Momenten in Hypardaken

Toepassing van de momentenlijnen van ir. Loof

BSc-eindwerk, eindrapport

Remko Molenaar
1039237

1e begeleider: dr. ir. P.C.J. Hoogenboom
2e begeleider: dr. ir. F.P. van der Meer

TUDelft

Momenten in Hypardaken

Toepassing van de momentenlijnen van ir. Loof

BSc-eindwerk

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

CTB3000 Q3 2015-2016

2 april 2016

door:

Remko Molenaar

1039237

1e begeleider: dr. ir. P.C.J. Hoogenboom

2e begeleider: dr. ir. F.P. Van der Meer

TU Delft

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van het onderzoek dat is uitgevoerd naar de geldigheid en toepassing van de formules die in de begin jaren ’60 door ir. H.W. Loof zijn afgeleid voor de momentenverdeling in hyparschalen. Dit onderzoek is uitgevoerd in de periode februari tot april 2016 in het kader van het Bachelor-eindwerk (vakcode CTB3000) voor de studie Civiele Techniek aan de TU Delft.

Hiermee is een vervolg gegeven op twee eerdere BSC-eindwerken over dit onderwerp, welke in 2015 zijn uitgevoerd door T.M. Tran en D. Hoekstra, waarin respectievelijk het geldigheidsgebied en de randvoorwaarden zijn onderzocht met betrekking tot de door ir. Loof afgeleide momentenlijnen. De aandacht heeft hierbij gelegen op het zoeken naar een meer algemene toepassing van de afgeleide formules en momentenlijnen voor gebruik in een vroeg ontwerpstadium van een hypardak.

In het rapport is enige voorkennis verondersteld op het gebied van Civiele Techniek en meer specifiek constructiemechanica.

De begeleiding bij dit onderzoek is gegeven door dr. ir. P.C.J. Hoogenboom en dr. ir. F.P. van der Meer. Bij deze wil ik hen, en om praktische redenen met name eerstgenoemde, hartelijk bedanken voor hun tijd en adviezen.

Den Hoorn, 4 april 2016

Remko Molenaar

Samenvatting

Een hypar is een dubbelgekromde schaal, waarbij één kromming een hyperbool beschrijft, de andere kromming een parabool. De membraanwerking in deze schalen is gunstig voor de krachtsafdracht in de schaal zelf, waardoor de constructie slank kan blijven en dus efficiënt is in het materiaalgebruik. De membraanwerking treedt echter alleen in de schaal zelf op en wordt verstoord door de randbalken waar de hypar is opgelegd. Deze randverstoring veroorzaakt een vanaf de rand naar het midden van de schaal (al dan niet geheel) uitdempend moment.

In 1961 heeft ir. H.W. Loof een rapport gepubliceerd met een analytische uitwerking van deze randstoringsmomenten. Uit constructief oogpunt is wenselijk in de eerste stappen van het ontwerp van een hypar(dak) een snelle schatting van de momenten te kunnen geven. Onduidelijk is nog of de formules van ir. Loof daarvoor geschikt zijn.

Door middel van simulaties met het EEM-programma ANSYS is gekeken of de gevonden momentenverdelingen overeenkomen voor ingeklemde en scharnierend opgelegde hypars. Naar aanleiding van eerdere BSc-eindwerken zijn grenzen bepaald waarbinnen de formules van ir. Loof toepasbaar zijn, echter konden de momentenlijnen zelf niet nauwkeurig benaderd worden.

Naar nu blijkt zijn die momentenlijnen hoogstwaarschijnlijk een middeling van de door ir. Loof gevonden data. Hoewel de momentenlijnen zelf niet gereproduceerd kunnen worden, is er wel een duidelijke trend zichtbaar geworden tussen de extreme waarden van het moment en de dimensieloze parameter ξ, die de eigenschappen van de hypar beschrijft. Vooral voor vrij flauwe krommingen van de hyparschalen wordt deze trend zichtbaar, wat overeenkomt met het uitgangspunt in het rapport van ir. Loof.

Het uitzetten van de gevonden trends in grafieken voor het inklemmings- en veldmoment tegenover deze parameter ξ maakt een schatting van de maximaal optredende momenten in de hyparschaal op een eenvoudige manier mogelijk, waarbij de afwijkingen met de door ir. Loof bepaalde waarden binnen 10% lijken te blijven.

Inhoudsopgave

Lijst van figuren

Voorpagina: Miami Marine Stadium (Friends of Miami Marine Stadium, 2016)

Lijst van Symbolen

Symbool	***Eenheid***	**Beschrijving**
x	mm	coördinaat in x-richting
y	mm	coördinaat in y-richting
z	mm	coördinaat in z-richting
k_{xy}	mm^{-1}	kromming
a_{xy}	mm	kromtestraal
l_x	mm	lengte van de rand in x-richting
l_y	mm	lengte van de rand in y-richting
l	mm	lengte van de randen
t	mm	dikte van de schaal
p	N/mm^2	gelijkmatig verdeelde oppervlaktebelasting
l_c	mm	karakteristieke lengte
ξ	$-$	dimensieloze schaalparameter
m_{xx}	Nmm/mm'	moment om de y-as
E	N/mm^2	elasticiteitsmodulus
v	$-$	dwarscontractiecoëfficiënt (Poisson-factor)
nx	$-$	aantal elementen in x-richting
ny	$-$	aantal elementen in y-richting
u_x	mm	verplaatsing in x-richting
u_y	mm	verplaatsing in y-richting
u_z	mm	verplaatsing in z-richting
φ_x	rad	hoekverdraaiing om x-as
φ_y	rad	hoekverdraaiing om y-as
φ_z	rad	hoekverdraaiing om z-as
Nn	$-$	totaal aantal knopen
F_p	N	puntlast per knoop

1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt een korte inleiding gegeven over de hyparschaal, het rapport van ir. H.W. Loof en eerdere BSc-eindwerken over dit onderwerp. Vervolgens worden de onderzoeksvraag en de doelen voor dit onderzoek behandeld, waarna in de leeswijzer de structuur van dit rapport wordt toegelicht.

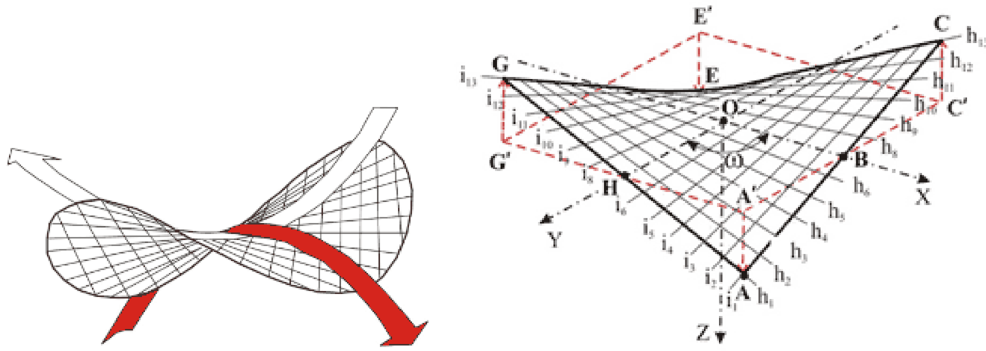
1.1 Hyparschalen

De hypar (ook wel hyppar) is een type dubbelgekromde schaal. De naam is een verwijzing naar de vorm van de schaal: het gekromde vlak beschrijft een hyperbool in één richting, een parabool in de andere richting. Hyparschalen kunnen zowel rechte als gekromde randen hebben.

Figuur 1.1 – Hypar met gekromde randen (Armstrong, 2009)

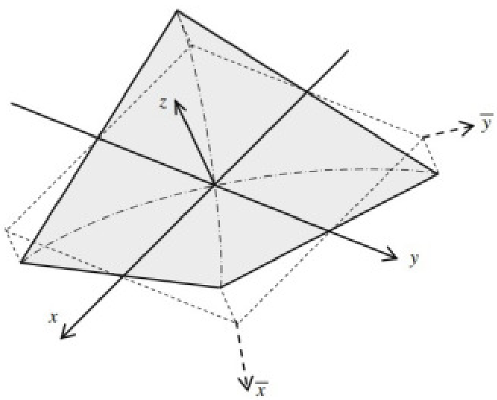
Figuur 1.2 - Hypar met rechte randen (Panek, 2010)

Ondanks het feit dat de hypar dubbelgekromd is, is het gehele oppervlak te beschrijven met loodrecht op elkaar staande rechte lijnen (zie figuur 1.3). Vanwege deze eigenschap is het bijvoorbeeld relatief eenvoudig om een bekisting te maken voor een in beton gestorte hypar.



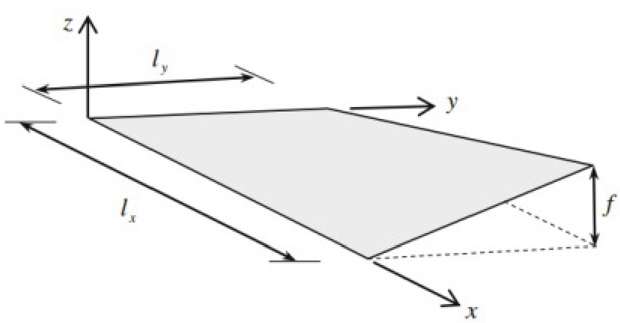
Figuur 1.3 - De hyparvorm is te beschrijven met rechte lijnen van rand tot rand (Candela, 2008)

In dit onderzoek worden alleen hypars met rechte randen beschouwd. In het model wordt het cartesisch coördinatenstelsel gebruikt. De oorsprong van dit x,y,z-assenstelsel is in het midden van de hypar gekozen. Het geprojecteerde grondvlak van de hypar ligt in het x,y-vlak. De hoogte in een willekeurig punt van de hypar wordt gegeven door de z-coördinaat volgens $z = k_{xy} \cdot x \cdot y$ waarin k_{xy} de kromming van de hyparschaal is. In dit rapport wordt vooral de kromtestraal a_{xy} genoemd, waarvoor geldt $a_{xy} = 1/k_{xy}$.



Figuur 1.4 - Hyparschaal in het gekozen x,y,z-assenstelsel (Blaauwendraad en Hoefakker, 2014)

De kromming k_{xy} is te bepalen door een denkbeeldig assenstelsel in één hoekpunt van de hypar te plaatsen, waarbij de x- en y-as samenvallen met de aan het hoekpunt grenzende randen (zie figuur 1.5). Uit de hoogte f van het overgebleven hoekpunt is nu de kromming te bepalen volgens $f = l_x \cdot l_y \cdot k_{xy} \rightarrow k_{xy} = f/(l_x \cdot l_y)$.



Figuur 1.5 - Bepaling van de kromming k_{xy}(Blaauwendraad en Hoefakker, 2014)

De geometrie van een hypar wordt gegeven door de lengtes van de randen l_x en l_y, de dikte t en de krommingsstraal a_{xy}. In dit onderzoek zijn alleen hypars beschouwd met een vierkant geprojecteerd grondoppervlak, m.a.w. $l_x = l_y$. De lengte wordt vanaf nu met slechts l aangeduid.

Schalen kunnen op basis van hun dikte worden ingedeeld in verschillende categorieën: zeer dikke schalen ($a_{xy}/t < 5$), dikke schalen ($5 < a_{xy}/t < 30$), dunne schalen ($30 < a_{xy}/t < 4000$) en membranen ($a_{xy}/t > 4000$).
Deze verdeling geeft tevens aan hoe krachten in de schalen worden opgenomen en afgedragen. In membranen komen alleen membraanspanningen voor. Bij dunnen schalen wordt de belasting door middel van membraanspanningen, schuifkrachten en momenten afgedragen. Voor dikke schalen treden membraanspanningen, dwarskrachten en momenten op. In zeer dikke schalen is geen membraanwerking aanwezig.

De membraanwerking is zeer gunstig voor de krachtsafdracht in de schaal zelf, waardoor de constructie slank kan blijven en dus efficiënt is in het materiaalgebruik.
Echter, de schaal is opgelegd op randbalken waar deze membraanwerking niet in optreedt. De schaal/het membraan wil "werken" onder invloed van de schuifkrachten/membraanspanningen, maar de stijve randbalken staan deze vervorming niet toe. Deze onderbreking in de membraanwerking heeft een randstoringsmoment als resultaat: een vanaf de rand naar het midden van de schaal (al dan niet geheel) uitdempend moment.

De maatgevende momenten treden op in de dwarsdoorsnedes in het midden van de randen. In het gekozen assenstelsel (met de oorsprong in het midden van de hypar) komt dit neer op de doorsnedes $x = 0$ en $y = 0$. In dit onderzoek worden de momenten m_{xx} in de doorsnede $y = 0$ beschouwd.

1.2 De momentenlijnen van ir. H.W. Loof

Ir. H.W. Loof heeft in 1961 een rapport gepubliceerd waarin hij een analytische oplossing heeft gepresenteerd voor de grootte van de randstoringsmomenten in een hypar. Door middel van een wiskundige benadering, gebaseerd op een differentiaalvergelijking die is gebruikt voor cylinderschalen, heeft ir. Loof het verloop van de buigingsstoring voor ingeklemde en scharnierend opgelegde hypars bepaald.

Om de krachtswerking in een willekeurige hypar te bepalen zijn vier parameters nodig. Drie parameters beschrijven de geometrie (de lengte van de randen l, de dikte t en de krommingsstraal a_{xy}) en de laatste de grootte van de belasting p. Variaties in deze parameters zijn niet in een enkele tweedimensionale grafiek te vatten. De assen voor de momentenlijnen zijn daarom dimensieloos gemaakt, waarbij een slimme keuze in de asgrootheden ervoor zorgt dat de variatie in de parameters zich laat vertalen naar twee dimensies.

Ten eerste zijn de karakteristieke lengte l_c en de dimensieloze grootheid ξ geintroduceerd:

$$l_c = \sqrt[3]{a_{xy} \cdot t \cdot l}$$

$$\xi = \frac{l_c}{l} = \sqrt[3]{\frac{a_{xy} \cdot t}{l^2}}$$

De karakteristieke lengte l_c is het meetkundig gemiddelde van de geometrieparameters, maar geeft ook de golflengte van het optredende randstoringsmoment.
Op de x-as van de momentenlijnen wordt de positie in de doorsnede (x) gedeeld door de karakteristieke lengte l_c, wat een dimensieloze grootheid oplevert:

$$\frac{x}{l_c} = \frac{\mathrm{x}}{\sqrt[3]{a_{xy} \cdot t \cdot l}}$$

Op de y-as van de momentenlijnen wordt het optredende moment m_{xx} dimensieloos gemaakt door een factor afhankelijk van de geometrie en de gelijkmatig over het oppervlak verdeelde belasting p:

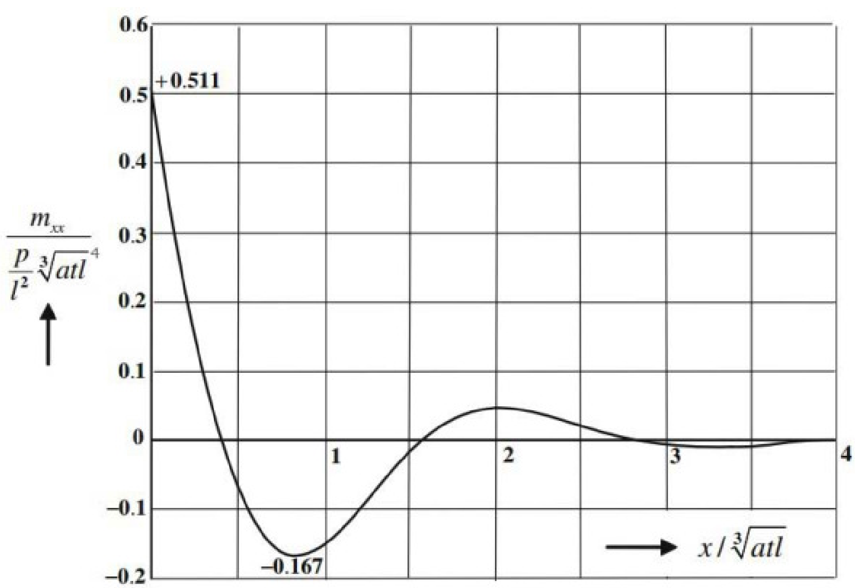
$$\frac{m_{xx}}{\frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4} = \frac{m_{xx}}{\frac{p}{l^2} \cdot \sqrt[3]{a_{xy} \cdot t \cdot l}^4} \equiv \frac{m_{xx}}{\frac{p}{\xi^4} \cdot \mathrm{l}^2}$$

De momentenlijnen laten een golfbeweging zien, die uitdempt naar het midden van de schaal (voor grotere waarden op de horizontale as).

Voor een ingeklemde hypar liggen de extreme waarden op $x = 0$ (het inklemmingsmoment) en op $x = 0.85 \cdot l_c$ (het extreme veldmoment). De grootte van deze momenten bedraagt resp.

$$m_{xx} = 0.511 \cdot \frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4 = -0511 \cdot \frac{p}{\xi^4} \cdot \mathrm{l}^2$$

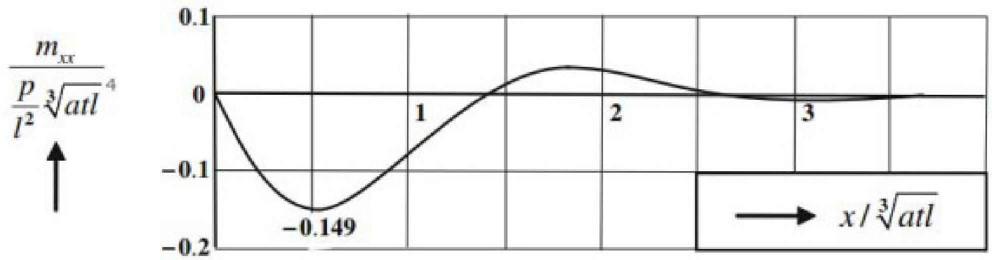
$$m_{xx} = -0.167 \cdot \frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4 = -0.167 \cdot \frac{p}{\xi^4} \cdot \mathrm{l}^2$$



Figuur 1.6 - Momentenlijn ingeklemde hypar (Loof, 1961)

De extreme waarde voor het veldmoment bij een scharnierend opgelegde hypar treedt op in het punt $x = 0.55 \cdot l_c$ en bedraagt

$$m_{xx} = -0.149 \cdot \frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4 = -0.149 \cdot \frac{p}{\xi^4} \cdot \mathrm{l}^2$$



Figuur 1.7 - Momentenlijn scharnierend opgelegde hypar (Loof, 1961)

Ir. Loof heeft in zijn rapport enkele aannames gedaan, om de wiskundige uitwerking van dit probleem mogelijk te maken. Hierbij zijn voor dit onderzoek vooral belangrijk:

- Het geldigheidsgebied beperkt zich tot flauw hellende schalen
- De verticale belasting p wordt verondersteld gelijkmatig verdeeld te zijn over het geprojecteerde grondoppervlak. Met andere woorden de belasting grijpt loodrecht naar beneden aan in het globale assenstelsel, niet loodrecht op het gekromde oppervlak van de hypar.

1.3 Eerdere BSc-eindwerken

In 2015 zijn reeds twee BSc-eindwerken geweid aan de momentenlijnen van Loof. De resultaten van deze onderzoeken zijn als startpunt gebruikt voor dit onderzoek. Hieronder worden de belangrijkste punten uit deze eindwerken besproken.

1.3.1 Nauwkeurigheid ontwerpformules voor buigende momenten in hypar-daken (Tran, 2015)

Er zijn grenzen vastgesteld waarbinnen de formules van Loof toepasbaar zijn voor initiële ontwerpberekeningen met een afwijking van -3% tot +40%. Hierbij is niet gekeken naar de locatie van de extreme waarden.

