

Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep
Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: Prof. Dr. B. VERSCHAFFEL

Bouwfysische en structurele analyse van een koepelwoningbouwsysteem
door
Sarah SACRE en Laure WILS

Promotor: Prof. Dr. Ir. Arch. A. JANSSENS
(Scriptiebegeleider: M. DEKOONING)

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van
burgerlijk ingenieur architect

Academiejaar 2005-2006

Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep
Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: Prof. Dr. B. VERSCHAFFEL

Bouwfysische en structurele analyse van een koepelwoningbouwsysteem
door
Sarah SACRE en Laure WILS

Promotor: Prof. Dr. Ir. Arch. A. JANSSENS
(Scriptiebegeleider: M. DEKOONING)

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van
burgerlijk ingenieur architect

Academiejaar 2005-2006

Toelating tot bruikleen

De auteurs geven de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.

6 juni 2006

Handtekening
Sarah SACRE

Laure WILS

Woord vooraf

Met veel plezier hebben we aan deze scriptie gewerkt. We zijn onze promotor, Prof. A. Janssens en begeleider, M. Dekooning, zeer dankbaar voor het aanreiken en de begeleiding van dit boeiende onderwerp. Het was voor ons de aanleiding om een mooie reis naar Bolivia te maken. We denken met plezier terug aan het bezoek aan het SHF-project en de gastvrijheid van de bewoners.

Onze dank gaat ook uit naar Els Van Londersele en Hilde Breesch voor de hulp bij Capsol en Meteonorm. Ook willen wij Rolf Vansteenwegen bedanken voor de introductie in EsaPrimaWin.

Later zullen we met genoegen terugdenken aan onze studietijd, dankzij de aangename sfeer in onze klas.

We willen niemand vergeten, dus danken we al onze vrienden uit Gent, Antwerpen en Bolivia.

Laure wil vooral haar beste vriendin Michèle bedanken, omdat ze (nu al bijna 12 jaar) zo'n fijne kameraad is. Michele, ik hoop dat je kindje zo leuk gaat zijn als jij. Ook Evelientje, bedankt voor onze vriendschap en je steun.

Sarah dankt vooral Floris voor alle steun, hulp en alle fantastische momenten. Maar eigenlijk willen we hem allebei bedanken voor het leuke gezelschap in Bolivia en de lekkere maaltijden in deze drukke tijden. Ook bedankt aan Ludwine voor het nalezen en verbeteren van de taalfouten.

Als laatste gaat onze dank uit naar onze familie: Esther, Annelies, Hari, Maya en Margootje. Voor de mentale en financiële steun zijn we onze lieve grootouders en onze ouders Annie Bonnarens en Georges Sacré, Marianne Jacobs en Daniël Wils zeer dankbaar.

Bouwfysische en structurele analyse van een koepelwoningbouwsysteem
door
Sarah SACRE en Laure WILS

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van
burgerlijk ingenieur architect

Academiejaar 2005-2006

Promotor: Prof. Dr. Ir. Arch. A. JANSSENS
(Scriptiebegeleider: M. DEKOONING)
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Universiteit Gent

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: Prof. Dr. B. VERSCHAFFEL

Samenvatting

In El Alto, een voorstad van La Paz (Bolivia), werden een reeks van betonnen koepelwoningen gebouwd met als doel een zinvolle basishuisvesting te bezorgen aan sloppenwijkbewoners.

Het project is opgestart door Solid House Foundation, een Nederlandse privé organisatie, die gebruik maakt van het koepelwoningbouwsysteem, ontwikkeld door het Monolithic Dome Association. Bij dit bouwsysteem wordt op een cirkelvormige betonnen vloerplaat een kunststof luchtvorm gemonteerd. Na het opblazen is dit de bekisting van de koepel en kan deze later opnieuw gebruikt worden.

Bij de toepassing van dit eenvoudig bouwsysteem stellen zich enkele vragen, die zich situeren op een aantal totaal verschillende domeinen: de bouwwijze, de historisch-culturele context, de materiaalkeuze, het bouwfysisch gedrag in het buitenklimaat en het structureel gedrag van de bouwvorm.

Deze scriptie legt zich vooral toe op deze laatste twee domeinen. De analyses gebeuren aan de hand van gespecialiseerde software, met name Capsol en EsaPrimaWin.

Met behulp van Capsol is de reactie van het binnenklimaat van de verschillende klimatologische en materiaalkundige factoren onderzocht.

In EsaPrimaWin is de invloed van bepaalde parameters op het structureel gedrag van de koepel gecontroleerd.

Er wordt aangetoond dat deze koepel op beide vlakken niet optimaal presteert. Een combinatie van deze analyses resulteert in het voorstel tot een optimale koepel, zowel in bouwfysisch als in structureel opzicht voor het klimaat in El Alto. Voor de andere klimaten is een aanzet tot verbetering weergegeven.

Trefwoorden: koepelwoning, luchtvorm, dynamische warmtebalans, eindige elementen analyse

INHOUD

Symbolenlijst

DEEL 1: SITUERING PROJECT	1
1. Solid House Foundation (SHF)	1
1.1 Doelstelling	1
1.2 Kenmerken van de projecten van de SHF	2
1.3 Monolithic Dome Association	2
1.3.1 Monolithic Dome	2
1.3.2 Ecoshell I	3
1.3.3 Ecoshell II	3
1.4 Bouwprincipe Solidhouse	3
1.5 Kostprijs Solidhouse	5
1.6 Voordelen gewapend beton	5
1.7 Vergelijking met conventionele woningen	5
1.8 Project	6
1.8.1 Atjeh, Indonesië	6
1.8.2 Nairobi, Kenia	6
1.8.3 Pottuvil, Sri Lanka	7
2. Project in El Alto, Bolivia	8
2.1 Nayan Utaja	8
2.2 Palmeras Del Sur	9
2.3 Wooncultuur in El Alto	9
2.3.1 Huisvestingsstrategieën in Zuid Amerika	10
2.3.2 De stad El Alto, ligging en ontstaan	11
2.3.3 De woningvoorraad in El Alto	13
2.3.4 Materialen in de woningbouw	13
2.3.5 Kwaliteit van de woonomstandigheden [5] [6]	14
2.3.6 Economische kenmerken van de huishoudens	15
2.4 SolidHouses in El Alto als uitgangspunt scriptie	16
2.4.1 Plannen, doorsneden en foto's	17
3. Andere vormen van koepelwoningbouwsystemen	19
3.1 Traditionele koepelwoningbouwsystemen	21
3.1.1 Iglo	21
3.1.2 De obus-hut, Tsjaad en Kameroen	22
3.2 Koepelwoningbouwsystemen als nood- en ontwikkelingswoningen	23

3.2.1 Sandbag Shelters, Nader Khalili	23
3.2.2 Opgeblazen ballonnen, Heinz Isler	25
3.2.3 Earthships, Micheal Reynolds	26
3.3 Alternatieve bouwwijze zonder luchtvorm	26
3.4 Besluit	28

DEEL 2: Bouwfysische analyse 29

1. Inleiding 29

2. Beoordelingsparameters 30

2.1 Keuze referentiedagen	30
2.2 Comfort binnenklimaat	31
2.2.1 Lucht- en oppervlaktetemperatuur	31
2.2.2 Comforttemperatuur	31
2.2.3 Thermisch comfort	32
2.2.4 Lokaal thermisch discomfort	33
2.3 Beoordelingscriteria	34
2.3.1 Demping	34
2.3.2 Tijdvertraging	35

3. Onderzoek naar het ingeven van de koepelwoning in Capsol 37

3.1 Inleiding	37
3.2 Berekening en gegevens	38
3.2.1 Halve bol	38
3.2.2 Balk	39
3.2.3 Ingeschreven achthoek	39
3.2.4 Ingeschreven zestienhoek	39
3.2.5 Omschreven achthoek	40
3.3 Invloed vorm verliesoppervlak	40
3.3.1 Winterperiode	40
3.3.2 Zomerperiode	41
3.3.3 Besluit	42
3.4 Keuze vorm referentiemodel	43

4. Invoeren in Capsol 44

4.1 Invoergegevens	44
4.1.1 Keuze van de woning	44
4.1.2 Oriëntatie	44

4.1.3 Zones	45
4.1.4 Zoneventilatie	45
4.1.5 Warmtetransport tussen de zones	48
4.1.6 Wanden	50
4.1.7 Binnenmuren	51
4.1.8 Hoekfactoren	53
4.2 Randvoorwaarden	53
4.2.1 Functiereferenties	53
4.2.1.1 Buitenluchttemperatuur	53
4.2.1.2 Grondtemperatuur	54
4.2.1.3 Bezonning	54
4.2.1.4 Interne winsten	56
A. Winsten door personen	56
B. Winsten door installaties	56
C. Bewonersscenario's	57
4.2.2 Zonreceptiefactoren	60
4.2.3 Controle	61
4.2.4 Zonafschermingen	61
4.2.4.1 Zonafschermingen van het hele gebouw	61
4.2.4.2 Zonafscherming van wanden	63
4.3 Besluit	64
5. Invloedfactoren warmtebalans	68
5.1 Warmtebalans	68
5.1.1 Verliezen	69
5.1.1.1 Transmissieverliezen	69
A. Berekening met oppervlaktetemperaturen	69
B. Geleidingswarmtestromen door Capsol	69
C. Gebouwgemiddelde materiaaleigenschappen	70
5.1.1.2 Ventilatieverliezen	71
A. Theoretische ventilatieverliezen	71
B. Ventilatiestroom door Capsol	71
5.1.1.3 Totale verliezen	73
5.1.2 Winsten	73
5.1.2.1 Interne winsten	73
5.1.2.2 Zonnewinsten	74
5.1.2.3 Totale winsten	78
5.1.3 Totale warmtebalans	78
5.1.4 Thermische traagheid	79
5.1.5 Besluit	80

5.2 Berekening van de stationaire binnenluchttemperatuur θ_{is}	80
5.3 Strategieën tot klimaatverbetering	82
5.3.1 Warmteopslag	82
5.3.1.1 Densiteit ρ	82
5.3.1.2 Soortelijke warmte c	83
5.3.1.3 Samenwerking tussen de lagen	86
5.3.2 Beperken van de verliezen	86
5.3.2.1 Transmissie	86
A. Compactheid	86
B. Gebouwgemiddelde U-waarde	86
B.1 Eigenschappen van isolatiematerialen	87
B.2 Warmte-geleidingscoëfficiënt λ	89
B.3 Grondmaterialen als isolatie	90
B.4 Dikte d	92
B.5 Combinatie adobe en beton	94
B.6 Positie van de isolatie	95
C. Gekozen isolatielaag	97
5.3.2.2 Ventilatie	98
5.3.3 Benutten van de winsten door passieve zonne-energie	99
5.3.3.1 Luifels	100
5.3.3.2 Invloed ramen	101
5.3.3.3 Helling	102
5.3.3.4 Oriëntatie	103
5.3.3.5 Grootte	106
5.3.3.6 ZTA-factor en U-waarde bij dubbel glas	108
5.3.3.7 Isolerende luiken	110
5.3.3.8 Kleur	110
6. Bouwfysische optimale koepelwoning	113
6.1 Beschrijving	113
6.2 Extreme klimaatsituaties	116
6.2.1 Omschrijving	116
6.2.2 Binnenluchttemperatuur optimale koepelwoning	116
6.2.3 Besluit	118
6.3 Verloop jaarlijkse binnenluchttemperatuur	118
7. Vergelijking van de conventionele bouwwijze met de betonnen koepelwoning	120
7.1 Beschrijving conventionele bouwwijze	120

7.2 Bouwfysische vergelijking	122
7.3 Mogelijke verbetering van de conventionele woning	123
8. Andere klimaten	125
8.1 Buitenklimaat	125
8.2 Passieve maatregelen voor koeling in warme landen	125
8.2.1 Klimaat en ligging Banda Atjeh, Indonesië	126
8.2.1 Nachtventilatie	127
8.2.2 Grondventilatie	128
8.2.3 Luifels	128
8.2.4 Kleur	130
8.2.5 Isolatie	130
8.2.6 Afscherming van de schuine vlakken	131
8.2.7 Andere afschermingen	131
8.2.8 Dubbel glas	132
8.3 Nairobi, Kenia	133
8.3.1 Klimaat en ligging	133
8.3.2 Binnenklimaat betonnen koepelwoning	133
8.4 Pottuvil, Sri Lanka	135
8.4.1 Klimaat en ligging	135
8.4.2 Binnenklimaat betonnen koepelwoning	136
8.5 Besluit	137
8.6 Selectie van een ideaal klimaat	138

DEEL 3: Structurele analyse 141

1. Inleiding 141

2. Theorie: membraanspanningen in koepels 142

2.1 Terminologie	142
2.1.1 Trek- en drukstructuren	142
2.1.2 Schalen en koepels	143
2.2 Krachtwerking in koepels	144
2.2.1 Membraankrachten	144
2.2.2 Samenwerking van membraankrachten. Krachtenevenwicht.	145
2.2.3 Sterkte van schaalconstructies - Membraanspanningstoestand	146
2.2.4 Het verschil tussen platen en schalen	147
2.2.5 Het verschil tussen bogen en koepels	147

3. eenvoudige problemen van omwentelingsschalen	149
3.1 Wiskundige uitdrukking van de membraanwerking	149
3.1.1 Bepaling van de meridiaankrachten N_φ	149
3.1.2 Bepaling van de hoepelkrachten N_θ	150
3.2 Vaak voorkomende belastingsgevallen in sferische schalen	152
3.2.1 Uniforme gravitaire belasting per eenheid van schaaloppervlak: 'eigen gewicht'	152
3.2.2 Gelijkmatic verdelde belasting per eenheid van horizontaal oppervlak: 'sneeuw'	154
 4. Constructief gedrag van bolkappen – Verstoringen van de membraantoestand	 155
4.1 Buigspanningtoestand	156
4.1.1 De buigspanningtoestand nader bekeken	156
4.1.2 Primaire krachtwervingen aan de ondersteuningen	156
4.1.3 Secundaire krachtwervingen	156
4.2 Instabiliteit van schalen - knik	158
4.2.1 De kritieke spanning	158
4.2.2 De knikbelasting	159
 5. Eerdere toepassingen van 'ballonnen' in koepels – De intuïtieve aanpak van Heinz Isler	 160
5.1 Heinz Isler	160
5.2 Vormgevingsprocessen	160
5.3 Krachten in de schalen	161
5.4 Constructie	161
 6. Eindige elementen analyse met ESA-Prima Win	 162
6.1. Het programma	162
6.1.1 Eindige elementen methode	162
6.1.2 Belangrijke opmerking m.b.t. de geldigheid van de resultaten	163
6.2 Invoer	163
6.2.1 Geometrie	163
6.2.2 Ondersteuningen	163
6.2.3 Belastingen	164
6.2.4 Combinaties	165
6.2.5 Netverfijning	166
6.3 Berekening	166
6.4 Gecontroleerde scenario's	167
6.5 Scenario 1: Bolkap	168
6.5.1 Reacties	168

6.5.2 Vervormingen	168
6.5.2.1 Verplaatsingen	169
6.5.2.2 Maximale rotaties	170
6.5.3 Interne krachten	171
6.5.3.1 Buiging	171
6.5.3.2 Membraankrachten	176
6.5.4 Spanningen	177
6.5.4.1 Spanningen t.g.v. uniforme gravitaire belasting per eenheid van schaaloppervlak: 'eigen gewicht'	177
6.5.4.2 Schuifspanningen in een koepel belast met axiaalsymmetrische belasting	179
6.5.4.3 Spanningen in de UGT	180
6.5.4.4 Schuifspanningen in een koepel belast met niet-axiaalsymmetrische belasting	180
6.5.5 Wapening	181
6.5.5.1 Definities	181
6.5.5.2 Benodigde wapeningoppervlaktes	182
6.5.5.3. Maximale staafdiameters	185
6.5.5.4 Maximale afstanden	186
6.5.6 Besluit	187
6.6 Scenario 2: Gesegmenteerde koepel	188
6.6.1 Reacties	188
6.6.2 Vervormingen	188
6.6.3. Interne krachten onder UGT	189
6.6.4 Wapening	190
6.6.4.1 Benodigde wapeningoppervlaktes	190
6.6.4.2 Maximale staafdiameters	192
6.6.4.3 Maximale staafafstanden	193
6.6.5 Besluit	193
6.7 Scenario 3: Koepel met 30 cm opstand	195
6.7.1 Vervormingen	195
6.7.2 Interne krachten	195
6.7.3 Wapening	197
6.7.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes	197
6.7.3.2 Maximale staafdiameters	198
6.7.3.3 Maximale staafafstanden	198
6.7.4 Besluit	198
6.8 Scenario 4: Vorm van de grote koepel met de afmetingen van de kleine koepel	199
6.8.1 Vervormingen	199
6.8.2 Interne krachten	200
6.8.3 Wapening	201
6.8.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes	201

6.8.3.2 Maximale staafdiameters	201
6.8.3.3 Maximale staafafstanden	201
6.8.4 Besluit	201
6.9 Scenario 5: Koepel afgesneden op de neutrale lijn	202
6.9.1 Vervormingen	202
6.9.2 Interne krachten	204
6.9.3 Wapening	205
6.9.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes	205
6.9.3.2 Maximale staafdiameters	206
6.9.3.3 Maximale staafafstanden	207
6.9.4 Oplossing	207
6.9.4.1 Ringbalken	207
6.9.4.2 Schuine muren	209
6.9.5 Besluit	210
6.10 Scenario 6: Koepelgeometrie afgeleid uit de 'kettinglijn' [37]	211
6.10.1 Opmaken van een gunstig koepelprofiel	212
6.10.2 Reacties	214
6.10.3 Vervormingen	214
6.10.4 Interne krachten	215
6.10.5 Wapening	216
6.10.6 Besluit	217
6.11 Scenario 7: Grote koepel	220
6.11.1 Vervorming	220
6.11.2 Interne krachten	220
6.11.3 Wapening	221
6.11.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes	221
6.11.3.2 Maximale staafdiameters en staafafstanden	222
6.11.4 Besluit	223
6.12 Scenario 8: Koepel met openingen & Scenario 9: Koepel met randverstijfde openingen	224
6.12.1 Vervormingen	225
6.12.1.1 Maximale vervormingen in scenario 8: zonder randverstijvers	226
6.12.1.2 Maximale vervormingen in scenario 9: met randverstijvers	226
6.12.2 Interne krachten	227
6.12.2.1 Interne krachten in scenario 8: zonder randverstijvers	227
6.12.2.2 Interne krachten in scenario 9: met randverstijvers	228
6.12.3 Wapening	229
6.12.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes in scenario 8: zonder randverstijvers	229
6.12.3.2 Benodigde wapeningoppervlaktes in scenario 9: met randverstijvers	230
6.12.4 Besluit	230

6.13 Scenario 10: Koepel met boogopeningen & Scenario 11: Koepel met brede boogopeningen	232
6.13.1 Vervormingen	232
6.13.1.1 Maximale vervormingen in scenario 10: smalle boogopeningen	233
6.13.1.2 Maximale vervormingen in scenario 10: brede boogopeningen	233
6.13.2 Interne krachten	233
6.13.2.1 Interne krachten in scenario 10: smalle boogopeningen	233
6.13.2.2 Interne krachten in scenario 11: brede boogopeningen	234
6.13.3 Wapening voor scenario 11	235
6.13.4 Besluit	235
6.14 Scenario 12: Koepel met een horizontaal dakraam	236
6.14.1 Vervorming	237
6.14.2 Interne krachten	237
6.14.3 Wapening	238
6.14.3.1 Zonder lijnlast	238
6.14.3.2 Met lijnlast	238
6.14.4 Besluit	238
6.15 Scenario 13: Betonnen koepel met dakramen en deur & Scenario 14: Betonnen koepel met dakramen, deur en laag adobe	240
6.15.1 Vervormingen	240
6.15.2 Interne krachten	241
6.15.3 Wapening	242
6.15.4 Besluit	243
6.16 Scenario 15: Betonnen koepel met dakramen, deur, laag adobe en verdikking van de wanden onderaan	244
6.17 Scenario 16: Roloplegging & Scenario 17: Inklemming	245
6.18.1 Scenario 16: Roloplegging	245
6.18.2 Scenario 17: Inklemming	247
6.18.3 Besluit	248
6.18 Scenario 18: Adobe sfeer	249
6.18.1 Schaaldikte 10 cm	249
6.18.2 Schaaldikte 40 cm	250
6.18.3 Besluit	250
6.19 Scenario 19: Adobe koepel met dakramen en deur	251

7. Synthese van de structurele analyse	252
---	------------

DEEL 4: BESLUIT	255
------------------------	------------

Literatuurlijst	257
-----------------	-----

Appendices	
------------	--

Symbolenlijst Bouwfysica

symbool	grootheid	dimensie
θ_e	binnenluchttemperatuur	[°C]
θ_i	buitenluchttemperatuur	[°C]
q	warmtestroomdichtheid	[W/m ²]
α	warmte-overgangscoefficiënt	[W/m ² K]
D	demping	[-]
τ	tijdvertraging	[h]
ρ	densiteit	[kg/m ³]
c	soortelijke warmte	[J/kgK]
ρc	specifieke warmtecapaciteit	[J/m ³ K]
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/mK]
R	warmteweerstand	[m ² K/W]
d	dikte	[m]
e_L	emmisiefactor	[-]
$a_{s,i}$	absorptiefactor binnenzijde	[-]
$a_{s,e}$	absorptiefactor buitenzijde	[-]
U	warmtedoorgangscoefficiënt	[W/m ² K]
$\bar{U}$	gebouwgemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt	[W/m ² K]
V	volume	[m ³]
C	compactheid	[m]
A_T	verliesoppervlakte	[m ²]
n	ventilatievoud	[1/h]
Q	hoeveelheid warmte	[J]
t	tijd	[h]
Φ	warmtestroom	[W]
G	zontoetredings-factor	[-]
τ_s	transmissiefactor	[-]
a	temperatuurvereffingscoëfficiënt	[m ² s]

DEEL 1:

SITUERING PROJECT

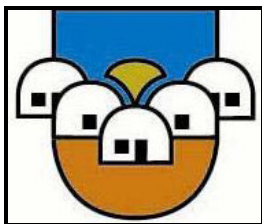
1. Solid House Foundation (SHF)

1.1 Doelstelling

In de hele wereld is, met een tekort aan ongeveer ruim één miljard woningen grote behoefte aan goede huisvestingsprogramma's. De Solid House Foundation (SHF) is opgericht met als doel een duurzame ontwikkeling te realiseren voor sociale huisvesting voor lage inkomensgroepen in ontwikkelingslanden. De bevolking wordt onmiddellijk betrokken bij de opbouw van de woningen. Naast de gerealiseerde woningen is de kwaliteit van de kennisoverdracht belangrijk. Zo beantwoordt de organisatie zowel aan haar praktische doelstelling, onderdak verzorgen, als aan haar sociale, vaardigheden vergroten en gemeenschapsfuncties stimuleren.

De SHF past hiervoor de koepelbouw toe, de zogenaamde SolidHouses. Door de gestandaardiseerde constructiemethode zijn de koepelwoningen in relatief korte tijd op te bouwen en betrekkelijk goedkoop.

De woonvoorzieningen worden gebouwd met lokale werkkrachten ondersteund door ervaren werknemers van de Solid House Foundation. Zo leert de bevolking hun eigen huis te bouwen na een praktijktraining van een maand. [1]



Figuur 1.1: Logo van de Solid House Foundation

1.2 Kenmerken van de projecten van de SHF

Om een duurzame lokale inbedding te verzekeren wordt er samengewerkt met lokale partijen. Veelal wordt er verder gewerkt op bestaande initiatieven voor huisvesting, die om uiteenlopende redenen niet goed van de grond komen.

De Solid House Foundation werkt niet met vaste ontwerpen voor de SolidHouses.

Door de eenvoudige bouwwijze zijn vele ontwerpinrichtingen mogelijk: losse of gekoppelde SolidHouses, met een grote of kleine diameter, hoge of lage gebouwen, met of zonder extra daken voor een beschutte buitenleefruimte, met of zonder ornamenten,...



Figuur 1.2: Verschillende ontwerpen voor SolidHouses

1.3 Monolithic Dome Association

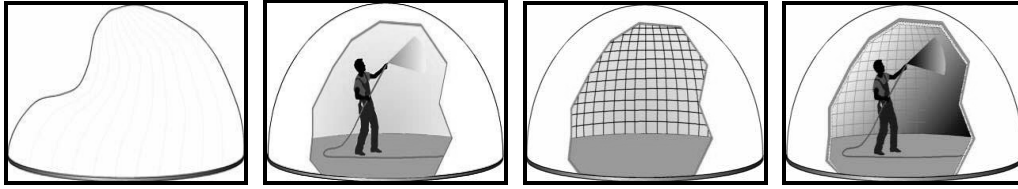
De Solidhouses zijn koepelwoningen die gebouwd zijn volgens het principe van de Monolithic Dome Association. Deze organisatie bouwt woningen volgens 3 verschillende methodes: Monolithic Dome, Ecoshell I en Ecoshell II. [2]



Figuur 1.3: Logo Monolithic Dome Association

1.3.1 Monolithic Dome

Bij de Monolithic Dome wordt de luchtform gebruikt als vorm voor de constructie. Doordat de luchtform blijft zitten doet ze tevens dienst als dakmembraan. Langs de binnenzijde van de luchtform wordt polyurethaan schuim gespoten als isolatie. Aan de isolatie wordt een wapeningsnet bevestigd en deze wordt bespoten met spuitbeton.



Figuur 1.4: Bouwwijze Monolithic Dome

1.3.2 Ecoshell I

Bij de Ecoshell I is het spuitbeton toegepast aan de buitenzijde van de luchtvorm. Hierdoor kan het beton ook met de hand aangebracht worden. De luchtvorm blijft niet zitten en dient enkel als bekisting die herhaaldelijk opnieuw kan gebruikt worden. Doordat het beton zich aan de buitenzijde bevindt, kan het betonneren enkel gebeuren in goede weersomstandigheden. Het beton blijft de enige laag, er wordt geen isolatie geplaatst.

1.3.3 Ecoshell II

Ecoshell II is een verbetering van Ecoshell I. Het beton wordt aan de binnenzijde van de luchtvorm gespoten, zodat het betonneren minder afhankelijk is van de weersomstandigheden. De luchtvorm wordt na uitharding van het beton verwijderd en kan opnieuw gebruikt worden. De Ecoshell II blijft ook ongeïsoleerd.

De Monolithic Dome Association benadrukt dat de Ecoshells door het ontbreken van isolatie enkel kunnen worden toegepast in warme tot zeer warme klimaten. Bij te hoge temperaturen kunnen de woningen afgedekt worden met stro.

De SHF maakt gebruik van de Ecoshell I en veranderde de naam in SolidHouse. Zo willen ze de veiligheid ervan benadrukken.

1.4 Bouwprincipe Solidhouse

Het bouwprincipe van de SolidHouses is al sinds jaren een beproefde bouwmethode. In de hele wereld staan vele duizenden woningen en gebouwen die met deze bouwmethode zijn gerealiseerd. Aan de hand van bouwstappen wordt het bouwsysteem uitgelegd aan toekomstige bewoners. De volledige bouwgids van een SolidHouse is opgenomen in appendix A.



1. Stort een betonnen fundament



2. Bevestig een halve ballon



3. Blaas de ballon op met een ventilator



4. Vorm over de ballon de bewapening



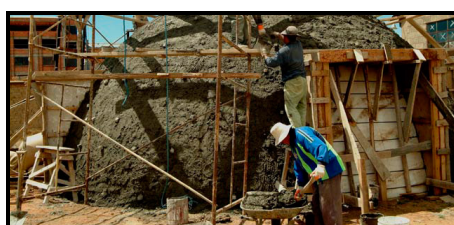
5. Vorm over de ballon de bewapening



6. Vorm over de ballon de bewapening



7. Bevestig de leidingen over het betonijzer



8 Breng de betonmortel aan



9. Verwijder de ballon en stukadoor de binnenzijde



10. Maak de binnenindeling en werk af

1.5 Kostprijs SolidHouse

In tabel 1.1 zijn de kostprijzen weergegeven voor de twee types van SolidHouses. De minimale waarden kunnen enkel bereikt worden als de ballon 50 tot 100 maal opnieuw gebruikt kan worden. De prijzen zijn geldig voor een koepelwoning in een gemiddelde situatie met een basis aantal ramen, deuren, één interne scheidingswand, één gootsteen en elektrische bedrading.

Tabel 1.1: Kostprijs SolidHouses

type	dameter [m]	woonoppervlak [m ²]	volume [m ³]	prijs [\$]
1	6,1	29,2	59	2500 tot 4500
2	9,15	65,7	200	4000 tot 7000

1.6 Voordelen gewapend beton

De keuze voor beton als bouw materiaal is goed te verantwoorden:

- De sferische vorm zet het materiaal bijna volledig in druk.
- Een betonnen woning biedt goede bescherming tegen sterke winden en regen.
- Een betonnen woning is veilig en gesloten.
- Een betonnen woning kan goed proper gehouden worden, wat helpt bij het elimineren van veel ziektes.

1.7 Vergelijking met conventionele woningen

Door de SHF wordt de vergelijking tussen de conventionele en de koepelbouwwijze gegeven.

- De koepel is zelfdragend waardoor steunmuren of pilaren overbodig worden. Zo ontstaat een flexibel in te delen binnenruimte.
- De koepelvorm biedt de meest optimale verhouding tussen de hoeveelheid bouw materiaal en de gerealiseerde ruimte.
- De koepelwoning uit gewapend beton is duurzaam, stevig, onderhoudsvriendelijk en bestand tegen verschillende natuurrampen.
- Het beton en het betonijzer zijn vaak lokaal verkrijgbaar en niet duur.
- Vergelijkbare conventionele huizen zijn tot tweemaal duurder dan de SolidHouses

- Doordat er weinig hout nodig is, is de belasting op het milieu beperkt.
- Tot 40% van het oppervlak kan worden verwijderd zonder dat de sterkte van de koepel wordt beïnvloed.
- De temperatuursfluctuaties tussen dag en nacht zullen minder zijn doordat het beton de warmte absorbeert en opslaat overdag en 's nachts terug uitstraalt.
- De koepelwoning is gemakkelijk uit te breiden.

Bij sommige van deze vergelijkingen kunnen echter grote vragen gesteld worden. De bouwfysische en structurele aspecten worden verder onderzocht.

1.8 Projecten

Naast het project in Bolivia onderneemt de SHF momenteel projecten in Indonesië, Kenia en Sri Lanka.

1.8.1 Atjeh, Indonesië

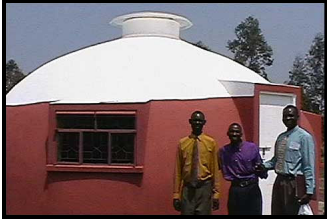
Na de verwoestende tsunami is er in Indonesië een groot gebrek aan huisvesting. Nog steeds verblijven veel mensen in tenten. Anderen zijn ondertussen verhuisd naar tijdelijke huisvestingskampen, waar organisaties huisjes uit hout en golfplaten hebben opgetrokken.

De SFH bereidt in Atjeh de bouw van een weeshuis en een huisvestingsproject voor. Het huisvestingsproject omvat naast de woningen ook de aanleg van wegeninfrastructuur en nutsvoorzieningen. Er zal ook ruimte voorzien worden voor zelfstandige ondernemingen, gezondheidscentra en onderwijs.

1.8.2 Nairobi, Kenia

In Nairobi wordt momenteel een koepel gebouwd volgens de SolidHouse methode. De koepel zal dienen als huisvesting voor een aantal bedrijfjes. Opdrachtgevers zijn de Rehema Housing Cooperative en de National Cooperative Housing Union (NACHU). NACHU is de partnerorganisatie van SHF in Kenia. De bouw van deze eerste koepel zal informatie geven over de lokale bouwkosten en biedt de mogelijkheid om verschillende belangstellenden, bijvoorbeeld vanuit de Keniaanse overheid, UN-Habitat en woning cooperatieven, kennis te laten maken met de SolidHouses.

In Nairobi zijn door de Monolithic Dome Association reeds Ecoshells gebouwd als kindertehuis en medisch centrum.



Figuur 1.5: Ecoshell in Nairobi door Monolithic Dome Association

1.8.3 Pottuvil, Sri Lanka

In Sri Lanka wordt er nog overlegd met de plaatselijke autoriteiten. Ook hier is er echter grote vraag naar noodwoningen ten gevolge van de tsunami.

2. Project in El Alto, Bolivia

Het eerste, en tot nog toe enige, gerealiseerde project van de SHF bevindt zich in El Alto. De SHF ontstond hier aansluitend op de stichting Happy Days Bolivia en is opgericht door Rudolf Burggraaf. Via deze organisatie geeft hij straatkinderen in La Paz de mogelijkheid om deel te nemen aan activiteiten die anders aan hen voorbij gaan. Deze jongeren werken allen als schoenpoetsers en verdienen per poetsbeurt 10 eurocent. Tijd om naar school te gaan hebben ze niet, waardoor ze moeilijk uit hun sociale situatie kunnen ontsnappen. Happy Days Bolivia geeft hen de kans om even hun moeilijk bestaan te vergeten.

2.1 Nayan Utaja

Als afsluiting van de Nederlands-Boliviaanse samenwerking is het aansluitende huisvestingsproject 'Nayan Utaja' ontstaan, wat 'Mijn huis' betekent in de Aymara taal. Hiervoor is door de organisatie een stuk grond aangekocht in de stad El Alto, waarop acht woningen zijn gebouwd, twee grote en acht kleine. De kleine koepels zijn bedoeld voor jonge gezinnen en van de grotere is er één voorzien voor vrijgezellen en de andere voor werkplekken en bijeenkomsten.

Het Boliviaanse bouwbedrijf IAA (Ingenieros y Arquitectos Asociados) heeft in het najaar van 2004 op het eigen bedrijfsterrein in El Alto de eerste twee betonnen Solid-Houses gebouwd als proefproject. Zo konden ze samen met de SHF experimenteren met de ballonnen, de samenstelling van het beton en de verschillende bouwwijzen. De twee Solid Houses worden nu gebruikt als demonstratie- project voor de inwoners van El Alto.



Figuur 1.6: Project Nayan Utaya, El Alto

2.2 Palmeras Del Sur

Momenteel wordt een haalbaarheidsstudie gemaakt voor een woonwijk van 700 koepelwoningen in El Alto. Het project maakt deel uit van een groter plan van woningbouwcorporatie Cooperativa de Servicios Potosi. Deze wil voorzien in de bouw van in totaal meer dan 6000 woningen.

De tweede partner van de Solid House Foundation is de federatie van de vrouw. Deze federatie wil de positie van de vrouw in de Boliviaanse samenleving verbeteren door voorlichtingsbijeenkomsten te organiseren. Het is de bedoeling dat de aangesloten vrouwen en hun gezinnen de mogelijkheid hebben om een koepelwoning te kopen in Palmeras del Sur. Hiervoor zal echter wel in de meeste gevallen een lening moeten worden aangegaan.

Het uiteindelijke doel is een duurzame en hechte sociale gemeenschap creëren. Daar de Boliviaanse projectontwikkelaars dus weinig ervaring hebben met duurzame woonwijken moet er hier vooral hulp komen vanuit Nederland dat gekenmerkt wordt door een 'woonwijkcultuur'.

2.3 Wooncultuur in El Alto [3] [4] [5] [6]

De woonwijken kennen echter weinig voorbeelden in de Boliviaanse maatschappij. De meeste Bolivianen bouwen hun huizen, op een ommuurd stuk grond, zelf volgens het principe van 'zelfbouw'. Een eenvoudig huisje, zelden groter dan 20 tot 25 m², wordt opgetrokken uit adobe met een dak van riet, palmbladeren of golfplaat. Het huisje kan heel snel gebouwd worden wanneer de hele familie meehelpt. Als de adobe stenen eenmaal gedroogd zijn is het een kwestie van drie tot vier weekeinden. Daarna volgt een periode van geleidelijke verbetering en uitbreiding (meer kamers, het aanbrengen van ramen en deuren, voorzieningen, ...). Het tempo hiervan wordt bepaald door de behoeften en financiële mogelijkheden van het gezin. Maar meestal is dit verbeteringsproces in het arme Bolivia een kwestie van lange duur.

In het straatbeeld wordt deze bouwwijze gekarakteriseerd door de vele bouwbedrijfjes. Alle nodige bouwmaterialen zijn daar te koop van bakstenen, golfplaten, dakpannen, cement tot wapening.



Figuur 1.7: Bouwbedrijven in El Alto

2.3.1 Huisvestingsstrategieën in Zuid Amerika

Latijns Amerika kent een sterke urbane groei, vooral in de grote stedelijke agglomeraties. De compacte stad beschouwt men als economisch efficiënt omdat voorzieningen veel goedkoper aangeboden kunnen worden aan huishoudens die dicht op elkaar wonen. Het resultaat van de ongebreidelde urbane groei is echter een concentratie van problemen in bepaalde wijken: vervuiling, congestie en urbane armoede.

Het denken over habitat in Derdewereldsteden is de afgelopen decennia sterk veranderd. Tot 1970 was de aandacht bijna uitsluitend gericht op huisvesting. Vanuit de geïndustrialiseerde wereld was het model van sociale woningbouw gekopieerd, dat werd aangevuld met afbraak van slums. Bolivia is één van de vele voorbeelden waarin een dergelijke organisatie niet van de grond heeft kunnen komen, wegens te kostbaar voor zowel de overheden als de bewoners. Het aantal woningen volstond niet om de groeiende urbane bevolking te kunnen opvangen en deze vielen buiten het bereik van de armen. Zo werden veel steden geconfronteerd met landinvasies en illegale bouwsels. Het ontbreken van voorzieningen en de onzekerheid over het behoud van woonruimte droegen bij tot de barre woonomstandigheden.

Het idee ontstond dat de rol van de overheden meer faciliterend moest worden. Huishoudens werden gestimuleerd om in hun eigen woonbehoefte te voorzien. Dergelijke strategieën noemt men 'zelfbouw'. Zelfbouwprojecten zijn te verdelen in 'sites-and-services' – en 'buurtverbeteringsprojecten'.

Met sites-and-services projecten stelt de overheid een verkaveling met basisvoorzieningen ter beschikking. Ook levert zij het ontwerp van de woningen, die de kopers dan zelf bouwen. De ontwerpen voldoen aan overheidsnormen aangaande het gebruik van duurzame bouwmaterialen en een verantwoorde constructie, die verhinderen dat de woningen echt goedkoop zijn. Bovendien geraken arme huishoudens niet aan een lening en is de ligging van dit soort verkavelingen ongunstig. Ze bevinden zich vaak in de periferie, ver weg van de werkgelegenheidscentra, wat de transportkosten te hoog maakt voor de arme bevolking.

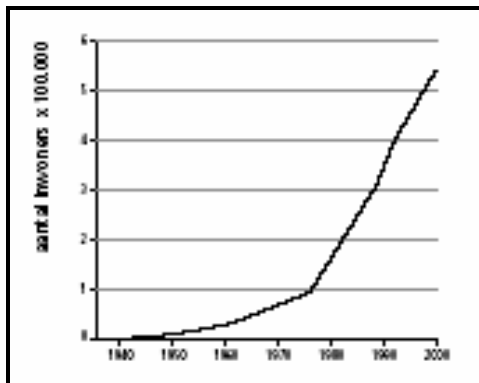
In buurtverbeteringsprojecten is de rol van de overheid beperkt tot het reguleren van het grondgebruiksrecht, het aanbieden van voorzieningen, het ordenen van het verkavelingspatroon, en verbeteren van de ontsluiting in bestaande zelfbouwwijken. Grote delen van de bevolking hebben met deze strategie toegang gekregen tot kwalitatieve huisvesting. Idealiter leidt buurtverbetering dus tot armoedebestrijding doordat woonomstandigheden worden verbeterd en de productieve mogelijkheden van armen worden vergroot. De bewoners mogen zelf kiezen in welke materialen ze hun woonst optrekken.

Sinds de jaren negentig beseft men dat het veelal niet de stedelijke armen waren die profiteerden van de zelfbouwprojecten van de vorige decennia. Ook werd duidelijk dat stedelijke ontwikkeling niet alleen een zaak is van de overheid, maar ook van tal van andere actoren zoals buitenlandse donoren, NGO's en de private sector. Men ziet in dat duurzame ontwikkeling bovendien alleen mogelijk is als deze gedragen wordt door de lokale bevolking. Met een beleid van decentralisatie en bevolkingsparticipatie wordt de aanpak van stedelijke problemen meer afgestemd op de plaatselijke omstandigheden.

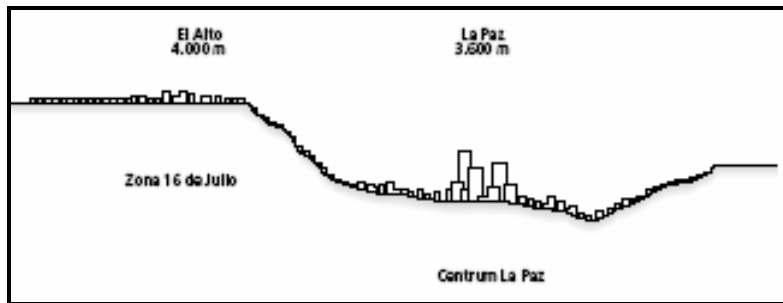
2.3.2 De stad El Alto, ligging en ontstaan

El Alto is een snel groeiende satellietstad van La Paz, Bolivia. De stad heeft zich in vijftig jaar ontwikkeld van ruraal gebied tot een stad met meer dan 500 000 inwoners (figuur 1.8).

Kenmerkend voor El Alto is zijn ligging op 4000 meter boven zeeniveau. La Paz ligt beschut in een keteldal 400 meter lager, wat een aangename klimaat teweeg brengt (figuur 1.9).



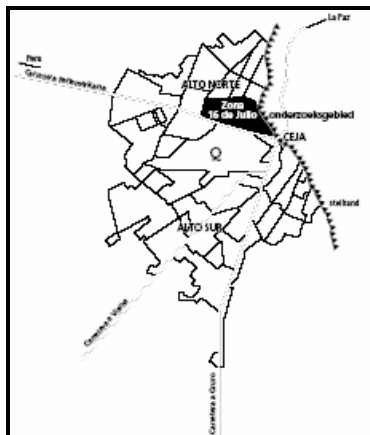
Figuur 1.8: Bevolkingsgroei in El Alto, 1950-2000



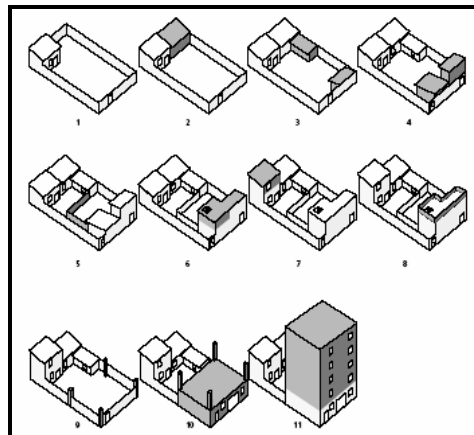
Figuur 1.9: Hoogteligging van El Alto ten opzichte van La Paz

Sinds 'De Reforma Agraria' (de landhervorming na de Nationale Revolutie in 1952) en de daaropvolgende migratie naar de steden, werden er in El Alto volop woningen uit adobe-blokken opgetrokken zoals deze ook op het omliggende platteland gangbaar waren. De moeilijke fysisch-geografische omstandigheden en het ontbreken van urbane voorzieningen maakte de grond in El Alto goedkoop en dus een ideaal vestigingsgebied. De groei van de stad en het aantal inwoners is sindsdien nooit gestopt. Dit veroorzaakte bestuurlijke en technische problemen die te groot zijn voor één centraal stedelijk bestuur, met beperkte financiële middelen.

Figuur 1.10 geeft een beeld van de ruimtelijke uitbreiding van de stad. De groei van El Alto is vertrokken vanaf het vliegveld van de stad ('La Ceja'). De huidige structuur wordt gekenmerkt door een uitbreiding van de stad in westelijke en zuidelijke richting. Naar het noorden en oosten wordt verdere groei verhinderd door de Cordillera Real, respectievelijk het keteldal waarin La Paz ligt. De bebouwing in de uiterste periferie bestaat meestal slechts uit schamele éénkamerwoningen en ook basisvoorzieningen zijn hier niet voor handen. Door de lage bevolkingsdruk is de grondprijs er nog laag, maar wordt wel opgedreven door de instroom van huishoudens. In reactie hierop groeit de stad steeds verder naar het zuiden.



Figuur 1.10: Structuurkenmerken van de bebouwing in El Alto



Figuur 1.11: Verdichting ten gevolge van zelfbouw in El Alto

2.3.3 De woningvoorraad in El Alto

Door de uitbreiding door zelfbouw van bestaande woningen raken wijken sterk verdicht. Huishoudens voeren aanpassingen uit aan hun woning wanneer daar behoefte aan is en wanneer ze over voldoende financiële middelen beschikken. Figuur 1.11 geeft duidelijk weer hoe de fasering verloopt. Alles begint met een onbebouwd perceel, slechts voorzien van een erfafscheiding. De ommuring geeft aan dat het perceel is verkocht, beschermt het tegen squatters [4] en illegale grondspeculanten en levert de privacy waar de Aymara's veel waarde aan hechten. Dan wordt de woning gebouwd, veelal in een hoek van het perceel. De perceelsmuur fungeert hierbij als achter- en zijmuur van de woning. Dit valt te rijmen met de culture-etnische context. De traditionele plaats van de woning bij Aymara's op het platteland is namelijk achterop het perceel (in tegenstelling tot huishoudens uit de stad, die bouwen hun woningen vaker aan de straatkant, zo kan men op de begane grond een winkeltje huisvesten). Oorspronkelijk beperkten de uitbreidingen zich tot het bijbouwen van kamers. Later bouwde men ook verdiepingen bovenop de bestaande bouw. Zo heeft de verdichting ook een verticale component.

2.3.4 Materialen in de woningbouw

Tabel 1.2 geeft een overzicht van de bouwmaterialen die door de meeste bouwbedrijfjes in El Alto aangeboden worden, en hun aandeel op de woningmarkt. Voor de constructie van de muren is adobe duidelijk het belangrijkste bouw materiaal (90% van de woningen in El Alto). Meestal blijven de muren onbekleed, soms zijn ze bepleisterd en/of beschilderd. Adobe is goedkoop, en bestand tegen de barre koude en wind in El Alto. Bovendien wordt adobe nogal eens gepropageerd als een ecologisch verantwoorde bouw materiaal wegens de beperking van transport van verbranding van fossiele brandstoffen. Het nadeel van adobe laat zich na vijftig jaar afgraven zien aan de bodem in El Alto: niet alleen is de toplaag verdwenen, ook zijn er hoogteverschillen van drie meter en meer ontstaan.

Bakstenen woningen zijn duurder en leveren daardoor de bewoners meer status op dan adobe. Een compromis uit zich in El Alto in het gemengde gebruik van bouwmaterialen: Heel de woning is in adobe opgetrokken, behalve een bakstenen muur aan de straat. Doorgaans hebben adobe en baksteen een vergelijkbare thermische isolatie en gedrag bij vocht. Echter, de gebruikte bakstenen zijn in de praktijk van zodanig slechte kwaliteit dan ze erg kwetsbaar zijn en snel beschadigen. Zo dringen vocht en koude binnen in de bakstenen muren, waar adobe muren 's nachts veel langer de warmte vasthouden. Het gebruik van adobe op het gelijkvloers is dan ook een rationele beslissing. Zowat alle éénlagige gebouwen zijn opgetrokken uit

adobe. Voor muren op de verdiepingen daarentegen worden de lichtere bakstenen gebruikt, wat maakt dat men bij gebouwen met drie of meer bouwlagen een combinatie van bouwmaterialen aantreft: adobe op de begane grond en baksteen op de andere verdiepingen. Bij zeldzame hoogbouw maakt de traditionele adobe plaats voor een betonnen skelet dat wordt opgevuld met baksteen.

Doorgaans worden golfplaten als dakbedekking gebruikt: golfplaten zijn goedkoop en snel en eenvoudig te plaatsen. De meeste huizen in El Alto hebben een lessenaarsdak. Hierbij heeft men geen pannenkatten nodig zoals bij dakpannen, wat de kosten laag houdt. Twee rijen platen overlappen elkaar en bedekken het hele dak. Bovendien kan men één of meer platen vervangen door doorzichtige plastic exemplaren (groene of gele kleur), waardoor daglicht binnen kan treden en de woning kan opwarmen. Andere dakbedekkingmaterialen als beton, dakpannen en stro, worden zelden toegepast.

Tabel 1.2: Bouwmaterialen in El Alto (als % van het totaal)

muren		daken		vloeren		
adobe	baksteen	golfplaat	dakpannen	hout	cement	aarde
91	9	97	3	27	34	39

Voor vloeren zijn drie belangrijke bouwmaterialen: aarde, cement en hout. Een aardenvloer wordt beschouwd als een teken van armoede. Zo een vloer is nagenoeg gratis, men moet enkel de grond aanstampen en ook het onderhoud is eenvoudig. Cementen- en bakstenen vloeren zijn ook gemakkelijk schoon te houden en zijn relatief goedkoop, maar zij zijn koud. Een houten vloer op het gelijkvloers is een statussymbool, door de hoge kostprijs ervan. Hout isoleert beter tegen koude uit de ondergrond en verhoogt het comfort. Een nadeel is het onderhoud: het hout moet geolied worden om het tegen rotten te beschermen. Dit is duur en arbeidsintensief.

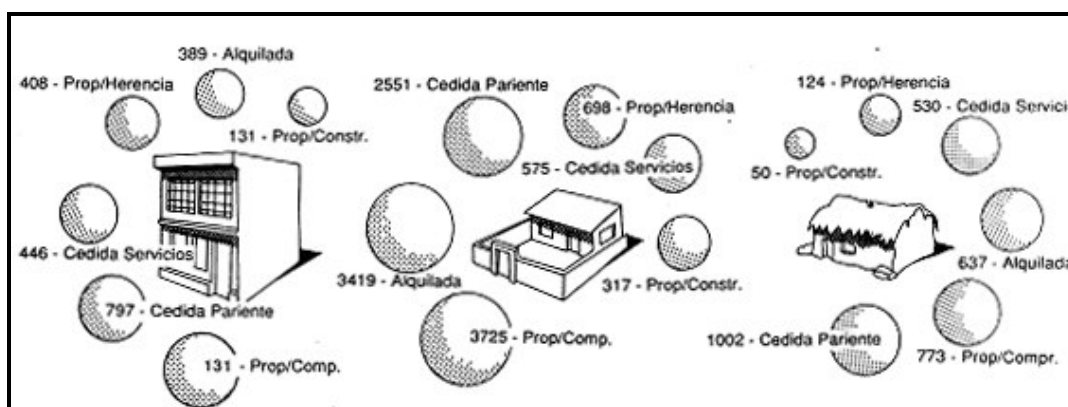
2.3.5 Kwaliteit van de woonomstandigheden [5] [6]

De introductie van sanitaire voorzieningen in de woning heeft geleid tot een verbetering van de woonomstandigheden en een afname van de gezondheidsrisico's (cholera, tyfus en diarree).

De dodelijke ziekte van Chagas is bij ons onbekend, maar vormt in Bolivia een hardnekkige plaag. De ziekte wordt overgedragen door de Vinchuca, een bloedzuigend insect kever die vooral in spleten en kieren van traditionele huizen gedijt. Aardenvloeren, daken in stro en lemen muurtjes geven de kever meer kansen. Een gebrek aan hygiëne en onderhoud gecombineerd met bijgeloof maakt het bestrijden van de Vinchuca niet makkelijker. Door een deel van de bevolking wordt de kever nog steeds

als een geluksbrenger en een voorbode van goede oogsten gezien. Gezien het risico dat verbonden is aan traditionele woningen worden vooral de armste lagen van de bevolking getroffen door Chagas. 25% van de bevolking is besmet door Chagas. Voor de Boliviaanse overheid is Chagas een prioriteit. Het Ministerie van Huisvesting behandelt de besmette huizen met chemische bestrijdingsmiddelen.

Algemeen kan men drie types eengezinswoningen onderscheiden in El Alto, met elk een verschillende woonkwaliteit, zoals weergegeven in figuur 1.12. Door de combinatie van lage inkomens, hoge druk op de grond en dus hoge kavelprijzen, leven vele huishoudens in kleine woningen. Nog steeds zijn er gezinnen die slechts over één kamer beschikken.



Figuur 1.12: Woontypes en woonkwaliteit in El Alto: a. goed; b. matig; c. slecht

2.3.6 Economische kenmerken van de huishoudens

Het zelfbouwproces in El Alto kenmerkte zich in het verleden door het inschakelen van timmerlieden, metselaars, dakdekkers en loodgieters door de eigenaar-bewoners. Mettertijd is het aandeel werkenden in de bouwnijverheid teruggedrongen, dit hangt samen met het verzadigd raken van de markt voor zelfbouwoningen en een toename in de inzet van bouwbedrijven van buitenaf voor de constructie van nieuwbouw.

Het inkomen van een man bedraagt ca 500 Bolivianos (Bs), van een vrouw ca 400 Bs. Door de economische crisis in de eerste helft van de jaren tachtig hebben velen geen middelen om zelf een woning te bouwen. El Alto kent dan ook een grote huurmarkt. De huurprijs van een woning bedraagt ca 70 Bs per maand.

Tabel 1.3 geeft een idee van de inkomens van de gezinnen die we hierover ondervraagden. In de tabel 1.3 zijn ook richtwaarden opgenomen van prijzen voor de gebruikelijke bouwmaterialen, door ons bekomen na navraag in één bouwbedrijfje.

Tabel 1.3: Prijs van bouwmaterialen, richtwaarden van de inkomsten en de belangrijkste uitgaven

bouwmaterialen		
	eenheid	prijs per eenheid [Bs]
golfplaat	2m10	32
dakpannen	15 dakpannen	17
wapening	diameter 8mm lengte 8m	58
portlandcement	50 kg	44.5
baksteen	100 bakstenen	32
latex verf	18 liter	230
pigment	-	5.5
aluminium	1mx1m	56
plastic	1mx2m / 1mx1m	66 / 32
inkomsten [Bs/dag]		
schoenpoetser		25
verkoper van boekjes		20
verkoper van kip		25
schrijnwerker		22
uitgaven [Bs/dag]		
transport naar La Paz		6
eten voor het gezin		30

2.4 SolidHouses in El Alto als uitgangspunt scriptie

Voor de bouwfysische en de structurele analyse is uitgegaan van een kleine SolidHouse in Bolivia. Door de Ecoshell als woning te bouwen in El Alto wordt er niet voldaan aan de voorwaarde van de Monolithic Dome Association. In El Alto heerst namelijk geen 'warm tot zeer warm' klimaat, maar een koud klimaat door het Andes gebergte.

De bergketen zorgt voor een verdeling van het land in verschillende klimaatzones. In het noorden (Amazones) is het over algemeen tropisch en vochtig. In het Zuid-Oosten (Chaco) meestal heet en droog, in de valleien gematigd koel en in de hooglanden (Altiplano) koud. Afhankelijk van de hoogte wordt het steeds kouder, met 's avonds op hoogten van 4000 meter temperaturen rond het vriespunt.

El Alto is gelegen op een hoogte van ongeveer 4082 meter. De buitenluchttemperatuur in El Alto heeft een zeer grote fluctuatie. Vooral tijdens de winter kan het 's nachts heel koud zijn en worden overdag temperaturen bereikt van 15°C. De maximale horizontale zonnestraling per dag is gedurende het hele jaar ongeveer gelijk en ligt veel hoger dan deze in België. Ook de diffuse horizontale en de directe zonnestraling hebben een grote waarde in de winter. Dit komt doordat de

zonne-intensiteit stijgt bij toenemende hoogte. Door de intensieve zonnestraling voelen de buitentemperaturen veel zachter aan.

In de woningbouw wordt er te weinig gebruik gemaakt van dit natuurlijk voordeel. De conventionele woningen worden gebouwd uit adobestenen en een stalen dak in golfplaat. Doordat het staal sterk geleidend is lopen de binnenluchttemperaturen overdag hoog op, maar deze warmte wordt ook snel opnieuw afgegeven zodra de zon niet meer schijnt. De adobemuren houden de warmte nog enigszins vast, maar door het grote dakoppervlak duurt dit niet zo lang.

Maar ook de SolidHouses houden geen rekening met het klimaat door het gebrek aan isolatie en slechte positionering van de ramen. In de bouwfysische analyse zal nagegaan worden wat de voordelen zijn van het klimaat en hoe deze kunnen worden ingezet om het binnenklimaat te verbeteren. Voor de analyse wordt uitgegaan van een kleine woningen, straal 3,1 meter, in El Alto.

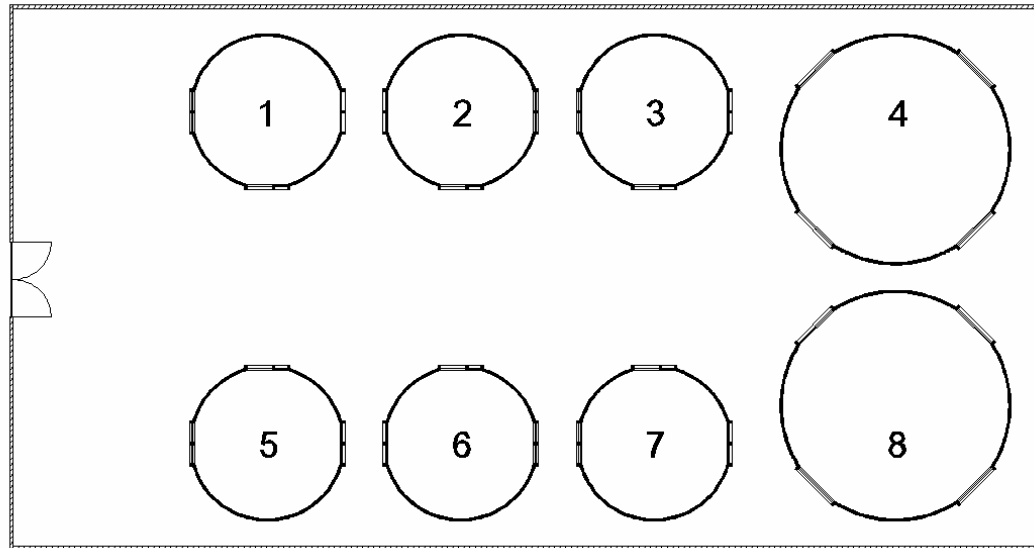
Het doel van de verbetering van de woningen is dat de maximale waarde van de binnenluchttemperatuur later wordt bereikt, dus op het ogenblik dat de buitentemperatuur reeds laag is. Zo worden de nachtelijke binnenluchttemperatuur, wanneer alle bewoners thuis zijn, hoger. De zonnestraling zal dus overdag moeten gecapteerd worden en opgeslagen, zodanig dat deze 's nachts kan vrijgegeven worden. Dit kan door een materiaal toe te passen met een voldoende tijdvertraging en een minimale warmtegeleiding.

Bij de toepassing van de SolidHouses zal er dus steeds rekening moeten gehouden worden met het buitenklimaat. Door het ontbreken van isolatie en verwarming speelt deze immers als enige een rol voor het binnenklimaat. Na het onderzoek van de winst- en de verliesposten van de betonnen koepel worden ook enkele voorstellen tot verbeteringen gegeven voor de andere klimaten waar de SHF van plan is om koepels te bouwen.

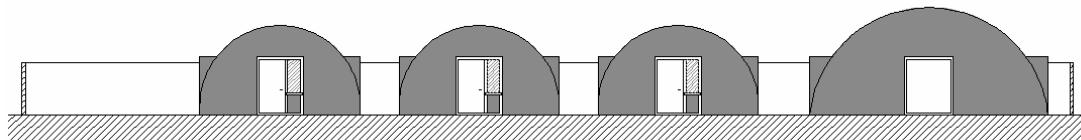
In de structurele analyse zullen de bepalende parameters van het structureel gedrag onderzocht worden. Het onderwerp van de structurele analyse zijn de koepels in El Alto. Met als leidraad de kennis van het structureel gedrag enerzijds en de bouwfysische gedrag anderzijds wordt er hier een voorstel tot constructieve verbetering gegeven.

2.4.1 Plannen en doorsnedes

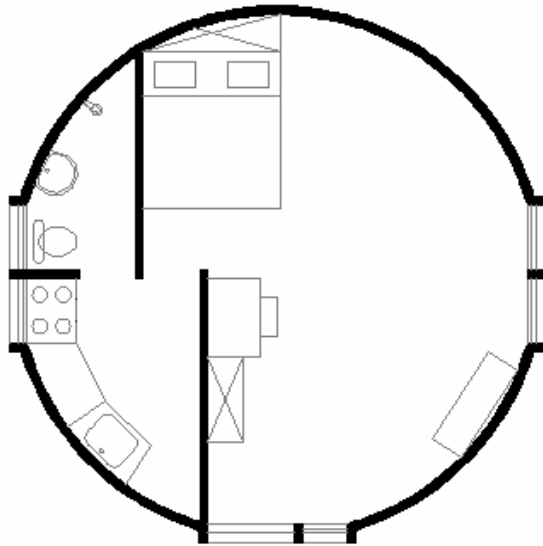
Figuur 1.13 tot 1.16 geven de afmetingen en plannen van de koepelwoningen in El Alto weer.



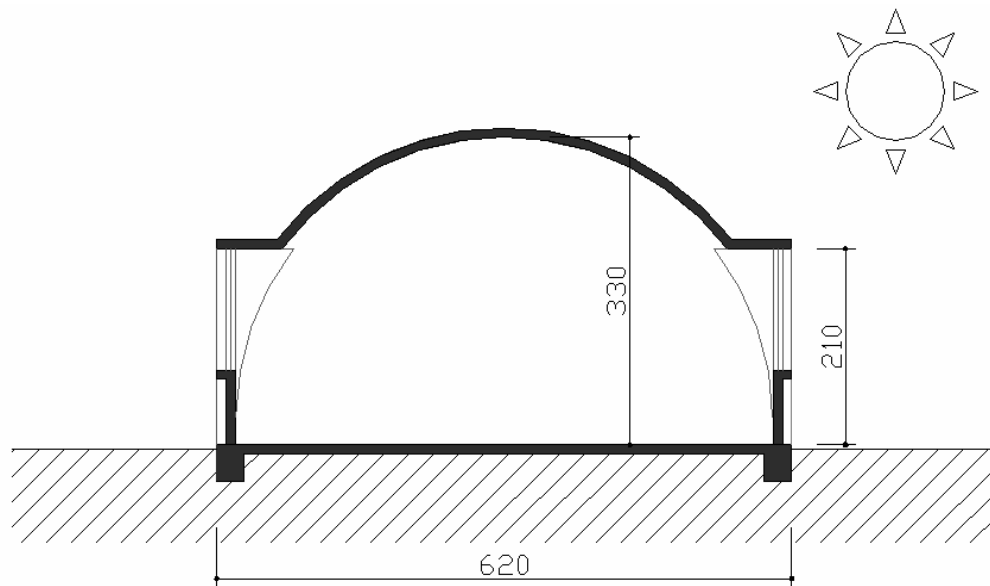
Figuur 1.13: Inplanting koepelwoningen in El Alto



Figuur 1.14: Aanzicht koepelwoningen in El Alto



Figuur 1.15: Inrichting koepelwoning met diameter 3,1 meter



Figuur 1.16: Doorsnede koepelwoning met diameter 3,1 meter

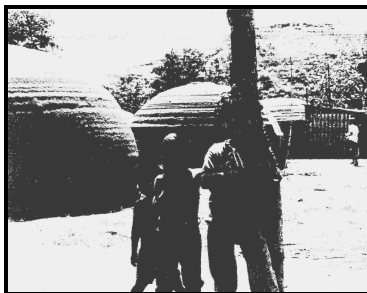
3. Andere vormen van koepelwoningbouwsystemen

De mens bouwt al eeuwen volgens het koepelbouwsysteem. Voorbeelden hiervan zijn de iglo's in Alaska en Canada en de obus-hutten in Kameroen en Tsjaad. Tegenwoordig wordt de koepelvorm ingezet als alternatieve bouwmethode om het (vaak acute) woningprobleem in ontwikkelingslanden en landen getroffen door natuurrampen op te lossen.

Het opleggen van een woonvorm aan mensen is nooit eenvoudig. Nog veel mensen houden zelfs in hoogste nood vast aan hun vertrouwde architectuur. Dit bleek uit studies van het ontwikkelingsprogramma van de Verenigde Naties in Iran. De koepelwoningen, gebouwd als noodhuisvesting voor de Irakese vluchtelingen van het Saddam regime, bleken niet echt populair bij de bewoners. Doordat de koepels rond zijn, lijken ze niet op hun traditionele huizen. [7]

Ook de inwoners van Sri Lanka stonden sceptisch tegenover de SolidHouses. De oorzaak was dat de koepelwoningen dezelfde vorm hebben als een Boeddhistisch tempelcomplex. Pas nadat ze door de SHF gewezen werden op de voordelen ging de bevolking akkoord. Voornamelijk het argument dat deze woonwijze tsunami resistent zijn gaf de doorslag, doordat vele inwoners op die manier familie en vrienden verloren waren. [1]

Ook de 'West German Red Cross and Bayer polyurethane iglo's' in Nicaragua werden niet aanvaard door de bevolking. Van de koepelwoningen blijft nu slechts het bovenste gedeelte over, ondersteund door houten kolommen. [8]



Figuur 3.1: Koepelwoningen in Nicaragua voor en na de aanpak van de bewoners

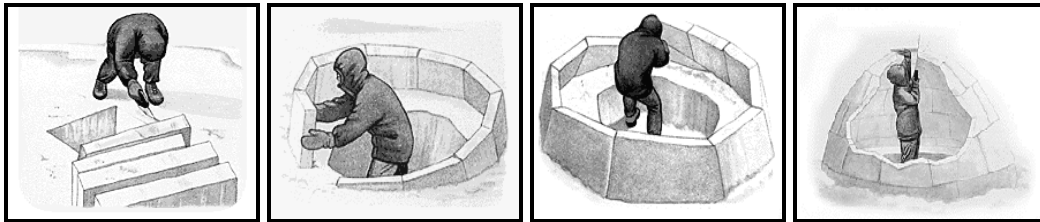
In andere landen is de koepelvorm wel aanvaard als woning. Dit wijst op het aanpassingsvermogen van sommige culturen. [8]

3.1 Traditionele koepelwoningbouwsystemen

3.1.1 Iglo [9]

De Inuït bouwde iglo's volgens het koepelbouwsysteem als winterwoning in Alaska en Canada. Doordat sneeuwblokken geen trek kunnen opnemen en er dus geen mogelijkheid bestaat om met sneeuwblokken een plat dak te construeren, bouwde de Inuït koepels.

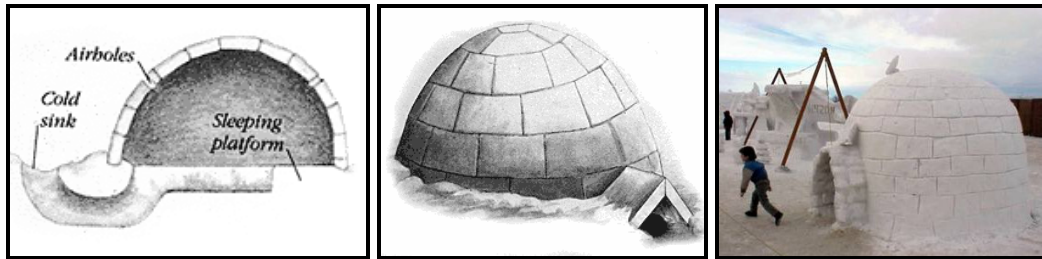
De iglo werd opgebouwd uit spiraalsgewijs gerangschikte sneeuwblokken en kon in ongeveer anderhalf uur opgericht worden. De bovenliggende lagen worden gedragen door de onderliggende en zijn zo dus enkel op druk belast. Door de koepelvorm moeten de sneeuwblokken dus enkel drukkrachten opnemen, waartoe zij in staat zijn. Sneeuw gebruikt om de iglo te bouwen, moest genoeg structurele sterkte bezitten om gekapt en gestapeld te kunnen worden. De plaats waar de sneeuwblokken werden uitgehaald diende als bodem van de iglo.



Figuur 3.2: Bouwmethode iglo

De sneeuw zorgde voor een uitstekende warmte-isolatie en de koepelvorm bood een maximale windgeleiding. De sneeuw hut werd verwarmd en verlicht door een lamp met zeehondenvet als brandstof. Deze leverde voldoende hitte om de binnenwand van de iglo te doen smelten. Door het herhaaldelijk smelten en terug vervriezen van binnenzijde ontstond een dikke ijslaag die bijdroeg tot de sterkte van de iglo. Om het druipen van de ijswand tegen te gaan werd de binnenwand behangen met kariboehuiden.

Een lange tunnelingang zorgde ervoor dat de dat de warme lucht niet naar buiten kon ontsnappen. De slaap- en zitplaatsen werden gevormd door een verhoogd platform dat bedekt was met huiden en ongeveer de helft van de iglo in beslag nam.



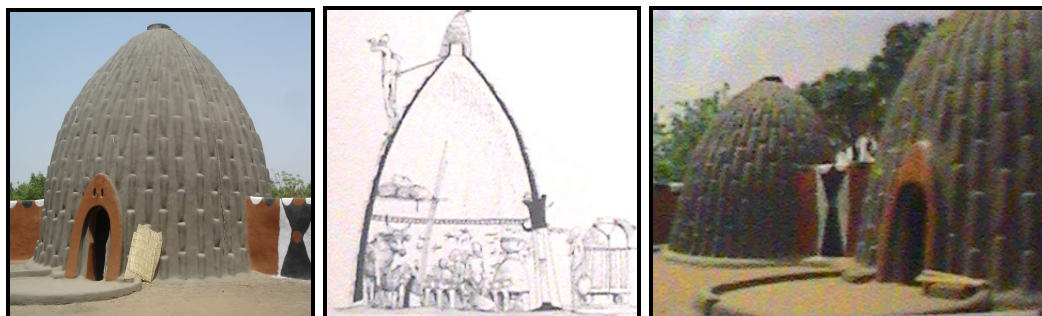
Figuur 3.3: Iglo

Het was noodzakelijk om ventilatieopeningen te voorzien in de iglo. De koolstofdioxide geproduceerd door de mens en het verwarmingssysteem moest kunnen afgevoerd worden langs openingen in de gebouwschil. Als raam werd vaak een blok zoetwaterijs gebruikt om licht te laten binnenvallen in de binnenruimte.

3.1.2 De obus-hut, Tsjaad en Kameroen [10], [11]

Obus-hutten zijn constructies in aarde en gras, die men terug vindt in Noord-Kameroen en Tsjaad waar de Musgum leven, een volk van vissers en ponykwekers. De naam 'obus' is afgeleid van de conische vorm en de verschillende cannelures in de gebouwschil.

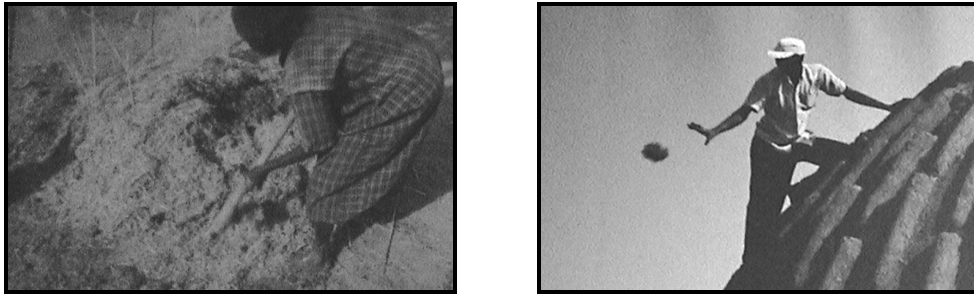
De hutten worden met de hand gebouwd, zijn ecologisch en hebben een parabolische vorm, waardoor ze enkel op druk belast worden. Er is geen wapening voorzien in de gebouwschil, enkel de decoratieve motieven aan de buitenkant dienen als smalle steunberen. Ze worden ook gebruikt als waterafvoer en steigers tijdens de bouw van de woning. Bovenaan is er een opening om de nodige ventilatie te verschaffen. Bij regenweer wordt de opening afgedekt door een steen.



