

De optimale koepel

Door Bart Elferink



Datum: 12/01/10
Studienummer: 1329502
Begeleiders:
Dr.ir. P.C.J. Hoogenboom
Ir. S. Pasterkamp

Inhoudsopgave

1 Samenvatting	4
2 Inleiding	5
3 Bestaande koepels	6
4 Theorie	9
5 Grafische bepaling	11
6 Numerieke methode	13
7 Optimale koepel resultaat	23
8 Resultaat vergelijken met bestaande koepel	25
9 Conclusie	28
Bijlage A volledig matlab script	29
Bijlage B literatuurlijst	31

1 Samenvatting

Dit verslag gaat over de het proces voor het vinden van de optimale koepel. Een optimale koepel is in elke richting met de zelfde drukspanning belast, hierdoor is het materiaal gebruikt maximaal. Omdat er geen analytische methode is om dit te bepalen, wordt er voor een numerieke methode gewerkt. Hiermee wordt de koepel in kleine blokjes opgedeeld, door een computer programma te gebruiken (waarbij de stapgrootte heel klein kan worden gekozen) is dit op een nauwkeurige manier te doen. Na het bepalen van de optimale koepel wordt er een benaderingsformule gepresenteerd voor het verloop van de koepel (niet de dikte, deze hangt af van de knikeisen). Met deze formule kan de ideale vorm makkelijk worden geproduceerd, zonder de hele methode door te hoeven lopen. De benaderingsformule is; $y = \gamma * x^2 * \rho * g / f$ met $\gamma = 0.25$ voor overspanningen van 10 tot 200 meter. Hierin is f de maximaal toelaatbare drukspanning, ρ de dichtheid en g de gravitatieconstante. Hierna wordt gekeken bij welke drukspanning de koepel voor een overspanning een optimale inhoud heeft. Dit wordt gedaan met behulp van de minimale diktes die benodigd zijn voor de knik. Het theoretische optimum is jammer genoeg niet toepasbaar, omdat de diktes onrealistisch klein worden. Hierdoor wordt de optimale koepel bepaald met een minimum dikte (die wel toepasbaar is), en wordt vergeleken met enkele bestaande koepels.

2 Inleiding

Veel van de grote overspanningen die gebouwd zijn in en voor de middeleeuwen bestaan uit bogen en koepels, dit komt omdat in koepels en bogen er enkel druk optreedt en in een tijd waar er nog geen wapening werd toegepast bij stenen constructies is dit erg belangrijk. Tegenwoordig worden er nog steeds koepelconstructies gebruikt voor daken en andere doeleinden. In dit verslag wordt gezocht naar de optimale koepel geometrie. Dit wil zeggen dat er een vorm wordt gezocht waarbij er overal druk in de koepel heerst en waarbij de inhoud minimaal is. Het materiaal waar de optimale koepel voor wordt beschreven is beton, ook is de koepel monolithisch, dit wil zeggen dat hij uit 1 stuk bestaat en er dus geen metselwerk is.

3 Bestaande koepels

3.1 Inleiding

In dit onderzoek gaan we uit van een in het vlak homogene koepel, hiermee wordt bedoeld dat de koepel dus uit 1 materiaal bestaat en massief is. Meeste koepels die wordt gemaakt tegenwoordig gebruiken vakwerken van staal, omdat dit materiaal bespaart. Bij grote (overspanningen boven de 100 meter) koepels kan de vorm van de koepel goed worden vergeleken met een massieve koepel, de dikte natuurlijk niet.

3.2 Norfolk Scope

De Norfolk Scope is een stadion met 12600 zitplaatsen in Norfolk Virginia (VS), dat gebouwd was in 1971 en 35 miljoen dollar kostte. De dakconstructie, zoals te zien in de foto van het stadion, is een monolithische koepel, dit wil zeggen deze uit 1 stuk beton bestaat. Hierdoor is de dakconstructie goed te vergelijken met de optimale koepel die aan het einde van dit onderzoek wordt gevonden. De koepel heeft een overspanning van 134 m en is 33,5 meter hoog, dit is echter de hoogte de top van de koepel naar het maaiveld. De hoogte van de koepel zelf is ongeveer 10 meter (dit is een schatting, de precieze hoogte is openbaar te vinden).



Figuur 3.1 Norfolk Scope.

3. 3 Louisiana Superdome

De Louisiana Superdome is een van de grootste koepelconstructies ter wereld en is het stadion van de New Orleans Saints (American football NFL). De koepel is gemaakt van staal en maakt ook gebruik van een vakwerkconstructie om het dak te ondersteunen. Desondanks is het toch te vergelijken met het uiteindelijke resultaat van dit onderzoek, wel in mindere mate als de Norfolk Scope. De koepel heeft een overspanning van 210 meter en een hoogte van 83,3 meter. Deze hoogte is weer de hoogte van de top van het gebouw tot het maaiveld, de hoogte van de koepel zelf zal ongeveer 30 a 35 meter zijn (schatting vanuit de foto's).



Figuur 3.2 Louisiana Superdome.



Figuur 3.3 Louisiana Superdome.

3.4 Faith Chapel Christian Center

De Faith Chapel Christian Center is een kerk in Birmingham (Alabama, VS), de constructie bestaat uit een grote koepel die direct op de grond staat. De koepel is net zoals de Norfolk Scope een monolithische koepel en bestaat dus uit 1 stuk beton. De koepel is 22 meter hoog en heeft een overspanning van 85 meter. Omdat de koepel uit 1 stuk beton bestaat is deze goed te vergelijken met het resultaat van dit onderzoek. Het enige probleem is dat, doordat de koepel direct op de grond staat er misschien wegens praktische redenen gekozen is voor een hogere koepel, dan dat optimaal zou zijn qua inhoud.



Figuur 3.4 FCCC in Birmingham, AL , VS.

4 Theorie

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden een aantal dingen uitgelegd en duidelijk gemaakt over de optimale koepel, waardoor het hoofdstuk van de oplossing wat leesbaarder wordt. Dit komt, omdat door een aantal dingen van te voren al te beschrijven, er minder zijstappen genomen hoeven te worden in de uitleg. Ook is dit hoofdstuk bedoeld om de basis van optimale koepelvormen te beschrijven.

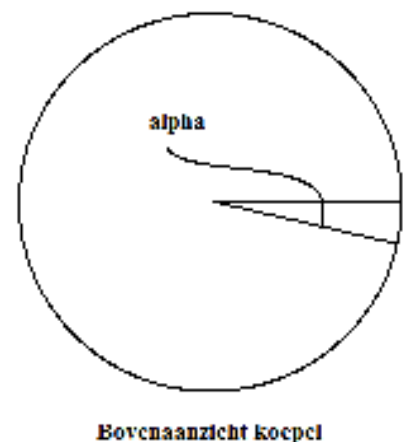
4.2 Eisen voor een optimale koepel

De eerste en meest belangrijke vraag is; wat wordt er nu precies verstaan onder een optimale koepel. In de optimale koepel moet er overal een drukspanning heersen en deze druk moet op elk punt in de koepel het elfde zijn. Dit wil zeggen dat in elke doorsnede van de koepel de gemiddelde drukspanning op de doorsnede overal gelijk moet zijn. De drukspanning mag dus wel variëren in de doorsnede zelf, bijvoorbeeld dat er meer druk op de kern van de doorsnede is als op de randen ervan. Er heerst dus overal een homogene druk in het vlak van de koepel, daardoor is de druk op elk blokje van de koepel van alle kanten gelijk. Dit wil dus zeggen dat de druk in de richting van de top naar beneden dus gelijk is aan de druk in de ring van de koepel (loodrecht op de vorige).