Deze grenzen zijn voor resp. ingeklemde en scharnierend opgelegde hypars:

$$0{,}23 < \xi < 0{,}56$$

$$0{,}25 < \xi < 0{,}68$$

Tevens is gekeken naar verschillende verhoudingen tussen de lengtes van l_y/l_x. Wederom voor resp. ingeklemde en scharnierend opgelegde hypars:

$$\frac{\xi}{0{,}92} < \frac{l_y}{l_x} < \frac{\xi}{0{,}11}$$

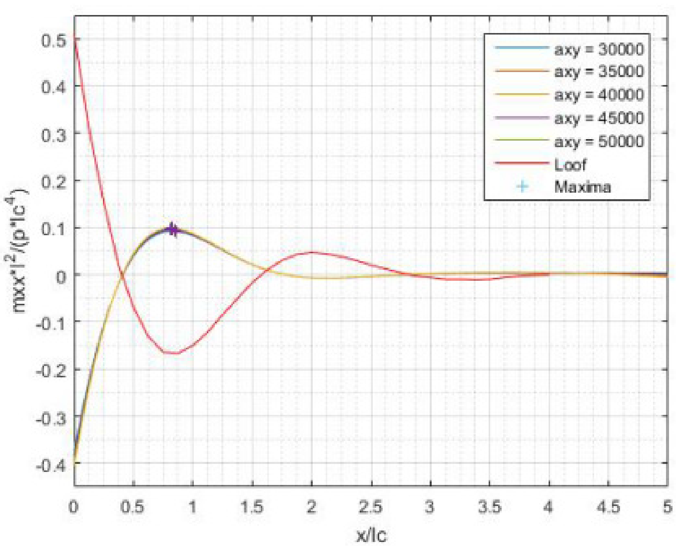
$$\frac{\xi}{1{,}4} < \frac{l_y}{l_x} < \frac{\xi}{0{,}28}$$

1.3.2 Momenten in hypparschalen - De randvoorwaarden van de momentenlijn van Loof (Hoekstra, 2015)

Hier is gekeken naar de schaalafmetingen waarbij de momentenverdeling het best de formules van Loof benaderd.

Dit blijkt vooral bij kleine dikte van de schaal het geval te zijn: $t = 5mm\ of\ t = 10mm$. De gepresenteerde resultaten en grafieken hebben nagenoeg allemaal betrekking op schalen met deze diktes. Daarnaast blijkt de beste fit met de momentenlijnen van Loof op te treden voor sterk gekromde hypars met een krommingsstraal $a_{xy} = 0.5 \cdot l$.

Over het algemeen is te zien dat voor verschillende schaalafmetingen verschillende momentenlijnen gevonden worden. Interessant is dan ook de grafiek op pagina 24, waarbij te zien is dat voor verschillende kromtestralen momentenlijnen (nagenoeg) samenvallen. Wat tevens opvalt is dat deze momentenlijnen gespiegeld zijn t.o.v. horizontale as van de momentenlijn van ir. Loof.



Figuur 1.8 - Samenvallende momentenlijnen pag. 24 (Hoekstra, 2015)

1.4 Onderzoeksvraag en doelen

Uit constructief oogpunt is het belangrijk de grootte van de randstoringsmomenten te kennen. Door middel van een gedetailleerde berekening is de grootte van deze momenten ook te bepalen. Echter, in de eerste stappen van het ontwerp van een hypar(dak) is het wenselijk een snelle eerste bepaling van de momenten te kunnen doen. Onduidelijk is nog of de formules van ir. Loof daarvoor geschikt zijn.

De onderzoeksvraag luidt dan ook:

Wat is de nauwkeurigheid en het toepassingsgebied van de formules van ir. H.W. Loof voor randstoringsmomenten in hyparschalen ten gevolge van verdeelde belasting op het oppervlak?

Daarnaast kan als subdoel gezocht worden naar een verklaring voor de opvallende grafiek uit het BSc-eindwerk van Hoekstra (2015), zie figuur 1.8. Hier zijn enkele momentenlijnen te zien die nagenoeg over elkaar heen vallen, een verschijnsel dat bij alle andere vermeldde simulaties niet leek op te treden. Tevens is hierbij opvallend dat de momentenlijnen om de horizontale as gespiegeld zijn ten opzichte van de momentenlijn van ir. Loof.

Hierbij zal het EEM-programma ANSYS gebruikt worden om simulaties uit te voeren voor verschillende hyparschalen en zo de momentenverdeling voor die schalen te bepalen.

Tenslotte was op voorhand als subdoel voor dit onderzoek gesteld om naast de theorie ook het praktische aspect mee te nemen door middel van een voorbeeldberekening voor het ontwerp van een gewapend betonnen hypardak, waarbij zowel de toepassing van de formules van Loof als het ANSYS belicht worden.
Dit aspect is echter achterwege gebleven, gezien de tijdsspanne waarin dit onderzoek uitgevoerd is.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het gebruikte ANSYS-model nader toegelicht. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de methodes doorgenomen waarmee dit model op betrouwbaarheid is gecontroleerd en waar nodig gecorrigeerd.
De resultaten van de uitgevoerde simulaties in ANSYS en de verwerkte resultaten worden in hoofdstuk 4 weergegeven, waarna in hoofdstuk de conclusies en aanbevelingen worden gepresenteerd.
Tenslotte zijn in de bijlagen de gebruikte scripts in ANSYS en Excel terug te vinden, evenals een toelichting op de wijze waarop de resultaten van de simulaties zijn verwerkt. Verder zijn in Bijlage D enkele bestaande hypardaken opgenomen.

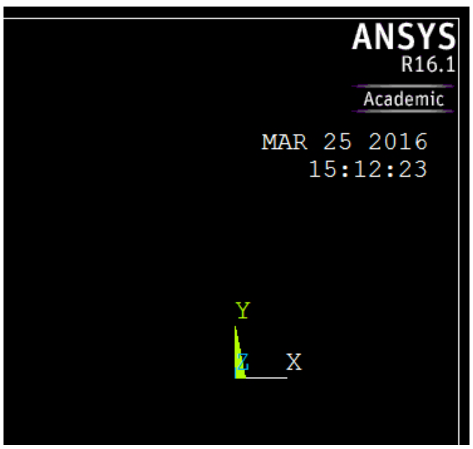
2 ANSYS-model

In dit hoofdstuk wordt de opbouw van het model toegelicht dat is gebruikt in ANSYS.
Voor het doorrekenen van hyparschalen is gebruik gemaakt van een script om dit snel en efficiënt te kunnen doen. In Bijlage A wordt uitgebreid aandacht besteed aan de werking van het script zelf.

2.1 Oriëntatie en elementen

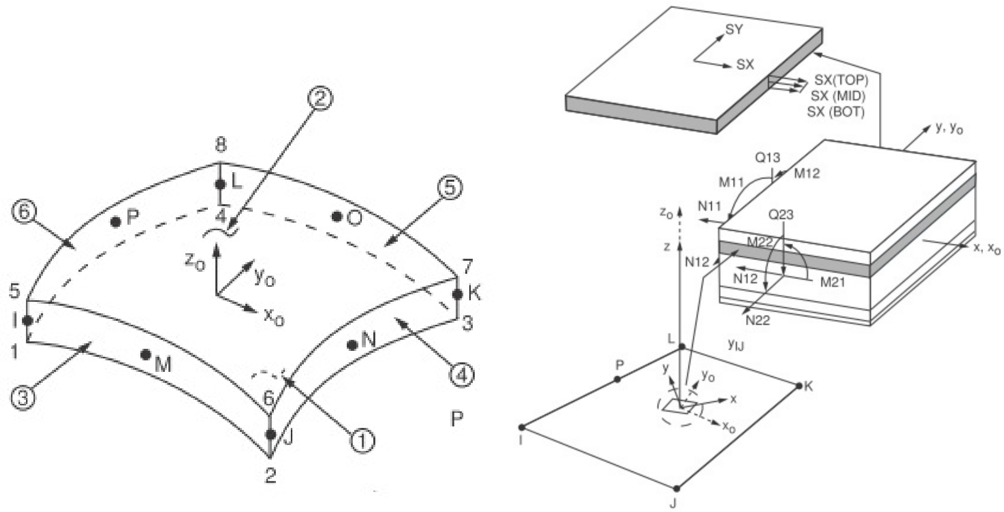
Bij het openen van ANSYS in de standaard *front view* is het assenstelsel als volgt georiënteerd (zie ook figuur 2.1):

- de y-as loopt verticaal, naar boven is positief
- de x-as loopt horizontaal, naar rechts is positief
- de z-as loopt loodrecht op het scherm, de richting "uit het scherm" is positief



Figuur 2.1 - Globaal assenstelsel in ANSYS

Er is een uitgebreide keuze in het type element waaruit het model opgebouwd kan worden. Voor dit onderzoek is het SHELL281-element gebruikt (zie ook figuur 2.2). Dit is een plaatvormig element met 8 knopen I t/m P: 4 in het midden van de hoekribben en 4 in het midden van de zijvlakken. Deze elementen zullen dusdanig worden geplaatst dat de richting van de assen van het lokale assenstelsel x_0, y_0, z_0 samenvallen met die van het globale assenstelsel.
Voor de momentenverdeling in de hypar worden de waarden voor $M11 = m_{xx}$ uitgelezen in de middendoorsnede van de schaal voor $y = 0$.



Figuur 2.2 - Het SHELL281-element: geometrie en krachtsuitvoer (ANSYS Element Reference, 2009)

2.2 Opbouw

De opbouw van een hyparschaal in het model is in een aantal stappen te beschrijven.

2.2.1 Vastleggen van de eigenschappen van de hypar

Hierbij gaat het in eerste instantie om de afmetingen: de lengte van de randen in x- en y-richting (l), de dikte van de schaal t en de kromtestraal a_{xy}. Hiermee ligt de geometrie van de schaal vast.

Vervolgens wordt het aantal elementen in x- en y-richting gekozen, door de lengtes op te delen in een aantal stukken nx en ny. Hiermee liggen ook de afmetingen van de elementen vast: de dikte is t, de lengte in resp. x- en y-richting l_x/nx en l_y/ny.

Als materiaaleigenschappen zijn in dit onderzoek een E-modulus van $E = 10^4\ N/mm^2$ gebruikt en een Poisson-factor $\upsilon = 0$.

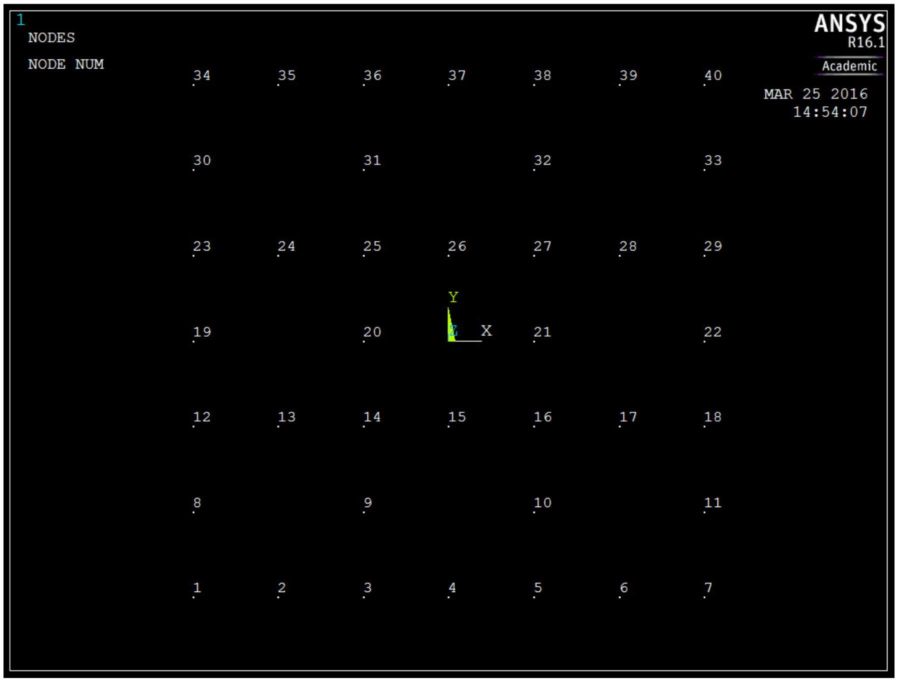
Tenslotte wordt een gelijkmatig over het oppervlak verdeelde belasting aangebracht: $p = -0.001 N/mm^2$. De belasting p is negatief vanwege de oriëntatie van de z-as en wordt aangenomen loodrecht naar beneden te werken in het globale assenstelsel. De belasting staat dus niet loodrecht op het oppervlak van de hyparschaal.

2.2.2 Plaatsen van de knopen en creëren van de elementen

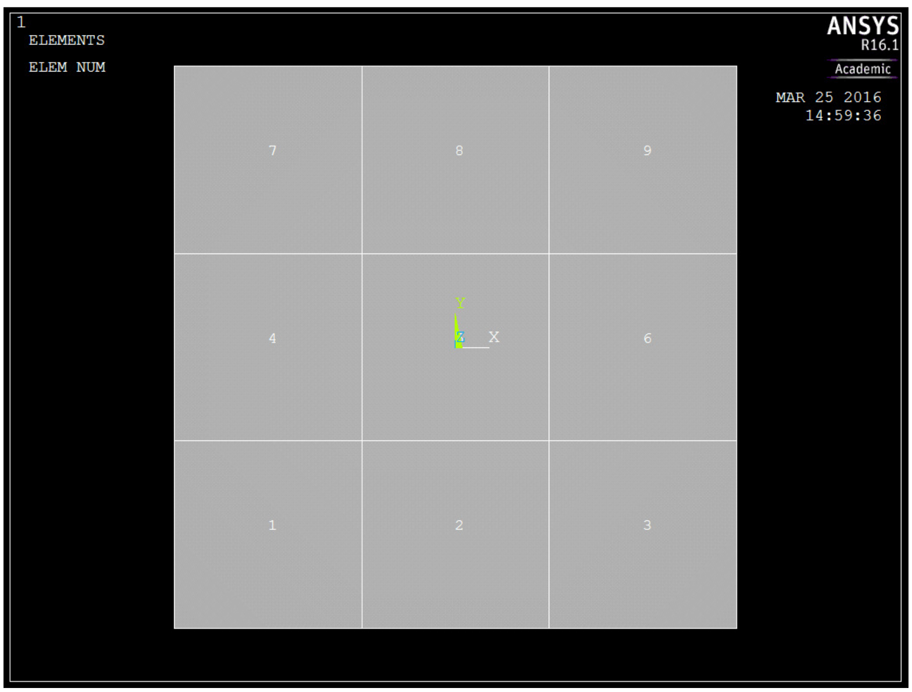
Op basis van de geometrie van de hypar en het aantal elementen liggen de posities van de knopen in het assenstelsel vast en kunnen deze in ANSYS geplaatst worden.

De knopen worden in rijen geplaatst van $x = -0.5 \cdot l_x$ tot $x = +0.5 \cdot l_x$, beginnend bij $y = -0.5 \cdot l_y$ en oplopend naar $y = +0.5 \cdot l_y$. Zie figuur 9 voor een voorbeeld met $nx = ny = 3$.

De elementen kunnen vervolgens gecreëerd worden door voor elk element de knopen I t/m P te selecteren (zie ook figuur 8). De elementen worden in dezelfde volgorde gecreëerd als de knopen geplaatst zijn. In figuur 10 zijn de elementen voor het voorbeeld met $nx = ny = 3$ te zien.



Figuur 2.3 - Plaatsing knopen voor $nx = ny = 3$



Figuur 2.4 - Plaatsing elementen bij $nx = ny = 3$

De relevante momenten worden in ANSYS in het midden van de elementen afgelezen. Het is dan ook belangrijk om te zorgen dat nx en ny oneven zijn, zodat de doorsneden $x = 0$ en $y = 0$ precies door het midden van een rij elementen lopen.

Voor dit onderzoek is de door de TU Delft beschikbaar gestelde versie van ANSYS gebruikt, met de daarbij aangeboden licentie (*ANSYS Academic teaching Introductory)*. Deze licentie kent een begrenzing op het maximaal aantal te gebruiken knopen of elementen van 32000.

Aangezien voor dit onderzoek het 8-knoops SHELL281-element is gebruikt, is het aantal knopen hier de bepalende factor. In principe zijn hierdoor geen grote problemen met betrekking tot de nauwkeurigheid van de resultaten uit de simulaties te verwachten geweest. Echter, het betekent wel dat de configuratie van de elementen enigszins beperkt is.

Er zijn andere elementtypen voorhanden met bijvoorbeeld 4 knopen in plaats van 8. Alhoewel dit in eerste instantie een goede keus lijkt met het oog op de begrenzing van de licentie, wordt de voorkeur gegeven aan een element met zoveel mogelijk knopen. Dit blijkt namelijk zowel de benodigde rekentijd als de behaalde nauwkeurigheid ten goede te komen, vergeleken met elementtypen met minder knopen.

2.2.3 Definitie van de randvoorwaarden en de belasting

Nu de hyparschaal in ANSYS is geplaatst, dienen de opleggingen op de randbalken gemodelleerd te worden. Er zijn randvoorwaarden voor de hypar opgesteld, waarbij twee situaties worden bekeken: een scharnierend opgelegde hypar en een ingeklemde hypar.

Aangenomen wordt dat de randbalken waarop de hypar is opgelegd rechtop staan in z-richting en niet loodrecht op het oppervlak van de hypar zijn geplaatst. Dit betekent dat de opleggingen zelf horizontaal gedacht kunnen worden in de x- en y-richting.

Voor beide situaties wordt vastgelegd dat de opleggingen in z-richting niet kunnen verplaatsen, m.a.w.: $u_z = 0$.
Daarnaast wordt ook bepaald dat translaties van de gehele constructie niet voor kunnen komen. Dit betekent voor de opleggingen evenwijdig aan de x-as dat $u_x = 0$ en voor opleggingen evenwijdig aan de y-as geldt $u_y = 0$.
Horizontale verplaatsingen loodrecht op de assen worden wel toegestaan, dus u_x en u_y zijn vrij voor opleggingen evenwijdig aan resp. de y-as en de x-as.

Bij de toegestane rotaties wordt wel een onderscheid gemaakt tussen een ingeklemde en een scharnierende oplegging. Bij een scharnier worden alle rotaties $\varphi_{x,}$, φ_y, φ_z vrij gelaten.
Voor een inklemming kan φ_z vrijgelaten worden, aangezien verplaatsingen loodrecht op de x- en y-as zijn toegestaan. Er is bepaald dat $u_z = 0$, waarmee voor een oplegging evenwijdig aan de x-as de rotatie φ_y impliciet al is verhinderd (en vice versa). Deze rotaties worden daarom ook vrijgelaten.

De randbalken bij een inklemming zijn torsiestijf, maar kunnen mogelijk wel “uitknikken” vanwege de toegestane horizontale verplaatsing loodrecht op de as. Dit betekent voor een oplegging evenwijdig aan de x-as dat $\varphi_x = 0$ en $\varphi_y = vrij$ en vice versa voor een oplegging evenwijdig aan de y-as.

Tabel 2.1 geeft het overzicht van de randvoorwaarden.

Tabel 2.1 - Randvoorwaarden

evenwijdig aan	*x-as*	*y-as*	*x-as*	*y-as*
randvoorwaarde	**Scharnier**		**Inklemming**	
u_x	0	vrij	0	vrij
u_y	vrij	0	vrij	0
u_z	0	0	0	0
φ_x	vrij	vrij	0	vrij
φ_y	vrij	vrij	vrij	0
φ_z	vrij	vrij	vrij	vrij

Als laatste wordt de belasting op de knopen aangebracht. De verdeelde belasting p wordt gemodelleerd door deze gelijkmatig als puntlasten over alle knopen te verdelen.

Het aantal knopen is te bepalen volgens $N_n = 3 + 5 \cdot nx + (ny - 1) \cdot (2 + 3 \cdot nx)$.

Hieruit volgt voor de puntlast per knoop:

$$F_p = \frac{p \cdot l_x \cdot l_y}{N_n}$$

3 Validatie

Het model en de bijbehorende scripts zijn op enkele manieren gecontroleerd op hun betrouwbaarheid. In dit hoofdstuk wordt eerst kort aandacht aan de scripts besteed. Wat betreft het model is gekeken naar de invloed van de gekozen elementgrootte, de gestelde randvoorwaarden en er is een toetsing geweest op een vlakke plaat.

3.1 Scripts

Een bestaand ANSYS-script is als uitgangspunt gebruikt voor het uitvoeren van de simulaties in ANSYS. De eerst uitgevoerde validatie is doorgronding en controle van dat script. In grote lijnen werkte dit script correct, waar nodig zijn enkele aanpassingen gedaan. De werking van het script wordt uitgebreid beschreven in Bijlage A.
Voor de verwerking van de resultaten is een Excel VBA-script gebruikt. Ook dit script is gecontroleerd om te zien of de ANSYS-uitvoer correct in Excel is geïmporteerd en verwerkt. Er is in dit rapport voor gekozen weinig aandacht te besteden aan toelichting op dit script, aangezien bij dit onderzoek vooral ANSYS centraal staat, niet Excel Visual Basic (VBA).