Figuur 3.4: Obus-hut

Ondanks het grote gewicht van de aarde wordt er geen fundering voorzien. De woningen zijn rond een circulair plan gebouwd door opeenstapeling van verschillende lagen en kunnen een diameter bezitten van meer dan 7 meter. De hoogte

kan waarden bereiken van 15 tot 20 meter. Onderaan hebben de muren een dikte van 30 centimeter, aan de top bedraagt deze slechts 10 centimeter.



Figuur 3.5: Constructiemateriaal

Het bouwmaterial voor de hut bestaat uit een mengsel van klei en suksukyi gras, een soort stro, gemengd met uitwerpselen van geiten. Dit mengsel laat men drogen in de zon.

De bouw van een obushut duurt zes maanden. Dit is zeer lang in vergelijking met de gewone hutten die op enkele dagen kunnen opgericht worden. Om deze reden worden er geen nieuwe obushutten meer geconstrueerd.

3.2 Koepelbouwsystemen als nood- en ontwikkelingswoningen

3.2.1 Sandbag Shelters, Nader Khalili [7], [10]

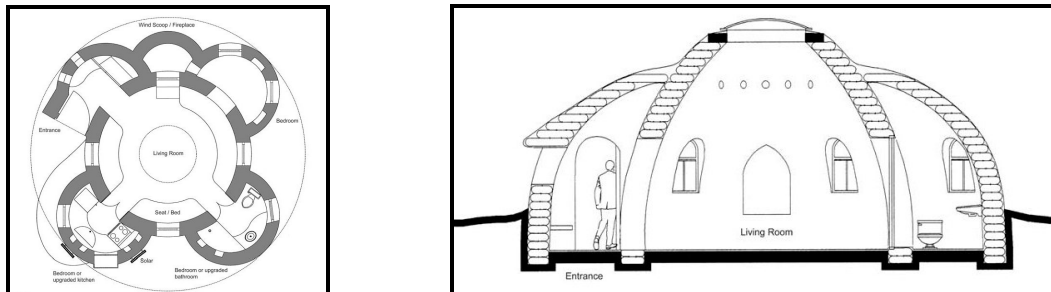
Nader Khalili, een Amerikaanse architect van Iraanse origine, houdt zich bezig met het lot van een miljard daklozen. Voor Khalili is de oplossing eenvoudig: hij gebruikt een materiaal dat we overal aantreffen, namelijk aarde. Khalili ontwikkelde de 'Super Adobe-techniek' om een 'Sandbag shelter' (schuilplaats in zandzakken) of 'Emergency shelter' (noodwoning) te creëren.



Figuur 3.6: Constructiewijze Sandbag Shelter

Deze constructie vereist geen specifieke kwalificatie, geen duur transport, heeft voldoende met een minimum aan primaire grondstoffen en kan vlug gebouwd worden door een ploeg van 3 tot 5 personen. De Sandbag shelter is een soort van iglo, bestaande uit zandzakken die op elkaar gestapeld worden. Hij wordt gebouwd met twee oorlogsmaterialen: zandzakken en prikkeldraad.

De zandzakken worden in alsmaar kleinere cirkels op elkaar gestapeld, de prikkeldraad gaat tussen de lagen en houdt de zandzakken samen. Deuren en ramen bestaan uit boogvormige openingen. In de nok kunnen openingen gelaten worden om schouwventilatie te verkrijgen. De buitenkant kan met moddermengsels worden bepleisterd, wat vooral in vochtige klimaten nodig is. Een woning met vijf kamers (34m²) kan aan een familie een blijvende huisvesting bieden.



Figuur 3.7: Plattegrond en doorsnede Sandbag Shelter

Deze shelters weerstaan aardbevingen, orkanen, overstromingen en isoleren tegen koude, warmte en lawaai door de vorm, het gewicht, de dikte en de prikkeldraad. De structuur is uitgetoetst in uiteenlopende klimaten, van Canada tot Chili. Ze is op grote schaal toegepast in Iran. In 2004 ontving het systeem van Nader Khalili de driejaarlijkse Aga Khan-prijs, een vooraanstaande onderscheiding voor architectuur in Islamitische landen.

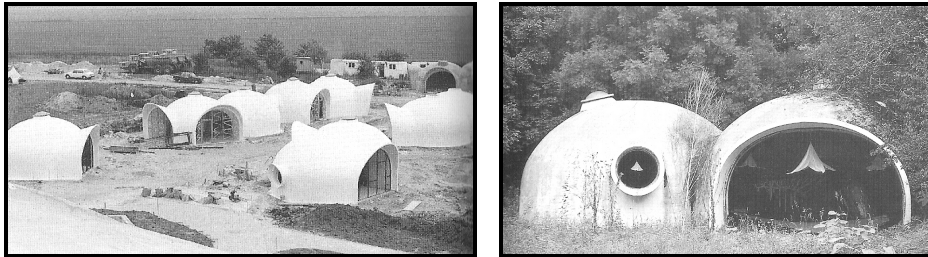
Als de koepels voor langere tijd bewoond moeten worden kunnen er meerdere kamers, hogere bogen en complexere structuren gebruikt worden. De binnenkant kan dan bepleisterd worden.



Figuur 3.8: Toepassingen van de Sandbag Shelter in Iran, India en Chili

3.2.2 Opgeblazen ballonnen, Heinz Isler [12]

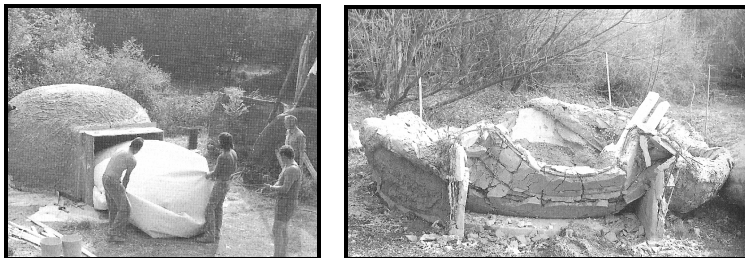
Heinz Isler ontwikkelde samen met architect J. Dahinden in 1997 woningen die aardbevingen weerstaan in het toenmalige Perzië (nu Iran). Isler gebruikte opgeblazen ballonnen die als herbruikbare bekistingen dienden, analoog als bij de SolidHouses. Het doel was de lokaal beschikbare materialen, zand en gestabiliseerde grond, te benutten om woonruimten te vervaardigen.



Figuur 3.9: Arbeiderswoningen in Parijs en proefkoepels in Zwitserland

De eerste experimenten werden uitgevoerd op ballonnen met de helft van de benodigde diameter. De woningen werden gebouwd in Zwitserland en bestonden uit een gespoten mengeling van gips en leem of uit een cement-gips mortel. Dit is een soort moderne adobe. Dit systeem laat toe om een bolvormige ballonvorm te gebruiken zonder het uiteenspatten van de schaal aan zijn basis. Het materiaal van het prototype was niet in staat om vochtigheid en vorst op te vangen. Echter het klimaat waar de woning zou worden gebouwd is droog, dus de gipsen constructie zou die omstandigheden wel kunnen weerstaan.

Isler bleef op zoek gaan naar woningen die weerstand bieden tegen vorst. Van dit onderzoek bevinden zich nog twee getuigen in de tuin van Islers kantoor. De schaal werd gevormd op een opgeblazen ballon. De opbouw bestond uit een laag gips, dan een isolatielaag van polyurethaanschuim en tenslotte een dunne laag van spuitbeton die weersbestendigheid moest verzekeren. Ondanks het feit dat er naar de schalen lange tijd niet is omgekeken zijn ze nog steeds in goede staat. De enige schade is te zien aan het gips dat begint af te brokkelen door de vorst-dooicycli.



Figuur 3.10: Experimenten naar vorstvaste koepels

Enkele koepels zijn gebouwd nabij Parijs. Zij doen dienst als arbeiderswoningen. (figuur 3.9)

3.2.3 Earthships, Michael Reynolds [13]

Een earthship is een duurzaam en ecologische woning, dat volledig onafhankelijk is van energie- en watervoorziening van buitenaf. De woning wordt zo ontworpen om de impact op de aarde te verminderen. Een earthship is gebouwd uit afvalmaterialen zoals autobanden, blikjes en flessen. Elektriciteit wordt voorzien door middel van zonnepanelen en/of windkracht. De watervoorziening gebeurt door het opvangen van regenwater dat meermaals wordt gerecycleerd.

Bij de toepassing van autobanden als muren worden deze gevuld met aarde en aangestampt, zodat er een erg stevige massa gevormd wordt. Wanneer de eerste laag banden gelegd is, worden de volgende lagen net zoals bakstenen erop gestapeld. In de natte adobe tussen de banden worden er soms aluminiumblikjes of glasscherven gedrukt om de adobe nog stabiel te maken. Het principe werd voor het eerst in praktijk gebracht door Michael Reynolds in New Mexico.

Ook koepelwoningen kunnen opgebouwd worden met behulp van dit systeem.



Figuur 3.11: Earthships uit autobanden

3.3 Alternatieve bouwwijze zonder luchtvorm

De constructie van een koepel volgens het principe van het Monolithic Dome Institute vergt gespecialiseerd gereedschap. Anderzijds is de constructie geen erg arbeidsintensief project. Deze combinatie werkt goed voor bijvoorbeeld de USA, waar arbeid duur is en uitrusting volop aanwezig. Het tegengestelde is echter waar in ontwikkelingslanden, waar arbeid goedkoop is en gereedschap duur en niet meteen voorhanden.

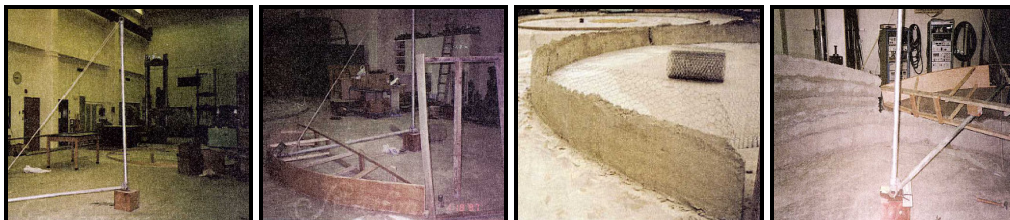
Een mogelijke alternatieve bouwwijze wordt beschreven door Chris Zweifel, medewerker van de Monolithic Dome Association. [14]

Zweifel zocht naar een eenvoudig vormsysteem voor de constructie van kleine koepelwoningen, met als opzet de noodzaak voor dure apparatuur en technische expertise. De benodigdheden bestaan enkel uit:

- 1 multiplex blad
- 2 stalen palen en een koord
- fittings en verbindingen
- hard werk: 180 manuren

De constructiemethode wordt ook beschreven volgens de opeenvolgende bouwstappen.

1. De juiste vorm wordt op de grond getekend. Een frame dient als passer, en bestaat uit een verticale paal en een hefboomsarm. Aan het eindpunt wordt de mal bevestigd.
2. De vormmal bestaat uit een multiplex strook omgebogen tot de gewenste vorm. Vooraf is de mal ingevet met olie om later het loskomen van het beton te vergemakkelijken. Het beton is samengesteld uit 3 delen zand, 1 deel cement en $\frac{1}{4}$ deel leem (om het beton meer bewerkbaar te maken). Na het plaatsen van kippengaas wordt het beton met een troffel op de vorm uitgesmeerd.
3. De onderste 'lift' is compleet. Het beton is uitgehard en de mal verwijderd. De kippengaas wapening komt uit het deel naar boven. De afmetingen bedragen 14", 48". Bij grotere afmetingen wordt de plaatsing moeilijker door de dubbele kromming en bij kleinere is er meer werk om de verbindingsdraad te plaatsen en deze netjes bijeen te houden.
4. Er worden eerst plaatselijk een paar 'lifts' vervolledigd. Daarna wordt de vorm gedraaid om weer een paar 'lifts' af te werken. Hierdoor ontstaat een opening tussen de twee fasen, die later eenvoudig gedicht kan worden.



Figuur 3.12: Bouwstappen 1 tot 4

5. Hogerop moet de constructie gestut worden zodat het niet ineen zou zakken. Bovenaan is het gemakkelijker om het beton van binnenuit aan te brengen. Om de draadmazen op de juiste plaats te houden, kan het aan de vorige "lift" verbonden worden met stukjes verbindingsdraad.
6. Naarmate de lagen groeien, worden gaasdelen in overlapping gelegd om de toekomstige buitenlaag te binden. De hele koepel moet weer met kippengaas ingepakt worden en geplaasterd met beton.
7. Nadat de eerste lagen beton zijn aangebracht bestaat de koepel uit afzonderlijke lagen beton.
8. Vervolgens wordt de tweede laag beton aangebracht. Belangrijk daarbij is om niet te veel water in het mengsel te steken, om krimpscheuren te vermijden.



Figuur 3.13: Bouwstappen 5 tot 8

3.4 Besluit

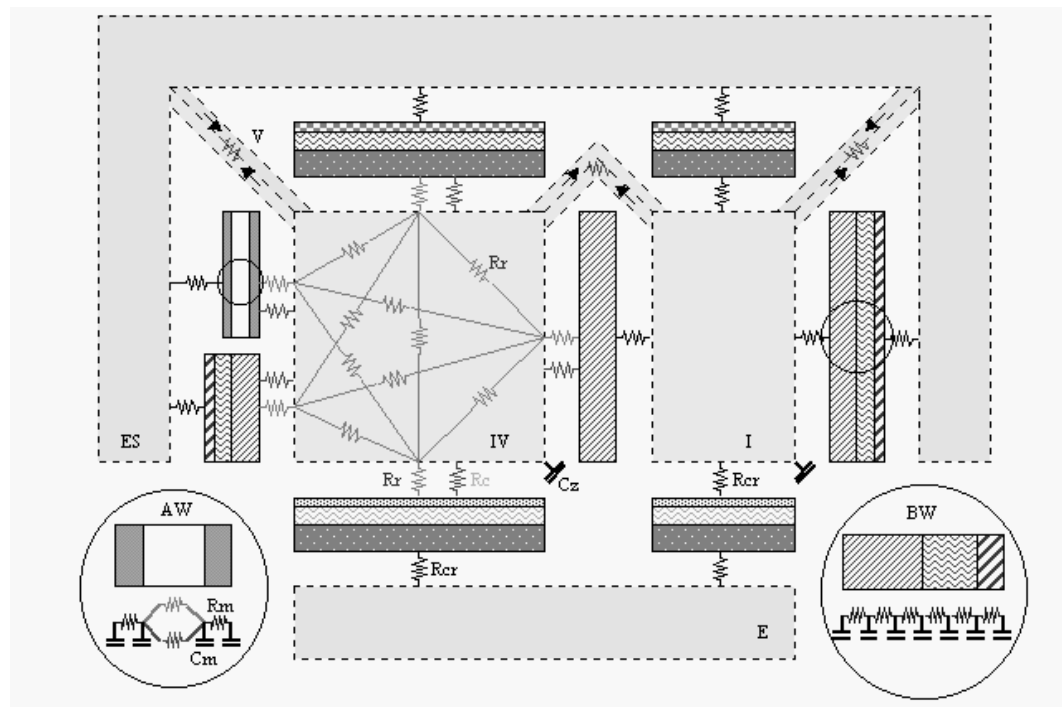
Uit voorgaande voorbeelden blijkt dat de koepels niet noodzakelijk moeten worden gebouwd in gewapend beton. Er kunnen even duurzame en weersbestendige koepelwoningen bekomen worden door het toepassen van alternatieve bouwmaterialen zoals klei, leem, stro,... Deze oplossingen bieden een groot ecologisch en economisch voordeel.

DEEL 2:

BOUWFYSISISCHE ANALYSE

1. Inleiding [15]

Het programma Capsol, van het bedrijf Physibel, is ontwikkeld om het dynamisch gedrag van multizonale objecten, zoals gebouwen, te kunnen stimuleren. Het programma gaat uit van een netwerk van thermische weerstanden en thermische condensatoren. De temperaturen in de knopen en de warmtestromen worden voor elke tijdstap berekend, uitgaande van de randvoorwaarden die in een aantal knopen gedefinieerd worden.



Figuur 1.1 Werkingsprincipe Capsol

Capsol vertaalt het gebouw en zijn omgeving in een aantal externe en interne zones, van elkaar gescheiden door wanden. De wanden worden gemodelleerd als een serie van weerstanden en condensatoren. Tussen deze wanden kan warmtetransport plaatsvinden door geleiding, convectie en straling. De warmtestromen komen tot stand door toegekende tijdsafhankelijke randvoorwaarden, zoals het verloop van de buitentemperatuur en de bezonning.

Hier werd Capsol gebruikt om een inzicht te krijgen in het thermisch gedrag van de betonnen koepelwoning. Ook de effecten van verschillende bouwkundige ingrepen in de gebouwschil op het verloop van de temperatuur van het binnenklimaat en de ruimteomhullende constructie kunnen hiermee onderzocht worden.

Hieronder worden de gekozen beoordelingsparameters weergegeven. Verder zal de wijze waarop de koepelwoning is ingevoerd in Capsol en de talrijke invoergegevens besproken worden.

2. Beoordelingsparameters

2.1 Keuze referentiedagen

De verschillende invloeden worden onderzocht voor een gemiddelde winter- en zomerperiode. De winterperiode is genomen van 1 tot 15 juni. In die situatie zijn de gemiddelde dagtemperaturen het laagst en staat de middagzon het laagst.

De zomerperiode loopt van 5 tot 19 november, waarbij de zon het hoogst in het zenit staat.

Om de vergelijking te verduidelijken zijn uit deze periodes telkens drie dagen genomen. In de wintersituatie is dit rond de koudste dag, 8 juni en in de zomer rond de warmste, 11 november.

Op 8 juni is echter het verloop van de buitentemperatuur verschillend van de andere dagen in de periode. Dit wordt veroorzaakt door bewolking op die dag. Omdat dit ook invloed heeft op de binnenluchttemperaturen is in de winterperiode 9 juni gekozen als referentiedag.

Als deze periodes sterk verschillen van de tussenperiodes, zal het verloop van de binnenluchttemperaturen in die situaties ook weergegeven worden.

In tabellen 2.1 en 2.2 zijn de gegevens voor het buitenklimaat opgenomen voor de referentiedagen in de winter- en zomerperiode.

Tabel 2.1: Gegevens buitenklimaat op 9 juni

$\theta_{e,gem}$ [°C]	$\theta_{e,max}$ [°C]	$\theta_{e,min}$ [°C]	$\theta_{e,ampl}$ [°C]	$t(\theta_{e,max})$ [h]	$q_{zon,glob\ max}$ [W/m²]	$t(q_{zon,glob\ max})$ [h]
3,9	14,7	-7,5	10,8	13:55	896,3	12:00

Tabel 2.2: Gegevens buitenklimaat op 11 november

$\theta_{e,gem}$ [°C]	$\theta_{e,max}$ [°C]	$\theta_{e,min}$ [°C]	$\theta_{e,ampl}$ [°C]	$t(\theta_{e,max})$ [h]	$q_{zon,glob\ max}$ [W/m²]	$t(q_{zon,glob\ max})$ [h]
11,5	20,4	1,1	8,9	13:55	1170,9	11:55

2.2 Comfort binnenklimaat [17]

2.2.1 Lucht- en oppervlaktetemperatuur

De binnenluchttemperatuur wordt in het midden van het gemodelleerde volume gemeten. Er wordt geen rekening gehouden met de eventuele invloeden van warme- of koudestraling door de wanden.

De oppervlaktetemperatuur wordt gemeten aan het oppervlak van de wanden.

2.2.2 Comforttemperatuur

Voor de berekeningen is uitgegaan van de comforttemperatuur. Deze houdt wel rekening met de stralingstemperatuur. Het is dus de temperatuur zoals men deze werkelijk in de ruimte zou ervaren. Capsol berekent deze volgens de formule:

$$\theta_{res} = a \cdot \theta_{air} + (1 - a) \cdot \theta_{rad} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

met θ_{res} comforttemperatuur [°C]

θ_{air} luchttemperatuur [°C]

θ_{rad} stralingstemperatuur [°C]

De gewichtsfactor a wordt ingesteld op 0,5. De comforttemperatuur wordt dan voor 50% bepaald uit de luchttemperatuur en voor 50% uit de stralingstemperatuur van de wanden.

2.2.3 Thermisch comfort

Thermische behaaglijkheid, de mate van thermisch comfort, is de toestand waarin de mens tevreden is over zijn thermische omgeving en geen voorkeur heeft voor een hogere of lagere omgevingstemperatuur.

Voor het behoud van het thermisch comfort moet aan twee voorwaarden voldaan zijn. De eerste voorwaarde is dat de combinatie van oppervlaktetemperatuur aan de huid en de inwendige lichaamstemperatuur een thermisch neutraal gevoel geven. De tweede conditie is dat de lichamelijke energiebalans in evenwicht is. De warmte geproduceerd door het metabolisme moet gelijk zijn aan de hoeveelheid warmteverlies van het lichaam.

De thermische behaaglijkheid kan bepaald worden met de comfortvergelijking. [16]

Deze wordt beschreven door Innova volgens de formule:

$$M - W = H + E_c + C_{res} + E_{res}$$

De comfortvergelijking is afgeleid van de behaaglijkheidsvergelijking van Fanger:

$$f(H, I_{cl}, \theta_a, \theta_{mrt}, p_a, v_{ar}, \theta_s, E_{sw}) = 0$$

De grootheden in deze vergelijking worden bepaald door verschillende comfortparameters die invloed hebben op de warmteperceptie van de mens. Deze parameters kunnen opgesplitst worden in omgevingsvariabelen en persoonsafhankelijke variabelen.

Omgevingvariabelen:

- θ_a luchttemperatuur [°C]
- θ_{mrt} gemiddelde stralingstemperatuur [°C]
- p_a partiële waterdampdruk van de lucht bij θ_a [Pa]
- v_{ar} relatieve lichtsnelheid [m/s]

Persoonsafhankelijke variabelen:

- H Met waarde, warmteproductie door activiteit per m² lichaamsoppervlak [W/m²]
- I_{cl} Clo waarde, warmteweerstand door kleding [clo]
- θ_s gemiddelde huidtemperatuur [°C]
- E_{sw} warmteverlies door verdamping van transpiratievocht per m² lichaamsoppervlak [W/m²]

Een thermisch comfortabel klimaat kan bereikt worden door verschillende combinaties van deze parameters. Meestal wordt de luchttemperatuur gezien als de belangrijkste parameter van het binnenklimaat. Maar ook de stralingstemperatuur en in grotere ruimten de luchtbeweging blijken een grote invloed te hebben.

De mate van thermisch comfort kan gemeten worden aan de hand van de eerste vier comfortparameters, maar de beleving van het binnenklimaat is afhankelijk van de persoonsafhankelijke variabelen. Door het aanpassen van de kleding kan al snel een behaaglijker gevoel gecreëerd worden. Voor de beoordeling van het binnenklimaat is de comforttemperatuur genomen als referentie.

2.2.4 Lokaal thermisch discomfort

Thermisch discomfort kan ook ontstaan door een ongewenste, plaatselijke opwarming of afkoeling van een deel van het lichaam. Dit discomfort kan niet zomaar weggenomen worden door een verlaging of een verhoging van de ruimtetemperatuur. Thermisch discomfort kan ingedeeld worden afhankelijk van de oorzaak.

- Droogte zorgt voor lokale convectieve afkoeling van het lichaam
- Tocht is afhankelijk van de luchttemperatuur, de luchtsnelheid en de luchtturbulentie
- Stralingsasymmetrie door temperatuurverschillen tussen plafond en vloer
- Te grote verticale temperatuurgradiënt door temperatuurverschillen in luchtlagen
- Contacttemperatuur van de vloer te hoog of te laag
- Grote temperatuurfluctuaties, door gebruik van materialen met een slecht dempende werking

In de conventionele woningen in El Alto zorgt voornamelijk de stralingsasymmetrie voor een oncomfortabele binnenomgeving door het golfplaten dak en het enkel glas. Ook de tocht door de slechte aansluitingen van ramen, dak en deur en de grote temperatuurfluctuaties zorgen voor een onbehaaglijk binnenklimaat.

2.3 Beoordelingscriteria

De verschillende bouwkundige ingrepen kunnen beoordeeld worden volgens verscheidene criteria.

De eisen voor de comforttemperatuur, vastgelegd in de Belgische normen, kunnen moeilijk toegepast worden op het binnenklimaat in ontwikkelingslanden. In het ontwerp van de betonnen koepelwoning wordt namelijk geen verwarming gebruikt.

Daarom is hier gekozen voor een analyse op basis van de comforttemperatuur: maximale, minimale en gemiddelde, voor de zomer- en winterperiode. 's Nachts is de binnenluchttemperatuur van de woning te laag, de verbeteringen zullen zich dus vooral op de nachtelijke situatie concentreren. Om de nachtelijke temperaturen te verhogen moet de maximale binnentemperatuur zo laat mogelijk bereikt worden. Dit kan gerealiseerd worden door de hogere temperaturen overdag trager te laten indringen in de constructie door bouwkundige ingrepen.

Voor deze ingrepen zal de demping en de tijdvertraging van de binnentemperatuur ten opzichte van de buitentemperatuur berekend worden. Dit kan doordat het buitenklimaat verandert volgens een periodische functie, waarop de constructie reageert met een periodische respons. Ten opzichte van het signaal aan het buitenoppervlak worden de temperaturen en warmtestroomdichtheden in de wand gedempt en verschoven in de tijd met een bepaalde tijdverschuiving.

2.3.1 Damping

De amplitude van de temperatuurfluctuatie die aan het oppervlak van een constructie wordt opgelegd neemt af nadat de temperatuurgolf voorbij is. Deze dempende werking is afhankelijk van de dikte en de warmtecapaciteit van de constructie.

Hoe groter de demping hoe langer het duurt dat de andere zijde van de constructie de maximale of minimale temperatuur bereikt. De demping D van een constructiewand kan als volgt gedefinieerd worden.

$$D = \left(1 - \frac{\theta_{i, \text{ampl}}}{\theta_{e, \text{ampl}}} \right) \cdot 100\% \quad [\%]$$

met $\theta_{i, \text{ampl}}$ temperatuuramplitude aan het binnenoppervlak = $\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{gem}}$ $[\text{°C}]$

$\theta_{e, \text{ampl}}$ temperatuuramplitude aan het buitenoppervlak $[\text{°C}]$

Een grote waarde voor D geeft aan dat de temperatuuramplitude in de binnenruimte behoorlijk is afgenomen, dus dat het binnenklimaat stabiel is geworden. Bij een lage waarde zijn fluctuaties in sterkere mate merkbaar in het binnenklimaat dan bij een hoge.

Er zijn verschillende constructie-eigenschappen die invloed hebben op de demping. De demping zal stijgen als:

- De constructie beter thermisch geïsoleerd is. Dus als er materialen gebruikt worden met een grote warmteweerstand.
- Zware lagen worden toegepast naast warmte-isolerende lagen.
- De isolatie langs de buitenzijde leidt tot beste demping van de zomerpieken.

2.3.2 Tijdvertraging

De tijdvertraging is een maat voor de tijd die nodig is vooraleer de temperatuur in het gebouw zich aan een bepaalde verandering in warmtewinsten of buitentemperatuur heeft aangepast. De tijdvertraging kan eenvoudig berekend worden als het verschil in tijd tussen de maximale buitentemperatuur en de maximale binnentemperatuur.

$$\tau = t(\theta_{e, \max} - \theta_{i, \max}) \quad [h]$$

met τ tijdvertraging [h]

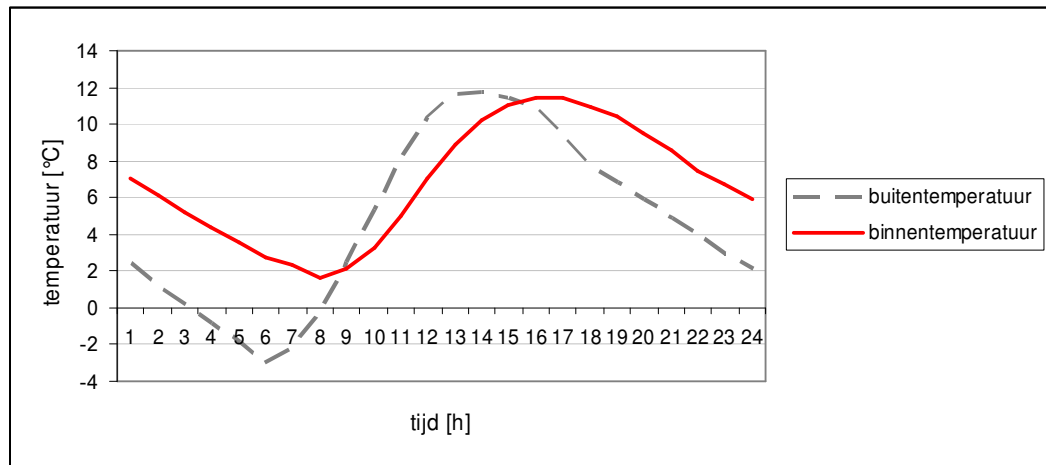
$\theta_{a, \max}$ maximaal optredende buitentemperatuur [°C]

$\theta_{i, \max}$ maximaal optredende binnentemperatuur [°C]

Hoe groter de tijdvertraging, hoe langer het duurt voordat de temperatuurfluctuatie van buiten door de constructie is binnengedrongen. Dus hoe later de maximale temperatuur bereikt wordt. Men kan dit effect bereiken door de wanden op te bouwen uit materialen met grote warmtecapaciteit.

Als de constructie een kleine tijdvertraging bezit zijn de kleine fluctuaties in het buitenklimaat snel merkbaar in het binnenklimaat. De tijdvertraging en demping van de binnenluchttemperatuur ten opzichte van de buitenluchttemperatuur zijn af te leiden uit grafiek 2.1.

Grafiek 2.1: Damping en tijdvertraging van de binnentemperatuur op 9 juni



Voor een nauwkeurigere bepaling van de tijdvertraging worden de temperaturen berekend per tijdstap van 5 minuten.

3. Onderzoek naar het ingeven van de koepelwoning in Capsol

3.1 Inleiding

Capsol kan enkel het warmtetransport berekenen doorheen vlakke constructiedelen. Zo kunnen bolvolumes en ook koepels niet zomaar worden ingegeven in het programma. Hiervoor is een vereenvoudiging van het volume nodig. De koepel moet onderverdeeld worden in een aantal vlakken. Deze onderverdeling kan rudimentair of zeer gedetailleerd zijn. In onderstaand hoofdstuk is nagegaan in hoeverre de detaillering moet worden doorgevoerd voor de invoer van het volume in Capsol.

Voor de bepalingen is uitgegaan van de klimaatgegevens van El Alto: de jaarlijkse buitenluchttemperatuur, de zonnestraling, de infrarode straling en de grondtemperatuur. De bepaling van deze functies wordt besproken in hoofdstuk 4. Alle ingevoerde volumes zijn opgebouwd uit beton met de volgende eigenschappen [18]:

Tabel 3.1: eigenschappen beton

materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	ϵ_L [-]	$a_{s,i}$ [-]	$a_{s,e}$ [-]
beton	0,1	2,2	0,045	2500	840	0,88	0,25	0,65

Het onderzoek naar de invoer van de koepelwoning in Capsol is gebaseerd op verschillende vormen met eenzelfde verliesoppervlak A_T . Echter de volumes V zijn voor alle vormen verschillend.

De verhouding tussen deze grootheden is de gebouwcompactheid C .

$$C = \frac{V}{A_T} \quad [m]$$

De warmteverliezen per eenheid van gebouwd volumes q zijn omgekeerd evenredig met de compactheid volgens de formule:

$$q = \frac{\bar{U}}{C} \quad [W/m^3K]$$

met $\bar{U}$ gebouwgemiddelde U-waarde [W/m²K]

Dus hoe groter de compactheid, hoe kleiner de verliezen zullen zijn door transmissie.

De verliezen door ventilatie zijn afhankelijk van het ventilatievoud n . Voor het ventilatievoud n_{ref} werd in het referentiemodel een waarde genomen van 1,5 /h. [19] Om voor alle volumes eenzelfde verlies te creëren, wordt het ventilatievoud bepaald volgens de formule:

$$n = \frac{Q}{V} \quad [1/h]$$

$$\text{met } Q \quad \text{ventilatiedebit} = n_{\text{ref}} \cdot V_{\text{koepel}} \quad [m^3/h]$$

Voor elk van de volumes is de comforttemperatuur berekend voor de winter- en zomerperiode.

3.2 Berekening en gegevens

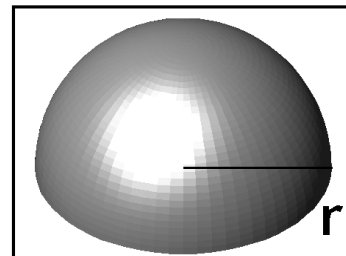
De bepalingen van de verschillende vormen zijn bijgevoegd in appendix C.

3.2.1 Halve bol

Voor de berekening van de volumes is telkens uitgegaan van een halve bol met een inwendige straal van 3,1 m. Deze halve bol is een vereenvoudiging van de koepelwoning. De opstand onderaan wordt niet in rekening gebracht.

Tabel 3.2: Gegevens halve bol

r [m]	V [m^3]	A_T [m^2]	C [m]	n [1/h]
3,1	62,39	90,57	0,69	1,5



Figuur 3.1: Halve Bol

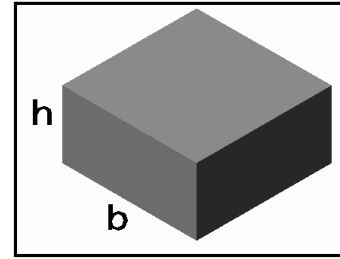
3.2.2 Balk

Om de vorm van de balk te bepalen is eerst de omschrijvende balk aan de halve bol berekend. De straal van 3,1 m is hier de hoogte h van de balk. Voor dit volume is het verliesoppervlak berekend. Door de hoogte te verkleinen verandert het verliesoppervlak. Bij een hoogte van 2,38 m is het verliesoppervlak ongeveer gelijk aan deze van de halve bol. De gekozen balk heeft dus dezelfde vorm als de

omschrijvende balk aan de halve bol, maar de afmetingen zijn verkleind waardoor de balk volledig in de halve bol past.

Tabel 3.3: Gegevens balk

h [m]	b [m]	V [m ³]	A _T [m ²]	C [m]	n [1/h]
2,38	4,76	53,93	90,63	0,60	1,74



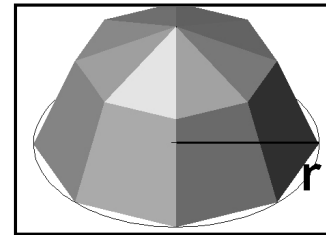
Figuur 3.2: Balk

3.2.3 Ingeschreven achthoek

Voor deze vorm is de ingeschreven achthoek van de bol bepaald, zowel in doorsnede als in plan. De ingeschreven achthoek past dus volledig binnen de halve bol. Hierdoor is het verliesoppervlak iets kleiner. Om het verliesoppervlak ongeveer gelijk te maken is de straal van de ingeschreven achthoek vergroot tot 3,3 m. Het volume ligt dan buiten de halve bol.

Tabel 3.4: Gegevens ingeschreven achthoek

r [m]	V [m ³]	A _T [m ²]	C [m]	n [1/h]
3,3	58,37	90,55	0,64	1,60



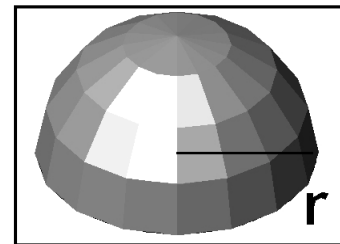
Figuur 3.3: Ingeschreven achthoek

3.2.4 Ingeschreven zestienhoek

Deze vorm is analoog bepaald als de ingeschreven achthoek. Alleen is hier de ingeschreven zestienhoek in plaats van de achthoek bepaald. Hierdoor is het volume meer gedetailleerd en benadert de vorm van het verliesoppervlak meer deze van de halve bol.

Tabel 3.5: Gegevens ingeschreven zestienhoek

r [m]	V [m ³]	A _T [m ²]	C [m]	n [1/h]
3,15	61,35	90,55	0,68	1,53



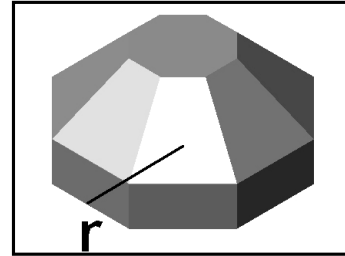
Figuur 3.4: Ingeschreven zestienhoek

3.2.5 Omschreven achthoek

De omschreven achthoek is de achthoek rakend aan de halve bol. Dit volume is volledig buiten de halve bol gelegen. De straal is verkleind tot een waarde van 2,91 m, zodat het verliesoppervlak gelijk is. Het volume ligt dan binnen de halve bol.

Tabel 3.6: gegevens omschreven achthoek

r [m]	V [m ³]	A_T [m ²]	C [m]	n [1/h]
2,91	56,67	90,60	0,63	1,65



Figuur 3.5: Omschreven achthoek

3.3 Invloed vorm verliesoppervlak

3.3.1 Winterperiode

Uit de gegevens in tabel 3.7 blijkt dat in de balk een lagere minimale waarde en hogere maximale waarde voor de binnenluchttemperatuur bereikt wordt. De demping van de balk is dus kleiner dan bij de andere volumes en heeft het minst stabiele binnenklimaat.

De maximumwaarde van de binnenluchttemperatuur wordt in alle volumes op hetzelfde tijdstip bereikt waardoor de tijdvertraging gelijk is.

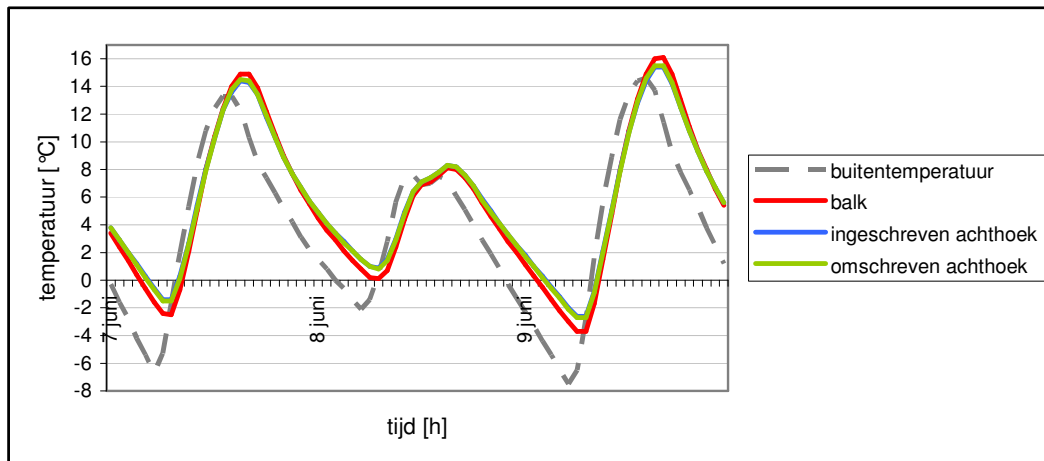
De binnenluchttemperaturen in grafiek 3.1 vertonen gedurende de hele winterperiode hetzelfde verloop. Enkel op 8 juni liggen de grafieklijnen anders ten opzichte van elkaar. De maximale waarde voor de binnenluchttemperatuur is nu het kleinst in de balk. Dit is te verklaren door het onregelmatige verloop van de buitentemperatuur en de zonne-irradiantie.

Grafiek 3.2 toont dat de globale zonnestraling steeds parabolische verloopt behalve op 8 juni.

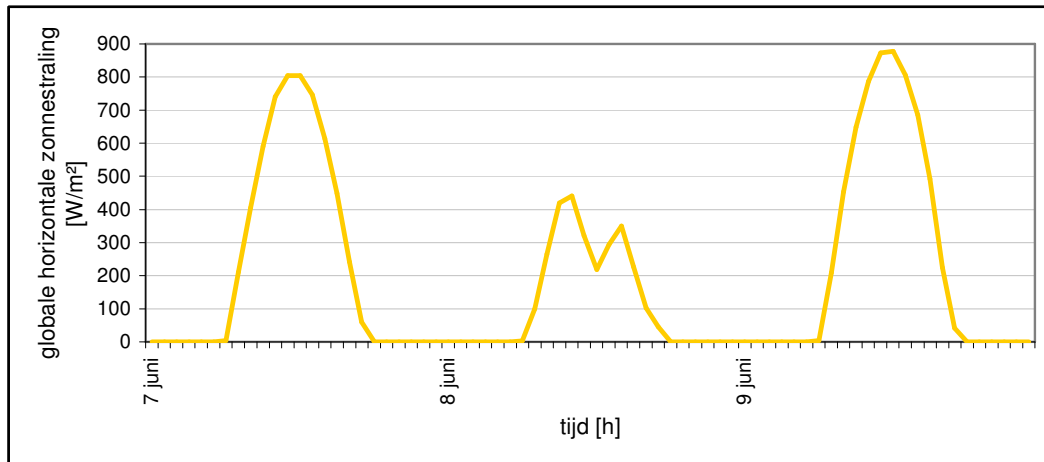
Tabel 3.7: gegevens binnenklimaat op 9 juni

volume	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
balk	5,8	16,2	15:45	-3,7	1:45	3,81
ingeschreven achthoek	6,0	15,5	15:45	-2,6	1:45	12,50
omschreven achthoek	6,0	15,6	15:45	-2,7	1:45	11,34

Grafiek 3.1: Temperaturen voor de verschillende vormen in winterperiode



Grafiek 3.2: globale horizontale zonnestraling



3.3.2 Zomerperiode

In de zomerperiode is de minimale waarde van de binnenluchttemperatuur in de balk opnieuw lager dan in de andere volumes. Maar de maximale waarde is nu het kleinst in de balk. Ook de tijdvertraging van de binnentemperatuur ten opzichte van de buitentemperatuur is anders dan bij de achthoeken.

De demping van de binnenluchttemperaturen is bij alle volumes negatief. Dit wil zeggen dat er in het binnenklimaat grotere temperatuurfluctuaties optreden dan in het buitenklimaat. Voor de achthoeken is dit verschijnsel nog groter dan bij de balk.

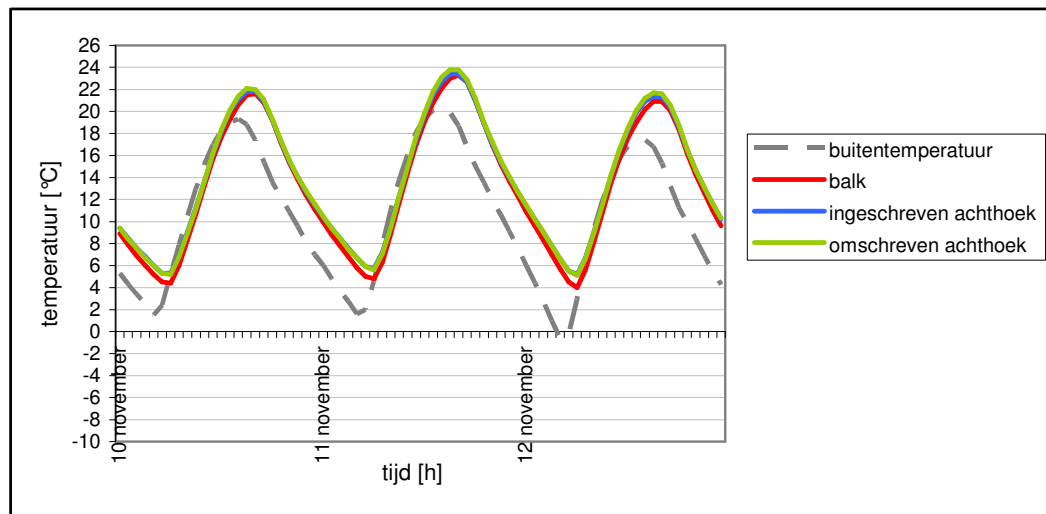
Het verloop van de binnenluchttemperaturen is ongeveer gelijk in de balk en de omschreven achthoek, maar deze van de omschreven achthoek is naar boven verplaatst volgens de Y as.

De ingeschreven achthoek heeft hetzelfde verloop als omschreven achthoek, maar de maximale binnenluchttemperatuur ligt $0,4^{\circ}\text{C}$ lager.

Tabel 3.8: gegevens binnenklimaat op 11 november

volume	$\theta_{i,\text{gem}} [^{\circ}\text{C}]$	$\theta_{i,\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$t(\theta_{i,\text{max}}) [\text{h}]$	$\theta_{i,\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$\tau [\text{h}]$	D [%]
balk	14,0	23,3	15:55	4,6	2:00	-0,04
ingeschreven achthoek	14,5	23,5	15:45	5,6	1:50	-1,01
omschreven achthoek	14,6	23,9	15:45	5,6	1:50	-1,00

Grafiek 3.3: Temperaturen voor de verschillende vormen in zomerperiode



3.3.3 Besluit

Doordat het ventilatie-debiet en de materiaaleigenschappen van de constructiedelen gelijk zijn, zijn de binnenluchttemperaturen enkel afhankelijk van de hellingen en oriëntaties van de gevelvlakken. De achthoeken bezitten meerdere oriëntaties, terwijl de balk slechts gericht is volgens de vier windrichtingen.

De balk heeft de hoogste maximale binnenluchttemperaturen in de winter, maar de hogere temperaturen worden minder goed vastgehouden. Dit komt door het grote horizontale bovenzvlak. Dit vlak ontvangt de meeste zonnestraling als de zon hoog staat, maar de lange golfverliezen naar de hemelkoepel zijn ook groter.

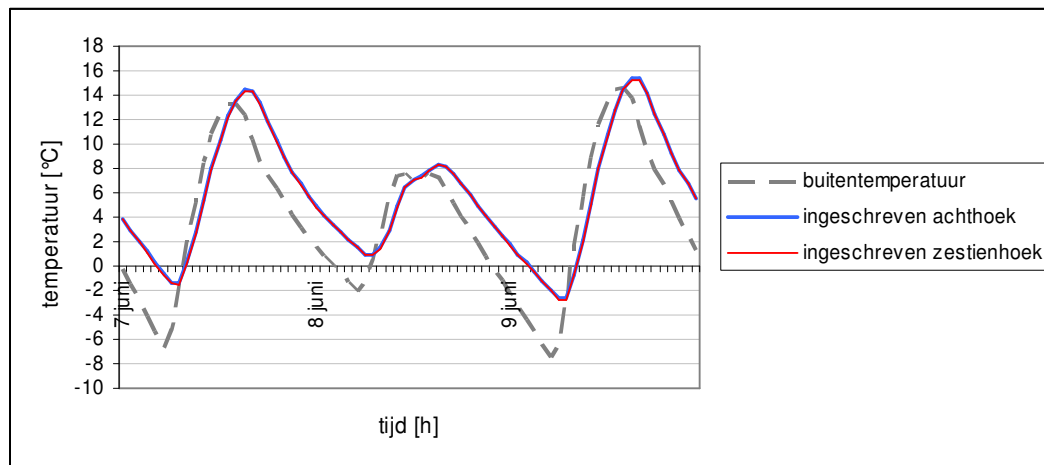
Doordat de omschreven achthoek ook een horizontaal bovenzvlak heeft, treedt dit fenomeen hier eveneens, zij het in beperkte mate, op. De minimale binnenluchttemperaturen zijn iets lager en de maximale zijn iets hoger dan deze van de ingeschreven achthoek. De schuine gevelvlakken bij de achthoeken houden de temperaturen s' nachts beter vast.

Er kan dus besloten worden dat de koepelvorm betere resultaten geeft voor de nachtelijke binnenluchttemperaturen dan de woning met een rechthoekig grondplan in het klimaat van El Alto.

3.4 Keuze vorm referentiemodel

De ingeschreven zestienhoek benadert het best de koepelvorm. Toch zijn de binnenluchttemperaturen van de ingeschreven achthoek en de zestienhoek, weergegeven in grafiek 3.4, nagenoeg gelijk gedurende het hele jaar. Voor de berekening in moet de koepelwoning dus niet overdreven gedetailleerd worden. Daarom is voor het referentiemodel verder gerekend met de ingeschreven achthoek, die dus minder invoer vraagt.

Grafiek 3.4: Temperaturen ingeschreven achthoek en zestienhoek in winterperiode



4. Invoeren in Capsol

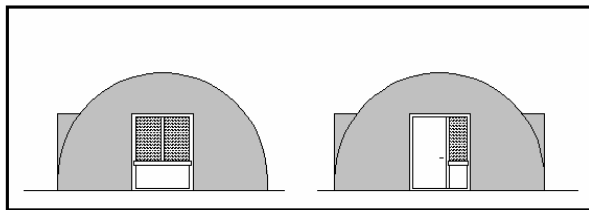
4.1 Invoergegevens

Voor het referentiemodel is ervan uitgegaan dat de woning eender waar kan geplaatst worden. De berekening voor andere klimaattypes kan snel worden doorgevoerd door enkel de klimaatfuncties aan te passen.

4.1.1 Keuze van de woning

Voor het referentiemodel is er uitgegaan dat de woning eender waar kan geplaatst worden. De berekening voor andere klimaattypes kan snel worden doorgevoerd door enkel de klimaatfuncties aan te passen.

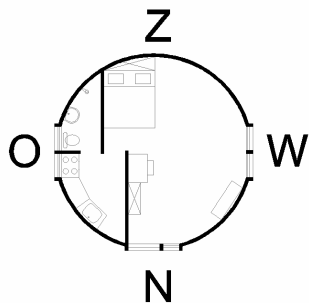
Het ontwerp van de koepelwoning in El Alto, met een straal van 3,1 meter, voorziet slechts drie ramen. Langs weerszijden van de woning twee ramen die de keuken, de badkamer en de leef- en slaapruijnte verlichten en één kleiner raam naast de deur.



Figuur 4.1: West- en noordgevel

4.1.2 Oriëntatie

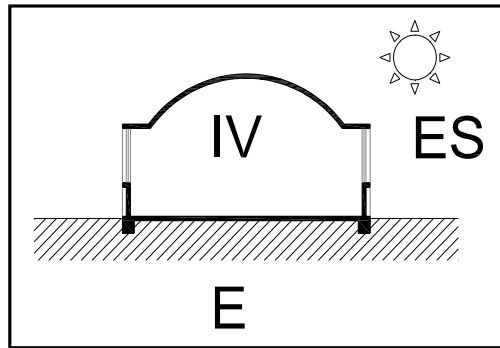
De oriëntatie is zo gekozen dat alle ramen kunnen bijdragen tot zonnewinsten. Het zuiden is voor het noordelijke halfrond de ongunstigste oriëntatie, hier is dan ook geen raam aanwezig. Het kleinste raam is hierdoor wel op het noorden gericht, wat de minst ideale positie is. De oriëntatie van de koepelwoning is weergegeven in figuur 4.2.



Figuur 4.2: Oriëntering van de koepelwoning

4.1.3 Zones

Een zone wordt gedefinieerd als een luchtknoop in het netwerk van weerstanden en condensatoren. Met overgangsweerstanden worden de zoneknopen aan de wanden gekoppeld. Zones kunnen intern (I) en extern (E) zijn. Enkel de interne zones beschikken over een volume. De externe zones zijn hier de zonzone (ES) en de bodem (E).



Tabel 4.1: Gegevens zones

naam	type	ρc [J/m ³ K]	V [m ³]
buiten	ES	1200	-
binnen	IV	1200	62,89
grond	ES	1200	-

Figuur 4.3: Zones

Voor de interne zone is de temperatuur ongekend (I) en bestaat er een scheiding tussen vereenvoudigde modellen (I) en modellen gebaseerd op hoekfactoren (IV). Het vereenvoudigd model combineert straling en convectie voor de warmteoverdracht. Het model gebaseerd op hoekfactoren maakt een onderscheid tussen de warmte-uitwisseling door convectie en straling door enkel een convectieve weerstand te onderstellen. De stralingsuitwisseling tussen wandoppervlakken is in dit geval afhankelijk van de emissiefactoren van de oppervlakken en van de hoekfactoren. In Bolivia is de zonnestraling een belangrijke factor voor het binnenklimaat. De zonnkant zal waarschijnlijk meer opwarmen dan de andere zijden van de woning. Om deze stralingsuitwisseling te bepalen is de mate waarin de wanden elkaar zien, de hoekfactoren, van belang. Deze worden in het IV model in rekening gebracht, wat zal leiden tot nauwkeurigere resultaten. Voor de berekening is dus gewerkt met het IV model.

4.1.4 Zoneventilatie

Ventilatie gebeurt enkel door infiltratie van lucht aan de aansluitingen van deur en ramen. De verse lucht die langs deze weg in de binnenruimte dringt, verlaat deze weer via dezelfde weg.

Voor het ventilatievoud is een waarde genomen van 1,5/h. Deze waarde geldt bij een slecht luchtdicht gebouw op een open terrein. [19]

Om het hygiënisch ventilatievoud te bepalen is het criterium om de kwaliteit van de binnenlucht te evalueren door de concentratie koolzuurgas in de lucht genomen. [4] Het nodige ventilatiedebiet bedraagt hiervoor $14,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{persoon}$. Voor het referentiemodel met twee bewoners is er dus een debiet nodig van $29 \text{ m}^3/\text{h}$. Het ventilatievoud is dan gelijk aan $0,46/\text{h}$.

Voor een woning met zes bewoners bedraagt het hygiënisch ventilatievoud $1,4/\text{h}$. Het hygiënisch ventilatievoud is dus kleiner dan het infiltratievoud, dus de infiltratie voorziet in de nodige luchtverversing. Dit kan beter gecontroleerd worden door het plaatsen van een ventilatierooster, waardoor er bij minder dan zes bewoners een kleiner ventilatieverlies kan ingesteld worden, op voorwaarde dat de aansluitingen volledig dicht zijn. Voor het plaatsen van het rooster dient echter een bijkomende uitsparing voorzien te worden in de betonnen koepel. Daar dit geen vanzelfsprekende uitvoering is, wordt er voor het referentiemodel gerekend op de infiltratie van lucht doorheen de aansluitingen om te voorzien in de ventilatiebehoefte.

Om de invloed van de kieren na te gaan, zijn de binnenluchttemperaturen berekend in Capsol voor een betonnen koepelwoning zonder kieren en met een infiltratievoud van $1,5/\text{h}$.

Uit grafiek 4.1 en 4.2 volgt dat de binnenluchttemperaturen voor beide woningen overdag gelijk zijn, van 8 tot 16 uur. Voor de andere uren liggen de temperaturen in een woning met een infiltratievoud lager dan in een woning zonder.

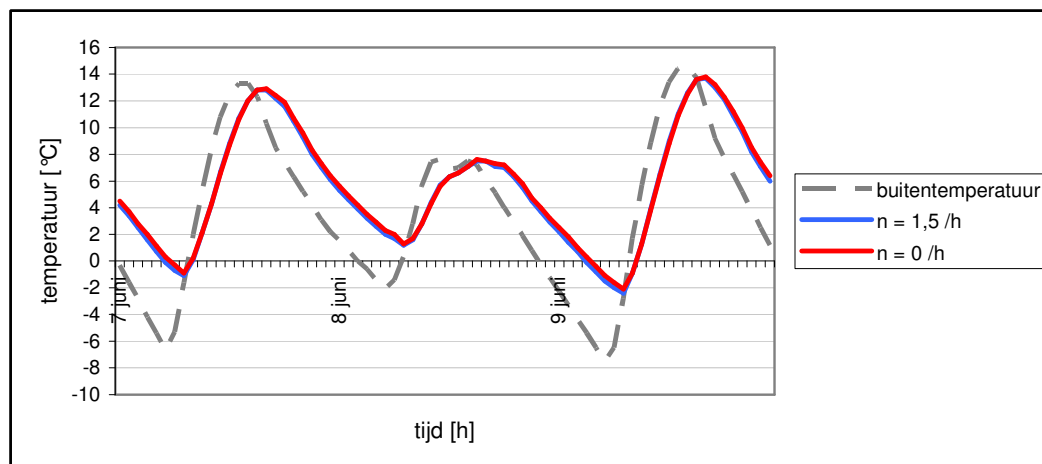
De tijdvertraging is hoger in een woning met kieren doordat de binnendringende lucht ook zijn warmte afstaat aan de lucht in de binnenruimte. Dit verschil is duidelijker in de zomerperiode. In deze periode is ook de maximale binnenluchttemperatuur lager als er ventilatie aanwezig is. In de winterperiode zijn de maximale waarden gelijk.

De minimale waarden voor de binnenluchttemperatuur in de koepelwoning met ventilatie is voor de beide periodes lager dan in de woning zonder ventilatie. In de laatste situatie zijn er dus 's nachts geen ventilatieverliezen, waardoor het nachtcomfort groter wordt. Het verschil in temperatuur tussen de beide situaties is uiterst klein, dit komt waarschijnlijk doordat de ventilatieverliezen veel kleiner zijn dan de transmissieverliezen. Dit wordt verder onderzocht in hoofdstuk 5.

Tabel 4.2: Gegevens binnenklimaat op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
$n = 0$ /h	5,73	13,8	16:00	-2,3	2:05	24,75
referentiemodel	5,56	13,8	15:55	-2,6	2:00	23,21

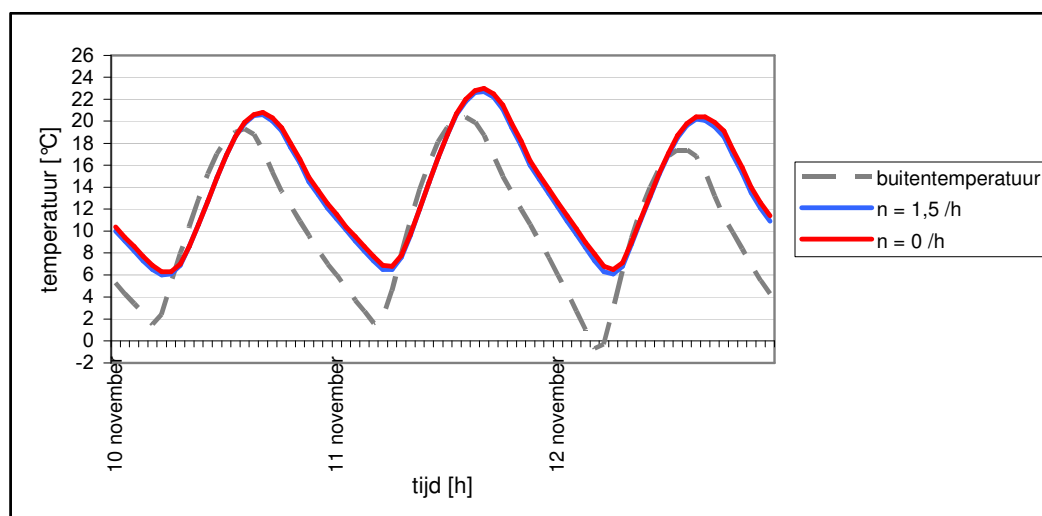
Grafiek 4.1: Vergelijking woning zonder en met kieren: Winterperiode



Tabel 4.3: Gegevens binnenklimaat op 11 november

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
$n = 0$ /h	14,84	23,0	16:00	6,8	2:05	8,66
referentiemodel	14,56	22,7	15:40	6,4	1:45	8,85

Grafiek 4.2: Vergelijking woning zonder en met kieren: Zomerperiode



4.1.5 Warmtetransport tussen de zones

De warmte-uitwisseling tussen de zones is onder andere afhankelijk van het verschil in temperatuur tussen de buiten- en de binnenoppervlakken van de constructiedelen.

Voor de beide oppervlakken van de wand zijn er hiervoor oppervlaktewarmte-overgangscoefficienten nodig. De globale oppervlaktewarmte-overgangscoefficient α_g wordt gekoppeld aan de buiten- en grondzone. Voor de buitenzone is de waarde 23 W/m²K genomen, volgens de Belgische normen. De globale oppervlaktewarmte-overgangscoefficient is gelijk aan de som van de warmte-overgangscoefficienten voor straling en convectie: $\alpha_g = \alpha_r + \alpha_c = 4 + 19 = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$. [17]

De waarden van de convectieve coëfficiënt is afhankelijk van de windsnelheid volgens de formule:

$$\alpha_c = 5,4 + 3,1 v_{\text{met}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

met v_{met} = meteorologische windsnelheid [m/s]

In het programma Meteonorm wordt voor El Alto een jaarlijks gemiddelde windsnelheid gegeven van 2,9 m/s, waardoor α_c gelijk wordt aan 14,5 W/m²K. Hierdoor wordt de globale warmte-overgangscoefficient gelijk aan 18,5 W/m²K. Deze waarde is dus lager dan de waarde opgegeven in de norm.

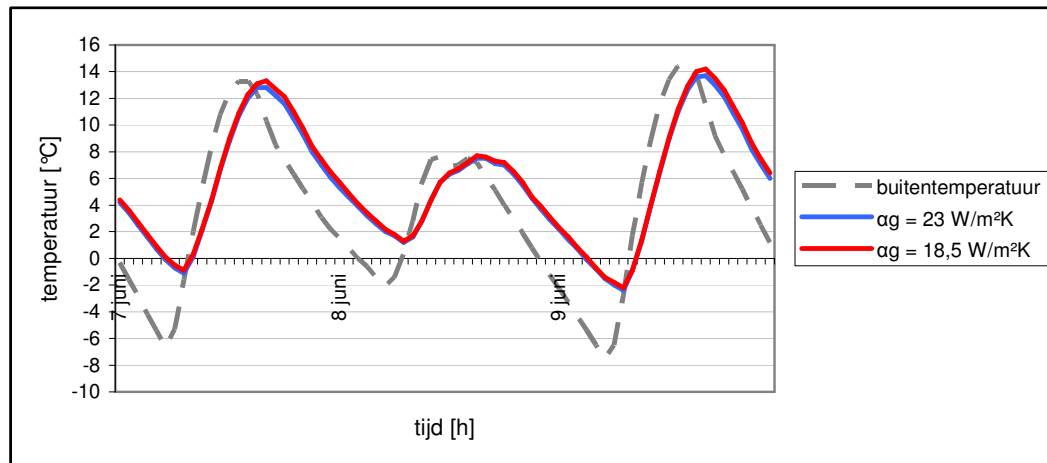
Om de invloed van de warmte-overgangscoefficienten te beoordelen zijn de binnenluchttemperaturen berekend in Capsol voor een α_g -waarde van 18,5 W/m²K en van 23 W/m²K. In grafiek 4.3 en 4.4 is het verloop van de binnenluchttemperaturen weergegeven voor de winter- en zomerperiode.

Uit tabel 4.4 en 4.5 volgt dat de damping voor winter- en de zomerperiode steeds kleiner is voor de berekening met een lagere α_g -waarde. In de zomer is het verschil in damping veel groter dan in de winter. Voor de beide periodes zijn de maximale en de minimale binnenluchttemperaturen hoger als er een lagere waarde voor de globale warmte-overgangscoefficient gebruikt wordt. In de zomerperiode is dit verschil groter dan in de winter.

Tabel 4.4: Gegevens binnenklimaat op 9 juni

	$\theta_{i,\text{gem}}$ [°C]	$\theta_{i,\text{max}}$ [°C]	$t(\theta_{i,\text{max}})$ [h]	$\theta_{i,\text{min}}$ [°C]	τ [h]	D [%]
$\alpha_g = 18,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	5,86	14,2	15:45	-2,4	1:50	22,34
$\alpha_g = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$	5,56	13,8	15:55	-2,6	2:00	23,21

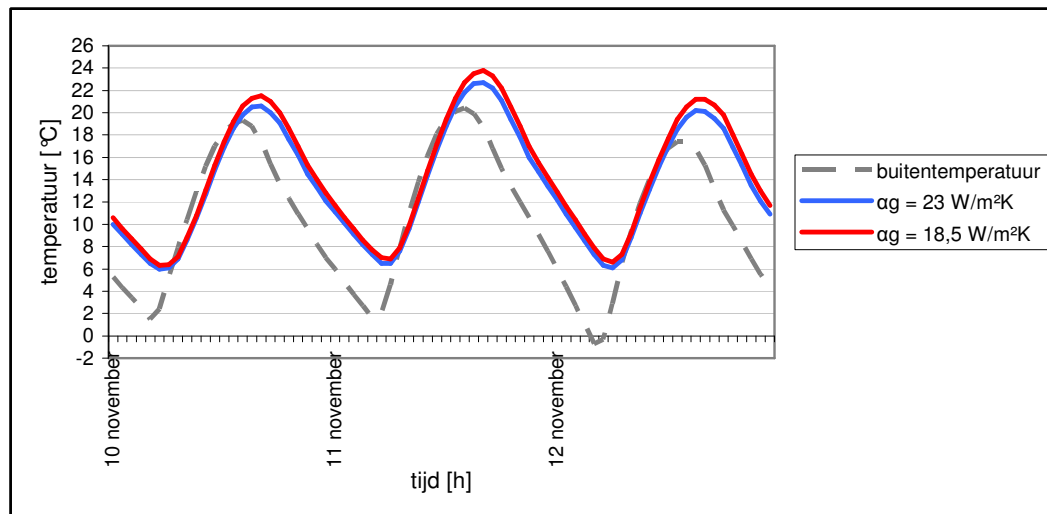
Grafiek 4.3: Vergelijking globale warmte-overgangscoefficienten: Winterperiode



Tabel 4.5: Gegevens binnenklimaat op 11 november

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
$\alpha_g = 18,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	15,25	23,8	16:00	6,9	2:05	4,27
$\alpha_g = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$	14,56	22,7	15:40	6,4	1:45	8,85

Grafiek 4.4: Vergelijking globale warmte-overgangscoefficienten: Zomerperiode



De invloed van de warmte-overgangscoefficient is het duidelijkst in de zomerperiode. De hogere binnenluchttemperaturen bij een lagere warmte-overgangscoefficient zijn te verklaren doordat de U-waarde van de gebouwschil wordt bepaald door de overgangscoefficienten. Hoe kleiner deze coëfficiënten, hoe kleiner de U-waarde, dus hoe slechter het materiaal warmte geleidt.

Voor het referentiemodel is gewerkt met de α_g -waarde van 23 W/m²K. Dit betekent dat de werkelijke resultaten voor de binnenluchttemperaturen in El Alto hoger zullen liggen dan deze van het referentiemodel.

Voor de grondtemperatuur moet de oppervlaktetemperatuur gelijk zijn aan de zonetemperatuur. Om dit effect te bereiken moet een waarde van 999 W/m²K genomen worden voor de globale oppervlaktewarmte-overgangscoefficiënt, zoals opgegeven door Capsol. Langs de binnenzijde van de muren is de zone van het type IV, waardoor enkel de convectieve coëfficiënt van belang is. Hiervoor is de waarde 3,5 W/m²K genomen. [17] De gekozen waarden voor de warmte-overgangscoefficiënten zijn weergegeven in tabel 4.6.

Tabel 4.6: Gekozen warmte-overgangscoefficiënten

constructiedeel	zone 1	α_g [W/m ² K]	α_c [W/m ² K]	zone 2	α_g [W/m ² K]	α_c [W/m ² K]
muur	buiten	23	-	binnen	-	3,5
vloer	grond	999	-	binnen	-	3,5

4.1.6 Wanden

In het algemeen zijn de wanden alle scheidende constructieonderdelen. Voor al deze delen moet de wandsamenstelling, eigenschappen van de opeenvolgende lagen, het oppervlak, de oriëntatie, helling, convectieve warmte-overgangscoefficiënt en de zonreceptie ingegeven worden.

De ingevoerde wanden in het referentiemodel zijn opgenomen in appendix D.

In het referentiemodel is verondersteld dat de betonnen buitenwanden aan de buitenzijde onbehandeld zijn. Aan de binnenzijde zijn ze wit geschilderd. Hierdoor is de absorptiefactor voor de buiten- en binnenzijde verschillend. Voor het enkel glas is een transmissiefactor τ_s gekozen van 0,80 en een absorptiefactor a_s van 0,15., waardoor de ZTA-factor g gelijk is aan 0,85. [17]

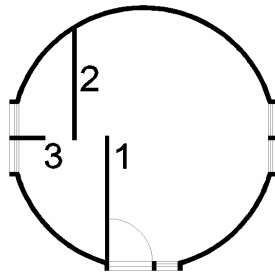
De thermische eigenschappen van de wanden zijn weergegeven in tabel 4.7.

Tabel 4.7: Thermische eigenschappen van de gebruikte materialen

materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	e_L [-]	$a_{s,i}$ [-]	$a_{s,e}$ [-]
betonnen muur	0,1	2,2	0,045	2500	840	0,88	0,25	0,65
betonnen vloer	0,15	2,2	0,068	2500	840	0,88	0,65	0,65
grond (leem)	3	1,13	2,655	2200	1000	0,90	0,83	0,83
enkel glas	0,004	0,8	0,005	2500	840	0,94	0,15	0,15

4.1.7 Binnenmuren

In de koepelwoning zijn 3 scheidende wanden aanwezig. Voor de eenvoud wordt uitgegaan dat er slechts één binnenzone is, dus dat alle binnenruimtes dezelfde luchttemperatuur hebben. Toch hebben de binnenmuren een bepaalde invloed op het binnenklimaat.



Figuur 4.4: Binnenmuren

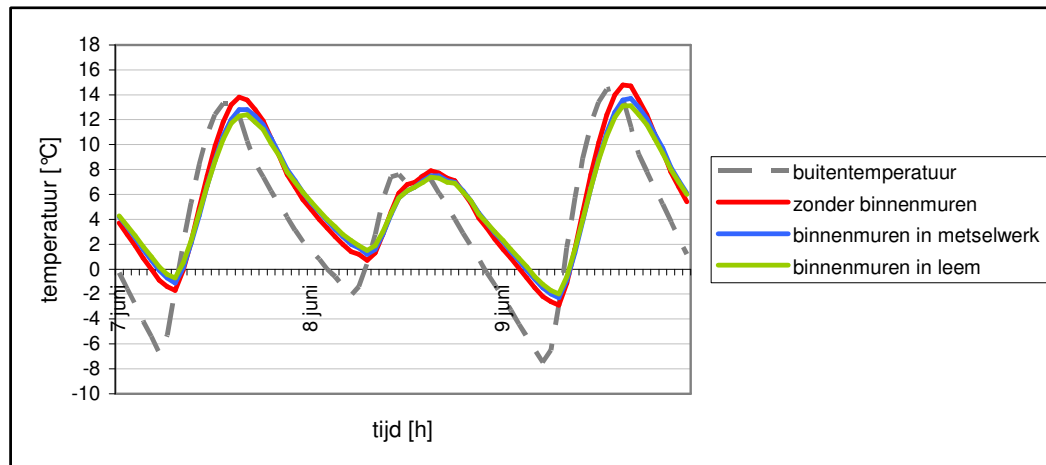
In grafiek 4.5 is het verloop weergegeven van de binnenluchttemperaturen in een woning met en een zonder binnenmuren. De gegevens van de binnenklimaten zijn opgenomen in tabel 4.8.

