van de verbinding dwarsschakel-staander als multi-lineair moment-rotatiediagram zijn ingevoerd (zie ook hoofdstuk 4).

De in dit onderzoek gemaakte berekeningen zijn nagenoeg allemaal gemaakt met 10 tussenstapjes (NSUBST,10). Later bleek dat ook uit kan worden gegaan van 1 tussenstap. Convergentieproblemen treden (nagenoeg) niet op.

Bij de instellingen van Ansys is uitgegaan van de volgende commando's:

```
Large deform effects:      off  
Newton-Raphson option:    program chosen  
Adaptive descent:         on if necessary  
Use lumped mass approx:   no  
Equation solver:         program chosen  
Pivots check:             yes
```

Het maximum aantal iteraties (NEQUIT) is niet nader gespecificeerd. Uitgaande van 1 substep zijn er ca. 5 stapjes nodig.

Er is uitgegaan van de volgende convergentie criteria

F (label)	calculated (ref. value)	0.001 (tolerance)	L2 (norm)	1.0 (min. ref)
M (label)	calculated (ref. value)	0.001 (tolerance)	L2 (norm)	1.0 (min. ref)

Er wordt geadviseerd altijd het evenwicht van een (maatgevend) knooppunt handmatig te controleren.

Aan de hand van de geometrisch en fysisch niet-lineaire berekening wordt de krachtsverdeling in de steiger geanalyseerd. Van belang hierbij is de momentenverdeling over de staanders. Uit analyses blijkt dat het bezwijken voornamelijk te maken heeft met het overschrijden van de uiterst opneembare momenten ter plaatse van de pen en de staander. De controles vinden plaats door in eerste instantie de momentenlijn ter plaatse van de maatgevende doorsnede te analyseren en te vergelijken met het uiterst opneembare moment. Het opneembaar moment van de penverbinding (tussen de staanders) bedraagt 1.4 kNm.

Alle criteria zijn in hoofdstuk 4 aan de orde gekomen. Voor de controle wordt gebruik gemaakt van het stroomschema van afbeelding 9.2.

- Controle pen en staander

In hoofdstuk 9 is reeds aangegeven dat element 662 (bij grotere hoogten) maatgevend is. Bij 4 slagen is het moment ter plaatse van element 662 nog gering en bedraagt 0.08 kNm. In afbeelding B.2.7 is het momentenverloop geïllustreerd, in afbeelding B.2.8 zijn de maatgevende elementen aangegeven en in afbeelding B.2.9 is het uitvoerfile van de inwendige krachten van elementen 658 en 662 geïllustreerd.

Uitgaande van een opneembaar moment van 1.4 kNm van de pen, bedraagt de unity-check ($0.09/1.4 = 0.06$). Bij grotere hoogten zal het moment in dit element toenemen.

- Controle hoekverdraaiing

De hoekverdraaiing wordt opgevraagd voor de knopen 800 en 801. Ondanks dat deze waarde gering is wordt de uitvoerfile weergegeven (afbeelding 2.10). (de hoekverdraaiing heeft een waarde van $0.5 \cdot 10^{-3} - 0.93 \cdot 10^{-3} = (-)0.43 \cdot 10^{-3}$ rad).

Opmerking:

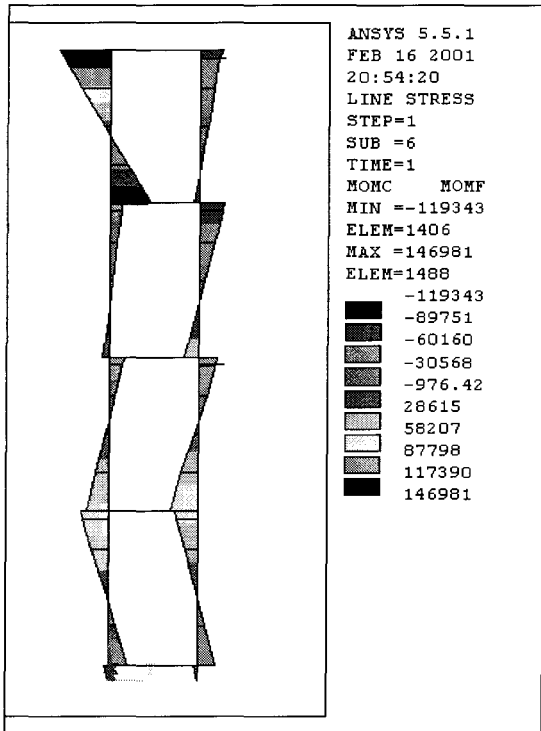
De hoekverdraaiing bleek bij geen van de onderzochte configuraties maatgevend te zijn.

- Verankering

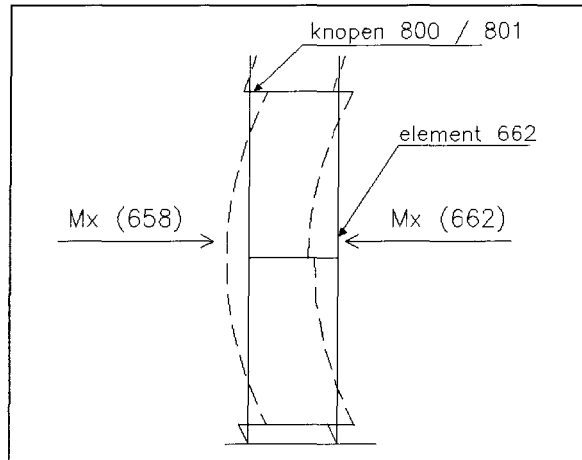
Op dezelfde wijze dient de verankering gecontroleerd te worden. Hiertoe dienen de reactiekrachten opgevraagd te worden.

Opmerking:

Bij onbeklede steigers bleken de verankeringen niet maatgevend te zijn.



B.2.7: Momentenverloop



Afbeelding B.2.8: Aanduiding knopen en elementen

ELEM=		FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
616	-0.34852E-01	45.580	-7632.8	-63525.	-120.86	0.0000	
617	0.34852E-01	-45.580	7604.2	37807.	57.481	0.0000	
ELEM=		FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
621	0.23266	61.678	-6754.4	-80408.	319.11	0.0000	
622	-0.23266	-61.678	6725.8	47444.	-194.37	0.0000	

Afbeelding B.2.9: Krachtenverloop in staanders

NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
800	-0.56293E-01	0.93404E-01	-0.39606	-0.49995E-03	-0.10293E-04	-0.58216E-04
801	-0.56293E-01	0.93404E-01	-0.39606	-0.93170E-03	-0.10293E-04	-0.19929E-04