3.2 Elementgrootte

Het aantal elementen in het model heeft invloed op de resultaten die uitgelezen worden. Om deze invloed te kwantificeren zijn enkele runs uitgevoerd met een verschillend aantal elementen nx en ny. Hieronder is een vergelijking weergegeven van de resultaten voor een ingeklemde en scharnierend opgelegde hypar, welke met verschillende elementconfiguraties is doorgerekend met ANSYS.

In het algemeen wordt de nauwkeurigheid van het model beter naarmate de elementgrootte verkleind wordt (m.a.w. bij toenemende nx en ny). Het uitgelezen moment bij toenemende nauwkeurigheid van het model nadert een "eindwaarde" $m_{xx,\infty}$ voor het theoretische limietgeval waarbij gebruik wordt gemaakt van een oneindig aantal elementen. Dit moment $m_{xx,\infty}$ wordt beschouwd als zijnde de werkelijke momentwaarde die in het model optreedt. Het is logischerwijs niet mogelijk een model op te stellen met een oneindig aantal elementen. Om $m_{xx,\infty}$ toch te kunnen benaderen kan een vuistregel gebruikt worden.
Er worden twee simulaties gedaan, waarbij de elementgrootte bij de tweede simulatie gehalveerd wordt vergeleken met de eerste run. Er geldt dus $nx_2 = 2 \cdot nx_1$ en $ny_2 = 2 \cdot ny_1$. De vuistregel die gebruikt kan worden stelt nu het volgende: het verschil in de uitgelezen waardes voor deze twee simulaties is gelijk aan het verschil tussen de uitgelezen waarde in de tweede simulatie en de "eindwaarde", oftewel:

$$m_{xx,2} - m_{xx,1} = m_{xx,\infty} - m_{xx,2}$$

Voor de eerste simulatie is gebruikt $nx_1 = ny_1 = 111$ en voor de tweede simulatie $nx_2 = ny_2 = 221$. Er is hier opzettelijk niet voor $nx_2 = ny_2 = 222$ gekozen, aangezien bij een even aantal elementen de momenten niet precies in het midden van de hypar afgelezen kunnen worden.

Deze twee simulaties zijn op een andere versie van ANSYS gedraaid, in verband met de eerder beschreven licentiebeperkingen. Omwille van de beschikbaarheid en de rekentijd is er voor gekozen voor de rest van dit onderzoek wel de TU Delft-versie van ANSYS te blijven gebruiken.

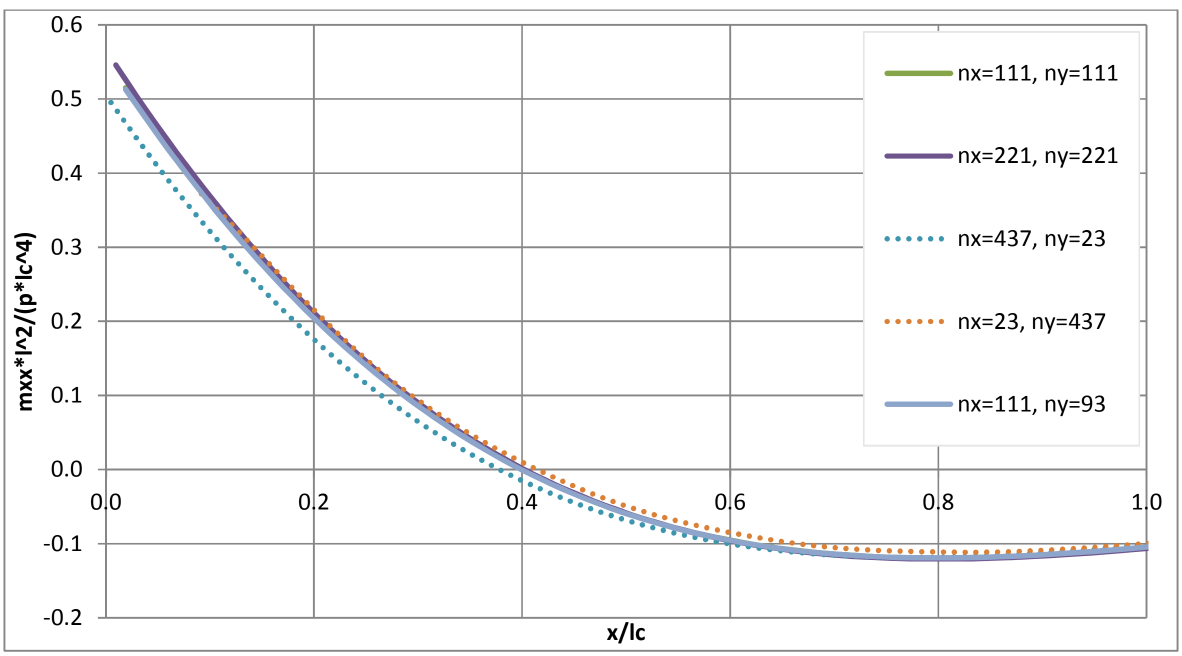
In navolging van het onderzoek van Hoekstra (2015) zijn tevens simulaties uitgevoerd waarbij geldt $nx >> ny$. Het is niet noodzakelijk dat de lengte en breedte van het element (ongeveer) gelijk zijn. Zo kunnen er zonder problemen verhoudingen groter dan 20:1 gebruikt worden, zonder dat dit de bepaling van de krachtswerking in de elementen noemenswaardig beïnvloedt. Aangezien er gekeken kan worden naar de momentenverdeling in slechts één richting, lijkt het ook logisch het aantal elementen in die richting een stuk groter te kiezen. Hier is een configuratie gekozen van $nx = 437$, $ny = 23$. Ook het omgekeerde geval met $nx = 23,$; $ny = 437$ is meegenomen. Tenslotte is nog een configuratie bekeken van $nx = 111, ny = 93$, welke binnen de TU-licentie van ANSYS bruikbaar is.

Onderstaande simulaties zijn uitgevoerd voor een hypar waarvoor geldt: $l = 15000\ mm, t = 40\ mm, a_{xy} = 75000\ mm$.

3.2.1 Inklemming

In figuur 3.1 is te zien dat de gevonden momentenlijnen elkaar grotendeels overlappen, met uitzondering van de gestippelde lijnen waarbij geldt $nx = 23$ of $ny = 23$. Geconcludeerd kan worden dat de gevonden waarde voor het inklemmingsmoment gevoelig is voor een te klein aantal elementen in y-richting. Tevens blijkt het maximum veldmoment gevoelig voor een te klein aantal elementen in x-richting.

Voor de gevallen waar $nx \approx ny$ vallen de momentenlijnen goed over elkaar heen.



Figuur 3.1 - Uitvergroting momentenlijnen bij variatie in aantal elementen (inklemming)

In tabel 3.1 zijn de inklemmings- en extreme veldmomenten weergegeven. De waarde voor $m_{xx,\infty}$, bepaald zoals hiervoor beschreven, is geel gemarkeerd. Voor elke simulatie is de procentuele afwijking bepaald met $m_{xx,\infty}$, ten opzichte van de gevonden waarde.

Tabel 3.1 - Extreme waarden moment bij variatie aantal elementen (inklemming)

ny	nx	$m(inkl)$	afwijking	$m(veld)$	afwijking
111	111	0.51521	-11.91%	-0.11919	-2.38%
221	221	0.54588	-5.62%	-0.12061	-1.18%
$m_{xx,2} - m_{xx,1}$		0.03067		-0.00142	
$m_{xx,\infty}$		**0.57656**		**-0.12203**	
ny	nx	$m(inkl)$	afwijking	$m(veld)$	afwijking
93	111	0.51286	-12.42%	-0.11909	-2.47%
23	437	0.49531	-16.40%	-0.11864	-2.86%
437	23	0.37200	-54.99%	-0.11153	-9.42%

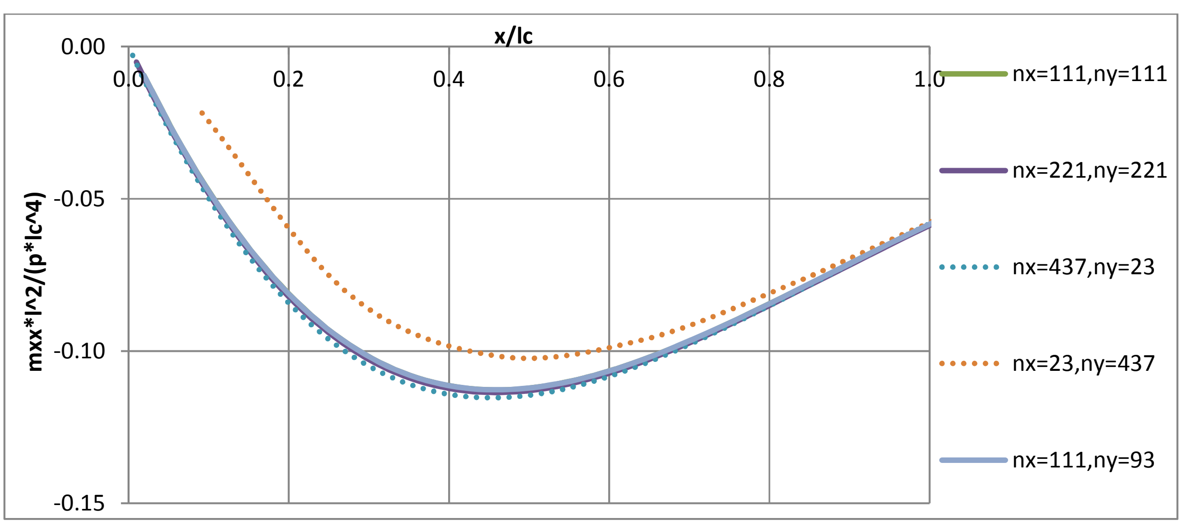
Vanwege de afwijking in de gevonden momenten bij configuraties waarvoor geldt $nx >> ny$ of $ny >> nx$ worden deze als te onnauwkeurig beschouwd en niet verder gebruikt.

Voor het vervolg van dit onderzoek is gekozen voor simulaties waarbij geldt $nx = 111, ny = 93$. In de analyse van de resultaten uit dit model zullen de extreme momentwaarden gecorrigeerd worden op basis van de afwijkingen in tabel 3.1:
- het inklemmingsmoment wordt gecorrigeerd met een factor 1,13
- het extreme veldmoment wordt gecorrigeerd met een factor 1,03

3.2.2 Scharnierend opgelegd

Op analoge wijze is een vergelijking gedaan voor een scharnierend opgelegde hypar.

Ook hier is een afwijking te zien in het gevonden veldmoment in de gevallen waar $ny >> nx$ en vooral wanneer $nx >> ny$, met name voor het geval waarbij $nx = 23$.



Figuur 3.2 - Uitvergroting momentenlijnen bij variatie in aantal elementen (scharnier)

Tabel 3.2 - Extreme waarde veldmoment bij variatie aantal elementen (scharnier)

ny	nx	$m(veld)$	afwijking
111	111	-0.11268	-1.57%
221	221	-0.11357	-0.78%
		-0.00089	
		-0.11445	
ny	nx	$m(veld)$	afwijking
93	111	-0.11264	-1.61%
23	437	-0.11534	0.77%
437	23	-0.10159	-12.66%

Op basis van deze resultaten wordt ook voor de scharnierende oplegging gekozen verder te werken met een configuratie van $nx = 111, ny = 93$.

In de analyse van de resultaten zal de extreme waarde van het veldmoment gecorrigeerd worden met een factor 1,02.

3.3 Randvoorwaarden

In paragraaf 0 zijn de in het model gebruikte randvoorwaarden beschreven. Door middel van een toevoeging aan het ANSYS-script zijn de verplaatsingen en rotaties van de knopen aan de randen van de hypar naar een uitvoerbestand weggeschreven. Zo kan eenvoudig gecontroleerd worden of de gestelde randvoorwaarden correct in het model zijn opgenomen.

Dit is gedaan voor twee verschillende hypars:

- Schaal 1: $l = 10000\ mm, t = 77\ mm,\ a_{xy} = 32000\ mm$
- Schaal 2: $l = 32000\ mm, t = 7\ mm, a_{xy} = 32000\ mm$

Beide zijn vervolgens zowel ingeklemd als scharnierend opgelegd. In tabel 2 is voor enkele willekeurige knopen de uitvoer opgenomen (“// aan” betekent evenwijdig aan).

Tabel 3.3 - Verplaatsingen en rotaties randknopen

oplegging	// aan		u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
scharnier	x-as	Schaal 1	0	0.029487	0	-0.0003	6.85E-06	3.13E-05
		Schaal 2	0	2.021358	0	0.01122	-5.6E-05	-0.00585
	y-as	Schaal 1	-0.01861	0	0	2.49E-06	-0.00058	-5.8E-05
		Schaal 2	0.829106	0	0	1.37E-05	0.00404	0.002625
inklemming	x-as	Schaal 1	0	0.014111	0	0	-3.6E-06	-7.2E-06
		Schaal 2	0	1.185491	0	0	-0.00016	-0.00069
	y-as	Schaal 1	-0.02459	0	0	1.79E-05	0	-0.00043
		Schaal 2	-0.13841	0	0	-1.1E-05	0	0.000877

Hierin is te zien dat de gevonden nulwaarden voor de verplaatsingen overeenkomen met de gestelde randvoorwaarden, voor zowel de scharnieroplegging als de inklemming.

Bij de inklemming zijn de rotaties om de evenwijdige as nul zoals voorgeschreven, rotaties om de z-as zijn vrijgelaten. Wat hier echter opvalt zijn de grijs gemarkeerde rotaties: vanwege het feit dat $u_z = 0$ zouden deze ook gelijk aan nul moeten zijn.
Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de rand van de hypar tussen de knopen een kleine golvende vervorming vertoont. De optredende rotaties zijn überhaupt al klein en de gemarkeerde rotaties zijn (soms flink) kleiner dan die om de z-as.

Om het effect hiervan te bekijken is ter controle voor beide ingeklemde schalen een simulatie gedaan waarbij is voorgeschreven dat $\varphi_y = 0$.

In tabel 3 zijn de extreme waarden van het moment opgenomen voor beide situaties. De gevonden veldmomenten zijn nagenoeg gelijk, voor het inklemmingsmoment is een afwijking van resp. 0.38% en 0.73% gevonden.

Tabel 3.4 - Extreme waarden momenten bij variatie randvoorwaarde φ_y

	randvoorwaarde	$m(inkl)$	$m(veld)$
schaal 1	$\varphi_y = vrij$	0.580348	-0.11735
	$\varphi_y = 0$	0.578142	-0.11729
schaal 2	$\varphi_y = vrij$	0.114701	-0.04884
	$\varphi_y = 0$	0.115539	-0.04884

Constructief gezien zijn deze verschillen te verwaarlozen, echter vanuit analytisch oogpunt is een afwijking van ca. 1% opvallend. Desondanks is er voor gekozen de randvoorwaarden aan te houden zoals eerder in paragraaf 2.2.3 beschreven. Niet alleen vanwege de relatief kleine afwijking in de vonden momentwaarden, maar ook vanwege de mogelijke onnauwkeurigheid van het huidige model: het aantal elementen is vanwege de gebruikte ANSYS-licentie begrensd op $nx = 111, ny = 93$. Bij een verfijning van het grid met grotere waarden voor nx en ny wordt de afstand tussen de knopen kleiner, waarmee verwacht kan worden dat de golvende vervorming en de daarmee gepaard gaande rotaties meer worden verhinderd en dus zullen afnemen.

3.4 Vlakke plaat

In het limietgeval waarbij de kromtestraal a_{xy} oneindig groot is en de kromming $k_{xy} = 0$, is er sprake van een vlakke plaat. Een laatste validatie die is uitgevoerd is een controle op de momentwaarden voor dit geval. Voor vlakke platen is de momentenverdeling namelijk bekend.

Op basis van tabel 18 van NEN6720 (1e druk september 1991) gelden de volgende extreme waarden in de middenstrook van de schaal voor het geval l_x/l_y=1:

- inklemmingsmoment $m_{sx;i} = 0.051 \cdot p \cdot l^2$
- veldmoment (inklemming) $m_{vx;i} = -0.018 \cdot p \cdot l^2$
- veldmoment (scharnier) $m_{vx;s} = -0.041 \cdot p \cdot l^2$

Er zijn verschillende simulaties uitgevoerd voor drie verschillende lengtes en 4 verschillende diktes van de schaal. In tabel 3.5 zijn de resultaten weergegeven van deze simulaties. Het theoretische moment volgens NEN6720 wordt vergeleken met de via ANSYS gevonden waarde en de procentuele afwijking tussen beide is gegeven.

Tabel 3.5 - Vergelijking momentwaarden met vlakke plaat

		inklemming						*scharnier*		
l	t	$m_{sx;i}$	$m(inkl)$	**afwijking**	$m_{vx;i}$	$m(veld)$	**afwijking**	$m_{vx;s}$	$m(veld)$	**afwijking**
5000	40	1275	1376.55	7.38%	-450	-447.772	-0.50%	-1025	-933.82	-9.76%
	75	1275	1376.4	7.37%	-450	-447.865	-0.48%	-1025	-939.899	-9.05%
	500	1275	1365.53	6.63%	-450	-453.128	0.69%	-1025	-1016.8	-0.81%
	1000	1275	1335.3	4.52%	-450	-463.376	2.89%	-1025	-1103.49	7.11%
30000	40	45900	49557.9	7.38%	-16200	-16118.3	-0.51%	-36900	-33411.3	-10.44%
	75	45900	49557.8	7.38%	-16200	-16118.4	-0.51%	-36900	-33447.2	-10.32%
	500	45900	49548.5	7.36%	-16200	-16124.4	-0.47%	-36900	-33889	-8.88%
	1000	45900	49519.1	7.31%	-16200	-16142.4	-0.36%	-36900	-34420.3	-7.20%
55000	40	154275	166570	7.38%	-54450	-54175.5	-0.51%	-124025	-112237	-10.50%
	75	154275	166570	7.38%	-54450	-54175.6	-0.51%	-124025	-112302	-10.44%
	500	154275	166560	7.38%	-54450	-54181.5	-0.50%	-124025	-113106	-9.65%
	1000	154275	166532	7.36%	-54450	-54199.8	-0.46%	-124025	-114065	-8.73%

Te zien is dat het via ANSYS gevonden inklemmingsmoment maximaal 7,38% groter is dan de theoretische waarde. Bij toenemende dikte van de plaat wordt deze afwijking kleiner. Dit effect neemt echter af bij toenemende lengte van de randen, waaruit geconcludeerd kan worden dat de factor l/t hierbij bepalend is: des te kleiner deze factor, des te kleiner de gevonden afwijking. Voor deze simulatie is de kleinste afwijking te vinden voor $l = 5000\ mm, t = 1000\ mm\ (l/t = 5)$. Opvallend is dat ruwweg voor l/t> 100 geen verschillen in de afwijking optreden: deze blijft 7,38%.

Het veldmoment bij een inklemming laat een veel kleinere afwijking zien, over het algemeen is de gevonden waarde ca. 0,50% kleiner dan de theoretische. Bij afnemende waarde van l/t wordt de afwijking zelfs nog iets kleiner, tot een omslagpunt voor ca. $l/t < 20$: de gevonden waarde voor het veldmoment wordt nu iets groter dan de theoretische waarde. Zie de afwijking voor $l = 5000\ mm$ en $t = 500\ \&\ 1000\ mm$.

De afwijkingen voor het veldmoment bij een scharnierende oplegging zijn een orde groter: ca. 10%. Wel is dezelfde trend te herkennen: een afnemende waarde van l/t laat een kleinere afwijking zien. Voor ca. $l/t < 20$ treedt weer een omslag op, waarbij de gevonden momentwaarde groter wordt dan de theoretische waarde.

Terugkijkend naar de genoemde classicifactie van schalen in paragraaf 1.1 kan gezegd worden dat voor dunne schalen de gevonden afwijking met de NEN-norm nagenoeg constant blijft. Wanneer het gebied van de dikke of zeer dikke schalen wordt bereikt, waar de membraanwerking sterk afneemt, treedt er een verandering op in de afwijking.