Als er binnenmuren aanwezig zijn, is de binnenluchttemperatuur overdag lager, maar 's nachts hoger dan een woning zonder binnenmuren. De binnenmuren zorgen dus voor een demping van de buitenluchttemperatuur. De maximale waarde van de binnenluchttemperatuur is lager en de minimale hoger. Dit komt doordat de binnenmuren overdag ook warmte opnemen en opslaan, waardoor de binnenluchttemperatuur gedurende de hele dag lager is. Als de binnenluchttemperatuur daalt, doordat de buitenluchttemperatuur lager wordt, zullen de wanden de opgenomen warmte voor een deel vrijgeven. Hierdoor stijgt de binnenluchttemperatuur ten opzichte van de situatie waarin er geen binnenmuren aanwezig zijn en dus geen warmte was opgeslagen.

Tabel 4.8: Gegevens binnenklimaat bij verschillende binnenmuren op 9 juni

binnenmuren	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
zonder	5,66	14,9	15:40	-3,2	1:45	13,96
in metselwerk	5,56	13,8	15:55	-2,6	2:00	23,21
in leem	5,49	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,18

Grafiek 4.5: Vergelijking woning met en zonder binnenmuren: Winterperiode



De mate waarin een wand warmte opslaat is afhankelijk van de warmtecapaciteit p_c van het gebruikte materiaal. Hoe groter p_c , hoe groter de demping van de binnenluchttemperaturen ten opzicht van de buitentemperaturen. Uit grafiek 4.4 volgt dat hierdoor de nachtelijke binnenluchttemperaturen hoger liggen.

Door de binnenmuren op te bouwen uit leemsteen zal de warmtecapaciteit van de wanden toenemen door de hogere dichtheid ρ en soortelijke warmte c van leem ten opzichte deze van snelbouwsteen. De hogere warmtegeleidingcoëfficiënt van leem heeft geen invloed op het binnenklimaat.

De tijdvertraging in een woning met lemen binnenmuren is groter, waaruit volgt dat de maximale binnenluchttemperatuur later wordt bereikt.

Als er in plaats van lemen betonnen binnenmuren worden gebruikt geeft dit dezelfde waarden voor het binnenklimaat als in het eerste geval. Het beton heeft wel een hogere dichtheid dan leem, maar de soortelijke warmtecapaciteit is lager.

De binnenmuren moeten anders ingegeven worden in Capsol dan de ander wanden. Voor de binnenmuren wordt slechts de halve opbouw beschouwd. Aan de ene zijde wordt een adiabatische randvoorwaarde opgelegd en aan de andere de binnenzon. De oppervlakte die ingegeven wordt moet de dubbele zijn van de werkelijke. De opbouw van een halve binnenmuur is weergegeven in tabel 4.9. De ingevoerde gegevens van de binnenmuren in opgenomen in appendix D.

Tabel 4.9: Opbouw halve binnenmuur

materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	e_L [-]	a_s [-]
pleister	0,01	0,52	0,019	1300	840	0,9	0,25
baksteen / leem	0,045	0,75 / 1,13	0,06 / 0,04	1300 / 2200	840 / 1000	0,9	1

Voor interne wanden kan bij de invoer van het programma geen oriëntatie worden opgegeven. Dit zorgt voor het ontbreken van een tijdafhankelijke bezonning van deze binnenoppervlakken.

Doordat leem binnenmuren een positiever effect hebben op het binnenklimaat dan de binnenmuren in snelbouwsteen, zijn leem binnenmuren ingevoerd in het referentiemodel. Beton heeft hetzelfde effect op het binnenklimaat als leem, maar leem wordt verkozen omdat dit veel goedkoper is en overal voorradig.

4.1.8 Hoekfactoren

Het gebruik van de hoekfactoren is nodig voor het simuleren van infrarode straling tussen de wanden in de IV zone en de zonverdeling na diffuse zonreflecties. Wanneer alle wanden van een zone zijn ingevoerd worden door Capsol initiële hoekfactoren berekend, die ervan uitgaan dat de wandoppervlakken op een bol liggen. De hoekfactoren zijn dus enkel afhankelijk van de wandoppervlakken. Door deze methode is het ook mogelijk dat een vlak zichzelf, of een ander oppervlak dat in hetzelfde vlak ligt, kan 'zien' en daarmee dus ook warmte mee uitwisselt. Oppervlakken die in hetzelfde vlak liggen, zoals een raam in een gevel, krijgen een hoekfactor gelijk aan nul toegekend zodat zij niet stralen naar elkaar.

4.2 Randvoorwaarden

4.2.1 Functiereferenties

Functiereferenties zijn tijdsafhankelijke functies, welke onder andere buitenluchttemperaturen, zonnestraling, infrarode straling, interne winsten, ventilatie en grondtemperatuur beschrijven. Deze functies worden aan de verschillende zones opgelegd, de eerste drie aan de buitenzone, de volgende twee aan de binnenzone en de laatste aan de grond. De functiereferenties kunnen bestand- of parametergedefinieerde functies zijn.

Een bestandgedefinieerde functie kan worden aangemaakt met het programma Funcedit.

4.2.1.1 Buitenluchttemperatuur

De klimaatgegevens voor de verschillende landen kunnen worden opgevraagd uit het programma Meteonorm. Meteonorm is een uitgebreide klimatologische database voor zonne-energie berekeningen. De data zijn gebaseerd op de gegevens

van weerstations over de hele wereld. De metingen zijn gebeurd in een tienjarige meetperiode met een afwijking van 2 tot 3%. Alle waarden die in deze analyse gebruikt zijn, zijn in Meteoronorm opgevraagd. De waarden zijn dan in Funcedit omgezet tot bruikbare functies.

Uit tabel 4.10 is af te leiden dat het klimaat in El Alto zeer koud is. In de zomermaanden ligt de maandgemiddelde buitenluchttemperatuur amper rond 8,5°C.

Tabel 4.10: Maandgemiddelde buitenluchttemperaturen El Alto

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	8,40	8,90	8,30	7,70	6,80	5,60	4,90	6,10	7,10	8,30	8,80	8,90

4.2.1.2 Grondtemperatuur

Het temperatuurverloop in de bodem kan op verschillende manieren bepaald worden, namelijk door het modelleren van een compleet grondpakket of door het afleiden van een grondtemperatuur uit de gemiddelde buitenluchttemperatuur. Gezien de vereenvoudiging van het model werd een schatting van de grondtemperatuur genomen, gebaseerd op de aanwezige gegevens. De gemiddelde grondtemperatuur op ongeveer 3 meter diepte, waar de grondtemperatuur het hele jaar quasi constant is, wordt geschat op 7,5°C, gelijk aan de gemiddelde buitenluchttemperatuur over het hele jaar.

4.2.1.3 Bezonnig

Capsol bevat een zonneprocessor waarmee de zonnestand en de hoeveelheid op een gevelvlak invallende zonnestraling wordt berekend met gegevens over de geografische ligging, het dagnummer, de tijd, de oriëntatie en de helling van de gevelvlakken.

De invallende zonnestraling op een extern oppervlak van een wand bestaat uit drie componenten: directe, diffuse en via de grond gereflecteerde straling. Deze kunnen als bestandgedefinieerde functies, omgezet met behulp van Funcedit, worden opgegeven in Capsol. Uit tabel 4.11 volgt dat In El Alto de zonnestraling gedurende het hele jaar vrijwel constant en hoog is. Dit in tegenstelling tot de zonnestraling in België. De zonnestraling zal dus als passieve maatregel kunnen worden ingezet voor de verwarming van het binnenklimaat.

Tabel 4.11: Maandgemiddelde invallende zonnestraling in El Alto

zonnestraling [W/m ²]	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	novr	dec
globale horizontale	202,0	216,6	197,4	210,3	219,1	193,4	204,5	224,9	233,2	246,5	260,4	220,9
diffuse horizontale	99,0	123,5	100,9	81,5	74,3	65,8	70,2	83,2	98,0	101,9	110,2	115,6
directe	147,3	132,4	141,6	195,7	241,9	227,1	230,3	226,9	197,6	203,6	211,9	153,5

Om de invloed van de zonnestraling in te schatten is in grafiek 4.6 de binnenluchttemperatuur gegeven voor een koepelwoning met en een zonder zonnestraling. Het binnenklimaat geeft gedurende het hele jaar een gelijkaardig verloop.

Uit de gegevens van tabel 4.12 is af te leiden dat het binnenklimaat zonder zonnestraling veel stabiel is dan dat met invloed van zon. De demping is dus veel kleiner door de invallende zonnestraling.

De minimale binnenluchttemperatuur is niet zo veel gedaald dan de maximale waarde. De zonnewinsten overdag gaan dus snel verloren door de verliezen 's nachts omwille van het grote verschil in temperatuur tussen binnen en buiten en de hoge warmtegeleiding van het gewapend beton.

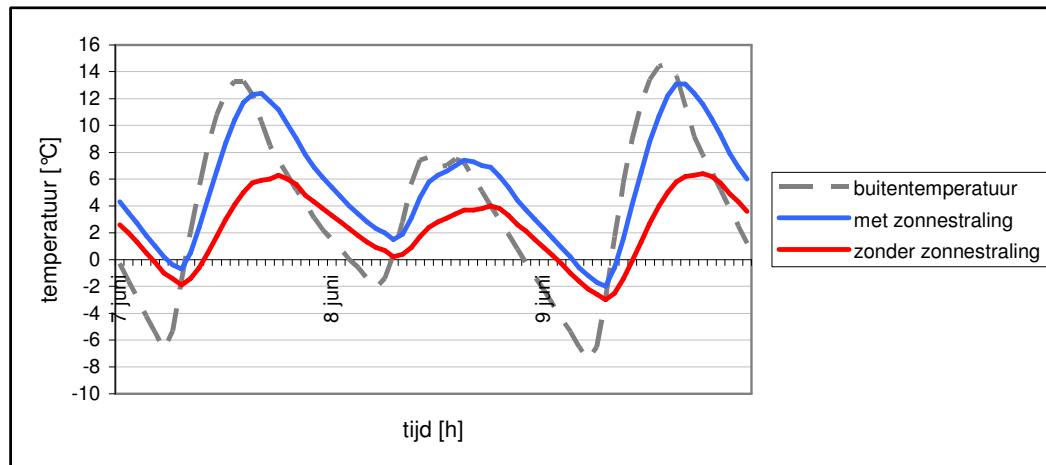
De binnenluchttemperatuur in de woning zonder zonnestraling is overdag nog vrij hoog. Dit komt door de hoge buitenluchttemperaturen.

De zonnewinsten zullen dus op een efficiënte wijze moeten worden aangewend door de nachtelijke verliezen te beperken.

Tabel 4.12: Gegevens binnenklimaat op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
met zonnestraling	5,49	13,2	15:50	-2,2	1:55	28,17
zonder zonnestraling	1,97	6,5	17:55	-3,2	4:00	57,81

Grafiek 4.6: Gegevens binnenklimaat met en zonder zonnestraling: Winterperiode



4.2.1.4 Interne winsten

A. Winsten door personen

Het metabolisme is de energie die vrijkomt door het verbrandingsproces in het menselijk lichaam. Deze is afhankelijk van het niveau van de lichamelijke activiteit. Het metabolisme wordt gemeten in Met ($1 \text{ Met} = 58,15 \text{ W/m}^2$ lichaamsoppervlakte). Een gemiddelde volwassene heeft een lichaamsoppervlakte van $1,7 \text{ m}^2$. Een persoon in een behaaglijk klimaat met een activiteitsniveau van 1 Met produceert dus een warmteverlies van ongeveer 100 W. Dit warmteverlies is afhankelijk van de activiteit en de omgeving. Voor het opstellen van de bewonersscenario's is er uitgegaan van de Met waarden opgegeven door Innova, de gebruikt waarden zijn weergegeven in tabel 4.13. [16]

Tabel 4.13: Waarden voor de warmteafgifte afhankelijk van de activiteit

activiteiten	metabolische waarde [W/m^2]	warmteafgifte [W]
slapen	46	78,2
zitten	58	98,6
spelen	65	110,5
wassen, scheren en aankleden	100	170
kledij wassen en strijken	170	289
afwassen en koken	145	246,5

B. Winsten door installaties

Ook de installaties produceren warmte. De warmte wordt afgegeven aan de binnenomgeving en draagt bij tot de warmtewinsten. In tabel 4.14 is de warmteafgifte

van de verschillende toestellen en installaties weergegeven. [20] De binnenruimte wordt in het midden verlicht met een gloeilamp.

Tabel 4.14: Interne winsten van huishoudelijke toestellen en installaties (uurgemiddelden)

huishoudelijke toestellen en installaties	warmteafgifte [W]
gasfornuis	203
TV, hifi, radio	68
warm water in de badkamer	35
warm water in de keuken	34
verlichting	60

C. Bewonersscenario's

Voor de interne winsten zijn er twee scenario's opgesteld. Een eerste scenario van een gezin met vier kinderen en twee volwassenen en een tweede van een gezin met twee volwassenen zonder kinderen. Als de bewoners thuis zijn, wordt dat televisie altijd aangezet. Voor de arme Boliviaanse bevolking is de televisie een luxeproduct die als een soort statussymbool geldt.

De interne winsten zijn als waarden per 30 minuten omgezet tot een bruikbare functie in Funcedit. Deze functie is opgelegd aan de binnenzone.

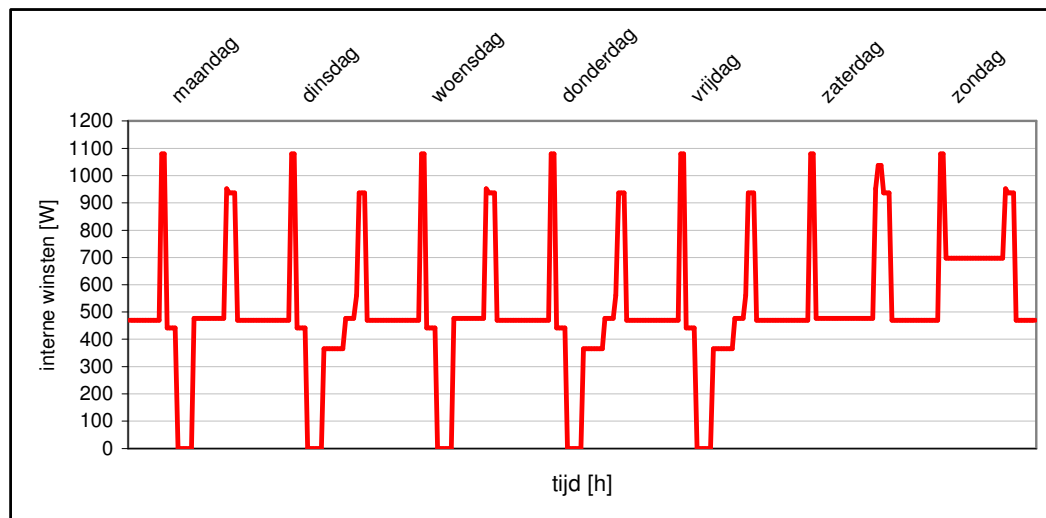
In appendix E zijn de posten van interne warmte per periode en per dag voor de scenario's opgenomen.

– Scenario 1: Twee volwassenen en vier kinderen

Het gezin bestaat uit drie meisjes en één jongen. De kinderen gaan allen naar school. De meisjes volgen enkel dinsdag- en donderdagvoormiddag les. De jongen gaat elke dag: maandag, woensdag en vrijdag enkel in de voormiddag en dinsdag en donderdag de hele dag.

De ouders gaan werken van 7 tot 18u, enkel op zondag is iedereen de hele dag thuis. Het verloop van de interne winsten per week in scenario 1 is weergegeven in grafiek 4.7.

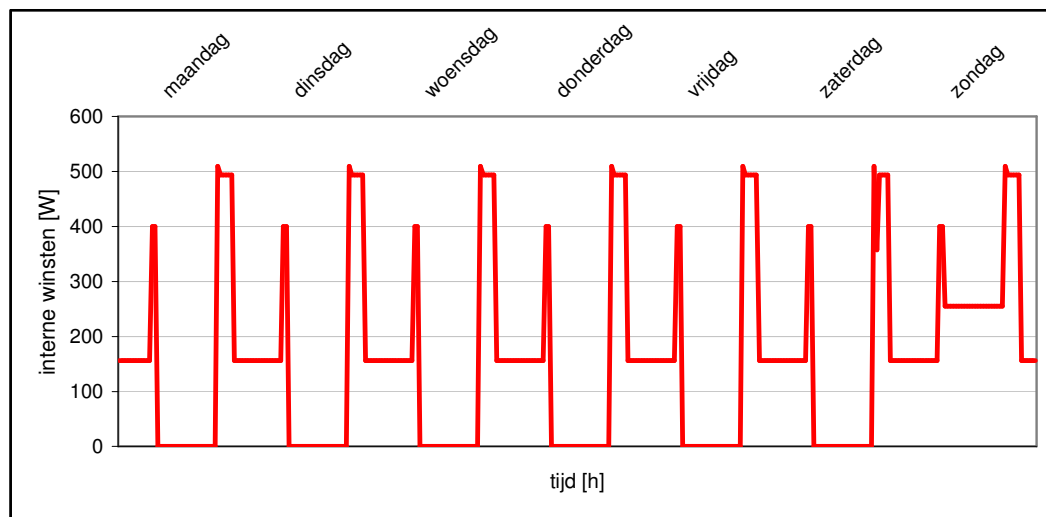
Grafiek 4.7: Wekelijkse interne winsten scenario 1



– Scenario 2: Twee volwassenen

Voor het tweede scenario is er uitgegaan van een gezin van twee personen. Deze gaan van maandag tot zaterdag werken van 7 tot 18u. Het wekelijkse verloop van de interne winsten in scenario 2 is weergegeven in grafiek 4.8.

Grafiek 4.8: Wekelijkse interne winsten scenario 2



De invloed van de interne winsten op het binnenklimaat is weergegeven in grafiek 4.9 en tabel 4.15. Er is een onderscheid gemaakt tussen de twee scenario's en een woning zonder interne winsten.

In de berekening is 1 januari een maandag. Hierdoor valt 9 juni op een woensdag. Op die dag zijn de meisjes in scenario 1 de hele dag thuis.

De minimale binnenluchttemperatuur stijgt als er mensen aanwezig zijn in de binnenruimte. De stijging bedraagt 0,25 °C per bewoner. De binnenluchttemperatuur is dus evenredig met het aantal bewoners.

De maximale binnenluchttemperatuur is ongeveer gelijk in de woning zonder bewoners en deze van scenario 2. Dit komt doordat de bewoners van scenario 2 de hele dag gaan werken. De nachtelijke winsten door de slapende bewoners zijn in de voormiddag helemaal verdwenen door de hoge warmtegeleiding van de constructie.

Bij scenario 2 is er wel een duidelijke stijging van de maximale binnenluchttemperatuur doordat de kinderen de hele dag thuis zijn.

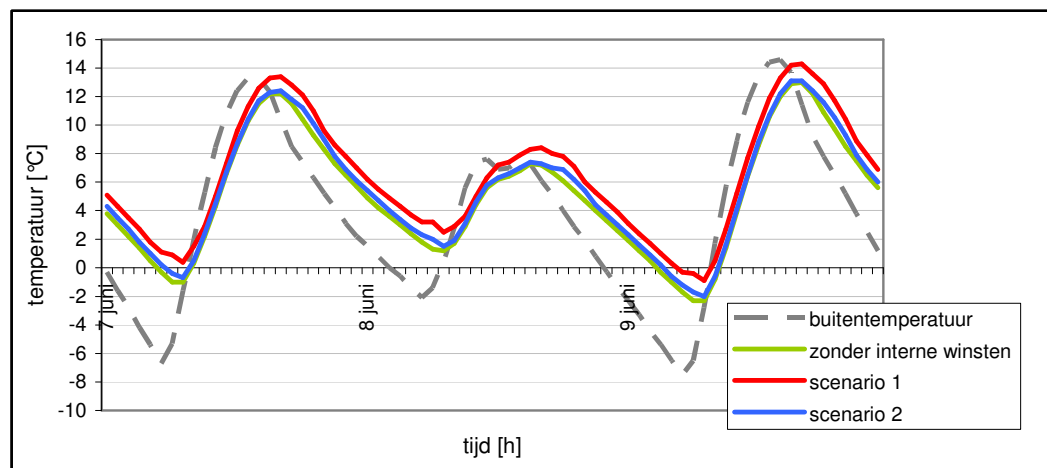
De demping bij scenario 2 is lager dan bij scenario 1. Dus hoe meer bewoners er aanwezig zijn, hoe meer de binnenluchttemperatuur zal fluctueren.

Voor het referentiemodel is verder gerekend met het bewonersscenario 2.

Tabel 4.15: Gegevens binnenklimaat op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
zonder interne winsten	5,12	13,1	16:00	-2,5	2:05	25,61
scenario 1	6,56	14,4	15:55	-1,1	2:00	26,93
scenario 2	5,49	13,2	15:50	-2,2	1:55	28,17

Grafiek 4.9: Vergelijking invloed scenario's op binnenluchttemperatuur: Wintersituatie



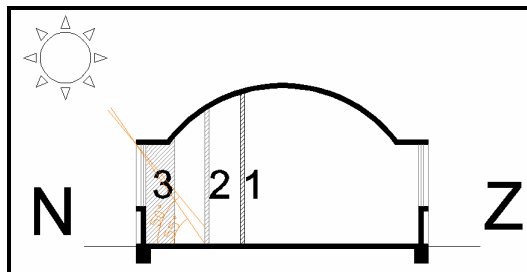
4.2.2 Zonreceptiefactoren

De zonreceptie geeft het gedeelte van de invallende zonnestraling weer die op het wandoppervlak valt. Capsol geeft aanbevolen waarden van de zonreceptie op in de handleiding. De zonreceptie in de zoneknoop wordt op 20% gesteld en de overige 80% wordt verdeeld over de vloer en de interne wanden. Met de 20% wordt de warmteabsorberende werking van het meubilair benaderd.

De exacte verdeling van deze 80% over de binnenmuren en de vloer kan afgeleid worden uit de zonnehoogtes en de zonne-azimuten gedurende het hele jaar.

Uit de figuur 4.5 is af te leiden dat er zon zal invallen op binnenmuur 2 als de zonnehoogte kleiner is dan of gelijk aan 55° . Deze situatie doet zich voor in El Alto van 15 mei tot 30 juli. De minimale zonnehoogte in die periode bedraagt $50,2^\circ$, als de zon in het noorden staat. De invallende straling bedraagt dan maar een klein aandeel van de 80% die verdeeld wordt over de vloer en de binnenmuren.

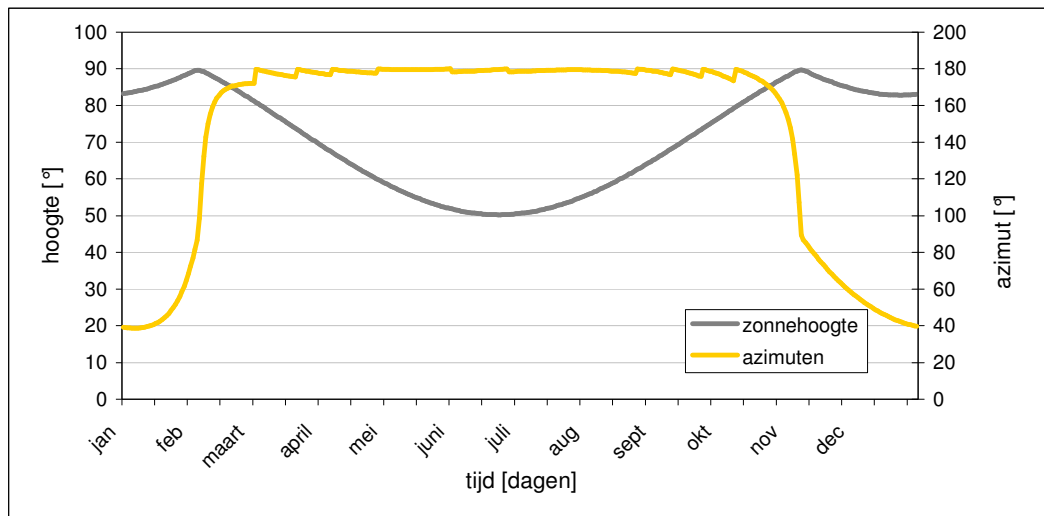
In het referentiemodel is er voor de oriëntatie echter vanuit gegaan dat binnenmuur 2 gericht is op het oosten. In die situatie valt er gedurende het hele jaar geen zonnestraling op de binnenmuren. De volledige 80 % wordt dus geabsorbeerd door de vloer.



Figuur 4.5: Zonnestand van 15 mei tot 30 juli

Uit grafiek 4.10 volgt dat de zon het laagst staat in de wintermaand juni en het hoogst in de zomermaanden november en februari.

Grafiek 4.10: Maximale zonnehoogtes en bijhorende azimuthen gedurende het hele jaar



4.2.3 Controle

Bij te hoge maximale binnenluchttemperaturen zullen de bewoners de woning ventileren door het openen van deur en ramen. Dit extra koelende ventilatiedebiet werd ingevoerd als controle in de binnenzone. De temperatuur waarbij de controle wordt ingeschakeld is vastgelegd op 23 °C.

De waarde van het ventilatievoud bij het openen van deur en ramen is bepaald volgens de specifieke lucht volumestroom $u_{v,v,koel}$. Bij draairamen bedraagt deze 2 dm³/m²s. [21] De specifieke lucht volumestroom kan omgezet worden naar een ventilatievoud. Dit ventilatievoud bedraagt 3,55/h. Dit betekent dat bij een binnenluchttemperatuur van 23°C de ventilatiestroom zal toenemen met een debiet van 223,26 m³/h bovenop het infiltratiedebiet doorheen de slechte aansluitingen.

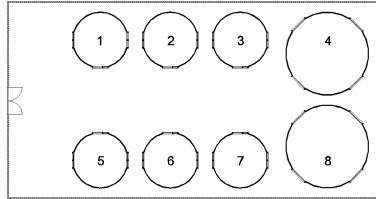
4.2.4 Zonafschermingen

4.2.4.1 Zonafschermingen van het hele gebouw

Zonafschermingen van gebouwen zijn objecten rondom het gebouw die de directe zonnestraling kunnen afschermen. Er wordt door Capsol opgegeven om rond de hele woning een globale afscherming te plaatsen met een hoogte van 5°. Dit is nodig omdat er door het omrekenen van zonnestraling op een horizontaal vlak naar een vlak met willekeurige oriëntatie afwijkingen ontstaan tussen de berekende zonnestand en de werkelijke. Vooral bij lage zonnestanden kan dit leiden tot een onrealistische zonnestraling.

Voor het referentiemodel is er ondersteld dat de woning geen invloed ondervindt van naburige gebouwen of muren rondom de site.

In El Alto staan de woningen echter zeer dicht op elkaar en zorgen de perceelsmuren ook voor schaduw. Om een vergelijking te maken tussen een vrij geplaatste woning en de meeste nadelig geplaatste in El Alto werd de afscherming van woning 3 ingevoerd in Capsol. De opstelling van de koepelwoningen is weergegeven in figuur 4.6.



Figuur 4.6: Opstelling van de woningen in El Alto

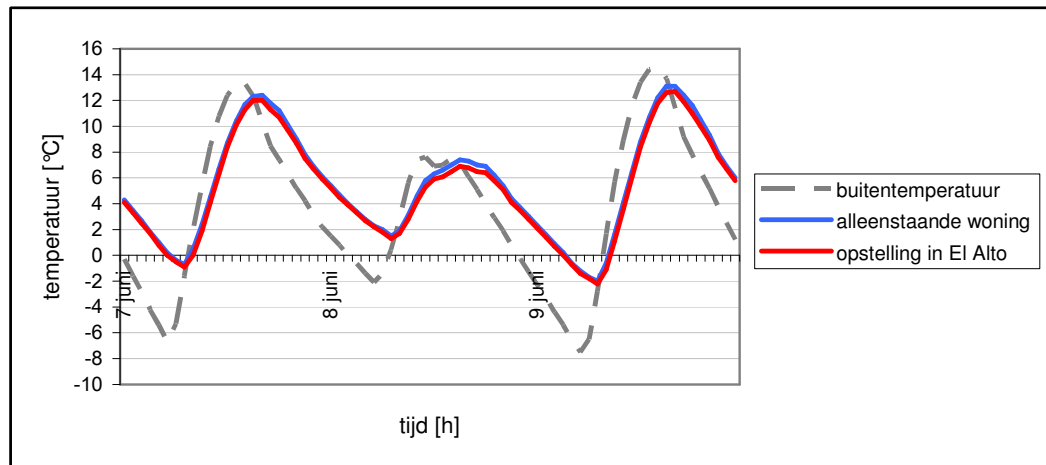
Voor het bepalen van de afscherming zijn er vier parameters nodig: maximale en minimale azimut en maximale en minimale hoogte. De waarden en de bepaling van deze parameters is opgenomen in appendix F.

In grafiek 4.11 is het verloop van de binnenluchttemperaturen weergegeven voor de opstelling in El Alto en voor een alleenstaande woning. In de zomerperiode heeft het binnenklimaat een gelijkaardig verloop als dat in de winterperiode. Uit tabel 4.17 is af te leiden dat het verschil tussen de maximale binnenluchttemperaturen in de tussenperiodes bij de verschillende opstellingen groter is. In deze periodes is er dus een grotere demping van de maximale waarde in de opstelling in El Alto door de afscherming door de omliggende gebouwen.

Tabel 4.16: Gegevens binnenklimaat op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
opstelling in El Alto	5,12	12,8	16:00	-2,4	2:05	28,83
alleenstaande koepelwoning	5,49	13,2	15:50	-2,2	1:55	28,17

Grafiek 4.11: Vergelijking opstelling koepelwoningen: Winterperiode



Tabel 4.17: Gegevens binnenklimaat op 1 september

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
opstelling El Alto	8,13	10,7	14:10	-2,4	1:20	37,43
alleenstaande woning	8,60	11,5	13:55	-2,2	1:05	29,26

De invloed van de omstaande gebouwen en muren is niet zo groot, waarschijnlijk door de goede geleidbaarheid van de betonnen muren.

Het verschil in maximale waarde van de binnenluchttemperatuur is wel groter als de zon op een hoogte staat van ongeveer 65°.

4.2.4.2 Zonafscherming van wanden

Deze afschermingen betreffen één specifieke wand. Bij de koepelwoning liggen de ramen en de deur 10 cm dieper dan het rechte vlak, zoals te zien is in figuur 4.7. De insprong fungeert als een korte luifel. Deze luifel is van toepassing op de ramen en de deur, maar ook op de rechte muurdelen onder de ramen.



Figuur 4.7: Insprong van de ramen en rechte muurdelen

Voor de afscherming van de wanden zijn dezelfde parameters nodig als bij de afscherming van het gehele gebouw. De waarden en de bepaling ervan zijn ook weergegeven in appendix F.

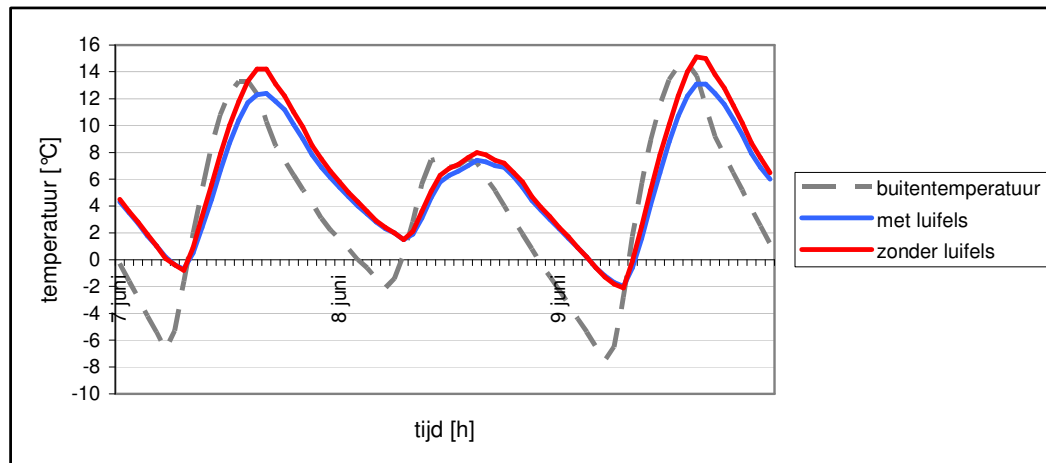
De binnenluchttemperaturen in grafiek 4.12 hebben hetzelfde verloop in de winter- en zomerperiode. Uit tabel 4.18 is af te leiden dat de demping met luifels iver veel groter is, maar de gemiddelde binnenluchttemperatuur is lager.

De maximale binnenluchttemperaturen liggen hoger bij de woning zonder luifels, deze fungeren als een kleine zonnewering. De minimale binnenluchttemperaturen zijn echter gelijk. Dus de winsten overdag in een woning zonder luifels leiden niet tot hogere temperaturen 's nachts. Dit komt door de hoge transmissieverliezen doorheen de gebouwschil. De invloed van de luifels zal groter zijn als de gebouwschil een lagere gemiddelde U-waarde heeft, dus als er isolatie zal worden toegepast.

Tabel 4.18: Gegevens binnenklimaat op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
zonder luifels	6,28	15,2	15:40	-2,2	2:05	16,85
met luifels	5,49	13,2	15:50	-2,2	1:55	28,17

Grafiek 4.12: Invloed van de luifels op de binnenluchttemperatuur: Wintersituatie



4.3 Besluit

Voor de betonnen koepelwoning zonder isolatie hebben de binnenmuren de gunstigste invloed op het verbeteren van het binnenklimaat. Als de binnenmuren een hoge warmtecapaciteit bezitten is deze invloed nog groter. Voor het referentiemodel is dan ook gekozen voor lemen binnenmuren. Door de binnenmuren worden de

fluctuaties van het buitenklimaat zodanig gedempt dat de minimale binnenluchttemperaturen hoger zijn. Er is dus een verbetering van de nachtelijke binnenluchttemperaturen, wat de opzet is van de analyse.

De andere invoergegevens hebben in mindere mate invloed op het binnenklimaat. De temperaturen overdag zijn meestal hoger, maar 's nachts is het temperatuursverschil klein. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de grote warmtegeleiding van het gewapende beton. Hierdoor zijn de nachtelijke verliezen groot, als de buitentemperaturen lager zijn dan de binnentemperaturen.

In tabel 4.19 worden de gekozen materiaaleigenschappen nog eens weergegeven die gebruikt zijn in het referentiemodel.

Tabel 4.19: Technische eigenschappen van de toegepaste materialen

materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	e_L [-]	$a_{s,i}$ [-]	$a_{s,e}$ [-]
betonnen muur	0,1	2,2	0,045	2500	840	0,88	0,25	0,65
betonnen vloer	0,15	2,2	0,068	2500	840	0,88	0,65	0,65
grond (leem)	3	1,13	2,655	2200	1000	0,90	0,83	0,83
pleister	0,01	0,52	0,019	1300	840	0,90	0,25	0,25
enkel glas	0,004	0,8	0,005	2500	840	0,94	0,15	0,15

Voor het referentiemodel zijn de gegevens voor het binnen- en buitenklimaat opgenomen in tabel 4.20 tot 4.23 voor de winter- en zomerperiode. De verlopen van de binnenluchttemperaturen zijn weergegeven in grafiek 4.13 en 4.14.

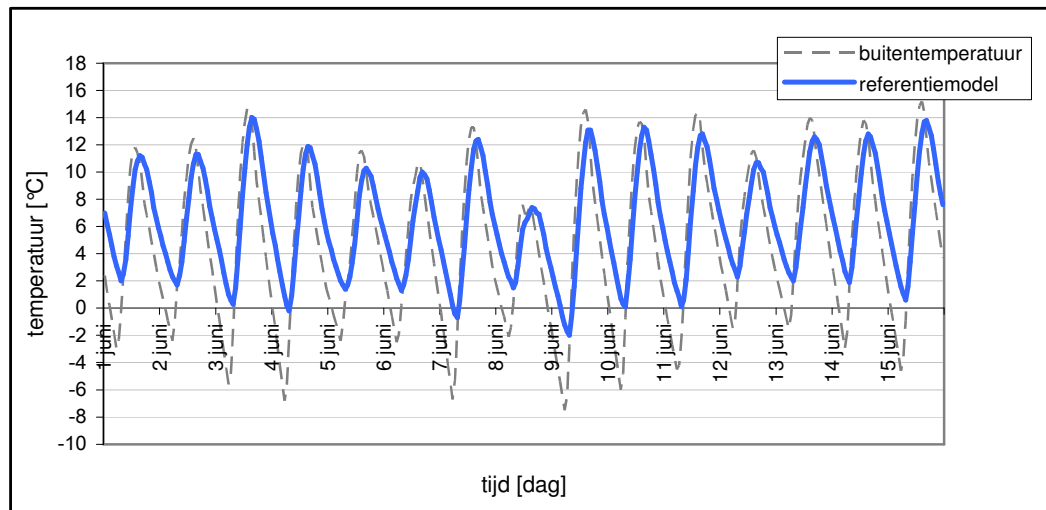
Tabel 4.20: Gegevens buitenklimaat referentiemodel op 9 juni

$\theta_{e,gem}$ [°C]	$\theta_{e,max}$ [°C]	$\theta_{e,min}$ [°C]	$\theta_{e,ampl}$ [°C]	$t(\theta_{e,max})$ [h]	$q_{zon,glob,max}$ [W/m ²]	$t(q_{zon,glob,max})$ [h]
3,9	14,7	-7,5	10,8	13:55	896,3	12:00

Tabel 4.21: Gegevens binnenklimaat referentiemodel op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,49	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,18

Grafiek 4.13: Binnenluchttemperatuur referentiemodel: Winterperiode



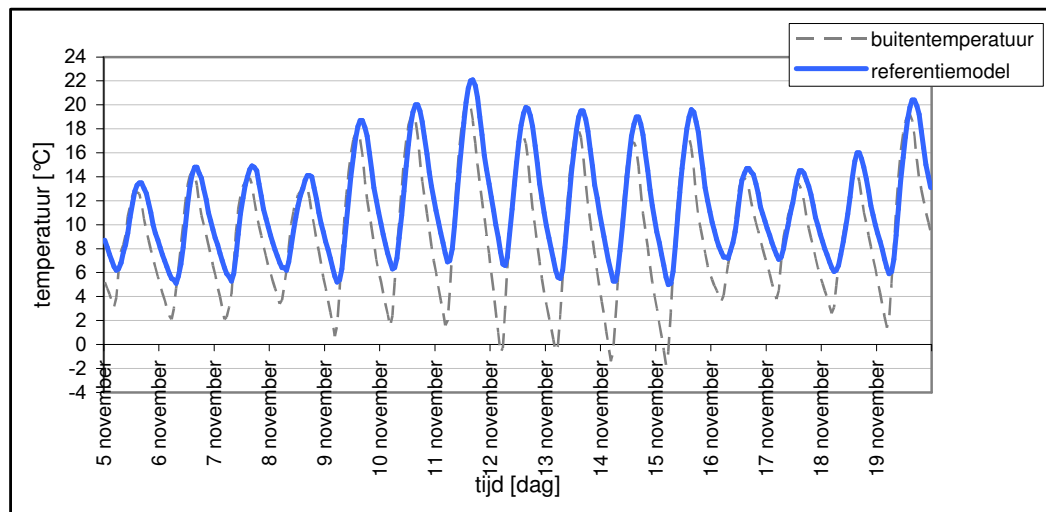
Tabel 4.22: Gegevens buitenklimaat referentiemodel op 11 november

$\theta_{e,gem}$ [°C]	$\theta_{e,max}$ [°C]	$\theta_{e,min}$ [°C]	$\theta_{e,ampl}$ [°C]	$t(\theta_{e,max})$ [h]	$q_{zon,glob,max}$ [W/m²]	$t(q_{zon,glob,max})$ [h]
11,5	20,4	1,1	8,9	13:55	1170,9	11:55

Tabel 4.23: Gegevens binnenklimaat referentiemodel op 11 november

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	14,52	22,2	15:50	6,8	1:55	13,93

Grafiek 4.14: Binnenluchttemperatuur referentiemodel: Zomerperiode



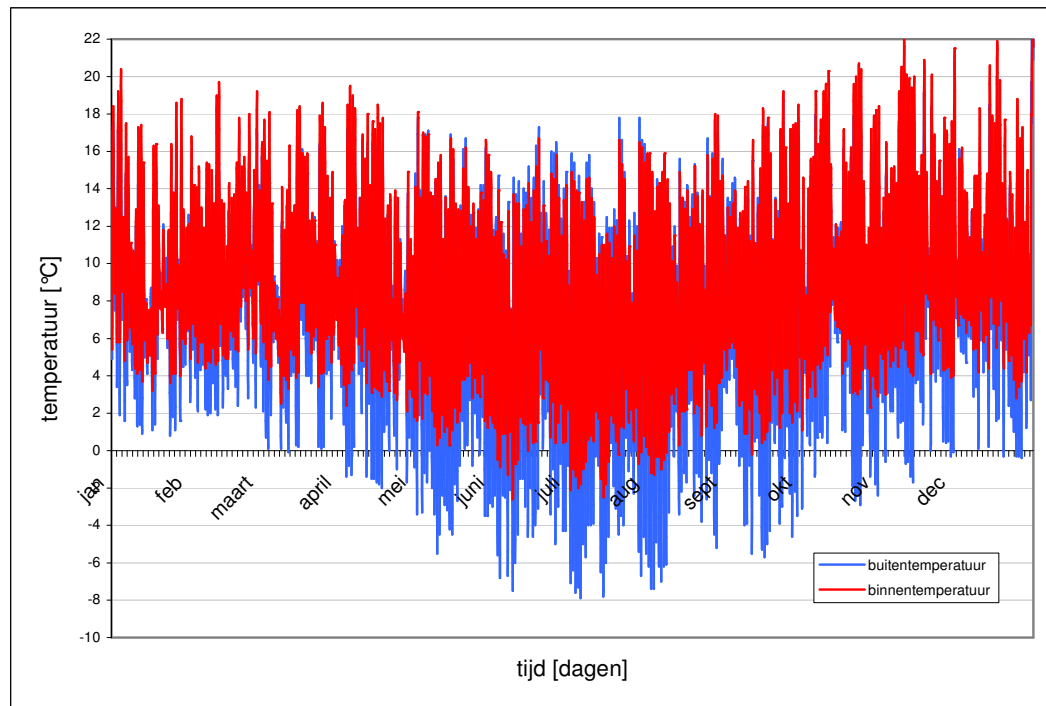
Grafiek 4.15 toont het verloop van de binnenluchttemperaturen gedurende het hele jaar. De betonnen koepelwoning presteert niet zo goed in het koude klimaat in El Alto. De nachtelijke binnenluchttemperaturen zijn in de winterperiode veel te laag om een normale nachtrust van de bewoners te garanderen. De waarden in tabel 4.24 tonen aan dat ook in de zomerperiode zijn de minimale binnenluchttemperaturen laag zijn. Er zal dus naar passieve oplossingen moeten gezocht worden om het binnenklimaat te optimaliseren.

De warmte van de hoge zonne-intensiteit blijft niet lang vastgehouden door het ongeïsoleerde beton. In het volgende hoofdstuk zullen de verlies- en de winstposten worden onderzocht en daar waar mogelijk verbeterd.

Tabel 4.24: Jaarlijkse binnenluchttemperaturen in het referentiemodel in El Alto, Bolivia

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	9,5	10,2	9,5	9,1	8,3	6,9	6,4	7,7	8,7	10,1	10,8	10,4
$\theta_{e,max}$	3,1	4,3	2,5	2,0	0,1	-2,7	-2,5	-1,5	-0,3	1,1	2,8	2,7
$\theta_{e,min}$	20,5	19,7	18,6	19,6	18,3	16,8	16,6	18,1	19,3	20,8	22,2	22,0

Grafiek 4.15: Verloop binnen- en buitenluchttemperaturen in het referentiemodel in El Alto, Bolivia



5. Invloedsfactoren warmtebalans

5.1 Warmtebalans

De warmtebalans van een gebouw volgt uit de wet van behoud van energie. Op elk ogenblik zijn de warmtewinsten in het gebouw gelijk aan de som van de warmteverliezen en de opslag van de warmte in het gebouw. Hier zal de warmtebalans gebruikt worden om de belangrijkste verliesposten op te sporen en deze te verbeteren. De berekening van de verschillende termen in de warmtebalans zijn gebaseerd op de resultaten uit Capsol. Door de dynamische berekening zijn de warmtestromen het meest nauwkeurig.

De algemene warmtebalans voor een gebouw is:

$$\Phi_s + \Phi_i + \Phi_h = \Phi_t + \Phi_v + \frac{dU}{dt} \quad [W]$$

met Φ_s warmtewinsten ten gevolge van bezonning [W]

Φ_i interne winsten ten gevolge van de warmte geproduceerd door de bewoners, apparaten, verlichting [W]

Φ_h energievraag voor verwarming (positief) of koeling (negatief) [W]

Φ_t transmissieverliezen ten gevolge van geleiding van warmte doorheen de gebouwschil [W]

Φ_v ventilatieverliezen ten gevolge van het convectief warmtetransport door luchtstroming door de luchtondichte gebouwschil [W]

$\frac{dU}{dt}$ thermische traagheid van het gebouw [W]

Om een behaaglijke binnenomgeving te verkrijgen moet de binnenluchttemperatuur tussen 20 en 26°C liggen volgens de Belgische normen. In Bolivia wordt er echter geen gebruik gemaakt van een verwarmingsinstallatie. De gebouwschil zal dus zo ontworpen moeten worden dat de warmteverliezen minimaal zijn en de warmtewinsten maximaal. Vooral de nachtelijke binnenluchttemperaturen zijn bepalend voor het slechte comfort van het binnenklimaat.

De warmtebalans is enkel berekend een winterperiode van 1 tot 15 juni.

5.1.1 Verliezen

5.1.1.1 Transmissieverliezen

De transmissieverliezen zijn gelijk aan de som van de transmissieverliezen doorheen alle constructiedelen die de gebouwschil vormen. Deze verliezen kunnen volgens drie methodes berekend worden door verschillende uitvoergegevens op te vragen uit Capsol.

Zo kan de transmissie berekend worden op basis van de oppervlaktetemperaturen van de scheidende constructiedelen, door de geleiding op te vragen uit Capsol en volgens de theoretische vereenvoudigde formule.

A. Berekening met oppervlaktetemperaturen

Voor de berekening op basis van de oppervlaktetemperaturen zijn de binnen- en buitenoppervlaktetemperaturen van alle scheidende constructiedelen opgevraagd uit Capsol. De transmissieverliezen worden dan bepaald door de volgende formule:

$$\Phi_t = \sum (A_i \cdot U_i \cdot (\theta_{i,s} - \theta_{e,s})) \quad [W]$$

met A_i oppervlakte van het scheidende constructiedeel [m²]

U_i U-waarde
[W/m²K]

$\theta_{i,s}$ oppervlaktetemperatuur van het constructiedeel aan de binnenzijde [°C]

$\theta_{e,s}$ oppervlaktetemperatuur van het constructiedeel aan de buitenzijde [°C]

De referentietemperatuur van de buitenomgeving wordt beïnvloed door de zonnestraling en de lange golfstraling op het geveloppervlak. Ze is dus afhankelijk van de oriëntatie, de helling, de absorptie- en de emissiefactoren. De buitenoppervlaktetemperaturen houden hier rekening mee. Hierdoor moeten de warmteovergangscoefficienten niet meer bij de U-waarde worden opgeteld.

B. Geleidingswarmtestromen door Capsol

Vervolgens kunnen in Capsol ook de geleidingswarmtestromen vanuit een zone naar een wand opgevraagd worden. De totale transmissieverliezen zijn dan de som van de warmtestromen aan de binnenzijde en aan de buitenzijde van de verschillende scheidende wanden.

$$\Phi_t = \sum_i (Q_{i, \text{geleiding, binnen}} + Q_{i, \text{geleiding, buiten}})$$

C. Gebouwgemiddelde materiaaleigenschappen

De laatste methode bestaat erin de transmissieverliezen te berekenen volgens een vereenvoudigde formule:

$$\Phi_t = A_T \cdot \bar{U} \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [\text{W}]$$

$$A_T = \sum_i A_i$$

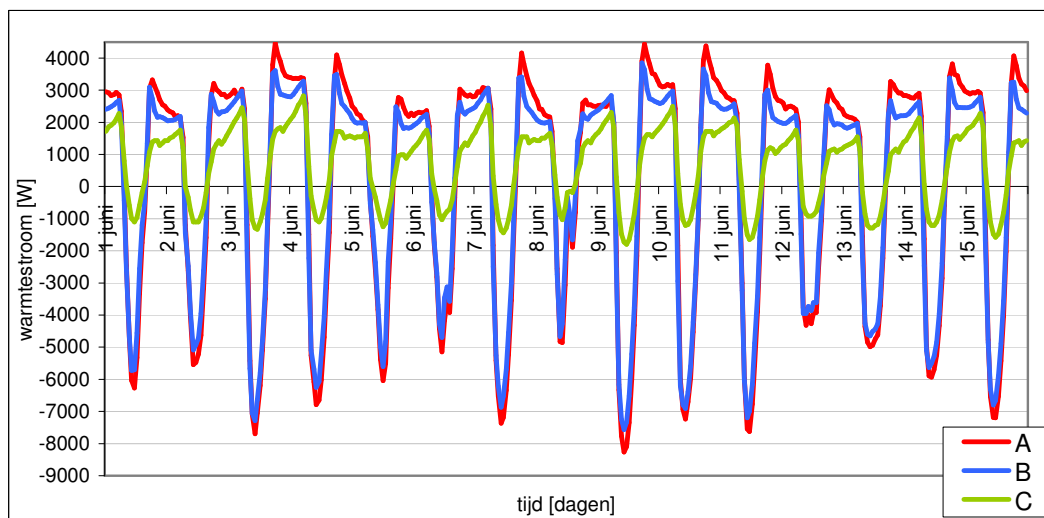
$$\bar{U} = \frac{\sum (a_i \cdot A_i \cdot U_i)}{\sum (A_i)}$$

met $\bar{U}$ gebouwgemiddelde U-waarde [W/m²K]

Voor de weegfactor is voor het warmteverlies naar de grond een waarde genomen van 1/3 en voor de gevel een waarde van 1.

Tabel 5.1 en grafiek 5.1 tonen een vergelijking tussen de transmissieverliezen berekend volgens de verschillende methodes. De positieve waarden van de warmtestroom zijn warmteverliezen van de binnenomgeving naar de buitenomgeving.

Grafiek 5.1: Transmissieverliezen volgens verschillende methodes



Tabel 5.1: Daggemiddelde transmissieverliezen volgens verschillende methodes

	1 juni	2 juni	3 juni	4 juni	5 juni	6 juni	7 juni	8 juni	9 juni	10 juni	11 juni	12 juni	13 juni	14 juni	15 juni
A	420	147	140	256	87	247	0	570	-303	244	-58	309	-58	281	-22
B	-287	-131	-177	-199	-117	-195	-44	-379	120	-245	-45	-234	-31	-210	-47
C	850	586	945	1030	485	594	770	713	658	937	580	533	340	695	658

Bij de drie methodes zijn de tijdstippen waarop transmissieverliezen optreden gelijk. De methodes A en B geven ongeveer hetzelfde verloop. Bij methode C is de amplitude veel kleiner. Bij deze methode hebben de gemiddelde warmtestromen steeds een positieve waarde. Volgens de andere methodes zijn de waarden soms negatief. Dit betekent dat er door transmissie gemiddeld warmte wordt afgestaan aan de buitenomgeving in plaats van dat er warmte verloren gaat. Dit zorgt voor grote temperatuurfuctuaties in de binnenruimte.

Voor de vergelijking van de ingrepen in de gebouwschil zullen de transmissieverliezen verder berekend worden volgens de gebouwgemiddelde materiaaleigenschappen. Hiermee is de transmissie eenvoudiger te bepalen.

5.1.1.2 Ventilatieverliezen

De ventilatieverliezen worden veroorzaakt door de infiltratie van lucht doorheen de aansluitingsvoegen van deur en ramen. De bepalende factor is dus het infiltratievoud, deze bedraagt 1,5 /h. De ventilatieverliezen kunnen ook volgens twee methodes bepaald worden. Volgens de theoretische formule door de binnen- en buitenluchttemperatuur op te vragen uit Capsol of door de ventilatiestromen te bepalen in Capsol aan de verschillende constructieonderdelen.

A. Theoretische ventilatieverliezen

De ventilatieverliezen kunnen berekend worden volgens de formule:

$$\Phi_v = 0,34 \cdot n \cdot V \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [W]$$

B. Ventilatiestroom door Capsol

Capsol geeft de ventilatiestroom vanuit een zone naar een andere. De ventilatieverliezen kunnen berekend worden door de ventilatiestroom van binnen naar buiten af te trekken van deze van buiten naar binnen.

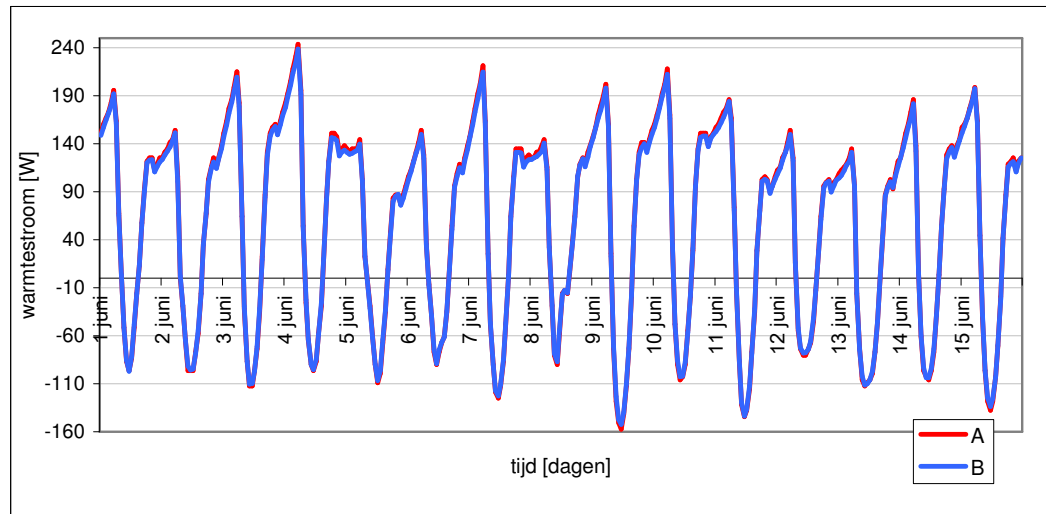
$$\Phi_v = \sum_i (Q_{i, \text{ventilatie, binnen}} - Q_{i, \text{ventilatie, buiten}}) \quad [W]$$

Uit tabel 5.2 en grafiek 5.2 is te zien dat de beide methodes dezelfde resultaten geven. De ventilatieverliezen bepaald volgens methode B hebben een iets hogere waarde dan deze bepaald met methode A. De positieve waarden zijn ook hier verliezen.

Tabel 5.2: Daggemiddelde ventilatieverliezen volgens verschillende methodes

	1 juni	2 juni	3 juni	4 juni	5 juni	6 juni	7 juni	8 juni	9 juni	10 juni	11 juni	12 juni	13 juni	14 juni	15 juni
A	74,8	51,2	82,7	89,7	42,5	51,7	67,2	62,0	57,5	81,2	50,9	46,6	29,9	60,9	57,6
B	72,5	50,3	81,0	87,5	41,3	50,3	65,5	61,1	56,4	80,7	49,7	45,9	28,9	59,6	56,9

Grafiek 5.2: Ventilatieverliezen doorheen de aansluitingen



De gemiddelde ventilatiestromen zijn positief, dus doorheen de aansluitingen gaat gemiddeld warmte verloren. Overdag is de luchtstroom van buiten naar binnen echter negatief, er wordt dan warmte afgegeven aan de binnenomgeving. Deze warmtewinsten zijn veel kleiner dan de nachtelijke verliezen.

5.1.1.3 Totale verliezen

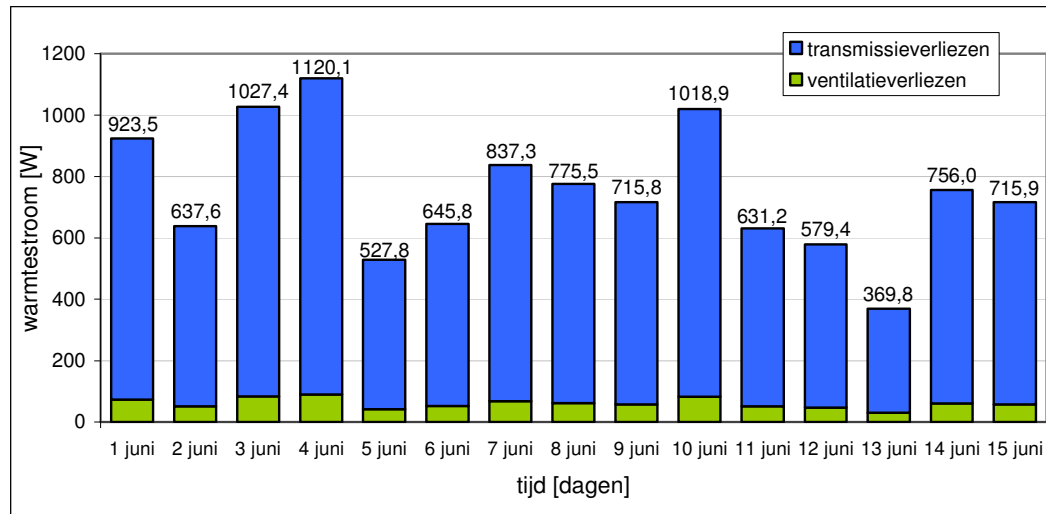
Voor de totale verliezen is er verder gerekend met de theoretische methodes om de invloed van de verliesposten in te schatten.

Uit de positieve gemiddelde waarden in grafiek 5.3 volgt dat volgens de theoretische methode de verliezen door transmissie en ventilatie groter zijn dan de winsten. De verliesposten door transmissie zijn het meest bepalend voor de warmteverliezen van de betonnen koepelwoning. De enige gebouwafhankelijke parameter hiervoor is volgens de theoretische formule de gebouwgemiddelde U-waarde. Hoe lager deze

waarde zal zijn, hoe kleiner de warmteverliezen. Deze zal dan ook het eerst aangepakt worden bij de verbetering.

Pas nadat de warmtegeleiding van het verliesoppervlak zal verbeterd zijn, zullen de ventilatieverliezen belangrijker worden.

Grafiek 5.3: Totale theoretische warmteverliezen



5.1.2 Winsten

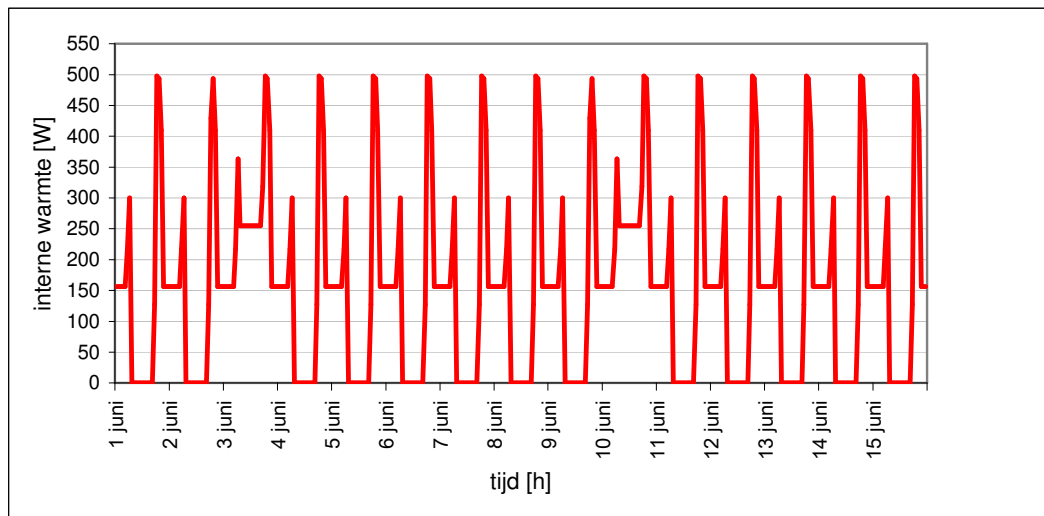
5.1.2.1 Interne winsten

De interne winsten zijn bepaald volgens de functie van scenario 2. De waarden van de interne winsten zijn opgenomen per periode van 30 minuten in grafiek 5.4. De gemiddelde interne winsten zijn weergegeven in tabel 5.3. De hoogste waarden van de interne winsten zijn geldig op zondag, wanneer de bewoners thuis zijn.

Tabel 5.3: Daggemiddelde interne winsten

1 juni	2 juni	3 juni	4 juni	5 juni	6 juni	7 juni	8 juni	9 juni	10 juni	11 juni	12 juni	13 juni	14 juni	15 juni
137,3	134,5	254,2	137,3	137,3	137,3	137,3	137,4	134,5	254,2	137,3	137,3	137,3	137,3	137,3

Grafiek 5.4: Interne winsten



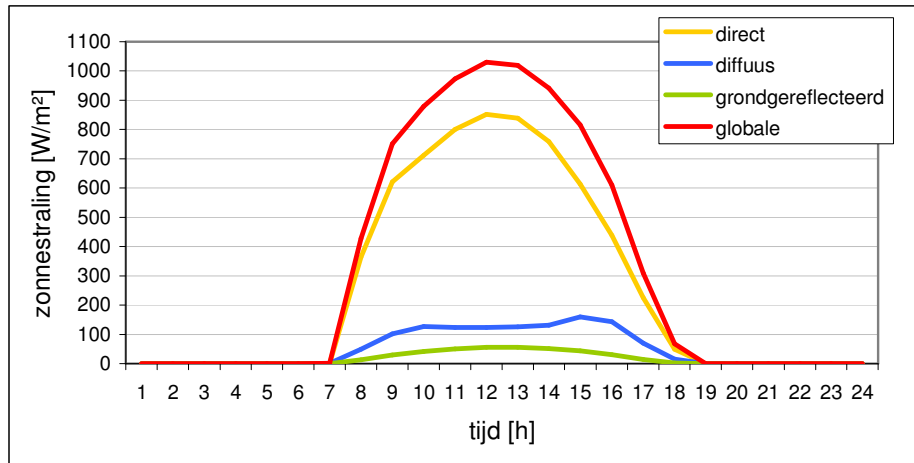
5.1.2.2 Zonnewinsten

De invallende zonnestraling op een extern oppervlak van een wand bestaat uit drie componenten: directe, diffuse en via de grond gereflecteerde straling. De directe zonnestraling valt rechtstreeks in op de wand. De diffuse wordt in de atmosfeer door stofdeeltjes en moleculen in alle richtingen gelijkmatig verstrooid en komt daarna op de wand terecht. De via de grond gereflecteerde straling valt alvorens de wand te bereiken op de grond. Het totaal aan zonnestraling op een vlak is de globale straling.

$$Q_{\text{globaal}} = Q_{\text{direct}} + Q_{\text{diffuus}} + Q_{\text{grondgereflecteerd}} \quad [\text{W}]$$

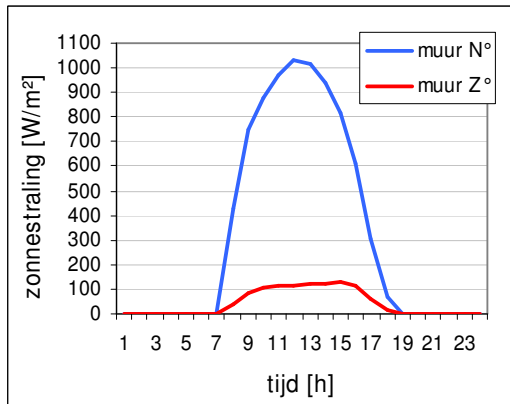
Uit grafiek 5.5 volgt dat in El Alto de directe zonnestraling een veel grotere waarde heeft dan de diffuse en de grondgereflecteerde. De directe zonnestraling is gedurende het hele jaar zeer groot.

Grafiek 5.5: Zonnestraling op 9 juni op muur N

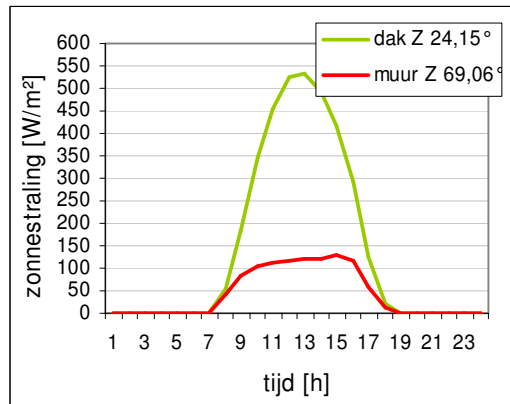


Uit grafiek 5.6 en 5.7 volgt dat de intensiteit van de globale zonnestraling dat een vlak ontvangt afhankelijk is van de helling en de oriëntatie van het vlak. Ook de zonshoogte is bepalend voor de intensiteit van de zonnestraling.

Grafiek 5.6: Invloed oriëntatie



Grafiek 5.7: invloed helling



De warmtewinsten aan de binnenomgeving die het gevolg zijn van de zonnestraling zijn de zonnewinsten. Deze kunnen indirect of direct zijn. De indirecte zonnewinsten vinden plaats doorheen stralingsdoorlatende constructiedelen. De absorptie van zonnewarmte aan het buitenoppervlak zorgt voor een verhoogde oppervlaktetemperatuur van het constructiedeel. De warmte wordt vervolgens afgegeven aan de binnenruimte. De directe zonnewinsten zijn warmtewinsten doorheen stralingsdoorlatende bouwdeelen, zoals glas. De zonnewinsten moet ook nog gecorrigeerd worden op de langgolvlige stralingsverliezen naar de hemelkoepel. Deze infrarode straling wordt in Capsol ingevoerd als een constante functie met een waarde van -50 en wordt aan de buitenzone opgelegd.

De zonnewinsten worden bepaald door de formule:

$$\Phi_s = \sum A_i \cdot f_{sh,i} \cdot g_i \cdot I_{s,i} \quad [W]$$

met	A_i	geveloppervlak	$[m^2]$
	$f_{sh,i}$	correctie voor beschaduwing	$[-]$
	g_i	ZTA-factor	$[-]$
	$I_{s,i}$	zonne-irradiantie op het glasoppervlak	$[W/m^2]$

De betonnen koepel is ongeïsoleerd en heeft een U-waarde van 4,64 W/m²K. De zonnewinsten doorheen de stralingsondoorlatende constructiedelen mogen dus niet verwaarloosd worden, daarom zijn ze berekend voor zowel de beglazing als voor de betonnen delen.

Voor de beglazing is de ZTA-factor afhankelijk van de gekozen transmissiefactor τ en absorptiefactor a_s van het constructiemateriaal. Volgens de formule:

$$g = \tau_s + \frac{a_s}{1 + \frac{\alpha_e}{\alpha_i}} \quad [-]$$

De ZTA-factor voor de stralingsondoorlatende constructiedelen wordt bepaald door de absorptiefactor en de U-waarde van het materiaal volgens de formule:

$$g = a_s \cdot \frac{U}{\alpha_e} \quad [-]$$

De zonnewinsten zijn hoger als de absorptiefactor groter is. Deze factor is afhankelijk van de kleur. Hoe donkerder de koepelwoning wordt geleverd, hoe meer zonnewinsten er zullen optreden doorheen de stralingsondoorlatende gebouwschil.

In tabel 5.4 zijn de waarden voor de ZTA-factor weergegeven voor de verschillende gevelmaterialen.

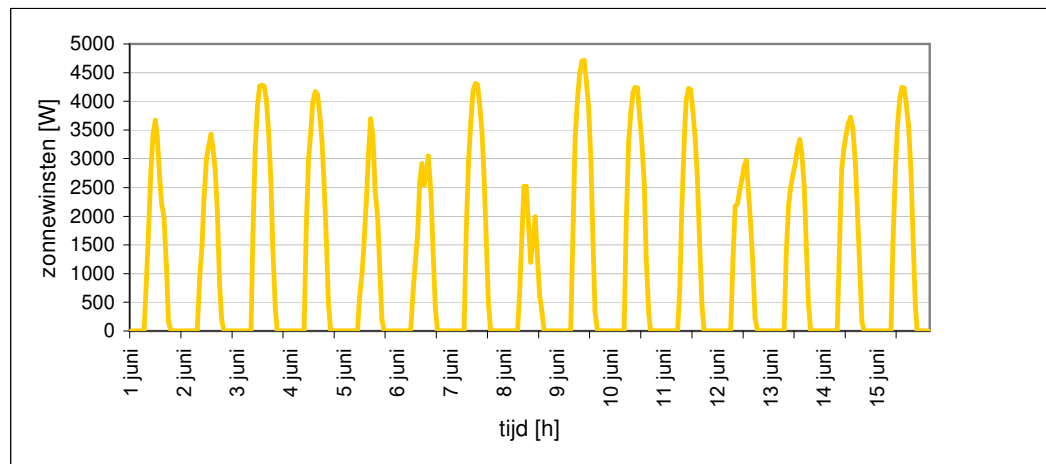
Tabel 5.4: ZTA-factor

materiaal	a_s [-]	τ_s [-]	U [W/m ² K]	g [-]
grijs beton	0,65	n.v.t	4,64	0,13
houten deur	0,75	n.v.t	2,7	0,09
enkel glas	0,15	0,8	n.v.t	0,84

Capsol berekent de invallende zonnestraling met afscherming van de zon $I_{s,sh}$ op elk oppervlak. Deze waarde is gebruikt voor de irradiantie van de zon op het oppervlak, dus er moet geen correctie meer worden toegepast voor de beschaduwing.

De totale zonnewinsten per uur zijn weergegeven in grafiek 5.8. De zonnewinsten hebben een hoge waarde. Voor de berekening van de transmissieverliezen volgens methode A zijn de zonnewinsten door de stralingsondoorlatende delen in rekening gebracht in de oppervlaktetemperatuur. De zonnestraling beïnvloedt namelijk in sterke mate de buitenoppervlaktetemperaturen. De theoretische berekening van de transmissieverliezen is dus een goede benadering als de zonnewinsten berekend worden door alle scheidende constructieonderdelen. De daggemiddelde zonnewinsten zijn weergegeven in tabel 5.5.

Grafiek 5.8: Zonnewinsten doorheen alle constructiedelen



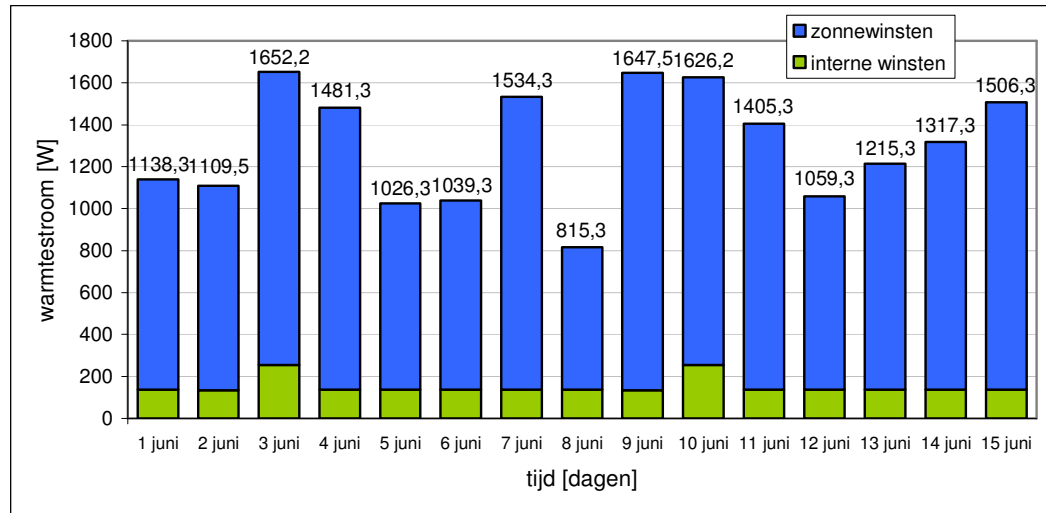
Tabel 5.5: Daggemiddelde zonnewinsten

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni	juni
1001	975	1398	1344	889	902	1397	678	1513	1372	1268	922	1078	1180	1369

5.1.2.3 Totale winsten

Uit grafiek 5.9 volgt dat de winsten voornamelijk worden bepaald door de zonnewinsten. De interne winsten hebben maar een beperkt aandeel in de totale winsten.