Afbeelding B.2.10: Uitvoerfile knopen 800 en 801

5. Berekening 5-10 slagen

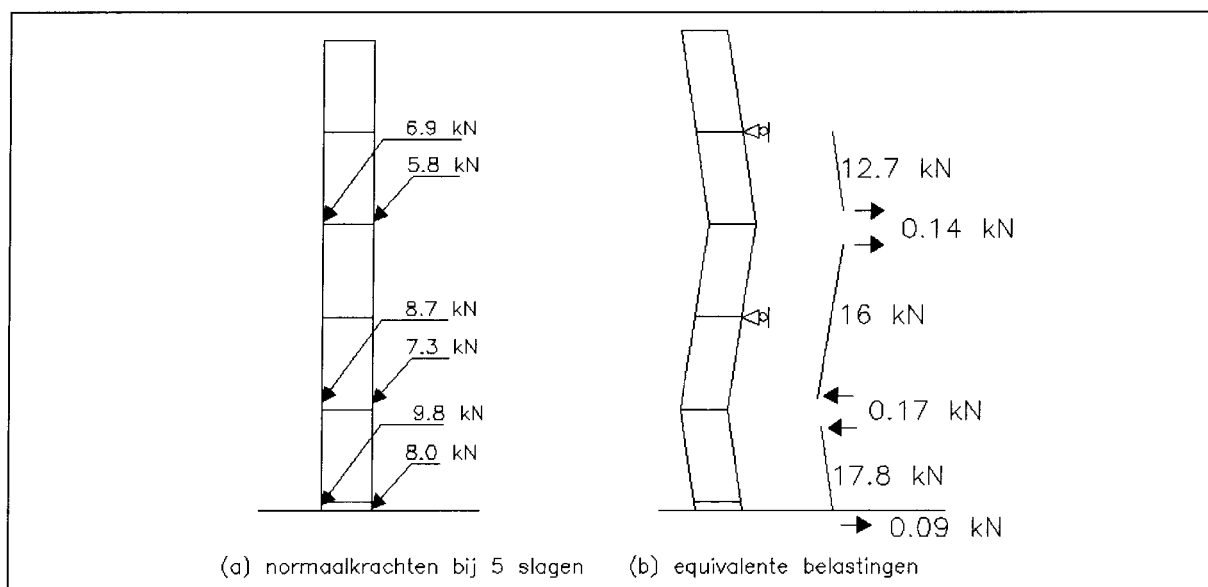
Nadat geconstateerd is dat de steigerconfiguratie bij 4 slagen voldoet (de bezwijkcriteria zijn niet overschreden) wordt het aantal slagen stapsgewijs verhoogd van 5 tot 10 slagen.

In tabel B.2.1 zijn de normaalkrachten in de staanders geïllustreerd (ter plaatse van de elementen). Uit deze normaalkrachten kunnen wederom de equivalente horizontaalkrachten worden bepaald (in afbeelding B.2.11 is deze afgebeeld voor 5 slagen). In tabel B.2.2 zijn de krachten in element 662 gegeven.

In afbeeldingen B.2.12 a en b zijn de momentlijnen van de slagen 5 en 10 weergegeven. Het maximum moment na 10 slagen bedraagt 0.18 kNm (<1.4 kNm).

Tabel B.2.1: Normaalkracht in elementen per slag

elementen	F [kN] per aantal slagen						
	4	5	6	7	8	9	10
9	8.7	9.8	10.6	11.5	12.7	13.8	15.6
10	7.5	8.0	8.9	9.7	10.3	10.8	11.8
658	7.6	8.8	9.6	10.4	11.6	12.8	13.5
662	6.8	7.3	8.2	9.0	9.6	10.1	11.1
1406	4.1	6.9	7.7	8.5	9.7	10.9	11.7
1410	3.7	5.8	6.7	7.5	8.0	8.6	9.5