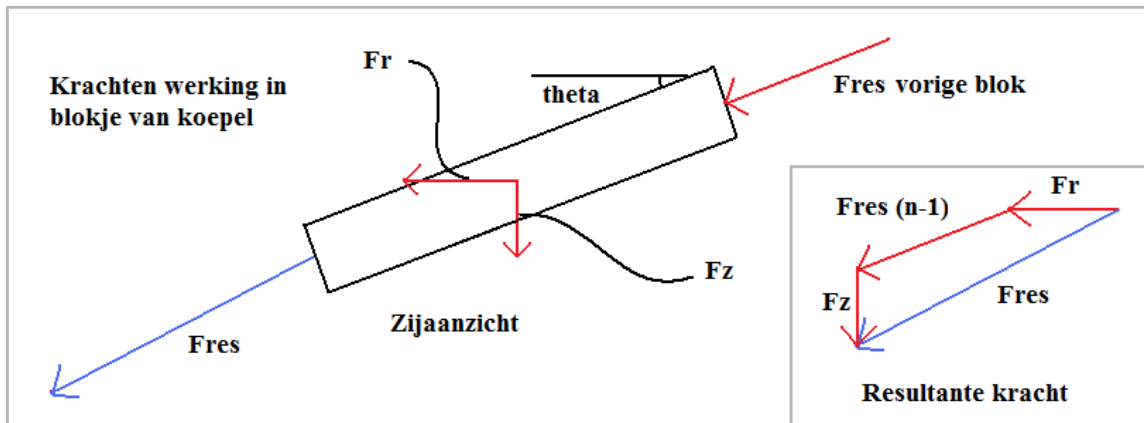
In dit onderzoek zijn we op zoek naar de optimale koepel, die alleen door zijn eigen gewicht belast wordt. Omdat hierbij 1 antwoord te vinden is (belastinggevallen kunnen verschillend zijn voor verschillende omgevingen) en omdat het eigen gewicht van een koepel de grootste belasting is. Een volgende consequentie hiervan, is dat de dikte van de koepel niet afhangt van de maximaal toelaatbare drukspanning. Dit komt omdat, een koepel van 100 mm dik het zelfde is als 10 koepels van 10 mm dik die op elkaar gestapeld zijn.

4.3 De methode

Omdat de oplossing de optimale koepel niet analytische te bepalen is, wordt er in dit onderzoek gekozen voor een numerieke methode. De makkelijkste manier om de optimale koepel te vinden is door deze in allemaal kleine blokjes op te delen. Je berekent een deel van de koepel met een vaste hoek (soort van taartpuntje van de complete koepel), deze kan dan later worden vermenigvuldigd voor de gehele koepel. De hoek van dit deel heet alpha (zie figuur). Bij deze methode wordt er begonnen met een driehoekig blokje in de top, dit wordt het 1^e blokje van de koepel. De volgende blokjes worden zo neergezet dat, de eisen van hierboven gelden. Dus de het volgende blokje wordt zo gepositioneerd en krijgt een dusdanige dikte waarbij er in elke richting de zelfde drukspanning heerst. Deze drukspanning blijft constant over de gehele koepel. Dus het tweede blokje komt voor uit de resultante kracht die blokje 1 levert, en zal dus dezelfde hoek als die kracht hebben. Op elk blokje staan dus 3 krachten; de zwaartekracht van het blokje zelf F_z , de ringkracht F_r en de normaalkracht van het vorige blok F_{res} of N . Deze hebben een resultante kracht die weer het volgende blokje bepaald, op deze manier wordt de gehele koepel bepaald. Als dit wordt gedaan met een kleine alpha en een kleine stapgrootte is dit een nauwkeurige methode.

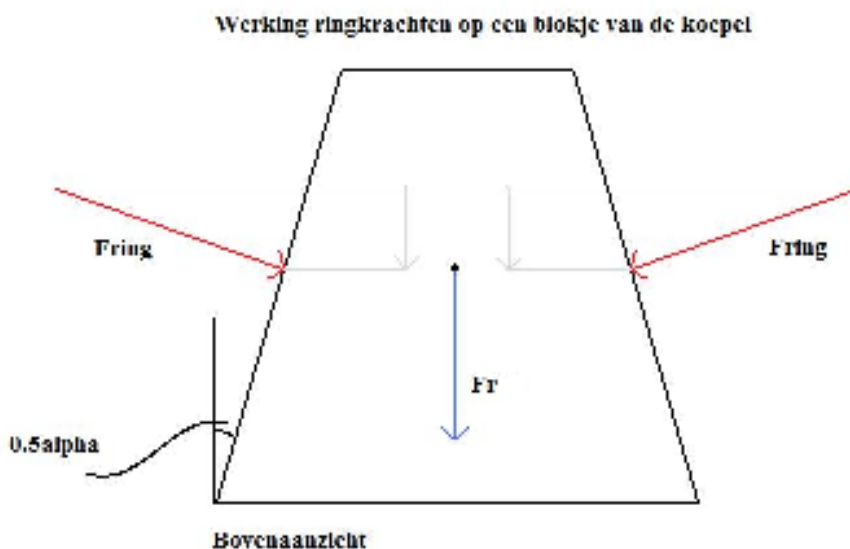


Zoals net verteld was staan er 3 krachten op elk blokje van de koepel; de zwaartekracht van het blokje zelf F_z , de ringkracht F_r en de normaalkracht van het vorige blok F_{res} of N . Hieronder staat een schets (figuur 4.1) van alle krachten op een blokje van de koepel, zoals te zien is bepalen deze drie krachten de F_{res} die op het volgende blokje staat. Het volgende blokje wordt dus in de zelfde richting geplaatst en krijgt een zodanige dikte dat de spanning in dit blok gelijk blijft aan de maximaal toelaatbare drukspanning.



Figuur 4.1 Krachtenwerking op een blokje in de koepel.

In figuur 4.2 staat hoe de resultante kracht van de ringkracht wordt bepaald. Het figuur is een bovenaanzicht van een willekeurig blokje en de resultante van de beide ring krachten F_{ring} geeft een resultante van de ringkrachten F_r .



Figuur 4.2 Resultante kracht van de ringkrachten.

Het mooie van deze methode is, dat elk deel van de gevonden koepel op zich weer een optimale koepel is. Dit komt, omdat er in de top wordt begonnen met de “bouw” van de koepel en er wordt net zolang doorgerekend tot de gewenste overspanning bereikt is, dus de eerste 25 meter van optimale koepel met een overspanning van 100 meter is hetzelfde, als een optimale koepel van 25 meter. Hierdoor hoeft er dus maar 1 tabel te worden gemaakt met de waardes van de koepel.

5 Grafische methode

5.1 Inleiding

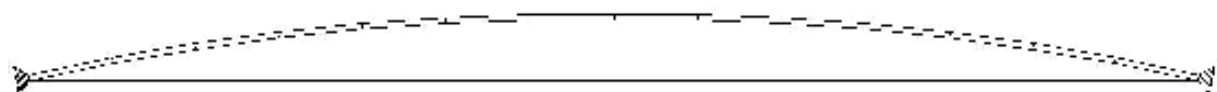
De vorm van een optimale koepel wordt eerst met de hand bepaald, om inzicht te krijgen in de methode. Ook is dit later nuttig om een numerieke methode te kunnen verifiëren. In dit stuk wordt beschreven hoe een benadering kan worden gevonden, van een optimale boog en koepel voor enkel eigen gewicht. Bij dit voorbeeld wordt b35 beton gebruikt, en voor optische redenen wordt het gewicht vertienvoudigd. Dit komt omdat een koepel of boog op alleen eigen gewicht heel erg plat is waardoor de waardes slecht zichtbaar worden. De constructie bestaat uit 14 blokjes, met een computer kan dit aantal worden opgeschroefd waardoor de benadering beter is, maar omdat dit een voorbeeld is, is dat niet nodig. Het tekenwerk is met Autocad gedaan voor praktische redenen.

5.2 Boog

Met deze methode wordt in de top van de boog begonnen, bij een optimale boog is overall een maximaal toelaatbare spanning in elke richting (in het vlak van de boog). Dus in de top moeten of een horizontale kracht H worden gekozen of een doorsnede, omdat de spanning maximaal moet zijn volgt de een uit de ander. In dit voorbeeld is gekozen van een begin doorsnede van 200 mm bij 200 mm, H wordt dus 840 kN (met rekenwaarde druksterkte van 21 N/mm^2). Verder wordt er gekozen voor delen met een lengte van 3 meter gekozen, en de gewicht van het beton is i.p.v. $23,54$, $235,4 \text{ kN/m}^3$.