Grafiek 5.9: Totale theoretische warmtewinsten



5.1.3 Totale warmtebalans

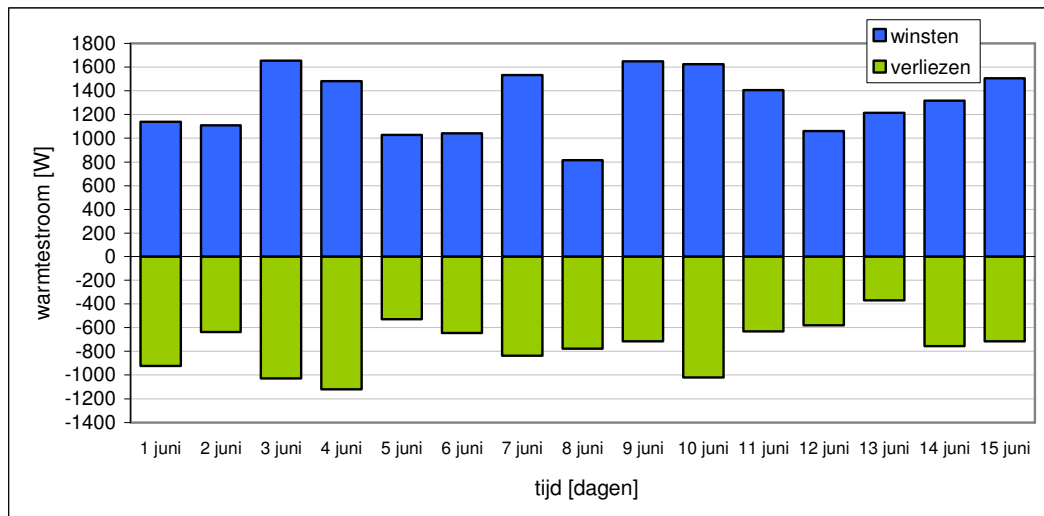
Het verschil van de winsten en de verliezen levert voor de hele periode een positieve waarde. De waarde is de opslagterm uit de warmtebalans, de opgeslagen warmte in de zware capacitieve constructie-elementen die in contact staan met de binnenomgeving.

Uit grafiek 5.10 en 5.11 volgt dus dat gedurende de winterperiode de warmtewinsten hoger zijn dan de warmteverliezen. De oorzaak hiervan zijn de hoge zonne-intensiteit in El Alto.

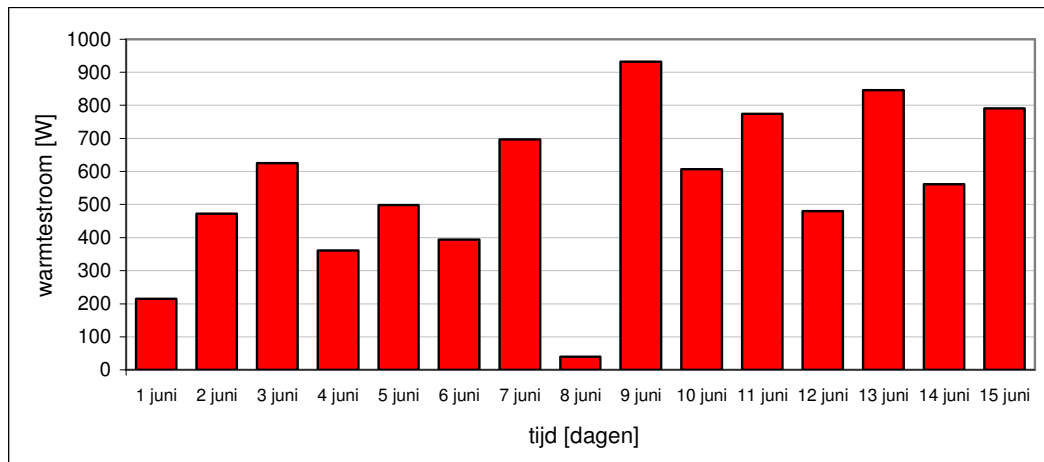
Op 8 juni is de warmtewinst het kleinst, dit komt door de lagere zonnestraling door de bewolking. De globale zonnestraling is dan veel lager dan op de andere dagen. Dit wordt veroorzaakt door de bewolking, waardoor er minder directe zonnestraling is.

Vanuit het oogpunt van de warmtebalans presteren de woningen goed doordat de warmtewinsten veel groter zijn dan de verliezen. De warmtewinsten vinden overdag plaats en zorgen voor hoge binnenluchttemperaturen. Maar de nachtelijke verliezen zijn zeer groot waardoor de winsten snel verloren gaan door de ongeïsoleerde koepel en de slechte aansluitingen. Hierdoor zijn de nachtelijke binnenluchttemperaturen te laag.

Grafiek 5.10: Daggemiddelde winsten en verliezen



Grafiek 5.11: Totale warmtebalans



5.1.4 Thermische traagheid

Aangezien het beton een zwaar capaciteef constructie-element is dat in contact staat met de binnenomgeving slaat het warmte op. De traagheidsterm uit de warmtebalans wordt bepaald door alle constructiedelen die toegankelijk zijn voor warmteopslag vanuit de binnenomgeving. De opslagterm kan berekend worden volgens de formule:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i \rho_i \cdot c_i \cdot A_i \cdot d_i \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad [W]$$

met d effectieve dikte [m]

Voor berekening van één dag is de effectieve dikte gelijk aan 0,1 m, wat overeenkomt met de dikte van de betonnen wand.

Uit de formule volgt dat hoe groter de soortelijke warmtecapaciteit zal zijn, hoe meer warmte er zal worden opgeslagen door de constructiedelen. Deze warmte wordt terug afgestaan als de binnenluchttemperatuur daalt. De nachtelijk binnenluchttemperaturen zullen dus hoger worden en daardoor zorgen voor een behaaglijkere binnenomgeving.

5.1.5 Besluit

De zonnewinsten veroorzaken voornamelijk een hogere binnenluchttemperatuur overdag. De warmteverliezen doorheen de gebouwschil zijn zeer groot zodat de temperaturen snel dalen als de zon minder schijnt. Dit komt door de hoge warmtegeleiding van het beton. Overdag zal deze lage warmteweerstand zorgen voor opwarming van de binnenluchttemperatuur door geleiding van de warmere buitentemperatuur doorheen de gebouwschil, maar 's nachts tot een snellere afkoeling door de veel koudere buitentemperatuur.

Er zal dus een optimum moeten gezocht worden tussen de maximale zonnewinsten overdag en de minimale nachtelijke transmissieverliezen. De gebouwschil zal de zonnewinsten zo lang mogelijk moeten vasthouden. Dus de wanden zullen de warmte moeten opslaan en deze 's nachts terug afgeven. Hiervoor is een grote warmteopslagcapaciteit en een lage warmtegeleiding nodig.

5.2 Berekening van de stationaire binnenluchttemperatuur θ_{is}

Om de invloed van de dynamische berekening van de binnenluchttemperaturen te onderzoeken zijn de stationaire binnenluchttemperaturen berekend voor het referentiemodel op 9 juni. Deze binnenluchttemperatuur onder stationaire randvoorwaarden kan berekend worden uit de warmtebalans door de thermische traagheid gelijk te stellen aan nul. De stationaire binnenluchttemperatuur hangt dus af van de buitentemperatuur, de warmtewinsten en de warmteverliezen en wordt berekend volgens de formule:

$$\theta_{is} = \theta_e + \frac{\Phi_s + \Phi_i + \Phi_h}{V\left(\frac{U}{C} + 0,34n\right)} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

De zonnewinsten zijn bepaald volgens de formules zoals beschreven bij de zonnewinsten.

Voor de interne winsten is een waarde genomen van 5 W/m^2 vloeroppervlakte, voor de koepelwoning zijn de interne winsten dan gelijk aan 155 W .

De energievraag voor verwarming is gelijk gesteld aan nul doordat er geen verwarmingsinstallatie aanwezig is in de koepelwoning.

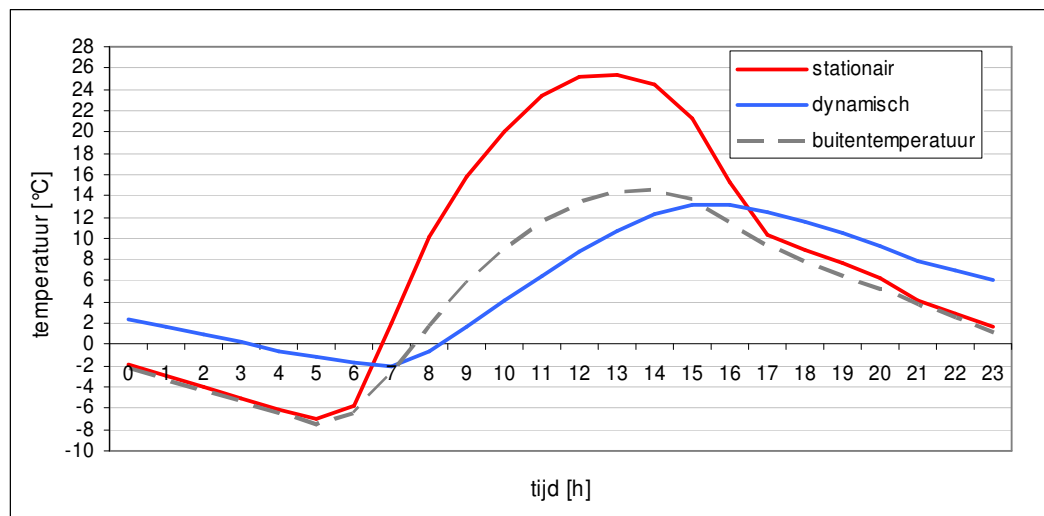
De buitentemperaturen zijn de temperaturen bepaald door het weerstation in El Alto op 9 juni.

Met de invulling van de gebouwparameters kunnen de stationaire binnenluchttemperaturen berekend worden.

Uit grafiek 5.12 is af te leiden dat tot 6 uur de stationaire temperaturen lager, vanaf 7 tot 16 uur hoger en vanaf 17 uur terug lager zijn dan de dynamische binnenluchttemperaturen berekend door Capsol. Deze grenzen vallen samen met de tijd dat de zon onder is, opkomt en terug onder gaat. Bij de dynamische berekening is er rekening gehouden met de warmte opgeslagen in de muren waardoor de nachtelijke temperaturen hoger zijn.

De dynamische binnenluchttemperaturen zijn overdag lager door de demping van het buitenklimaat door opname van warmte door de wanden. Bij de stationaire berekening voelt de binnenruimte onmiddellijk het effect van de grotere zonnestraling overdag. De maximale waarden van de binnenluchttemperaturen zijn dan ook veel hoger volgens de stationaire methode dan de dynamische.

Grafiek 5.12: Stationaire en dynamische binnenluchttemperatuur referentiemodel op 9 juni



5.3 Strategieën tot klimaatverbetering

Als uitgangspunt voor de verbetering van de betonnen koepelwoning wordt het referentiemodel gekozen. De bijkomende materiaallagen worden op de betonnen constructie met een dikte van 10 cm geplaatst. De buitenzijde van de woning heeft in alle gevallen dezelfde absorptie, reflectie en emissiefactor als deze van het beton. Voor de meeste invloedstermen is enkel de winterperiode opgenomen, indien het verloop van de zomerperiode hiervan sterk verschilt, zal deze ook worden weergegeven.

5.3.1 Warmteopslag

De warmteopslag van de wanden wordt bepaald door de soortelijke warmtecapaciteit, deze wordt bepaald door de densiteit ρ en de soortelijke warmte c .

5.3.1.1 Densiteit ρ

Om de invloed van de densiteit op de binnenomgeving te beoordelen is aan het beton een materiaallaag toegevoegd van 5 cm met een verschillende densiteit. De andere thermische eigenschappen van de materialen zijn dezelfde. De lagen zijn langs binnen toegepast, omdat de warmte enkel wordt vastgehouden door de materiaallagen aan de binnenzijde van de isolatie. In deze fase is nog geen isolatie geplaatst, maar later wordt deze wel toegevoegd.

De gebruikte materiaallagen hebben de dezelfde eigenschappen als het gebruikte beton, maar de densiteit is een veranderlijke.

Tabel 5.6: Thermische eigenschappen toegepaste materiaallagen

d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	e_L [-]	$a_{s,e}$ [-]
0,05	2,2	0,023	x	840	0,88	0,65

Uit grafiek 5.13 en tabel 5.7 volgt dat hoe groter de densiteit van de toegevoegde materiaallaag, hoe lager de maximale en hoe hoger de minimale binnenluchttemperatuur. Het verschil tussen de maximale en de minimale waarden voor de verschillende densiteiten is gelijk. Zo daalt de maximale binnenluchttemperatuur tussen een densiteit van 2500 kg/m³ en 1250 kg/m³ met een waarde van 0,6°C en stijgt de minimale temperatuur met 0,6°C.

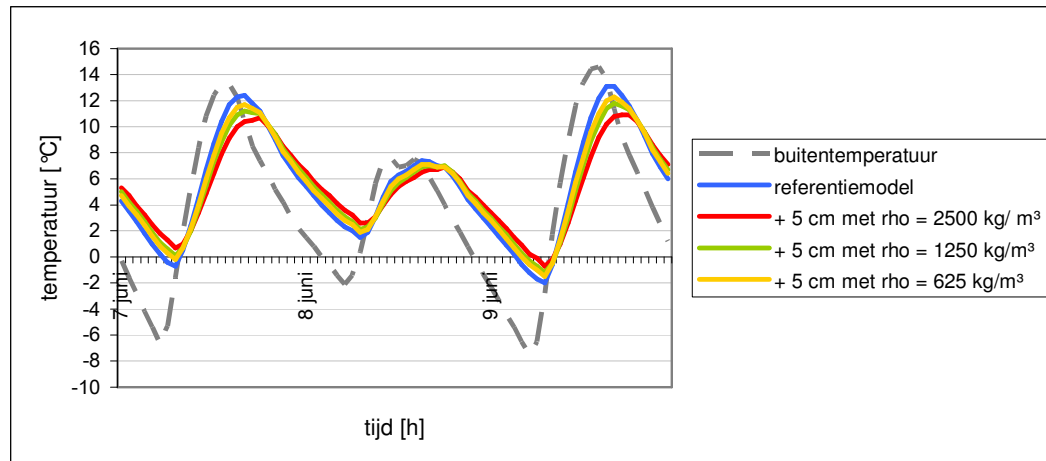
De demping van de materialen met een hogere densiteit is groter, waardoor het binnenklimaat stabiel is. De demping stijgt evenredig met de densiteit. De tijdvertraging echter niet. Deze is ongeveer gelijk voor een densiteit van 1250 kg/m^3 en 650 kg/m^3 , maar is veel groter voor de waarde 2500 kg/m^3 . Bij toepassing van gewapend beton aan de binnenzijde van de isolatie zal de maximale temperatuur dus veel later bereikt worden.

De gemiddelde binnenluchttemperatuur blijft ongeveer gelijk voor de verschillende densiteiten.

Tabel 5.7: Gegevens binnenklimaat bij toepassen materiaallaag aan binnenzijde op 9 juni

	$\theta_{i,\text{gem}}$ [°C]	$\theta_{i,\text{max}}$ [°C]	$t(\theta_{i,\text{max}})$ [h]	$\theta_{i,\text{min}}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
+ 5 cm met $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$	5,2	11,1	18:00	-0,8	4:05	45,2
+ 5 cm met $\rho = 1250 \text{ kg/m}^3$	5,3	11,7	16:15	-1,4	2:20	40,7
+ 5 cm met $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$	5,4	12,3	16:10	-1,8	2:15	35,8

Grafiek 5.13: Invloed van de densiteit bij toepassing langs binnen



Voor de koepelwoning fungeert de huidige betonnen schaal als een wand met een grote capaciteit. De isolatie zal dus aan de buitenzijde van de koepel moeten worden aangebracht.

5.3.1.2 Soortelijke warmte c

De soortelijke warmte bepaalt samen met de densiteit de opslagcapaciteit van de constructiedelen aan de binnenzijde van de isolatie. Om de invloed van de soortelijke warmte te beoordelen zijn verschillende lagen met dezelfde thermische eigenschappen, maar met een verschillende soortelijke warmte ingegeven in Capsol.

Deze lagen zijn toegevoegd langs de binnen- en buitenzijde van de betonnen gevel. De lagen met de grootste soortelijke warmte bevinden zich best aan de binnenzijde van de isolatie zodat zij overdag warmte uit de binnenomgeving kunnen opslaan en deze 's nachts weer afgeven. Maar verder zullen isolatiematerialen aan de buitenzijde worden toegepast met een hogere soortelijke warmte dan gewapend beton. Om de invloed van de positie van de materialen met de grootste soortelijke warmte te becijferen zijn deze dus langs binnen en langs buiten berekend.

In tabel 5.8 zijn de eigenschappen voor de materiaallagen weergegeven.

Tabel 5.8: Thermische eigenschappen toegepaste materiaallagen

d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	θ_L [-]	$a_{s,e}$ [-]
0,05	2,2	0,023	2500	x	0,88	0,65

Uit de tabellen 5.9 en 5.10 en grafieken 5.14 en 5.15 volgt dat hoe kleiner de soortelijke warmte, hoe hoger de maximale en hoe lager de minimale waarde voor de binnenluchttemperatuur. Ook de demping en de tijdvertraging worden kleiner. Dit betekent dat er meer warmte wordt opgeslagen in materialen met een hoge soortelijke warmte. Dit verloop doet zich eveneens voor als de materialen aan de binnenzijde en aan de buitenzijde van de gewapende betonnen wand worden toegevoegd.

Als het materiaal met een hogere soortelijke warmte langs de binnenzijde van de constructie wordt geplaatst zal de minimale binnenluchttemperatuur hoger zijn dan in het geval de laag aan de buitenzijde is aangebracht. Dit geldt voor materialen met dezelfde thermische eigenschappen. Als de laag zich aan de binnenzijde bevindt wordt de warmte dichter bij de binnenomgeving opgeslagen en zal dus meer aan het binnenklimaat worden afgegeven dan aan het buitenklimaat. Hoe groter de soortelijke warmte, hoe sterker het verschil tussen toepassing van de lagen aan de verschillende zijden van de constructie.

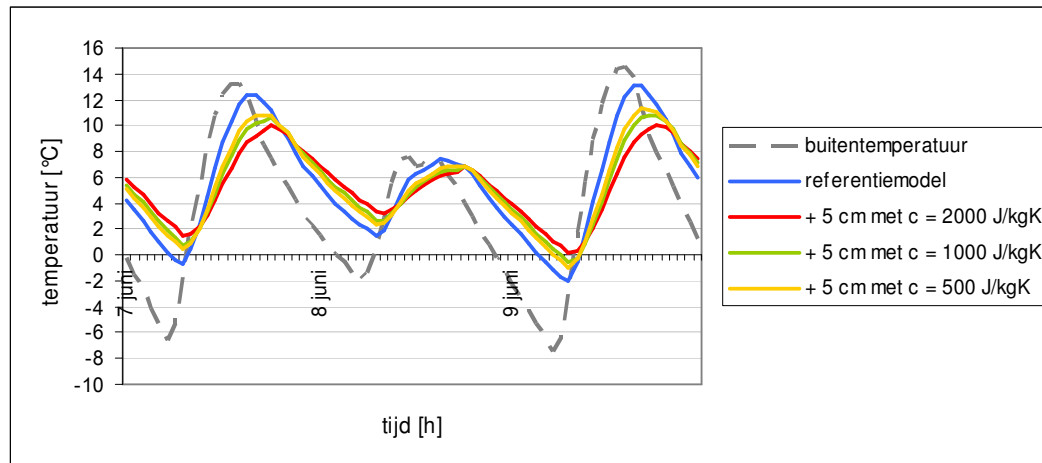
Tabel 5.9: Gegevens binnenklimaat bij toepassen materiaallaag aan buitenzijde op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	t ($\theta_{i,max}$) [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
+ 5 cm met c = 2000 J/kgK	5,0	10,2	18:05	0	4:10	51,9
+ 5 cm met c = 1000 J/kgK	5,2	11	18:00	-0,7	4:05	45,8
+ 5 cm met c = 500 J/kgK	5,3	11,3	17:55	-1,1	4:00	43,9

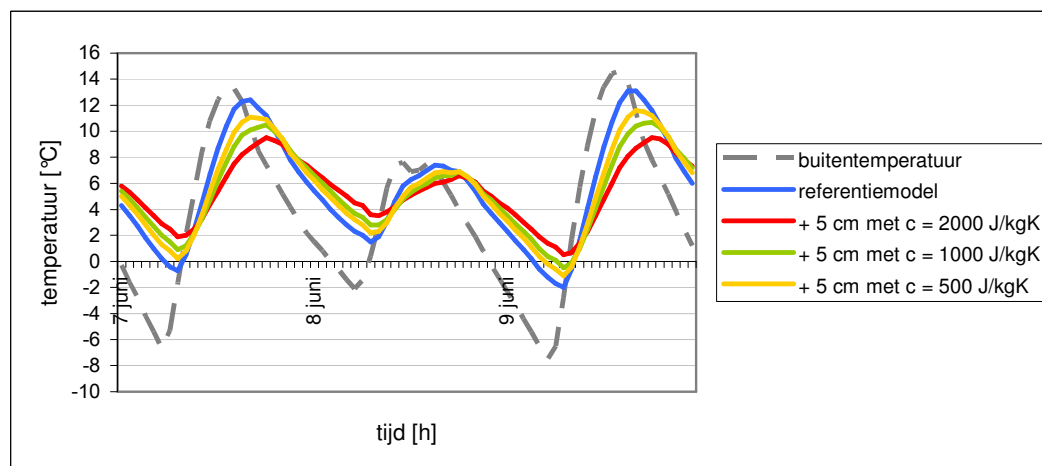
Tabel 5.10: Gegevens binnenklimaat bij toepassen materiaallaag aan binnenzijde op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
+ 5 cm met $c = 2000$ J/kgK	4,9	9,5	18:00	0,4	4:05	57,8
+ 5 cm met $c = 1000$ J/kgK	5,2	10,9	18:00	-0,6	4:05	46,6
+ 5 cm met $c = 500$ J/kgK	5,3	11,6	17:50	-1,3	3:55	41,4

Grafiek 5.14: Invloed van de soortelijke warmte bij toepassing langs buiten



Grafiek 5.15: Invloed van de soortelijke warmte bij toepassing langs binnen



De laag met de hoogste soortelijke warmte gedraagt zich energetisch dus het best aan de binnenzijde van de constructie. De toegevoegde laag aan de buitenzijde van de betonnen koepel zal dus best een lagere of gelijke soortelijke warmte bezitten dan het gewapende beton.

5.3.1.3 Samenwerking tussen de lagen

De wanden die het best de warmte kunnen opslaan, dus met de grootste soortelijke volumieke warmtecapaciteit ρc , bevinden zich dus het best aan de binnenzijde van de constructie. Zodat zij 's nachts makkelijker hun opgeslagen warmte kunnen afgeven aan de koudere binnenomgeving.

5.3.2 Beperken van de verliezen

5.3.2.1 Transmissie

De warmteverliezen per eenheid van gebouwd volume kunnen uitgedrukt worden volgens de formule:

$$q = \frac{\bar{U}}{C} \quad [W/m^3K]$$

De transmissieverliezen worden dus bepaald door de gebouwgemiddelde U-waarde en de compactheid van het gebouw.

A. Compactheid

Hoe compacter het gebouw, hoe kleiner het verliesoppervlak, dus hoe kleiner de transmissieverliezen zullen zijn.

De koepelvorm heeft het kleinste verliesoppervlak voor eenzelfde nuttige vloeroppervlakte dan andere vormen. Het volume en het verliesoppervlak van de woning liggen vast. De compactheid zal enkel kunnen veranderd worden door de vorm van de koepel te wijzigen, als deze structureel beter is dan de halve bol.

B. Gebouwgemiddelde U-waarde

De U-waarde van het gebouw zal verbeteren als er minder warmtegeleidende materialen worden toegepast als scheidend constructiedelen. Dus door toepassing van thermische isolatie. Aangezien isolatie duur is als toepassing in ontwikkelingslanden zullen goedkope materialen onderzocht worden die leiden tot een behaaglijker binnenklimaat.

De gebouwgemiddelde U-waarde van het referentiemodel bedraagt: 3,65 W/m²K.

B.1 Eigenschappen van isolatiematerialen

Om de invloed van de isolatie na te gaan zijn de binnenluchttemperatuur en de andere parameters berekend voor een betonnen koepelwoning met 5 cm polyurethaan en respectievelijk 5 cm adobe toegevoegd aan de buitenzijde.

Adobe is een mengsel van zand, klei, leem en stro. De ideale samenstelling voor een niet-gestabiliseerde adobe bestaat ongeveer uit 55 tot 75% zand, 10 tot 28% leem en 15 tot 18% klei. De dichtheid van adobe met een stabilisatie met 10% vlasleem bedraagt 980 kg/m^3 . [22]

De soortelijke warmte bedraagt $0,2 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$, dit komt overeen met ongeveer 840 J/kgK . [23] De warmteweerstand van een adobesteen met een dikte van 10 inch bedraagt $3,80 \text{ ft}^2\text{h}^\circ\text{F/BTU}$. De warmte-geleidingscoëfficiënt λ bedraagt dus ongeveer $0,379 \text{ W/mK}$. [23]

De thermische eigenschappen van de gebruikte adobe en de polyurethaanisolatie zijn weergegeven in de tabel 5.11 en 5.12.

Tabel 5.11: Thermische eigenschappen adobe

d [m]	λ [W/mK]	R [$\text{m}^2\text{K/W}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK]	ϵ_L [-]	$a_{s,e}$ [-]
0,05	0,379	0,132	980	840	0,88	0,65

Waarbij $\bar{U} = 2,94 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tabel 5.12: Thermische eigenschappen PUR

d [m]	λ [W/mK]	R [$\text{m}^2\text{K/W}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK]	ϵ_L [-]	$a_{s,e}$ [-]
0,05	0,028	1,786	25	1470	0,88	0,65

Waarbij $\bar{U} = 0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$

Uit de tabel 5.13 en grafiek 5.16 volgt dat de demping bij PUR veel hoger is dan bij adobe. Als er PUR wordt gebruikt is de binnenluchttemperatuur quasi constant. De maximale binnenluchttemperatuur ligt hoger bij adobe en de minimale lager. Voor 9 juni is er een groter verschil tussen de minimale waarden doordat de adobe minder is opgewarmd door de lagere zonnestraling op 8 juni. De tijdvertraging van de beide materialen is gelijk, dus de maximale waarde van de binnenluchttemperatuur wordt in de binnenruimtes op hetzelfde ogenblik bereikt.

De soortelijke volumieke warmtecapaciteit van adobe is veel groter dan deze van PUR, met een verhouding van 22,4. Maar de warmte-geleidingscoëfficiënt van adobe is hoger dan deze van PUR, met een verhouding van 13,5.

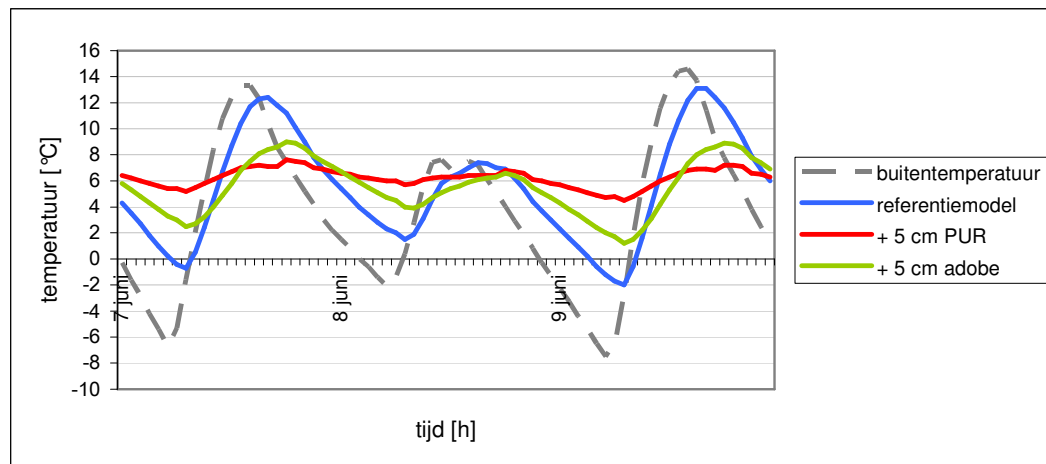
Er wordt meer warmte opgeslagen in de adobelaag, maar de warmte wordt sneller afgegeven dan deze opgeslagen in de PUR-laag bij daling van de buitenluchttemperatuur.

Voor een constant binnenklimaat moet de warmteweerstand van de materiaallaag aan de buitenzijde dus zo groot mogelijk zijn. Dit kan door het toevoegen van een laag met een lage warmte-geleidingscoëfficiënt of door de dikte van de laag te vergroten.

Tabel 5.13: Gegevens binnenklimaat bij toepassen van 5 cm PUR en adobe op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
+ 5 cm adobe	5,1	8,9	17:55	1,1	4:00	64,6
+ 5 cm PUR	5,7	7	18:00	4,2	4:00	87,9

Grafiek 5.16: Invloed van de isolatie op de binnenluchttemperatuur



De warmtegeleiding van de gebouwschil wordt bepaald door de U-waarde volgens de formule:

$$U = \left(\frac{1}{8} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{23} \right) \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Deze is afhankelijk van de warmte-geleidingscoëfficiënt en de dikte van de laag.

Doordat de λ -waarde van PUR en adobe sterk verschillen zal een adobelaag met een dikte van 75 cm moeten toegepast worden op de betonnen koepel om eenzelfde U-waarde te bekomen als bij een toepassing van 5 cm PUR op de koepel.

De invloed van de dikte en de warmte-geleidingscoëfficiënt zal verder onderzocht worden om zo de ideale waarden te bepalen die voor het behaaglijkste binnenklimaat zorgen.

B.2 Warmte-geleidingscoëfficiënt λ

Voor de impact van de λ -waarde van de buitenlaag op het binnenklimaat te beoordelen zijn enkele materiaallagen op het beton geplaatst met verschillende λ -waarde. De verhouding tussen beide waarden bedraagt 2. De andere eigenschappen van de materiaallagen zijn gelijk.

Tabel 5.14 Thermische eigenschappen toegepaste materiaallagen

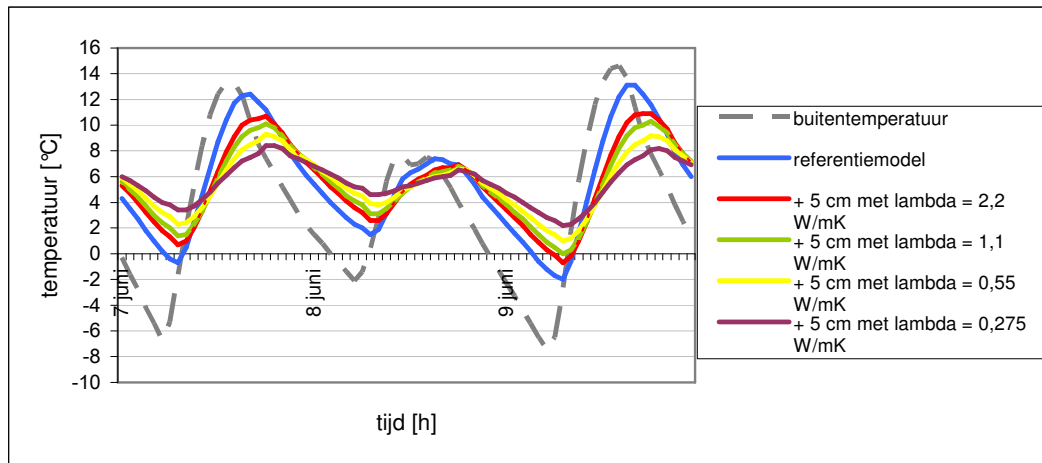
d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	e_L [-]	$a_{s,e}$ [-]
0,05	x	0,023	2500	840	0,88	0,65

Uit tabel 5.15 en grafiek 5.17 volgt dat de als de λ -waarde kleiner wordt, de maximale waarde van de binnenluchttemperatuur kleiner en de minimale waarde groter wordt. De demping stijgt ook evenredig met een kleinere λ -waarde. Deze materialen geleiden minder goed de warmte en zorgen dus voor een grotere demping van de fluctuaties van de buitenluchttemperatuur.

Pas vanaf een λ -waarde lager dan 0,55 W/mK stijgen de minimale binnenluchttemperatuur en de tijdvertraging sterk. De gemiddelde binnenluchttemperatuur is voor de verschillende warmte-geleidingscoëfficiënten en ongeveer gelijk.

Tabel 5.15: Gegevens binnenklimaat bij toepassen van verschillende λ -waarden

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	t ($\theta_{i,max}$) [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
+ 5 cm met $\lambda = 2,2$ W/mK	5,2	11,1	17:55	-0,8	4:00	45,2
+ 5 cm met $\lambda = 1,1$ W/mK	5,1	10,3	17:55	-0,1	4:00	51,8
+ 5 cm met $\lambda = 0,55$ W/mK	5,0	9,2	18:00	0,9	4:05	61,2
+ 5 cm met $\lambda = 0,275$ W/mK	5,0	8,1	18:55	2,1	5:00	71,6

Grafiek 5.17: Invloed van de λ -waarde op de binnenluchttemperatuur

B.3 Grondmaterialen als isolatie

Om een goedkope oplossing voor de isolatie te verkrijgen is er gebruik gemaakt van een laag grondmateriaal. De grondmaterialen hebben verschillende thermische eigenschappen. [24]

De emissie- en absorptiefactor zijn gelijk genomen voor alle grondmaterialen. Voor zandgrond zijn de eigenschappen overgenomen van zand, maar hier dient wel nog toevoeging van andere materialen bij te gebeuren opdat het zand zou blijven liggen op de betonnen ondergrond.

Als isolatie kan nog ander materiaal aangewend worden. Zo kan de betonnen koepel bedekt worden met een laagje isolerende beton gemengd met puimsteen, perliet, vermiculiet, styrofoam korrels, rijstpellen, zaagsel,...

Als organische vulsels gebruikt worden zullen die wel sneller opnieuw gecoat moeten worden.

Hier is gekozen voor grondmaterialen, de eigenschappen zijn weergegeven in tabel 5.16.

Tabel 5.16: Thermische eigenschappen van de toegepaste grondmaterialen

grondmateriaal	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	a [m ² /s] x 10 ⁻⁶
adobe	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
leem	5,2	11,1	17:55	-0,8	4:00	45,2
klei	5,1	10,3	17:55	-0,1	4:00	51,8
zand	5,0	9,2	18:00	0,9	4:05	61,2
beton	5,0	8,1	18:55	2,1	5:00	71,6

Uit tabel 5.17 en grafiek 5.18 is af te leiden dat adobe het best presteert als isolatie. Dit komt door de lage warmte-geleidingscoëfficiënt in vergelijking tot de andere materialen. De soortelijke volumieke warmtecapaciteit is echter veel lager. De snelheid waarmee de warmte doorheen een constructiedeel stroomt wordt bepaald door de temperatuurvereffingscoëfficiënt a .

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [\text{m}^2\text{s}]$$

Bij adobe is de temperatuurvereffingscoëfficiënt het kleinst, dus zal warmte minder snel doorheen de gebouwschil stromen zowel van binnen naar buiten als in de andere richting. Hierdoor is de maximale binnenluchttemperatuur het kleinst en de minimale binnenluchttemperatuur het grootst bij adobe.

Voor leem en klei is het verloop van de binnenluchttemperatuur gelijk. Dit komt doordat de temperatuurvereffingscoëfficiënt gelijk is voor de beide materialen.

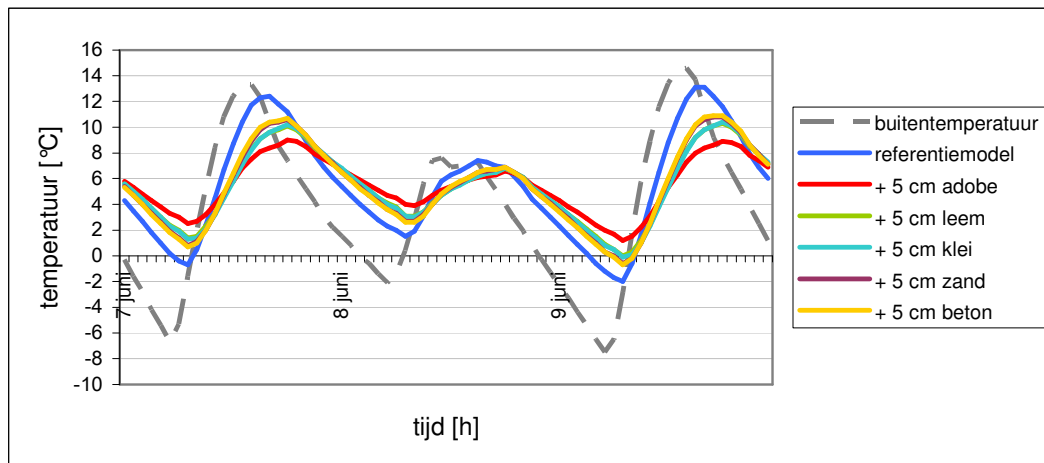
Voor klei, leem en zand is de soortelijke warmte veel groter dan voor beton en adobe. Dit komt omdat er bij de eerste grondmaterialen rekening gehouden is met een bepaalde hoeveelheid water die in het materiaal aanwezig is. Water heeft een hoge soortelijke warmte van 4186 J/kgK.

De tijdvertraging is ongeveer gelijk voor de verschillende materialen.

Tabel 5.17: Gegevens binnenklimaat bij toepassen van verschillende grondmaterialen op 9 juni

	$\theta_{i,\text{gem}}$ [°C]	$\theta_{i,\text{max}}$ [°C]	$t(\theta_{i,\text{max}})$ [h]	$\theta_{i,\text{min}}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
+ 5 cm adobe	5,1	8,9	17:55	1,1	4:00	64,6
+ 5 cm leem	5,1	10,3	17:55	-0,1	4:00	51,7
+ 5 cm klei	5,1	10,5	18:00	-0,2	4:05	49,8
+ 5 cm zand	5,2	11	17:55	-0,7	4:00	45,9
+ 5 cm beton	5,2	11,1	17:55	-0,8	4:00	45,2

Grafiek 5.18: Invloed van de toegepaste grondmaterialen op de binnenluchttemperatuur



Doordat adobe de hoogste minimale binnenluchttemperaturen geeft zal er verder gerekend worden met dit grondmateriaal. De thermische eigenschappen van adobe kunnen sterk verschillen afhankelijk van de percentages klei, leem, zand en stro die zijn toegevoegd. Hoe groter de hoeveelheid stro, hoe kleiner de densiteit. Dus hoe beter het materiaal zal isoleren, maar hoe lager de warmtecapaciteit. Adobes gestabiliseerd met enkel vlasleem en in combinatie met andere stoffen (kalk, TMP, houtslip en melkwei) blijken het best thermisch isolerend te zijn. [22]

B. 4 Dikte d

Hoe dikker de isolatielaag, hoe groter de warmteweerstand zal zijn. Doorheen de wanden zal er warmtestroom door geleiding plaatsvinden als de buitenomgeving een hogere temperatuur bezit dan de binnenomgeving. Als de dikte van de laag tussen het binnen- en het buitenklimaat echter te groot wordt, zal de warmte de andere zijde van de constructie niet bereiken op het moment dat er warmte nodig is. Daarom moet er een optimale dikte gezocht worden voor de adobelaag op de betonnen koepel.

Uit tabel 5.18 en grafieken 5.19 en 5.20 volgt dat bij een verdubbeling in dikte van adobe de minimale binnenluchttemperatuur stijgt met ongeveer 1,5°C. Tot 20 cm adobe blijft de gemiddelde waarde van de binnenluchttemperatuur ongeveer gelijk. Bij een dikte van 30 cm stijgt deze waarde sterker. Bij deze isolatielaag is de demping het grootst, dus is het binnenklimaat het meest stabiel.

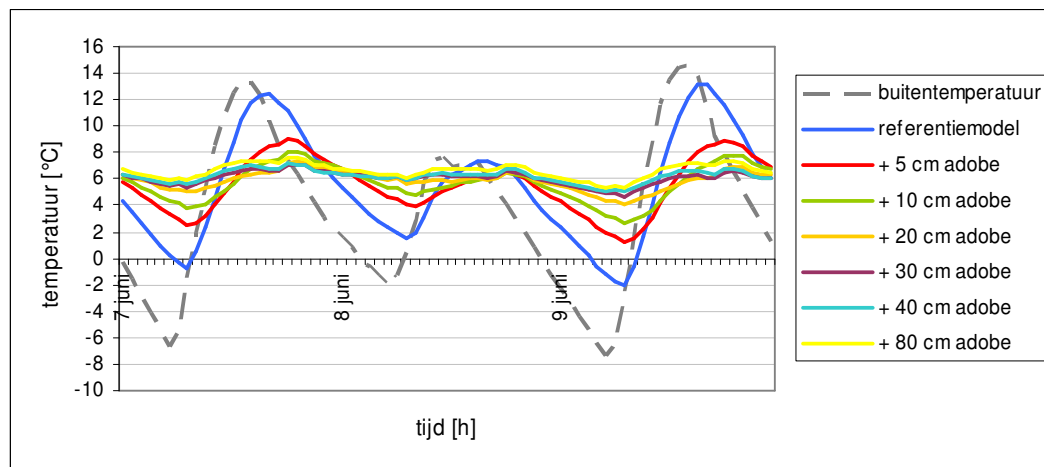
Bij een dikte groter dan 30 cm daalt de binnenluchttemperatuur. Een dikte van 30 cm levert dus de interessantste waarden op voor het binnenklimaat.

Dezelfde opmerkingen kunnen gemaakt worden in de zomerperiode.

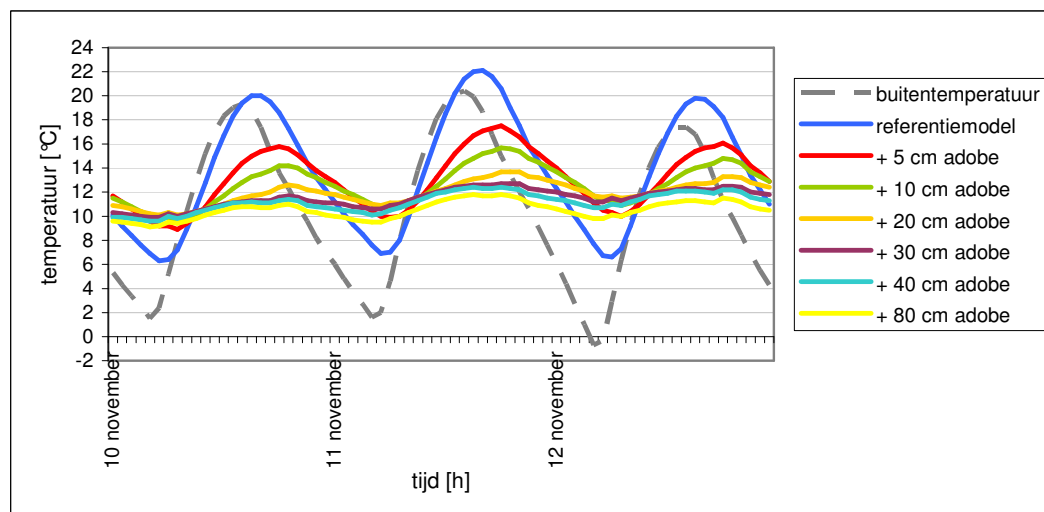
Tabel 5.18: Gegevens binnenklimaat bij toepassen van verschillende diktes adobe op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	θ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
+ 5 cm adobe	5,1	8,9	17:55	1,1	4:00	64,6
+ 10 cm adobe	5,1	7,7	18:55	2,6	5:00	76,0
+ 20 cm adobe	5,3	6,8	20:25	3,9	6:30	86,1
+ 30 cm adobe	6,0	6,7	20:05	5,4	6:10	93,5
+ 40 cm adobe	5,7	6,5	18:50	4,7	4:55	92,7
+ 80 cm adobe	6,1	7	18:50	4,9	4:55	91,5

Grafiek 5.19: Invloed van de dikte van een adobelaag op de binnenluchttemperatuur



Grafiek 5.20: Invloed van de dikte van een adobelaag op de binnenluchttemperatuur zomerperiode



Er is verder gewerkt met een toepassing van een adobelaag van 30 cm bovenop de betonnen schaal van 10 cm.

B. 5 Combinatie adobe en beton

Om de samenwerking tussen de betonnen schaal en adobe na te gaan is een vergelijking gemaakt van een koepel enkel bestaande uit beton, één enkel uit adobe en één uit een combinatie van de twee materialen.

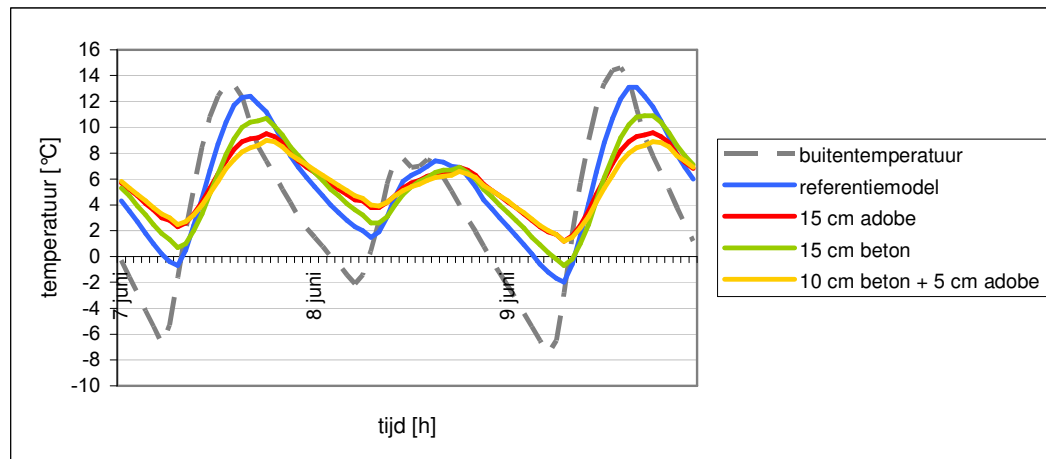
Uit tabel 5.19 en grafiek 5.21 volgt dat 15 cm adobe een stabielere binnenklimaat geeft, dus een lager minimale en een hogere maximale binnenluchttemperatuur, dan 15 cm beton.

Bij een combinatie van beton en adobe is de minimale binnenluchttemperatuur hoger en de maximale waarde lager dan bij een koepel enkel bestaande uit adobe. Op 9 juni is dit verschil zeer klein doordat de zon weinig warmte heeft afgegeven op 8 juni, maar de trend zet zich verder gedurende het hele jaar.

Tabel 5.19: Gegevens binnenklimaat bij verschillende combinaties beton en adobe op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
15 cm adobe	5,4	9,6	18:00	1	4:05	60,4
15 cm beton	5,2	11,1	17:55	-0,8	4:00	45,1
10 cm beton + 5 cm adobe	5,1	8,9	17:55	1,1	4:00	64,6

Grafiek 5.21: Invloed van de combinatie adobe en beton op de binnenluchttemperatuur



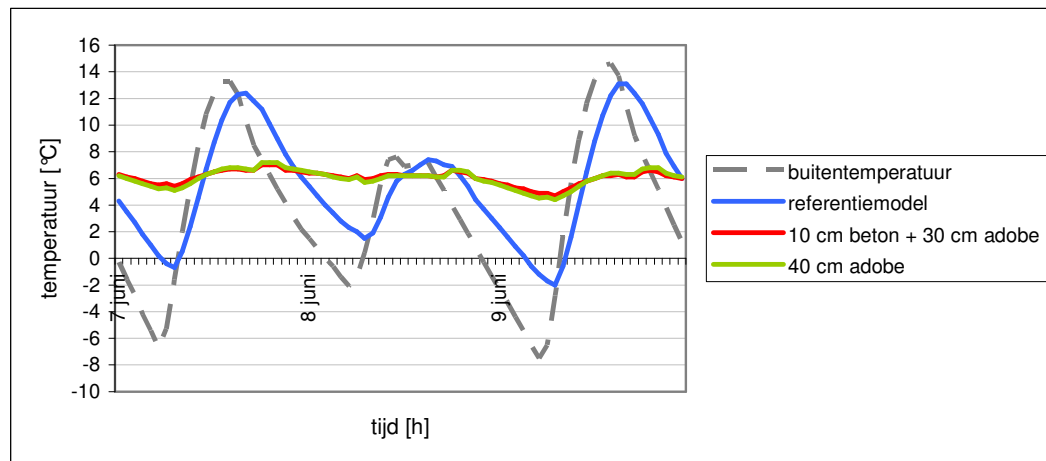
Bij een combinatie van 30 cm adobe en 10 cm beton verloopt de binnenluchttemperatuur quasi gelijk als bij een koepel bestaande uit 40 cm adobe. Dit verloop is weergegeven in grafiek 5.22.

Uit de tabel 5.20 volgt dat de minimale waarde van de luchttemperatuur en de demping iets hoger zijn bij een adobelaag van 30 cm op de betonnen schaal.

Tabel 5.20: Gegevens binnenklimaat bij verschillende combinaties beton en adobe op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
40 cm adobe	5,5	6,6	19:00	4,1	7:05	89,4
10 cm beton + 30 cm adobe	5,5	6,4	19:00	4,4	7:05	91,8

Grafiek 5.22: Invloed van de combinatie adobe en beton op de binnenluchttemperatuur



Bouwfysisch zijn de beide materiaaltoepassingen aan elkaar gelijk. Maar voor de verbetering is er voorlopig verder gerekend met 30 cm adobe op de betonnen koepel.

B.6 Vloerisolatie

Naast het isoleren van de gevel kan ook vloerisolatie zorgen voor minder warmteverliezen naar de grond.

De opbouw van de geïsoleerde vloer is weergegeven in tabel 5.21. Als isolatie is er 4 cm geëxtrudeerd polystyreen gebruikt.

Tabel 5.21: Opbouw geïsoleerde vloer

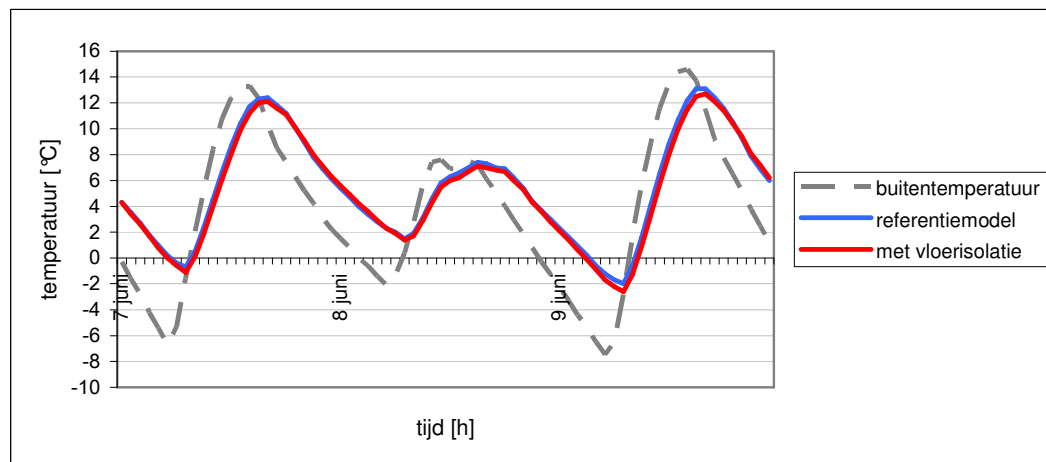
materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
grond	3	1,13	2,655	2200	909
beton	0,1	2,2	0,045	2500	1000
isolatie	0,04	0,035	1,143	25	1470
uitvullaag	0,06	1,3	0,046	2200	850

Waarbij $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$

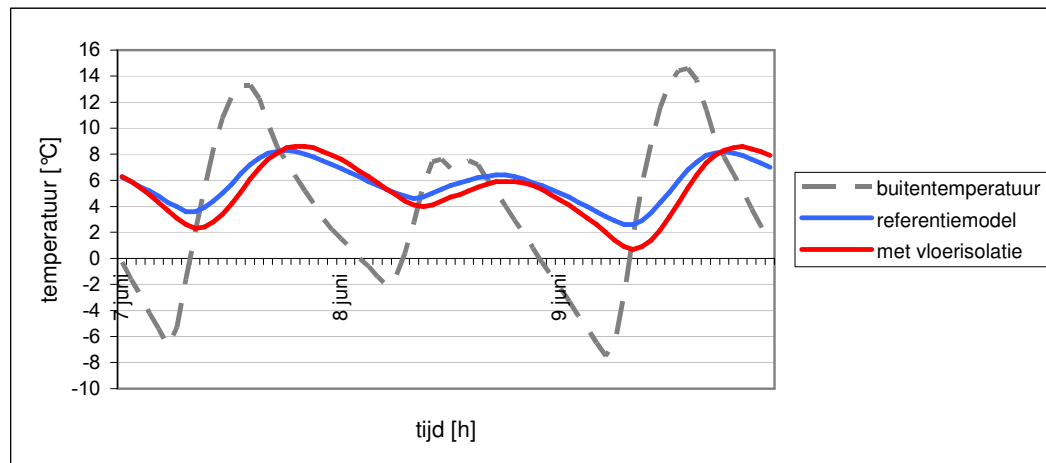
Uit grafiek 5.23 volgt dat de binnenluchttemperaturen van een woning met en één zonder vloerisolatie ongeveer gelijk zijn. Dit komt doordat de grondtemperatuur relatief hoog is ten opzichte van de buitenluchttemperatuur 's nachts. Voor de grondtemperatuur is namelijk de gemiddelde jaarlijkse buitenluchttemperatuur genomen, deze bedraagt $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Deze grondwarmte draagt bij tot een hogere binnenluchttemperatuur als er geen isolatie is, de warmte kan dan gemakkelijker de binnenruimte bereiken.

Uit grafiek 5.24 is af te leiden dat er grotere fluctuaties optreden bij een geïsoleerde vloer. Dit komt doordat de invallende zonnestraling en warmte sneller terug worden afgegeven aan de binnenomgeving, door de lagere warmtecapaciteit van de geïsoleerde vloer.

Grafiek 5.23: Invloed vloerisolatie op de binnenluchttemperatuur



Grafiek 5.24: Invloed vloerisolatie op de vloerooppervlaktetemperatuur



Omdat de vloerisolatie een onstabielere vloerooppervlaktetemperatuur veroorzaakt is vloerisolatie geen optie voor de verbetering van de koepelwoning.

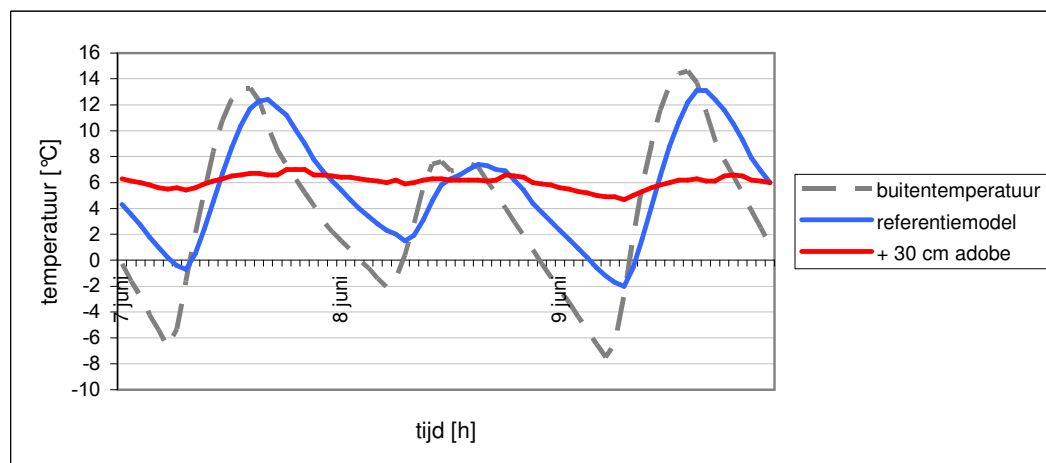
C. Gekozen isolatielaag

Voor de isolatie is een adobelaag genomen van 30 cm bovenop de betonnen schaal van 10 cm. De gegevens van het binnenklimaat in deze koepelwoning zijn weergegeven in tabel 5.22. Het binnenklimaat zal verder verbeterd worden door de inzet van passieve maatregelen.

Tabel 5.22: Gegevens binnenklimaat gekozen isolatielaag op 9 juni

$\theta_{i, \text{gem}}$ [°C]	$\theta_{i, \text{max}}$ [°C]	$t(\theta_{i, \text{max}})$ [h]	$\theta_{i, \text{min}}$ [°C]	τ [h]	D [%]
6,0	6,7	20:05	5,4	6:10	93,5

Grafiek 5.25: Binnenluchttemperatuur van de koepelwoning met gekozen isolatielaag



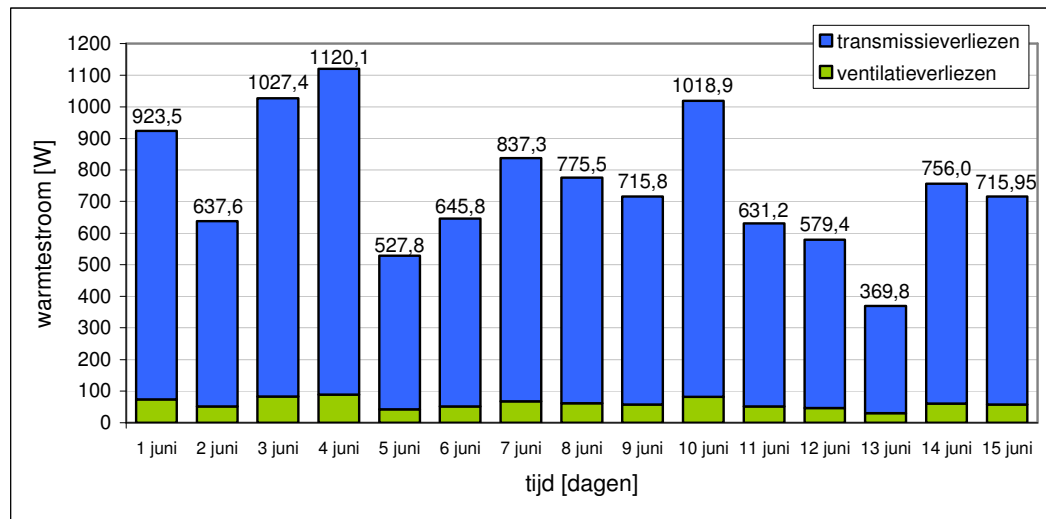
5.3.2.2 Ventilatie

Als de transmissieverliezen kleiner worden zullen de ventilatieverliezen een belangrijkere invloed uitoefenen op de totale warmteverliezen.

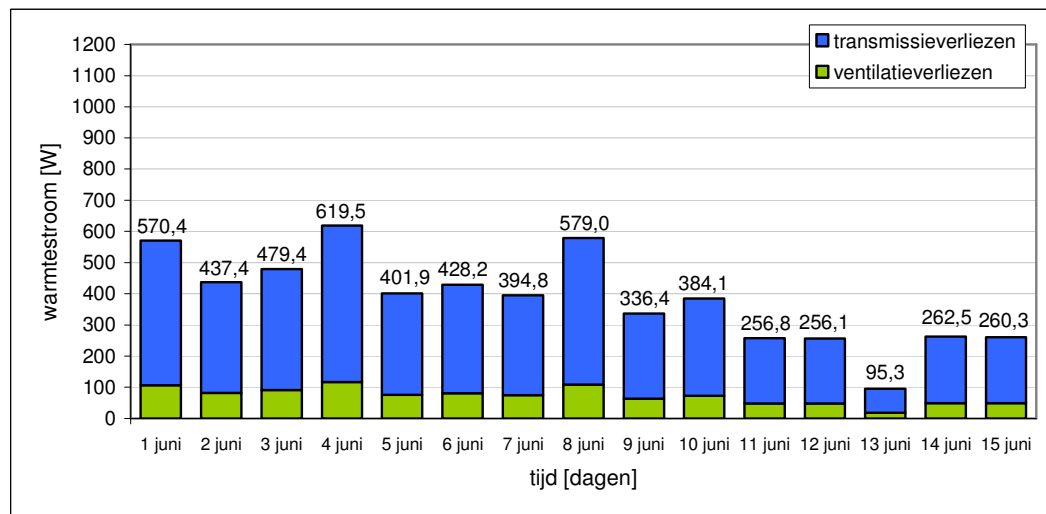
Om de invloed van de adobelaag op de verliezen te vergelijken zijn in grafiek 5.26 en 5.27 de totale verliezen zonder adobe weergegeven en deze met toepassing van 30 cm adobe op de betonnen koepel.

Door de isolerende adobe zijn de transmissieverliezen sterk gedaald. De ventilatieverliezen zijn echter gestegen doordat de binnenluchttemperatuur hoger is.

Grafiek 5.26 Totale theoretische warmteverliezen zonder adobe



Grafiek 5.27 Totale theoretische warmteverliezen met 30 cm adobe



5.3.3 Benutten van de winsten door passieve zonne-energie

Voor het invangen, opslaan en verdelen van de zonnewarmte zijn de twee belangrijkste systemen: de directe en de indirecte. Enkel het directe systeem wordt hier gebruikt.

Bij het direct systeem valt het zonlicht rechtstreeks in in de te verwarmen ruimte, deze treedt dus op als een warmtecollector. Dit wordt bereikt door raamoppervlaktes te richten op de oriëntatie van de zon. De invallende zonnestraling op de wanden en de vloeren wordt geabsorbeerd en opgeslagen. Bij het dalen van de binnenluchttemperatuur wordt

de opgeslagen warmte door straling en convectie weer aan de ruimte afgegeven.

De hoeveelheid opgeslagen warmte is afhankelijk van de kleur. Een lichtere kleur heeft een grotere reflectiefactor, waardoor het zonlicht wordt gereflecteerd. Een donkere kleur absorbeert de straling en straalt deze later terug uit.

Het nadeel van het toepassen van een groot raamoppervlak is dat er 's nachts veel verlies van de warmte kan optreden, zeker bij toepassing van enkel glas. Nachtsisolatie kan noodzakelijk zijn voor een goede prestatie van het systeem, dit kan door isolerende luiken. Ook kan verblinding en een gebrek aan privacy optreden door de grote raamoppervlakken.

De inplanting van de woningen volgens de oriëntatie van de zon en de dichtbij gelegen woningen is ook van belang voor de mate waarin de zonnestraling het glasoppervlak zal bereiken. Voor het noordelijk halfrond is de oriëntatie van glasvlakken op het zuiden het gunstigst en voor het zuidelijk halfrond een oriëntatie op het noorden.

Andere bebouwing en groen kunnen de bezonning belemmeren. De mate van belemmering wordt bepaald door de hoogte van de zonnestand en door de afstand en de oriëntatie van de belemmerde factor ten opzichte van de woning. Met behulp van de zonnehoogten kan de belemmeringhoek bepaald worden. Vooral in de winter, als de zon lager staat, is de belemmering van naast gelegen woningen groter. Een goede oriëntatie van bouwblokken ten opzichte van elkaar is dan belangrijk, zodat de woningen niet of zo min mogelijk in elkaars schaduw staan.

Enkele parameters die invloed hebben op de zonnewinsten zijn onderzocht voor de koepelwoning in El Alto. Afhankelijk van de verschillende parameters is dan de beste toepassing gekozen.

Het onderzoek van de parameters is uitgevoerd op de betonnen koepel met een isolatielaag van 30 cm adobe.

5.3.3.1 Luifels

Bij het referentiemodel is de invloed van de luifels op de binnenluchttemperatuur klein, doordat er veel warmtewinsten optreden doorheen de niet-geïsoleerde gewapende betonnen schaal. Bij de toepassing van 30 cm adobe is de koepelwoning geïsoleerd en treden er minder zonnwinsten op doorheen de gebouwschil. De invloed van de luifels op de binnenluchttemperatuur is hier dus veel groter. Dit verschil is af te leiden uit tabel 5.23 en grafiek 5.28. Gedurende het hele jaar doet zich dit verloop voor, doordat de zonnestraling in El Alto in alle seizoenen quasi constant is.

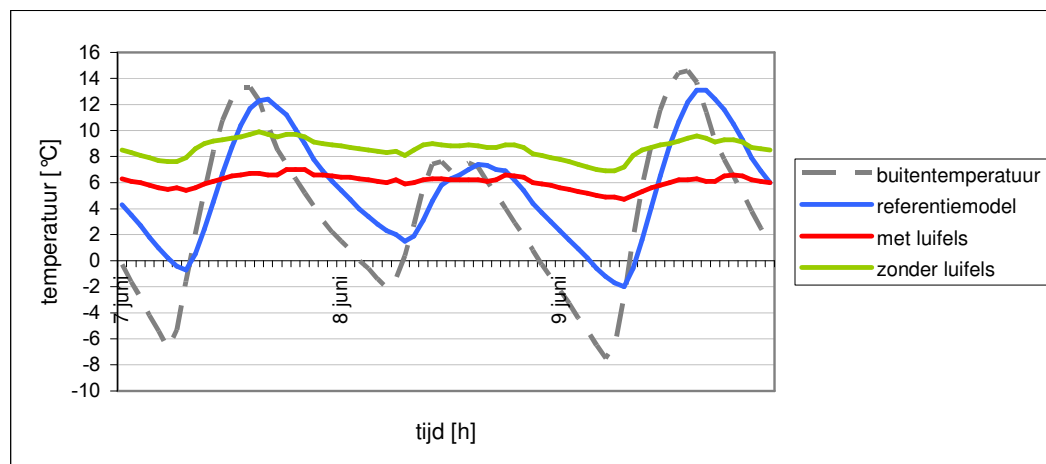
Door de luifels te verwijderen is er een sterke stijging van de binnenluchttemperatuur. Het verloop blijft gelijk, maar is naar boven geschoven met een waarde van ongeveer 2,6 °C. Dit wil dus zeggen dat een teruggetrokken raam van 10 cm ten opzichte van de gevel een temperatuursdaling veroorzaakt van 2,6 °C.

De tijdvertraging is wel sterk afgenomen, maar de demping is ongeveer gelijk.

Tabel 5.23: Gegevens binnenklimaat bij situatie met en zonder luifels op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
met luifels	6,0	6,7	20:05	5,4	6:10	93,5
zonder luifels	8,1	9,3	14:55	6,4	1:00	88,9

Grafiek 5.28: Invloed van de luifels op de binnenluchttemperatuur



Voor de toepassing van de koepelwoning in El Alto is het dus beter om de luifels boven de ramen te minimaliseren. Bij de verdere berekeningen zijn de luifels weggelaten.

5.3.3.2 Invloed ramen

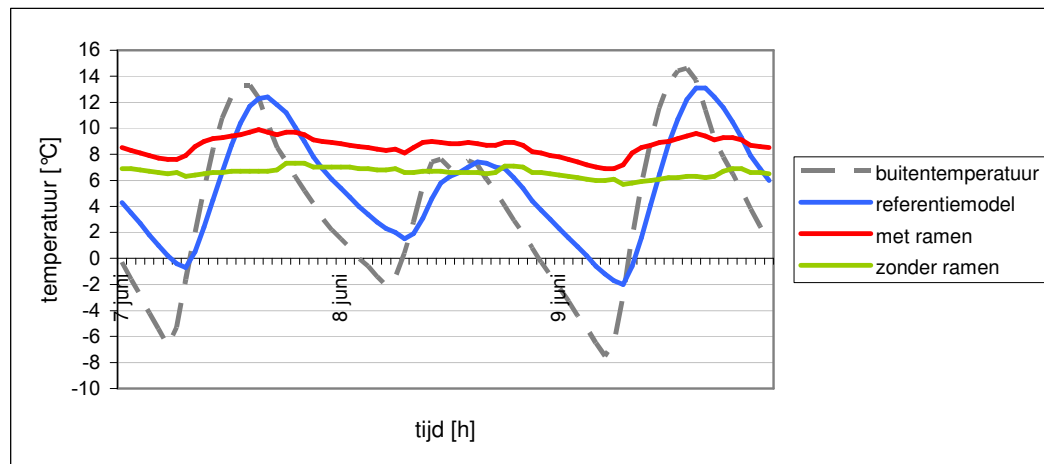
De aanwezigheid van ramen in de gevel is ook sterk bepalend voor het binnenklimaat. De ramen in deze vergelijking zijn even groot en ingeplant volgens het referentiemodel.

Door het glas stijgt de binnenluchttemperatuur sterk. Uit grafiek 5.29 is af te leiden dat de binnenluchttemperatuur 's nachts wel sneller afkoelt dan in een situatie zonder ramen, maar overdag, als de zon begint te schijnen, warmt de binnenruimte sneller op. De demping van de buitenluchttemperatuur is groot, waardoor het binnenklimaat quasi constant is.

Tabel 5.24: Gegevens binnenklimaat bij situatie met en zonder luifels op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
met ramen	8,1	9,3	14:55	6,4	1:00	88,9
zonder ramen	6,0	6,7	20:00	5,4	6:05	93,5

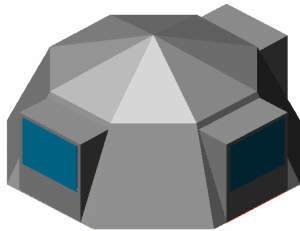
Grafiek 5.29: Invloed van de ramen op de binnenluchttemperatuur



5.3.3.3 Helling

Om de impact van de helling van het glas te onderzoeken zijn de ramen in het referentiemodel onder verschillende hoeken geplaatst. Er is geen rekening gehouden met de vermindering van het volume van de binnenruimte bij een andere helling van het glas. De deur is verwaarloosd en vervangen door een glasoppervlakte even groot als de andere ramen. Hierdoor is er een grotere oppervlakte glas aanwezig dan in het referentiemodel.

De positie van de ramen is weergegeven in figuur 5.1. De helling van het glas bedraagt in de figuur 90°, voor de andere hellingen zijn de ramen schuiner geplaatst. De gekozen hellingen zijn gelijk aan deze van de vlakken van de betonnen koepel ingevoerd in Capsol.