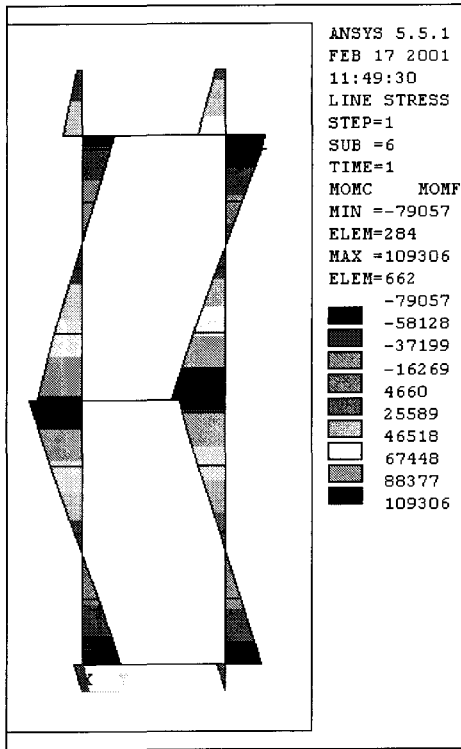


Afbeelding B.2.11: Equivalente belasting bij 5 slagen

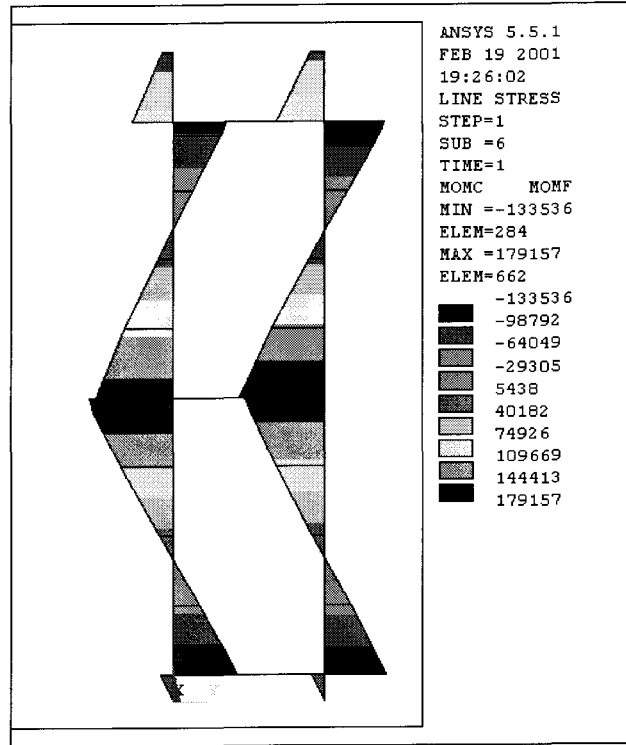
Tabel B.2.2: Krachten in element 662 per slag
krachten in element 662

slagen	F [kN]	$M_{x,s,d}$
5	7.3	0.10
6	8.2	0.10
7	9.0	0.12
8	9.6	0.14
9	10.1	0.16
10	11.1	0.18

eenheden kN, kNm



B.2.12 a: Momentenverloop bij 5 slagen
 ($M_{662} = 0.1 \text{ kNm}$)



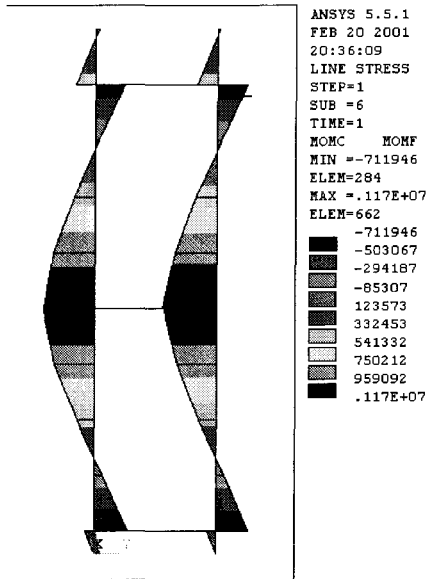
B.2.12 b: Momentenverloop 10 slagen
 ($M_{662} = 0.18 \text{ kNm}$)

5. Berekening bij 24 slagen

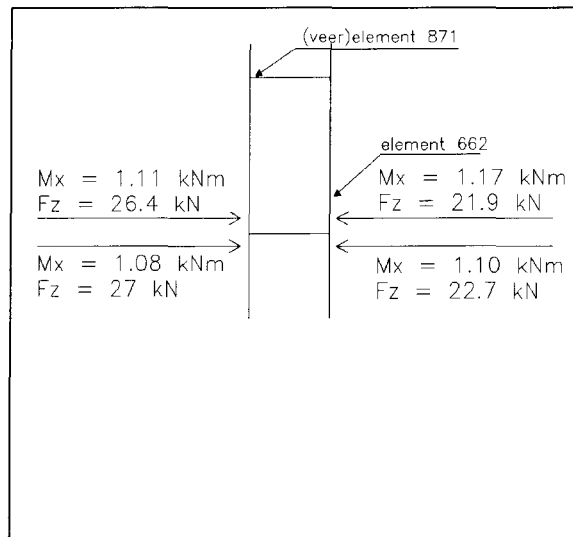
Uit hoofdstuk 9 volgde dat bij deze belastingcombinatie de steigerconfiguratie 24 slagen hoog gebouwd kan worden. Onderstaande conclusies zijn in hoofdstuk 9 ook gedeeltelijk gepresenteerd. Ter wille van de duidelijkheid worden van deze bouwhoogte de resultaten weergegeven.