Op elk blokje staat twee krachten de normaal kracht uit het vorige blokje en de zwaartekracht, in het eerste blok staat dus de kracht H en de zwaartekracht F_z (voor verticaal). De resultante kracht van deze twee is de Normalkracht $N(1)$ die op blokje 2 werkt. Met $N(1)$ kan de grootte van de doorsnede van blok 2 worden bepaald met de maximale drukspanning f . De richting van het blok 2 is natuurlijk hetzelfde als de richting van $N(1)$. Op blokje 2 staat dus ten eerste $N(1)$ en ten tweede $F_z(2)$ (gewicht van blok 2) en hier kan weer de resultante van worden bepaald, namelijk $N(2)$ die op blokje 3 werkt. Op deze manier kan dus een willekeurige optimale boog worden benaderd, die alleen afhangt van de beginwaarde van de doorsnede of de beginkracht.

In onderstaand figuur is een boog weergegeven die met deze methode is bepaald. De boog bestaat uit 14 blokken van 3 meter, heeft een overspanning van 41,688 meter en hoogte van de top is gelijk aan 2,128 meter.



In tabel 5.1 staan de waardes van elk zwaartepunt van elk blok. Met blok 1 is het blok aan de top en 7 is degene bij het scharnier (halve boog dus). Het begin van het assenstelsel is in het midden van de top, met x horizontaal en y verticaal.

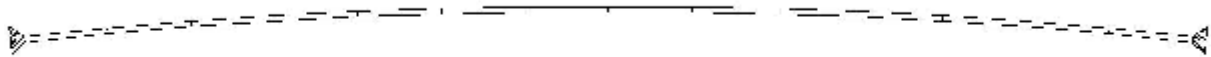
	X (m)	Y (m)	Dikte (m)	Richting (graden)
1	1,50000	0,00000	0,200000	0
2	4,49896	0,05283	0,200058	2
3	7,49381	0,20867	0,200231	4
4	10,48214	0,46472	0,200518	6
5	13,46013	0,82644	0,200918	8
6	16,42599	1,27524	0,201429	10
7	19,35279	1,82152	0,202052	12

Tabel 5.1

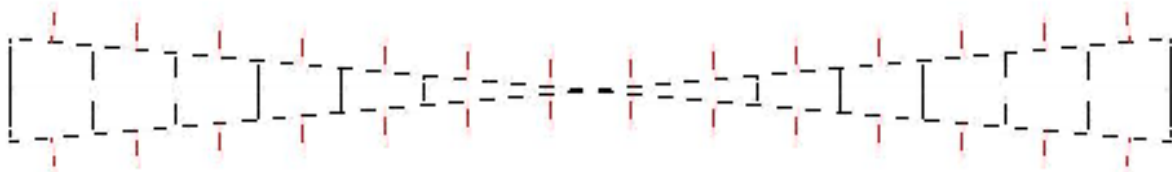
5.3 Koepel

De methode voor een koepel lijkt erg op deze van de boog, maar er zijn wel wat dingen die veranderen. Bij een koepel kijk je naar een klein deel met een vaste hoek (dus een soort taartpunt uit de gehele koepel) in dit voorbeeld is 10 graden aangenomen. Omdat er nu in de top geen oppervlak meer is, wordt er niet begonnen met een horizontale top kracht, maar een dikte voor het eerste blok (voor meer informatie zie hoofdstuk theorie). Met deze dikte kunnen de maximale ringkrachten worden berekend met behulp van de maximaal toelaatbare drukspanning f . Op elk blokje werkt dus nu de resultante van de ringkrachten Fr , de zwaartekracht Fz en de normaalkracht N van het vorige blok (met uitzondering op blok 1, omdat $N=0$). Verder gaat de methode het zelfde als deze van een boog, alleen verandert de breedte van het blok aan de hand van horizontale afstand vanaf de top.

In onderstaand figuur is de doorsnede van een optimale koepel weergegeven met de zelfde parameters als de boog. De koepel is ongeveer twee keer zo vlak als de boog, dit is ook logisch, omdat door de ringkrachten de koepel vlakker wordt. Overspanning is gelijk aan 41,923 meter en top zit op 1,056 meter.



In het onderstaand figuur is het bovenaanzicht weergegeven van het deel van de koepel die gebruikt is voor de berekening de rode lijnen zijn de ringkrachten en deze werken als druk op dit segment.



In tabel 5.2 staan de waarden van elk zwaartepunt van elk blok. Met blok 1 is het blok aan de top en 7 is degene bij het scharnier (halve koepel). Het begin van het assenstelsel is in het midden van de top, met x horizontaal en y verticaal.

	X (m)	Y (m)	Dikte (m)	Richting (graden)
1	1,50000	0,00000	0,200000	0
2	4,49958	0,02530	0,200028	1
3	7,49871	0,10072	0,200120	2
4	10,49599	0,22641	0,200298	3
5	13,49071	0,40251	0,200550	4
6	16,48706	0,62887	0,200874	5
7	19,46918	0,90537	0,201275	6

Tabel 5.2

6 Numerieke methode

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de numerieke methode beschreven, waarmee de optimale vorm en dikte van de koepel kan worden bepaald, zodat het materiaal gebruik minimaal is. Om een precieze oplossing te krijgen, moet er gebruik worden gemaakt van een rekenprogramma. Dit komt omdat de oplossing niet analytisch te bepalen is, en dus via een numerieke methode bepaald moet worden. Rekenkundige computerprogramma's zijn hier natuurlijk perfect voor, omdat de rekensnelheid dermate snel is, zodat de stapgrootte klein genoeg kan worden genomen, om een nauwkeurige benadering te vinden. Bij deze berekening is er gebruik gemaakt van het programma Matlab. In dit programma is een script gemaakt die een lijst van berekeningen uitvoert, waar uiteindelijk de complete geometrie van de koepel kan worden bepaald. Het volledige script staat in de bijlage, per kopje worden alle onderdelen en uitbreidingen van het script uitgelegd.

6.2 Script

Voor het berekenen van de koepel wordt er in de top van de koepel begonnen met de berekening, op dit eerste blokje staan de ring krachten van de koepel en de zwaarte kracht van de massa van het blokje zelf. Omdat overal in de koepel homogene druk moet zijn (zie hoofdstuk theorie), kan de resultante kracht worden bepaald die op het volgende blok wordt uitgeoefend. Hetzelfde geldt voor het tweede blokje, hier staan de kracht van het vorige blokje, de ring krachten van de koepel en de zwaarte kracht op. Hier komt weer een resultante kracht uit, die weer het volgende blokje bepaald. Omdat elke resultante kracht een grootte en een richting heeft, kan de richting en de dikte van het volgende blokje worden bepaald.

6.2.1 Loop

Het belangrijkste deel van het script is de loop, die steeds elk nieuw blokje koepel berekent. Een loop is een constructie waarmee een of meerdere berekeningen herhaald uitgevoerd worden. Dit wordt gebruikt door alle berekeningen die nodig zijn om het volgende blokje te bepalen, herhaaldelijk te doen. Dus voor n (stap) van 1 tot 10000 kan de loop dus de diktes en richtingen van blokje 1 tot 10000 uitrekenen. De loop die hier gebruikt wordt, loopt van $n=3$ tot $n=k$, met k als invoervariabele in het script, zodat er dus per keer dat het script gerund een aantal stappen kan worden gekozen. De reden dat n op 3 begint en niet op 0 of 1 komt, omdat matlab in vectoren en matrices werkt en er is geen nulde positie in een vector. En omdat bij de beginvoorwaarden de resultante kracht (van het vorige blok) op het eerste blokje gelijk aan nul moet zijn, wordt dit dus $N(1)$. En de resultante kracht van het eerste blokje $N(2)$.