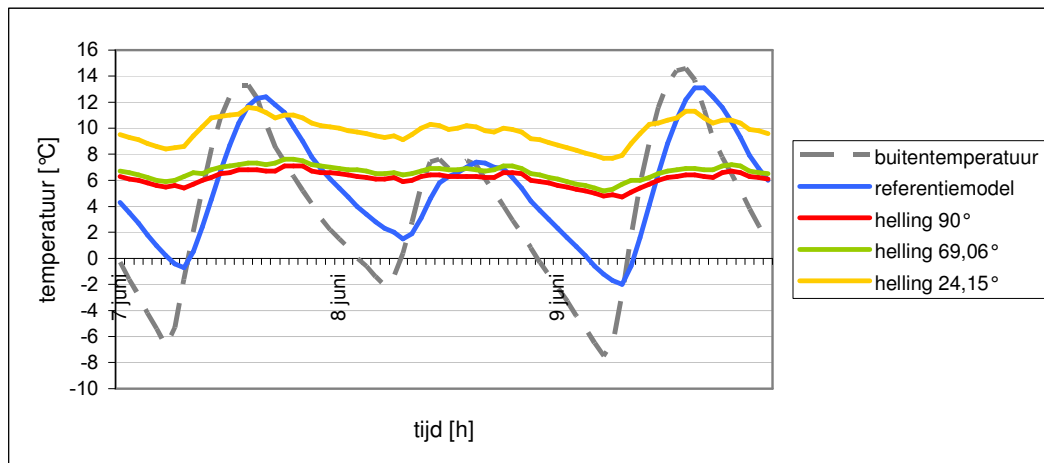
Figuur 5.1: Positie van de ramen

Hoe meer het glas gericht is naar de hemelkoepel, hoe meer zonnestraling er op het vlak zal invallen, waardoor de binnenluchttemperatuur stijgt. De fluctuaties in het binnenklimaat zijn niet te groot, doordat de demping nog steeds een grote waarde bezit. Maar de minimale binnenluchttemperatuur is sterk gestegen bij een helling van 24,15°.

Tabel 5.25: Gegevens binnenklimaat bij verschillende hellingen van het glas op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
helling 90°	5,6	6,5	19:00	4,4	5:05	91,5
helling 69,09°	6,1	7	19:00	4,8	5:05	91,6
helling 24,15°	9,3	11,1	14:50	7,2	0:55	82,9

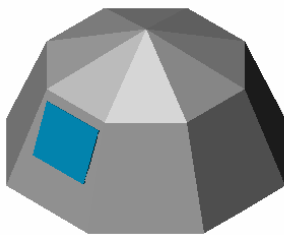
Grafiek 5.30: Invloed van de helling van de ramen op de binnenluchttemperatuur



De ramen worden in de koepelwoning best zo hoog mogelijk geplaatst, zodat er een maximum aan zonnestraling kan opgevangen worden, dus onder een zo klein mogelijke hoek. Bij te hoge buitentemperaturen moet er wel nagegaan worden of er geen gevaar is voor oververhitting.

5.3.3.4 Oriëntatie

Doordat Bolivia gelegen is op het zuidelijk halfrond zal het noorden de meest interessante geveloriëntatie zijn om de beglazing te positioneren. Om de invloed van de oriëntatie na te gaan is er telkens één raam geïnstalleerd volgens de verschillende oriëntaties, onder een hoek van 69,06°. Figuur 5.2 geeft de plaatsing en oppervlakte van het gekozen raam weer.



Figuur 5.2: Plaatsing raam voor nagaan van de invloed van de oriëntatie

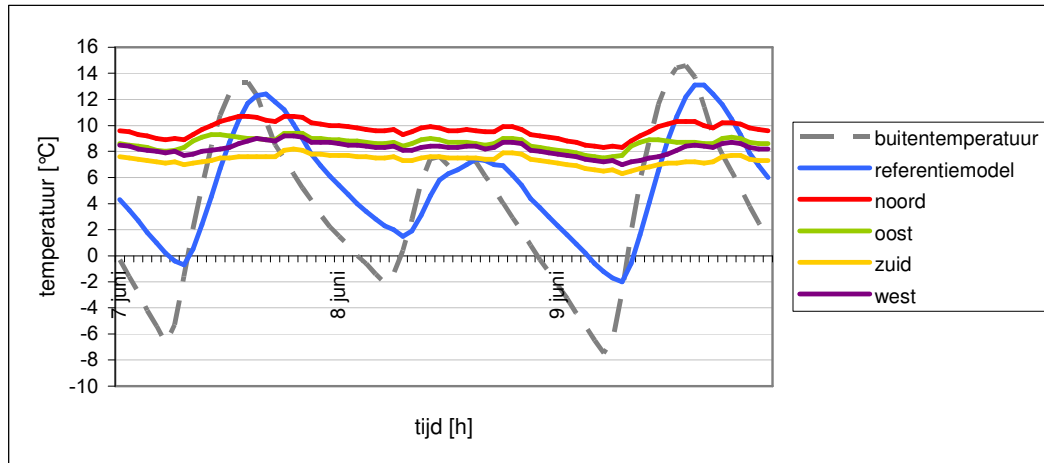
De invloed van de oriëntatie op de binnenluchttemperatuur is niet gelijk gedurende het hele jaar. De binnenluchttemperaturen zijn weergegeven voor de winter- en de zomerperiode, maar ook voor een tussenperiode.

Uit de grafieken 5.31 tot 5.33 is af te leiden dat de oriëntatie op het noorden het meeste zonnewinsten oplevert in de winter en dus zorgt voor een hogere

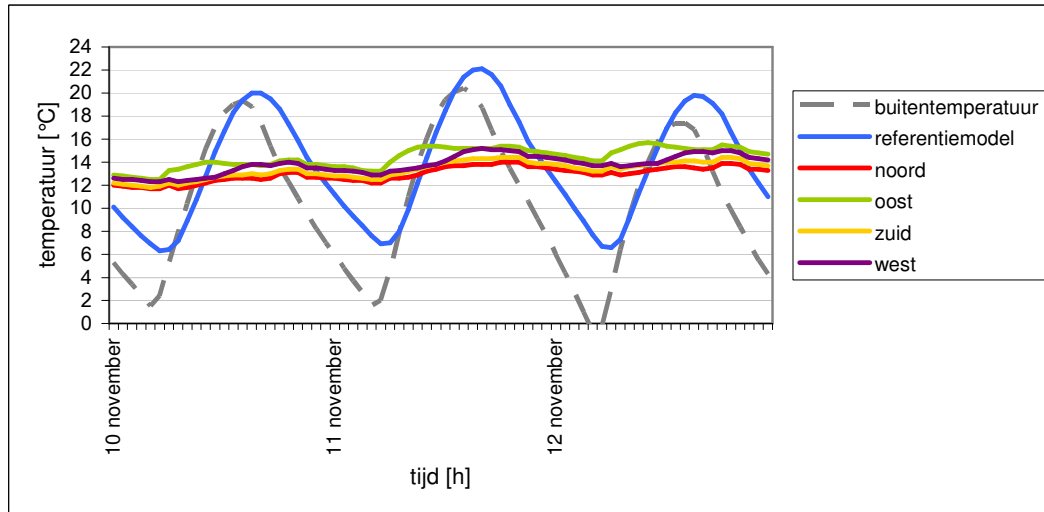
binnenluchttemperatuur. De zon staat in die periode op haar hoogste punt in het noorden. In de zomerperiode leveren de oostelijke en de westelijke oriëntatie de hoogste binnenluchttemperaturen.

In de tussenperiodes zijn zowel het noorden als het oosten gunstige oriëntaties voor het plaatsen van beglazing.

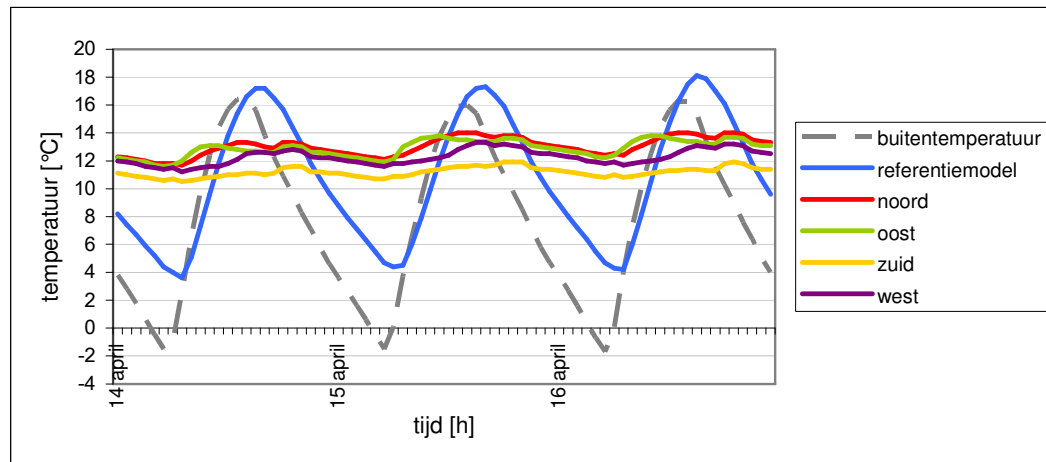
Grafiek 5.31: Invloed van de oriëntatie van de ramen op de binnenluchttemperatuur winterperiode



Grafiek 5.32: Invloed van de oriëntatie van de ramen op de binnenluchttemperatuur zomerperiode

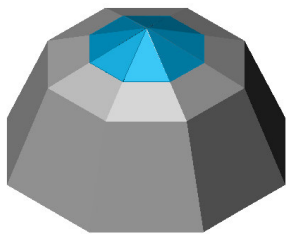


Grafiek 5.33: Invloed van de oriëntatie van de ramen op de binnenluchttemperatuur tussenperiode

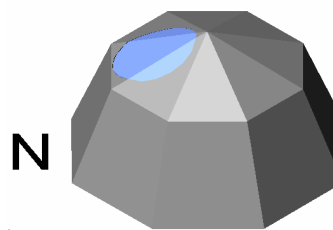


De ramen zullen dus het best gepositioneerd worden in het noorden en het oosten onder een zo klein mogelijke hoek. Het grootste glasoppervlak bevindt zich best in het noorden, doordat deze windrichting de meest gunstige is in de winter als de warmtewinsten het meest nodig zijn.

Een dakkoepel is naar alle windrichtingen gericht. Het zal dus beter zijn om in de winter een dakraam te richten naar het noorden en een deel naar het noordoosten en noordwesten. In figuren 5.3 en 5.4 is weergegeven hoe deze ramen gepositioneerd zijn en ingegeven zijn in Capsol.



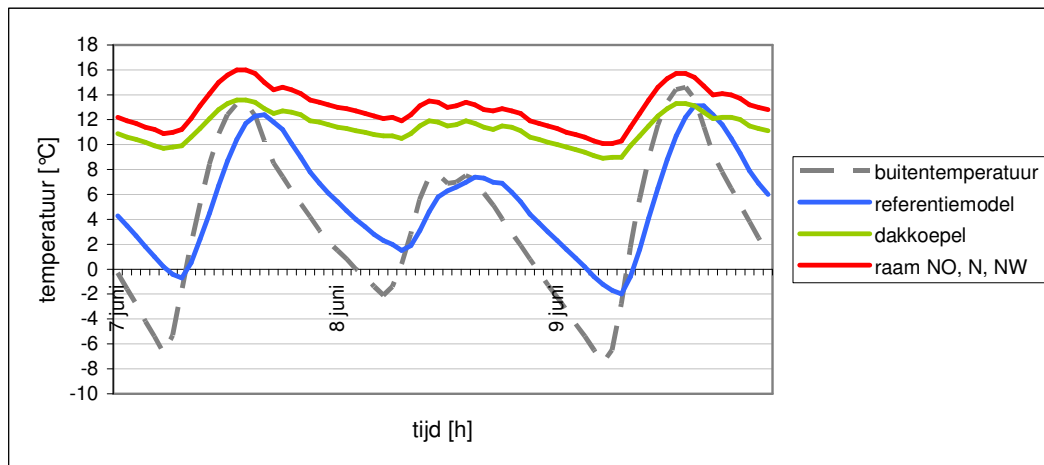
Figuur 5.3: Dakkoepel



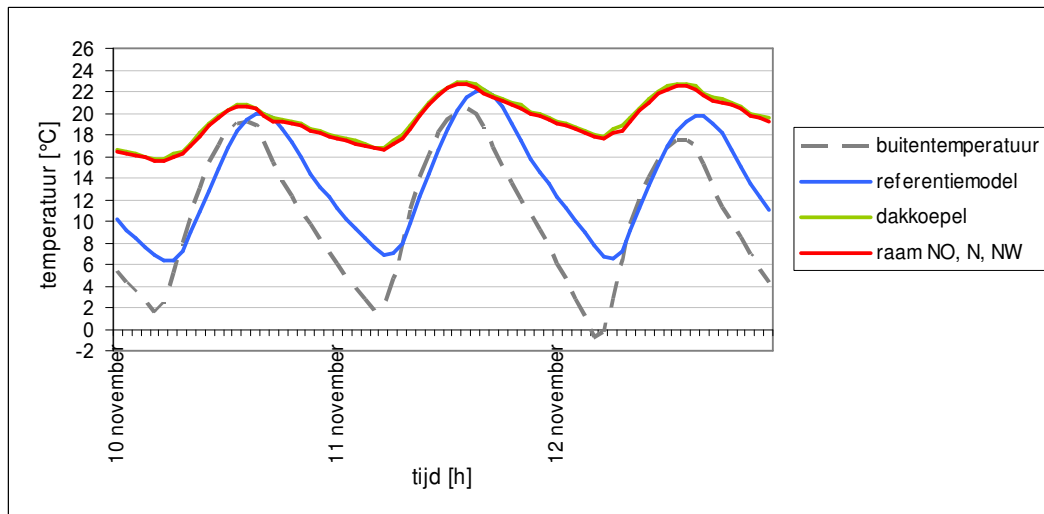
Figuur 5.4: raam NO, N, NW

De beide raamoppervlaktes zijn gelijk. In de grafieken 5.34 en 5.35 is er een vergelijking gemaakt tussen deze twee ramen voor een winter- en zomerperiode. Voor de winterperiode en de tussenperiodes presteert de dakkoepel minder goed, maar voor de zomerperiode zijn de binnenluchttemperaturen gelijk voor beide ramen.

Grafiek 5.34: Vergelijking binnenluchttemperatuur dakkoepel en raam NO, N, NW winterperiode



Grafiek 5.35: Vergelijking binnenluchttemperatuur dakkoepel en raam NO, N, NW zomerperiode



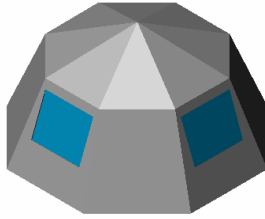
5.3.3.5 Grootte

Om een optimum te zoeken tussen een maximum aan zonnewinsten en een minimum aan verliezen zijn verschillende raamoppervlaktes ingegeven in Capsol. Het percentage glas is uitgedrukt ten opzichte van het geveloppervlak.

Voor de berekening is uitgegaan van drie ramen gericht op het noorden, oosten en westen. De ramen zijn geplaatst onder een hoek van $69,06^\circ$.

Het oppervlak voor de oostelijke en de westelijke ramen bedraagt in het referentiemodel

$2,08 \text{ m}^2$. Als er drie ramen van deze oppervlakte geplaatst worden dan bedraagt het glaspercentage 10%. Deze situatie is weergegeven in figuur 5.5.



Figuur 5.5: Plaatsing van de ramen voor bepaling glaspercentage

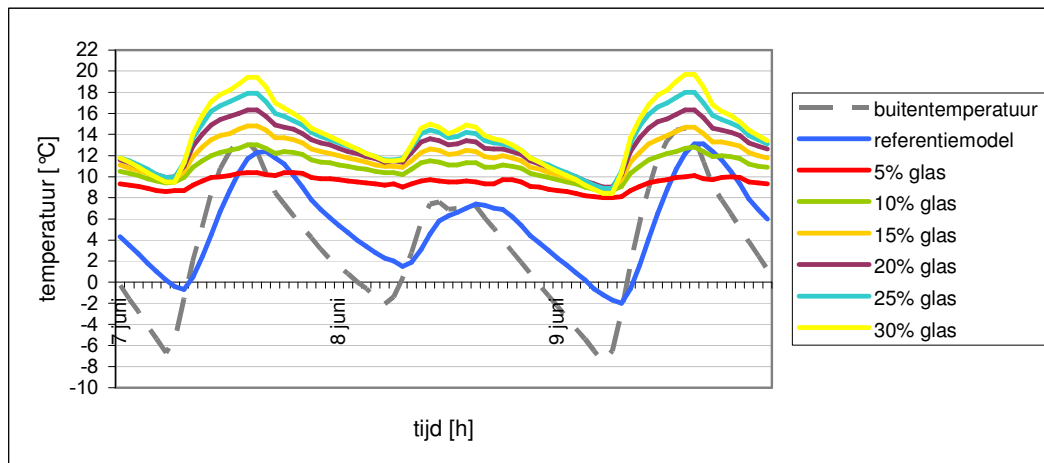
Bij het plaatsen van meer glas stijgt de binnenluchttemperatuur en daalt de demping van de buitenluchttemperatuur. Vanaf 20% glas daalt de minimale binnenluchttemperatuur echter terwijl de maximale waarde blijft stijgen. Bij meer dan 20% glas zal er dus een kans bestaan op oververhitting bij hoge buitenluchttemperaturen en een intensieve zonnestraling.

Voor de minimale waarden van de binnenluchttemperatuur is het verschil tussen 15 en 20% klein. Maar bij 15% is het binnenklimaat stabiel door de hogere demping, daarom is 15% te verkiezen boven 20%.

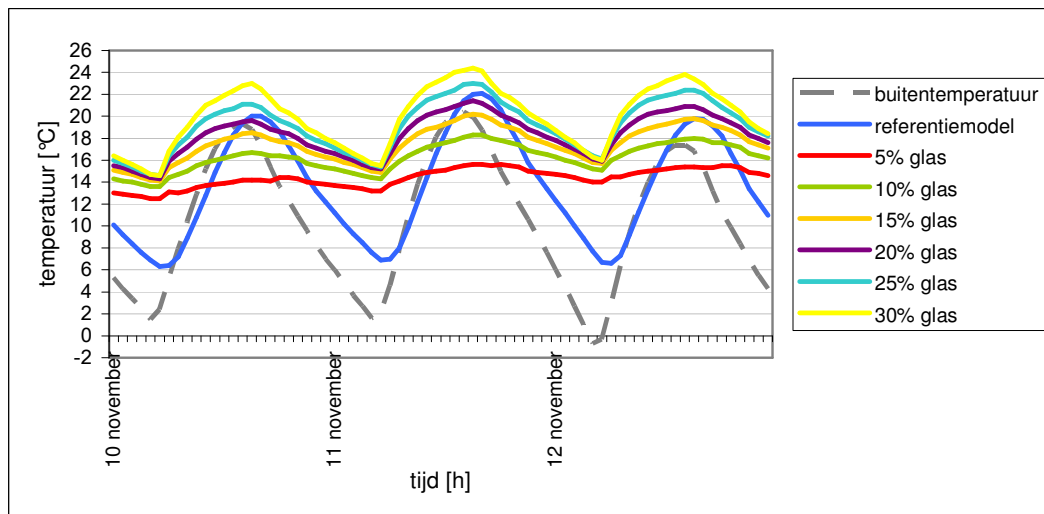
Tabel 5.26: Gegevens binnenklimaat bij verschillende glaspercentages op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
5% glas	8,8	9,8	15:00	7,4	1:05	90,9
10% glas	10,5	12,5	14:55	8,0	1:00	81,4
15% glas	11,6	14,5	14:45	8,4	0:50	72,8
20% glas	12,6	16,1	14:40	8,5	0:45	67,0
25% glas	13,3	17,9	14:50	8,2	0:55	57,4
30% glas	13,8	19,7	15:00	7,9	1:05	45,6

Grafiek 5.36: Invloed van het percentage glas op de binnenluchttemperatuur winterperiode



Grafiek 5.37: Invloed van het percentage glas op de binnenluchttemperatuur zomerperiode



De ramen zijn in de berekeningen geplaatst onder een grote hoek, $69,06^\circ$. Als de plaatsingshoek kleiner is, wordt de binnenluchttemperatuur hoger. Een glaspercentage van 10% zal het optimum zijn tussen de warmtewinsten en de warmteverliezen doorheen het glasoppervlak voor een raam in het bovenste deel van de koepel. Meer glas zal ook duurder zijn.

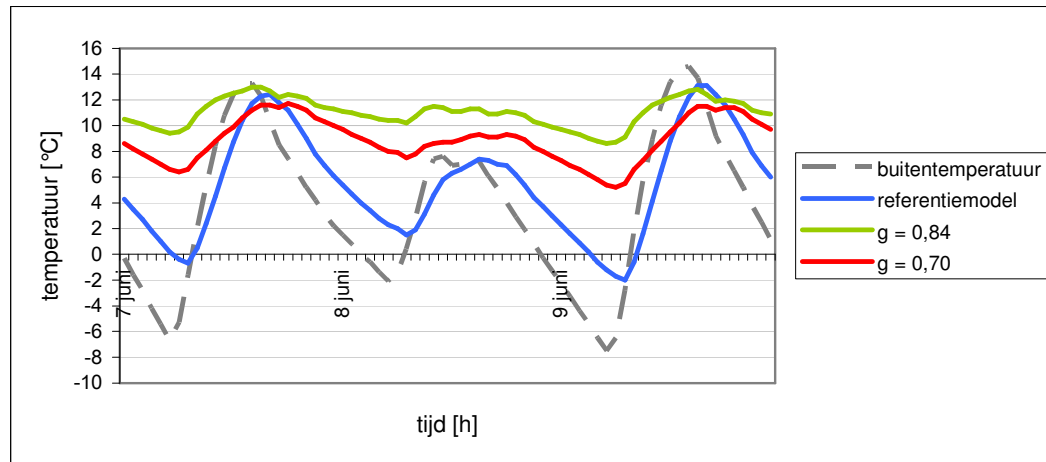
5.3.3.6 Zontoetredingsfactor en U-waarde bij dubbel glas

Glas kan een verschillende zontoetredingsfactor (ZTA) hebben afhankelijk van de absorptie- en transmissiefactor van het gebruikte glas. De algemene waarde van de ZTA-factor voor enkel glas bedraagt 0,85. Om de invloed van de ZTA-factor na te gaan op de binnenluchttemperatuur is deze berekend voor glas met een ZTA-factor van 0,85

en van 0,70. Voor de berekening is uitgegaan van de ramen gepositioneerd volgens figuur 5.5 en met een glasoppervlak van 10% van het geveleppervlak.

Uit grafiek 5.38 volgt dat de binnenluchttemperatuur hoger ligt als de ZTA-factor groter is. Dit komt doordat het glas met een hogere ZTA-factor een lagere absorptiefactor heeft en er dus minder warmte wordt geabsorbeerd, wat dus leidt tot een lagere binnenluchttemperatuur.

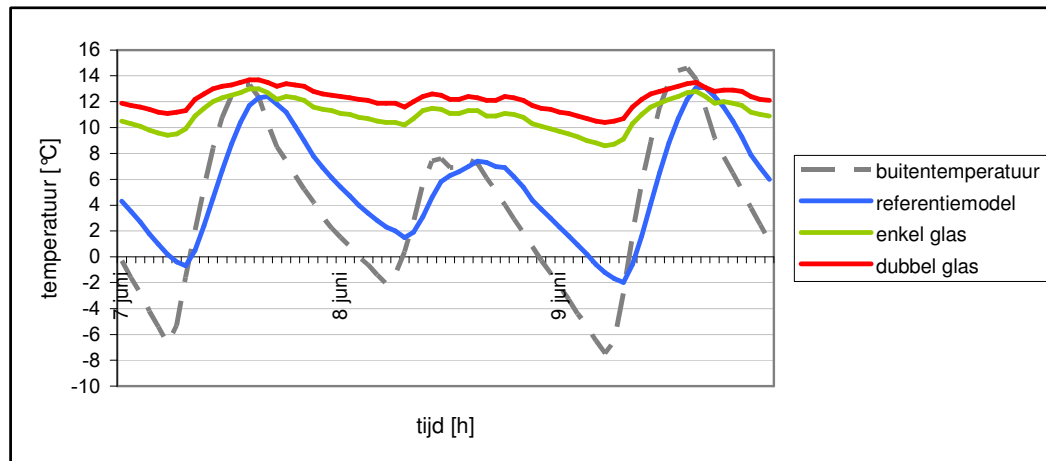
Grafiek 5.38: Invloed van de ZTA-factor op de binnenluchttemperatuur



Dubbel glas heeft een lagere ZTA-factor, maar ook een hogere warmteweerstand. Hierdoor treedt er minder warmte binnen in de binnenruimte, maar de warmte wordt wel beter vastgehouden. Uit grafiek 5.39 volgt dat bij een U-waarde van $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ en een ZTA-factor van 0,7 de binnenluchttemperatuur hoger is dan bij toepassing van enkel glas voor de beglazing.

De invloed van de warmteweerstand is dus groter dan deze van de ZTA-factor.

Grafiek 5.39: Invloed van dubbel glas op de binnenluchttemperatuur



5.3.3.7 Isolerende luiken

Door de grote warmtegeleiding van het enkel glas zal er 's nachts langs die weg nog veel warmte verloren gaan. Om deze nachtelijke warmteverliezen tegen te gaan, kunnen luiken geplaatst worden voor de ramen.

Door deze luiken overdag te openen kan het zonlicht in de ruimte binnenvallen. Als de zon is ondergegaan worden de luiken gesloten en blijft de gevangen zonnewarmte langer vastgehouden, door de hogere warmteweerstand van de luiken ten opzichte van deze van het enkel glas.

In Capsol kunnen geen tijdafhankelijke zonneweringen worden ingegeven. De luiken zullen door het programma enkel gesloten worden als een bepaalde doelt temperatuur overschreden wordt. Dan vervangt het programma het glas door een wand met andere thermische eigenschappen. Maar in dit geval moeten de luiken net gesloten worden op het moment dat de zonnestraling nul wordt. De simulatie zou mogelijk zijn indien er in Capsol een minimale waarde van de globale zonnestraling zou kunnen worden ingegeven. Dit is een mogelijk voorstel tot uitbreiding van het programma.

Voor een goede werking van de luiken moeten deze best een warmteweerstand bezitten die ongeveer gelijk is aan deze van de gevel.

5.3.3.8 Kleur

De binnenluchttemperatuur is afhankelijk van de kleur van de gevel. Hoe donkerder de kleur, hoe groter de absorptiecoëfficiënt, dus hoe hoger de oppervlaktetemperaturen van constructiedelen die door de zon beschenen worden. De

reeds gebouwde koepelwoningen in El Alto zijn beschilderd met een waterdichte verf in roodbruin en in groen.

Er zijn vier verschillende kleuren toegepast op de koepel. De kleuren en hun absorptiecoëfficiënt zijn weergegeven in tabel 5.27.

Tabel 5.27: Absorptiecoëfficiënten van de verschillende kleuren

kleur	wit	roodbruin	groen	zwart
$a_{s,e}$ [-]	0,25	0,75	0,59	0,90

De invloed van deze kleuren op de binnenluchttemperatuur is weergegeven in tabel 5.28 en grafieken 5.40 en 5.41.

De zwarte verf geeft de hoogste waarden voor de binnenluchttemperatuur doordat deze kleur de hoogste absorptiefactor heeft en dus het meest warmte opslaat. De tijdvertraging is ook het grootst bij de zwarte koepel en de demping is het kleinst, waardoor de fluctuaties van de binnenluchttemperaturen het grootst zijn.

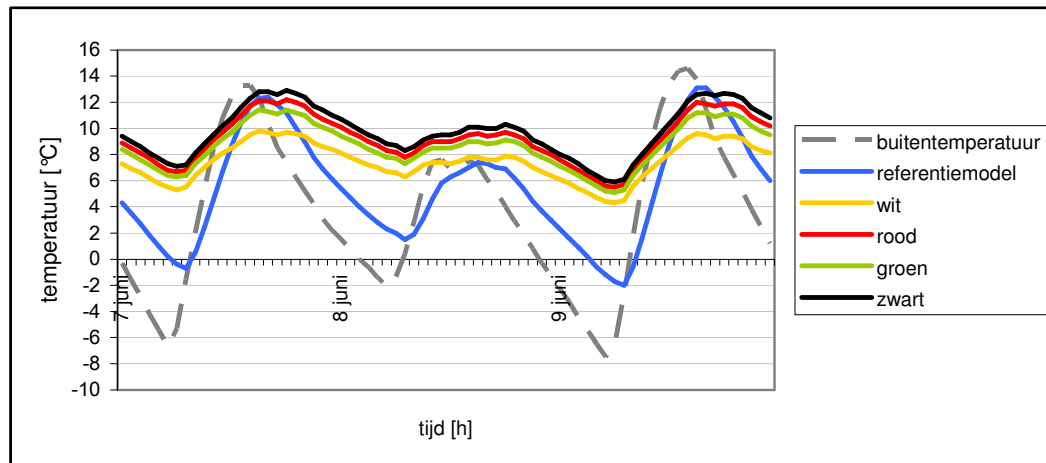
De witte koepel geeft de laagste binnenluchttemperaturen, maar wel het meest stabiele binnenklimaat.

Het verschil tussen de verschillende kleuren is groter in de zomerperiode.

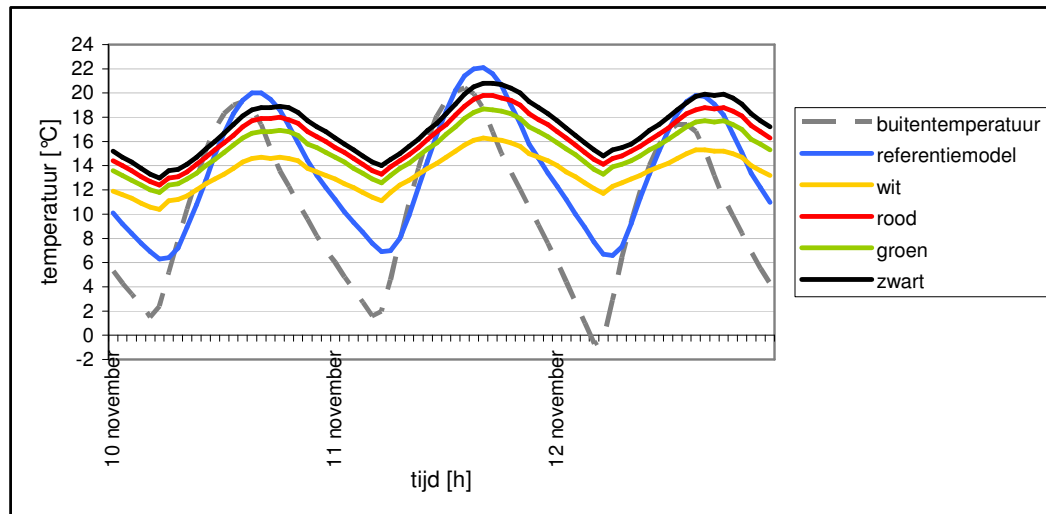
Tabel 5.28: Gegevens binnenklimaat bij verschillende kleuren op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
wit	7,0	9,5	15:25	3,7	1:30	77,3
roodbruin	8,8	11,8	15:25	4,9	1:30	72,5
groen	8,3	11,1	15:35	4,5	1:40	73,7
zwart	9,4	12,6	16:00	5,2	2:05	70,0

Grafiek 5.40: Invloed van de kleur op de binnenluchttemperatuur winterperiode



Grafiek 5.41: Invloed van de kleur op de binnenluchttemperatuur zomerperiode



De koepelwoning wordt best niet wit geverfd, doordat de witte kleur de zonnestraling reflecteert in plaats van absorbeert. Adobe heeft een roodbruine kleur met een hoge absorptiefactor, hetgeen een positieve invloed heeft op de binnenluchttemperatuur. Als de bewoners de woning willen verven zal de voorkeur uitgaan naar een donkere kleur.

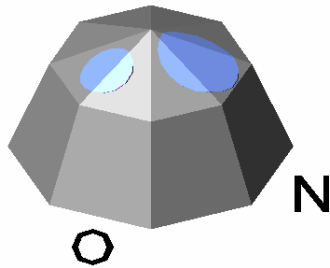
6. Bouwfysisch optimale koepelwoning

6.1 Beschrijving

Doordat de binnenmuren ook bijdragen tot de warmteopslag en een afscheiding nodig is tussen de badkamer, keuken en de leefruimte, zullen deze bewaard blijven. Door de scheiding tussen de ruimtes zijn er dus twee ramen nodig die de binnenzones verlichten.

Uit de analyse van de beglazing is gebleken dat de noordelijke oriëntatie de meest gunstige is voor de winterperiode. Het oosten is gedurende het hele jaar een goede oriëntatie voor de ramen. De ramen worden best zo hoog mogelijk in de koepelwoning geplaatst om het maximum aan zonnestraling op te vangen.

Het totale glasoppervlak bedraagt 10% van het geveloppervlak. Hierbij treedt er geen oververhitting op tijdens de warmere zomerdagen. Er is gekozen voor twee ramen met een verschillende oppervlakte, waarvan de grootste georiënteerd is naar het noorden, noordoosten en noordwesten. Het kleinste raam verlicht de badkamer en de keuken en is gericht op het zuidoosten en het oosten. De positie van de ramen is weergegeven in figuur 6.1.



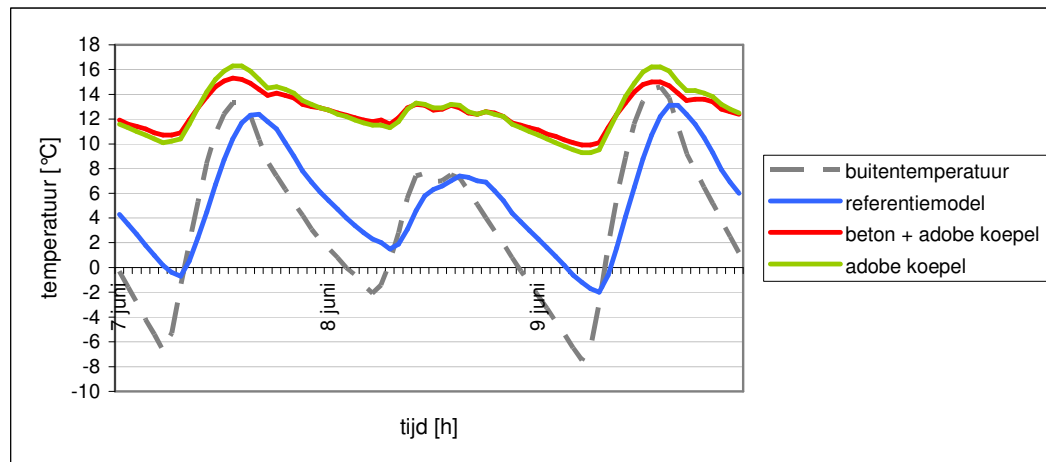
Figuur 6.1: Positionering en verhouding van de ramen

Voor de kleur is geopteerd voor de roodbruine kleur van adobe. Als er gras op de woning gepland wordt om de adobe beter op zijn plaats te houden, levert dit door de lagere absorptiefactor voor groen een iets lagere binnenluchttemperatuur op. Deze invloed is echter gering.

Als isolatie is er 30 cm adobe toegepast op de betonnen schaal van 10 cm. Als de koepel enkel opgebouwd wordt uit adobe zijn de minimale binnenluchttemperaturen lager en de maximale waarden hoger dan in het eerste geval. De fluctuaties van de

binnenluchttemperaturen zijn dus groter, door de lagere capaciteit van de adobe. De combinatie beton-adobe levert het gunstigste resultaat. Het verschil in binnenluchttemperatuur in beide koepels is echter relatief klein. Als de adobe koepel uit de structurele analyse gunstig blijkt te zijn, zal er voor deze toepassing geopteerd worden. Door de goedkopere materialen zal deze woning economisch het gunstigst zijn. De vergelijking van de binnenluchttemperaturen van de koepelwoningen is weergegeven in grafiek 6.1. De binnenluchttemperaturen van de koepels gedurende het hele jaar worden op deze wijze weergegeven ten opzichte van elkaar.

Grafiek 6.1: Vergelijking binnenluchttemperatuur combinatie beton-adobe en enkel adobe



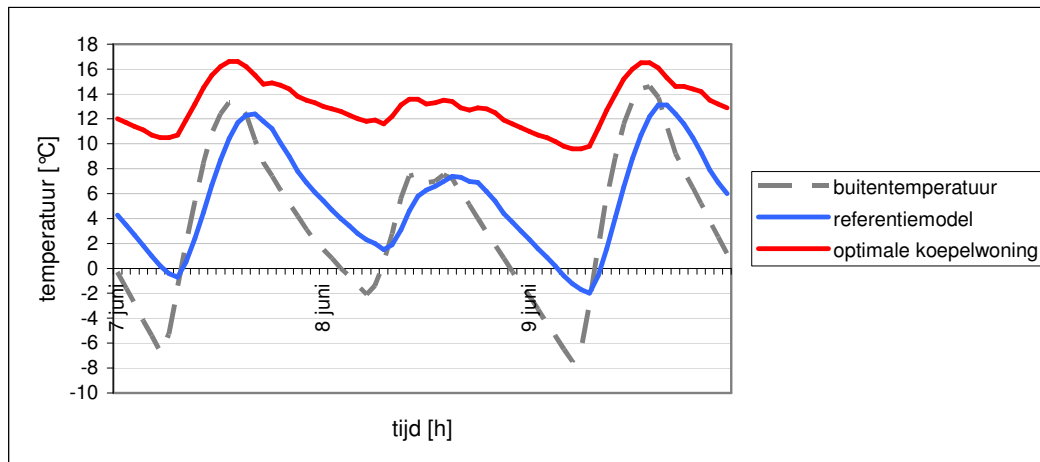
De optimale koepelwoning is deze bestaande uit een laag van 40 cm adobe. De binnenluchttemperaturen voor deze bouwfysisch optimale koepelwoning zijn weergegeven in grafieken 6.2 en 6.3.

Uit de gegevens van het binnenklimaat, weergegeven in tabel 6.1, volgt dat de minimale binnenluchttemperatuur 11,2°C hoger ligt dan deze in het referentiemodel. Ten opzichte van de buitenluchttemperatuur bedraagt het temperatuursverschil 14 °C.

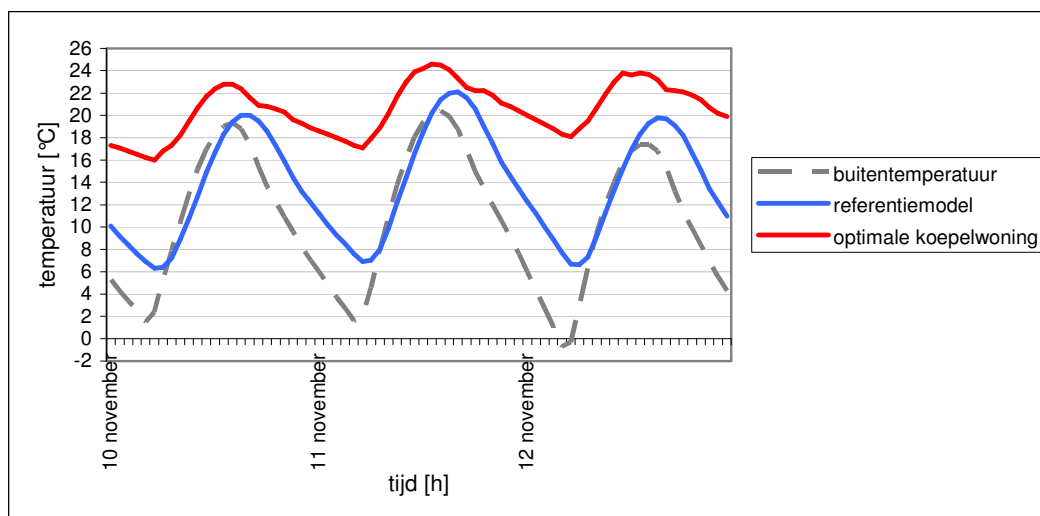
Tabel 6.1: Gegevens binnenklimaat optimale koepelwoning

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
referentiemodel	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
optimale koepelwoning	12,6	16,1	14:00	8,9	0:05	67,3

Grafiek 6.2: Vergelijking binnenluchttemperaturen referentiemodel en optimale koepelwoning winterperiode



Grafiek 6.3: Vergelijking binnenluchttemperaturen referentiemodel en optimale koepelwoning zomerperiode



6.2 Extreme klimaatsituaties

6.2.1 Omschrijving

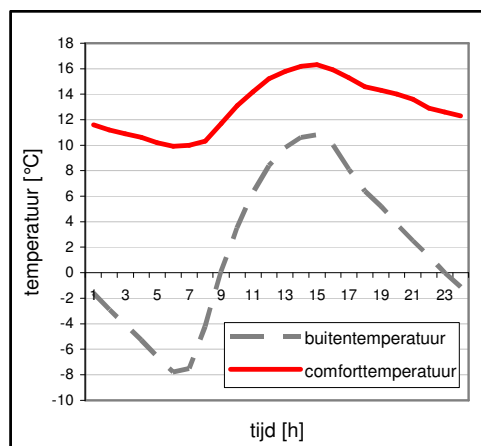
Naast de dagen die tot nu toe gebruikt zijn om de prestatie van de koepelwoning te beoordelen, wordt het binnenklimaat bepaald voor meer extreme klimaatsomstandigheden. Uit de gegevens van het buitenklimaat verkregen door Meteoronorm zijn de volgende situaties onderzocht:

- 15 juli: dag met minimale gemiddelde buitenluchttemperatuur ($\theta_{e,gem} = \min$)
- 16 december: dag met maximale gemiddelde buitenluchttemperatuur ($\theta_{e,gem} = \max$)
- 6 juli: dag met minimale buitenluchttemperatuur ($\theta_e = \min$)
- 11 november: dag met maximale buitenluchttemperatuur ($\theta_e = \max$)
- 22 juni: dag met minimale gemiddelde globale horizontale zonnestraling ($q_{zon, glob, gem} = \min$)
- 26 december: dag met maximale gemiddelde globale horizontale zonnestraling ($q_{zon, glob, gem} = \max$)
- 20 januari: dag met minimale globale horizontale zonnestraling ($q_{zon, glob} = \min$)
- 12 februari: dag met maximale globale horizontale zonnestraling ($q_{zon, glob} = \max$)

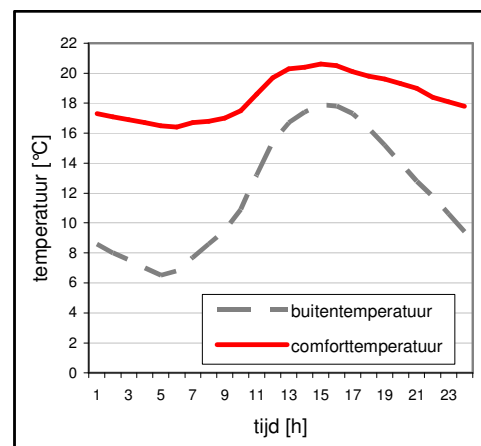
6.2.2 Binnenluchttemperatuur optimale koepelwoning

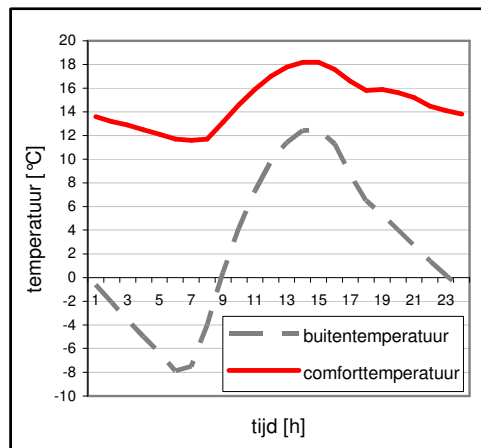
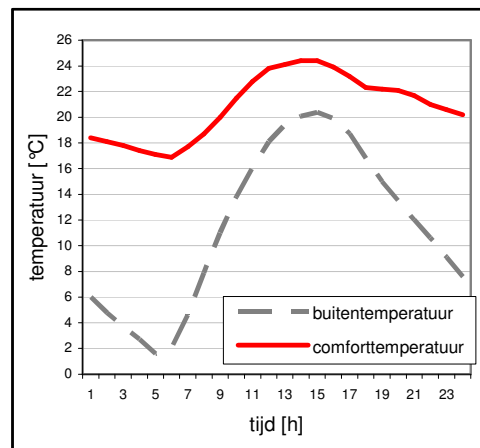
Het verloop van de binnenluchttemperaturen in de optimale koepel is voor de verschillende situaties weergegeven in de grafieken 6.4 tot 6.11.

Grafiek 6.4: Binnenluchttemperatuur $\theta_{e,gem} = \min$

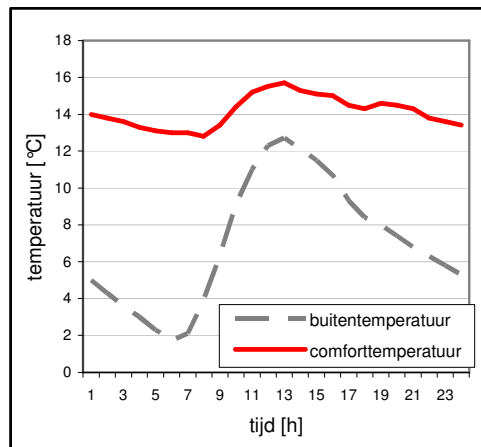


Grafiek 6.5: Binnenluchttemperatuur $\theta_{e,gem} = \max$

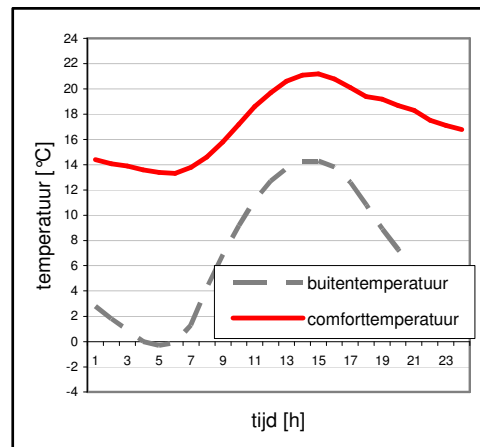


Grafiek 6.6: Binnenluchttemperatuur $\theta_e = \min$ Grafiek 6.7: Binnenluchttemperatuur $\theta_e = \max$ 

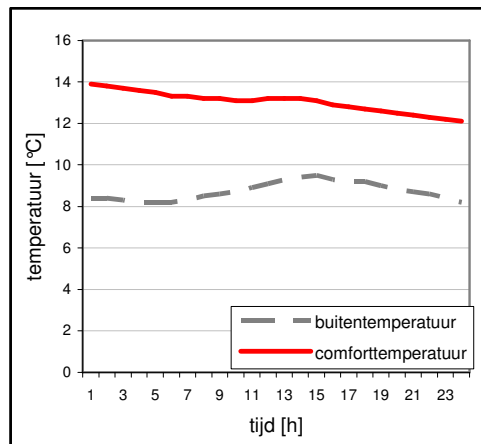
Grafiek 6.8: Binnenluchttemperatuur

 $q_{\text{zon, glob, gem}} = \min$ 

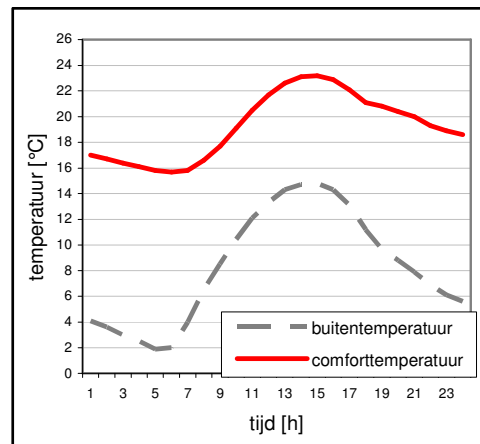
Grafiek 6.9: Binnenluchttemperatuur

 $q_{\text{zon, glob, gem}} = \max$ 

Grafiek 6.10: Binnenluchttemperatuur

 $q_{\text{zon, glob}} = \min$ 

Grafiek 6.11: Binnenluchttemperatuur

 $q_{\text{zon, glob}} = \max$ 

6.2.3 Besluit

De minimale binnenluchttemperatuur wordt bereikt op de dag met de gemiddelde minimale buitenluchttemperatuur. De waarde bedraagt 9,9°C. De laagste binnenluchttemperatuur valt op 9 juni. Dit komt doordat de buitenluchttemperatuur op 7 en 8 juni ook laag zijn. Bij de andere dagen zijn meestal de dagen voordien warmer dan de dag dat de minimale waarden van de buitenluchttemperatuur vallen.

Ook als er weinig zonnestraling is, zullen de binnenluchttemperaturen nog vrij hoog zijn, door de relatief hoge waarden van de buitenluchttemperaturen.

Bij de maximale buitenluchttemperatuur zal er een maximale waarde bereikt worden voor de binnenluchttemperatuur. Deze bedraagt 24,4°C en ligt dus nog altijd onder de comfortgrens van 26°C.

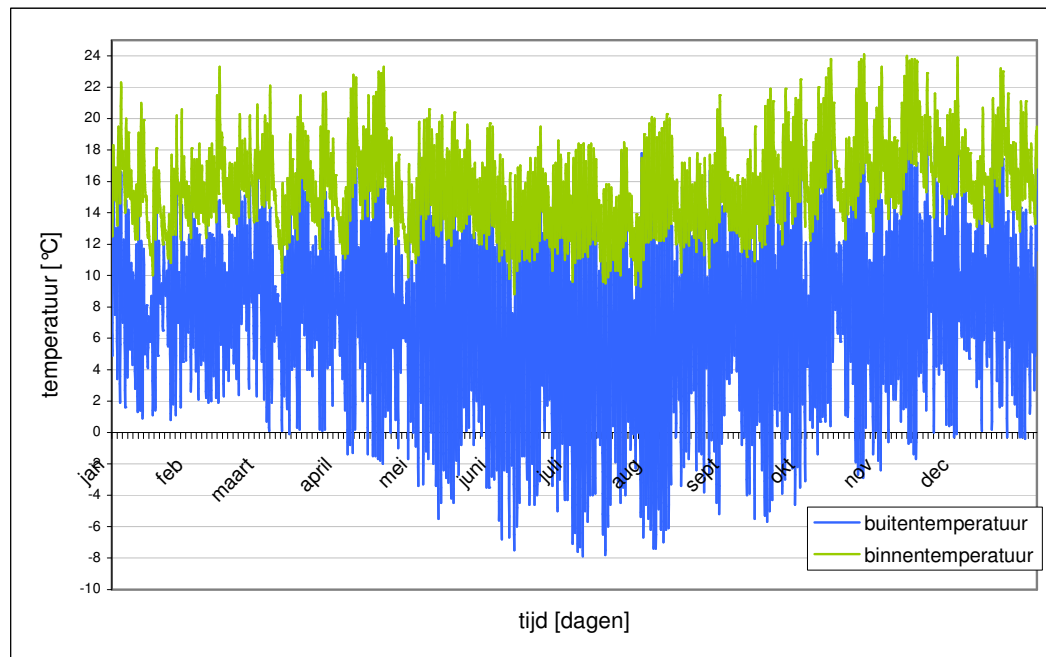
6.3 Verloop jaarlijkse binnenluchttemperatuur

De jaarlijkse binnenluchttemperaturen zijn weergegeven in tabel 6.2 en grafiek 6.12. De maximale waarde gedurende het hele jaar bedraagt 24,5°C. Deze temperatuur valt binnen de comfortgrens. De minimale waarde van de binnenluchttemperatuur is 9,3°C, wat dus veel lager is dan de comforttemperatuur van 16°C voor slaapruidtes volgens Belgische normen. De lage waarde wordt echter pas bereikt rond 7 uur 's morgens, dus als de bewoners meestal het huis verlaten om te gaan werken. Voor de bewoners in El Alto, die lage nachtelijke temperaturen gewoon zijn en geen gebruik maken van verwarming, zullen deze temperaturen al aanvaardbaar zijn.

Tabel 6.2: Maandelijks binnenluchttemperaturen in adobe koepel

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	15,0	16,1	15,7	15,9	15,5	14,0	13,6	15,1	15,7	17,2	18,0	16,8
$\theta_{e,max}$	22,4	23,3	22,1	23,3	20,7	19,5	19,1	21,6	22,6	24,5	24,6	24,5
$\theta_{e,min}$	9,9	12,3	10,1	9,9	10,8	9,3	9,3	10,2	10,8	12,1	13,6	12,7

Grafiek 6.12: Verloop jaarlijkse buiten- en binnenluchttemperatuur in adobe koepel in El Alto



7. Vergelijking van de conventionele bouwwijze met de betonnen koepelwoning

7.1 Beschrijving conventionele bouwwijze

De woningen in El Alto worden oorspronkelijk gebouwd in adobestenen met een dikte van 40cm. Het dak bestaat uit een golfplaat. In sommige gevallen is in de golfplaat een opening voorzien en afgedekt met een lichtdoorlatende kunststof. Om het gebruik van een balkenrooster te vermijden, wordt het dak in overkraging gelegd ten opzichte van de muren. Deze overkragingen zijn ingegeven als luifels in Capsol. De berekening van de afschermhoeken van de luifels is opgenomen in appendix G.

De verhoudingen van de onderzochte adobe woning zijn gebaseerd op figuur 7.1.



Figuur 7.1: Adobe woning in El Alto

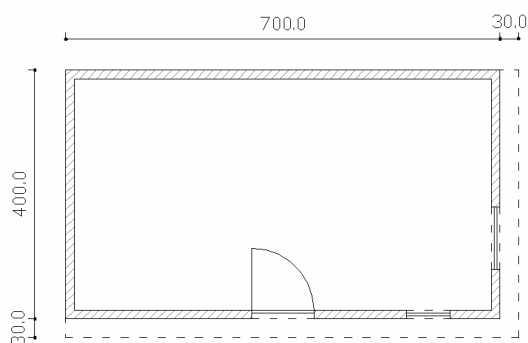
Voor de vergelijking is er een woning genomen met dezelfde nuttige vloeroppervlakte als de koepelwoning. De binnenruimte is beschouwd als één zone. De kenmerken van de verschillende zones zijn opgenomen in tabel 7.1. Aan de binnenzone is het bewonersscenario 2 opgelegd, waarbij de woning bewoond wordt door twee volwassenen.

Tabel 7.1: Gegevens zones

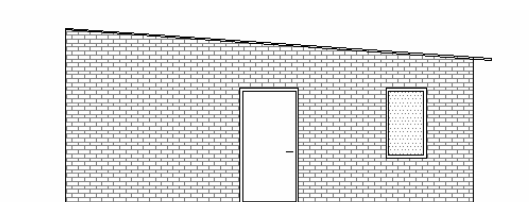
naam	type	ρc [J/m ³ K]	V [m ³]
buiten	ES	1200	-
binnen	IV	1200	77
grond	ES	1200	-

Het infiltratievoud bedraagt 1,14 zodat het infiltratiedebiet voor de conventionele woning gelijk is aan dit van de koepelwoning. Het ventilatiedebiet bij het openen van de deur bij een temperatuur van 23°C bedraagt 201,3 m³.

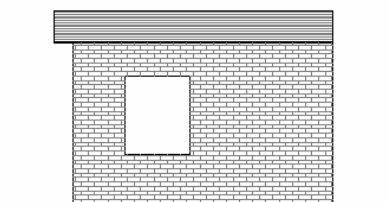
De afmetingen van de adobe woning zijn weergegeven in figuren 7.2 tot 7.4.



Figuur 7.2: Plan



Figuur 7.3: Noordgevel



Figuur 7.4: Westgevel

In tabel 7.2 zijn de thermische eigenschappen opgenomen van de toegepaste materialen.

Tabel 7.2: Thermische eigenschappen van de gebruikte materialen

materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	e_L [-]	$a_{s,i}$ [-]	$a_{s,e}$ [-]
adobesteen	0,4	0,379	1,055	980	840	0,90	0,25	0,75
golfplaat	0,002	45,0	4×10^{-5}	7800	480	0,90	0,86	0,86
grond (leem)	3	1,13	2,655	2200	1000	0,90	0,83	0,83
enkel glas	0,004	0,8	0,005	2500	840	0,94	0,15	0,15

7.2 Bouwfysische vergelijking

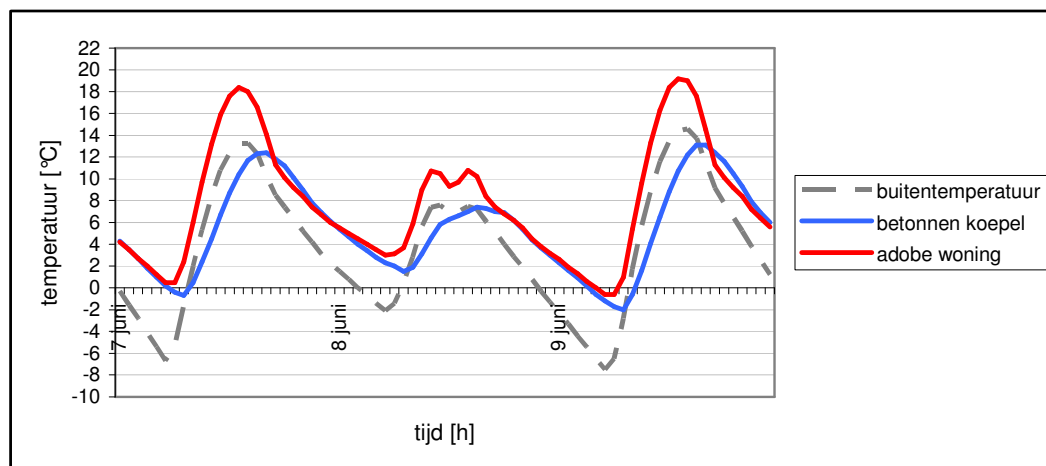
De binnenluchttemperaturen zijn berekend voor de winter- en de zomerperiode. Uit de gegevens voor het binnenklimaat in grafieken 7.1 en 7.2 en tabel 7.3 volgt dat de maximale binnenluchttemperatuur in de gebruikelijke woning zeer hoog is. Dit komt door de hoge warmte-geleidingscoëfficiënt van de stalen golfplaat. Het dak zorgt voor extra warmte in de binnenruimte gedurende de uren dat de zon schijnt. Deze warmte wordt niet lang vastgehouden door de lage warmteweerstand van het staal. Door het dak zijn de fluctuaties in het verloop van de binnenluchttemperatuur zeer groot. De demping heeft een negatieve waarde. Dit betekent dat het binnenklimaat minder stabiel is dan het buitenklimaat.

Door de betere isolerende adobestenen dan het gewapend beton zijn de minimale waarden van de binnenluchttemperaturen in de adobe woning hoger dan in de betonnen koepelwoning.

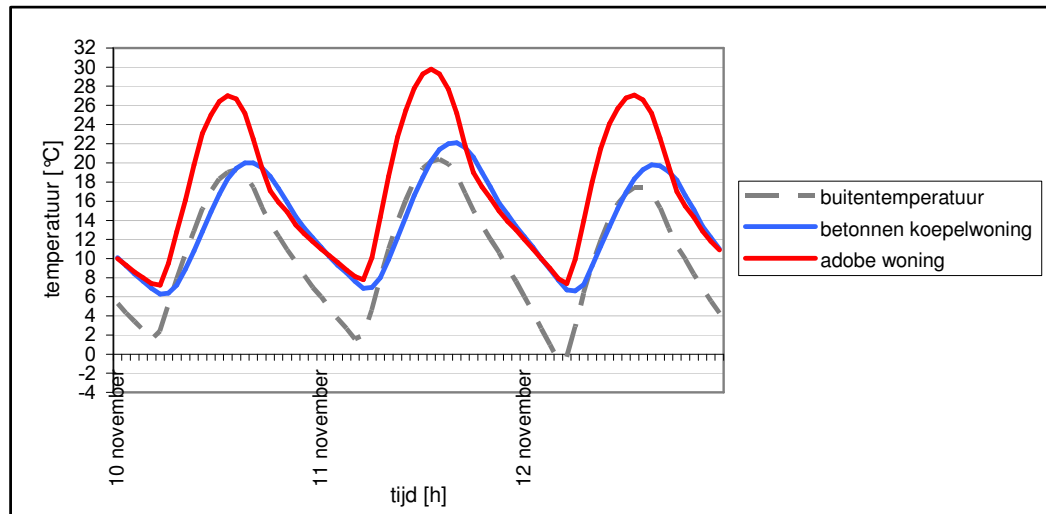
Tabel 7.3: Gegevens binnenklimaat adobe woning en betonnen koepelwoning op 9 juni

	$\theta_{i,gem}$ [°C]	$\theta_{i,max}$ [°C]	$t(\theta_{i,max})$ [h]	$\theta_{i,min}$ [°C]	τ [h]	D [%]
betonnen koepelwoning	5,5	13,2	15:50	-2,3	1:55	28,2
adobe woning	8,0	19	-1,1	13:55	0:00	-2,9

Grafiek 7.1: Vergelijking binnenluchttemperaturen adobe woning en betonnen koepel winterperiode



Grafiek 7.2: Vergelijking binnenluchttemperaturen adobe woning en betonnen koepelwoning zomerperiode



7.3 Mogelijke verbetering van de conventionele woning

Het golfplaten dak speelt de belangrijkste rol in het discomfort van de adobe woning. Voor het verbeteren van de woning zal het dak best geïsoleerd worden. In Bolivia wordt er stro op het dak gelegd om het binnenklimaat beter te stabiliseren. Het stro treedt op als isolatie en zorgt voor lagere maximale en hogere minimale binnenluchttemperaturen. In grafiek 7.3 is de binnenluchttemperatuur weergegeven voor een adobe woning met toepassing van stro op het golfplaten dak. Door het gebruik van stro wordt het binnenklimaat stabiel, door de grotere demping. De minimale binnenluchttemperatuur wordt ook later bereikt. De thermische eigenschappen van het stro zijn afgeleid uit deze van strobalen. De gebruikte eigenschappen zijn weergegeven in tabel 7.4. [25]

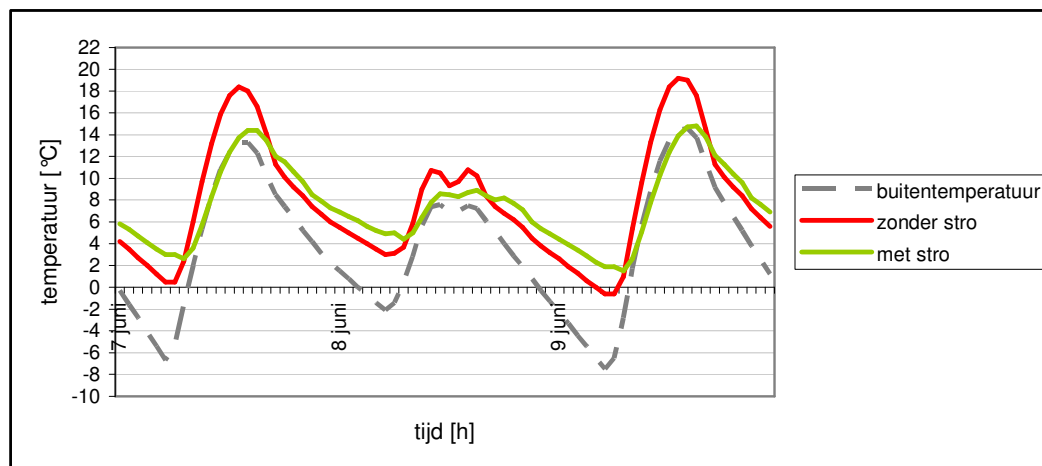
De eigenschappen van het stro in El Alto zullen verschillen van deze waarden doordat het stro niet ideaal gepakt is, maar de waarden zijn enkel gebruikt voor een indicatie van de invloed van het stro.

Het stro zal wel snel degraderen bij regen door de toepassing op het dak. Als oplossing hiervoor kan op het stro een extra plaat gelegd worden, waardoor het stro minder snel zal degraderen en het niet van het dak zal waaien. Of het stro kan onder het dak aangebracht worden.

Tabel 7.4: Thermische eigenschappen stro

d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	e_L [-]	$a_{s,e}$ [-]
0,4	0,587	0,170	342	1465	0,86	0,75

Grafiek 7.3: Vergelijking binnenluchttemperaturen adobe woning met en zonder stro winterperiode



8. Andere klimaten

De Solid House Foundation is van plan koepelwoningen te bouwen in andere ontwikkelingslanden. Zo staan Indonesië, Kenia en Sri Lanka op het programma. In dit hoofdstuk wordt het binnenklimaat en eventuele verbeteringen van de betonnen koepelwoning onderzocht voor de verschillende landen.

8.1 Buitenklimaat

Het binnenklimaat is volledig afhankelijk van het buitenklimaat als er niet wordt verwarmd. Het buitenklimaat wordt onder andere bepaald door de temperatuur, de bezonning en lange golfstraling en de windsnelheid. De jaarlijkse gemiddelde buitentemperatuur daalt van de evenaar naar de polen, terwijl de winterse maandgemiddelden lager liggen naarmate we meer landinwaarts trekken of hoger zitten.

De bezonning is ook afhankelijk van het klimaat. In streken met een zeeklimaat is er minder zon. Een landklimaat of een ligging dicht bij de keerkringen of de poolcirkels betekent meer zon. Meer zon zorgt echter ook voor gemiddeld helderder nachten en daardoor meer lange golf verliezen.

Een hogere windsnelheid veroorzaakt meer verliezen, maar kan in warme klimaten voor een aangename koeling van de binnentemperaturen zorgen. Hoge of lage windsnelheden hebben veel te maken met de nabijheid van de zee en de mate van beschutting door het nabije landschap. [19]

8.2 Passieve maatregelen voor koeling in warme landen

De passieve maatregelen om een koeler binnenklimaat te creëren in de betonnen koepelwoningen worden besproken voor de toepassing van de woning in Atjeh, gelegen in Indonesië. De binnenluchttemperaturen om de invloed van de passieve maatregelen na te gaan zijn berekend voor een periode van drie dagen gelegen rond de warmste dag. In Atjeh is de dag met de gemiddelde maximale buitentemperatuur 26 maart.

8.2.1 Klimaat en ligging Banda Atjeh, Indonesië

Banda Atjeh heeft een tropisch vochtig zomerklimaat en is gelegen aan zee. In een tropisch klimaat zijn de jaarlijkse buitentemperaturen zeer hoog. De windsnelheden in een zeeklimaat zijn ook relatief groot. Hierdoor kan de windsnelheid ingezet worden als drijvende kracht voor de koele luchtventilatie van het binnenklimaat. Afhankelijk van de moesson kent Indonesië een regentijd en een droge periode. Banda Atjeh is gelegen op Sumatra, waar de neerslagen over het gehele jaar vrij gelijkmatig verdeeld zijn.

De ligging en de buitentemperaturen voor Atjeh zijn weergegeven in figuur 8.1 en tabel 8.1.



Figuur 8.1: Ligging Banda Atjeh

Tabel 8.1: Jaarlijkse buitentemperaturen in Atjeh, Indonesië

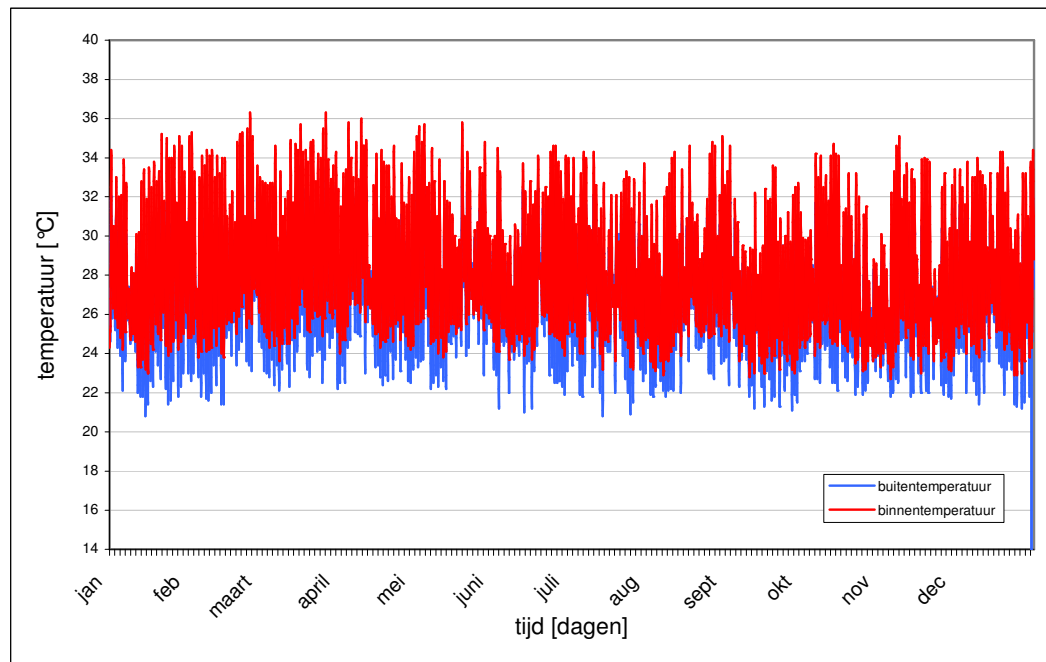
	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	26,9	27,4	27,6	27,4	27,6	26,9	27,0	26,8	26,1	26,4	26,2	26,7
$\theta_{e,max}$	32,1	32,7	33,7	33,4	33,6	32,5	32,1	32,7	31,8	31,9	32,5	32,1
$\theta_{e,min}$	21,4	21,0	21,9	22,2	21,9	20,8	20,8	21,7	20,9	21,8	21,6	21,8

De jaarlijkse binnenluchttemperaturen in de betonnen koepelwoning in Atjeh zijn weergegeven in tabel 8.2 en grafiek 8.1.

Tabel 8.2: Jaarlijkse binnenluchttemperaturen in de betonnen koepelwoning in Atjeh, Indonesië

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	28,3	29,1	29,2	28,9	28,8	28,1	28,1	27,9	27,3	27,5	27,4	28,1
$\theta_{e,max}$	35,2	36,3	36,3	36,1	35,9	34,6	34,4	35,2	34,6	34,8	35,2	34,4
$\theta_{e,min}$	22,1	23,5	23,4	23,9	23,7	23,5	23,1	22,0	22,0	22,0	22,1	22,0

Grafiek 8.1: Verloop binnen- en buitenluchttemperaturen in Atjeh



8.2.1 Nachventilatie

De koude nachtelijke buitentemperaturen veroorzaken in El Alto oncomfortabele binnenluchttemperaturen.

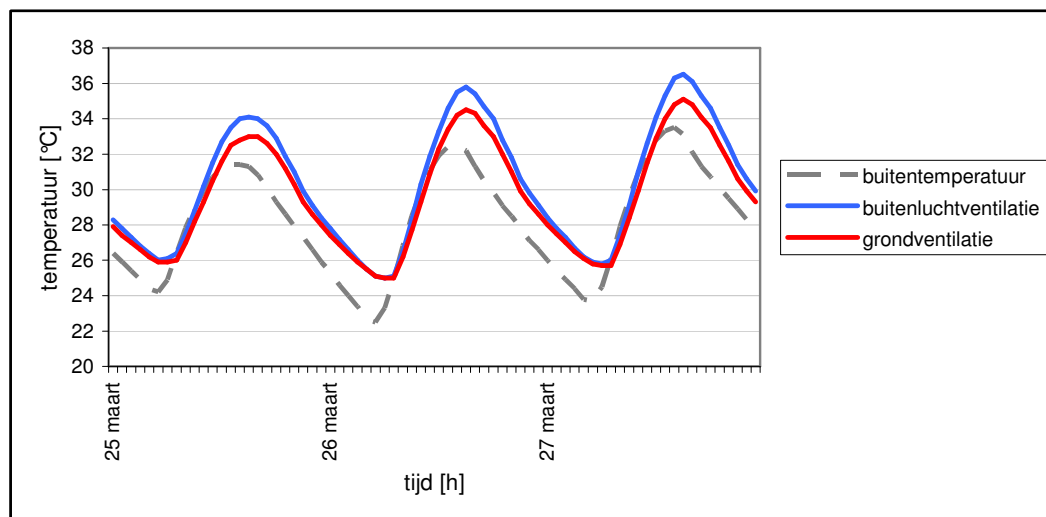
In warme klimaten zullen de maximale binnenluchttemperaturen zorgen voor het discomfort. Door nachventilatie wordt de nachtelijke, koudere buitenlucht ingezet om de binnentemperaturen overdag te doen dalen. 's Nachts koelt de gebouwmassa af door de buitenlucht met een hoog ventilatievoud langsheen de binnenzijde van de constructiedelen te laten stromen. Het ventilatiedebiet kan gecreëerd worden door de ramen tegenover elkaar te openen. De koude wordt dan in de wanden opgeslagen en overdag afgegeven. Dit systeem moet toegepast worden in combinatie met een goede zonnewering. Zo blijven de binnentemperatuur en de constructietemperatuur relatief laag. Een goed geïsoleerde en capacitieve woning is hiervoor een vereiste. Nachventilatie kan niet gesimuleerd worden in Capsol door het ontbreken van een tijdsafhankelijke functie voor het toepassen van de ventilatie.