Op basis van de resultaten is te zien dat de met het model gevonden extreme waarden voor het inklemmingsmoment en het veldmoment bij scharnierende oplegging niet overeenkomen met de theoretische waarde. Het veldmoment bij inklemming is bij benadering wel gelijk aan de theoretische waarde.
Het is echter moeilijk hier een conclusie aan te verbinden. Het is niet duidelijk op welke wijze de coëfficiënten in NEN6720, die gelden voor een volledige inklemming of een vrije oplegging, bepaald zijn. Er kan dan ook niet met zekerheid gezegd worden of de gevonden afwijkingen zijn veroorzaakt door een verschil in de gebruikte randvoorwaarden. Of dat dit toe te schrijven is aan onnauwkeurigheden in het hier gebruikte model, in de wijze waarop de normcoëfficiënten zijn bepaald, of wellicht beide.
Er is dan ook gekozen om naar aanleiding van deze validatie geen correcties op de ANSYS-uitvoer toe te passen en slechts te benadrukken dat de resultaten uit het model een afwijking vertonen met de theorie voor het geval van een vlakke plaat.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden van een aantal relevante simulaties de resultaten getoond. Het momentenverloop in de middendoorsnede van de hypar voor $y = 0$ is symmetrisch rondom het punt $x = 0$. Om deze reden zijn de momentenlijnen slechts voor de helft afgebeeld over het gebied $-0.5 \cdot l \leq x \leq 0$.

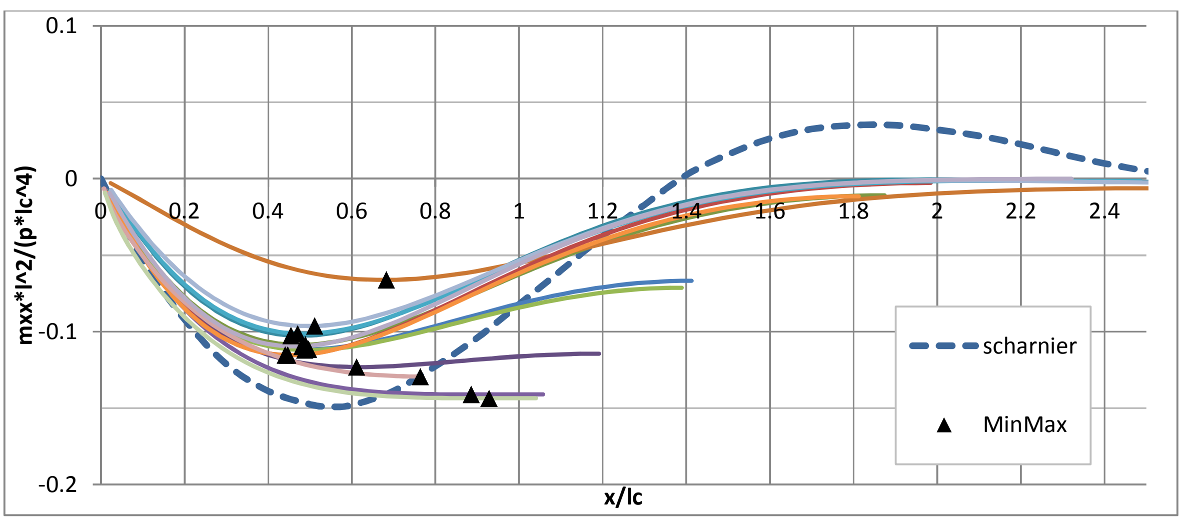
Om de analogie met de momentenlijnen van ir. Loof te behouden, is ervoor gekozen op de horizontale as de waarde $(x + 0.5 \cdot l)/l_c$ uit te zetten, zodat deze alleen positieve waarden laat zien, beginnend bij nul.

In de momentenlijnen zijn de waarden afgebeeld zoals deze uit ANSYS zijn geëxporteerd. De correctiefactoren op de extreme waarden, zoals besproken in paragraaf 3.2, zijn niet verwerkt in de momentenlijnen. Aangezien de extreme waarden gemarkeerd zijn, werkt het verwarrend wanneer deze punten buiten de momentenlijnen lijken te vallen.

De manier waarop de ANSYS-uitvoer is opgeslagen en verwerkt in Excel wordt in bijlage C verder toegelicht. Meer informatie over de gebruikte scripts is te vinden in bijlagen A en B.

4.1 Benadering momentenlijnen van Loof

In figuur 4.1 zijn voor een aantal scharnierend opgelegde hypars de momentenlijnen afgebeeld. Gestippeld is de momentenlijn van ir. Loof weergegeven, de extreme waarden van het veldmoment zijn gemarkeerd.

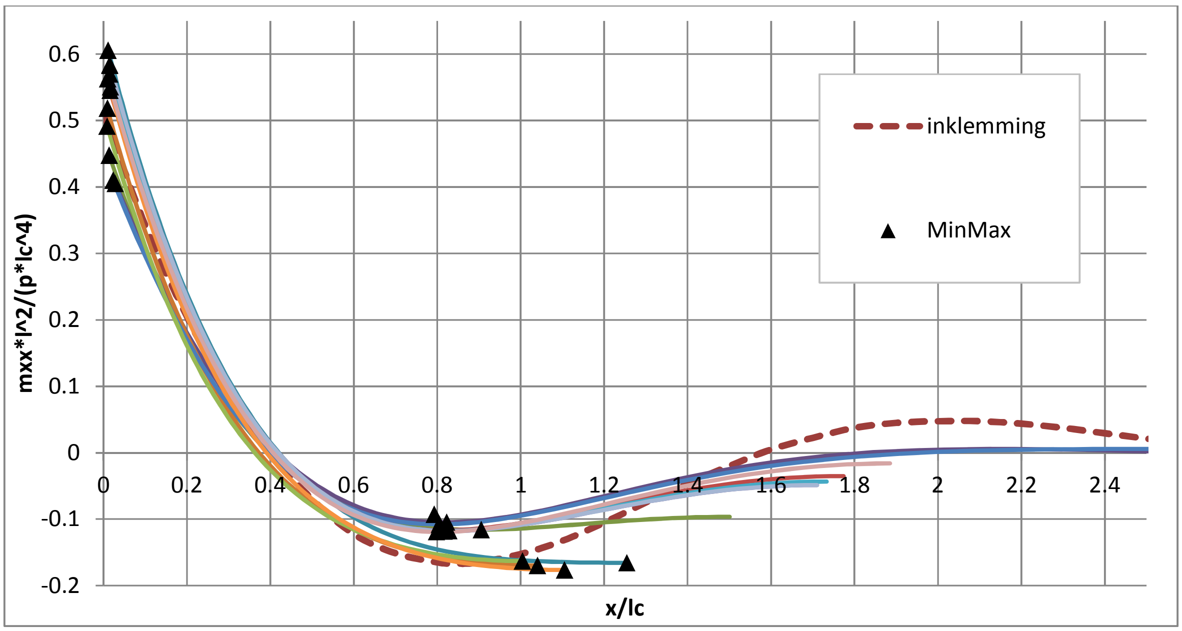


Figuur 4.1 - Momentenlijnen voor verschillende hypars (scharnierend opgelegd)

Er is een grote spreiding zichtbaar tussen de momentenlijnen onderling, zowel wat betreft de vorm en lengte als de grootte en de locatie van de extreme waarde.

Het eindpunt van elke momentenlijn correspondeert met het punt $x = 0$ in de doorsnede van de hypar en daarmee het punt $(0 + 0.5 \cdot l)/l_c = 0.5 \cdot l/l_c = 0.5/\xi$ op de horizontale as. Hoe lager de waarde ξ voor een hypar, hoe langer de momentenlijn in deze grafiek door zal lopen.

Voor hogere waarden van ξ is de momentenlijn korter en is te zien dat het moment niet richting nul uitdempt.
De extreme waarde volgens de momentenlijn van ir. Loof ligt op $x/l_c = 0.55$, echter er is te zien dat het merendeel van de extreme waarden iets verder naar links ligt en rondom $x/l_c = 0.5$ is geconcentreerd.



Figuur 4.2 - Momentenlijnen voor verschillende hypars (ingeklemd)

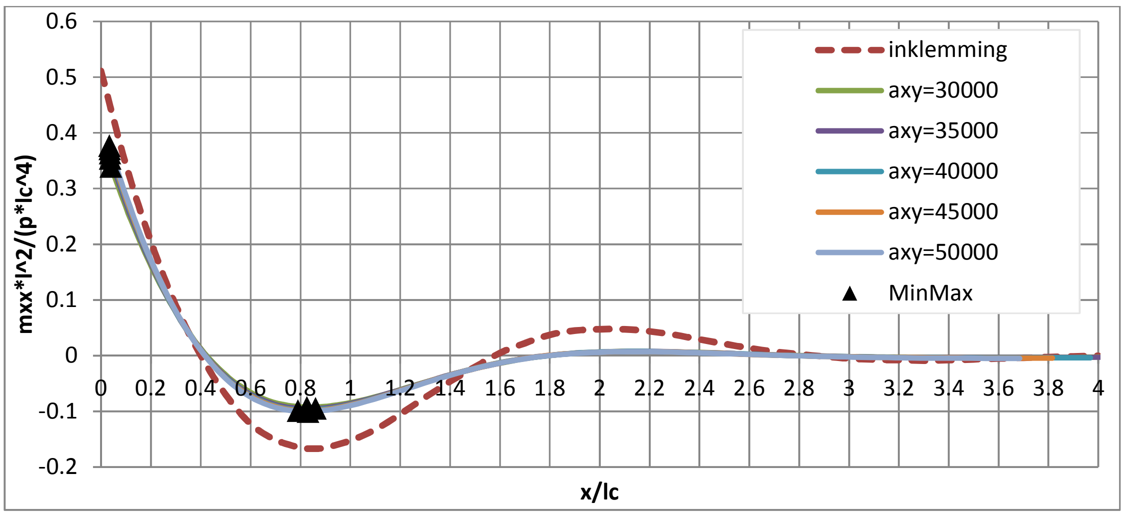
Een soortgelijke trend is zien voor ingeklemde hypars. Afhankelijk van de waarde van ξ is de momentenlijn langer of korter. Er is wederom een spreiding te zien in de locatie en de grootte van de extreme waarden (het inklemmingsmoment en het maximale veldmoment).
Volgens ir. Loof is $x/l_c = 0.85$ de locatie van het veldextreem. Hier is te zien dat, zoals bij de scharnierend opgelegde hypars, dit extreem iets verder naar links op de as rondom $x/l_c = 0.8$ is geconcentreerd. Er is tevens een behoorlijke spreiding in de grootte van het inklemmingsmoment te constateren, in dit geval ca. 10% onder en boven de waarde van 0.511 zoals bepaald door ir. Loof.

4.2 Resultaten met betrekking tot het BSc-eindwerk van Hoekstra (2015)

In bovenstaande figuren is te zien dat geen van de momentenlijnen samenvalt met die van Loof. Zoals eerder al onderzocht door Hoekstra blijkt het ook niet mogelijk de momentenlijnen van Loof exact te benaderen. De beste fit is daar gevonden voor zeer dunne schalen met een sterke kromming ($t = 5$ à$10\ mm$, $a_{xy} = 0.5 \cdot l$, $\xi \approx 0.079$).

Deze zijn vanwege de kromming niet representatief voor hypars in een dakconstructie en qua dikte al helemaal niet wanneer voor uitvoering in beton wordt gekozen. Het is des te opvallender dat de beste fit bij een sterke kromming wordt gevonden, aangezien ir. Loof in zijn rapport juist is uitgegaan van hypars met flauwe hellingen.

Zoals in hoofdstuk 1 vermeld is tevens gekeken naar de samenvallende momentenlijnen uit dat onderzoek.
Naast het feit dat de lijnen samenvallen, viel op dat deze om de horizontale as gespiegeld waren ten opzichte van de momentenlijn van ir. Loof. Dit bleek veroorzaakt doordat het lokale assenstelsel van de elementen in dat model niet overeen kwam met het globale assenstelsel van de gehele schaal.
Dit is in het ANSYS-script gecorrigeerd, waarna de resultaten zijn gereproduceerd met dezelfde parameters ($l = 10000\ mm\ , t = 5\ mm\ , a_{xy} = 30000 - 50000\ mm$). Er is nu te zien dat alle momentenlijnen dezelfde oriëntatie hebben en wederom nagenoeg over elkaar heen vallen.



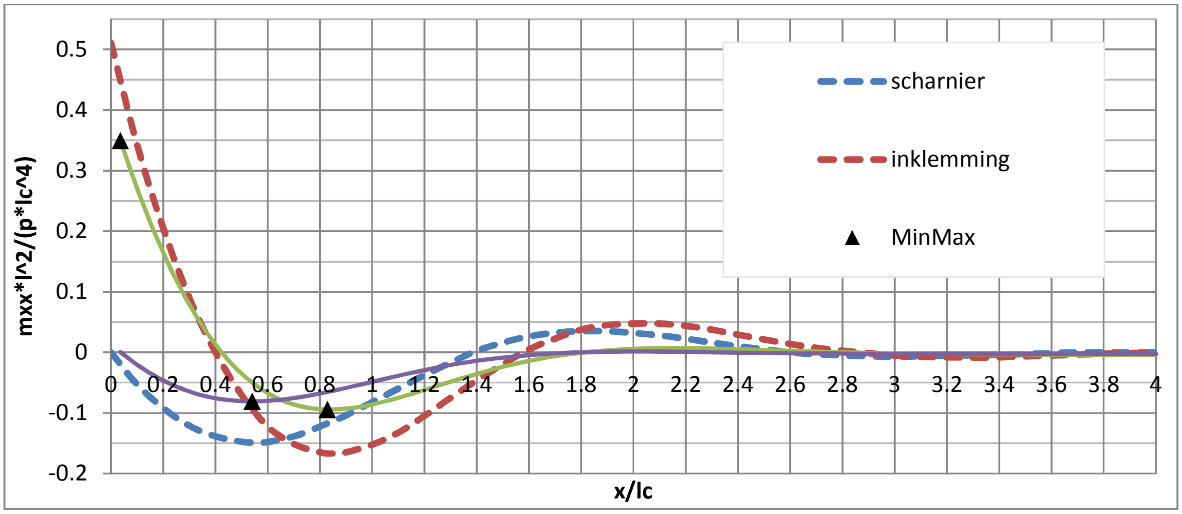
Figuur 4.3 - Reproductie samenvallende momentenlijnen

Ook bij deze schalen heeft de parameter ξ een kleine waarde ($0.114 < \xi < 0.136$), veroorzaakt door de geringe dikte t in combinatie met een matig sterke kromming ($3 \leq a_{xy}/l \leq 5$).

De vraag is nu of de gelijkvormigheid van de momentenlijnen met die van ir. Loof en het samenvallen van momentenlijnen voor verschillende hypars overeenkomstigheden hebben.

Zoals eerder genoemd is de parameter ξ van grote invloed op de lengte van de momentenlijn. Er kan dus gesteld worden dat gelijkvormigheid met de momentenlijnen van Loof alleen is voorbehouden aan schalen met een kleine waarde voor ξ. Meer specifiek: de momentenlijnen van Loof zijn op de horizontale as uitgezet tot en met de waarde $x/l_c = 4$. Als dit de momentenlijn voor de halve doorsnede is, betekent dit ook dat $0.5 \cdot l/l_c = 0.5/\xi = 4$, waaruit volgt dat $\xi = 0.125$ voor die bewuste hypars. Op de vorige pagina is echter al vermeld dat uit onderzoek is gebleken dat de beste fit optreedt voor $\xi \approx 0.079$.

Een snelle controle met een schaal met parameters $l = 15000\ mm$, $t = 10\ mm$, $a_{xy} = 43945\ mm$ waarvoor geldt $\xi = 0.125$ laat inderdaad zien dat de momentenlijn niet exact gelijk is. De vorm en lengte komen weliswaar overeen, echter zijn de extreme waarden ver van elkaar verwijderd.



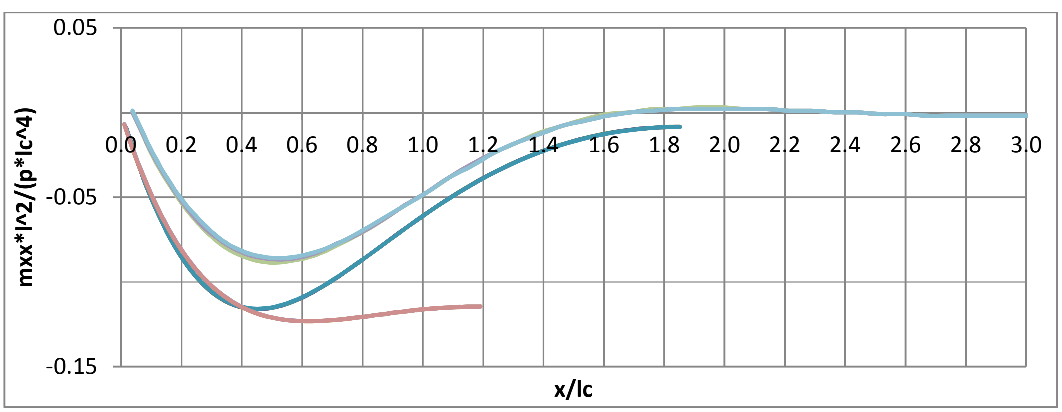
Figuur 4.4 - Momentenlijnen voor hypar met $\xi = 0.125$

De oplossing lijkt hiermee niet te liggen in de kleine getalwaarde van de parameter ξ. Er is echter nog een andere overeenkomst voor de samenvallende momentenlijnen: de waarde van ξ is nagenoeg constant.

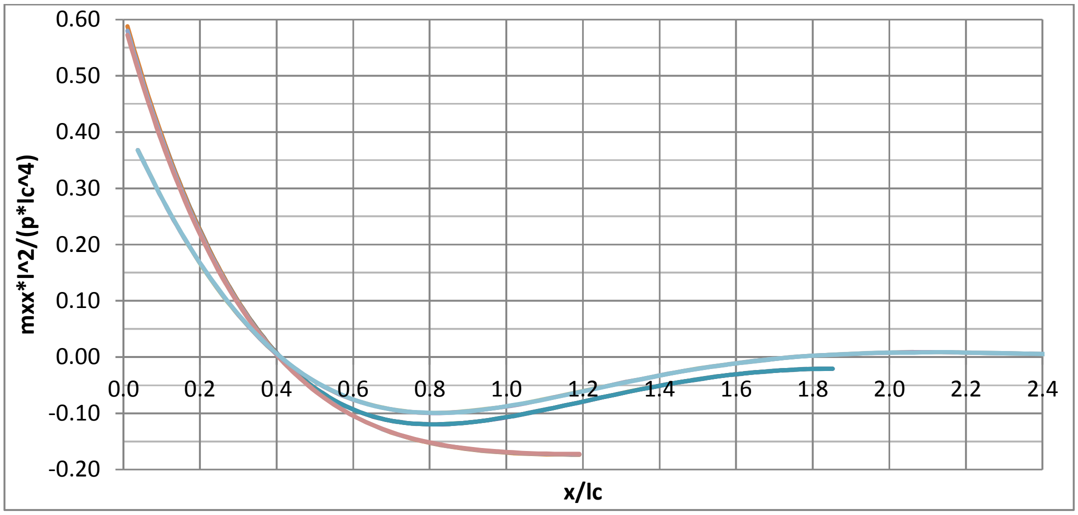
4.3 Constante ξ

Om te zien of een constante waarde van ξ inderdaad een bepalende factor is, zijn simulaties gedaan in ANSYS voor schalen met verschillende afmetingen, maar voor gelijke waarden van ξ. De volgende parameters zijn hierbij gebruikt: $\xi = 0.12\ :\ l = 7000\ mm$, $\xi = 0.27\ :\ l = 11000\ mm$, $\xi = 0.42\ :\ l = 15000\ mm$. De kromtestraal is gevarieerd volgens $5 < a_{xy}/l < 20$, waarna de dikte is bepaald op voorwaarde van de exacte waarde voor ξ .

In figuren 4.5 en 4.6 zijn voor negen van deze simulaties (drie per waarde van ξ) de momentenlijnen weergegeven.



Figuur 4.5 - Momentenlijnen voor constante ξ (scharnieroplegging)



Figuur 4.6 - Momentenlijnen voor constante ξ (inklemming)

Het wordt direct duidelijk dat de momentenlijnen voor de schalen met gelijke waarde van ξ nagenoeg hetzelfde zijn: er zijn namelijk geen 9 maar slechts 3 momentenlijnen te zien in beide figuren. Er lijkt dan ook een duidelijk verband te zijn tussen het optredende moment en de geometrie van de hypar, uitgedrukt in de parameter ξ.