Voor het berekenen van elke resultante kracht, zijn een aantal gegevens nodig die per blokje anders zijn. Ten eerste bestaat de resultante kracht uit een x -en y-component, in dit script worden de krachten als vectoren beschreven, waarbij het eerste element de x-component is. De volgende kracht $N(n,1)$ wordt dus bepaald door bij de x-component de ringkracht Fr bij op te tellen bij de vorige normaalkracht in de x-richting $N(n-1,1)$. In de y richting werkt dit het zelfde alleen hier wordt de zwaarte kracht Fz er bij opgeteld. De regels voor de volgende kracht in de loop zijn dus:

$$\begin{aligned} N(n, 1) &= Fr(n) + N(n-1, 1) ; \\ N(n, 2) &= Fz(n) + N(n-1, 2) ; \end{aligned}$$

De ringkracht $Fr(n)$ van blokje n wordt bepaald door de lengte l , de dikte $d(n)$, de maximaal toelaatbare drukspanning f en α de hoek van het deel van de koepel dat wordt berekent. Voor uitgebreidere uitleg zie hoofdstuk theorie.

```
Fr(n)=d(n)*l*2*sin(0.5*alpha)*f;
```

F_z volgt uit de inhoud van het blokje ($i(n)$) en het soortelijk gewicht van het bouw materiaal ($\rho \cdot g$, in script ρ),

```
Fz(n)=i(n)*rho;
i(n)=2*x(n)*sin(0.5*alpha)*d(n)*l;
```

De inhoud $i(n)$ volgt uit de lengte l (oftewel de stapgrootte), de dikte $d(n)$ en de gemiddelde breedte van het blokje ($2 \cdot x(n) \cdot \sin(0.5 \cdot \alpha)$), met $x(n)$ de x -coördinaat van het middenpunt blokje n en α de hoek van het deel van de koepel dat wordt berekent. De dikte $d(n)$ volgt uit de resultante kracht van het vorige blokje $N(n-1)$, deze wordt gedeeld door de maximaal toelaatbare drukspanning en de breedte van het blokje ($r(n) \cdot 2 \cdot \sin(0.5 \cdot \alpha)$) met $r(n)$ is de afstand van het begin van het blokje naar het middel punt van de koepel, samen met de hoek α kan worden bepaald wat de breedte is. Als dit bekend is volgt de dikte van het volgende blokje, omdat overal in de koepel er in het vlak een drukspanning van f moet heersen (zie hoofdstuk theorie). $\text{Norm}(N(n-1,:))$ geeft de lengte van de vector die nodig is, om de grootte van de resultante kracht te berekenen.

```
d(n)=(norm(N(n-1,:)))/(f*r(n)*2*sin(0.5*alpha));
r(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1));
```

De x -en y -coördinaten volgen uit de richting van de resultante kracht van het vorige blokje. De hoek van deze richting is θ , en kan eenvoudig worden berekent door de inverse $\tan$ te nemen van N_y/N_x . Hier na zijn de nieuwe x -en y -coördinaten te berekenen door:

```
theta(n)=atan(N(n-1,2)/N(n-1,1));
x(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1))+0.5*l*cos(theta(n));
y(n)=y(n-1)+0.5*l*sin(theta(n-1))+0.5*l*sin(theta(n));
```

Hieronder staat de loop die gebruikt wordt in het script. De volgorde van de formules is zo geordend zodat het zo snel mogelijk gaat. Dit komt omdat bij elke regel er geen onbekende achter het $=$ teken staan, waardoor het programma er minder moeite mee heeft. In de laatste regel wordt Sumi berekent dit zit er bij om alle i 's op te tellen, zodat aan het einde de totale inhoud van de koepel kan worden bepaald.

```
for n=3:k;

r(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1));
d(n)=(norm(N(n-1,:)))/(f*r(n)*2*sin(0.5*alpha));
Fr(n)=d(n)*l*2*sin(0.5*alpha)*f;
theta(n)=atan(N(n-1,2)/N(n-1,1));
x(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1))+0.5*l*cos(theta(n));
y(n)=y(n-1)+0.5*l*sin(theta(n-1))+0.5*l*sin(theta(n));
i(n)=2*x(n)*sin(0.5*alpha)*d(n)*l;
Fz(n)=i(n)*rho;
N(n,1)=Fr(n)+N(n-1,1);
N(n,2)=Fz(n)+N(n-1,2);
Sumi(n)= Sumi(n-1)+i(n);

end;
```

6.2.2 Beginvoorwaarden

Omdat in de loop steeds waarden van het vorige blokje nodig zijn, moeten voor de loop een aantal begin waarden worden ingevuld. Zoals eerder in dit hoofdstuk stond, bestaat er geen nulde positie in matlab waardoor het eerste segment van de koepel in dit script blokje 2 is ipv 1. Hieronder staan de begin voor waarden van het script, waar alle waarden van het eerste blokje worden berekent, dit gaat op de zelfde wijze als de berekeningen in de loop, op een paar kleine verschillen na. Omdat het eerste blokje niet trapeziumvormig is maar de vorm van een driehoek heeft, wordt de inhoud op een iets andere manier bepaald.

```
x(2)=0.5*1;
y(2)=0;
theta(2)=0;
i(2)=d(2)*l^2*pi*(alpha/(2*pi));
Sumi(2)=i(2);

N(1,1)=0;
N(1,2)=0;

Fr(2)=1*d(2)*f*2*sin(0.5*alpha);
Fz(2)=1*d(2)*(alpha/(2*pi));
N(2,1)=Fr(2);
N(2,2)=Fz(2);
```

6.2.3 Aansturing

De beginvoorwaarden samen met de loop geeft de kern van het script, het volgend wat nu moet worden toegevoegd is de aansturing van het script en commands voor de gewenste output. Het script wordt aangestuurd door de command `koepelEG(dbegin,rho,f,l,j)` in de commandwindow van matlab te runnen. Hier moeten natuurlijk waarden worden ingevuld voor `dbegin`, `rho`, `f`, `l` en `j` met `dbegin` als de begin dikte en `j` als het aantal stappen. Voor de hoek van het deel van de koepel die wordt berekent wordt altijd 1 graad gekozen, dit is nauwkeurig genoeg, want kleiner kiezen maakt niet uit in de uitkomsten. Na de loop staat een simpel plot command die een plot maakt van de `x` en `y` waarden.

```
function koepelinfo1000 = koepelEG(dbegin,rho,f,l,j)
format('longEng')

k=j+1;

alphadegree=1;
alpha=(pi*alphadegree)/(180);

d(2)=dbegin;

(begin vw's)
(loop)

plot(x,y)
axis equal
```

Hieronder staan de aansturing, beginvoorwaarden, de loop en de output bij elkaar zoals ze ook in het script staan, dit is de basis van script. De komende paragrafen wordt dit script nog verder uitgebreid. Dit script is getest op de uitkomsten van de grafische bepaling van de koepelvorm en met invoer van de zelfde parameters komt dezelfde koepel uit het script. Hierdoor is dus te zeggen dat het script in ieder geval geen fouten heeft ten opzichte van de grafische bepaling.

```
function koepelinfo1000 = koepelEG(dbegin, rho, f, l, j)
format('longEng')

k=j+1;

alphadegree=1;
alpha=(pi*alphadegree)/(180);

d(2)=dbegin;

x(2)=0.5*l;
y(2)=0;
theta(2)=0;
i(2)=d(2)*l^2*pi*(alpha/(2*pi));
Sumi(2)=i(2);

N(1,1)=0;
N(1,2)=0;

Fr(2)=l*d(2)*f^2*sin(0.5*alpha);
Fz(2)=l*d(2)*(alpha/(2*pi));
N(2,1)=Fr(2);
N(2,2)=Fz(2);

for n=3:k;

r(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1));
d(n)=(norm(N(n-1,:)))/(f*r(n)^2*sin(0.5*alpha));

Fr(n)=d(n)*l^2*sin(0.5*alpha)*f;
theta(n)=atan(N(n-1,2)/N(n-1,1));

x(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1))+0.5*l*cos(theta(n));
y(n)=y(n-1)+0.5*l*sin(theta(n-1))+0.5*l*sin(theta(n));
i(n)=2*x(n)*sin(0.5*alpha)*d(n)*l;
Fz(n)=i(n)*rho;

N(n,1)=Fr(n)+N(n-1,1);
N(n,2)=Fz(n)+N(n-1,2);

Sumi(n)= Sumi(n-1)+i(n);

end;

plot(x,y)
axis equal
```