8.2.2 Grondventilatie

De temperatuur van de ondergrond is op een bepaalde diepte constant gedurende het hele jaar. Doordat deze temperatuur overdag een lagere waarde heeft in warme klimaten dan de buitentemperatuur kan de temperatuur van de grondmassa ingezet worden als koelinstallatie. Door de buitenlucht met een bepaald debiet in de grond te zuigen neemt deze lucht de temperatuur aan van de grondmassa. De lucht moet wel voldoende diep en lang met de grond in contact komen alvorens voldoende af te koelen. Deze afgekoelde lucht wordt dan met een bepaald debiet in de binnenruimte geblazen en de warme lucht wordt afgevoerd door een ventilatieopening in de gebouwschil. Om de invloed van de grondventilatie na te gaan is een debiet van 223 m^3 genomen, gelijk aan de waarde bij het openen van de deur. Op deze wijze kan de invloed van koelen met de buitenlucht en met de grondlucht worden nagegaan. Voor de grondtemperatuur is een waarde gekozen van 24°C .

Uit grafiek 8.2 is af te leiden dat de maximale waarde van de binnenluchttemperatuur daalt met een waarde van ongeveer 1°C bij toepassing van grondventilatie. De minimale waarden blijven quasi gelijk.

Grafiek 8.2: Invloed grondventilatie op binnenluchttemperatuur

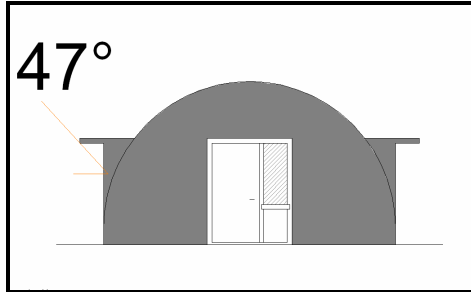


8.2.3 Luifels

Door het plaatsen van luifels boven de ramen wordt de afschermingshoek van het glas ten opzichte van de zon groter. De beschaduwingsfactor uit de vergelijking van de zonneprestaties wordt kleiner door de lagere zonnestraling op het glas. Hierdoor

worden de zonnewinsten kleiner. De binnenluchttemperatuur zal dus dalen als er luifels worden gebruikt.

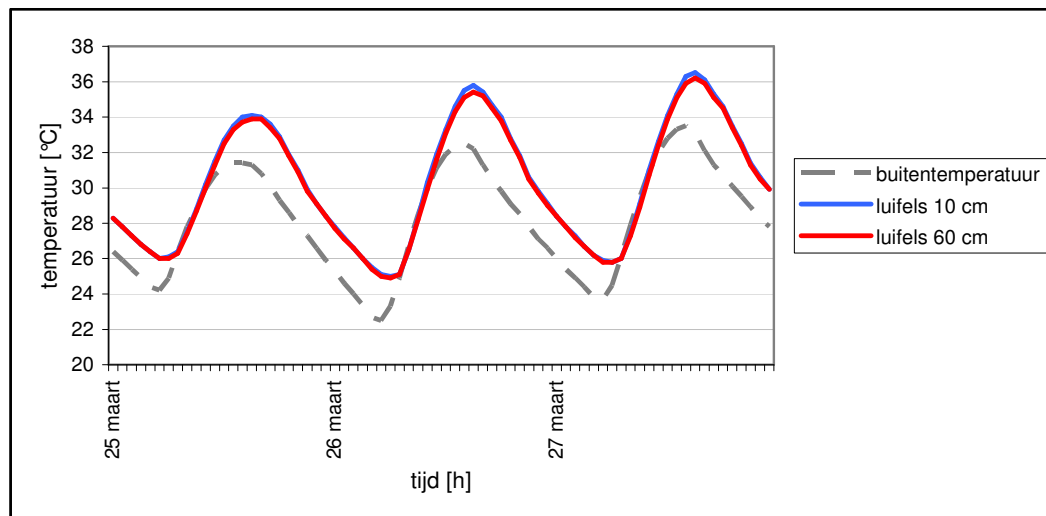
Om de invloed van de luifels op de binnenluchttemperaturen te bepalen zijn grotere afschermingshoeken van de ramen ingevoerd in Capsol. De simulatie is gebeurd voor luifels met een lengte van 60 cm, dus 50 cm langer dan de oorspronkelijke. De toegepaste luifels zijn weergegeven in figuur 8.2.



Figuur 8.2: Luifels met lengte 50 cm boven de ramen

Uit grafiek 8.3 is af te leiden dat de binnenluchttemperaturen bij de grotere luifels niet veel verschilt van deze met de luifels van 10 cm. Enkel de maximale binnenluchttemperatuur is iets lager in het eerste geval. De kleine impact van de luifels wordt veroorzaakt door de lage warmteweerstand van de betonnen gebouwschil. Bij toepassing van isolatie zou de invloed tussen de verschillende binnenluchttemperaturen veel groter zijn.

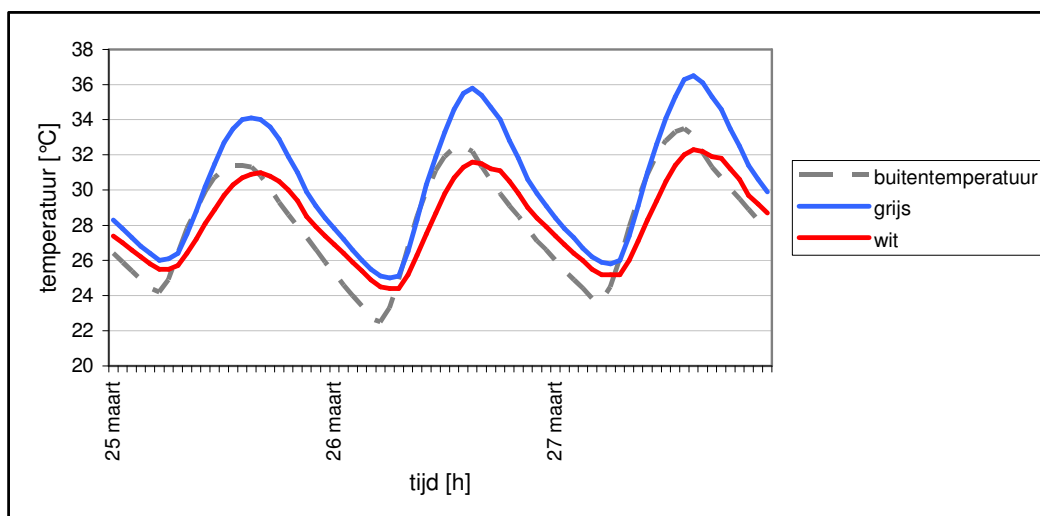
Grafiek 8.3: Invloed van grotere luifels op de binnenluchttemperatuur



8.2.4 Kleur

In de warme klimaten wordt de betonnen koepel het best geverfd in een lichte kleur met een lage absorptiefactor. Wit bezit de laagste absorptiefactor. In de grafiek 8.4 is het verloop van de binnenluchttemperatuur weergegeven voor een wit geverfde en een grijze betonnen koepelwoning. Door de witte kleur dalen de maximale waarden van de binnenluchttemperatuur sterk. Het temperatuursverschil bedraagt ongeveer 4 °C. De minimale binnenluchttemperaturen zijn gedaald met ongeveer 1 °C.

Grafiek 8.4: Invloed van de kleur op de binnenluchttemperatuur

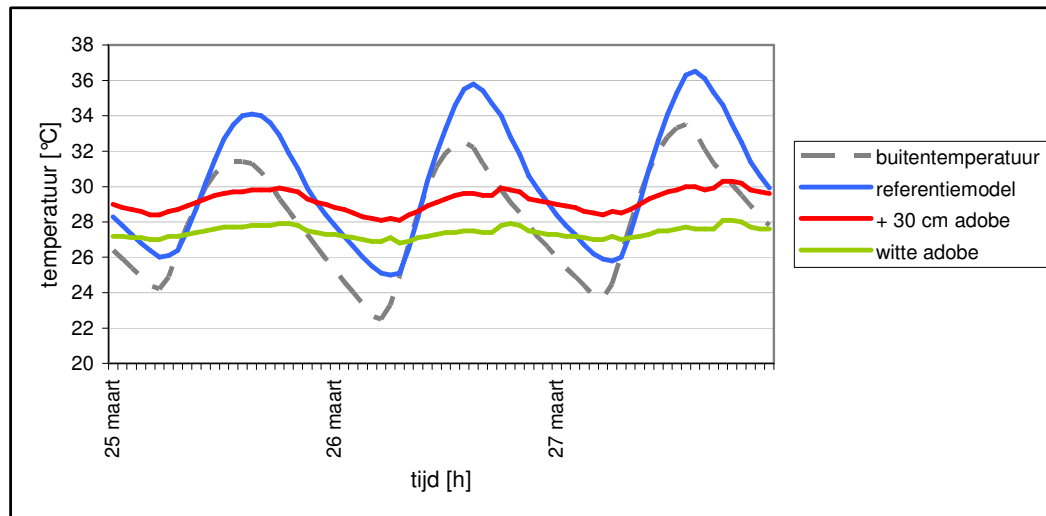


8.2.5 Isolatie

Door toevoegen van een isolatielaag zal het binnenklimaat veel stabielier zijn. Als vergelijking is een laag van 30 cm adobe toegevoegd bovenop de betonnen schaal. Bij deze toepassing stijgt de maximale binnenluchttemperatuur gedurende het hele jaar niet boven de waarde van 30 °C. Als er op de adobe een soort pleisterlaag toegevoegd wordt met een witte kleur daalt de maximale waarde met 2 °C. De maximale en de gemiddelde binnenluchttemperatuur dalen aanzienlijk bij toepassing van adobe, maar de nachtelijke minimale waarde stijgt. Deze nachtelijke binnenluchttemperaturen zijn dan te hoog voor een goede nachtrust. Er zal dus een kleinere dikte van adobe moeten worden gebruikt, waardoor de nachtelijke binnenluchttemperaturen nog aanvaardbaar blijven.

Het verloop van de binnenluchttemperaturen bij gebruik van bruine en witte adobe is weergegeven in grafiek 8.5.

Grafiek 8.5: Invloed adobe op binnenluchttemperatuur



8.2.6 Afscherming van de schuine vlakken

Uit de bouwfysische analyse van de koepelwoning in El Alto is gebleken dat de gevel-elementen met de kleinste hoek ten opzichte van de horizontale de grootste hoeveelheid zonnestraling ontvangen. Deze vlakken zijn bij de koepelwoning bovenaan gelegen. Door een toepassing van een dakconstructie boven de koepel kunnen deze vlakken afgeschermd worden van de zonnestraling. In figuur 8.3 zijn enkele voorbeelden gegeven ontworpen door de Solid House Foundation.

Voor het dak kan ook een bekleding met stro worden gebruikt.

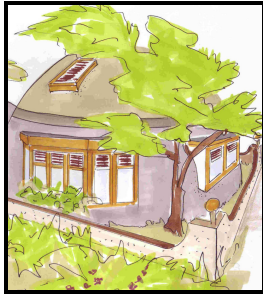


Figuur 8.3: Toepassingen van dakconstructies

8.2.7 Andere afschermingen

Andere bebouwing en groen kunnen ook de bezonning afschermen. De mate van afscherming wordt bepaald door de hoogte van de zonnestand en door de afstand en de oriëntatie van de belemmerde factor ten opzichte van de woning. Door de zonneshoogte te bepalen uit Capsol kan de belemmeringhoek vastgesteld worden.

Bomen kunnen bijdragen tot een koeler binnenklimaat door de schaduw en door het koelende effect op de buitenlucht.

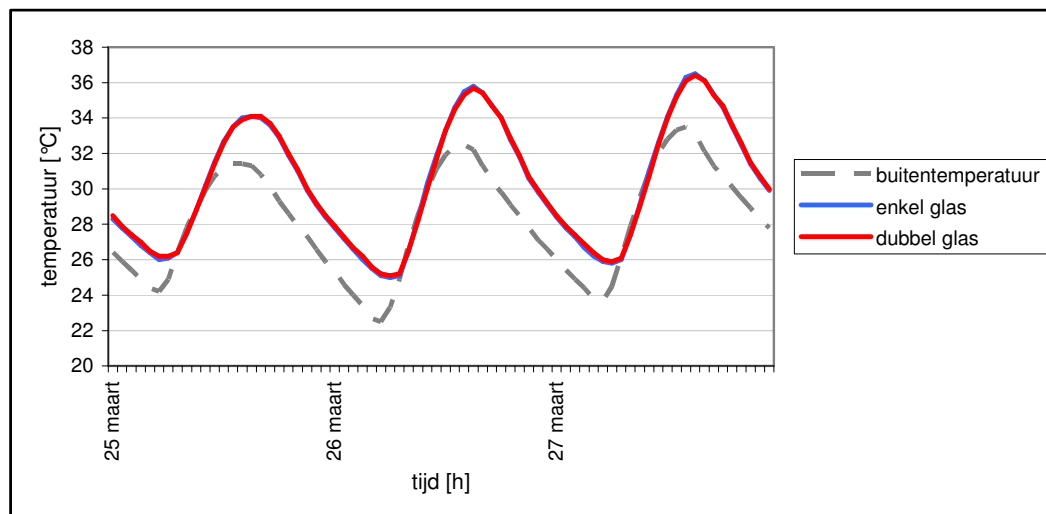


Figuur 8.4: Afscherming van de koepelwoning door bomen

8.2.8 Dubbel glas

In plaats van enkel glas kan er ook dubbel glas worden toegepast. Dubbel glas laat minder warmte door zonnestraling door in de ruimte door de lagere transmissiefactor. De hogere warmteweerstand zorgt ook voor een mindere warmtegeleiding. De toepassing van dubbel glas heeft quasi geen invloed op de binnenluchttemperatuur bij de ongeïsoleerde betonnen koepelwoning. Pas als de gebouwschil een voldoende hoge warmteweerstand bezit zal dubbel glas een invloed hebben op het binnenklimaat.

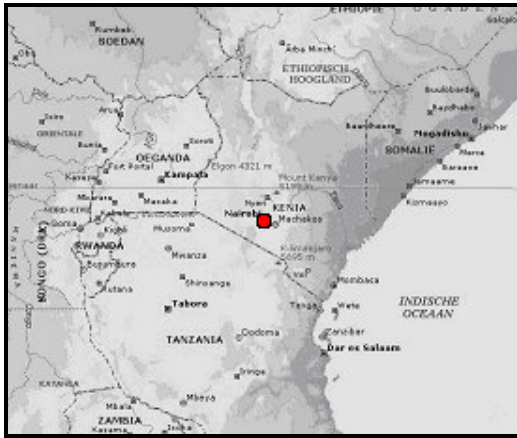
Grafiek 8.6: Invloed dubbel glas op binnenluchttemperatuur



8.3 Nairobi, Kenia

8.3.1 Klimaat en ligging

Het tropisch regenklimaat in Kenia wordt beïnvloed door de Indische Oceaan. Omdat het land geografisch gezien zeer uiteenlopend is, kent het verschillende subklimaten. Afhankelijk van onder andere de hoogte kent elk deel van Kenia een ander klimaat met eigen droge en natte tijden. In Nairobi, gelegen op een hoogte van 1660 m, bedraagt de jaarlijks gemiddelde buitenluchttemperatuur ongeveer 19°C. Voor de berekeningen van de binnenluchttemperaturen zijn de klimaatgegevens gebruikt van het station Nairobihourjomo.



Figuur 8.5: Ligging Nairobi

Uit tabel 8.3 volgt dat de maandgemiddelde buitenluchttemperaturen vrij comfortabele waarden hebben.

Tabel 8.3: Jaarlijkse buitentemperaturen in Nairobi, Kenia

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	20,1	20,6	21,1	20,3	19,4	17,6	17,2	17,3	18,7	20,1	19,1	19,4
$\theta_{e,max}$	29,9	31,0	30,1	28,6	27,9	26,6	28,5	27,8	28,9	29,8	27,9	27,0
$\theta_{e,min}$	9,3	8,3	10,1	11,7	10,3	8,3	7,1	6,1	7,4	9,3	10,5	9,9

8.3.2 Binnenklimaat betonnen koepelwoning

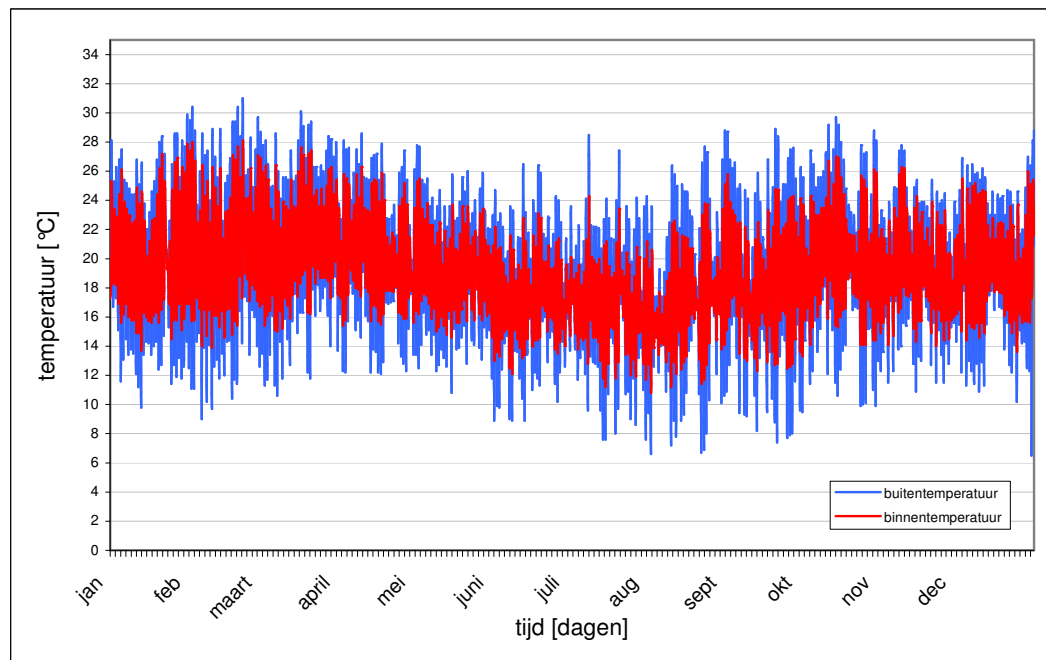
Door de betonnen koepel wit te schilderen worden de maximale waarden van de binnenluchttemperaturen sterk verlaagd. Het buitenklimaat wordt gedempt, waardoor de maximale en de minimale pieken van de buitenluchttemperatuur worden

uitgevlakt. De maximale binnenluchttemperatuur is nooit hoger dan de maximale buitentemperatuur. De witte betonnen koepelwoning presteert redelijk goed in dit klimaat. Door de woning te bedekken met een laag isolerende adobe, zullen de minimale binnentemperaturen stijgen en door toepassing van de andere passieve maatregelen zoals in Atjeh zal het binnenklimaat nog stabiel worden. De jaarlijkse binnenluchttemperaturen in de witte betonnen koepelwoning in Nairobi zijn weergegeven in tabel 8.4 en grafiek 8.7. De minimale binnenluchttemperaturen bij toepassing van 10 cm adobe zijn opgenomen in tabel 8.5.

Tabel 8.4: Jaarlijkse binnenluchttemperaturen in de witte betonnen koepelwoning in Nairobi, Kenia

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	20,1	20,8	21,2	20,4	19,4	17,5	17,0	17,0	18,6	20,0	19,2	19,4
$\theta_{e,max}$	28,0	28,1	27,7	26,4	26,2	32,1	24,3	23,9	26,3	27,1	26,4	26,3
$\theta_{e,min}$	13,7	13,9	15,0	15,4	14,6	12,1	11,2	10,8	12,3	13,3	14,0	13,5

Grafiek 8.7: Verloop binnen- en buitenluchttemperaturen in Nairobi



Tabel 8.5: Maandgemiddelde minimale binnenluchttemperaturen in de koepelwoning in Nairobi, Kenia

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
zonder adobe	13,7	13,9	15,0	15,4	14,6	12,1	11,2	10,8	12,3	13,3	14,0	13,5
+ 10 cm adobe	17,9	18,1	18,7	18,9	18,0	16,0	15,3	14,9	16,2	17,4	17,4	17,2

8.4 Pottuvil, Sri Lanka

8.4.1 Klimaat en ligging

Sri Lanka ligt in de tropische gordel. De buitentemperatuur heeft dus gedurende het hele jaar een hoge waarde. Deze bedraagt ongeveer 27 °C.

Doordat Pottuvil gelegen in aan de kust zorgt de frisse oceaanwind voor de nodige koeling. De wind kan hier dus ingezet worden om de binnenruimte af te koelen. In de bergen daalt de temperatuur met een halve graad per stijging van honderd meter. Het klimaat in Sri Lanka wordt beïnvloed door de bergketens en door de moesson.

Voor de berekening van het binnenklimaat in de betonnen koepelwoning zijn de klimaatgegevens gebruikt van het weerstation Batticaloa. Batticaloa is ook gelegen aan de kuststrook van Sri Lanka en ligt in dezelfde klimaatzone. Uit tabel 8.6 is af te leiden dat de buitenluchttemperaturen zeer hoge waarden aannemen. Vooral de maximale temperaturen zullen kunnen leiden tot oververhitting in het binnenklimaat van de betonnen koepelwoning.



Figuur 8.6: Ligging Pottuvil

Tabel 8.6: Jaarlijkse buitentemperaturen in Pottuvil, Sri Lanka

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	25,3	26,0	27,0	27,9	29,3	29,3	29,3	28,9	28,2	27,5	26,1	25,7
$\theta_{e,max}$	29,9	30,0	31,5	32,2	33,5	34,4	34,2	32,6	32,4	31,5	30,5	30,3
$\theta_{e,min}$	18,3	20,3	21,5	23,0	23,8	24,7	24,8	24,7	22,1	21,1	21,6	19,6

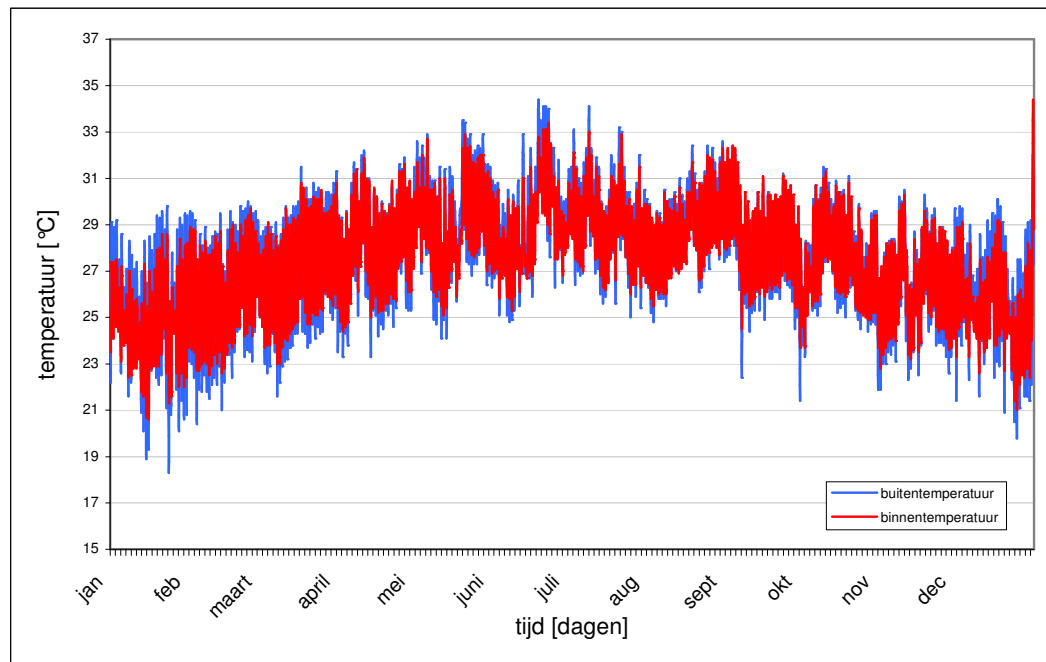
8.4.2 Binnenklimaat betonnen koepelwoning

Door de hoge buitenluchttemperaturen en zonne-irradiantie zullen de passieve maatregelen voor koeling in dit klimaat hoogst nodig zijn. De ingezette maatregelen zijn analoog met deze in Indonesië. De inzet van de koele oceaanwind bij nacht- en dagventilatie zal leiden tot een daling van de oppervlaktetemperaturen aan de binnenzijde van de constructie en dus een daling van de maximale binnenluchttemperatuur. In tabel 8.7 en grafiek 8.8 zijn de binnenluchttemperaturen weergegeven zonder inzet van passieve maatregelen met enkel gebruik van witte verf. De maximale binnenluchttemperaturen bij toepassing van grondventilatie en plaatsing van 10 cm isolerende adobe zijn weergegeven in tabel 8.8. Het verschil tussen de maximale waarden met en zonder adobe en grondventilatie bedraagt ongeveer 2°C. Door de andere passieve maatregelen voor koeling ook in te zetten, zal het verschil nog groter worden.

Tabel 8.7: Jaarlijkse binnenluchttemperaturen in witte betonnen koepelwoning in Pottuvil, Sri Lanka

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
$\theta_{e,gem}$	24,9	26,0	27,0	28,1	29,1	28,9	29,1	28,7	28,4	27,5	26,3	25,4
$\theta_{e,max}$	28,7	29,7	30,9	32,0	32,9	33,4	32,2	32,3	32,4	31,3	30,3	29,3
$\theta_{e,min}$	20,5	22,1	22,1	24,3	25,1	25,2	25,8	25,4	24,4	23,5	22,1	20,9

Grafiek 8.8: Verloop binnen- en buitenluchttemperaturen in Pottuvil



Tabel 8.8: Maandgemiddelde maximale binnenluchttemperaturen in koepelwoning in Pottuvil, Sri Lanka

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
witte koepel	28,7	29,7	30,9	32,0	32,9	33,4	32,2	32,3	32,4	31,3	30,3	29,3
adobe en grondventilatie	27,0	27,9	28,8	29,7	30,3	30,7	30,5	30,0	30,1	29,3	28,5	27,7

8.4 Besluit

Afhankelijk van het klimaat waarin de betonnen koepelwoning zich bevindt zullen er andere technieken moet worden ingezet om het binnenklimaat te verbeteren. Bij tropische klimaten zullen maatregelen voor passieve koeling moeten worden toegepast en in koude klimaten passieve verwarming. In beide klimaten zal de gebouwschil een zekere isolatiewaarde moeten bezitten om een stabiel en redelijk behaaglijk binnenklimaat te creëren.

In de tropische klimaten moet de zonnestraling zoveel mogelijk worden afgeschermd door luifels, lichte kleuren, bomen, andere gebouwen, dakconstructies en door toepassen van ventilatiesysteem. De nachtelijke afkoeling moet opgeslagen worden in de zware constructiematerialen.

In de koude klimaten moeten de ramen net gericht worden volgens de oriëntatie met de maximale zonnestraling en deze warmte moet zo lang mogelijk worden vastgehouden door toepassing van capacitieve constructiematerialen.

8.5 Selectie van een ideaal klimaat

Voor de toepassing van de betonnen koepelwoning zonder inzet van passieve maatregelen moet het buitenklimaat voldoen aan ideale voorwaarden.

Voor de selectie van een ideaal klimaat kan gebruik gemaakt worden van een aantal geologische kaarten: klimaat- en zonne-irradiantiekaarten. [26]

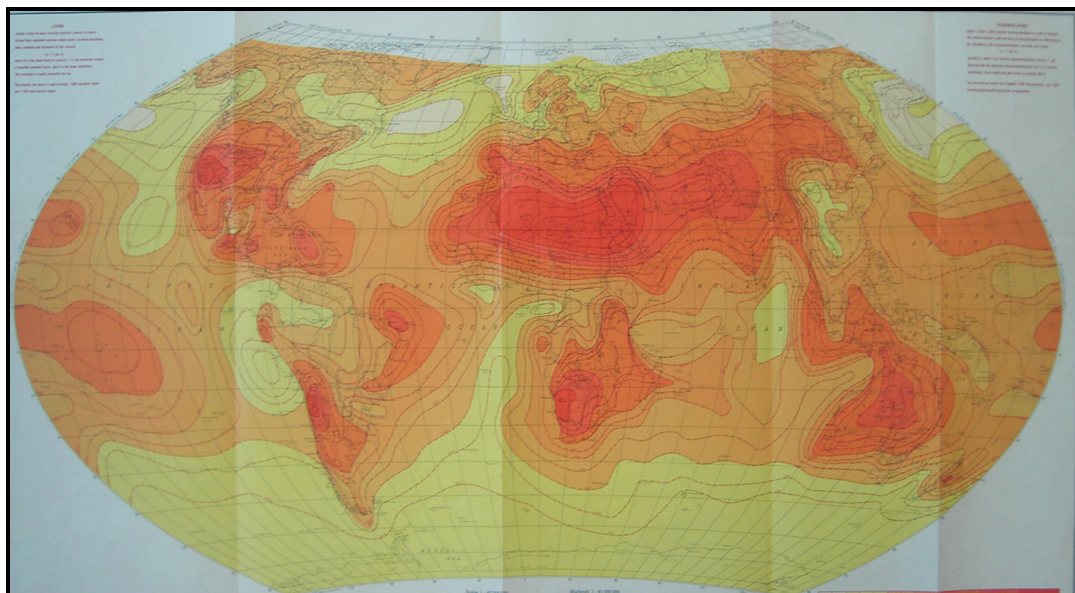
De zonne-irradiantiekaarten kunnen bestaan uit:

- Isolijnen: lijnen van gelijke zonne-irradiantie [$\text{kcal}/\text{cm}^2\cdot\text{jaar}$]
- Isohelen: lijnen van gelijke zonnestralingsduur [h]

In figuur 8.7 zijn de jaarlijkse totale uren zonne-irradiantie weergegeven.

De zonne-irradiantie is het totaal van directe en diffuse zonnestraling op een horizontaal vlak. De gegevens werden gegenereerd door de International Geophysical Cooperation van juli 1957 tot december 1959.

De hoeveelheid zonne-irradiantie is afhankelijk van de breedtegraad, de hoogte, de bewolking en de atmosferische turbulentie.



Figuur 8.7: Jaarlijkse totale uren zonne-irradiantie

Klimaatkaarten delen de wereld op in vijf grote klimaatzones, die vervolgens worden opgesplitst in verschillende subgroepen.

De vijf hoofdgroepen zijn:

- I : Polaire en sub-polaire zones
- II : Koude en gematigde Boreale zones
- III : Koele gematigde zones
- IV : Warme gematigde subtropische zones
- V : Tropenzone

De verschillende zones zijn weergegeven in figuur 8.8.

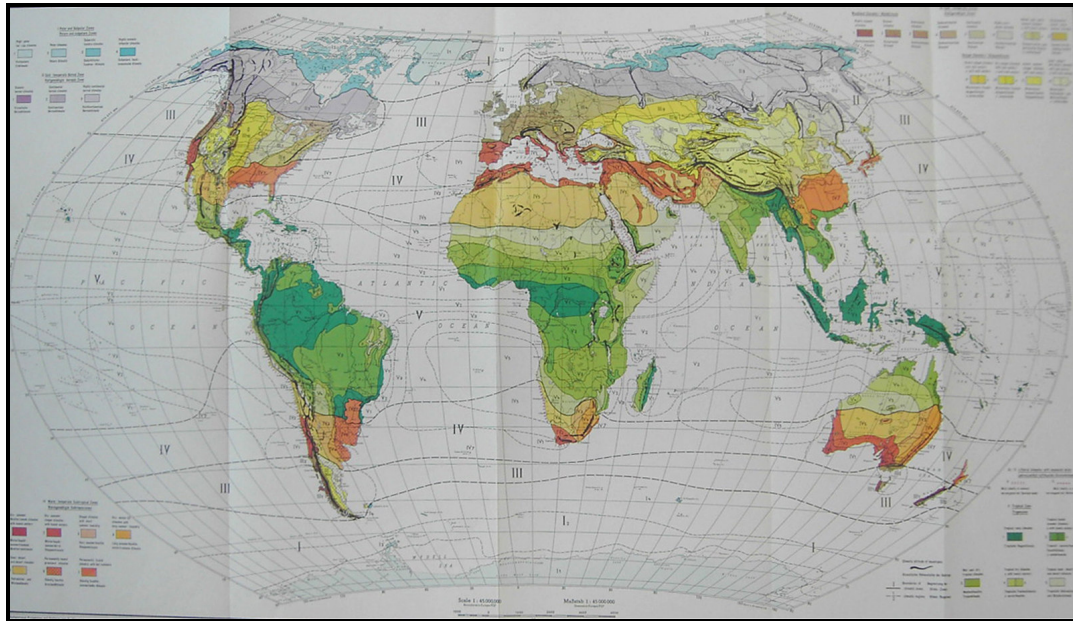
Na analyse van het klimaat in El Alto concluderen we dat een hoge zonne-irradiantie niet noodzakelijk een warm binnenklimaat oplevert. Door de ongeïsoleerde koepel zal zonnewarmte onvoldoende lang worden vastgehouden door de lage nachtelijke temperaturen. Voor een ideaal klimaat voor de betonnen koepelwoning zijn dus gematigde buitentemperaturen nodig in combinatie met een gematigde zonne-irradiantie. Het klimaat zal dus waarschijnlijk in een warme en gematigde subtropische zone gelegen zijn. In deze zone bevinden zich de vlakke en heuvelachtige landklimaten met milde winters. In de koudste maand bedragen de temperaturen 6°C tot 13°C in de zuidelijke hemisfeer.

De subgroepen voor deze zones zijn:

- 1. Droge zomer Mediterrane klimaten met vochtige winters
- 2. Droge zomer steppe klimaten met vochtige winters
- 3. Steppe klimaten met korte zomervochtigheid en droge winters
- 4. Droge winter klimaten met langdurige zomervochtigheid
- 5. Woestijn en half woestijn klimaten zonder harde winters
- 6. Altijd vochtige graslandklimaten
- 7. Altijd vochtige klimaten met hete zomers

Behalve subgroep 5, door de frequente nachtvorst, voldoen al deze klimaten aan de eisen. Deze klimaten bevinden zich in Zuid-Australië, Noord- en Zuid-Afrika, Oost-China (aan de Oost Chinese Zee), Midden Oosten (Pakistan, Afghanistan, Iran, Irak,...), Centraal Amerika (Mexico, Cuba, Haïti,...) en in Zuid-Amerika Noord-Argentinië en Uruguay.

Het is nog steeds niet zeker of de klimaten in deze landen werkelijk een ideaal binnenklimaat zullen opleveren, door de grote hoeveelheid van factoren die een rol spelen. De ideale voorwaarden zijn dat de buitentemperaturen binnen de comforteisen liggen (tussen 20°C en 24°C), zodat er geen kans is op oververhitting, en de nachtelijke temperaturen niet veel dalen. De aanwezigheid van water heeft een gunstige invloed op de tempering van de temperaturen.



Figuur 8.8: Klimaatkaart van de aarde

DEEL 3

STRUCTURELE ANALYSE

1. Inleiding

De sferische koepel is het meest gangbare type koepel sinds de oudheid. Het is de meest natuurlijke oplossing van technische intrinsieke waarde om een oppervlak te overdekken zonder tussensteunpunten, gebruik makend van een minimum aan materialen.

Wij zullen hier eerst het krachterspel en de typische terminologie van koepels m.b.v. de membraantheorie beschrijven. Met het oog op het begrip van de lezer gaan we hier voldoende op in. Dan maken we kennis met de meer intuïtieve aanpak van Heinz Isler en trekken we onze conclusies.

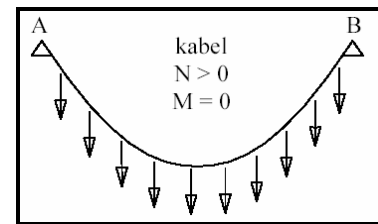
Hoewel buiging en wringing door de membraantheorie en door het geïdealiseerde gedachte-experiment van Isler worden weggedacht mag men hun effecten niet vergeten. Openingen en andere effecten verstoren de membraanwerking in de koepel en de uitwerking daarvan kunnen wij niet met de hand berekenen. Omwille van het belang van openingen in de bouwfysische optimalisatie van de koepelwoning is de kennis van hun invloed op het structureel gedrag van de koepel onontbeerlijk. Vandaar dat we uiteindelijk zullen overgaan tot de eindige elementenmethode (ESA-Prima Win) om het een en ander te simuleren. Met dergelijke numerieke methode kunnen we een beeld krijgen van het werkelijk gedrag van de sferische koepel, zoals hij bestaat, en zoals hij geoptimaliseerd is voortgekomen uit de simulaties van het thermisch gedrag.

2. Theorie: membraanspanningen in koepels [27], [28], [29], [30], [31]

2.1 Terminologie

2.1.1 Trek- en drukstructuren

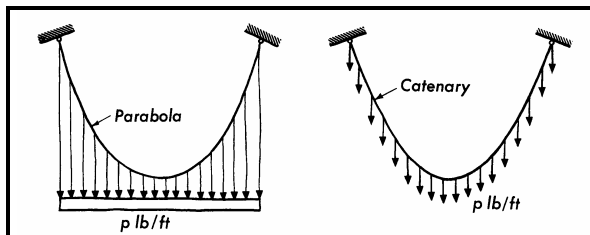
Kabels zijn vormactieve trekstructuren. Ze danken hun capaciteit aan de verdeling van materiaal in de ruimte. De buigzaamheid van kabels is een gevolg van hun kleine laterale afmetingen in verhouding tot hun lengte, en het betekent een beperkte weerstand tegen buiging: een kabel kan geen buigende momenten opnemen. Bij een geringe wijziging van de belasting past hun geometrie zich onmiddellijk aan de veranderde omstandigheden aan zodat in de nieuwe evenwichtstoestand alweer uitsluitend trekspanningen heersen. Zo zal een kabel, wanneer hij belast wordt met steeds meer gewichtjes, telkens een nieuwe evenwichtsconfiguratie aannemen, met rechte stukken tussen de puntlasten en richtingsveranderingen ter plaatse van de aangrijpingspunten ervan. Deze evenwichtsvorm heet een **funiculaire veelhoek** (Latijn: *funis* = touw; Grieks: *gonia* = hoek), het is de natuurlijke vorm vereist om belastingen onder trek te kunnen dragen. Als het aantal gewichtjes verdeeld langsheen de kabellengte toeneemt tot oneindig, verkrijgt de funiculaire veelhoek een toenemend aantal kleinere zijden. De veelhoek wordt een golvende funiculaire curve: de **kettinglijn** (figuur 3.1, figuur 3.2). Dit is de natuurlijke vorm aangenomen door een kabel met constante doorsnede, onder zijn eigen gewicht dat gelijk verdeeld is langsheen zijn lengte.



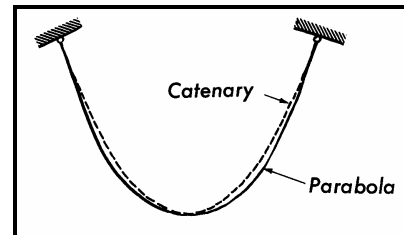
Figuur 3.1: Een kabel opgehangen in vaste punten A en B, neemt onder zijn eigen gewicht een kettinglijn aan

Als de kabel belast wordt met een horizontaal eenparig verdeelde belasting, wordt de funiculaire veelhoek een **parabool** (figuur 3.2).

Als een kabel zowel zijn eigen gewicht als een horizontaal eenparig verdeelde belasting draagt neemt hij een tussenliggende vorm aan (figuur 3.3).



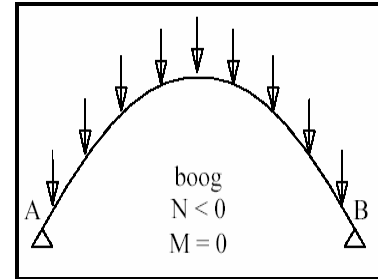
Figuur 3.2: Eenparig verdeelde lijnlasten op een kabel: parabool en kettinglijn



Figuur 3.3: Gelijkenis tussen parabool en kettinglijn

Een **boog** is essentieel een drukstructuur.

Voor elke set lasten is er een bepaalde ideale boogvorm, de funiculaire vorm, waarvoor de hele boog onder pure druk staat. Deze booggeometrie kan bepaald worden door de lasten aan een kabel te hangen en door de resulterende curve om te draaien (figuur 3.4) (cfr. adaptatie aan het buigend momentendiagram). De funiculaire boog is vrij van buiging en hoeft alleen maar normaalspanningen ten gevolge van druknormaalkrachten te weerstaan. Het woord 'funiculair' suggereert hier een afleiding uit de evenwichtsvorm van een touw of kabel.



Figuur 3.4: Door de kabel te inverteren om AB, en het materiaal te vervangen door steen, dat goed is in druk, verkrijgt men de ideale vorm van een boog onder zijn gewicht.

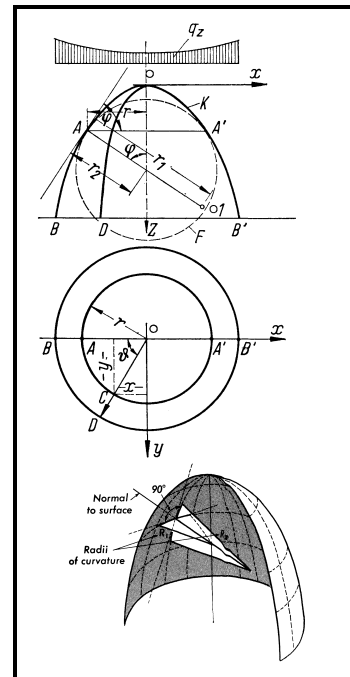
Soepele **membranen** ('vliezen') kunnen gezien worden als het ruimtelijke equivalent van flexibele kabels. Bij **funiculaire schalen** kan men dan een analogie onderkennen gelijkaardig aan de kabel-booganalogie.

2.1.2 Schalen en koepels

Schalen zijn dunne oppervlaktestructuren die gevormd worden door aan elk punt van een willekeurig oppervlak $F(x,y,z)=0$ een zekere dikte in de normaalrichting toe te schrijven.

Het middenvlak van een **omwentelingsschaal** is gevormd door de rotatie van een vlakke kromme K om een rechte lijn z in zijn vlak (figuur 3.5). De genererende kromme K noemt men de **meridiaan** en zijn vlak het meridiaan vlak; elk willekeurig punt A van de meridiaan beschrijft een cirkel AA' genaamd de **parallelcirkel**. We gebruiken deze terminologie om later een inzicht te krijgen in de interne krachten in een koepel.

Een gekromd oppervlak heeft een dubbele kromming (d.w.z. dat een raakpunt met een raakvlak raakt aan het constructieoppervlak via een raakpunt) en dus in elk punt A twee hoofdkromtestralen r_1 en r_2 (zie figuur 3.5). In het geval van een omwentelingsschaal is r_1 de meridiaankromtestraal op het beschouwde punt, en r_2 is de straal van een bol F rakend aan het middenvlak van de schaal langsheen een parallelcirkel die door hetzelfde punt gaat.



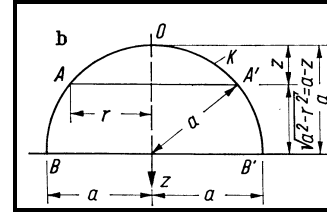
Figuur 3.5: Terminologie van schalen

Over het algemeen kan de vergelijking van de meridiaankromme OD geschreven worden als $z = f(r)$ en (daar $r = \sqrt{x^2 + y^2}$) meer specifiek als $z = f(\sqrt{x^2 + y^2})$.

Passen we dit toe voor **sferen** (schalen bekomen door omwenteling van een cirkel om zijn as) (figuur 3.6).

$$z = a - \sqrt{a^2 - r^2} = a - \sqrt{a^2 - x^2 - y^2}$$

Deze vergelijking legt de positie van elk punt vast door drie cartesische coördinaten (x, y, z) . Voor de oplossing van problemen in omwentelingsschalen is het gebruik



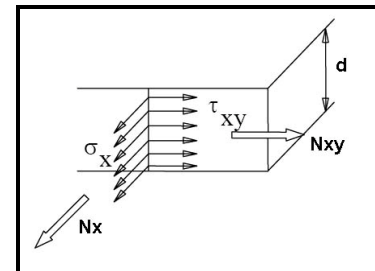
Figuur 3.6

van **hoekcoördinaten** (φ, ϑ) beter. In dergelijk coördinatensysteem wordt de positie van elk punt C van het middenvlak bepaald door zijn meridiaan en parallelcirkel. De hoek ϑ (geografische lengtegraad) wordt gemeten vanaf de referentiemeridiaan OB . φ (geografische breedtegraad) is de hoek ingesloten tussen de omwentelingsas en de normaal Ao , op het schaaloppervlak op het beschouwde punt. *Alle punten van dezelfde meridiaan zijn gedefinieerd door dezelfde hoek ϑ , en alle punten gelegen op dezelfde parallelcirkel hebben dezelfde hoek φ .*

2.2 Krachtwerking in koepels

2.2.1 Membraankrachten

In een membraanspanningstoestand zijn de spanningsresultanten: buigend moment, wringend moment en dwarskracht, alle gelijk aan nul. De spanningen in een doorsnede haaks op het middenvlak zijn evenwijdig met het raakvlak aan dat middenvlak en constant over de dikte van de schaal (figuur 3.7).



Figuur 3.7: Spanningen in de dikte van de koepel

De resultanten van die spanningen over de schaaldikte t worden **schaalkrachten*** genoemd:

$$N_x = \sigma_x \cdot d$$

$$N_y = \sigma_y \cdot d$$

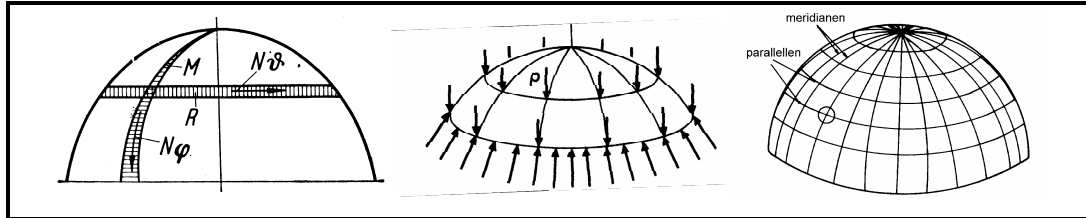
$$N_{xy} = \tau_{xy} \cdot d$$

Figuur 3.8 toont een meridionale strook, die onder spanningen staat door de normaalkracht N_φ (de **meridiaankracht**) en krachten overbrengt werkend in het

* In wat volgt worden voor de notatie van schaalkrachten de hoofdletters N en de kleine letters n door elkaar gebruikt. Beide hebben echter dezelfde betekenis. De subscripten x en y verwijzen naar θ en φ . Esa Prima Win gebruikt x en y .

meridiaanvlak. De ringvormige strook anderzijds kan enkel horizontale krachten overbrengen en staat onder spanningen door de normaalkrachten N_ϕ (hoepelkrachten).

x en y zijn de (lokale) hoofdrichtingen, rakend aan de hoofdkrommingslijnen.



Figuur 3.8

Figuur 3.9

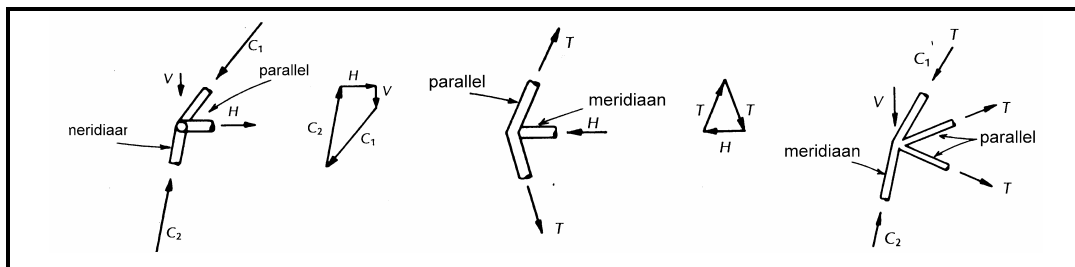
Figuur 3.10

2.2.2 Samenwerking van membraankrachten. Krachtenevenwicht.

De structurele werking van een omwentelingskoepel onder verticale axiaal-symmetrische belasting (zoals het eigen gewicht) is een gevolg van zijn geometrische karakteristieken. De meridiaansecties en de parallelsecties zijn de hoofdkromming en hoofdspanningssecties. De spanningen op deze secties zijn eenvoudige trek of druk gelijk verdeeld over hun smalle dikte. Figuur 3.9 toont deze spanningen ontwikkeld op een parallel. Ze zijn druk in de richting van de meridiaan en ze zijn constant langsheen de parallel, daar de koepel en de belasting axiaal-symmetrisch zijn.

Beschouw het netwerk van meridianen en parallellen beschreven op een koepel (figuur 3.10). Stel dat de belastingen op de koepel geconcentreerd aangrijpen op de knopen meridiaan-parallel en dat de meridianen en parallellen rechte lijnstukken vormen tussen de knopen.

In figuur 3.11 wordt het krachtenevenwicht onder een verticale belasting weergegeven van een vrij-lichaam-diagram bestaande uit een knoop van dit netwerk, en de verbonden uiteinden van meridiaan en parallel.



Figuur 3.11: Verticale projectie (meridiaan), horizontale projectie (parallel) en 3D zicht van een knoop.

Een verticale projectie stelt het evenwicht van de meridiaan voor. De uitwendige kracht (V) en de drukkracht in de meridiaan boven de knoop (C_1), die wordt uitgeoefend door het deel van de koepel boven het beschouwde niveau, worden in evenwicht gehouden

door de druk in een lagere tak van de meridiaan (C_2) en door een horizontale kracht (H) in het vlak van de parallel. Dit is de kracht uitgeoefend *door de parallel op de meridiaan*.

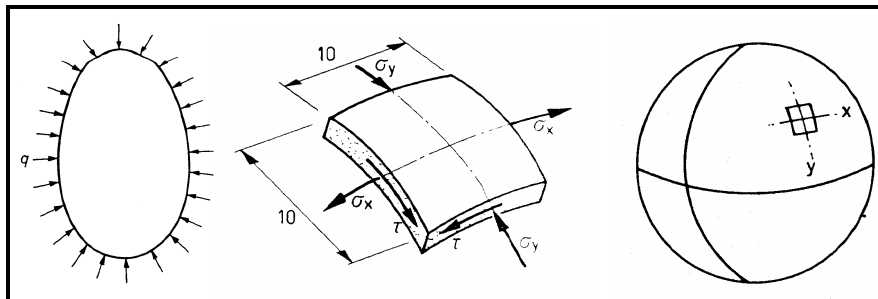
Een horizontale projectie, stelt het evenwicht van de parallel voor. Men ziet dat de kracht H , wanneer ze op de parallel wordt aangebracht (in tegengestelde zin, daar het nu de kracht is uitgeoefend *door de meridiaan op de parallel*), in evenwicht gehouden wordt door de kracht in de parallel (trek of druk naar gelang de zin van H).

2.2.3 Sterkte van schaalconstructies - Membraanspanningstoestand

In de natuur zijn er talloze schaalconstructies: eierschaal, schelp, schedel, enz. Een uitgeblazen kippenei verdraagt een gelijkmatige belasting van zeker 15000 N/m^2 (figuur 3.12 a). Een vergelijk met de sneeuwbelasting 500 N/m^2 en de windbelasting 700 N/m^2 toont hoe sterk de constructie is.

De **slankheid** van de schaal is de verhouding van de schaaldikte tot de kleinste kromtestraal:

$$\lambda = \frac{d}{R_{\min}}$$



Figuur 3.12: a) Uniforme belasting van een eierschaal; b) Schaalelement (100 mm^2) uit een bolschaal met membraanspanningstoestand

Een kippenei met $R_{\min} \approx 1 \text{ cm}$ en $d \approx 0,4 \text{ mm}$ heeft een slankheid $1/25$. Een moderne schaalconstructie is relatief dunner dan een eierschaal (waarden $1/100$ tot $1/500$). Voor een buigende structuur spreken we van $1/40$.

Onze koepel met $R_{\min} = 3,10 \text{ m}$ en $d = 0,1 \text{ m}$ heeft een slankheid van $\lambda = 1/31$ en is daarmee redelijk dik (vergelijkbaar met de top van een eitje).

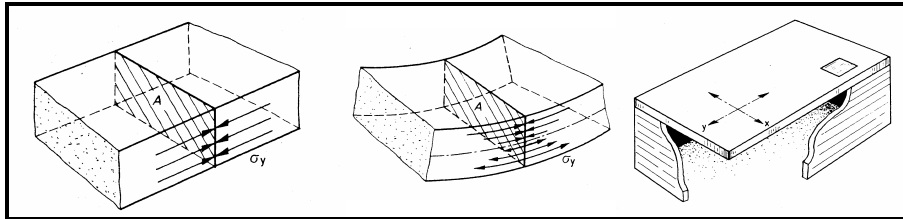
Schaalconstructies zijn dus zeer economisch qua materiaalverbruik. Dit heeft volgende oorzaken (figuur 3.12 b):

1. Het materiaal 'draagt' in twee onderling loodrechte richtingen X en Y .
2. Ten gevolge van het gekromde oppervlak wordt de gelijkmatige belasting hoofdzakelijk via normaal- en schuifspanningen afgevoerd.

Men zegt: in een schaal heerst een **membraanspanningstoestand**.

2.2.4 Het verschil tussen platen en schalen

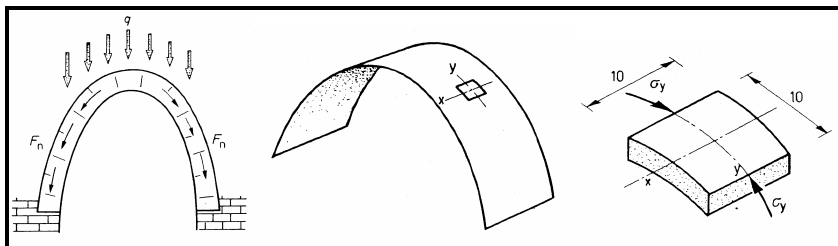
Dat schalen de gelijkmatige belasting hoofdzakelijk via normaal- en schuifspanningen afgevoerd werd vermeld in §2.2.3. Dit is een gevolg van het gekromde oppervlak. Inderdaad voldoet een vlakke plaat aan vier zijden opgelegd ook aan 1, maar niet aan 2: op een elementje van de plaat werken buigende momenten en dus buigspanningen (figuur 3.13).



Figuur 3.13: Membraandrukspanningen σ_y op vlak A van een schaalconstructie, t.o.v. buigspanningen σ_y op vlak A van een in twee richtingen dragende plaat

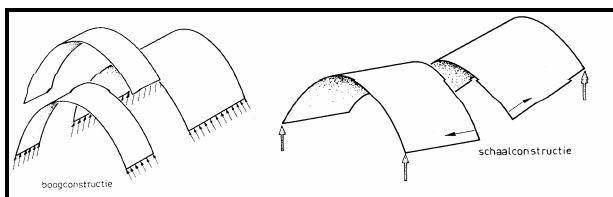
2.2.5 Het verschil tussen bogen en koepels

Het materiaal van een koepel 'draagt' in twee onderling loodrechte richtingen X en Y. Een boog niet, die voldoet aan 2, maar niet aan 1. Een boog voert de gelijkmatige belasting ook via normaalkrachten af, maar een boogelementje brengt slechts een normaalspanning σ_y over, het draagt niet in de x-richting ($\sigma_x=0$) (figuur 3.14).



Figuur 3.14: Een boog die men uitrekt, werkt niet hetzelfde als een boog die men om zijn as laat roteren.

Hierdoor kan een booggedeelte (of opening) uit de constructie genomen worden zonder dat dit de rest beïnvloedt (figuur 3.15). Bij een schaal kan dit niet.

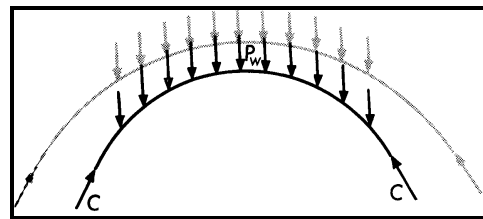


Figuur 3.15: Onafhankelijkheid van de meridianen in cilinderschalen

Inderdaad blijft de boogwerking behouden als de boog wentelt rond zijn as. Maar koepelstructuren gaan een stap verder. In tegenstelling tot bogen, die funiculair zijn voor één enkele belastingscombinatie, gedragen de meridianen van een koepel zich als een funiculaire boog *voor elke belastingscombinatie*; m.a.w. de belasting wordt gedragen zonder buigspanningen te verwekken.

Dit essentiële verschil in structureel gedrag komt doordat de meridianen ondersteund worden door de parallellen, die hun zijdelingse verplaatsing tegenwerken door hoepelspanningen op te wekken. Geïsoleerde bogen echter hebben geen zijdelingse ondersteuning. De bijdrage van de parallellen aan het funiculair gedrag van de koepel is bepaald door de vervormingen van de meridianen onder belasting.

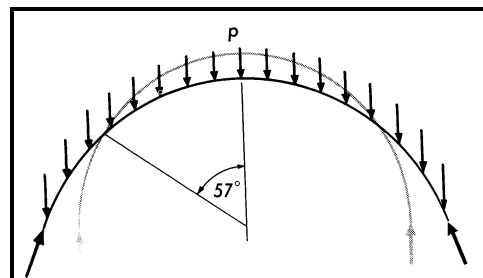
In een platte koepel (figuur 3.16) (diepte/overspanning verhoudingen vanaf $1/8$) bewegen de meridianen naar binnen onder inwerking van de belasting. Hierdoor verkorten de parallellen, zij worden samengedrukt en hun weerstand daartegen vermindert de vrijheid van de meridianen



Figuur 3.16: Platte koepel

om naar binnen te bewegen. Een platte koepel werkt dus als een reeks meridiaanbogen elastisch ondersteund door de parallellen. Het ontwikkelt *drukspanningen langsheen zowel meridianen als parallellen* en kan (theoretisch) bestaan uit materialen die geen trekspanningen kunnen opbrengen, zoals baksteen of beton.

In een hoge koepel (figuur 3.17) (diepte/overspanning verhoudingen tot $1/2$, hieronder valt onze koepel) bewegen de punten aan de kroon naar binnen onder inwerking van de belastingen, maar de punten aan de basis bewegen naar buiten.



Figuur 3.17: Hoge koepel

Daar verlengen de parallellen en zij ontwikkelen trekspanningen, die opnieuw deze beweging tegenwerken. Afhankelijk van het type belasting zal *een bepaalde parallel een constante lengte behouden, alle parallellen boven het neutrale vlak staan onder druk, al die eronder ontwikkelen trek*. Zie verder bij de berekeningen.

Waar de boogwerking bij een enkele boog toegeschreven wordt aan het bestaan van horizontale spatkrachten (t.g.v. de belemmering van de steunpuntverplaatsing), die functie bij koepelbogen door de horizontale parallellen tot stand komt. Een symmetrisch belaste boog wil opengaan en naar buiten dringen, wat

ook zijn diepte is. Bolkappen dragen verticale belastingen als het ware door talrijke meridionale bogen, die op hun beurt samengehouden worden door ringvormige banden.

De samenwerking tussen meridianen en parallellen verlenen de koepel haar grote stijfheid. De spanningen ontwikkeld door een koepel zijn zuiver druk of trek, en de corresponderende vervormingen zijn zeer klein. De verhouding tussen de doorbuiging van de top en de overspanning, is een grootte-orde 10 kleiner dan bij een buigstructuur als bv. een balk. De buitenwaartse verplaatsing van de koepel aan zijn omtrek is nog kleiner. De rotatie van de omtrek – de richtingsverandering van de meridianen – is ook heel beperkt. De (buig)stijfheid van cirkelkoepels verklaart dus waarom hun dikte mag gereduceerd worden tot zeer kleine waarden.

3. Eenvoudige problemen van omwentelingsschalen [27], [30]

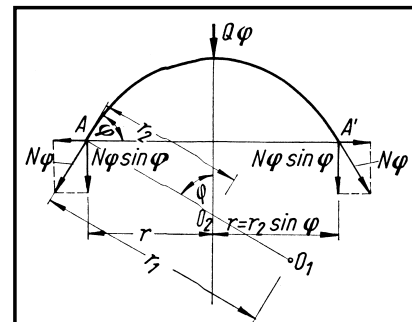
3.1 Wiskundige uitdrukking van de membraanwerking

We beperken de bepaling van de interne krachten tot schalen onder axiaalsymmetrische belastingen. Deze belastingtoestand wordt verkregen door rotatie van een symmetrische belaste meridionale strip rond de schaal-as. Dan is elk meridiaanvlak een symmetrievlak, en dus vrij van schuifkrachten: $N_{\varphi\theta} = N_{\theta\varphi} = 0$. Daarom besluiten we dat omwentelingsschalen onder axiaalsymmetrische belasting enkel normaalkrachten overdragen. In wat volgt onderstellen we ook dat de randvoorwaarden geen storend effect op de membraanspanningstoestand teweeg brengen.

3.1.1 Bepaling van de meridiaankrachten N_φ

Zij Q_φ de verticale component van de totale belasting werkend over een willekeurige parallelcirkel AA' (figuur 3.18). Deze moet in evenwicht gehouden worden door de verticale componenten van de normaalkrachten N_φ werkend langs de omtrek van AA' zodat:

$$2\pi r N_\varphi \sin \varphi + Q_\varphi = 0$$



Figuur 3.18: Bepaling van de meridiaankrachten

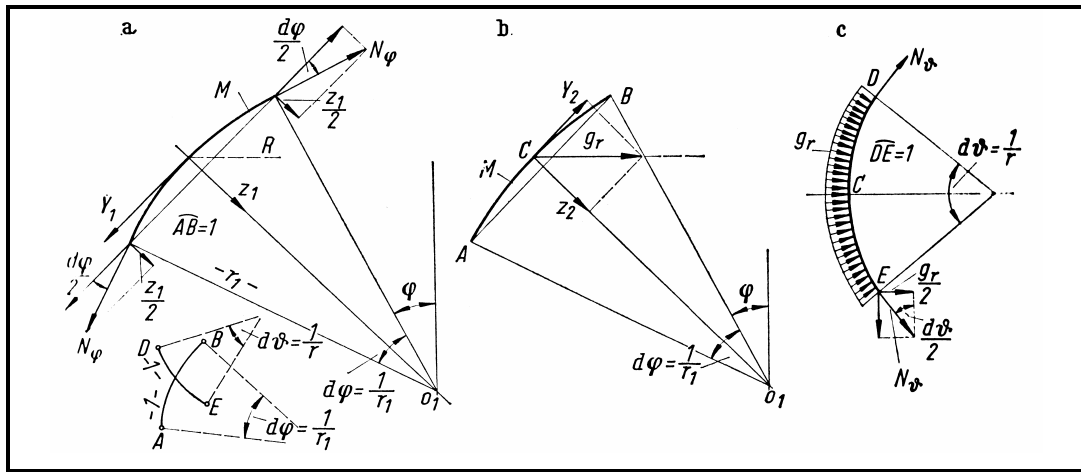
of
$$N_\varphi = \frac{-Q_\varphi}{2\pi r \cdot \sin \varphi_\varphi}$$

met $r = r_2 \sin \varphi$ wordt dit

$$N_\varphi = \frac{-Q_\varphi}{2\pi r_2 \cdot \sin^2 \varphi_\varphi} \quad (a)$$

3.1.2 Bepaling van de hoepelkrachten N_φ

De belasting werkend in een eenheidsoppervlak van het schaaloppervlak wordt opgesplitst in twee componenten, een tangentiële (Y) en een loodrechte (Z) (figuur 3.19).



Figuur 3.19: Bepaling van de hoepelkrachten

De figuur toont twee infinitesimale stroken van het schaaloppervlak, een meridiaan ($M = A B C$) en een ringvormig ($R = D C E$), beide met lengte en breedte gelijk aan de eenheid. De belasting wordt ten dele gedragen door de meridiaan (Y_1, Z_1) en ten dele door de ringvormige strook ($-Y_2, Z_2$), en de volgende relaties gelden:

$$\begin{cases} Y_1 - Y_2 = Y \\ Z_1 + Z_2 = Z \end{cases} \quad (b)$$

Uit figuur 3.19a volgt dat
$$N_\varphi = -\frac{Z_1 \cdot 1}{2 \sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right)}$$

en daar $\sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right) = \frac{d\varphi}{2}$ hebben we (met $d\varphi = 1/r_1$):

$$\begin{cases} N_\varphi = -Z_1 \cdot r_1 \\ Z_1 = -\frac{N_\varphi}{r_1} \end{cases} \quad (c)$$

In figuur 3.19b ziet men dat de belasting gedragen door de ringvormige strip R gelijk is

aan $g_r = \frac{Z_2}{\sin \varphi}$, en de hoepelkracht N_ϑ is dan (figuur 3.19c):

$$\begin{cases} N_\vartheta = \frac{-g_r \cdot 1}{2 \sin\left(\frac{d\vartheta}{2}\right)} = -Z_2 r_2 \\ Z_2 = -\frac{N_\vartheta}{r_2} \end{cases} \quad (d)$$

Substitutie van de Z_1 en Z_2 waarden van de vergelijkingen (c) en (d) in (b) geeft:

$$\begin{cases} Z = Z_1 + Z_2 = -\frac{N_\varphi}{r_1} - \frac{N_\vartheta}{r_2} \\ \text{of: } \frac{N_\varphi}{r_1} + \frac{N_\vartheta}{r_2} = -Z \end{cases} \quad (e)$$

Met andere woorden: de membraanspanningstoestand in een omwentelingsschaal onder axiaalsymmetrische belasting is enkel mogelijk wanneer vergelijkingen (a) en (e) voldaan zijn. Voor onze bolkap zijn de hoofdkromtestralen aan elkaar gelijk en constant over de volledige uitgestrektheid: $r_1=r_2=r$. Vergelijkingen (a) en (e) worden herleid tot:

$$\begin{cases} N_\varphi = \frac{-Q_\varphi}{2\pi r \cdot \sin^2 \varphi} \\ N_\varphi + N_\vartheta = -rZ \end{cases} \quad (f)$$

Het verband tussen N_φ en N_ϑ uitgedrukt in het tweede deel van (f) noemt men de 'vliesvergelijking'.

Een uitdrukking voor Q_φ wordt als volgt gevonden (figuur 3.20). De verticale component van de belasting is

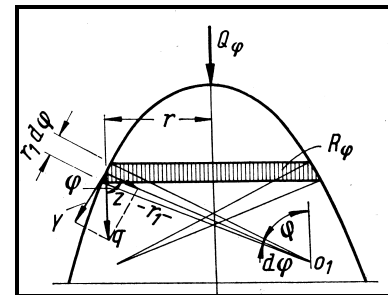
$$q = Y \sin \varphi + Z \cos \varphi$$

en het element R_φ van de strook draagt de verticale belasting

$$dQ_\varphi = 2\pi r_1 d\varphi (Y \sin \varphi + Z \cos \varphi) = 2\pi r_1 r_2 \sin \varphi (Y \sin \varphi + Z \cos \varphi)$$

De totale verticale belasting Q_φ is dus:

$$Q_\varphi = 2\pi \int_0^\varphi r_1 r_2 \sin \varphi (Y \sin \varphi + Z \cos \varphi) d\varphi$$



Figuur 3.20

3.2 Vaak voorkomende belastingsgevallen in sferische schalen

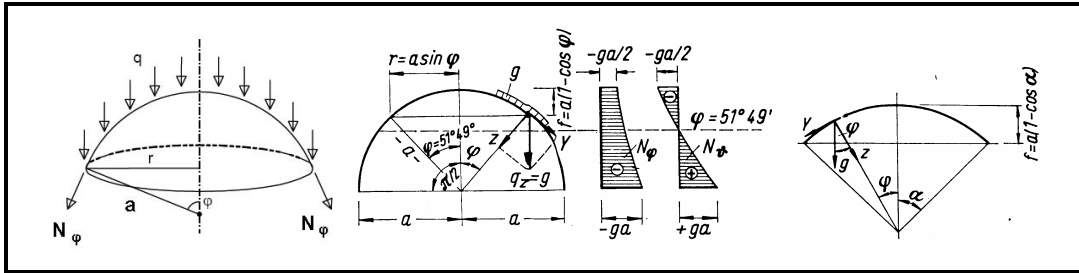
3.2.1 Uniforme gravitaire belasting per eenheid van schaaloppervlak: 'eigen gewicht'

Zij q_z de verticale belasting per eenheidsoppervlakte. Voor het eigengewicht is $q_z = g$:

$$g = Y \sin \varphi + Z \cos \varphi$$

Met de notaties van figuur 3.21 ($r_1=r_2=a$, $\alpha=\varphi_{\max}$) vindt men voor de belasting Q_φ :

$$Q_\varphi = 2\pi \int_0^\alpha a \cdot a \cdot g \sin \varphi \cdot d\varphi = -2\pi a^2 g (\cos \alpha - 1) \quad (g) \quad (9)$$



Figuur 3.21: Koepel belast door eigen gewicht

In dit geval zijn de belastingscomponenten:

$$\begin{cases} Y = g \sin \varphi \\ Z = g \cos \varphi \end{cases}$$

Uit vergelijking (g) volgt dat de verticale component van de totale belasting Q_φ gelijk is aan $2\pi g a^2 (1 - \cos \varphi)$ en bijgevolg, zijn de interne krachten N_φ en N_θ van vergelijking (f) gelijk aan ($0 \leq \varphi < 180^\circ$):

$$\begin{cases} N_\varphi = \frac{-2\pi g a^2 (1 - \cos \varphi)}{2\pi a \cdot \sin^2 \varphi} = -ag \frac{1}{1 + \cos \varphi} \\ N_\theta = -aZ - N_\varphi = -g \cos \varphi \cdot a + \frac{ga}{1 + \cos \varphi} = -ag \left(\cos \varphi - \frac{1}{1 + \cos \varphi} \right) \end{cases} \quad (h) \quad (10)$$

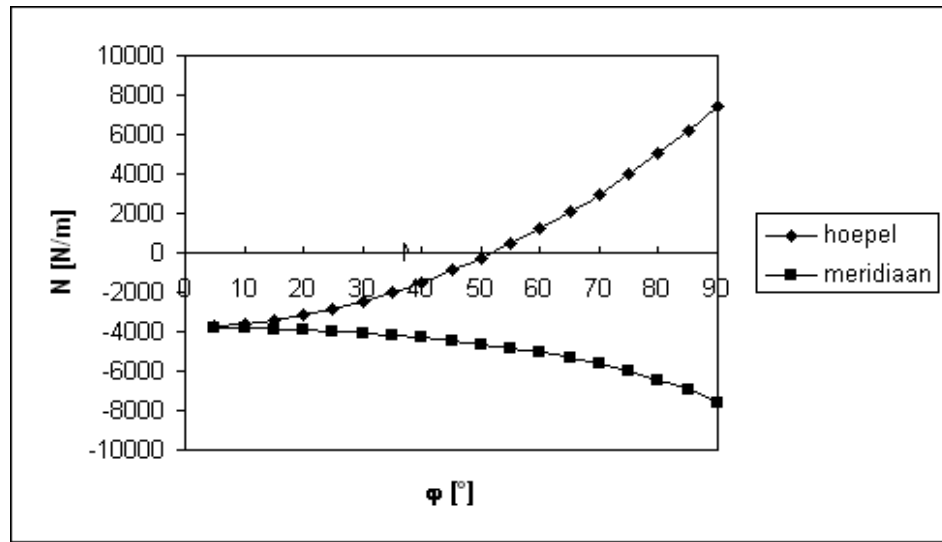
De interne krachten in onze betonnen koepel met dikte 0,1 m worden dan, met $g = m / A = \rho \cdot V / A = \rho \cdot d = 2500 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,1 \text{ m} = 250 \text{ kg/m}^2 = 2450 \text{ N/m}^2$:

$$\begin{cases} N_\varphi = -ag \frac{1}{1 + \cos \varphi} = -3,1 \text{ m} \cdot 2450 \text{ N/m}^2 \cdot \frac{1}{1 + \cos \varphi} = -7600 \frac{1}{1 + \cos \varphi} \text{ N/m} \\ N_\theta = -ag \left(\cos \varphi - \frac{1}{1 + \cos \varphi} \right) = -7600 \left(\cos \varphi - \frac{1}{1 + \cos \varphi} \right) \text{ N/m} \end{cases} \quad (11)$$

De interne krachten zijn afhankelijk van de hoek φ . Aan de koepelbasis, waar $\varphi = 90^\circ$ zijn de interne krachten in parallellen en meridianen gelijk: 7600 N/m.