De momentenlijn bij 24 slagen is geïllustreerd in afbeelding B.2.13 a, het krachtenverloop is geïllustreerd in afbeelding B.2.13 b.

In afbeelding B.2.14 is de uitvoerfile afgebeeld met hierin de optredende krachten.



Afbeelding B.2.13 a: Momentenlijn



Afbeelding B.2.13 b: Krachten in maatgevende doorsnede

```

PRINT FORC ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT NODE TOTAL FORCE LISTING *****

LOAD STEP=      1  SUBSTEP=      6
TIME=      1.0000  LOAD CASE=      0

THE FOLLOWING X,Y,Z FORCES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEM=      658  FX          FY          FZ          MX          MY          MZ
      616  0.22022      80.532     -26445.     -0.11079E+07  1105.2      0.00
      617 -0.22022     -80.532      26416.      0.90701E+06 -665.33     0.00

ELEM=      662  FX          FY          FZ          MX          MY          MZ
      621  0.33186      248.64     -21941.     -0.11680E+07  687.93     0.00
      622 -0.33186     -248.64      21912.      0.90774E+06 -412.75     0.00
    
```

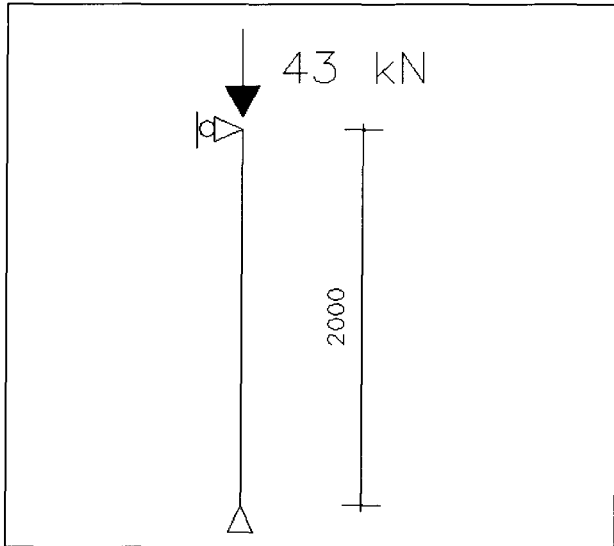
Afbeelding B.2.14: Uitvoer krachten elementen 658 en 662 (bij 24 slagen)

Bijlage 3: Bouwhoogtebepaling (met $L_k = 2000$ mm)

In deze bijlage wordt de bouwhoogte bepaald uitgaande van een kolom met een vrije kniklengte van 2000 mm. Aan de hand van dit voorbeeld wordt aangetoond dat het bepalen van de bouwhoogte aan de hand van het knikpatroon een veel lagere waarde geeft.

De bouwhoogtebepaling in deze bijlage is dan ook niet juist en is louter ter informatie.

Aan de hand van NEN 6770 is bepaald dat de bezwijklast in rekenwaarde 43 kN bedraagt.



Indien de belasting op de buitenstaander bij configuratie 1 per slag 1.1 kN bedraagt en nuttige belasting totaal 4.7 kN, kan er uitgaande van deze schematisering een bouwhoogte worden bereikt van 34 slagen $((43-4.7)/1.1)$.

Opmerkingen

Bij deze schematisering wordt het pen-criterium niet meegenomen en wordt uitgegaan van een star-geschoorde constructie. Tevens wordt additionele momenten verwaarloosd.