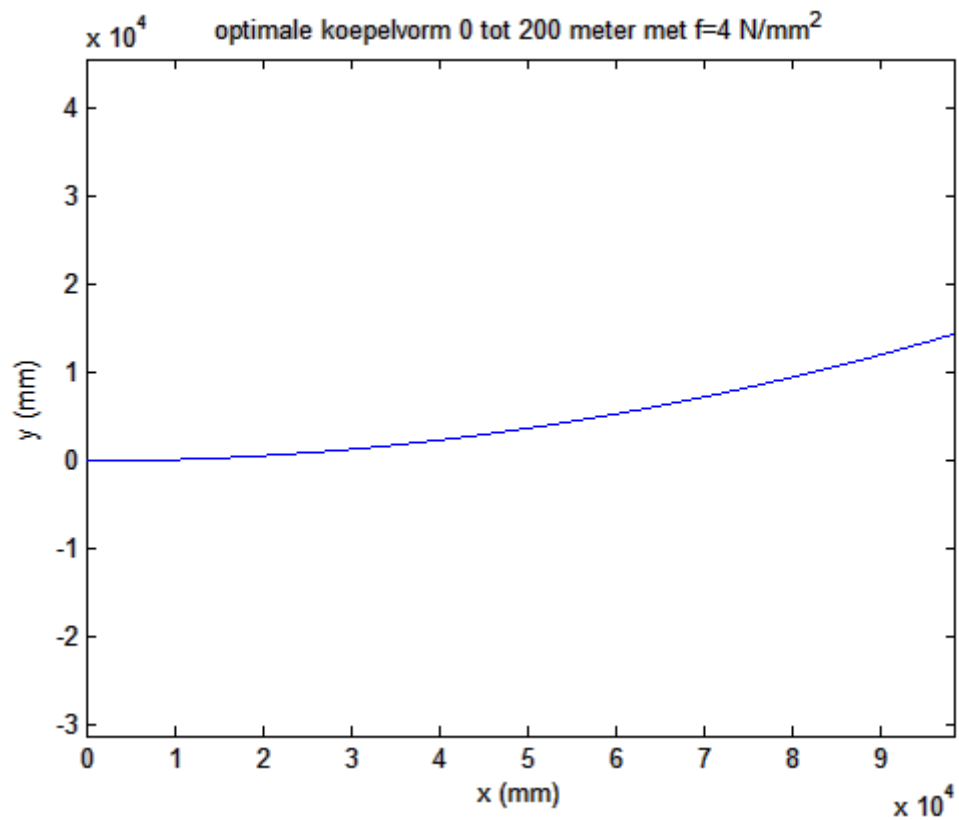
6.3 Optimale vorm

Met het script is de vorm te bepalen voor de optimale koepel, deze is alleen nog onafhankelijk van een begindikte, dit komt omdat de koepel alleen op eigengewicht wordt belast (zie hoofdstuk theorie). Daarom wordt er gekozen voor een begindikte van 1, verder kiezen we voor B35 betoon met als maximaal toelaatbare drukspanning 4 N/mm^2 , dit is voor beton een gangbare maximaal toelaatbare centrische druk. Het theoretische maximum is gelijk aan 28 N/mm^2 , maar om ook rekening te houden met 2^e orde effecten en een buffer in te bouwen is 4 N/mm^2 een veilige keuze. De soortelijke massa van B35 $\rho \cdot g$ (in het script gewoon ρ) is gelijk aan $235 \cdot 10^{-7} \text{ N/mm}^3$. Het script wordt gerund tot een overspanning van bijna 200 meter, omdat dit de overspanning is waar alle koepels onder zitten die geen vakwerkconstructies zijn van staal zijn.

Dus met het command `koepelEG(1,235e-7,4,5,20000)`, kunnen alle waardes van koepel worden berekend. Hieronder staat tabel 6.1 met de x -en y-coördinaten en de bijbehorende diktes van de koepel. De tabel neemt vrij grootte stappen, de tussen waardes zijn er wel, maar voor de leesbaarheid zijn deze hier weggelaten. Elk deel van de optimale koepel zoals in het hoofdstuk theorie staat, is een optimale koepel. Dus stel dat er een koepel met een overspanning van 60 meter moet worden gemaakt, dan gelden dus de waardes uit de tabel tot $x = 30$ meter (halve overspanning).

x (mm)	y (mm)	d (tov begin d)
4997,3	38,1	1,00124
9996,1	148,3	1,00189
14992,6	331,8	1,00297
19986,0	588,5	1,00449
24975,1	918,4	1,00643
29958,8	1321,1	1,00882
34936,1	1796,6	1,01164
39905,9	2344,6	1,01490
44867,3	2964,7	1,01860
49819,1	3656,7	1,02275
54760,4	4420,2	1,02735
59690,2	5254,8	1,03240
64607,6	6160,0	1,03791
69511,4	7135,4	1,04387
74401,0	8180,5	1,05030
79275,2	9294,8	1,05720
84133,2	10477,7	1,06457
88974,1	11728,6	1,07242
93797,2	13046,9	1,08076
98601,5	14432,0	1,08959

Tabel 6.1



Figuur 6.1

In figuur 6.1 zijn de x en y waarden tegen elkaar uitgezet, de reden dat de koepel ondersteboven in de grafiek staat komt doordat in koepel een assenstelsel gekozen is met de y-as naar beneden gericht.

6.4 Benaderingsformule

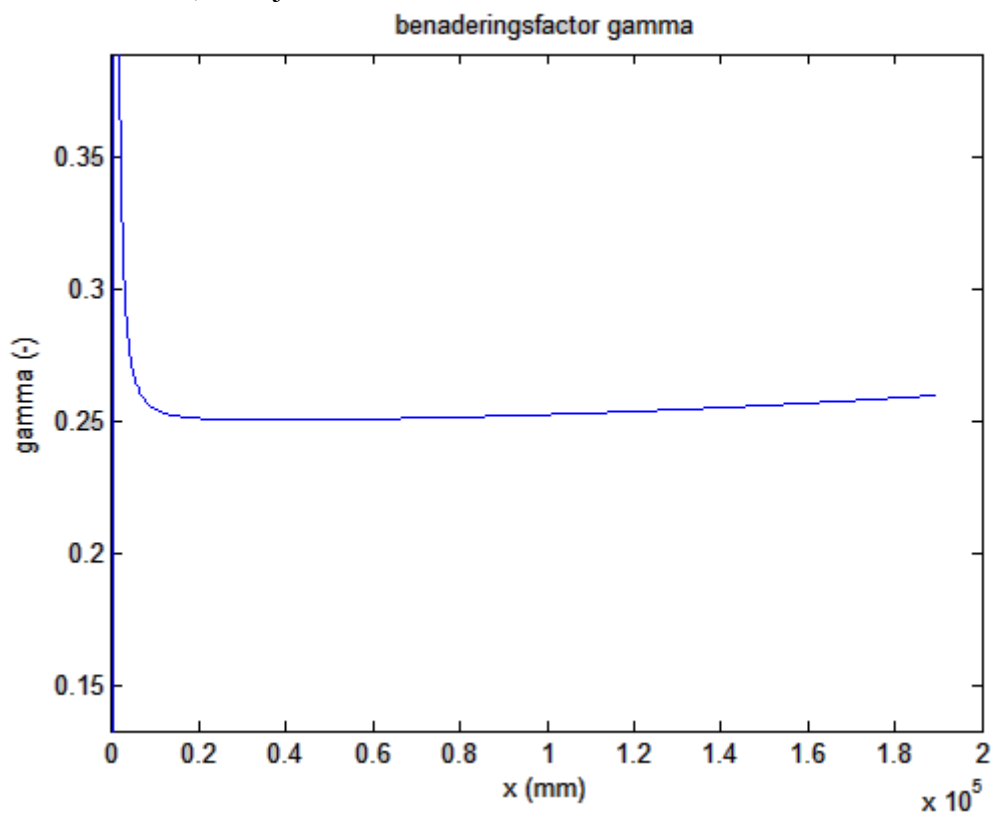
De vorm van de koepel kan worden benaderd met een formule, deze formule geldt niet voor alle overspanningen, maar geldt wel voor alle koepels met overspanningen van tussen ongeveer 10 en 200 meter. De vorm van de koepel kan worden benaderd met:

$y = \gamma * x^2 * \rho * g / f$ met $\gamma = 0.25$ voor overspanningen van 10 tot 200 meter. Een overspanning van 200 is ook het maximum, waarbij monolithische koepels van beten efficiënt zijn (in vergelijking tot andere materialen). Deze benadering is vrij nauwkeurig hieronder staan in tabel 6.2 voor elke overspanning de waarde van γ .

x (mm)	y (mm)	gamma
19978,5	591,8	0,2524
39898,4	2347,4	0,2510
59682,8	5257,0	0,2512
79267,9	9296,3	0,2518
98594,4	14432,8	0,2527

Tabel 6.2

In figuur 6.2 is te zien dat de waarde van γ tot $x=100$ (dus overspanning van 200 meter), net iets boven de 0,25 blijft.