Grafiek 3.1 toont de veranderlijkheid van de schaalkrachten in functie van φ . De meridiaankrachten zijn overal drukkrachten; de waarde van de hoepelkrachten vertoont een tekenomslag, met druk in het bovenste deel van de schaal en trek in het onderste deel. Uit vergelijking (h) volgt dat de hoepelkracht N_φ verdwijnt bij $\varphi = 51^\circ 49'$. Deze waarde legt de stand van het neutrale vlak vast.

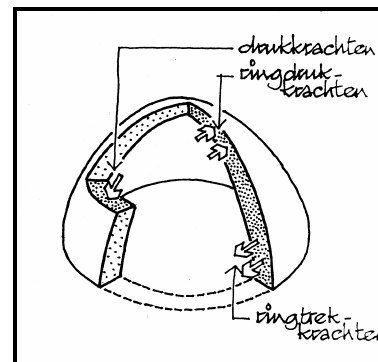
Grafiek 3.1: Krachtenverloop in de koepel in El Alto, onder eigen gewicht (theoretisch)



De maximale spanningen vindt men ook aan de onderzijde:

$$\begin{cases} \max \sigma_\varphi = -\frac{N_\varphi}{0,1m} = -76000 \text{ N/m}^2 = -0,076 \text{ N/mm}^2 \\ \max \sigma_\theta = 0,076 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

De maximale spanningen zijn dus gelijk maar tegengesteld aan de rand van een hemisfeer. Ze zijn 150 maal groter dan de druksterkte van beton (C12/15, $f_{ck} = 12 \text{ N/mm}^2$, $f_{cd} = 8 \text{ N/mm}^2$), en 20 keer zo groot als de treksterkte ($f_{ctm} = 1.6 \text{ N/mm}^2$). Onder zijn eigen gewicht is een koepel dus een zeer stabiele structuur. De wiskundige koepel kan bestaan zonder wapeningen (figuur 3.22).



Figuur 3.22: Een ongewapend koepelgewelf

In werkelijkheid moet men rekening houden met randvoorwaarden, en in ieder geval is er steeds een minimum wapening nodig om verandering van temperatuur, krimp en dergelijke op te vangen. Bovendien gaat men er in berekeningen van wapeningsdoorsneden vaak van uit dat het beton geen trek kan opnemen.

3.2.2 Gelijkmatic verdelde belasting per eenheid van horizontaal oppervlak: 'sneeuw'

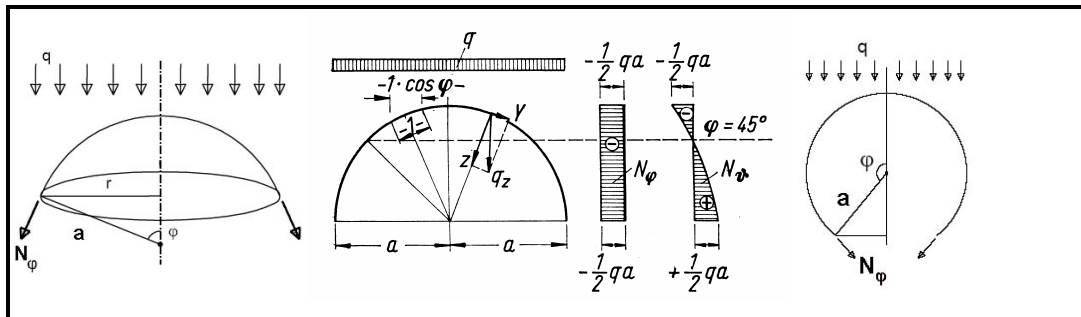
Voor een schaal onder uniforme horizontale belasting is $q_z = q \cos \varphi$.

De belastingscomponenten Y , Z en Q_φ zijn:

$$\begin{cases} Y = q \cos \varphi \sin \varphi \\ Z = q \cos^2 \varphi \\ Q_\varphi = q \pi r^2 = q \pi a^2 \sin^2 \varphi \end{cases}$$

en de interne krachten N_φ en N_θ volgen uit (f):

$$\begin{cases} N_\varphi = \frac{-q \pi a^2 \sin^2 \varphi}{2 \pi a \cdot \sin^2 \varphi} = -\frac{aq}{2} \\ N_\theta = -aZ - N_\varphi = -q \cos^2 \varphi \cdot a - N_\varphi = -\frac{qa}{2} \cos 2\theta \end{cases}$$



Figuur 3.23: Koepel belast door horizontaal uniform verdelde belasting: 'sneeuw'

In de figuur 3.23 wordt de verdeling van de interne krachten N_φ en N_θ getoond in functie van φ . De meridiaankracht blijft constant, de hoepelkracht verandert van teken bij $\varphi = 45^\circ$. Aan de kruin zijn de parallelkrachten gelijk aan de meridiaankrachten:

$$N_\varphi = N_\theta = -\frac{qa}{2}$$

Het resultaat is geldig voor koepels die kleiner zijn dan een hemisfeer $\varphi \leq 90^\circ$ als $180^\circ > \varphi \geq 90^\circ$ (rechts in figuur 3.23), dan geldt:

$$N_\varphi \cdot \sin \varphi \cdot 2\pi r + q \cdot \pi a^2 = 0 \Rightarrow N_\varphi = -\frac{qa}{2 \sin \varphi}$$

$$\text{en } N_\theta = -\frac{qa}{2 \sin^2 \varphi}$$

Aan de basis zijn, met een sneeuwbelasting van 500 N/mm^2 , $a = 3,1 \text{ m}$:

$$N_\varphi = -\frac{500 \text{ N/m}^2 \cdot 3,10 \text{ m}}{2} = -775 \text{ N/m}$$

$$\text{en } N_\theta = -\frac{qa}{2} \cos 2\varphi = -\frac{500 \text{ N/m}^2 \cdot 3,10 \text{ m}}{2} \cos 180^\circ = -775 \text{ N/m} \cdot (-1)$$

Aan de onderrand zijn weerom de spanningen gelijk maar tegengesteld. Beiden zijn ze 10 maal kleiner dan de interne krachten ten gevolge van het eigen gewicht. Telt men het effect van beide op dan nog zal de koepel stabiel zijn.

4. Constructief gedrag van bolkappen – Verstoringen van de membraantoestand [12], [27], [29], [32]

De *membraantheorie* zegt dat een koepel de belasting vooral door membraanspanningen draagt (druk, trek, schuif), omdat de ontwikkeling van schuifspanningen de koepel funiculair maakt voor alle belastingen. Daar wordt ondersteld dat de membraankrachten in het middenvlak van de schaal werken. In dat geval zullen de corresponderende membraanspanningen uniform verdeeld worden over de schaaldikte. De vervormingen kunnen dan rechtstreeks uit de membraankrachten berekend worden.

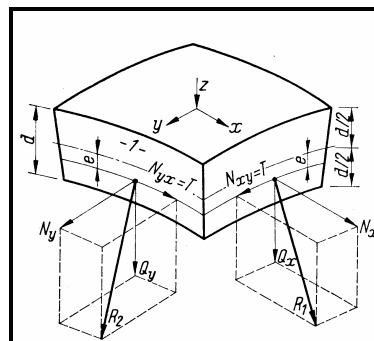
Geplaatst in realistische randvoorwaarden is het zeer moeilijk om de membraanvervorming toe te laten en blijft de membraantheorie niet volledig opgaan doordat er buigkrachten opgewekt worden.

De kleine dikte van betonnen bolkappen is ruim toereikend om de membraanspanningen op te nemen (d.i. ze zijn in de praktijk betrekkelijk klein), maar biedt veel minder weerstand tegen buigende momenten. De kans bestaat dat buigspanningen de aanvaardbare waarden overschrijden. Daarom moeten we de mogelijkheid op buigspanningen nagaan. Inderdaad blijkt in de praktijk dat de dikte van de betonnen schaal vaak bepaald wordt door buigstoringen, veeleer dan door de membraanspanningen ten gevolge van belastingen.

4.1 Buigspanningtoestand

4.1.1 De buigspanningtoestand nader bekeken

Figuur 3.24 toont een schaalement met trapezoidale vlakken $1 \cdot d$. We beschouwen ze als rechthoekig zijnde omdat de kromtestralen zeer groot zijn t.o.v. d . De resultante R_1 (R_2) van de interne krachten werkt op het vlakje in een punt met een **excentriciteit** e t.o.v. het middenvlak. Opsplitsen van R_1 (R_2) in drie componenten levert een normaalkracht N_x (N_y), een transversale kracht Q_x (Q_y), en schuifkrachten die gelijk zijn (T)



Figuur 3.24: Buigspanningen

als de vlakken onderling loodrecht zijn. De excentriciteit van de resultanten resulteert in twee buigende momenten, $M_x = N_x \cdot e$ $M_y = N_y \cdot e$, en een torsiemoment, $M_{xy} = M_{yx} = T \cdot e$. N_x , N_y en T zijn de **membraankrachten** en de overige krachten Q_x , Q_y , M_x , M_y , M_{xy} zijn **buigkrachten**. Als de resultanten in het middenvlak van de schaal werken, zullen de buigkrachten verdwijnen en ontstaat er een membraantoestand.

De buigstoring kan een smalle zone in de buurt van de storingsbron affecteren of een groot gebied van het schaaloppervlak. In het eerste geval zal de membraantoestand domineren terwijl de buigtoestand van ondergeschikt belang is, en vice versa. In dubbelgebogen oppervlakken zal de membraantoestand alleszins overheersen.

4.1.2 Primaire krachtweringen aan de ondersteuning

Het ontstaan van buigspanningen in koepels is meestal terug te brengen op de ondersteuning. Zij zullen de vervormingen t.g.v. membraankrachten tegenwerken en induceren op die manier buiging in de schaal. Aan de hand van ESA-Prima Win zal hier dieper op ingegaan worden.

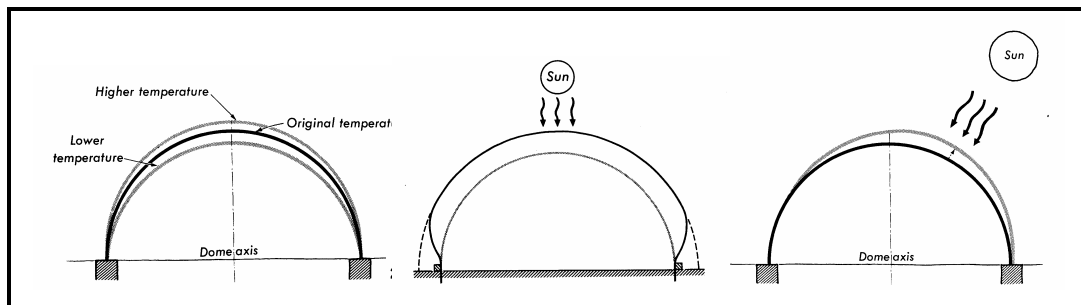
4.1.3 Secundaire krachtweringen

Verscheidene andere effecten willen de rand van de bolkap verplaatsen, en worden daarin op gelijkaardige wijze tegengewerkt door de oplegging. Ook hier gaat dit gepaard met buigstoringen.

Een koepel weerstaat goed verdeelde belastingen door membraanspanningen, maar reageert problematisch op **geconcentreerde lasten**. Alle belastingen die in staat zijn om een knik of plotse krommingsverandering in een dunne schaal te induceren - lijnlasten of puntlasten - zullen buigspanningen opwekken en kunnen tot verbrijzel

van de schaal leiden. Een gekookt eitje illustreert het verschil tussen verdeelde en geconcentreerde lasten: Het blijft goed zitten in de eierdop maar de schaal wordt gebroken door de impact van een lepeltje. Men moet hierbij ook denken aan de belastingsafdracht naar de funderingen: een doorlopende ondersteuning draagt dus de voorkeur.

Thermisch gedrag speelt vooral een rol in grote koepels. Door verandering van temperatuur wil de koepel uitzetten of inkrimpen. De ondersteuning die op constante temperatuur blijven, verhinderen de thermische beweging van de koepelrand (figuur 3.25). Daar omtreksverplaatsingen ten gevolge van thermische veranderingen meestal groter zijn dan die ten gevolge van belastingen, zijn de buigspanningen ten gevolge van thermische uitzetting normaal gezien ook groter. Meer ingewikkelde thermische belastingen ontstaan in een koepel door de dagelijkse thermische cyclus, wanneer de ene zijde door blootstelling aan zon meer opgewarmd wordt dan de andere. De koepelvorm verandert op onsymmetrische wijze en wordt ontregeld. De aldus geïnduceerde spanningen zijn moeilijk te evalueren, maar ze zijn alleszins hoog.



Figuur 3.25: Thermische bewegingen; Buigvervormingen aan ringverstijfde randen; Asymmetrische thermische verstoring

Verder zijn er nog andere verschijnselen, die kunnen optreden in betonnen schalen en een bijkomende invloed uitoefenen op het krachten spel in een koepel. Effecten van lange duur die minder belangrijk zijn dan primaire storingen, of zeer onvoorspelbare effecten die zich slechts zeer uitzonderlijk voordoen.

Kruip is het verschijnsel waarbij de vervormingen van een betonnen constructie onder permanente belasting niet-lineair toenemen in de tijd.

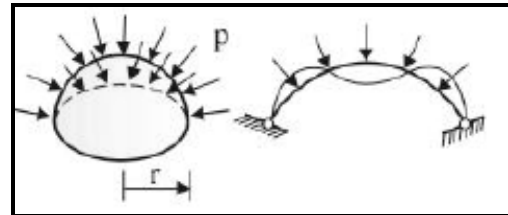
Krimpscheuren in beton ontstaan vaak bij het uitharden van beton, waarbij water ontsnapt en er trekspanningen ontstaan in de steenstructuur. In El Alto zijn er enorme temperatuurschommelingen tussen dag en nacht, wat nefast is voor het uitharden van beton. In dit opzicht is het gebruik van kant en klare adobe meer gerechtvaardigd. Het vochtig houden van het beton gedurende bv. 28 dagen is geen oplossing, want in de

koude nachten bevriest het water, en daar het volume van ijs groter is dan dat van water ontstaan er alsnog barsten.

Aardbevingen, storm en tornado's vormen volgens de Monolithic Dome Association geen gevaar voor hun uitvinding. Volgens hun berekeningen worden de ontwerpsterkten waarop de airform betonnen koepel ontworpen is, niet bereikt door aardbevingkrachten. Het zou een uitwendige kracht vereisen die vele malen groter is dan de aardbeving om de ontwerpwaarde van het beton zelf te bereiken. Ook aanstromend water dat tegen een koepel aanbotst, wordt gedeeltelijk afgeleid naar de weerszijden. De cirkelvormige balk onder de vloerplaat zit als tanden in de grond, waardoor de koepel niet zal wegglijden met de waterstroom. Daar er geen dak (geen roofing, dakpannen,...) is dat kan afwaaien, en geen verticale muren waar de wind op kan drukken, zijn koepels vrijwel tornado bestendig.

4.2 Instabiliteit van schalen - knik

Dikke schalen bezwijken door verbrijzeling wanneer de spanningen buitensporig groot worden. Bij dunne schalen zal de membraanspanning nooit de ontwerpsterkte van het beton overschrijden, ook al is de spanningsverdeling niet uniform. Dunne schalen (zoals elk dun structuurelement) zullen bezwijken door instabiliteit: plooien, builen, doorslag. Dit moet men zorgvuldig inschatten. Het kan leiden tot een verdikking van de schaal.



Figuur 3.26: Daar de schaal onder druk staat, moet het nagekeken worden voor knik.

4.2.1 De kritieke spanning

De **kritieke spanning** σ_{cr} voor knik bij schalen, wordt gegeven door de formule van **Zoelly**. Die zegt dat knik optreedt onder een uniforme belasting van:

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu)}} \cdot \frac{d}{a} = \frac{Ed}{a\sqrt{3-0.2}} = 0.65 Ed/a$$

Hierin zijn

E de elasticiteitsmodulus bij kortstondige belastingen of op lange termijn. Voor beton met sterkteklasse C12/15 bedraagt de secansmodulus $E = 26\,000 \text{ N/mm}^2$ [39]

d de dikte van de schaal

- a de plaatselijke kromtestraal
- v de coëfficiënt van Poisson kan, voor elastische rek, gelijk gesteld worden aan $v=0.2$ [39]. Wordt in het getrokken beton scheurvorming toegelaten, dan stelt men $v=0$. [33]

De knikspanning voor de koepel die het onderwerp uitmaakt van onze studie, wordt:

$$\sigma_{cr} = \frac{26000 \cdot 100}{3100\sqrt{2,4}} = 541 \text{ N/mm}^2$$

Voor een imperfecte koepel ligt de knikspanning veel lager. Met een veiligheidsfactor van 4, wordt de maximaal toelaatbare drukspanning in onze koepel:

$$\sigma_{max} = \frac{541}{4} = 135 \text{ N/mm}^2$$

Voor beton met sterkteklasse C12/15 bedraagt de karakteristieke druksterkte 12 N/mm² en de gemiddelde treksterkte $f_{ctm}=1.6$ N/mm² [39], σ_{max} ligt dus ver boven de materiaaleigenschappen. Onze koepel zal met andere woorden eerder bezwijken door breuk dan door knik. Het spreekt dan ook voor zich dat σ_{max} ook ver boven de maximale interne spanningen ligt.

4.2.2 De knikbelasting

De **knikbelasting** wordt gebruikt om het plaatselijk knikgevaar in een koepel na te gaan:

$$P_{cr} = c \cdot E \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2 \geq s \cdot P_{eff}$$

Hierin zijn

- c een factor die onder andere rekening houdt met imperfecties en de schaalvorm
- P_{cr} de kritieke belasting
- s een veiligheidsfactor
- P_{eff} de gebruiksbelasting

Of, volgend uit de formule van de kritieke spanning: $P_{cr} = 2\sigma_{cr} \frac{d}{a} = 35 \text{ N/mm}^2$

Vlakkere koepels bezwijken blijkbaar eerder door knik (a groter, dus d/a kleiner, $(d/a)^2$ zeer klein). De initiële dikte is in dezelfde mate ook zeer belangrijk. Een reductie van de dikte van 100 mm naar 80 mm zou de kniksterkte met ongeveer 40 % verlagen. Tijdens het gebruik zal de schaal zich vervormen en ook effecten van lange duur zoals krimp en kruip kunnen belangrijk zijn. Door deze effecten zullen de koepelranden naar

buiten bewegen, en zal de kromtestraal groter en de knikbelasting lager uitvallen. Een koepel is dus zeer imperfectie-gevoelig.

Toch mogen we besluiten dat er *in onze koepel geen knikgevaar* is, dankzij haar grote dikte/straal verhouding.

5. Eerdere toepassingen van ‘ballonnen’ in koepels – De intuïtieve aanpak van Heinz Isler [12]

5.1 Heinz Isler

Heinz Isler was ervan overtuigd dat niet het tekenbord of het wiskundig model, maar het fysisch model de methode was om schalen te onderzoeken. Zijn ontwerpfilosofie bevat termen als eenvoud, zuiverheid van concept en van fysische experimenten. Een minimum aan vereist volume en oppervlakte vergt een minimum aan energie en bouwmaterialen, en ook het aantal bouwonderdelen wil hij beperken. Zo heeft een koepeldak geen voegen, waardoor het waterwerend en ondoordringbaar is. Deze vereisten zitten duidelijk allen vervat in een monolithische koepelwoning, waar het minimaliseren van het aantal elementen wellicht tot een limiet is gebracht.

5.2 Vormgevingsprocessen

Isler is van mening dat zowel computerprogramma als handberekeningen gebaseerd zijn op onnauwkeurige hypothesen. De numerieke nauwkeurigheid geeft volgens hem een fout gevoel van veiligheid, want eigenlijk is alles onzeker bij betonnen koepels. Hij stelt dat het gedrag ervan afhankelijk is van de kwaliteit van het ontwerp en van het beton, de temperatuur waarbij het beton is gegoten, de volgorde van uitvoering en de ouderdom.

Tegenover het ontwerpen van gebouwen vertrekkende van een wiskundig berekende draagkracht en stijfheid, plaatst Isler een methode gebaseerd op het vinden van de juiste vorm door observatie gevolgd door het vervaardigen van schaalmodellen ter verificatie.

Isler beseft de efficiëntie van dubbelgekromde dunne betonnen oppervlakken t.o.v. platen (zie eerder), dat door het toevoegen van een kromming de draagkracht en de weerstand tegen vervorming enorm toenemen. Dit is waar Isler steeds naar op zoek was: constructieve vormen waardoor het minste materiaal zo wordt vormgegeven om

aan de aangrijpende krachten te weerstaan zodat er een minimum aan spanningen en vervormingen optreden, m.a.w. vormactieve constructies.

Isler zoekt voor elke constructie naar de meest geadapteerde vorm, die onder de dominante belasting slechts aan trek- of drukkrachten onderworpen is. Voor dunne betonnen schalen is de hoofdbelasting het eigen gewicht, deze is belangrijker dan om het even welke nuttige last, windbelasting of sneeuwbelasting. Deze zoektocht kan gebeuren volgens verschillende methodes. Isler combineert hiervoor een observatie van de natuur met fysische modellen. Zo haalt hij vrije vormen uit geïnverteerde hangende membranen. Een nat doek opgehangen tussen lokale steunpunten met dezelfde relatieve positie als deze in het uit te werken project, zal onder zijn eigen gewicht een vorm aannemen waarin uitsluitend trekspanningen heersen. Dit komt doordat een doek (nat of droog) geen weerstand biedt tegen buiging en druk. Door de vorm te fixeren (met zelfhardend polyesterhars bijvoorbeeld) en hem te inverteren zou de resulterende vorm slechts drukspanningen moeten weerstaan, en ideaal uit beton vervaardigd worden.

5.3 Krachten in de schalen

Isler stelt dat het overbodig is om computers te gebruiken vanwege het gemak waarmee krachten in schaaloppervlakken bepaald kunnen worden door eenvoudige berekeningen met de hand, of zelfs uit het hoofd. De aldus ingeschatte membraanspanningen zijn zo klein (15% en minder van de betonsterkte) dat hij ze niet moet bewijzen. Bovendien zijn er als de schaal dun genoeg is praktisch geen momenten, of ze zijn onbelangrijk. Isler beschouwde dit als eenvoudige statica en stelde dat het ware probleem zich op een ander niveau bevindt. Instabiliteit was datgene wat hij het meest vreesde.

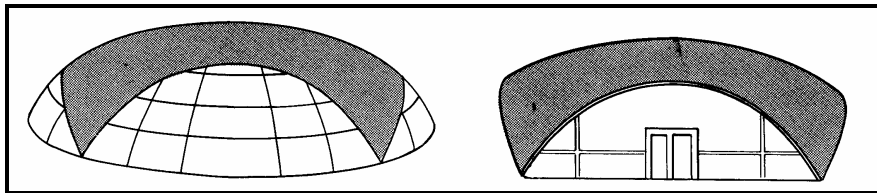
5.4 Constructie

Omdat er enkel druk is in de schaal moet er in theorie geen wapening gebruikt worden. Toch heeft Isler nooit een schaal gebouwd zonder wapening, want als er iets onverwachts gebeurd zal de ongewapende schaal snel breken.

Net als de Monolithic Dome Association kwam Isler op het idee om luchtvormen te gebruiken als herbruikbare bekisting, zoals reeds besproken in deel 1. De bestendigheid van koepelwoningen tegen aardbevingen wordt volgens Isler

veroorzaakt door de stijve vorm van de woning. De koepel zal wel glijden op de fundering (door de beweging van de zandgrond), maar dankzij de dubbele kromming zal hij niet breken.

De uitvinding van ballonnen vormen voor beton wordt wel meer geclaimd. Bijvoorbeeld door **Neff**, die **Noyes** en **Salvadori** inspireerde tot het bouwen van zogenaamde 'iglo-huizen' (figuur 3.27). Ook hier vinden we een opgeblazen ballon die een wapeningsnet ondersteunt, waarover een dunne laag beton gespoten is met een 'concrete gun'. [29]



Figuur 3.27: De iglo-huizen van Neff.

6. Eindige elementen analyse met ESA-Prima Win

6.1. Het programma [34]

6.1.1 Eindige elementen methode

ESA-Prima Win is een Windows toepassing voor de berekening en het ontwerp van constructies. De basis van de eindige elementen analyse (Finite Element Analysis of FEA) is de voorstelling van een structuur als een eindig aantal lijnen en tweedimensionale of driedimensionale onderverdelingen. Deze onderverdelingen worden eindige elementjes genoemd, ze zijn kritiek voor de nauwkeurigheid van de oplossing. De elementen worden verbonden aan zogeheten knopen. Samen vormen ze een eindig elementen model van een structuur of een structureel element.

Het werkelijk gedrag van de structuur moet dan in wiskundige termen uitgedrukt worden. Zo bekomt men een analytisch model. Het eigenlijke gedrag is over het algemeen zeer complex en een analytisch model is dus een sterke vereenvoudiging. Om een verfijnd model te krijgen, moet de geometrie van de structuur goed ingevoerd worden, moet het materiaalgedrag goed gesimuleerd worden, moeten de ondersteuning en verbindingen gemodelleerd worden en moet men de externe belasting transformeren tot equivalente krachten die aangrijpen in de knopen.

Aldus kan FEA gebruikt worden om een structuur of structureel element, geconstrueerd uit eender welk materiaal met gekende mechanische eigenschappen, te onderzoeken.

Eindige elementen analyses spelen een belangrijke rol in onderzoek en ontwerp. Het levert redelijk nauwkeurige oplossingen en bereikt sneller en goedkoper resultaat dan grote laboratorium experimenten naar het voorbeeld van Heinz Isler.

6.1.2 Belangrijke opmerking m.b.t. de geldigheid van de resultaten

Door de afwezigheid van normen m.b.t. bouwvoorschriften in Bolivia, wordt voor alle berekeningen de Eurocode gevolgd. Dit betekent dat we uitgaan van “Europees gespecificeerd” beton, een ‘ongeldige’ berekeningsmethodiek (Combinaties, UGT, GGT, veiligheden,...), en dus Europees geïnspireerde resultaten en vereiste wapeningshoeveelheden.

6.2 Invoer

6.2.1 Geometrie

Een derde opmerking die we kunnen formuleren i.v.m. de nauwkeurigheid van de resultaten, betreft de invoer van een vereenvoudigde bolgeometrie als was het een samenstel van 2D segmenten.

ESA-Prima Win biedt wel de mogelijkheid een bolkap als geheel in te voeren, maar die valt niet eenvoudig te modificeren (onder andere door de openingen). Net zoals in Capsol vertrekken we daarom van een model in AutoCad, waarbij de parallelcirkels verdeeld worden in 32 delen, en de meridiaanbogen in 16. Aldus verdelen we een half boloppervlak in 256 segmenten. Men kan zich indenken dat deze benadering een grotere impact zal hebben op de resultaten dan in de bouwfysische analyse, niet in het minst omdat de gunstige continue kromming wegvalt en omdat de spanningen oplopen in de nabijheid van knikpunten. In tegenstelling tot de vloeiende membraanspanningen die er in werkelijkheid zullen optreden, zullen we in de analyse meer discontinuïteiten en spanningsophopingen tegenkomen. Ons eerste onderzoek in ESA-Prima Win zal dan ook zijn een vergelijking tussen de bolkap als één enkel 2D macro, t.o.v. de bolkap uit 256 ‘platen’. De bevindingen hieruit houden we indachtig bij het interpreteren van de verdere resultaten.

6.2.2 Ondersteuning

De ondersteuning van de koepel bestaat uit een continue cirkelvormige balk onder de koepelrand. De balk heeft een breedte van 30 cm, en zit 40 cm diep in de grond. Door de koepelwerking zelf is de constructie in feite zelfdragend, zowel in de radiale

als in de tangentiële richting. De functie van de balk ligt in het weerhouden van globale verplaatsingen van de koepel. Daarnaast is de constructie ook verbonden met een vloerplaat, die de relatieve beweging van de koepelrand in radiale richting weerstaat. Men kan dus stellen dat er in alle richtingen weerstand geboden wordt tegen de verplaatsingen:

- In de x-richting: Naast de funderingsbalk waaraan de koepel is vast gebetonneerd, levert de koepel in zijn eigen stabiliteit in de lokale x-richtingen. Een horizontale snede net boven de grond, toont een rigide ring, waarin optredende tangentiële trek-, en drukkrachten worden opgenomen door respectievelijk de wapening, en het beton.
- In de y-richting: De aanwezigheid van een vloerplaat, monolithisch aangestort aan de koepel, zorgt voor een weerstand tegen een radiaal naar buiten gerichte verplaatsing van de koepelrand. Deze beweging wordt ook verhinderd door de parallellen van de koepel zelf, en door de funderingsbalk.
- In de z-richting: De verticale reactiekracht wordt geboden door een schijfvormige funderingsplaat, die de belastingen afdraagt naar de grond.

Weerstand tegen rotaties:

- R_x , R_y en R_z : Rotaties worden niet weerstaan. Dit in de veronderstelling dat de koepel dus niet gewapend is.

6.2.3 Belastingen

Permanente belasting

Eigen gewicht

- Betonnen koepel: $\rho_{\text{gewapend beton}} = 2500 \text{ kg/m}^3$, met een macro dikte van 0.1 m geeft dit een oppervlaktelast van 2.5 kN/m^2 .
- Adobe koepel: $\rho_{\text{adobe}} = 980 \text{ kg/m}^3$ (aarde, gestabiliseerd a.h.v. 10% vlasleem) [22] ofwel 3.92 kN/m^2 voor een koepel met dikte 40 cm.

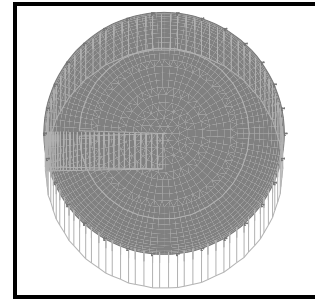
Deklaag adobe

- 30 cm adobe geeft een oppervlaktelast van 2.94 kN/m^2 .

Variabele belasting

Windbelasting

- Windkrachten worden gerepresenteerd door een kracht van 0.7 kN/m^2 in de globale Y-richting (figuur 3.28)
- Windbelasting werkt op korte termijn.
- Eurocode 1 lasttype: 'wind' (i.v.m. de partiële veiligheidsfactor).



Figuur 3.28: Bovenzicht koepel. Schematische voorstelling van de windbelasting die van boven naar beneden 'waait'.

Sneeuwbelasting

- Het gewicht van sneeuw wordt gerepresenteerd door een kracht van 0.5 kN/m^2 in de globale negatieve Z-richting.
- Sneeuwbelasting werkt op korte termijn.
- Eurocode 1 lasttype: 'sneeuw'

Inhoud van de belastingsgevallen

We gebruiken steeds de drie belastingsgevallen uit tabel 3.1 in onze berekeningen.

BG4 komt enkel tussen wanneer een betonnen koepel bedekt wordt met adobe.

Tabel 3.1: Belastingsgevallen

BG	Naam	Type	Coëfficiënt	Groep
1.	eigen gewicht	eigengewicht	1.00	wind groep sneeuw groep
2.	wind bg	gecombineerd BG	1.00	
3.	sneeuw bg	variabel	1.00	
4.	adobe bg	permanent	1.00	

6.2.4 Combinaties

EC eenv UGT

Code: De vereenvoudigde uiterste grenstoestand combinaties werden geïmplementeerd volgens [35]:

Inhoud van deze combinatie: BG1 BG2 BG3

De volgende combinaties worden gegenereerd:

$$\Sigma(1.35 \cdot G_{k,i}) + 1.5 \cdot Q_{k,i}$$

$$\Sigma(1.00 \cdot G_{k,i}) + 1.5 \cdot Q_{k,i}$$

$$\Sigma(1.35 \cdot G_{k,i}) + \Sigma(1.35 \cdot Q_{k,i})$$

$$\Sigma(1.00 \cdot G_{k,i}) + \Sigma(1.35 \cdot Q_{k,i})$$

Met de drie belastingsgevallen krijgen we een reeks van acht uiterste grens combinaties, weergegeven in tabel 3.2. EPW gaat elke van deze combinaties na en maakt, per grootte en voor elk scenario, een lijst van de extreme UGT combinaties.

Tabel 3.2 Uiterste combinaties van BG1, BG2 en BG3

Regels voor het genereren van uiterste combinaties	
1 :	1.35*BG1
2 :	1.00*BG1
3 :	1.35*BG1 / 1.50*BG2
4 :	1.00*BG1 / 1.50*BG2
5 :	1.35*BG1 / 1.50*BG3
6 :	1.00*BG1 / 1.50*BG3
7 :	1.35*BG1 / 1.35*BG2 / 1.35*BG3
8 :	1.00*BG1 / 1.35*BG2 / 1.35*BG3

EC eenv GGT

Code: De vereenvoudigde bruikbaarheidsgrenstoestand combinaties werden geïmplementeerd volgens [35]:

Inhoud van deze combinatie: BG1 BG2 BG3

De volgende combinaties worden gegenereerd:

$$\Sigma(1.00*G_{k,i}) + 1.00*Q_{k,i}$$

$$\Sigma(1.00*G_{k,i}) + \Sigma(0.9*Q_{k,i})$$

Met de drie belastingsgevallen krijgen we vier gebruikscombinaties (tabel 3.3).

Tabel 3.3 Gebruiks combinaties van BG1, BG2 en BG3

Regels voor het genereren van gebruikscombinaties	
1 :	1.00*BG1
2 :	1.00*BG1 / 1.00*BG2
3 :	1.00*BG1 / 1.00*BG3
4 :	1.00*BG1 / 0.90*BG2 / 0.90*BG3

6.2.5 Netverfijning

Er wordt gekozen voor een net met gemiddelde afmeting van 0.2 m. Dit levert een aantal vergelijkingen in de orde van een duizendtal.

6.3 Berekening

Er worden enkel lineaire berekeningen uitgevoerd. Kruip (niet-lineair) en krimp (stabieliteit) worden niet beschouwd.

6.4 Gecontroleerde scenario's

We hanteren 18 invoerscenario's, waarbij we telkens één randvoorwaarde wijzigen. Zo kunnen we focussen op de invloed van deze parameters: vorm, afmetingen, materiaal, openingen,... Rekening houdend met deze bevindingen geven we een structurele beoordeling van de bestaande toestand. Met de opgedane kennis kan het bouwfysisch gunstig gebleken concept vertaald worden naar een voorstel tot structurele revisie.

Aan de hand van scenario's 1 en 2 gaan we na wat de invloed is van de vereenvoudiging tot 2D macro's in ESA-Prima Win.

Door de scenario's 3, 4, 5 en 6 krijgen we een idee van de invloed van de vorm van de rotatiekromme. We kunnen dan een eerste stap zetten in de richting van een verbeterde koepel. Er wordt kort gekeken naar de invloed van de grootte op de koepel in scenario 7, daar er in El Alto ook twee grote koepels gebouwd zijn.

Wegens het bouwfysisch belang en de structurele impact, wordt ook de invloed van openingen in de koepel onderzocht. Scenario's 8 en 9 analyseren de bestaande ramen en deuren in de koepel zoals hij gebouwd is in El Alto.

De openingen worden in scenario's 10 en 11 afgerond, wat een natuurlijker krachterspel toelaat. Wanneer we dan een idee hebben van de ideale vorm van een opening gaan we in scenario's 12 na of de locatie van de openingen in de koepel ook een rol speelt. Scenario 13 combineert de gunstige vorm van de openingen met de gunstige locatie ervan naar warmtehuishouding toe.

In scenario 14 gaan we nog een stap verder en wordt nagegaan wat de impact van de 30 cm dikke adobelaag op de schaal is, (cf. bouwfysische analyse). In scenario 15 voegen we hier een aanpassing van de schaaldikte volgens de optredende krachten aan toe, een concept dat in de structurele wereld vaak wordt toegepast.

In de scenario's 16 en 17 wordt gekeken of er kan verholpen worden aan de buiging onderin de koepel, door de randvoorwaarden te veranderen. In scenario 16 wordt de scharnierende ondersteuning vervangen door een roloplegging in de radiale richting. Scenario 17 houdt rekening met het feit dat door de koepel te wapenen, de oorspronkelijk scharnierende ondersteuning toch weerstand zal bieden tegen rotaties. Men kan deze keuze van vaste steunpunten ook interpreteren als de inklemming van de koepelrand in de grond.

Ten slotte onderzoeken we in de laatste twee scenario's 18 en 19 of de koepel ook uit adobe kan vervaardigd worden. We starten eenvoudig met een volle adobe hemisfeer in scenario 18, en scenario 19 geeft een idee van de spanningen die zich voordoen in de optimale koepelgeometrie, als de koepel volledig uit adobe werd opgetrokken.

6.5 Scenario 1: Bolkap

Een eenvoudige '2D macro' met straal 3.1 meter wordt ingevoerd.

6.5.1 Reacties

Tabel 3.4 geeft in vetjes gedrukt de globale extremen (van alle combinaties) van reacties in steunpunten. De waardes worden doorgaans in knopen gegeven, echter in dit 2D macro-model is er slechts één referentieknoop.

Tabel 3.4: Reacties in de bolkap

Steunpunt	knoop	combi	Rx [kN]	Ry [kN]	Rz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	1751	4	0.66	-0.55	1.60	0.00	0.00	0.00
	1725		-0.66	-0.55	1.60	0.00	0.00	0.00
	1738	5	-0.00	0.22	2.49	0.00	0.00	0.00
	1764	4	0.11	-1.17	2.08	0.00	0.00	0.00
	4	6	-0.00	-0.31	3.01	0.00	0.00	0.00
	1738	3	-0.00	0.03	0.88	0.00	0.00	0.00

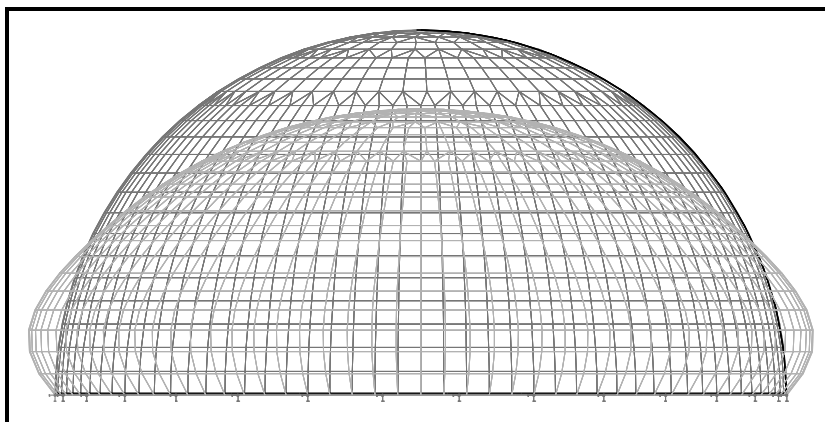
6.5.2 Vervormingen

EPW geeft zelf meteen na berekening maximale verplaatsing en maximale rotatie voor de belastingsgevallen (dus niet voor combinaties - UGT of GGT). Deze vervormingen zijn niet absoluut (m.a.w. het zijn de kleinste negatieve of grootste positieve waarden).

Maximale verplaatsing $U_z = -0.016$ mm BG1 aan de top.

Maximale rotatie $\text{Fix} = 0.018$ mrad BG1 knoop aan de onderrand.

BG1 (belastingsgeval 1: het eigengewicht) geeft de grootste vervormingen van de drie belastingsgevallen. Figuur 3.29 geeft een beeld van de vervorming t.g.v. het eigengewicht. Volgens de membraantheorie zijn de enige interne krachten die BG1 (uniform verdeelde verticale belasting) in de koepel induceert zijn volgens de membraantheorie axiale (tangentiële) krachten volgens de parallellen en meridianen. Deze interne krachten lopen op bij een toename van de hoek φ . Daar vervorming een gevolg is van interne krachten zouden de vervormingen hier ook met φ moeten toenemen. Dit komt erop neer dat de onderste parallel de grootste verplaatsing moet ondergaan. Dit gegeven is niet te zien op de vervormingfiguur 3.29, waar er aan de koepelbasis in tegendeel een terugval is.



Figuur 3.29: Vervorming in knopen t.g.v. BG1

De volledige reeks componenten van vervorming zijn U_x , U_y , U_z , F_{ix} , F_{iy} , F_{iz} . Dit zijn vervormingen volgens en rotaties rond de assen van het globale assenstelsel, dat zijn oorsprong heeft in het midden van de koepel (X-as naar links, Y-as van onder naar boven volgens de windrichting). De hierna volgende figuren beelden vervormingen in UGT uit.

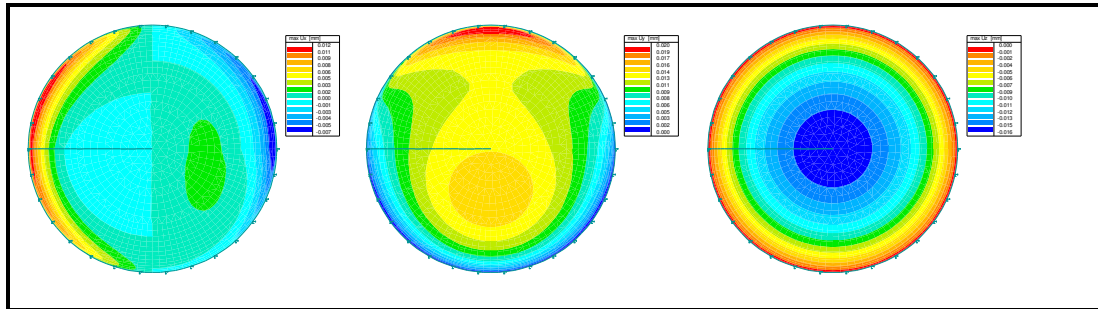
6.5.2.1 Verplaatsingen (figuur 3.30)

max U_x . Het eigengewicht en de sneeuwbelasting bepalen het verloop van deze figuur. Voor deze belastingsgevallen is de figuur voor max U_y dezelfde, maar gedraaid over 90° (het zijn immers axiaalsymmetrische belastingen).

De maximale verplaatsing t.g.v. een bepaalde UGT combinatie bedraagt 0.012 mm, links aan de rand, dit is namelijk in de richting van de positieve X-as, m.a.w. in dit punt geven de isobanden de werkelijke uitwijking van de rand weer.

max U_y . De grootste verplaatsing gebeurt bovenaan de tekening door de superpositie van het windeffect enerzijds en het gewicht en de sneeuwbelasting anderzijds. Door de verticale belasting willen de randen radiaal naar buiten bewegen volgens de membraantheorie, wat op die locatie gestimuleerd wordt door de wind. Onderaan de tekening wordt deze radiale uitzetting net tegengewerkt door de wind.

max U_z . De verticale verplaatsing is uitsluitend het gevolg van de verticale belastingen, en dan vooral van het eigen gewicht. De grootste verplaatsing is die van de kroon, 0.016 mm naar beneden.



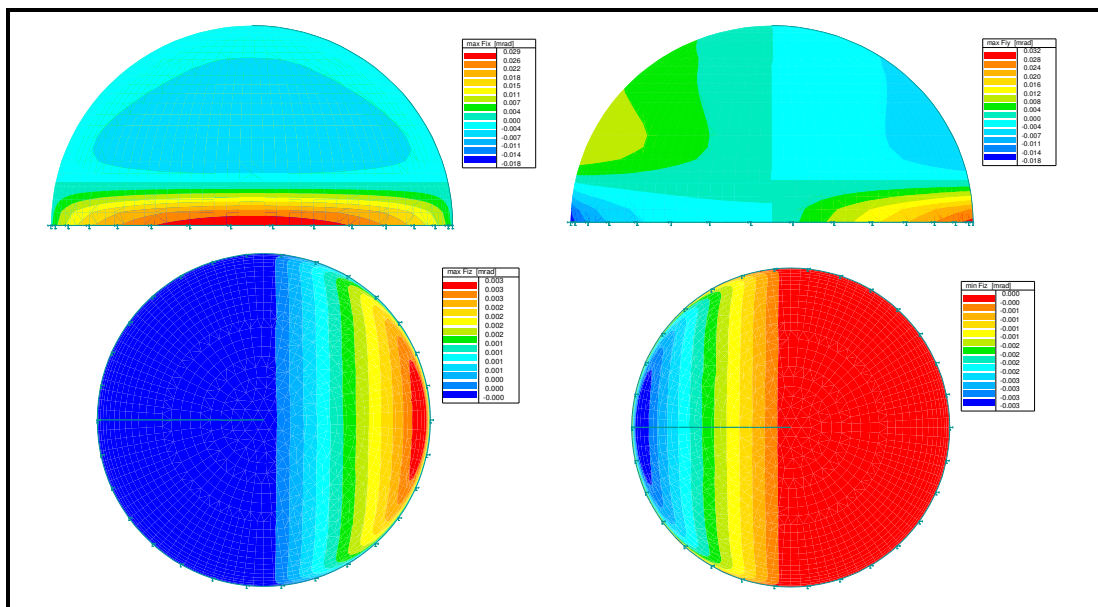
Figuur 3.30: Verplaatsingen in UGT: Max Ux, max Uy, max Uz

6.5.2.2 Maximale rotaties (figuur 3.31)

De eerste twee tekeningen in figuur 3.31 geven in isobanden de vervorming uit figuur 3.29 weer, in combinatie met de invloed van BG2 (wind) en BG3 (sneeuw). De buigvervormingen om de horizontale assen (X: naar rechts, Y: naar de lezer toe, d.i. ook de windrichting) weerspiegelen ook het randeffect aan de basis. Verderop zal deze onverenigbaarheid tussen theorie en realiteit verklaard worden.

Een zeer grote zone blijft volledig vrij van buigvervorming om de globale X-as. Dit is zo voor alle belastingsgevallen afzonderlijk, dus ook voor alle mogelijke combinaties.

De rotatievervorming om de Y as geeft een zelfde tekening (90° gedraaid), met dezelfde grootteordes qua vervorming. De tekeningen van **Fix** en **Fiy** zijn gelijkaardig voor de drie belastingsgevallen, met in schaal een doorwegend aandeel van het gewicht.



Figuur 3.31: Max Fix, max Fiy, max Fiz en min Fiz

De kleine minimale en maximale rotaties om de Z-as (laatste twee tekeningen van figuur 3.32) zijn volledig het gevolg van de wind, die op de figuren van onder naar boven werkt en daarbij aangrijpt op de volledige koepel.

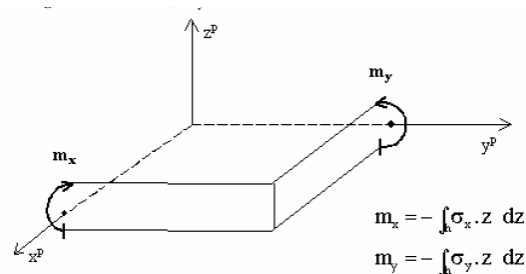
Opmerking: Beide figuren **Fiz** zijn gedefinieerd in het globale assenstelsel, met de oorsprong in het centrum van de koepelvloer. Vandaar de tekenomslag en de noodzaak om twee figuren (min en max Fiz) op te voeren om een volledig beeld te krijgen van de twee helften. De rotaties in de beide helften zijn immers gelijk maar tegengesteld. De isobanden hebben een verloop van minimale Fiz in de middellijn van de koepel naar maxima aan de uitersten. De verklaring daarvoor is de grote hefboomsarm die de windwerking t.o.v. de Z-as heeft aan de randen (3.1 m). (De wind werkt op deze plattegronden van onder naar boven). BG2 'duwt' op de schaal aan een zijde en 'trekt' als het ware aan de andere zijde. Dit vormt een goede benadering voor het effect van de werkelijk invallende wind op loef en lijzijde.

6.5.3 Interne krachten

6.5.3.1 Buiging

Hoewel er volgens de membraantheorie geen momenten bestaan in een koepel, treden er volgens EPW toch beperkte buigkrachten op. Daarom is het nuttig om kort deze krachten te definiëren. De basisgrootheden voor buiging zijn:

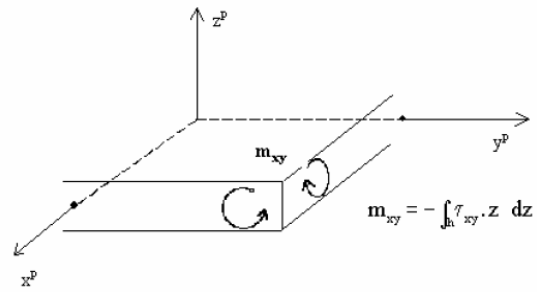
m_x, m_y buigmomenten



Voor homogene platen is de spanning op de positieve zijde $z=+h/2$:

$$\sigma_x = -m_x/W \quad \sigma_y = -m_y/W$$

m_{xy} torsiemoment

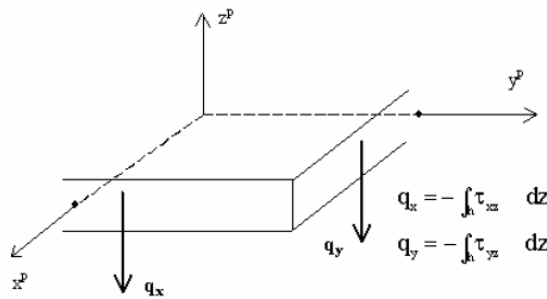


Voor homogene platen is de spanning op de positieve zijde $z=+h/2$:

$$\sigma_{xy} = -m_{xy}/W$$

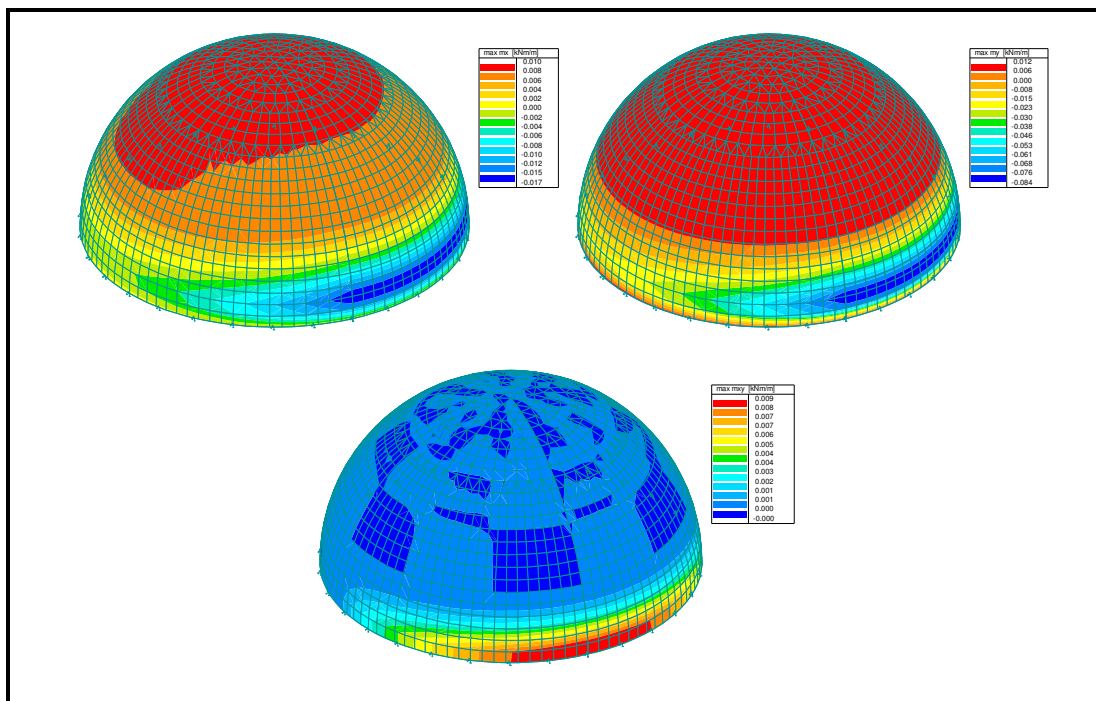
q_x, q_y

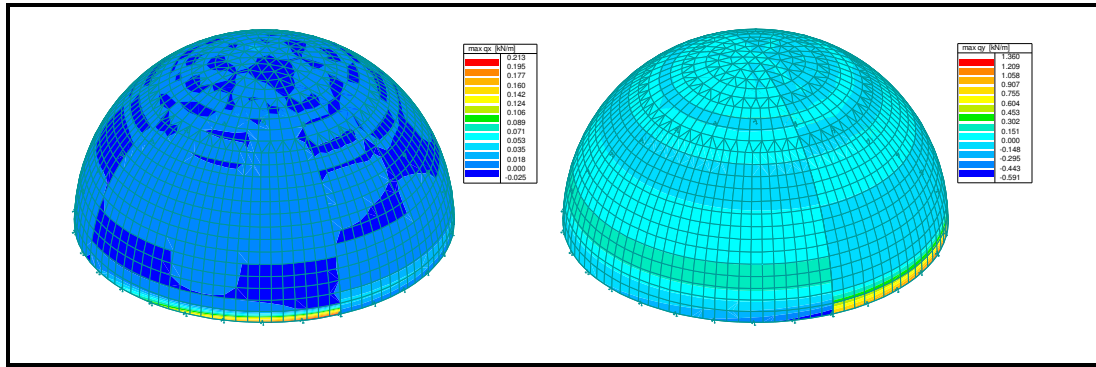
dwarskrachten



De horizontale component van de schuifspanning is $\tau_{xy}=q_{xy}/h$.

Figuur 3.32 geeft de maximale buigkrachten onder de UGT





Figuur 3.32: Max mx, max my, max mxy, max qx, en max qy onder de UGT

In een koepel geplaatst onder werkelijke randvoorwaarden, treedt er steeds buiging op. De theorie onderstelt dan wel dat de continue, membraire spanningsstroom niet verstoord of onderbroken wordt langs de begrenzingen, in realiteit gaat dit niet op.

Er is sprake van buigende momenten in de orde van tientallen Newtonmeters per meter (max mx en max my in figuur 3.32), die tot axiale spanningen leiden van een orde $(- 84 \text{ Nm/m} \cdot W \text{ met } W = h^2/6 = 0.00167 \text{ m}^2) \quad 0.2028 \text{ N/mm}^2$.

Torsie is er zeer weinig (maximaal 9 Nm/m) (max mxy figuur 3.32).

De grote dwarskrachten (max qx en max qy in figuur 3.32) geven aanleiding tot schuifspanningen in de dikte van de schaal. Deze schuifspanningen τ_{yz} zijn van een grootteorde $(1000 \text{ N/m} \div 0.1 \text{ m} =) 0.01 \text{ N/mm}^2$.

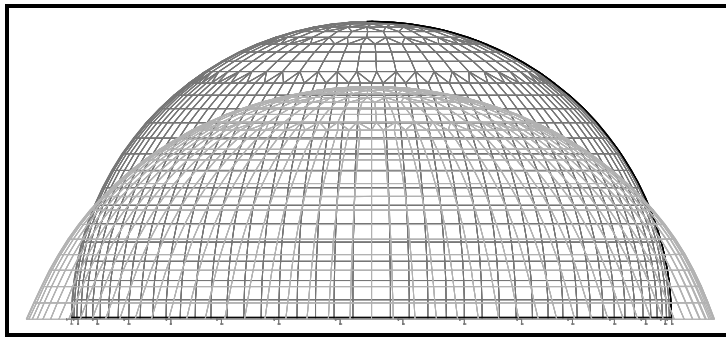
De compatibiliteit van de verplaatsingen is een belangrijke ontstaansoorzaak van buiging in de koepel. Ten gevolge van de membraanwerking voor een gegeven belasting zal een schaal aan haar rand radiale verplaatsingen willen maken (i.f.v. de krachten in de parallel), terwijl de kroon verticaal zal verplaatsen. In de krachtenanalyse werd stilzwijgend aangenomen dat koepels vrij zijn om deze minieme verplaatsingen te ondergaan. Inderdaad wordt de uitbuiging van de kroon niet verhinderd, hier bestaat dus een zuivere membraanspanningstoestand. Daarentegen worden de radiale bewegingen van de schaalbasis verhinderd door een vaste ondersteuning en de aanwezigheid van een gewapende vloerplaat, de rekken in de omtreksrichting zijn er nul (verplaatsingen X, Y, Z vast; rotaties Rx, Ry, Rz vrij). De invloed van deze vloerplaat is te vergelijken met die van een trekstang bij een boog.

Volmaakt star is een ondersteuning zelden, meestal zullen er toch vervormingen en verplaatsingen onder invloed van de reactiekrachten optreden, die dan opgelegd worden aan de schaalrand. Dus de randverplaatsingen van de schaal zijn nooit compatibel met deze van de ondersteunende constructie. De schaalbeweging aan de

rand wordt tegengewerkt wat leidt tot een verstoring van het membraire spanningsbeeld van de primaire krachswerkingen, dus tot buiging van de schaalwand.

De buigstoringen aldus ingeleid aan de omtrek dempen wel snel uit, dankzij de weerstand die de parallellen bieden. Terwijl de buigingsverplaatsingen van de meridianen groot zouden kunnen zijn gezien de kleine buigstijfheid van het materiaal, zijn de parallellen stijf, en zij staan zulke grote verplaatsingen niet toe. De stoorzones blijven dus beperkt tot de omgeving van de opgelegde randen, afhankelijk van $\sqrt{\lambda}$; om ze te beperken moet de schaal dunner gemaakt worden. Met $d = R/31$, zal de stoorzone zich uitstrekken tot 1 meter. De rest van de schaal zal effectief in een ongestoorde membraanspanningstoestand zijn.

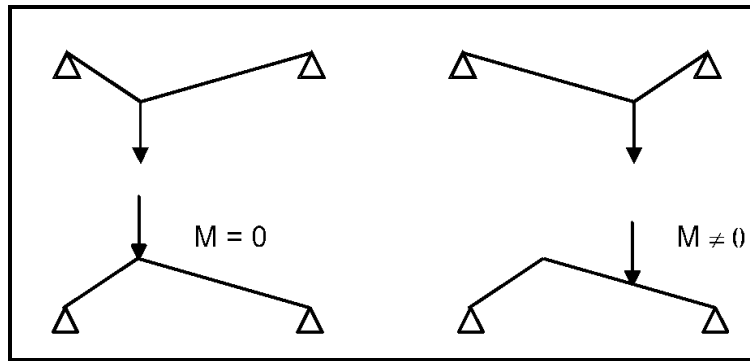
Stel dat de koepel wel radiaal zou kunnen verplaatsen door middel van een roloplegging, dan vervormt de koepel onder zijn eigen gewicht volgens figuur 3.33.



Figuur 3.33: Roloplegging in plaats van scharnierende steunpunten.

De randbuiging zal niet meer optreden, maar de koepelvorm die oorspronkelijk een hemisfeer was met verticale raaklijn aan de randen, wordt platter, waardoor de krachten niet meer verticaal de grond worden ingeleid. Deze ingreep heeft dus weerom storingen tot gevolg. We zullen op deze configuratie verder ingaan in §6.20 (scenario 16)

In werkelijkheid is een betonnen schaal ondersteund, en bovendien niet vormactief, waardoor deze per definitie buig- en wringstijf is. Het is immers geen dunne kabel. Daar hun geometrie gefixeerd is, gaat (een verandering van) de belasting niet gepaard met een zichtbare adaptatie van de vorm en wordt het ideale drukspanningsbeeld verstoord door effecten van buiging (figuur 3.34).

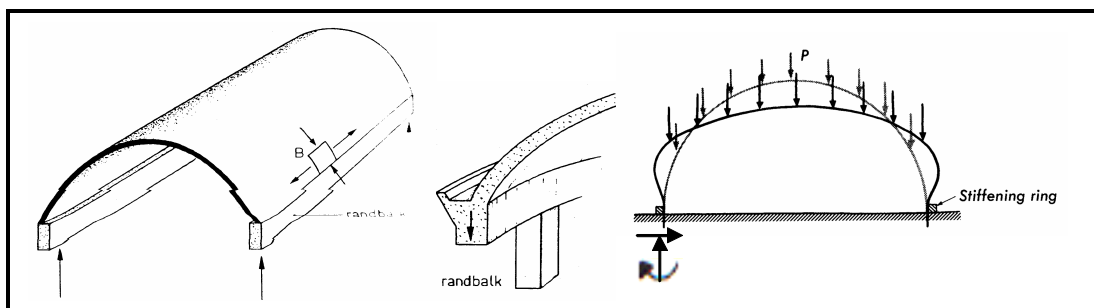


Figuur 3.34: Vormactieve kabels t.o.v. niet-vormactieve stenen constructies

Voor het bijzonder geval van een bolkap waarvan de basis met het neutrale vlak samenvalt, zijn er geen spanningen in de onderste parallel. De radiale verplaatsingen zijn dan onbestaande en men zou scharnierende ondersteuning kunnen gebruiken zonder buiging in de koepel te induceren.

In de gangbare praktijk echter wordt de schaalrand voorzien van een verstijvende randbalk, of een verdikking van de schaalwand, om de buiging te ondervangen en het schaaffect te kunnen handhaven (figuur 3.35). De randbalk verhindert de buitenwaartse beweging van de omtrek en bemoeilijkt diens rotatie. Hij induceert dus een omkering van de spatkracht naar binnen, en buiging aan de basis (rechts in figuur 3.35).

We besluiten dat de ideale spanningstoestand onderhevig is aan storende invloeden o.a. van wijzigingen in de belastingen en van onverenigbaarheid met de randvoorwaarden.

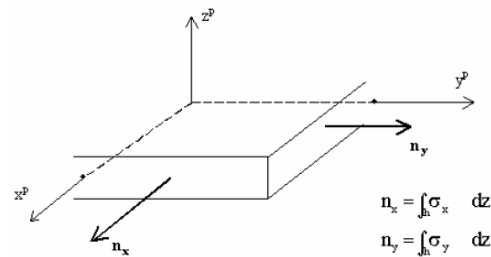


Figuur 3.35: Buigvervorming aan de ringverstijfde koepelrand

6.5.3.2 Membraankrachten

De basisgrootheden voor membraanefecten zijn:

n_x, n_y membraankrachten

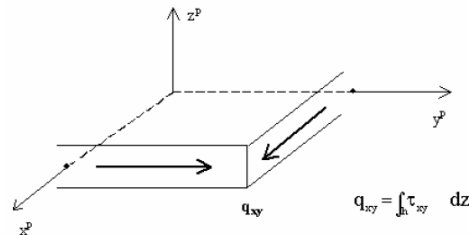


De normaalspanningen zijn:

$$\sigma_x = -n_x/h$$

$$\sigma_y = -n_y/h.$$

q_{xy} dwarskrachten



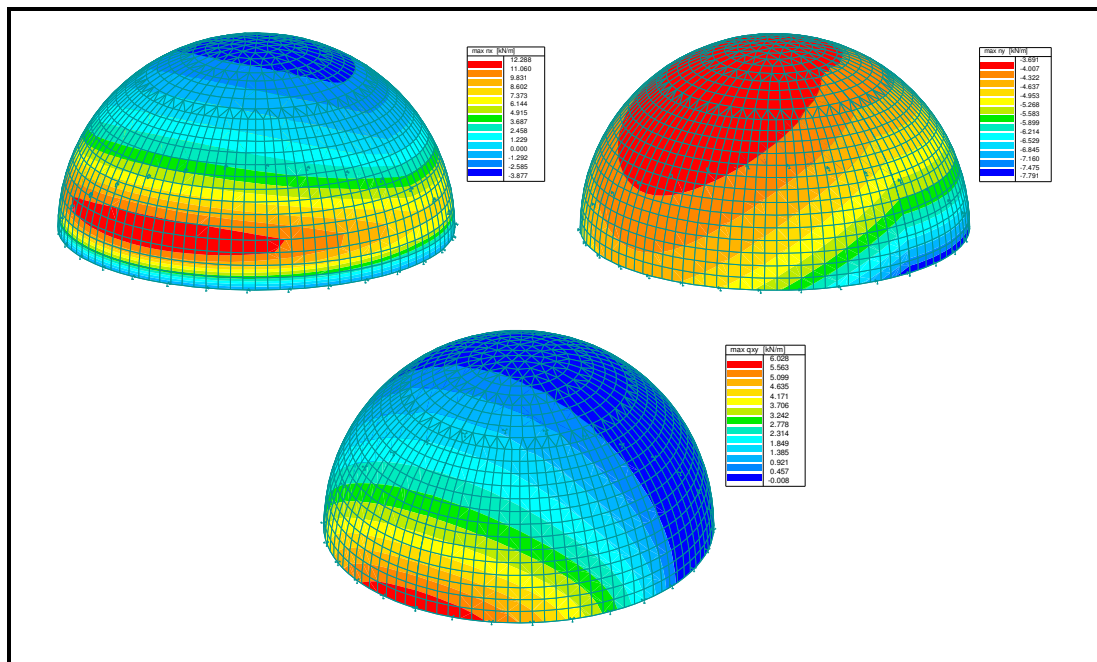
De maximale membraankrachten onder de UGT berekend door EPW, worden weergegeven in figuur 3.36.

max n_x . De grootste maximale parallel trekkrachten vindt men in de zone boven de randen. Wegens de constante doorsnede zullen hier ook de grootste trekspanningen optreden, en de wapening zal daarop gedimensioneerd worden. De neutrale vezel bevindt zich nog steeds in de buurt van 51° , zelfs met de windbelasting erbij. De lichtst blauwe zone kent geen parallelkrachten. Erboven zit de koepel volledig veilig onder druk. Om de spanningen daar te beperken zou men een dikkere schaalwand kunnen toepassen.

max n_y . De meridiaankrachten zijn allen negatief: er heerst overal druk in de lokale y -assen. Het grootste is de druk natuurlijk aan de basis, waar al het gewicht naar afgeleid wordt.

max q_{xy} . Schuifkrachten zijn volledig te wijten aan de windbelasting, zoals duidelijk te zien op de opsplitsing die de figuur kenmerkt.

Onder zuiver verticale belasting zou de koepel volledig werken op twee mechanismen: meridiaan- en parallelkrachten, pas bij een niet uniforme belasting zoals de wind, komt dit derde mechanisme eraan te pas.



Figuur 3.36: Max n_x , max n_y en max q_{xy} onder UGT

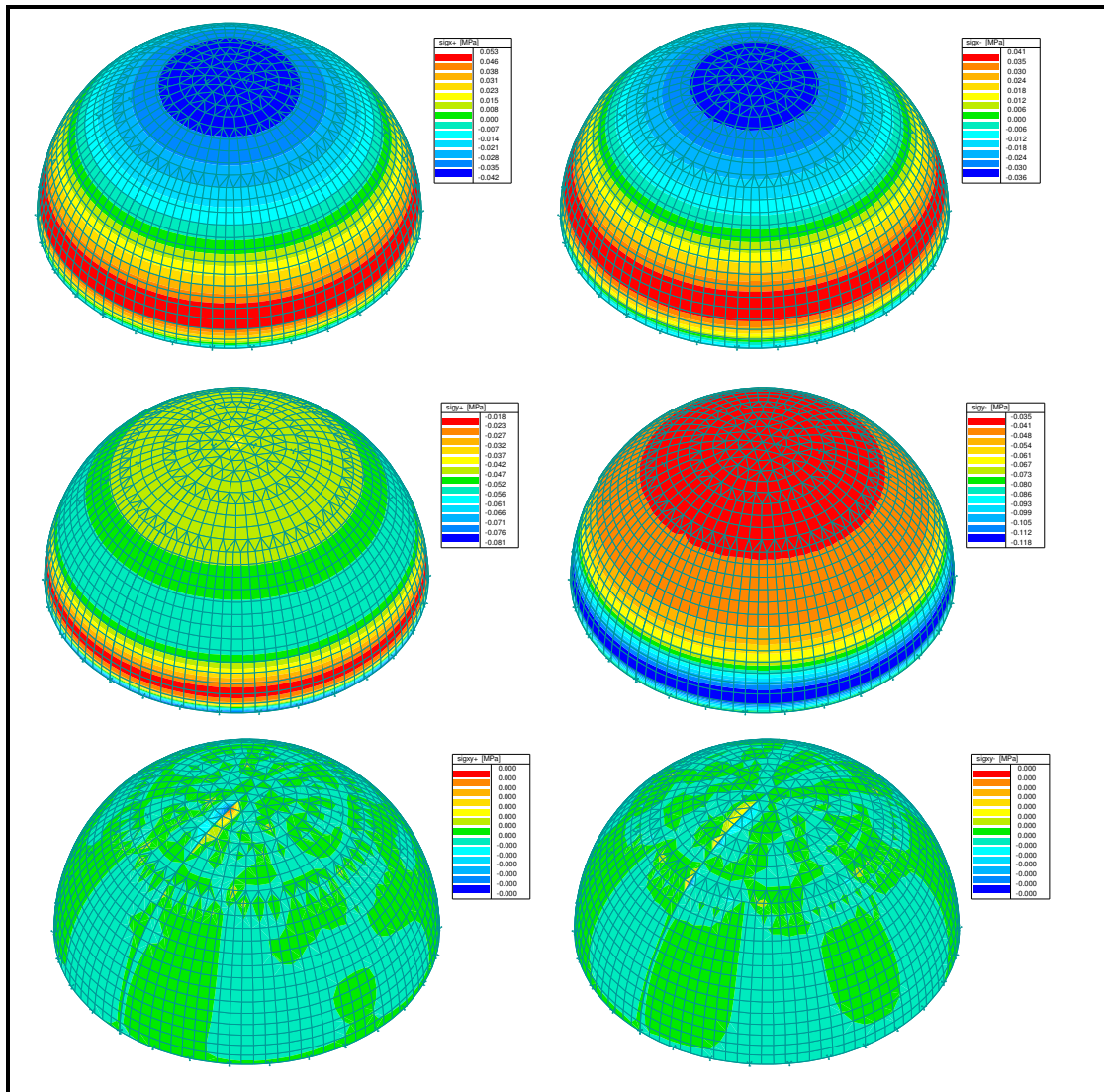
6.5.4 Spanningen

6.5.4.1 Spanningen t.g.v. uniforme gravitaire belasting per eenheid van schaaloppervlak: 'eigen gewicht'

De basisgrootheden voor spanningen zijn:

- sig_{x+} , sig_{y+} Normaalspanning op de zijde met positieve lokale z coördinaat in x en y richting.
- sig_{xy+} Schuifspanning op de zijde met positieve lokale z coördinaat in het vlak van het 2D element (veroorzaakt door m_{xy} en q_{xy}).
- sig_{x-} , sig_{y-} Normaalspanningen op de zijde met negatieve lokale z coördinaat in x en y richting.
- sig_{xy-} Schuifspanning op de zijde met negatieve lokale z coördinaat in het vlak van het 2D element (veroorzaakt door m_{xy} en q_{xy}).