Er is vervolgens dan ook onderzocht of er een trend te ontdekken is wanneer het moment in een grafiek wordt uitgezet tegen ξ (in plaats van x/l_c). Hiervoor is een groot aantal simulaties gedaan voor zowel ingeklemde als scharnierend opgelegde hypars, met de volgende parameters:

- $l = 5000\,, 10000\,, 15000 \ldots 45000\ mm$
- $a_{xy}/l = 1, 2\,, 3 \ldots 20$
- $t = 5\,, 50\,, 95\,, 140\,, 185\ mm$

Vanuit constructief oogpunt zijn vooral de extreme waarden van de momenten van belang. Bij de verwerking van de resultaten van deze simulaties zijn dan ook slechts het inklemmingsmoment en de maximale veldmomenten meegenomen. Er bleek inderdaad direct een trend zichtbaar te zijn voor de gegenereerde data.

In figuur 4.7 is voor scharnierend opgelegde schalen het maximale veldmoment uitgezet tegenover ξ. De rode stippellijn geeft de waarde aan volgens de momentenlijn van ir. Loof:

$$m_{xx} = -0.149 \cdot \frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4$$

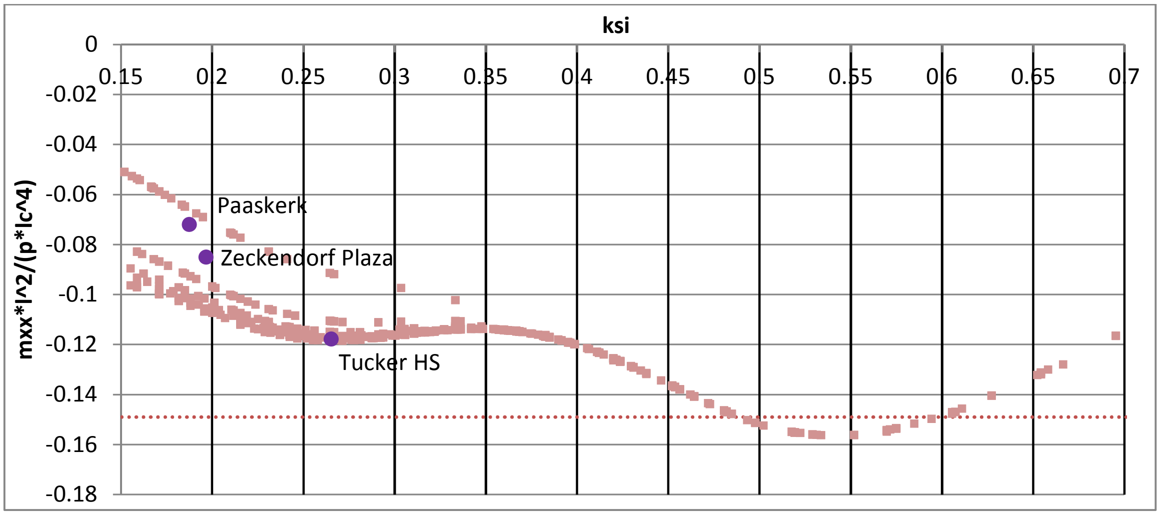
Op dezelfde wijze is in figuur 4.8 het maximale veldmoment uitgezet tegenover ξ voor ingeklemde hypars. Ook hier geeft de stippellijn de waarde uit de momentenlijn van ir. Loof:

$$m_{xx} = -0.167 \cdot \frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4$$

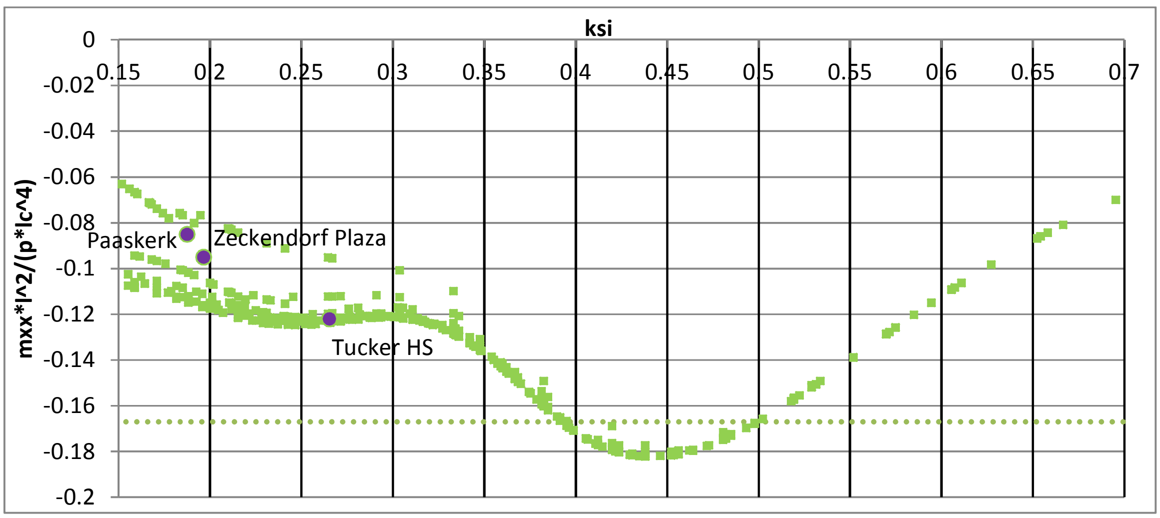
Vervolgens is in figuur 4.9 het inklemmingsmoment tegenover ξ uitgezet. De stippellijn geeft wederom de waarde aan uit de momentenlijn van ir. Loof:

$$m_{xx} = 0.511 \cdot \frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4$$

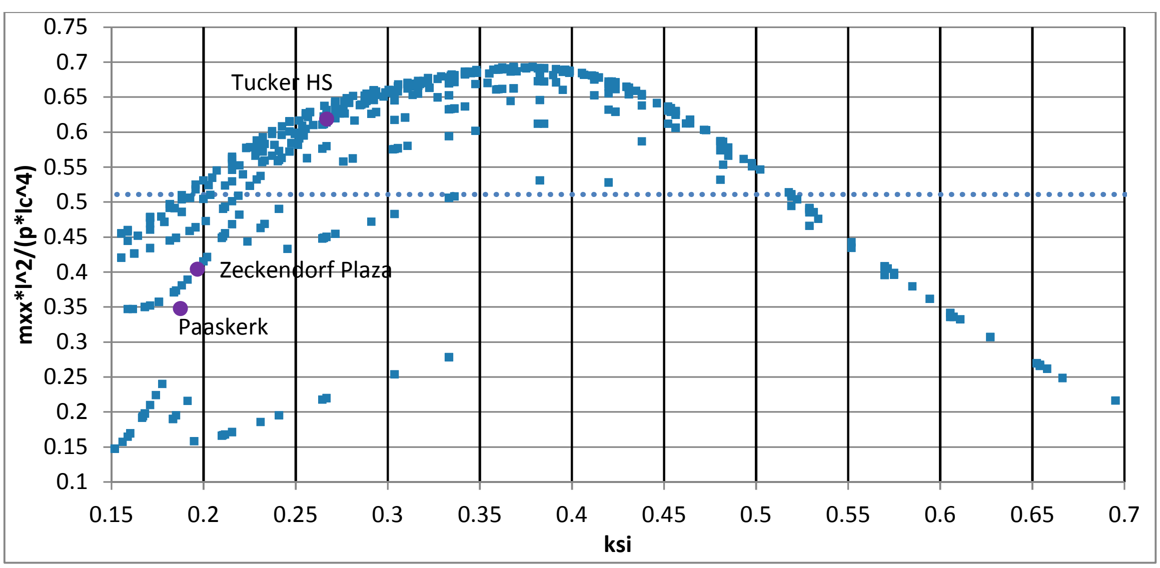
Voor alledrie de figuren is op de horizontale as het domein $0.15 \leq \xi \leq 0.70$ afgebeeld. Tevens zijn bij benadering enkele datapunten voor bestaande hypardaken aangegeven, zie ook bijlage D.



Figuur 4.7 - Maximum veldmomenten (scharnieroplegging) vs. ξ



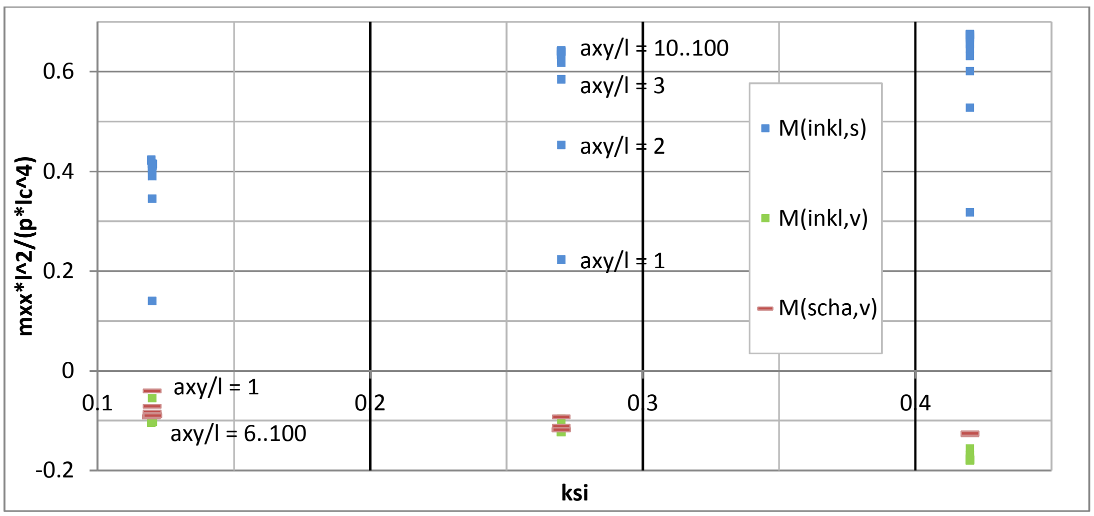
Figuur 4.8 - Maximum veldmomenten (inklemming) vs. ξ



Figuur 4.9 – Inklemmingsmomenten vs. ξ

Er is in de grafieken geen lineaire trend zichtbaar, maar een golvende beweging. Deze lijkt niet gerelateerd te zijn aan de door ir. Loof bepaalde extreme waarde: de maximale veldmomenten zijn nagenoeg allemaal kleiner, op een beperkt gebied na waar het maximum de waarde van ir. Loof overschrijdt. Voor de inklemmingsmomenten lijkt de waarde van ir. Loof een gemiddelde te zijn voor de data.
Verder valt op dat het merendeel van de datapunten een omhullende lijn lijken te hebben. Tegelijkertijd is ook te zien dat een deel van de datapunten duidelijk binnen deze omhullende ligt, een deel hiervan vertoont tevens aparte golvende trends.

Na bestudering van deze punten werd duidelijk dat de kromtestraal van de hypars, aangeduid met de verhouding a_{xy}/l, hierin een bepalende factor is. Voor de dataset uit het begin van deze paragraaf met $\xi = 0.12\,, 0.27\,, 0.42$ zijn in figuur 4.10 de extreme waarden voor de momenten weergegeven, waarbij geldt $a_{xy}/l = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 50, 100$.

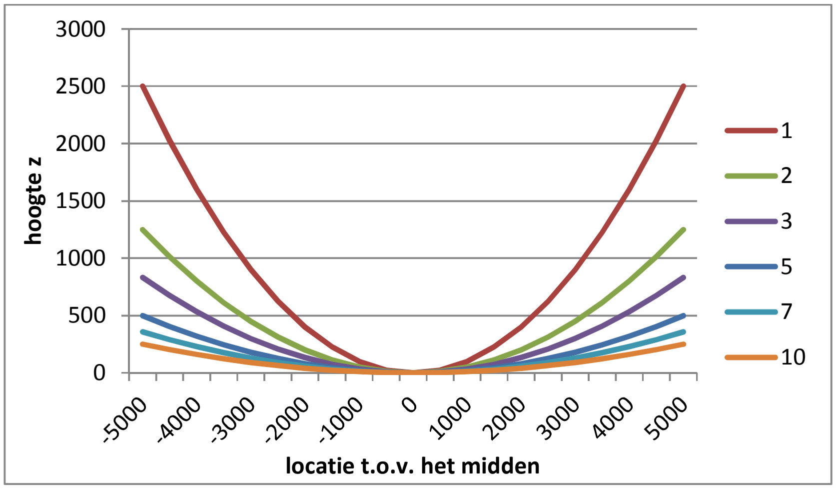


Figuur 4.10 - Extreme momenten vs. ξ bij variatie a_{xy}/l

De spreiding in de momentwaarden is het sterkst aanwezig voor het inklemmingsmoment (blauw). Bij een sterke kromming ($a_{xy}/l = 1$) ligt de waarde ruim 50% lager dan de omhullende. De grootte van het inklemmingsmoment lijkt dus erg gevoelig te zijn voor de kromming van de schaal.
Het veldmoment bij inklemming (groen) vertoont tevens een spreiding, al is deze veel kleiner. Ditzelfde geldt voor het veldmoment bij een scharnierende oplegging (rood). Hier is voor $\xi = 0.42$ zelfs nagenoeg geen spreiding meer zichtbaar.

Dit komt overeen met figuren 4.7 t/m 4.9: de sterkste spreiding in de resultaten is te zien voor het inklemmingsmoment. Bij de veldmomenten treedt voor $\xi > 0{,}35$ nagenoeg geen spreiding in de datapunten meer op. Hierbij wordt nog wel aangetekend dat, met de gebruikte parameters voor deze simulaties en in het bijzonder de gebruikte lengtes l, bij toenemende waarde van ξ minder en minder schalen voorkomen met sterke kromming ($a_{xy}/l < 5$). Hiervoor zullen schalen met kleinere lengte gebruikt dienen te worden: $l < 5000\ mm$. Niettemin is te constateren dat de spreiding in datapunten voor grotere waarde van ξ afneemt.

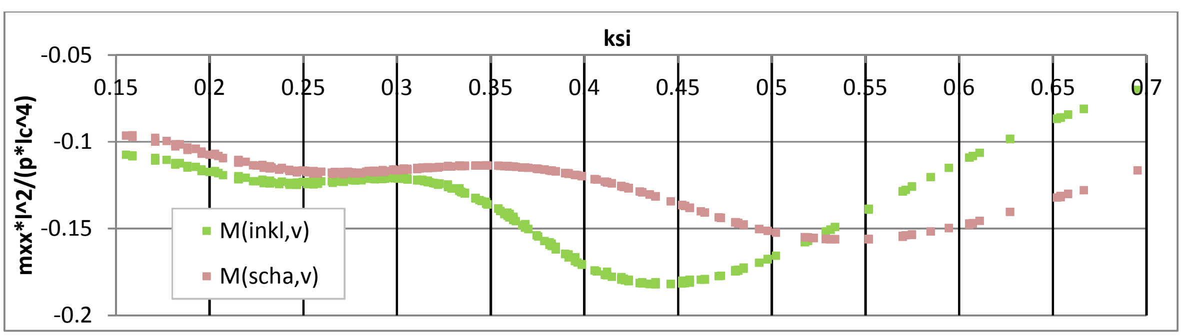
Een mogelijk verklaring voor deze afhankelijkheid van de kromming in de spreiding van de datapunten, ligt mogelijk in de vorm van de desbetreffende schalen. In figuur 4.10 is voor een aantal waarden van a_{xy}/l de parabolische kromming weergegeven voor een schuine doorsnede van een hypar met lengte $l = 10000\ mm$ (als het ware de schuine doorsnede van de bovenste helft van een hypar). Voor kleine waarden van a_{xy}/l, dus een sterke kromming, is een groot verschil zichtbaar in het hoogteverloop van de schaal. Naarmate de kromming minder wordt, komen de vormen van de hypars dichter en dichter bij elkaar te liggen. De hoogte is bepaald volgens de eerder vermeldde formule $z = k_{xy} \cdot x \cdot y = x \cdot y / a_{xy}$.



Figuur 4.11 - Kromming van hypars voor verschillende waarden a_{xy}/l

Te verwachten is dat de omhullende lijnen in figuren 4.7 t/m 4.9 bij afnemende kromming langzamerhand verder opschuiven tot de momentwaarden voor een vlakke plaat worden benaderd. Immers, de vlakke plaat is het limietgeval waarbij de kromtestraal oneindig is.

Voor de hier gebruikte dataset krijgt de omhullende van de veldmomenten vorm voor $a_{xy}/l > 6$, zoals weergegeven in figuur 4.12. Dit is een opgeschoonde versie van figuren 4.7 en 4.8.



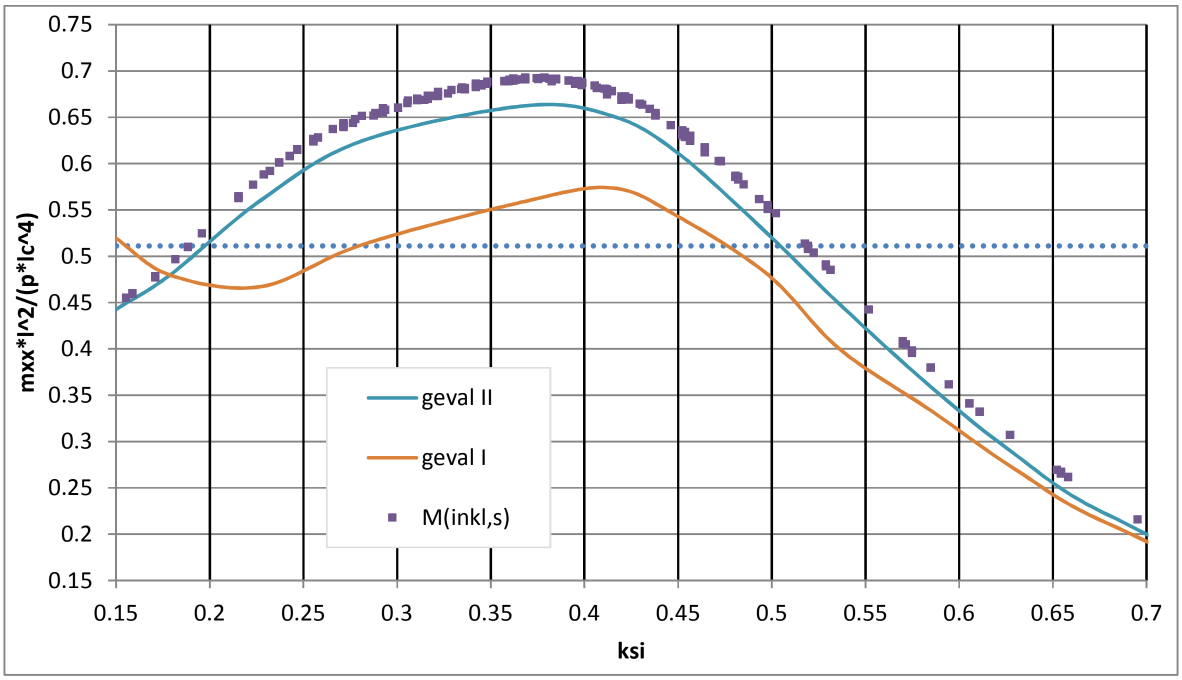
Figuur 4.12 - Omhullenden veldmomenten vs. ξ

Voor het inklemmingsmoment, dat gevoeliger is voor de kromming, ligt deze grens wat hoger: $a_{xy}/l > 10$. In zijn rapport heeft ir. Loof naast de eerder genoemde momentenlijnen ook zelf een grafiek opgenomen waarin, op logaritmische schaal, het moment dimensieloos is uitgezet als $m_{xx}/p \cdot l^2$ tegenover ξ^{-3}.

Hierbij zijn twee gevallen beschouwd wat betreft de opleggingen: een verhinderde dwarsverplaatsing van de rand (geval I) of juist een volkomen vrije dwarsverplaatsing van de rand (geval II).
De curves voor beide gevallen op deze logaritmische schaal liggen bij elkaar in de buurt en zijn benaderd met één rechte lijn:

$$m_{xx} = 0.511 \cdot \frac{p}{l^2} \cdot {l_c}^4$$

In figuur 4.9 was reeds zichtbaar dat deze rechte lijn de datapunten niet goed beschrijft, maar wel een gemiddelde lijkt te zijn. Vanuit het rapport van ir. Loof zijn nu voor gevallen I en II de curves gereproduceerd door een aantal datapunten op te meten. Deze twee lijnen zijn vervolgens toegevoegd aan de grafiek in figuur 4.13, waarvoor dus geldt $a_{xy}/l > 10$.