Figuur 6.2 benaderingsfactor gamma.

6.5 Knik

Tot nu toe is de minimale dikte van de koepel nog niet bepaald, deze wordt bepaald door het risico op knikken. De vergelijking voor knik in het vlak bij koepelvormige constructies is gelijk aan:

$$\sigma_{cr} = (0.1 * E * t) / a$$

Met σ_{cr} is gelijk aan de maximaal toelaatbare optredende drukspanning, E de elasticiteitsmodulus, t de dikte en a de straal van de kromming, de 0.1 is een veiligheidsfactor. Wanneer deze formule wordt omgedraaid kan dus de minimale dikte worden bepaald.

$$t = (\sigma_{cr} * a) / (0.1 * E)$$

Wanneer dit in het script wordt toegevoegd in de loop, kan hiermee de benodigde begindikte worden bepaald en de inhoud van de koepel. Dit gebeurt door elke iteratie de straal van de kromming a uit te rekenen en deze terug te rekenen naar de benodigde begin dikte door deze te delen door de huidige d (deze is de dikte, wanneer de begindikte gelijk aan 1 zou zijn).

```
dtheta(n) = theta(n) - theta(n-1);
koepelR(n) = 0.5 * l / tan(0.5 * dtheta(n));
dbeginknik(n) = (((f * (koepelR(n)) / (E * 0.1)))) / (d(n));
```

Hierin is koepelR(n) de straal van de kromming van de koepel a en dbeginknik(n) de benodigde begindikte van de koepel die volgt uit de knikvoorwaarde van het blokje n. Hieronder staan de benodigde begindiktes per x coördinaat in de koepel. Hier is d toegepast dus de uiteindelijke dikte van de koepel, de waarden zijn voor een maximale drukspanning van $f = 2 \text{ N/mm}^2$.

x (mm)	dbeginknik(mm)	Aantal maal de begindikte	d toegepast(mm)
9989,2	109,417	1,008	110,249
19949,1	109,024	1,018	111,392
29841,3	108,538	1,036	113,312
39633,8	107,884	1,060	116,033
49297,1	107,061	1,093	119,587
58804,2	106,073	1,133	124,018
68131,6	104,929	1,182	129,379
77259,4	103,637	1,241	135,735
86171,0	102,209	1,308	143,162
94853,7	100,655	1,387	151,751

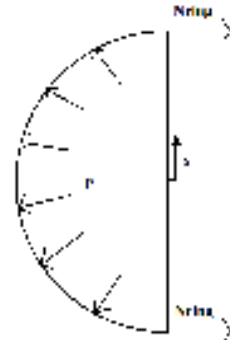
Tabel 6.3

Zoals te zien is in tabel 6.3, is de benodigde begindikte afhankelijk van het eerste stuk van de koepel dit is in elk geval zo, daarom wordt in het script automatisch voor de dbeginknik van 5 meter gekozen. De reden dat dit vanaf 5 meter is, is omdat er in de eerste aantal stappen nog onnauwkeurigheden kunnen optreden in het bepalen van de benodigde begindikte (door de numerieke methode). Als de dikte wordt gekozen voor de knikvoorwaarden op 5 meter kunnen er geen problemen optreden.

6.6 Trekring

Bij de oplegging moeten de spatkrachten van de koepel worden tegengewerkt, daarvoor wordt een ring om de rand van de koepel heen gebouwd. In deze betonnen trekking wordt de kracht via wapening afgedragen. Voordat de optimale inhoud kan worden berekend moet ook de inhoud van de trekking worden berekend, omdat deze bij vlakke koepels groter is dan bij bolle. Voor de wapening in de trekking is er gekozen voor FeB 400 HWL wapeningsstaal, dit heeft een treksterkte f_y van 350 N/mm^2 . De normaalkracht in de ring wordt bepaald door druk die op de ring staat en is gelijk aan p (druk) * $x(n)$ (de straal), zie schets hiernaast. De druk p is gelijk aan de dikte $d(n)$ maal de horizontale component van de drukspanning dit is gelijk aan $f \cdot \cos(\theta)$ met θ als de hoek van het laatste stuk van de koepel. Hieronder staat de toevoeging in de loop voor het berekenen van de inhoud van de trekking

```
Nring(n)=x(n)*d(n)*f*cos(theta(n));
As(n)=Nring(n)/(fy);
Ab(n)=As(n)/w;
Iring(n)=Ab(n)*x(n)*2*pi;
```



Wanneer de normaalkracht in de ring N_{ring} bepaald is, kan de benodigde wapeningsdoorsnede A_s bepaald worden. Deze wordt bepaald door de treksterkte van het wapeningsstaal f_y . Hierna wordt de doorsnede van de trekking A_b berekend, deze is namelijk de doorsnede van de wapening A_s gedeeld door het wapeningspercentage w . Nu de doorsnede bekend is, kan gemakkelijk de inhoud van de ring worden uitgerekend door A_b te vermenigvuldigen met de omtrek van de ring ($x(n) \cdot 2 \cdot \pi$).

Om te kijken hoe groot het deel van de inhoud van de trekking op de totale inhoud, is de inhoud van de grootst mogelijke trekking bepaald. Dat wil zeggen de grootst mogelijke binnen de parameters van dit onderzoek, dus met een overspanning van 200 meter. Dit is vooral om een inschatting te geven van het deel van de inhoud die door de trekking wordt bepaald, en om te kijken of deze een grootte heeft die toepasbaar is. Voor de grootst mogelijke trekking wordt 4 N/mm^2 aangehouden, omdat de meest vlakke koepel oplevert en daarmee de meest grootte doorsnede van de ring. De doorsnede van de ring is gelijk aan 117737 mm^2 dit is dus ongeveer een ring met een doorsnede van 400 mm bij 300 mm, wat makkelijk toe te passen is. Omdat deze doorsnede vrij klein is vergeleken met de doorsnede van de gehele koepel, is de inhoud ook maar een fractie van het totaal. De inhoud van de ring is namelijk 72 m^3 en de totale inhoud is gelijk aan 14391 m^3 . De inhoud van de ring is dus maar 0,5% van het totaal, dit komt door de knik deze koepel een begindikte van 440 mm heeft. Hieronder in de tabel staan de verdere gegevens van de koepel. Bij bollere koepels is het aandeel van de trekking qua inhoud vergelijkbaar klein.

x (mm)	y (mm)	d (mm)
9994	150	440
19983	590	441
29956	1322	443
39903	2346	446
49817	3658	449
59688	5256	454
69509	7136	459
79273	9295	464
88972	11729	471
98599	14432	479

Tabel 6.4

6.7 Optimale inhoud

De optimale inhoud is te vinden door de drukspanning te laten variëren, hierdoor wordt de koepel vlakker of bollender en tussen compleet vlak en oneindig hoog is er een optimum te vinden. Door de knikvoorwaarden hebben koepels die vlakker zijn een dikkere doorsnede, omdat de straal van de kromming groter wordt, hierdoor is er een optimum te vinden. Elke overspanning heeft zijn eigen optimale vorm, dit wil zeggen dat elke overspanning zijn eigen maximaal toelaatbare druksterkte heeft, waarbij een vorm hoort. Dit in tegenstelling tot de vorige oplossing zonder knik waarbij er 1 oplossing is voor de optimale koepel. Hierbij is dus de eerste 25 meter van de optimale koepel voor 100 meter exact hetzelfde als de eerste 25 meter van een koepel van 25 meter. En dit geldt dus niet voor de optimale inhoud van de koepel.

Het optimum kan alleen een theoretisch optimum zijn of ook een realiseerbare constructie. Dit hangt af van de dikte van de koepel, stel dat deze in de top 1 cm is, dan kan deze koepel natuurlijk niet kunnen worden gerealiseerd. Wanneer er een optimum ontstaat dat niet kan worden gerealiseerd, wordt er een vaste begindikte gekozen en gekeken wat bij die overspanning de optimale vorm is met die begindikte.

Voor overspanningen van 0 tot 200 meter staan hieronder in tabel 6.5, de optimale koepels beschreven. $x(n)$ is hier weer de laatste x-coördinaat en dus de halve overspanning.

$x(n)$ (m)	$y(n)$ (m)	f (N/mm ²)	$dbegin$ (m)
100	55,42	1,2	0,039
75	41,50	0,9	0,021
50	27,70	0,6	0,009
25	13,86	0,3	0,002

Tabel 6.5

Het enige probleem is dat de diktes niet realiseerbaar zijn, en dit dus een theoretisch optimum is. Daarom moet er een minimale begindikte worden toegepast. Als minimale dikte voor beton is 200 mm een veilige keuze, hiermee is er genoeg ruimte voor imperfecties in het materiaal en voor extra belasting zoals personen die op de koepel lopen voor onderhoud.

Bij een maximale drukspanning van $2,7 \text{ N/mm}^2$ is de inhoud van de koepel minimaal, bij deze drukspanning is de minimale begindikte wegens de knikvoorwaarde precies gelijk aan 200 mm. Omdat bij een maximale drukspanning van 4 N/mm^2 de begindikte 440 mm was en is de inhoud groter dan bij $f = 2,7 \text{ N/mm}^2$. Omdat een koepel met $f = 2,7 \text{ N/mm}^2$ het dichtst bij het theoretische optimum zit is dit het optimum wat toepasbaar is. In het volgende hoofdstuk wordt de optimale koepelvorm beschreven.

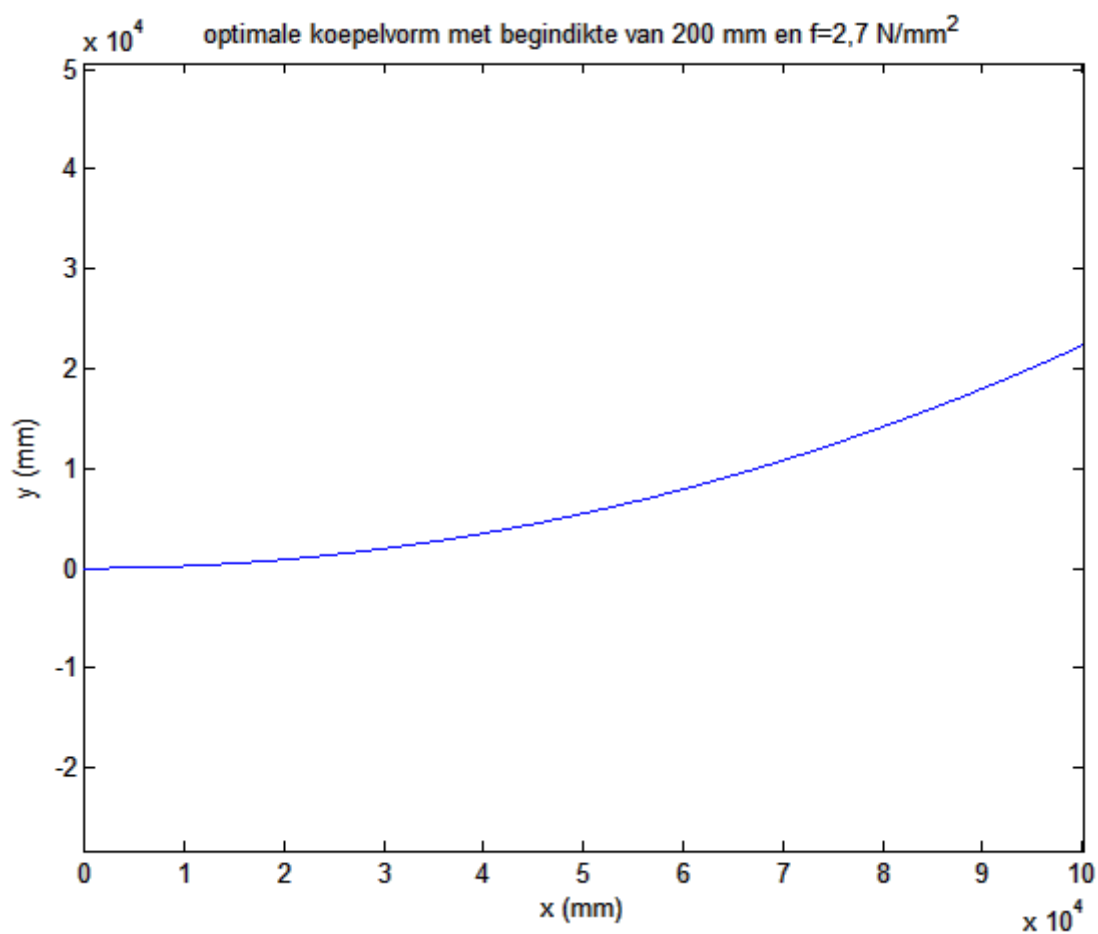
7 Optimale koepel resultaat

Zoals in het vorige hoofdstuk is verteld, heeft de optimale koepel een maximaal toelaatbare drukspanning $2,7 \text{ N/mm}^2$ voor een minimale dikte van 200 mm. Hieronder staat in een tabel de waarden van de koepel weergegeven. Als een constructeur dus een koepel wilt bouwen met een overspanning van 120 meter, dan kan hij met de benaderingsformule en de gevonden gamma's uit de tabel de koepel construeren. De constructeur zou dan dus bij $x(n) = 60$ stoppen. De waarden van de dikte kunnen worden geïnterpoleerd.

x (mm)	y (mm)	d (mm)	gamma
5163	60	200,7	0,260
10326	234	201,0	0,253
15484	524	201,6	0,251
20634	930	202,3	0,251
25773	1450	203,2	0,251
30900	2085	204,3	0,251
36011	2833	205,6	0,251
41105	3694	207,2	0,251
46179	4666	209,0	0,251
51230	5749	210,9	0,252
56256	6941	213,1	0,252
61256	8240	215,6	0,252
66227	9646	218,2	0,253
71167	11156	221,1	0,253
76075	12770	224,2	0,254
80948	14484	227,6	0,254
85785	16298	231,2	0,254
90584	18209	235,1	0,255
95344	20216	239,2	0,256
100064	22316	243,6	0,256

Tabel 7.1

In figuur 7.1 staat het verloop van de koepel weergegeven in een grafiek.



Figuur 7.1 Verloop optimale koepel.

In het onderstaand figuur staat de doorsnede van de koepel in het totaal, om een impressie te geven hoe deze er in het totaal uit ziet.

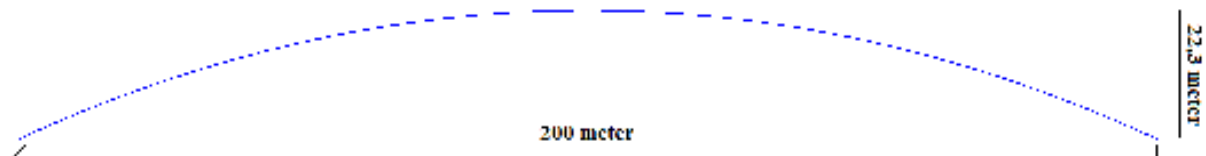


Figuur 7.2 Impressie optimale koepel.

8 Resultaat vergelijken met bestaande koepels

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden drie bestaande koepels vergeleken met het resultaat van het onderzoek. Dit is om te kijken of de bestaande koepels er op lijken en zo niet, waarom ze niet op de oplossing lijken. De drie koepels waar naar gekeken wordt zijn beschreven in het hoofdstuk “bestaande koepels”. Hieronder staat in een figuur voor de duidelijkheid nog een de optimale koepel gegeven tot een overspanning van 200 meter.



Figuur ..

8.2 Norfolk Scope

De Norfolk Scope heeft een overspanning van 134 m en is ongeveer 10 meter hoog. Als er wordt gekeken in tabel .. is te zien dat bij een overspanning van 134 m ($x(n) = 67$ meter) een hoogte van 9,6 meter hoort. Dit komt dus aardig overeen met de afmetingen van het monolithische koepelgedeelte van de Norfolk Scope. Hoewel zoals ook op de foto te zien is heeft de Norfolk Scope misschien een iets bollere koepel, maar de vorm komt zeer overeen met het resultaat van het onderzoek.