Figuur 4.13 - Omhullende inklemmingsmoment vs. ξ

Evenals voor geval II uit het rapport van ir. Loof, is ook in de randvoorwaarden van het model bij dit onderzoek de dwarsverplaatsing van de rand vrijgelaten. Te zien is dat de datapunten de curve voor geval II zeer goed volgen, alhoewel de waarden iets hoger liggen dan voor deze curve (ca. 5%).

Hiermee komt de centrale onderzoeksvraag weer naar voren: hoe nauwkeurig zijn de formules van ir. Loof en wat is het toepassingsgebied?

5 Conclusies en aanbevelingen

Aanleiding voor dit onderzoek was het vinden van een betrouwbare methode om in het vroege ontwerpstadium van een hypardak een schatting van het optredende moment te maken.

Op basis van de in hoofdstuk 4 vermeldde resultaten lijkt een betere benadering te zijn gevonden voor de extreme momentwaarden die optreden in een hyparschaal. In dit hoofdstuk zullen de conclusies op basis van deze resultaten besproken worden.
Er zijn echter nog steeds aspecten die verder uitgewerkt dienen te worden, waaronder de betrouwbaarheid van het in dit onderzoek gebruikte model voor kleine waarden van de parameter ξ. Dit zal in de paragraaf 5.2 aan de orde komen.

5.1 Conclusies

In dit BSc-eindwerk en in de twee eerder uitgevoerde eindwerken over dit onderwerp is geconstateerd dat de momentenlijnen van ir. Loof voor een ingeklemde of scharnierend opgelegde hyparschaal niet nauwkeurig te benaderen zijn. De benadering van de extreme waarden leverde afwijkingen op tot wel 40%.

Wat is nu de mogelijke reden dat de exacte momentenlijnen van ir. Loof niet met ANSYS te reproduceren lijken? Het gaat hier natuurlijk om de vergelijking tussen een analytisch bepaalde uitkomst en de resultaten van een numerieke simulatie.

Aan beide kanten zijn aannames gedaan, vereenvoudigingen gebruikt en daardoor onnauwkeurigheden te vinden. Om te beginnen heeft ir. Loof een aantal uitgangspunten genomen die het wiskundige probleem vereenvoudigden. Hierbij kan onder andere gedacht worden aan de differentiaalvergelijking die de basis voor analyse heeft gevormd, of de variatie in kromming over het oppervlak van de hypar die niet in rekening is gebracht. Noodzakelijke uitgangspunten, omdat het probleem anders überhaupt niet op die wiskundige wijze opgelost had kunnen worden. Het is echter niet bekend welke invloed deze vereenvoudigingen hebben gehad op de resultaten.

Aan de andere kant zijn er ook vereenvoudigingen gebruikt in het ANSYS-model. Het blijft daarmee ook niet meer dan een model, dat zo nauwkeurig is als de uitgangspunten op basis waarvan het is opgebouwd. Of het programma ANSYS zelf betrouwbaar genoeg is wordt hier in het midden gelaten, al wordt in de aanbevelingen wel opgenomen soortgelijke simulaties met andere EEM-programma's uit te voeren ter controle. Belangrijker in eerste instantie is de betrouwbaarheid van het gebruikte model.

Een in het oog springend verschil tussen het model hier en in het rapport van ir. Loof is de definitie van het assenstelsel. De oorsprong is in dit onderzoek in het midden van de hyparschaal genomen, waarbij het x,y-vlak de hypar precies in tweeën deelt.

In het rapport van ir. Loof is assenstelsel anders gedefinieerd: de oorsprong van het assenstelsel ligt hier in één van de hoekpunten, waarbij de x- en y-as de contouren van de hypar volgen. Het overnemen hiervan in het ANSYS-model levert veel moeilijkheden op, zodat hier niet voor is gekozen. Het gevolg is echter wel dat de krachtsverdeling in een verschillende ruimtelijke oriëntatie wordt uitgelezen.

Door de focus te verleggen van de momentenlijnen naar de relatie tussen de extreme waarden van het moment en de parameter ξ, zoals besproken in paragraaf 4.3, is nu wel een trend ontdekt voor de extreme momentwaarden. In het geval van de inklemmingsmomenten blijkt de omhullende tevens de curve uit het rapport van ir. Loof zeer goed te volgen.
Voor de extreme veldmomenten zijn in dat rapport geen grafieken opgenomen waarin het moment tegenover ξ zijn uitgezet. Op basis van het inklemmingsmoment wordt aangenomen dat de omhullenden voor de extreme veldmomenten een gelijke betrouwbaarheid zullen hebben. Dit wordt gebaseerd op het feit dat ir. Loof in zijn rapport expliciet heeft aangegeven dat zijn resultaten geldig zijn voor flauw hellende hypars. In de opgeschoonde omhullenden in figuur 4.12 en 4.13 is dit ook het geval, aangezien de data bij sterke kromming daar is weggelaten.

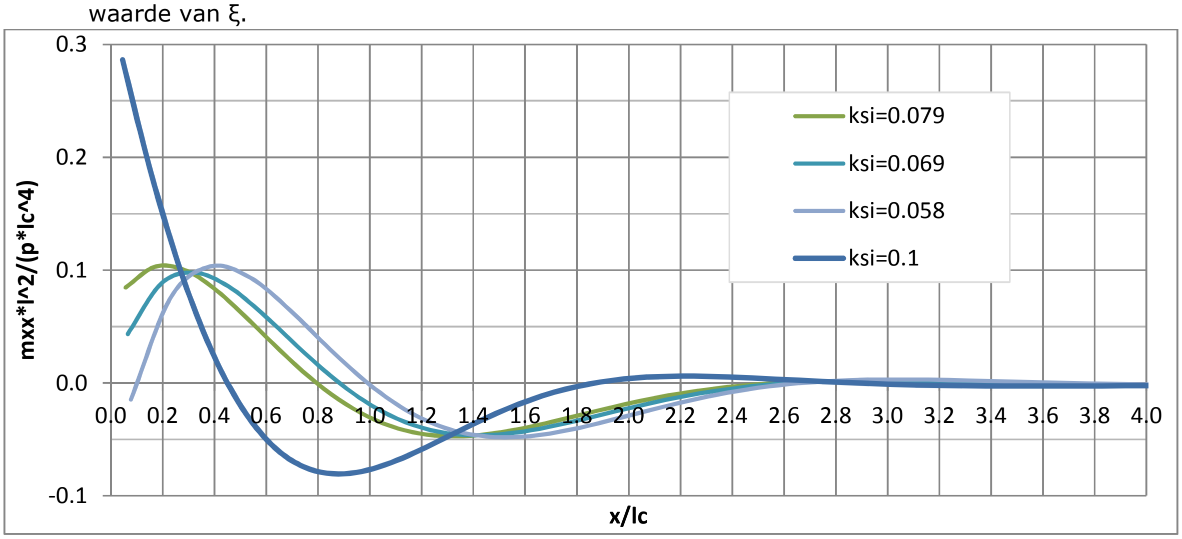
Alhoewel een afwijking van 5% analytisch gezien aanzienlijk is, is uit constructief oogpunt een schatting van het moment in de vroege ontwerpfase met deze nauwkeurigheid meer dan acceptabel. Het lijkt dan ook zinvol in dit kader de precieze momentenlijnen van ir. Loof (zoals te zien uit paragraaf 1.2) te vervangen door de omhullende lijnen uit figuur 4.12 en figuur 4.13 en hiermee een schatting van het te verwachten moment in de hypar te maken.
Wanneer de kromming van het te ontwerpen hypardak sterker is, zal het optredende moment niet langer op of zelfs rond de omhullende liggen. Echter, de omhullenden blijven een veilige schatting voor de grootte van het moment, aangezien de spreiding in de datapunten bij figuren 4.7 t/m 4.9 laten zien dat de werkelijke momentwaarde lager zal liggen. Het is hierbij natuurlijk ook mogelijk een inschatting van de waarde te maken op basis van de grafieken, wetende dat er een spreiding in de data optreedt bij sterkere krommingen.
De geldigheid van deze omhullenden voor toepassing bij het ontwerp van hypardaken lijkt hiermee, gebaseerd op de waarden van ξ, in orde bij het in dit onderzoek gebruikte model.

Zoals in de volgende paragraaf wordt besproken, lijkt de betrouwbaarheid van het model (en met name het aantal elementen in x- en y-richting) voor kleine waarden van ξ echter wel tekort te schieten. Om deze waarden van ξ te bereiken, spreken we over schalen met een sterke kromming, relatief grote lengte en een (zeer) geringe dikte, wat de toepassing van een dergelijke schaal als dakconstructie onaannemelijk maakt. Er wordt dan ook geconcludeerd dat de geldigheid van de omhullenden voor toepassing in dakconstructies hiermee niet beïnvloedt is.

5.2 Aanbevelingen

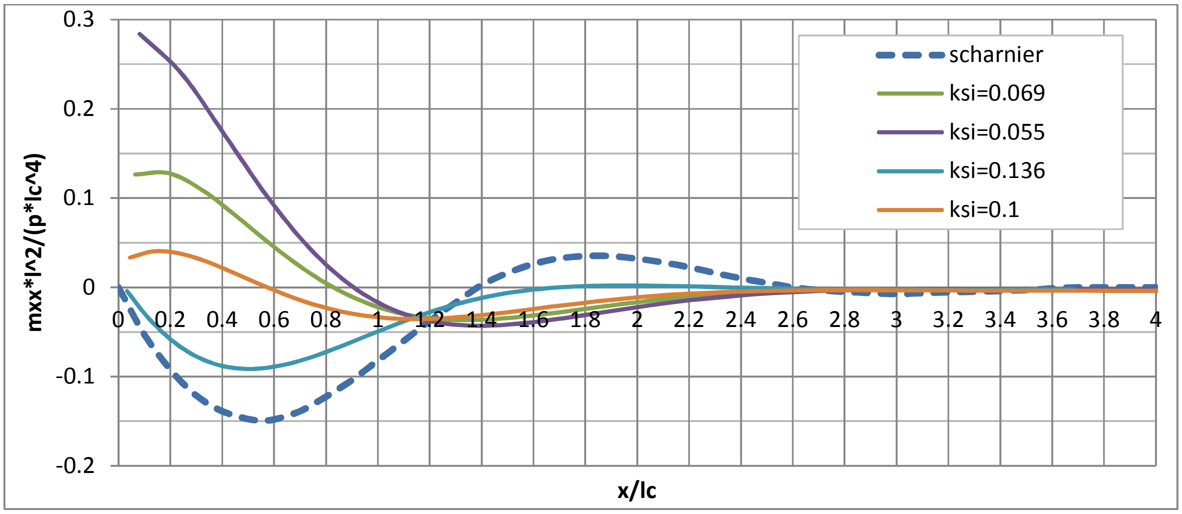
Tijdens de simulaties met het gekozen model (waarvoor geldt $nx = 111, ny = 93$), zijn enkele onregelmatigheden geconstateerd in de gevonden momentenlijnen voor kleine waardes van ξ. Deze treden op bij ingeklemde schalen voor ξ<0,10 en voor $\xi < 0.15$ bij scharnierend opgelegde schalen.

In figuur 5.1 is te zien dat de momentenlijnen bij een inklemming voor die gevallen een ander verloop hebben dan de verwachte momentenlijn: ze lijken haast in tegenfase te zijn.
In het BSc-eindwerk van Hoekstra (2015) is op pagina 22 tevens melding gemaakt van een omslagpunt in het inklemmingsmoment, waarbij deze plotseling negatieve waarden kreeg. Het ging daar om hypars met een zeer kleine boogstraal ($a_{xy} \leq l_x$) waarvoor echter ook $\xi < 0.1$ geldt. Het is de vraag of de afwijking wordt veroorzaakt door de sterke kromming of door de kleine waarde van ξ.



Figuur 5.1 - Afwijking momentenlijnen kleine ξ (inklemming)

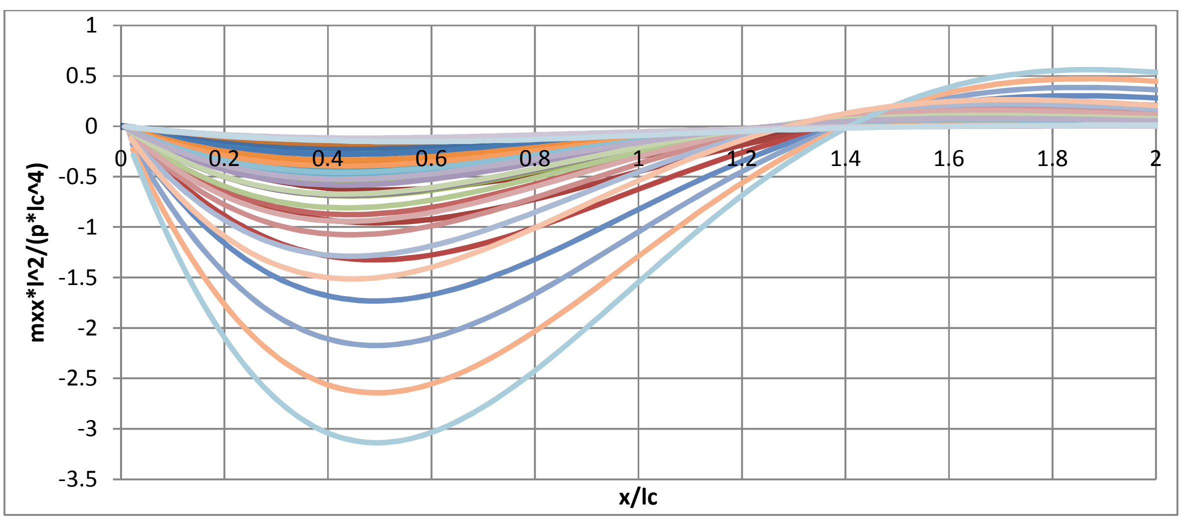
In figuur 5.2 zijn op dezelfde wijze enkele momentenlijnen weergegeven voor scharnierend opgelegde hypars, waarbij de blauw gestippelde lijn de momentenlijn van ir. Loof voorstelt. Te zien is dat voor afnemende waarde voor ξ de momentenlijnen meer doen denken aan die voor een ingeklemde schaal. Tevens is te zien dat de lijnen ook in tegenfase schijnen te zijn met de momentenlijn van ir. Loof. De momentenlijn met de grootste waarde voor ξ in deze grafiek heeft de meeste gelijkenis met een “normale” momentenverdeling, echter is bij inzoomen te zien dat het moment voor $x/l_c = 0$ niet naar nul lijkt te gaan.
Wellicht is de nauwkeurigheid van het model in dit onderzoek niet voldoende. Zoals eerder besproken is het aantal gebruikte elementen in x- en y-richting gekozen op basis van de resultaten uit de validatie en begrensd door de gebruikte licentie. Wanneer het aantal elementen voldoende vergroot kan worden, blijkt misschien dat de momentenlijnen in figuur 5.2 toch zeer sterk naar nul afnemen voor waarden van x/l_c in de buurt van nul. Er resteert dan wederom de mogelijke constatering dat de verandering in het momentenverloop een gevolg van de geometrie van de schaal is wanneer ξ kleine waarden aanneemt.



Figuur 5.2 - Afwijking momentenlijnen voor kleine ξ (scharnieroplegging)

Bij de validatie is in paragraaf 3.2 geconcludeerd dat een elementenconfiguratie waarbij $nx \gg ny$ geen betrouwbare resultaten lijkt te geven.

Bij simulaties voor scharnierend opgelegde hypars met een configuratie $nx = 437, ny = 23$ is voor kleine waarden van ξ echter wel een analogie gevonden met figuur 5.2: de extreme positieve momentwaarden dicht bij het nulpunt op de horizontale as treden hier ook op. Deze extremen liggen echter verder van het nulpunt op de horizontale as.



Figuur 5.3 - Vergroting maximale veldmoment bij kleine ξ (scharnier)

Een mogelijke verklaring voor figuur 5.3 is een te klein aantal elementen in y-richting. De karakteristieke lengte l_c is, zoals eerder genoemd, niet alleen een meetkundig gemiddelde van de geometrieparameters van de hypar, maar is ook de golflengte van het randstoringsmoment. Binnen een periode van deze golflengte van dit moment dienen genoeg elementen te liggen om de golfbeweging nauwkeurig genoeg te kunnen beschrijven.

Het aantal elementen binnen de lengte l_c in y-richting wordt gegeven door:

$$\frac{l_c}{\frac{l_y}{ny}} = \frac{\xi \cdot l_y}{\frac{l_y}{ny}} = \xi \cdot ny$$

In het geval waar $\xi \approx 0.1$ geeft dit voor het aantal elementen binnen een lengte l_c een waarde van $ny/10$.
Met $ny = 23$ voor de simulaties bij figuur 5.3 betekent dit slechts 2.3 elementen per golflengte l_c, wat niet voldoende is om die golvende beweging nauwkeurig te omschrijven. Die onnauwkeurigheid in de momentenverdeling in y-richting heeft als gevolg dat de momentwaarden in x-richting beïnvloedt worden.

Het verdient dan ook zeker aandacht om bovengenoemde effecten nader te bekijken en hierbij aanvullende simulaties uit te voeren. Zowel voor constructies met kleine waarde voor parameter ξ als in het algemeen met een vergroting van het aantal elementen (bijv. $nx = ny = 221$ of nog groter indien wenselijk en mogelijk).

Een vergroting van het aantal elementen heeft mogelijk ook een gunstige invloed op de optredende rotaties in de knopen langs de randen, zoals genoemd in paragraaf 3.3. Van deze rotaties werd verondersteld dat deze niet op zouden treden ten gevolge van de verhinderde verticale verplaatsing van de randknopen. De op basis hiervan verwachte golfvormige vervorming van de randen van de schaal dient verder onderzocht te worden en kan wellicht verminderd worden bij een groter aantal elementen in het model. Wanneer dit niet het geval kan een aanpassing van de gestelde randvoorwaarden bekeken worden.

Een laatste aanbeveling is een vergelijkend onderzoek naar de resultaten van simulaties met verschillende softwarepakketten. Bij de BSC-eindwerken over dit onderwerp is steeds ANSYS gebruikt en het is mogelijk dat bij het gebruik van andere software de resultaten enigszins zullen afwijken.

Literatuurlijst

ANSYS. (2009). ANSYS Element Reference (Release 12.1 ed.).

ANSYS. (2013). ANSYS Mechanical APDL Command Reference (Release 15.0 ed.).

Armstrong, A. (Producer). (2009, 24-03-2016). Hypar roof over Little Chef. [Photo] Retrieved from https://www.flickr.com/photos/french-disko/3206552076

Candela, F. (Producer). (2008, 31-03-2016). *The Hyperbolic Paraboloid*. Retrieved from http://artmuseum.princeton.edu/legacy-projects/Candela/paraboloid.html

Hoefakker, J. H. en Blaauwendraad, J. (2014). *Structural Shell Analysis*: Springer Dordrecht.

Hoekstra, D. (2015). *Momenten in hypparschalen*
De randvoorwaarden van de momentenlijn van Loof. (BSc-eindwerk).

Hoogenboom, dr. ir. P.C.J. (2015). *Handouts Shell Analysis CIE4143, Theory and Application*: TU Delft.

Loof, i. H. W. (1961). *Eenvoudige formules voor de buigingsstoringen in hypparschalen, die volgens beschrijvenden zijn begrensd.*

Normalisatie-Instituut, N. (1991). Technische grondslagen voor bouwconstructies
TGB 1990 - Voorschriften Beton
Constructie eisen en rekenmethoden (VBC 1990).

Panek (Producer). (2010, 24-03-2016). Warszawa-Ochota railway station. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Warszawa_Ochota_train_station

Friends of Miami Marine Stadium (Producer). (02-04-2016). Miami Marine Stadium. Retrieved from http://www.praktijkverenigingbout.nl/

Tran, T. M. (2015). *Nauwkeurigheid ontwerpformules voor buigende momenten in hypar-daken*
Beoordeling Nauwkeurigheid Formules van Loof (BSc-eindwerk).

Bijlage A – ANSYS script

Hieronder is het ANSYS-script te vinden, zoals dit is gebruikt voor de simulaties. De code is in delen weergegeven, met daartussen een uitleg van de functionaliteit. Er is ook commentaar toegevoegd in de code zelf, commentaar wordt voorafgegaan door een uitroepteken (!).
Dit is gedaan om de code inzichtelijk en bruikbaar te maken voor de lezer. Op deze manier is de code (in al dan niet aangepaste en/of uitgebreide vorm) te gebruiken voor het bepalen van de momentenverdeling in een hypar met behulp van ANSYS.