Figuur 8.1 Norfolk Scope

8.3 Louisiana Superdome

De Louisiana Superdome heeft een overspanning van 210 meter en een hoogte van 30 a 35 meter. Dit is vergeleken met de optimale koepel, ook een wat bollere koepel. De hoogte was 23 meter bij een overspanning van 200 meter, dus zou in de buurt van 25 meter zijn bij een overspanning van 210 meter. Dus ook de Superdome is boller dan het gevonden optimaal, dit komt waarschijnlijk door de gekozen minimum dikte van de koepel. Wanneer deze namelijk kleiner wordt gekozen is de optimale koepel vorm boller. Het kan ook komen door het materiaal, omdat de Superdome namelijk bestaat uit een stalen vakwerk constructie. De vorm van de koepel komt wel erg overeen met het gevonden resultaat.



Figuur 8.2 Louisiana Superdome

8.4 Faith Chapel Christian Center

De FCCC koepel is 22 meter hoog en heeft een overspanning van 85 meter, bij het gevonden optimaal was dit een hoogte van 4 meter. Deze koepel is duidelijk een stuk bolliger, dan het gevonden optimaal. Dit komt vooral door praktische en esthetische redenen, want bij een koepel met een hoogte van 4 meter zou totaal niet praktisch zijn. Omdat bij dit gebouw de koepel niet alleen het dak is van de constructie, zoals bij de Scope en de Superdome, is het ook belangrijker wat de nuttige hoogte binnen is. De FCCC is bedoelt als een grote conventie hal van binnen en heeft dus een veel grotere hoogte nodig dan 4 meter. Ook zijn materiaalkosten van de koepel natuurlijk maar een klein deel van de totale kosten van de constructie. Dus als de opdrachtgever het mooier en praktischer vind om een bollere koepel te hebben, hoeft dit niet extreem veel meer te kosten.



Figuur 8.3 FCCC

8.5 Conclusie

Niet alle drie de bestaande koepels waren goed te vergelijken met het gevonden optimaal van dit onderzoek. De FCCC was waarschijnlijk niet gebouwd, met de intensie om de optimale koepel qua inhoud te gebruiken, maar meer op bruikbaarheid van de ruimte. De andere twee koepelconstructies waren wel goed te vergelijken, omdat in beide gevallen de koepel alleen het dak van de constructie was en dus niet afhankelijk was van de hoogte onder de koepel. Hierdoor waren deze koepels wel gemaakt met als intensie een koepel te bouwen met zo min mogelijk inhoud, want hoe minder inhoud de koepel heeft hoe lichter hij ook is voor de rest van de constructie. Daarom is het mooi dat de Norfolk Scope qua afmetingen erg op het gevonden resultaat lijkt, omdat dit met hetzelfde materiaal gemaakt is als de koepel in dit onderzoek. Het feit dat de Superdome wat minder op de optimaal van dit onderzoek lijkt, zou aan het materiaal kunnen liggen. De vorm van de Superdome lijkt wel op de vorm van het gevonden optimaal.

9 Conclusie

De optimale koepelvorm qua inhoud is afhankelijk van wat toepasbaar is per materiaal. Er is gevonden dat het theoretische optimum voor beton niet toepasbaar is wegens materiaal restricties. Maar als er een minimum dikte wordt toegepast, kan er een optimum worden gevonden voor de inhoud van de koepel. De optimale koepelvorm die uit dit onderzoek is gekomen is te benaderen met de formule; $y = \gamma * x^2 * \rho * g / f$ met $\gamma = 0.25$ voor overspanningen van 10 tot 200 meter. Hierbij is $f = 2,7 \text{ N/mm}^2$ en de dikte van de koepel gaat van 200 mm in de top, en naar 250 mm bij de rand (overspanning 200 meter). Ook is bevonden dat de trekkring van de koepel maar een klein gedeelte van de inhoud inneemt en daarom niet significant is voor de totale inhoud. De al bestaande koepels waren allemaal iets boller dan het gevonden optimum, dit zou kunnen komen door 2^e orde effecten die in dit onderzoek niet mee waren genomen.

Hieronder staat in tabel 9.1 de waardes van de optimale koepel met een minimale toepasbare dikte van 200 mm.

x (mm)	y (mm)	d (mm)	gamma
5163	60	200,7	0,260
10326	234	201,0	0,253
15484	524	201,6	0,251
20634	930	202,3	0,251
25773	1450	203,2	0,251
30900	2085	204,3	0,251
36011	2833	205,6	0,251
41105	3694	207,2	0,251
46179	4666	209,0	0,251
51230	5749	210,9	0,252
56256	6941	213,1	0,252
61256	8240	215,6	0,252
66227	9646	218,2	0,253
71167	11156	221,1	0,253
76075	12770	224,2	0,254
80948	14484	227,6	0,254
85785	16298	231,2	0,254
90584	18209	235,1	0,255
95344	20216	239,2	0,256
100064	22316	243,6	0,256

Tabel 9.1

Bijlage A

Compleet matlab script.

```
function koepelinfo1000 = koepelEG(dbegin,rho,f,l,j)
format('longEng')

k=j+1;

E= 31000;

alphadegree=1;
alpha=(pi*alphadegree)/(180);

d(2)=dbegin;
xstandaard=10000;

Fr = NaN(k,1);
Fz = NaN(k,1);
N = NaN(k,2);
r = NaN(k,1);

x(2)=0.5*l;
y(2)=0;
theta(2)=0;
i(2)=d(2)*l^2*pi*(alpha/(2*pi));
Sumi(2)=i(2);
benaderingy(2)=0.25*x(2)^2*rho/f;

N(1,1)=0;
N(1,2)=0;

Fr(2)=l*d(2)*f^2*sin(0.5*alpha);
Fz(2)=l*d(2)*(alpha/(2*pi));
N(2,1)=Fr(2);
N(2,2)=Fz(2);

for n=3:k;

r(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1));
d(n)=(norm(N(n-1,:)))/(f*r(n)*2*sin(0.5*alpha));

Fr(n)=d(n)*l^2*sin(0.5*alpha)*f;
theta(n)=atan(N(n-1,2)/N(n-1,1));

x(n)=x(n-1)+0.5*l*cos(theta(n-1))+0.5*l*cos(theta(n));
y(n)=y(n-1)+0.5*l*sin(theta(n-1))+0.5*l*sin(theta(n));
i(n)=2*x(n)*sin(0.5*alpha)*d(n)*l;
Fz(n)=i(n)*rho;

N(n,1)=Fr(n)+N(n-1,1);
N(n,2)=Fz(n)+N(n-1,2);

Sumi(n)= Sumi(n-1)+i(n);

benaderingy(n)=0.25*x(n)^2*rho/f;
factor(n)=(f*y(n))/(x(n)^2*rho);

dtheta(n)= theta(n)-theta(n-1);
koepelR(n)= 0.5*l/tan(0.5*dtheta(n));
dbeginknik(n)= (((f*(koepelR(n))/(E*0.1))))/(d(n));
```

```

end;

dbenodigd= d*dbeginknik(1000);
Itotaal=Sumi(k)*360*dbeginknik(1000)

counter = 1;
for m=3:k
    if mod(m, 1000) == 1
        x1000(counter) = x(m);
        y1000(counter) = y(m);
        d1000(counter) = d(m);
        factor1000(counter) = factor(m);
        benaderingy1000(counter) = benaderingy(m);
        dbeginknik1000(counter)= dbeginknik(m);
        koepelR1000(counter)= koepelR(m);
        dbenodigd1000(counter)= dbenodigd(m);
        counter = counter + 1;
    end
end

plot(x,y)
axis equal

koepelinfo1000 = [x1000' y1000' d1000' factor1000' dbeginknik1000'
dbenodigd1000'];

```

Bijlage B
Literatuurlijst

Theorie:

Leerboek der toegepaste mechanica Deel 3 door Dr. Ir. j. Klopper (5^e druk)

Theory of plates and shells door Stephen P. Timoshenko & S. Woingwsky-Krieger

Getting started with Matlab 7, a Quick introduction for scientist and engineers

Infomap constructieleer

Norfolk Scope

http://en.wikipedia.org/wiki/Norfolk_Scope

Louisiana superdome

<http://architecture.about.com/od/domes/f/superdome.htm>

FCCC

http://en.wikipedia.org/wiki/Faith_Chapel_Christian_Center