De code kan achter elkaar geplakt worden in een bestand om door ANSYS uit te laten voeren. Bij het openen van ANSYS dient de locatie van het bestand als *working directory* ingesteld te worden. De bestandsnaam is vervolgens het commando waarmee ANSYS de code uitvoert.
Als het bestand als *.mac-bestand wordt opgeslagen herkent ANSYS het bestand direct als uit te voeren macro. Bijvoorbeeld: met het commando "inklemming" kan het bestand "inklemming.mac" uitgevoerd worden.
Aangezien de code het makkelijkst in een standaard teksteditor als Notepad aangepast kan worden, is het handzaam het bestand als *.txt op te slaan, bijv. "scharnier.txt". In ANSYS kan dit bestand nu worden aangeroepen met als commando de bestandsnaam inclusief extensie: "scharnier.txt".

Meer informatie over ANSYS commando's en elementtypen is te vinden in de ANSYS Mechanical ADPL Command reference en ANSYS Element reference.

Instellen van de geometrie, elementconfiguratie en -type en materiaaleigenschappen

Als eerste worden de eigenschappen van de hypar vastgelegd. Een variabele kan een getalwaarde krijgen, of met een formule worden bepaald (bijv. $a_{xy} = 6 \cdot l_x$)

```
!     PARAMETERS VASTLEGGEN
    FINISH                            ! beëindigd de actieve ANSYS-processor
    /CLEAR,START             ! leegt de database, default start
    E = 1.0e4                         ! E-modulus in N/mm2
    nu = 0.0                          ! Poisson' s ratio
    t = 50                            ! dikte in mm
    ly = 10000                        ! lengte in y-richting in mm
    lx = ly                           ! lengte in x-richting in mm
    axy = 50000              ! kromtestraal in mm, zet axy = 0 voor oneindig (vlakke plaat)
    p = -0.001                        ! verdeelde belasting in N/mm2
    *IF,axy,NE,0,THEN                 ! als axy=0: kxy=0, anders kxy=1/axy
        kxy=1/axy
    *ELSE
        kxy=0
    *ENDIF
    lc = (axy*lx*t)**(1/3)            ! karakteristieke lengte in mm
    ksi = lc / lx                     ! ksi (dimensieloos)
    ! kies altijd ONEVEN aantal elementen in beide richtingen,
    ! zodat x- en y-as door middelpunten elementen lopen (hier wordt mxx of myy uitgelezen)
    ny = 93                           ! aantal elementen in y-richting
    nx = 111                          ! aantal elementen in x-richting
    ! twee extra karakteristieken, nuttig bij verwerking data
    axyt = axy / t                    ! verhouding axy/t
    axyl = axy / lx                   ! verhouding axy/lx
```

Een ANSYS-simulatie is in 3 fasen op te delen: de preprocessor fase, de oplosfase en de postprocessor fase.

Na initialisatie wordt de preprocessorfase gestart. De opgegeven materiaaleigenschappen en het elementttype worden nu gedefinieerd. In dit model is gekozen voor een isotroop materiaal en het elementtype SHELL281.

```
!     ELEMENTTYPE & MATERIAALEIGENSCHAPPEN VASTSTELLEN
    /PREP7                     ! start preprocessor voor creëren model
    ! define a temperatur table for material properties
    MPTEMP,,,,,,,,             ! materiaal: isotroop
    MPTEMP,1,0
    ! define property data associated with temperature table
    MPDATA,EX,1,,E             ! E-modulus
    MPDATA,PRXY,1,,nu                    ! PR: poisson's ratio
    ET,1,SHELL281              ! define element type: 8 knopen rechthoek
    ! define element real constants
    R,1,t,t,t,t,,,             ! element dikte at nodes i,j,k,l
```

Plaatsen van de knopen en elementen

Nog steeds in de preprocessorfase worden de knopen en elementen geplaatst. De volgorde waarin dit gebeurd is in hoofdstuk 2 nader toegelicht. Aangezien de elementen geen knoop in het midden hebben, wordt met conditie $tx + ty < 1$ gezorgd dat deze knoop wordt overgeslagen.
Na plaatsing van de knopen worden de elementen "geplaatst" door het knoopnummer te definiëren dat correspondeert met knopen I t/m P van het SHELL281-element met behulp van de functies k1 t/m k3.

```
!     KNOPEN PLAATSEN
    ty=1 ! plaats knopen, oorsprong assenstelsel in het midden van de schaal
    *DO,j,-ny,ny
        ty=-ty
        tx=1
        *DO,i,-nx,nx
            tx=-tx
            *IF,tx+ty,LT,1,THEN
                x=i*lx/nx/2
                y=j*ly/ny/2
                z=x*y*kxy
                N,,x,y,z,,,  ! define node
            *ENDIF
        *ENDDO
    *ENDDO
```

```
!     ELEMENTEN PLAATSEN
SHPP,OFF                       ! geen waarschuwing over elementvorm bij nx/ny>20
    *DO,j,1,ny ! insert elements
        *DO,i,1,nx
            k1=1+(i-1)*2+(j-1)*(3*nx+2)          ! knoop I
            k2=1+i+(2+(j-1)*3)*nx+(j-1)*2        ! knoop P
            k3=1+(i-1)*2+j*(3*nx+2)              ! knoop L
            E,k1,k1+2,k3+2,k3,k1+1,k2+1,k3+1,k2  ! define element
        *ENDDO
    *ENDDO
```

Instellen van de randvoorwaarden en aanbrengen belasting

Nu de knopen en elementen zijn geplaatst, worden de randvoorwaarden voor de opleggingen in de randknopen gedefinieerd. Deze worden in 6 stukken opgesplitst: de boven- en onderrand, en voor de linker- en rechterrand apart van elkaar de hoekknopen en middenknopen van de elementen. Vervolgens wordt nog de belasting p gelijkmatig verdeeld over alle knopen als puntlasten.

```
!    RANDVOORWAARDEN INSTELLEN
! Onderste rij aan knopen (y = -0.5ly , // x-as)
    *DO,i,1,2*nx+1
        D,i,UX,0
        D,i,UZ,0
        D,i,ROTX,0
    *ENDDO
! De linkerrand van de schaal (x = -0.5lx , // y-as)
    ! hoekpunten van de elementen
    *DO,j,1,ny+1
        i=(j-1)*(3*nx+2)+1
        D,i,UY,0
        D,i,UZ,0
        D,i,ROTY,0
    *ENDDO
    ! midpunten van de elementen
    *DO,j,1,ny
        i=2*nx+2+(j-1)*(3*nx+2)
        D,i,UY,0
        D,i,UZ,0
        D,i,ROTY,0
    *ENDDO
! De bovenste rand aan knopen (y = 0.5ly , // x-as)
    *DO,j,1,2*nx+1
        i=(3*nx+2)*ny+j
        D,i,UX,0
        D,i,UZ,0
        D,i,ROTX,0
    *ENDDO
! De rechterrand van de schaal (x = 0.5lx , // y-as)
    ! hoekpunten van de elementen
    *DO,j,0,ny
        i=2*nx+1+j*(3*nx+2)
        D,i,UY,0
        D,i,UZ,0
        D,i,ROTY,0
    *ENDDO
    ! midpunten van de elementen
    *DO,j,1,ny
        i=j*(3*nx+2)
        D,i,UY,0
        D,i,UZ,0
        D,i,ROTY,0
    *ENDDO


!    BELASTING AANBRENGEN
    *GET,maxN,NODE,0,COUNT   ! parameter voor maximaal aantal knopen
    F,ALL,FZ,p*lx*ly/maxN    ! belasting toevoegen, op ALLE knopen.
    FINISH                   ! beëindigd de preprocessor
```

De oplosfase

Hierin wordt de simulatie uitgevoerd door ANSYS, waarbij de vervormingen en krachtsverdeling in de schaal worden bepaald. Qua code lijkt dit niet erg bijzonder.

```
!    SOLUTION FASE
    /SOLU                    ! start de oplosfase
    ! compute
    SOLVE
    FINISH                   ! beëindigd de oplosfase
```

De postprocessorfase

Hierin worden de resultaten verwerkt. Voor meer informatie over de beschikbare krachtuitvoer, zie de ANSYS Element reference.

Als eerste worden de momenten m_{xx} uit de oplossing geïmporteerd, waarna een contourplot van de momenten op het scherm wordt getoond. Vervolgens worden de momenten en de locatie waar ze optreden in een arrayvariabele geplaatst. Er wordt tevens een plot op het scherm getoond van de momentenlijn.

Tenslotte wordt er een uitvoerbestand in CSV-formaat gecreëerd. Om dit bestand een unieke naam te geven, is er voor gekozen de hyparparameters in de bestandsnaam te verwerken, te weten $l_x, t, a_{xy}, l_c, \xi, a_{xy}/t, a_{xy}/l, ny\ en\ nx$. In het bestand zelf worden de waarden voor $a_{xy}, t, l_x, nx\ en\ p$ weggeschreven, gevolgd door de arrayvariabele die de momententabel bevat.

```
! MOMENTEN OPHALEN
    /POST1                              ! start de postprocessor
    ETABLE,MXX,SMISC,4                  ! vraagt data uit de output in een tabel, 4 = Mxx
PLESOL,SMISC,4                ! plot de (contour) momenten verdeling, Mxx


! MOMENTEN IN TABEL ZETTEN
    *GET,maxE,ELEM,0,COUNT              ! Aantal elementen
    *SET,minv,(NINT(ny/2)-1)*nx+1  ! bepaald eerste element waarin moment wordt uitgelezen
    *DIM,MOMXX,TABLE,nx,2
    ! x-waarden in midden van de elementen in x-richting
    *VGET,MOMXX(1,1),ELEM,1,CENT,X,,,,
    ! mxx-waarden in midden van elementen op y=0 (midden schaal)
    *VGET,MOMXX(1,2),ELEM,minv,ETAB,MXX
    *VPLOT,MOMXX(1,1),MOMXX(1,2),2


! EXPORT AS CSV
    *dim,sFname,string,100              ! creëer de bestandsnaam
    sFname(1)=STRCAT('InklC-lx=',CHRVAL(lx))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-t=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(t))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-axy=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(axy))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-lc=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(lc))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-ksi=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(ksi))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-axy!t=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(axyt))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-axy!l=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(axyl))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-axy!l=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(axyl))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'-ny!nx=')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(ny))
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),'!')
    sFname(1)=STRCAT(sFname(1),CHRVAL(nx))
    *CFOPEN,sFname(1),csv,,             ! open bestand voor uitvoer
    *VWRITE,'axy',',',axy
    (A,A,F12.2)
    *VWRITE,'t',',',t
    (A,A,F12.2)
    *VWRITE,'lx',',',lx
    (A,A,F12.2)
    *VWRITE,'nx',',',nx
    (A,A,F12.2)
    *VWRITE,'p',',',p
    (A,A,F12.4)
    *VWRITE,MOMXX(1,1),',',MOMXX(1,2)
    (F12.2,A,F12.2)
    *CFCLOS                             ! sluit uitvoerbestand
```

Controle op de randvoorwaarden

Deze toevoeging op de code is gebruikt om de verplaatsingen en rotaties van de randknopen te controleren en te vergelijken met de gestelde randvoorwaarden. Net als bij de definitie van de randvoorwaarden is dit in 6 delen opgesplitst. De verplaatsingen en rotaties worden voor elke knoop in x,y,z-richting opgevraagd en in een arrayvariabele geplaatst. Tenslotte worden deze variabelen weggeschreven in een CSV-bestand, analoog aan de standaarduitvoer zoals hiervoor beschreven. In dit bestand staat zo een tabel met $u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$.

```
! Controle onderste rij knopen
    *DIM,UBOT,TABLE,2*nx+1,3
    *DIM,ROBOT,TABLE,2*nx+1,3
    *VGET,UBOT(1,1),NODE,1,U,X
    *VGET,UBOT(1,2),NODE,1,U,Y
    *VGET,UBOT(1,3),NODE,1,U,Z
    *VGET,ROBOT(1,1),NODE,1,ROT,X
    *VGET,ROBOT(1,2),NODE,1,ROT,Y
    *VGET,ROBOT(1,3),NODE,1,ROT,Z

! Controle bovenste rij knopen
    *DIM,UTOP,TABLE,2*nx+1,3
    *DIM,ROTOP,TABLE,2*nx+1,3
    *VGET,UTOP(1,1),NODE,(3*nx+2)*ny+1,U,X
    *VGET,UTOP(1,2),NODE,(3*nx+2)*ny+1,U,Y
    *VGET,UTOP(1,3),NODE,(3*nx+2)*ny+1,U,Z
    *VGET,ROTOP(1,1),NODE,(3*nx+2)*ny+1,ROT,X
    *VGET,ROTOP(1,2),NODE,(3*nx+2)*ny+1,ROT,Y
    *VGET,ROTOP(1,3),NODE,(3*nx+2)*ny+1,ROT,Z

! Controle linker rand, hoekpunten:
    *DIM,ULEFC,TABLE,ny+1,3
    *DIM,ROLEFC,TABLE,ny+1,3
    *DO,j,1,ny+1
        i=(j-1)*(3*nx+2)+1
        *GET,ULEFC(j,1),NODE,i,U,X
        *GET,ULEFC(j,2),NODE,i,U,Y
        *GET,ULEFC(j,3),NODE,i,U,Z
        *GET,ROLEFC(j,1),NODE,i,ROT,X
        *GET,ROLEFC(j,2),NODE,i,ROT,Y
        *GET,ROLEFC(j,3),NODE,i,ROT,Z
    *ENDDO

! Controle linker rand, middenpunten
    *DIM,ULEFM,TABLE,ny,3
    *DIM,ROLEFM,TABLE,ny,3
    *DO,j,1,ny
        i=2*nx+2+(j-1)*(3*nx+2)
        *GET,ULEFM(j,1),NODE,i,U,X
        *GET,ULEFM(j,2),NODE,i,U,Y
        *GET,ULEFM(j,3),NODE,i,U,Z
        *GET,ROLEFM(j,1),NODE,i,ROT,X
        *GET,ROLEFM(j,2),NODE,i,ROT,Y
        *GET,ROLEFM(j,3),NODE,i,ROT,Z
    *ENDDO

! Controle rechter rand. hoekpunten
    *DIM,URIGC,TABLE,ny+1,3
    *DIM,RORIGC,TABLE,ny+1,3
    *DO,j,0,ny
        i=2*nx+1+j*(3*nx+2)
        *GET,URIGC(j,1),NODE,i,U,X
        *GET,URIGC(j,2),NODE,i,U,Y
        *GET,URIGC(j,3),NODE,i,U,Z
        *GET,RORIGC(j,1),NODE,i,ROT,X
        *GET,RORIGC(j,2),NODE,i,ROT,Y
        *GET,RORIGC(j,3),NODE,i,ROT,Z
    *ENDDO
```

```
! Controle rechterrand. middenpunten
    *DIM,URIGM,TABLE,ny,3
    *DIM,RORIGM,TABLE,ny,3
    *DO,j,1,ny
        i=j*(3*nx+2)
        *GET,URIGM(j,1),NODE,i,U,X
        *GET,URIGM(j,2),NODE,i,U,Y
        *GET,URIGM(j,3),NODE,i,U,Z
        *GET,RORIGM(j,1),NODE,i,ROT,X
        *GET,RORIGM(j,2),NODE,i,ROT,Y
        *GET,RORIGM(j,3),NODE,i,ROT,Z
    *ENDDO


! EXPORT AS CSv
    *dim,sFname2,string,100
    sfname2(1)=STRCAT('Inklval-lx=',CHRVAL(lx))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'-t=')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(t))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'-axy=')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(axy))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'-lc=')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(lc))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'-ksi=')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(ksi))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'-axy!t=')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(axyt))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'-axy!l=')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(axyl))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'-ny!nx=')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(ny))
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),'!')
    sfname2(1)=STRCAT(sfname2(1),CHRVAL(nx))
    *CFOPEN,sFname2(1),csv,,

*VWRITE,UTOP(1,1),',',UTOP(1,2),',',UTOP(1,3),',',ROTOP(1,1),',',ROTOP(1,2),',',ROTOP(
1,3)
    (F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8)
    *VWRITE,'======'
    (A)

*VWRITE,UBOT(1,1),',',UBOT(1,2),',',UBOT(1,3),',',ROBOT(1,1),',',ROBOT(1,2),',',ROBOT(
1,3)
    (F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8)
    *VWRITE,'======'
    (A)

*VWRITE,ULEFC(1,1),',',ULEFC(1,2),',',ULEFC(1,3),',',ROLEFC(1,1),',',ROLEFC(1,2),',',R
OLEFC(1,3)
    (F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8)
    *VWRITE,'======'
    (A)

*VWRITE,ULEFM(1,1),',',ULEFM(1,2),',',ULEFM(1,3),',',ROLEFM(1,1),',',ROLEFM(1,2),',',R
OLEFM(1,3)
    (F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8)
    *VWRITE,'======'
    (A)

*VWRITE,URIGC(1,1),',',URIGC(1,2),',',URIGC(1,3),',',RORIGC(1,1),',',RORIGC(1,2),',',R
ORIGC(1,3)
    (F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8)
    *VWRITE,'======'
    (A)

*VWRITE,URIGM(1,1),',',URIGM(1,2),',',URIGM(1,3),',',RORIGM(1,1),',',RORIGM(1,2),',',R
ORIGM(1,3)
    (F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8,A,F12.8)

    *CFCLOS
```

Bijlage B - Excel VBA script

Voor de verwerking en interpretatie van de momenten in de met ANSYS doorgerekende hypars is gebruik gemaakt van Excel. Er zijn verschillende scripts geschreven in VBA (Visual Basic) om dit te bewerkstelligen.
Hieronder is het overgrote deel van deze code toegevoegd. Om herhaling te voorkomen zijn variaties op dezelfde code slechts eenmaal opgenomen.
Er is hier slechts summier commentaar gegeven bij de code. Dit commentaar wordt in Excel VBA voorafgegaan door een apostrof (‵).
De code is uitgevoerd vanuit een bronbestand, waarvandaan bepaalde gegevens met de code naar het nieuwe bestand worden gekopieerd (bijv. grafieken van ir. Loof of het ANSYS-script).
Voor gebruik van deze code of verdere toelichting kunt u zich wenden tot de auteur.

Importeren van ANSYS-uitvoer (*.csv-bestanden)

```
Sub ImportFiles()
' import ANSYS output files
Dim ANSYSfiles As Variant, wbNwname As Variant
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, FirstSh As Integer, LastSh As Integer
Dim CSVname As String

Application.ScreenUpdating = False
On Error GoTo Errorcatch

    Set wbActive = ThisWorkbook
    ' open existing workbook to append to or create new workbook with CANCEL
    ANSYSfiles = Application.GetOpenFilename("Excel-files (*.xlsx), *.xlsx", , "Select Excel-files
or CANCEL for new file", , True)
Application.DisplayAlerts = False
    If IsArray(ANSYSfiles) Then
        Set wbnew = Workbooks.Open(ANSYSfiles(1))
    Else
        Set wbnew = Workbooks.Add
        wbActive.Worksheets("Loof").Copy before:=wbnew.Sheets(1)
        wbActive.Worksheets("M-lines").Copy before:=wbnew.Sheets(1)
        For i = 1 To 3
            wbnew.Sheets("Sheet" & i).Delete
        Next i
    End If
Application.DisplayAlerts = True
' select and import CSV-files
    ANSYSfiles = Application.GetOpenFilename("CSV-files (*.csv), *.csv", , "Select CSV-files", ,
True)
    For i = 1 To UBound(ANSYSfiles)
        Set wbImport = Workbooks.Open(ANSYSfiles(i))
        wbImport.Worksheets(1).Copy after:=wbnew.Sheets("Loof")
        CSVname = wbImport.Worksheets(1).Name
        wbImport.Close savechanges:=False
        ‘ format data in CSV-file
        FormatCSV (CSVname)
    Next i
```

```
    ' sort worksheets by name
    With wbnew
        FirstSh = 3
        LastSh = .Worksheets.Count
        For j = FirstSh To LastSh
            For k = j To LastSh
                If UCase(.Worksheets(k).Name) < UCase(.Worksheets(j).Name) Then
                    .Worksheets(k).Move before:=.Worksheets(j)
                End If
            Next k
        Next j
    End With
Application.ScreenUpdating = True
    ' create chart from data in imported CSV-files
    CreateChart
    Exit Sub

Errorcatch:
    MsgBox Err.Description
    Resume Next

End Sub
```

Formatteren van ingevoerde CSV-bestanden

```
Sub FormatCSV(wsName As String)
Dim colRange As Range, rTrg As Range
Dim j As Integer, nr As Integer, delta As Double
'format CSV-data to custom table

Application.ScreenUpdating = False
    With wbnew.Worksheets(wsName)
        ' insert and calculate some parameters and format table headers
        .Range("C1").Value = "lc"
        .Range("D1").Formula = "=(B1*B2*B3)^(1/3)"
        .Range("C2").Value = "ksi"
        .Range("D2").Formula = "=D1/B3"
        .Range("C3").Value = "lx/t"
        .Range("D3").Formula = "=B3/B2"
        .Range("C4").Value = "axy/t"
        .Range("D4").Formula = "=B1/B2"
        .Range("C5").Value = "axy/lx"
        .Range("D5").Formula = "=B1/B3"
        .Rows(6).Insert shift:=xlDown
        .Range("A6").Value = "x"
        .Range("B6").Value = "mxx"
        .Range("C6").Value = "x*"
        .Range("D6").Value = "mxx*"
        .Range("E6").Value = "x*"
        .Range("F6").Value = "maxxx*"
        .Range("G6").Value = "x*"
        .Range("H6").Value = "minxx*"
        With .Range("A1:A5,C1:C5,A6:H6,E8:H8")
            .Font.Bold = True
```

```
    With .Interior
        .Pattern = xlSolid
        .PatternColorIndex = xlAutomatic
        .ThemeColor = xlThemeColorDark1
        .TintAndShade = -0.249977111117893
        .PatternTintAndShade = 0
    End With
End With
With .Range("A1:B5,C1:D5,A6:H6,E8:H8").Borders
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlThin
End With
‘ calculate dimensionless variables x* and mxx*
If .Range("D1").Value = 0 Then
    Set colRange = .Range("A7").Resize((.Range("B4").Value + 1) / 2)
    colRange.Offset(0, 2).Value = colRange.Value
    colRange.Offset(0, 3).Value = colRange.Offset(0, 1).Value
Else
    Set colRange = .Range("C7").Resize((.Range("B4").Value + 1) / 2)
    With colRange
        .FormulaR1C1 = "=(RC[-2]+(R3C2/2))/R1C4"
        .NumberFormat = "0.0000"
    End With
    With colRange.Offset(0, 1)
        .FormulaR1C1 = "=RC[-2]*R3C2^2/(-R5C2*R1C4^4)"      ' Mxx*l^2/(-p*lc^4)
        .NumberFormat = "0.00000"
    End With
End If
‘ determine extreme values (min&max for fixed support, only min (field) for hinged support)
If Left(wsName, 1) = "I" Then
    Set rTrg = AddressOfMax(colRange.Offset(0, 1))
    With .Range("E7")
        .Value = rTrg.Offset(0, -1).Value
        .NumberFormat = "0.0000"
    End With
    With .Range("F7")
        .Value = rTrg.Value
        .NumberFormat = "0.00000"
    End With
End If
Set rTrg = AddressOfMin(colRange.Offset(0, 1))
delta = 0
nr = 0
Do Until delta <> 0
    nr = nr + 1
    delta = rTrg.Value - rTrg.Offset(nr, 0).Value
Loop
delta = 0
If nr > 1 Then
    For j = 1 To nr
        delta = delta + rTrg.Offset(j - 1, -1).Value
    Next j
    delta = delta / nr
Else
    delta = rTrg.Offset(0, -1).Value
End If
```

```
        With .Range("G7")
            .Value = delta
            .NumberFormat = "0.0000"
        End With
        With .Range("H7")
            .Value = rTrg.Value
            .NumberFormat = "0.00000"
        End With
    End With
End Sub


Function AddressOfMin(rng As Range) As Range
    Set AddressOfMin = rng.Cells(WorksheetFunction.Match(WorksheetFunction.Min(rng), rng, 0))
End Function



Function AddressOfMax(rng As Range) As Range
    Set AddressOfMax = rng.Cells(WorksheetFunction.Match(WorksheetFunction.Max(rng), rng, 0))
End Function
```

Data omzetten naar een grafiek

```
Sub CreateChart()
‘ create chart from data, base chart is copied from source Excel file
Dim seriesNw As Series
Dim i As Integer, j As Integer, nx As Integer, teller As Integer

Application.ScreenUpdating = False

    ‘ reset the chart
    teller = 1
    wbnew.Worksheets("M-lines").Range("A:B").ClearContents
    wbnew.Worksheets("M-lines").ChartObjects(1).Activate
    With ActiveChart
        For j = .SeriesCollection.Count To 1 Step -1
            If .SeriesCollection(j).Name <> "scharnierend" And _
               .SeriesCollection(j).Name <> "ingeklemd" Then
                 .SeriesCollection(j).Delete
            End If
        Next j
    End With
    ‘ per imported worksheet: add extreme values to dataseries
    ‘ insert bending moments in graph as new dataseries
    For i = 3 To wbnew.Sheets.Count
        With wbnew.Worksheets("M-lines")
            If Left(wbnew.Sheets(i).Name, 1) = "I" Then
                teller = teller + 1
                wbnew.Sheets(i).Range("E7:F7").Copy
                .Cells(teller, 1).PasteSpecial xlPasteValues
            End If
            teller = teller + 1
            wbnew.Sheets(i).Range("G7:H7").Copy
            .Cells(teller, 1).PasteSpecial xlPasteValues
        End With
        wbnew.Worksheets("M-lines").ChartObjects(1).Activate
        With ActiveChart
```

```
            Set seriesNw = .SeriesCollection.NewSeries
            With wbnew.Sheets(i)
                nx = Int(.Range("B4").Value / 2 + 1)
                seriesNw.XValues = .Range("C7").Resize(nx)
                seriesNw.Values = .Range("D7").Resize(nx)
                seriesNw.Name = "lx=" & .Range("B3").Text & "|t=" & .Range("B2").Text & "|a="
& .Range("B1").Text
                seriesNw.MarkerStyle = -4142
                seriesNw.Format.Line.Weight = 2.25
            End With
        End With
    Next i
    ‘ insert data series for extreme values to chart
    wbnew.Worksheets("M-lines").ChartObjects(1).Activate
    With ActiveChart
        Set seriesNw = .SeriesCollection.NewSeries
        With wbnew.Worksheets("M-lines")
            seriesNw.Name = "MinMax"
            seriesNw.XValues = .Range("A2", .Range("A2").End(xlDown))
            seriesNw.Values = .Range("A2", .Range("A2").End(xlDown)).Offset(0, 1)
            seriesNw.Format.Line.Visible = msoTrue
            seriesNw.Format.Line.ForeColor.RGB = RGB(125, 96, 160)
            seriesNw.Format.Line.Transparency = 1
            seriesNw.MarkerSize = 9
            seriesNw.MarkerStyle = 3
            seriesNw.Format.Fill.ForeColor.ObjectThemeColor = msoThemeColorText1
        End With
    End With
    wbnew.Worksheets("M-lines").ChartObjects(1).Activate

Application.ScreenUpdating = True

    End Sub
```

Creëren van ANSYS-batchbestanden

```
Sub CreateBatchInputInklC()
‘ create ANSYS batch file to calculate multiple hypars from one command file
‘ ANSYS code is exported to textfile from Excel worksheet with varying parameters
‘ loop can be adapted to specific needs
Dim tsta As Double, tend As Double, lysta As Double, lyend As Double, axyste As Double
Dim axysta As Variant, axyend As Variant, t As Double, ly As Double, axy As Double
Dim outputfName As String
Dim tCell As Range, lyCell As Range, axyCell As Range, writeCells As Range, wrCell As Range
Dim wbThis As Worksheet
Dim ksi As Double, lc As Double, teller2 As Integer

On Error GoTo Errorcatch

Set wbThis = Worksheets("CrBatchInputInkl")

Close #1
‘ initialise hypar parameter boundaries
tsta = 5
tend = 80
lysta = 5000
lyend = 25000
axysta = "3ly"
```

```
axyend = "5ly"
aantal = 0
' create output textfile
outputfName = ThisWorkbook.Path & "\InklC-lx=" & lysta & "tm" & lyend & _
              "-t=" & tsta & "tm" & tend & "-axy=" & axysta & "tm" & axyend & ".txt"
Open outputfName For Output As #1
' create multiple ANSYS jobs through loop and export code to output file
With wbThis
    Set tCell = .Range("A6")
    Set lyCell = .Range("A10")
    Set axyCell = .Range("A12")
    Set writeCells = .Range("A2:A180")
    For ly = lysta To lyend Step 5000
        For axy = 3 * ly To 5 * ly Step 0.5 * ly
            For t = tsta To tend Step 45
                lc = (ly * axy * t) ^ (1 / 3)
                ksi = lc / ly
                aantal = aantal + 1
                tCell.Value = "    t = " & t
                lyCell.Value = "    ly = " & ly
                axyCell.Value = "    axy = " & axy
                For Each wrCell In writeCells
                    Write #1, wrCell
                Next wrCell
            Next t
        Next axy
    Next ly
End With
Close #1
' show user number of ANSYS jobs in output file
MsgBox (aantal)

    Exit Sub

Errorcatch:
    MsgBox Err.Description

End Sub
```

Bijlage C – Verwerking resultaten

Hieronder wordt beknopt beschreven hoe de resultaten zijn verwerkt.

Bij elke simulatie in ANSYS wordt een uitvoer-bestand in CSV-formaat (*comma separated value*) geproduceerd. Hierin worden de parameters van de simulatie weggeschreven, gevolgd door een tabel met de momenten m_{xx} (in de doorsnede $y = 0$) en de locatie x waarop dit moment is uitgelezen (zie ook bijlage A). Een voorbeeld is in onderstaande figuur gegeven.

```
axy      ,          10000.00
t        ,            777.00
lx       ,           5000.00
nx       ,             11.00
p        ,           -0.0010
    -2272.73,               234.38
    -1818.18,               -92.47
    -1363.64,              -273.29
     -909.09,              -372.71
     -454.55,              -421.54
        0.00,              -436.06
      454.55,              -421.55
      909.09,              -372.71
     1363.64,              -273.29
     1818.18,               -92.48
     2272.73,               234.37
```

Figuur C.0.1 - ANSYS-uitvoer in CSV-bestand

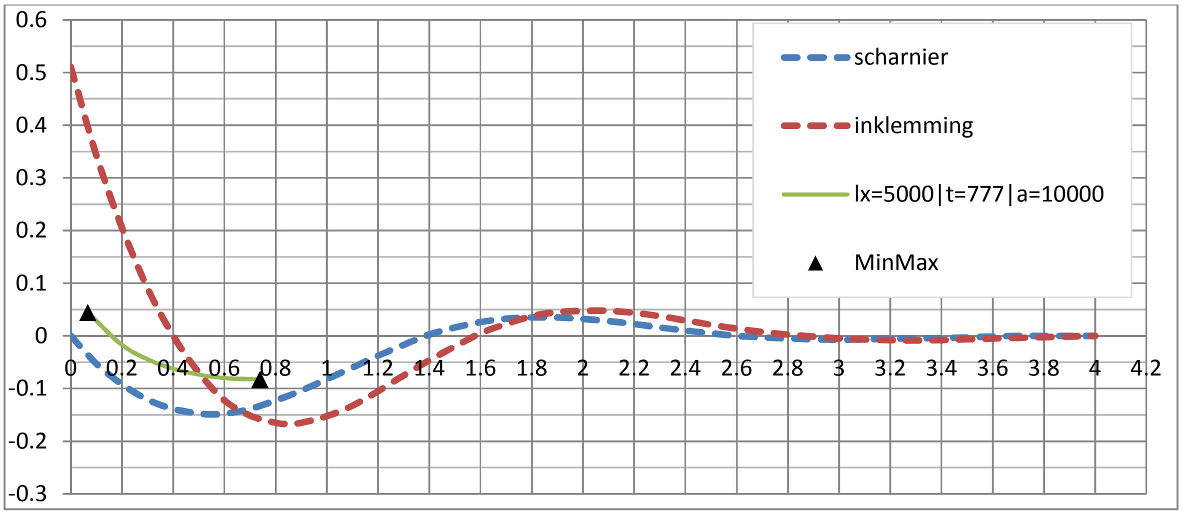
Met behulp van het VBA-script worden de waarden in de tabel vervolgens in Excel omgerekend naar de dimensieloze grootheden. Het CSV-formaat zoals in figuur C.1 wordt geimporteerd, waarna enkele extra parameters toegevoegd. Vervolgens wordt de momententabel naar dimensieloze parameters omgevormd voor de linkerhelft van de doorsnede (dus tot $x = 0$) en worden de maximale en minimale waarde bepaald. In onderstaande figuur is het resultaat weergegeven voor dezelfde CSV-uitvoer.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	**axy**	10000	**lc**	3386.858				
2	**t**	777	**ksi**	0.677372				
3	**lx**	5000	**lx/t**	6.435006				
4	**nx**	11	**axy/t**	12.87001				
5	**p**	-0.001	**axy/lx**	2				
6	**x**	**mxx**	**x***	**mxx***	**x***	**maxxx***	**x***	**minxx***
7	-2272.73	234.38	0.0671	0.04453	0.0671	0.04453	0.7381	-0.08285
8	-1818.18	-92.47	0.2013	-0.01757				
9	-1363.64	-273.29	0.3355	-0.05192				
10	-909.09	-372.71	0.4697	-0.07081				
11	-454.55	-421.54	0.6039	-0.08009				
12	0	-436.06	0.7381	-0.08285				
13	454.55	-421.55						
14	909.09	-372.71						
15	1363.64	-273.29						
16	1818.18	-92.48						
17	2272.73	234.37						

Figuur C.0.2 - ANSYS-uitvoer in Excel na bewerking

Deze worksheets met de bewerkte ANSYS-uitvoer vormen vervolgens de bron voor het creëren van de momentenlijnen en de moment-ξ-grafieken.

Bij het maken van de momentenlijnen wordt een basisgrafiek met daarin de momentenlijnen van ir. Loof geladen, waar de grafieken op basis van de ANSYS-uitvoer aan toegevoegd worden. Elke nieuwe data series wordt benoemd op basis van de naam van het CSV-bestand:



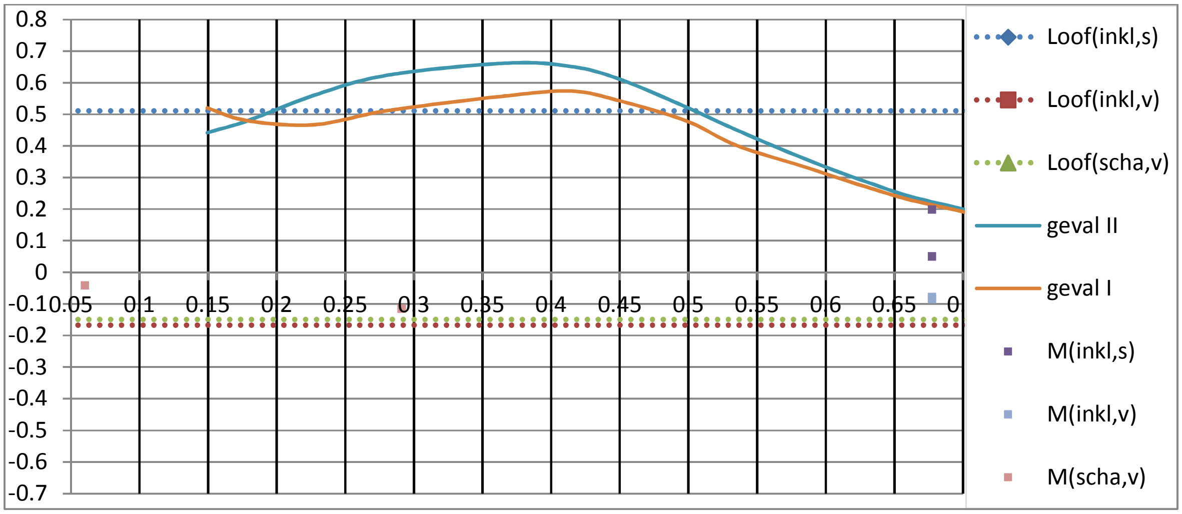
Figuur C.0.3 - Momentenlijn uit ANSYS-uitvoer

Voor de moment-ξ-grafieken worden per worksheet met ANSYS-uitvoer de waarde van de parameter ξ en de relevante extreme waarden naar een tabel gekopieerd. Bij scharnierend opgelegde schalen betreft dit slechts het minimum (het extreme veldmoment), bij ingeklemde schalen zowel het minimum als het maximum (resp. het veld- en inklemmingsmoment).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
x-as	Inkl		Scha							
ksi	M(inkl,s)	M(inkl,v)	M(scha,v)	axy	t	lx	lc	lx/t	axy/t	axy/lx
0.060254			-0.04081	32000	7	32000	1928.114	4571.429	4571.429	1
0.290991			-0.11493	32000	77	10000	2909.915	129.8701	415.5844	3.2
0.677372	0.050321	-0.08534		10000	777	5000	3386.858	6.435006	12.87001	2
0.677372	0.198391	-0.07838		10000	777	5000	3386.858	6.435006	12.87001	2

Figuur C.0.4 - Basistabel voor moment-ξ-grafiek

De momenten worden vervolgens tegenover ξ in een grafiek geplot. Ook hierbij wordt eerst een basisgrafiek geladen. Daarin zijn de extreme waarden uit de momentenlijnen (+0.511 , -0.167 en -0.149) en de curves uit de logaritmische grafiek voor geval I en II van ir. Loof al verwerkt.



Figuur C.0.5 - Moment-ξ-grafiek uit gecreëerde basistabel

Bijlage D – Praktijkvoorbeelden

In deze bijlage worden de afmetingen gegeven van enkele bestaande hypardaken. Deze afmetingen zijn deels bekend, deels geschat aan de hand van de afbeeldingen.

Zeckendorf Plaza, Denver USA

Dit betreft een uit 4 hypars samengesteld dak, waarbij voor één hypar bij benadering geldt:

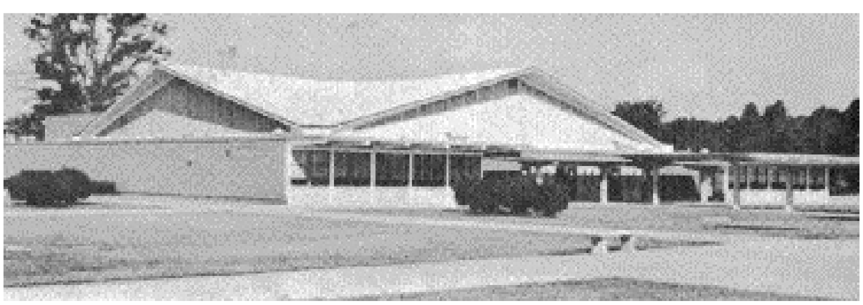
$l = 21.8\,m$ / $19{,}1\,m$, $t = 0.075\,m$, $a_{xy} = 40.3\,m$, $a_{xy}/l = 1.85$ / 2.12 , $\xi = 0.196$ / 0.218

Figuur D.0.1 - Zeckendorf Plaza, Denver USA (Handouts Shell Analysis CIE4143, 2015)

Tucker High School, Henrico County USA

Dit betreft eveneens een uit 4 hypars samengesteld dak, waarbij voor één hypar geldt:

$l = 24.0\,m$ / $25{,}1\,m$, $t = 0.09\,m$, $a_{xy} = 126.7\,m$, $a_{xy}/l = 5.27$ / 5.04 , $\xi = 0.274$ / 0.265



Figuur D.0.2 - Tucker High School, Henrico County USA (Handouts Shell Analysis CIE4143, 2015)

Paaskerk, Amstelveen

Een dak bestaand uit één hyparschaal, met geschatte afmetingen :

$l = 21.9\,m$, $t = 0.1\,m$, $a_{xy} = 30.4\,m$, $a_{xy}/l = 1.39$, $\xi = 0.187$

Figuur D.0.3 - Paaskerk, Amstelveen (Handouts Shell Analysis CIE4143, 2015)

Op basis van deze afmetingen en de daaruit volgende waarden voor ξ zijn in figuren 4.7 t/m 4.9 punten gemarkeerd voor deze constructies tussen de met ANSYS verkregen data, om zo een link met de praktijk te kunnen leggen.