Figuur 3.37 geeft de spanningen weer onder BG1 (het eigen gewicht), zoals ze berekend werden door EPW.



Figuur 3.37: σ_{x+} , σ_{x-} , σ_{y+} , σ_{y-} , σ_{xy+} en σ_{xy-} onder het eigen gewicht

Uit de bovenstaande figuren kan men twee belangrijke zaken afleiden: Ten eerste is op dit eenvoudige niveau nog een vergelijking mogelijk met de 'berekeningen met de hand', uitgevoerd in §3.2.1. Ten tweede zijn de schuifspanningen in een koepel onder zijn eigen gewicht blijkbaar onbestaand.

De berekeningen volgens de formules uit de membraantheorie, gaven voor de maximale membraanspanningen aan de koepelrand σ_θ en σ_ϕ : $\sigma_{\theta, \max} = |\sigma_{\phi, \max}| = 0.076$ N/mm². Deze waarden staan t.o.v. de uitersten **σ_{x+}** _{max} = 0.053 N/mm² en **σ_{y-}** _{max} = 0.118 N/mm² en t.o.v. de spanningen aan de koepelbasis $\sigma_{x+} = -0.01$ N/mm² en $\sigma_{y+} = -0.081$ N/mm². De grootteordes van de maxima komen wel ongeveer overeen, maar de spanningen aan de koepelbasis zijn zeer verschillend. Vooral het verloop van de spanningen verschilt. Vooral de parallelspanningen vallen in de theorie te klein uit, terwijl de theoretische meridiaanspanningen beter de werkelijkheid benaderen. Deze

verschillen en overeenkomsten zijn nog duidelijker als men de membraankrachten beschouwd.

De belangrijkste tekortkoming van deze handberekeningen, is het verwaarlozen van de ondersteuningsrandvoorwaarden. Hierdoor kunnen in de theorie de spanningen continu oplopen naarmate φ toeneemt tot 90° . Onder de werkelijke randomstandigheden, is de zone van hoogste trekspanningen echter hoger gelegen.

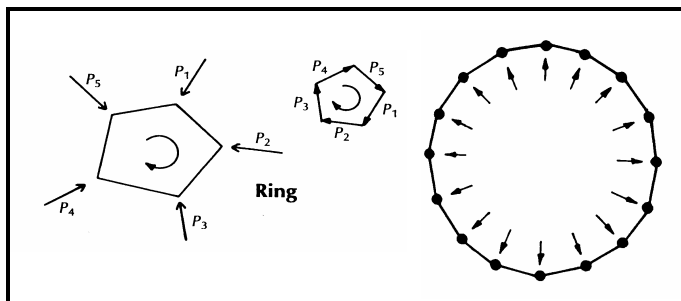
De schuifspanningen die in de theorie buitenspel bleven, zijn inderdaad in EPW ook gelijk aan nul, $\text{sig}_{xy} = 0 \text{ N/mm}^2$.

6.5.4.2 Schuifspanningen in een koepel belast met axiaalsymmetrische belasting

Beschouwt men de geïsoleerde parallel van figuur 3.38. Op de knopen in deze parallel werken de horizontale componenten van alle krachten die door de meridianen werden afgevoerd naar beneden.

Onder bepaalde omstandigheden kan de *parallel de funiculair van die krachten* zijn, en de parallel kan hen ondersteunen in druk of trek, afhankelijk van de zin van de krachten. Bij een bolvormige koepel zijn de parallellen cirkelvormig, en vormt een parallel de kabelvorm voor eender welke axiaalsymmetrische belasting, zoals het eigengewicht of sneeuw (alle horizontale componenten zijn dan gelijk). Ten gevolge van zijn funiculair gedrag onder elke set symmetrische belastingen, verandert een koepel niet van vorm om zich aan te passen aan de verandering in belastingen. De koepel blijft een axiaalsymmetrisch rotatieoppervlak. Daardoor is het een stabiele structuur voor zulke belastingen.

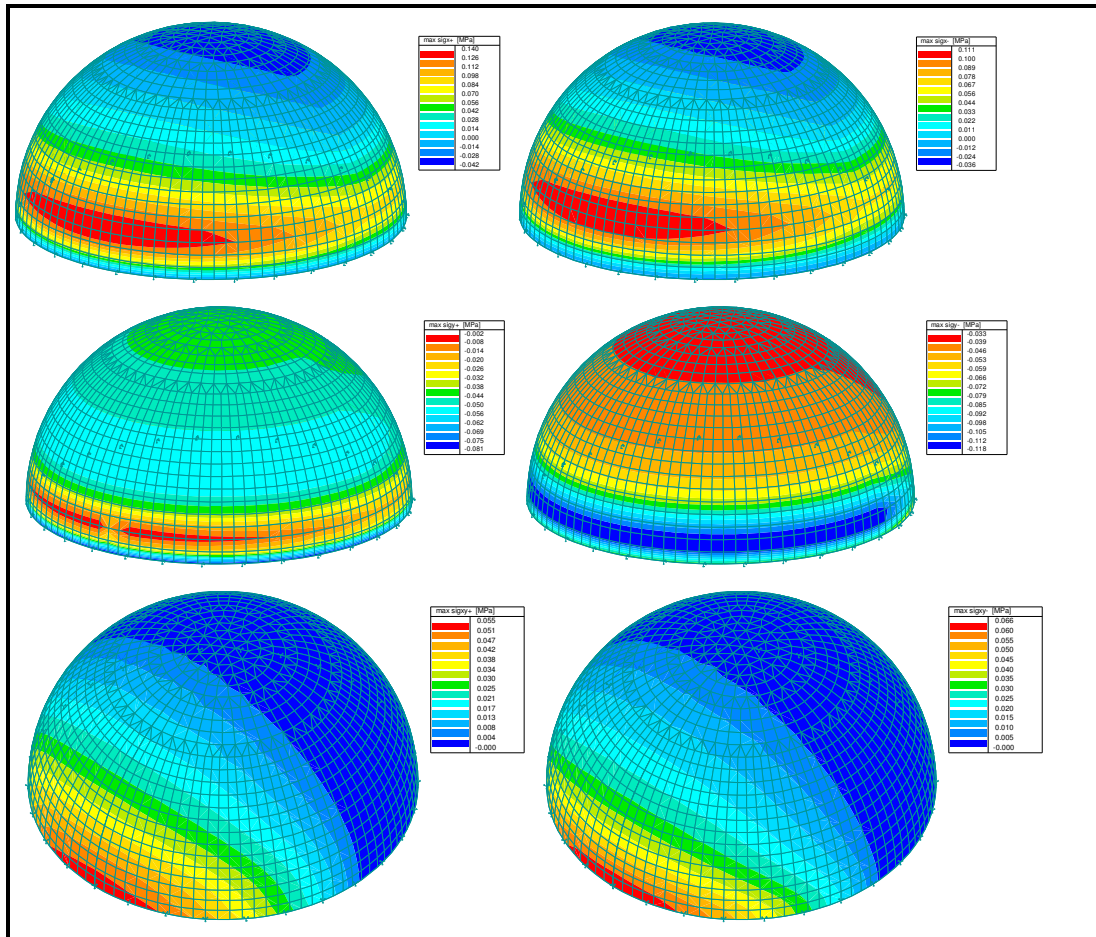
Inderdaad, EPW geeft onder het eigen gewicht (een uniforme verticale belasting) geen schuifspanningen (figuur 3.37).



Figuur 3.38: In de limiet wordt de funiculaire veelhoek een cirkel, dan is het de funiculaire curve voor een radiale druk of trek

6.5.4.3 Spanningen in de UGT

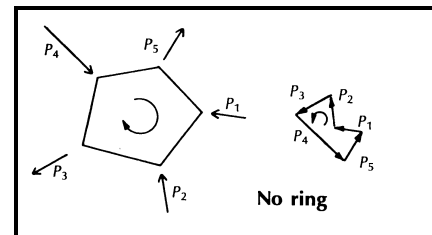
Figuur 3.39 geeft de basisgrootheden van de spanningen weer onder UGT.



Figuur 3.39 max sigx+, max sigx-, max sigy+, max sigy-, max sigxy+, max sigxy-

6.5.4.4 Schuifspanningen in een koepel belast met niet-axiaalsymmetrische belasting

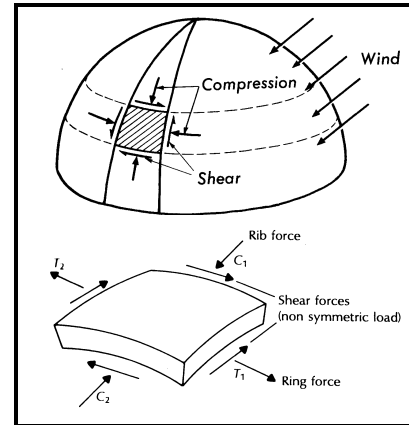
In de uiterste grenstoestand zijn er wel schuifspanningen. Deze nemen duidelijk de wind belasting op. Een convex, dubbelgekromd oppervlak, kan *eender welke belasting* in membraanwerking dragen, behalve puntlasten die lokale buiging veroorzaken. Als de belasting op een dunne koepel namelijk zodanig is dat de *parallel geen kabelvorm* heeft voor de horizontale componenten (figuur 3.40), m.a.w. als directe spanningen langsheen de meridianen en parallellen de gehele belasting niet kunnen dragen, is er een derde mechanisme voorhanden om het onevenwichtige verschil op te heffen: het **schuifmechanisme**.



Figuur 3.40: Niet-axiaalsymmetrische belasting

Membraanschuifkrachten, of diagonale normaalkrachten zullen een deel van de horizontale krachten in evenwicht houden (figuur 3.41). Voorziene veilige spanningen worden niet overschreden, directe spanningen (druk en trek) enerzijds, en schuifspanning anderzijds, zullen altijd delen en de totale belasting op een element van een bolvormige koepel in evenwicht brengen zonder dat er een verandering van vorm nodig voor is.

De membraanstaat in schalen is dus altijd mogelijk, en kan gerepresenteerd worden door twee normaalkrachten n_x en n_y en de schuifkracht q_{xy} . In tegenstelling tot membranen (die van vorm moeten veranderen onder veranderende belastingen, omdat ze enkel trekspanningen kunnen ontwikkelen), is de vorm van een gebogen oppervlak in directe werking daarom niet gerelateerd met de belasting. *Rekening houdend met het schuifmechanisme, kan men zeggen dat een koepel funiculair is voor alle belastingen en daarom een stabiele structuur is onder eender welke set belastingen, symmetrisch of niet.*



Figuur 3.41: Schuifspanningen t.g.v. niet axiaalsymmetrische belasting: windwerking

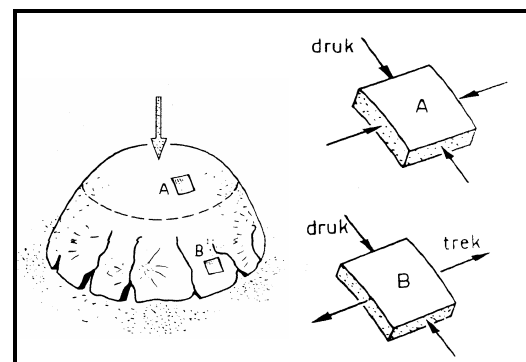
6.5.5 Wapening

6.5.5.1 Definities

Trekringen: Bij de belasting van een stenen bolschaal ontstaat een breukbeeld zoals in figuur 3.42 is weergegeven, te wijten aan de trekkrachten op de onderste parallellen. Om deze scheuren te voorkomen en bezwijken te vermijden (de meridianen ontvangen geen steun meer van de parallellen), kan men onder in het gewelf ringvormige trekelementen aanbrengen.

Na het berekenen van de interne krachten kan de theoretisch vereiste wapening in de schaal berekend worden. Dit zal verlopen volgens de EuroCode2.

Naast de benodigde wapening wordt ook een controle in gebruiksgrenstoestand uitgevoerd. Indien nodig zal de theoretisch vereiste wapening dan automatisch worden vergroot om aan de eisen te voldoen.



Figuur 3.42: Trek- en drukzones, scheuren

Die eisen betreffen vooral scheurcontrole: de maximaal toelaatbare scheurwijdte is ingesteld op 0.3 mm, zowel aan de +z als aan -z zijde. Verder houden deze eisen ook een beperking van de vervorming in, en het vermijden van het afrukken van de betondekking t.g.v. de radiale druk die de binnenste wapening uitoefent tegen het beton, naar het kromtecentrum toe.

Drukwapening: Men kan een waarde voor het 'minimum-percentage drukwapening' invoeren. Het doel van dit concept is slanke structuren zoals schalen een structuurgebaseerde minimumveiligheid tegen knik bieden.

Wat de schalen betreft, werkt de normale drukkracht gewoonlijk in combinatie met een buigend moment. EPW definieert een grens waarbij een doorsnede onder normale drukkracht nog altijd als een structuur met overheersende druk moet beschouwd worden.

In tegenstelling tot lokale wapening, wordt globale wapening gebruikt om het globale gedrag van de schaal te verbeteren. Bijvoorbeeld het knikgedrag vanwege de dikte van de schaal.

6.5.5.2 Benodigde wapeningoppervlaktes

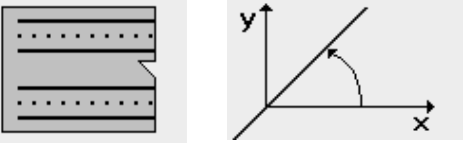
Voor de berekening van de theoretisch vereiste wapening en scheurcontrole definiëren we een wapeningset met volgende eigenschappen [35]:

De betondekking werd op 30 mm gezet:

Staafdiameter:	6	
Korrel diameter:	$d_g \leq 32$	
Beton:	C12/15	
<u>Milieuklasse:</u>	<u>2b</u>	(vochtig, met vorst)
Betondekking $t_{b,min}$	25 mm	
<u>+ Delta t_b</u>	<u>5 mm</u>	(tolerantietoeslag voor ter plaatse gestort beton)
→ Resultaat t_b	30mm	

De gedefinieerde wapeningset is een set staal S220 (onbekende kwaliteit, dus kleinst genomen) bestaande uit vier lagen, zoals weergegeven in tabel 3.5.

Tabel 3.5: Opbouw wapeningset

	Wapeningslagen [mm]	Hoeken [deg]
		
	Betondekking 30	
	Diameters wapeningsstaven	
L1+	2.0*	0
L2+	2.0	90
L2-	2.0	90
L1-	2.0	0
	Betondekking 30	

De opdeling van een axiaalsymmetrische koepel in meridianen en parallellen zet zich door bij de definiëring van een wapeningsrooster. Hier komen ook de verstijvers, zodat we een ware mesh creëren die de pure schaalstructuur versterkt.

Ls1+ en Ls2+ vormen een orthogonaal raster langs de convexe zijde van de koepel. Ls1+ is de buitenste laag en loopt volgens de parallellen, dit is trekwapening die bovendien de buiging om de lokale x-as opvangt. Ls2+ loopt volgens de meridianen en zal dus fungeren als drukwapening, daar langsheen de meridianen slechts drukkrachten werken, maar draagt vermoedelijk bij, bij de opname van trekspanningen. Deze wapening biedt mee weerstand tegen buiging om de lokale y-assen.

Ls1- en Ls2- vormen een orthogonaal raster langs de concave zijde van de koepel.

Uit het verloop van de membraankrachten konden we reeds afleiden dat er in het bovenste deel van de koepel in principe geen wapening nodig is. Ook bij de wapeningsberekening geeft EPW aan dat er geen wapening nodig is in het kroongebied. Een minimale hoeveelheid wapening lijkt echter aangewezen.

Met EPW is het mogelijk om zelf een schaal te maken waarop de tekening dan herschaald wordt. We gaan daarbij telkens uit van een fijnmazig wapeningsnet, “kippengaas”, waarvan de eigenschappen in tabel 3.6 zijn weergegeven. Over de in El Alto gebruikte materialen, en de kwaliteit ervan, heerst geen zekerheid. We stellen voor om beton en staal met een lage kwaliteit te nemen: beton C12/15 en staal S220. De EC2 geeft voor de materiaalsterktes de waarden weergegeven in tabel 3.7. De eigenschappen van S220 als wapeningsstaven worden in tabel 3.6 gegeven.

* De keuze van 2.0 mm voor de staven, voorafgaand aan de eigenlijke wapeningsberekening speelt een rol in de scheurcontrole.

Tabel 3.6: Staalafmetingen van kippengaas en staal S220

materiaal	diameters (mm)	maaswijdten (mm)	Oppervlakte (mm ² /m)
kippengaas	2	50	62
S220	10	250	

Tabel 3.7: Mechanische karakteristieken van beton C12/15 en staal S220

materiaal	grootheid	waarde (N/mm ²)
staal	f_{yk}	220
beton C12/15	f_{ck}	12.0
	f_{ctm}	1.6

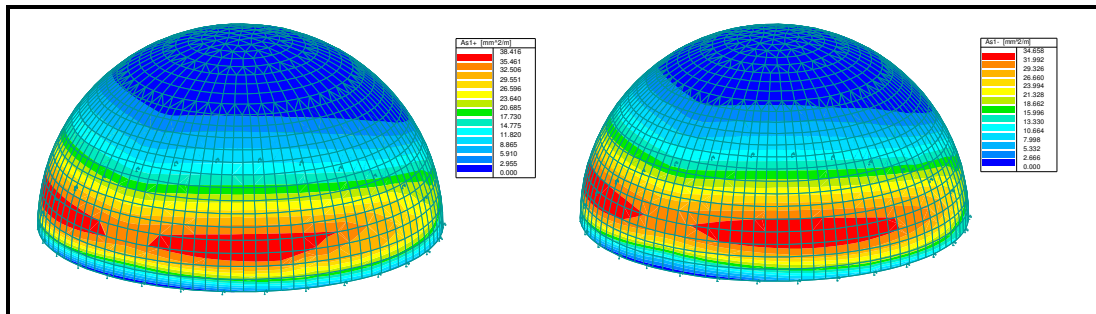
De spanningsdraagkracht van het beton wordt volledig uitgesloten voor het wapeningsontwerp. In de spanningszone is het enige dragende materiaal het wapeningsstaal.

Een vereenvoudigde berekening met de hand, enkel afgaand op de membraankrachten (dus foutief niet op de buigkrachten) $n_{x,max}=11447$ N/m geeft met $f_{yk}=220$ N/mm² alvast een grootteorde voor $A_s=11447/220=52$ mm²/m. Deze hoeveelheid berekend voor laag wordt vermoedelijk verdeeld over Ls1 (83%) en Ls2 (17%, dit is 20% van Ls1). En dus zal $A_{s1} \approx 43$ mm²/m en $A_{s2} \approx 9$ mm²/m.

In de schema's zal men daarom het minimum drukwapeningspercentage niet terugvinden, het aandeel dat laag Ls2 steeds heeft in het opvangen van trek van laag Ls1, is groter dan de minimumdrukwapening. In de schema's zal daarom A_{s2} altijd dezelfde tekening zal hebben als A_{s1} , op een factor 0.8 na.

De waarden van A_{s1} en A_{s2} die zonet werden berekend, kloppen hier ongeveer, daar er zeer weinig buiging optreedt in deze perfecte sfeer. EPW zal de wapeningsoppervlakte natuurlijk wel juist berekenen, door virtuele referentiemembraankrachten in te voegen als zijnde een combinatie van de buigkrachten (omgezet naar een krachtenkoppel) en de membraankrachten. Met die referentiekrachten worden de wapeningshoeveelheden berekend gebruik makend van klassieke procedures voor structurele muurmodellen.

Uiteindelijk geeft EPW als wapeningshoeveelheden hetgeen is weergegeven in figuur 3.43 en figuur 3.44. De tekeningen zijn isobanden, banden van gelijke waarden in knopen, gemiddeld per macro (met deze keuze verkrijgt men vloeiende lijnen; en dit is ook meestal het strengste).

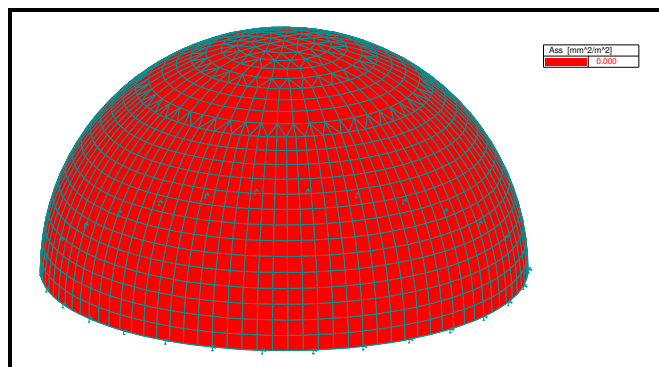


Figuur 3.43: As1+ en As1-

Het schema van **As1+** heeft ongeveer dezelfde tekening als de max-nx in UGT, maar houdt ook rekening met GGT. Voor **As2+** is dezelfde tekening geldig met een 5 maal kleinere schaal.

Aan de binnenkant van de schaal is blijkbaar ongeveer evenveel wapening **As1-** nodig als aan de buitenzijde. Voor **As2-** is eenzelfde analogie met As1- geldig.

Uit figuur 3.44 blijkt dat er geen schuifwapening nodig is. Het beton kan de schuifspanningen t.g.v. windbelasting volledig zelf dragen.

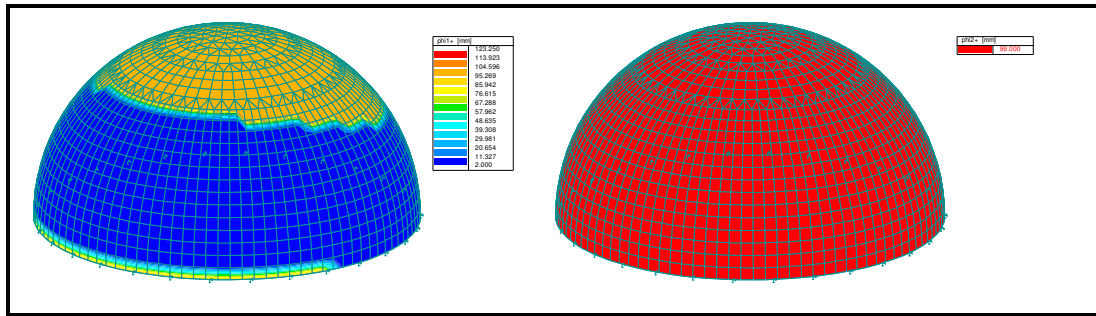


Figuur 3.44: Ass

Blijkbaar overschrijdt de benodigde wapeningsoppervlakte nooit 38 mm²/m, m.a.w. volstaan twee lagen kippengaas van lage kwaliteit ruimschoots om te voldoen aan Eurocode 2 eisen voor UGT en GGT. (Opmerking: stel dat het kippengaas een staalkwaliteit S500 heeft dan zal de maximale benodigde wapeningsoppervlakte slechts ca. 15 mm²/m bedragen).

6.5.5.3. Maximale staafdiameters

ESA-Prima Win geeft maximale diameters en maximale staafafstanden om te voldoen aan de GGT (scheurcontrole). Figuur 3.45 geeft de waarden in isobanden weer voor het buitenste net. Voor het binnenste net gelden dezelfde waarden.

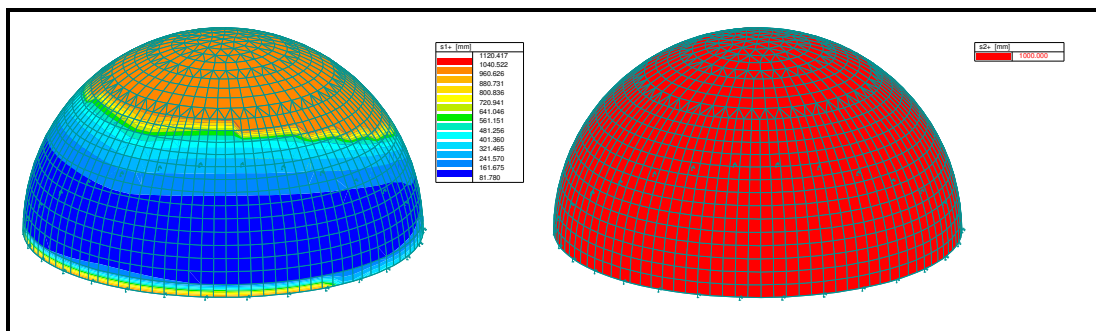


Figuur 3.45: phi1+, phi2+

De kroonzone is veel minder streng dan de onderste zone waar er trekspanningen zullen optreden in de parallellen. Het gevaar voor scheurvorming is hier reëel. De 'minimale maximale diameters' zijn $\phi_{1+}=\phi_{1-}=2$ mm. In de meridiaanrichting (drukrichting) is er geen gevaar in de gebruiksgrenstoestand, overal geldt $\phi_{2+}=\phi_{2-}=99$ mm. Het globale maximum in acht genomen mag men stellen dat een fijnmazig net met kleine diameters zoals kippengaas, als dusdanig zeer gunstig is voor het vermijden van scheuropeningen.

6.5.5.4 Maximale afstanden

Om aan de GGT (scheurcontrole) te voldoen moeten ook de afstanden tussen de staven beperkt worden, zoals weergegeven in figuur 3.46. Deze beperking heeft ook als doel het vermijden van het afsappen van de betondekking aan de binnenzijde: de trekkers duwen immers tegen het beton.



Figuur 3.46: s1+, s2+

Wat de figuren betreft kan men hier hetzelfde verhaal vertellen als bij de maximale staafdiameters. In de meridianen is er geen gevaar, overal is $s_{2+}=s_{2-}=1000$. De minimale maximale staafafstanden s_{1+} en s_{1-} zijn ca. 81 mm. M.a.w., kippengaas voldoet hier weer aan voor de hele koepel.

6.5.6 Besluit

ESA-Prima Win stelt een kleine hoeveelheid nodige wapening voor, met een kleine maximale dikte en een fijne verdeling. Dit roept vragen op m.b.t. de kwaliteit van de huidige bewapening in de koepels. De diameters zijn alleszins veel te groot om te voldoen aan GGT ($2\text{ mm} < 10\text{ mm}$), en de tussenafstanden ook ($81\text{ mm} < 250\text{ mm}$). De bestaande wapening is bovendien goed voor een laag van 2 cm staal in de 10 cm dikke betonschil. Dit is meer dan dubbel zoveel als de 8 mm die men behaalt met vier lagen van 2 mm zoals we voorstellen (deze hoeveelheid zal wel stijgen wanneer we openingen maken in de koepel). Er blijft dan een voldoende grote betondikte oven van 9.2 cm (in tegenstelling tot 8 cm), wat de drukspanningen reduceert.

De juiste ligging van de staven in de schaaldikte is een delicate en dure zaak; in landen met hoge arbeidskosten vindt men het voordeliger om de schaaldikte te verhogen in plaats van het staal exact te plaatsen. Deze opmerking geldt zowel voor de bestaande wapening als over het voorgestelde wapeningsnet.

Een andere mogelijkheid om het beton te wapenen is vezelwapening. Een voorbeeld hiervan is Dramix [36]. Dit zijn zeer dunne metaalvezels ontwikkeld door Bekaert Fibre Technologies. Hun diameter bedraagt tussen 1 en 80 micron, dus tot zestig keer dunner dan een menselijk haar. Deze vezels kennen hun toepassing als toevoegmateriaal in shotcrete. De stalen vezels werken in alle richtingen. Dramix is duurzaam, ductiel en heeft een groot energieabsorberend vermogen. Het gebruik van aldus gewapend beton situeert zich voornamelijk in tunnelbouw en industriële vloeren, maar wordt stilaan ook gebruikt in woningbouw. Voor ons is deze techniek praktisch omdat ze aansluiting vindt bij de typische constructiewijze van de Monolithic Dome Association en omdat ze een zeer fijne wapening en zeer fijne verdeling van de wapening biedt. De vraag is of deze manier van wapening goedkoper is dan de overmatige wapening die door de SolidHouse Foundation wordt toegepast. Alleszins zijn de vezels zo dun en fijn verdeeld in het beton dat er geen gevaar is voor scheurcontrole, dat constructiefouten nauwelijks gevolgen zullen hebben, en dat algemeen de constructie beter presteert. In hetzelfde gamma bestaan ook polypropyleenvezels die krimpscheuren in vers gestort beton verminderen.

Wellicht een goedkopere versie van dergelijke staalvezels zijn hennepvezels. Men zou eigenlijk op zoek moeten gaan naar ter plaatse voorhanden materialen. Staalwapening is sinds de introductie van betonskeletbouw wel te vinden in El Alto, maar blijft toch meestal buiten het bereik van de armere bevolkingslagen. Kippengaas is in dat opzicht beter, het is overal ter wereld verkrijgbaar en zeer goedkoop.

6.6 Scenario 2: Gesegmenteerde koepel

In dit scenario wordt de invloed van de vereenvoudiging tot 2D macro's in ESA-Prima Win onderzocht. Het is belangrijk om kennis te hebben van afwijkingen om de nauwkeurigheid van de resultaten te interpreteren. De koepel is verdeeld in 256 segmenten (met een gemiddelde afmeting van 0.236 m^2). Dit geeft 257 knopen. De netverfijning blijft ingesteld op een mesh met afmeting 0.2 m (oppervlakte 0.04 m^2 voor de vierkante mazen).

6.6.1 Reacties

Tabel 3.8 geeft de globale extremen van reacties in steunpunten (in de knopen). Deze waarden zijn vergelijkbaar met tabel 3.4 van scenario 1. Er wordt nog steeds gedrukt op de steunpunten in de verticale (Z) richting en dat is het belangrijkste.

Tabel 3.8: Reacties in de gesegmenteerde koepel

Steunpunt	knoop	combi	Rx [kN]	Ry [kN]	Rz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
17	230	6	0.72	-0.56	2.37	0.00	0.00	0.00
29	240		-0.72	-0.56	2.37	0.00	0.00	0.00
22	249	5	0.00	0.37	2.92	0.00	0.00	0.00
24	1516	4	-0.09	-1.25	2.03	0.00	0.00	0.00
6	248	6	0.00	-0.52	3.76	0.00	0.00	0.00
22	249	3	0.00	0.06	0.78	0.00	0.00	0.00

6.6.2 Vervormingen

Maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen:

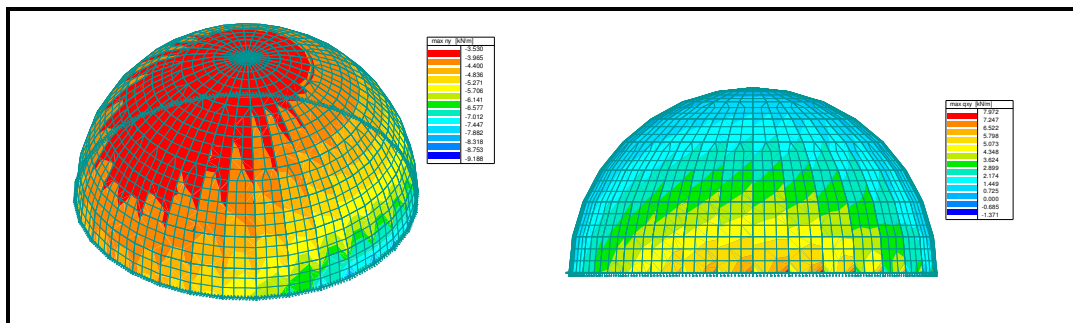
Maximale verplaatsing -0.016 mm BG1 aan de top.

Maximale rotatie -0.013 mrad BG2 knoop aan de onderrand.

Het is logischerwijs nog steeds de top die het meest zal verplaatsen: een zakking van 0.016 mm t.g.v. het eigengewicht (figuur 3.47), identiek aan wat bekomen werd in scenario 1.

Ditmaal veroorzaakt de wind de maximale rotatie, ergens aan de onderrand. Het eigengewicht veroorzaakt minder rotatie dan in scenario 1 (Fix was daar maximaal 0.018 mrad). We vermoeden dat dit komt omdat de randknopen (die nog steeds het meeste roteren) nu deel uitmaken van platen (drie meshes hoog). Deze platen zijn driezijdig ingeklemd en worden naar buiten geduwd door afdalende spatkrachten. Hierdoor zal het middengebied van de plaat gedeeltelijk meedelen in de buigvervorming, waardoor het onderste randje net iets gespaard blijft.

De maximale schuifkrachten **qxy** (figuur 3.49) hebben als uiterste grenzen 7.972 kN/m (> 6.028 kN/m bij de sfeer) en -1.371 kN/m (< -0.008 kN/m bij de sfeer). Om hieruit te mogen besluiten dat in de gesegmenteerde koepel meer op schuiving gewerkt wordt dan op zuivere membraanwerking zou je de precieze oppervlaktes van de isobanden moeten kennen. In ieder geval is de maximale schuifkracht groter. We zullen bij de wapening zien of deze overschatting invloed heeft op de vereiste dwarskrachtwapening (die gelijk was aan 0 in scenario 1).

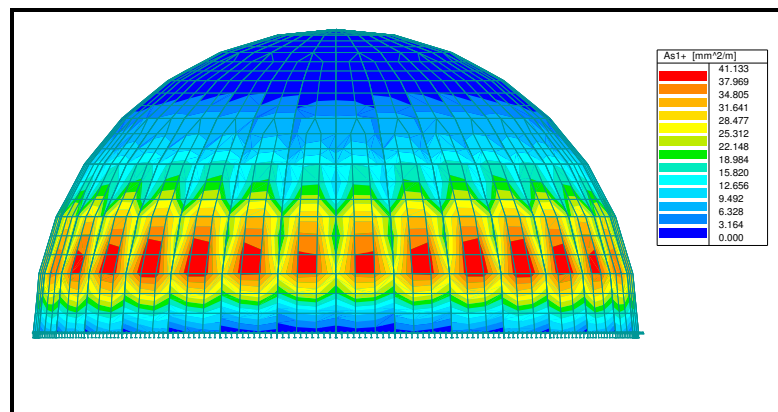


Figuur 3.49: max ny en max qxy onder UGT

6.6.4 Wapening

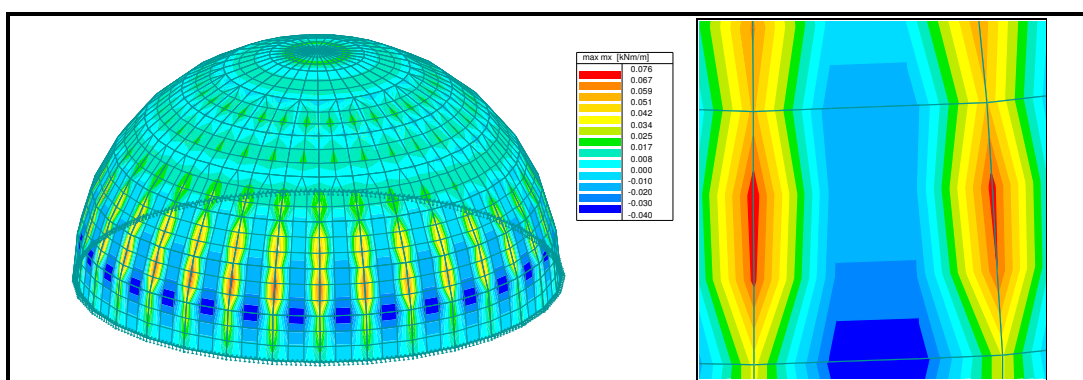
6.6.4.1 Benodigde wapeningoppervlaktes

Door de onderschatting van de parallel-trekkkrachten n_x zou men kunnen verwachten dat de vereiste wapeningsoppervlakte **As1+** kleiner is dan bij de perfecte bolkap. Het tegendeel is echter waar. De maximale wapening bedraagt 41.133 mm²/m (figuur 3.50), dus meer dan bij de sfeer (38.416 mm²/m). Een verklaring vindt men terug in de tekening: die vertoont op de tweede rij segmenten (platen) verhoogde wapeningsconcentraties, die samenvallen met de middens van de segmenten. Die segmenten worden door EPW namelijk als afzonderlijke platen beschouwd, en we treffen er buiging in aan zoals bij de belasting van niet gekromde platen gangbaar is.



Figuur 3.50: As1+

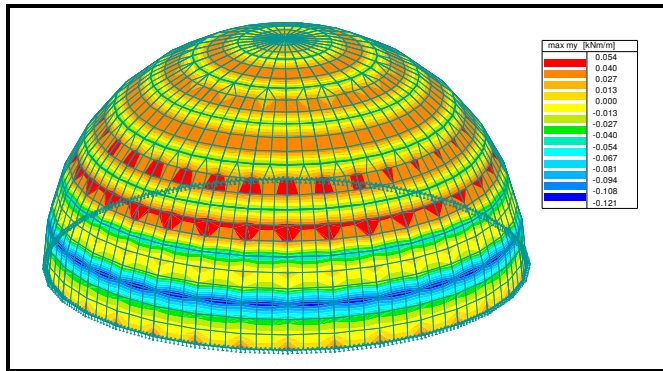
Inderdaad, de buigkrachten (figuur 3.51) vormen een gelijkaardige discontinue tekening. Als we een randsegmentje (een plaat dus) van naderbij inspecteren (rechts in figuur 3.51) is de grote variatie van de buigkracht te zien, die gaat van $m_x=0.076$ kNm/m aan de verticale randen (voegen), vertoont een tekenomslag die evenwijdig daarmee loopt, en gaat tot ca -0.030 kNm/m in het midden van de plaat. Vergeleken met de sfeer-macro (waar de maximale m_x slechts -0.017 kNm/m bedraagt), is de buiging in de gesegmenteerde koepel veel groter. Bovendien bleef eenzelfde m_x over de volledige omtrek gelden in scenario 1 (figuur 3.32) terwijl m_x in de gesegmenteerde koepel een grilliger verloop kent, waarbij de verticale voegen de grote stoorzenders zijn.



Figuur 3.51: max m_x onder UGT (globaal en uitvergroet)

We besluiten dat de onderschatting van de parallel-trekkkrachten min of meer gecompenseerd wordt door de overschatting van buiging, en dat daardoor de wapeningshoeveelheid vergelijkbaar blijft met die van de halve sfeer. Ongetwijfeld is dit verschil in buig-gedrag het grootste effect dat we door de vereenvoudiging van de halve bol tot een samenstel van 256 plaatjes ondervinden.

De oppervlakte **As2+** van de drukwapening die volgens de meridianen loopt, vertoont dezelfde tekening als **As1+**, maar met een vijf maal kleinere schaal. De maximale benodigde oppervlakte bedraagt nu (20% van **As1+**) $8.227 \text{ mm}^2/\text{m}$, wat weer meer is dan bij de sfeer ($7.683 \text{ mm}^2/\text{m}$). De tekening van **my** is echter helemaal anders (figuur 3.52) dan de tekening van **As2+**. Het **my** verloop fluctueert langsheen de meridianen met als uiterste grenzen 0.054 kNm/m en -0.121 kNm/m . De in absolute waarde grootste buigkracht rond de y-as bevindt zich nog steeds in de randzone beïnvloed door de incompatibiliteit van de randverplaatsingen. Met $m_y=-0.121 \text{ kNm/m}$ bedraagt die er wel veel meer dan bij de volmaakte sfeer waar $m_y=-0.084 \text{ kNm/m}$ en de tekening (figuur 3.32) veel meer beantwoorde aan de membraantheorie. De werking van de koepel in afzonderlijke rijen platen is ook hier herkenbaar.



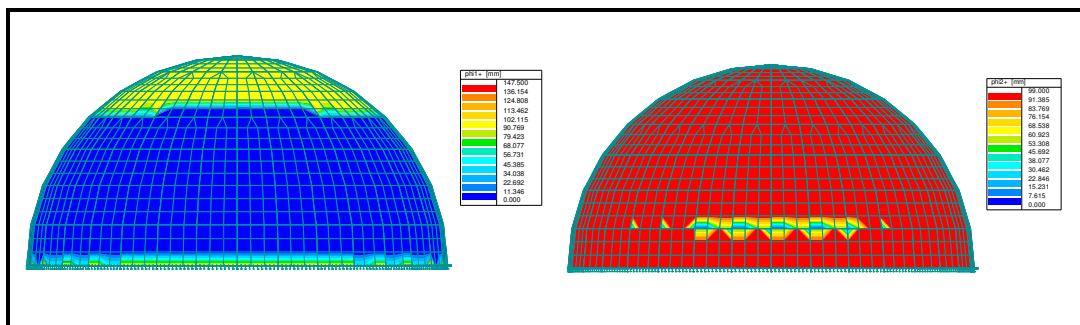
Figuur 3.52: max my in UGT

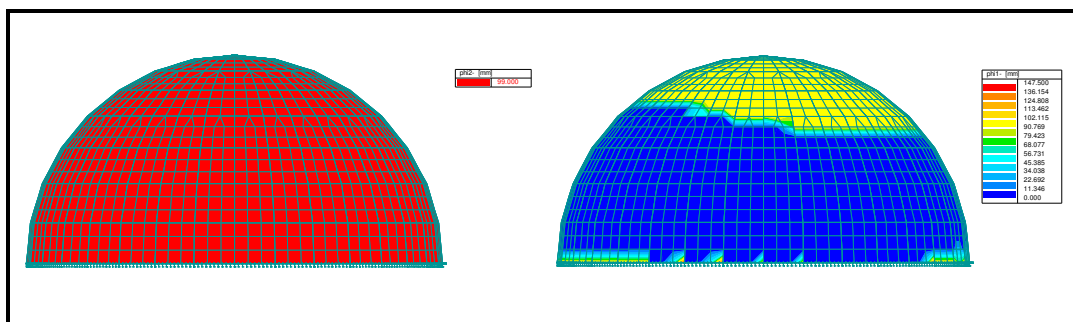
Voor de wapening aan de binnenzijde van de koepel kan men hetzelfde verhaal vertellen. **As1-** vertoont precies hetzelfde patroon als **As1+** (figuur 3.50), maar haalt een hoger maximum: $As1_{-max}=45.039 \text{ mm}^2/\text{m}$, dit is weer veel meer dan bij de halve sfeer ($34.658 \text{ mm}^2/\text{m}$). $As2_{-max}=0.2 \cdot As1_{-max}=9.008 \text{ mm}^2/\text{m}$, wat ook meer is dan bij de sfeer ($6.932 \text{ mm}^2/\text{m}$).

Nog steeds geldt **Ass**=0 mm^2/m . Het beton blijft in staat om de schuifspanningen alleen op te nemen.

6.6.4.2 Maximale staafdiameters

De tekeningen voor de phi-waarden (figuur 3.53) zijn, op afwijkingen na, gelijkaardig aan de maximale staafdiameters bij de perfecte bolkap. Voor een enkele wapeningset is enkel de minimale maximale staafdiameter belangrijk, en die is hier **phi1+=phi1-=0.000 mm** voor de lagen L1, volgens de parallellen. Bij de sfeer lag dit op de realistischere waarde 2 mm, en we behouden dan ook deze waarde zodat ons kippengaas blijft werken, en blijft voldoen aan de GGT. **phi 2+=phi 2-= 0 à 99 mm**.

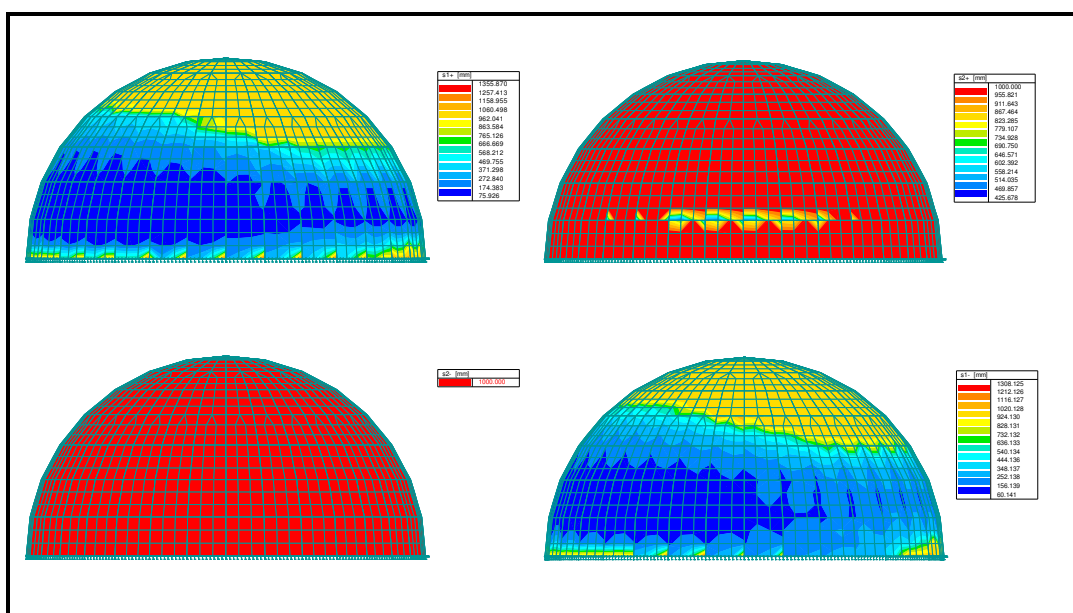




Figuur 3.53: phi1+, phi2+, phi2- en phi1-

6.6.4.3 Maximale staafafstanden

De eis voor de scheurcontrole met betrekking tot de maximale staafafstanden resulteert hier in een waarde $s_{1+} = 75.926$ mm (figuur 3.54), wat iets lager is dan de 81.780 mm bij de perfecte bolkap, maar niet noemenswaardig (5 mm verschil t.o.v. de 50 mm maaswijdte van kippengaas, en de 250 mm staafafstand in de bestaande koepelwapening). s_{2+} , s_{2-} en s_{1-} zijn iets minder streng.



Figuur 3.54: s1+, s2+, s1- en s2-

6.6.5 Besluit

Waar de werking van een koepel in scenario 1 nog vooral membraanspanningstoestand was, eigen aan koepels, is er in de gesegmenteerde koepel van scenario 2 buigwerking bijgekomen, eigen aan platen. De opdeling van de koepel in platen zorgt voor een onderschatting van de parallel-trekkrachten die

gecompenseerd wordt door de overschatting van buiging. Hierdoor blijft de wapeningshoeveelheid vergelijkbaar met die van de halve sfeer.

De voorwaarden m.b.t. beperking van de staafafstanden en staafdiameters zijn hier strenger dan in de perfecte hemisfeer. Deze eisen, die veel afwijken van de waarden gevonden in scenario 1, bevinden zich steeds in voegen, of in knopen waar vier platen (vier voegen) samenkomen. Daar de koepel in werkelijkheid een continue kromming en materiaalverloop kent, en geen knikken of typische plaat-uitbuiging, mogen we deze ongerijmdheden negeren.

We besluiten voorzichtig dat de vereenvoudiging waarmee we verder zullen werken, vrij nauwkeurig zijn, en geen praktische gevaren zullen doen ontstaan omdat ze op het eerste zicht strenger lijken.

6.7 Scenario 3: Koepel met 30 cm opstand

De raaklijnen aan een volmaakte hemisfeer in zijn steunpunten zijn verticaal, waardoor het aangebrachte beton gemakkelijk afglijdt. Om dit op te lossen werd er een bekistingpaneel gehanteerd, waardoor de kleine koepel in El Alto een opstand van 30 cm heeft. Het effect van dit verticaal 'muurtje' wordt in dit scenario onderzocht.

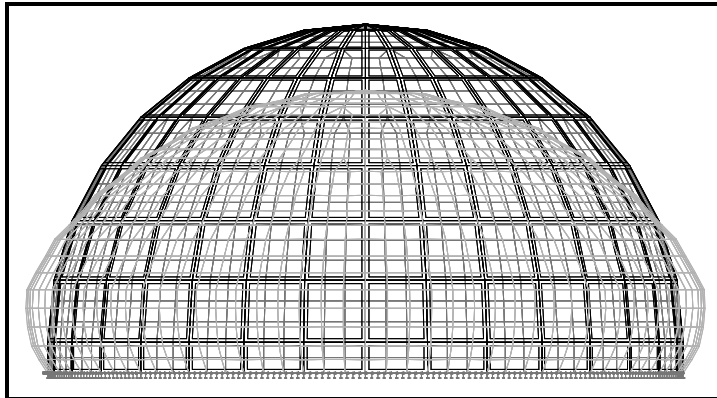
6.7.1 Vervormingen

De maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen blijven vergelijkbaar met de voorgaande scenario's:

Maximale verplaatsing -0.017 mm BG1 nog steeds de top.

Maximale rotatie 0.016 mrad BG1 nog steeds aan de onderrand.

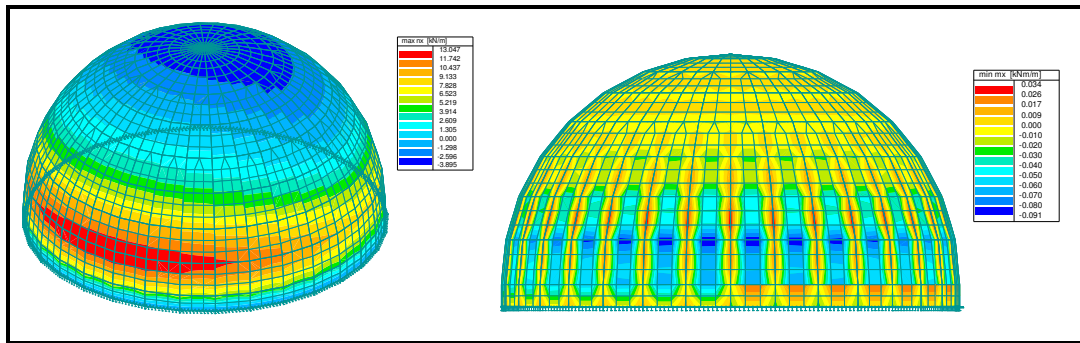
Figuur 3.55 toont de vervorming in knopen, onder verticale uniforme belasting (het eigen gewicht), van een koepel met onderrand.



Figuur 3.55: Vervorming in knopen onder verticale uniforme belasting

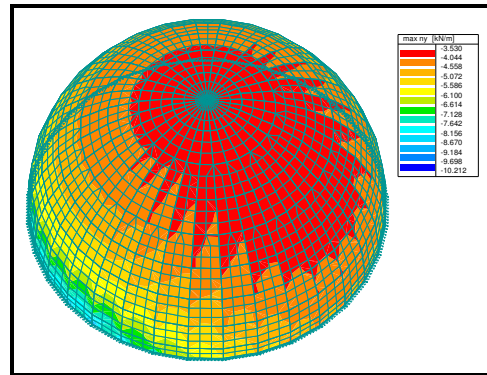
6.7.2 Interne krachten

De linkerhelft van figuur 3.56 toont de verdeling van de horizontale krachten n_x in de koepel met opstand. De drukkrachten in de bovenste parallellen blijven dezelfde, maar de grootste parallel-trekkkrachten bedragen 13.047 kN/m, wat groter is dan de 11.447 kN/m in de hemisfeer. Een mogelijke verklaring vinden we in de berekening volgens de membraantheorie (§3.2.1, §3.2.2), waar bleek dat n_x toenam met φ in een op zichzelf staande koepel (geen randvoorwaarden). De onderste parallellen willen dus méér uitrekken in een koepel waar φ oploopt tot boven 90° , terwijl de basis op een zelfde manier wordt tegengehouden door de ondersteuningen als bij de hemisfeer. In een koepel met een opstand zijn de trekkrachten daardoor groter. Het is logisch dat hierdoor de in absolute waarde grootste buiging m_x (boven de randen) ook een groter gebied bestrijkt (rechterhelft figuur 3.56).



Figuur 3.56: max nx en min mx

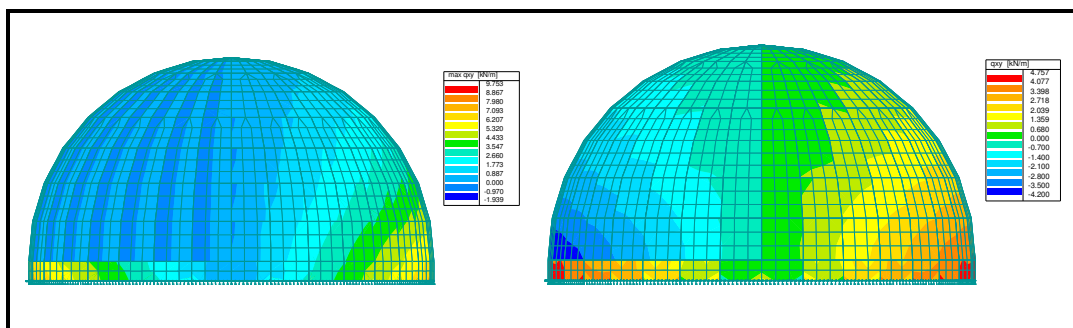
De meridiaankrachten **ny** (figuur 3.57) blijven bovenin zo goed als gelijk. De enige invloed die de opstand in deze richting heeft is dat de krachten een 30 cm langere weg moeten 'afleggen' om afgedragen te worden, en dat er onderaan meer druk ontstaat door het bijkomende gewicht van de opstand.



Figuur 3.57: max ny onder UGT

Figuur 3.58a geeft de schuifkrachten **qxy** in de koepel onder een gecombineerde werking van de drie belastingsgevallen. Wanneer enkel de windbelasting wordt beschouwd krijgt men figuur 3.58b. Stel dat de wind vanuit één richting 'aanwaait' op de koepel - op de figuur is de wind in het blad gericht - dan zullen de twee punten in het midden van de onderste rand (aan de loef en de lijzijde) het minste effect van deze werking ondervinden. Het beton zal, vertrekkend vanuit de middelste meridiaan, de wind symmetrisch afvoeren d.m.v. dwarskrachten, die zich steeds ophopen en maxima vertonen op de scheidingslijn tussen loef en lijzijde. Deze krachtsafdracht is te vergelijken met die van het eigengewicht, waarbij de drukspanningen zich ophopen naar onder toe. Het toont de aërodynamische hoedanigheid van een dubbelgekromd oppervlak.

(Opmerking: op beide helften werken de dwarskrachten in dezelfde zin, maar vermits de figuur gemaakt is op basis van de lokale assenstelsels zijn wijzerzin en tegenwijzerzin voor beide helften tegengesteld.) De dwarskrachtwerking blijft ongewijzigd bij het toevoegen van de opstand.

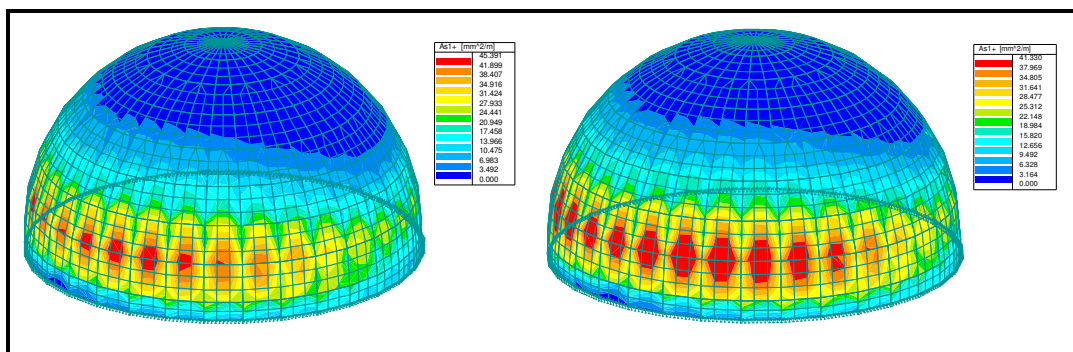


Figuur 3.58: qxy a) in UGT b) BG2 (wind)

6.7.3 Wapening

6.7.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes

Door de hoge parallelkrachten is hier net iets meer ringwapening vereist dan in de koepel zonder opstand (maximale **As1**+ = 45.391 mm²/m t.o.v. 41.133 mm²/m). De 'rode zone' uit figuur As1+ 3.50 van scenario 2 is naar boven geschoven en uitgebreid, net als de oranje-gele zones. Dit is duidelijk te zien als we de schaal van die figuur toepassen op deze figuur 3.59a, dit geeft dan figuur 3.59b, die we makkelijker kunnen vergelijken met de figuur 3.50 van de hemisfeer. De gebogen zone is door de opstand verschoven naar boven, en de grootste spanningen blijven zich concentreren in de middens van de uitgebogen (in werkelijkheid sferisch gekromde) platen, langsheen de (in werkelijkheid onbestaande) horizontale voegen tussen twee rijen platen. Een kippengaas levert echter nog steeds de nodige staaloppervlakte, dus we stellen ons hier nog geen praktische vragen over de hogere wapeningshoeveelheid.



Figuur 3.59: As1+ a) schaal van EPW b) verschaald naar scenario 2

In de opstand volstaat zeer weinig wapening: hier wordt wel alle belasting langs afgevoerd, maar die overdracht gaat met weinig trek (buiging) gepaard. Dit is te vergelijken met de zone van ca. 20 cm net aan de rand in de hemisfeer, die ook vrij bleef van grote paralleltrekkkrachten en buiging. De verklaring ligt in de plaatsing van

een hemisfeer op een muurtje: de hemisfeer voert alle krachten af naar zijn onderrand en verandert ze van richting tot ze uiteindelijk aan de onderrand verticaal lopen, evenwijdig met de raaklijn aan de hemisfeer. Daar kunnen ze gewoon doorlopen in de verticale ondersteuning. Met andere woorden, de opstand wordt vrijwel slechts op druk belast. In scenario 5 zal blijken dat dit niet geldt voor een koepel die afgesneden wordt op de neutrale vezel, en geplaatst op een muurtje. Daar moeten de afgeleide krachten immers veranderen van richting bij de overgang in de muren.

Net als bij A1+ haalt **As1-** hier hogere waarden (tot 49.148 mm²/m) en de rode-gele zones strekken zich verder uit dan bij de koepel zonder opstand ($As1-,_{max} = 45.039$ mm²/m in de tweede rij platen).

As2+ (**As2-**) verandert per definitie gelijklopend met As1+ (**As1-**).

Er is nog steeds geen schuifwapening nodig doordat **Ass** = 0mm²/m.

6.7.3.2 Maximale staafdiameters

Ten opzichte van de koepel zonder opstand verandert er niets aan **phi1+** en **phi1-**. **phi2+** blijft globaal overal 99 mm, met enkele ongerijmdheden waar de minimale maximale diameter 2 mm wordt geëist. **phi2-** blijft overal 99 mm.

6.7.3.3 Maximale staafafstanden

s1+ blijft gelijk als bij de koepel zonder opstand, behalve plaatselijk een onrealistische eis voor maximale staafafstanden 0 mm (niet eens aan de toegevoegde onderrand).

s2+ blijft over het algemeen 1000 mm (met zoals in figuur 3.54 uit scenario 2 enkele minieme zones aan voegen waar $s \leq 500$ mm. Vermits er echter geen voegen zijn in werkelijkheid kunnen we deze eis buiten beschouwing laten).

s2- blijft 1000 mm.

6.7.4 Besluit

De verhoogde wapeningsoppervlakte in een koepel met opstand is een gevolg van de verhoogde parallel-trekspanningen onderin. De opstand zelf blijft gespaard van grote tekspanningen, doordat deze onder grote druk staat en in die zin is 'voorgespannen'.

6.8 Scenario 4: Vorm van de grote koepel met de afmetingen van de kleine koepel

Met dit scenario willen we kijken welke van de twee in El Alto bestaande vormen de meest gunstige is naar structureel gedrag toe. De kleine koepels zijn de hemisferen (met opstand), de grote koepels zijn platter. We verscalen de kromtestraal van de grote koepel naar 3.1 m. Zo bekomen we een platte koepel met een iets kleinere basis (6.14 m) en hoogte (2.77 m), maar wel dezelfde kromtestraal (3.1 m) als de hemisfeer. Alleszins zal hij dus minder gewicht vertegenwoordigen. Maar wat de invloed zal zijn van deze afplatting op zijn globaal structureel gedrag, dat volgt.

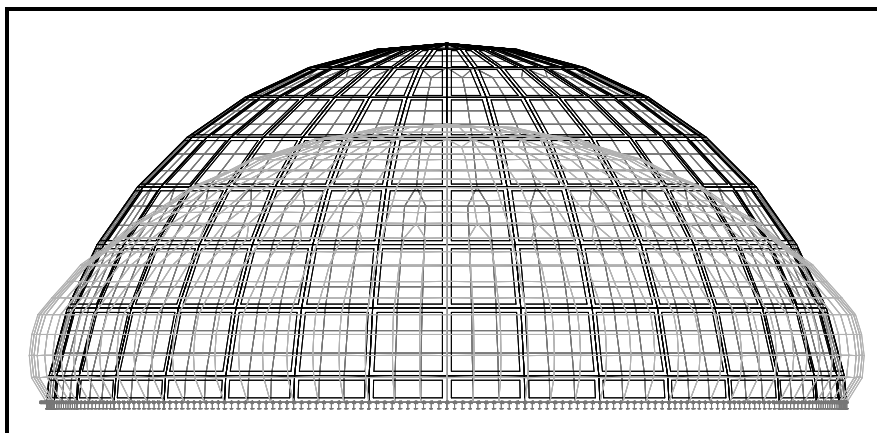
6.8.1 Vervormingen

De maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen zijn afkomstig van het eigen gewicht:

Maximale verplaatsing -0.014 mm BG1 aan de top.

Maximale rotatie -0.017 mrad BG1 een knoop aan de onderrand.

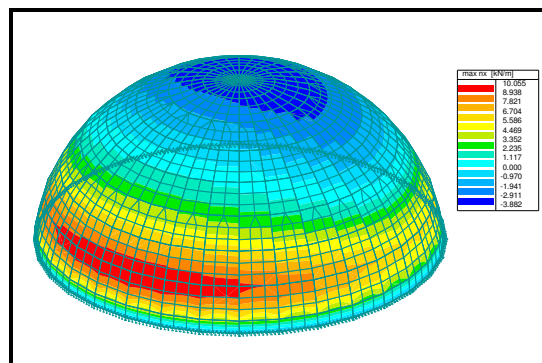
De verticale verplaatsing van de top is iets minder dan bij de vorige scenario's. Het kleinere gewicht is hiervoor verantwoordelijk, een grafische voorstelling hiervan is weergegeven in figuur 3.60. Maar het ware effect van de afplatting van de koepel laat zich op het niveau van vervormingen nog niet zien.



Figuur 3.60: Vervorming in knopen onder het eigen gewicht

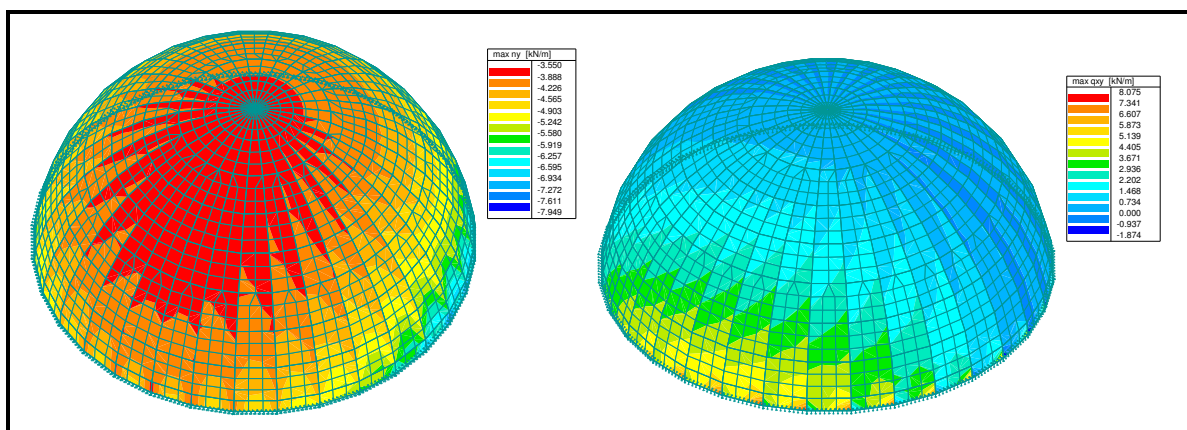
6.8.2 Interne krachten

Ten opzichte van de hemisfeer (scenario 2, figuur 3.48) is de grootste trekkracht **nx** in de parallellen afgenomen van 11.447 kN/m naar 10.055 kN/m (figuur 3.61). Dit komt natuurlijk omdat φ hier maar oploopt tot 84° (i.t.t. $\varphi_{\max}=90^\circ$ bij de hemisfeer), waardoor de membraankracht wijzigen (§3.2.1). De neutrale vezel bevindt zich op dezelfde hoogte ($\varphi \approx 51^\circ$) ten aanzien van de top, maar er bevinden zich minder parallellen onder, dus er is relatief minder trekzone in de plattere koepel.



Figuur 3.61: max nx

De meridiaankrachten **ny** (figuur 3.62) zijn steeds drukkrachten, en lopen op vanaf het gebied aan de kroon -3.550 kN/m (vrijwel gelijk dus aan de meridiaankrachten bovenin de hemisfeer -3.530 kN/m, zie figuur 3.49). Het is logisch dat ze onderin slechts een maximum halen van $n_y = -7.949$ kN/m (t.o.v. 9.188 kN/m bij de hemisfeer) omwille van de kleinere afmetingen van de koepel. De drukkrachten zijn niet kritisch in een betonnen constructie, het feit dat de drukkracht iets hoger of iets lager ligt zal geen rol spelen in de keuze van de vorm voor de uiteindelijke betonnen koepel.



Figuur 3.62: max ny en max qxy

Qua dwarskrachten **qxy** (rechterfiguur 3.62) verandert er globaal niets aan de tekening t.o.v. de hemisfeer (figuur 3.49). Ook de grootte-orde van het bereik (8.075 kN/m tot -1.874 kN/m t.o.v. 7.972 kN/m tot -1.371 kN/m bij scenario 2) blijven vergelijkbaar. In het opzicht van de dwarskracht maakt het dus ook niets uit of de koepel plat of diep is.

6.8.3 Wapening

6.8.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes

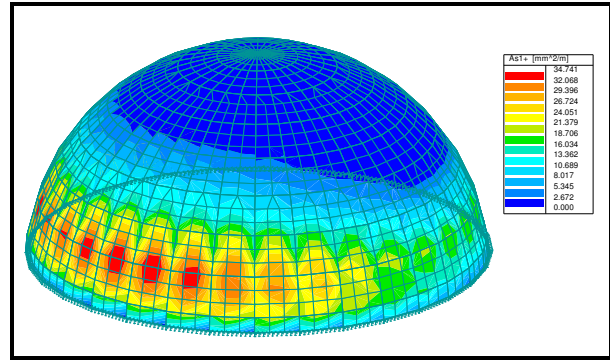
De nodige wapeningsdoorsnede **As1-** (/ **As1+**) bedraagt in deze plattere koepel maximaal slechts 34.741 mm² (/ 37.297 mm²) per lopende meter (figuur 3.63), redelijk wat minder dan 41.133 mm²/m (/ 45.039 mm²/m) in de hemisfeer (figuur 3.50). Hier merkt men duidelijk het voordeel van een bolsegment ten opzichte van een halve bol.

Verder geldt nog steeds

$$\mathbf{As2=0.2*As1-},$$

$$\mathbf{As2+=0.2*As1+}$$

en **Ass=0.00 mm²/m**.



Figuur 3.63: As1+

6.8.3.2 Maximale staafdiameters

De maximale staafdiameters zijn van dezelfde grootteordes als in scenario 2.

6.8.3.3 Maximale staafafstanden

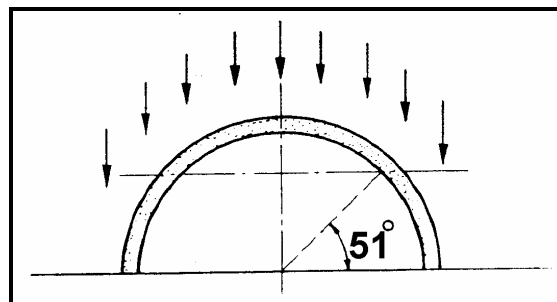
Voor de staafafstanden wordt ook verwezen naar scenario 2.

6.8.4 Besluit

Hoe kleiner $\varphi_{\max}$ in de geometrie van de koepel, m.a.w. hoe platter de koepel, hoe minder parallellen onder de neutrale vezel, hoe minder trek er in de koepel wordt gegenereerd.

6.9 Scenario 5: Koepel afgesneden op de neutrale lijn

Een koepel die enkel zijn eigen gewicht draagt, vertoont een neutrale parallel, die niet zal getrokken of ingedrukt worden bij belasting. Deze parallel bevindt zich volgens de berekeningen naar de membraantheorie onder een hoek $\varphi \approx 51^\circ$ (figuur 3.64). Het bolsegment dat we krijgen wanneer we de oorspronkelijke



Figuur 3.64: Men zal een plat koepelsegment verkrijgen na het afsnijden op de neutrale lijn

hemisfeer afsnijden op een vlak onder 51° , verscalen we tot het een diameter heeft van 6.2 m, gelijk de oorspronkelijke koepel. De hoogte tot de kroon is veel lager: 1.48 m. Deze koepel zou dus in principe nergens trek ontwikkelen, en moet dan niet gewapend worden.

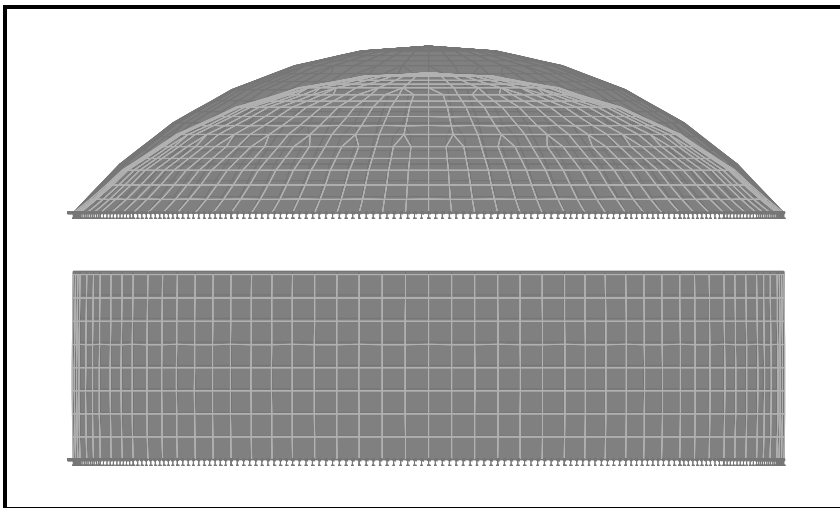
Om een bruikbaar volume te bekomen, is het echter nodig om onder de koepel een muur te voorzien van 1.62 m, zodat de totale hoogte tot de kroon toch nog 3.1 m wordt. In scenario 3 onderzochten we een hemisfeer met een verticaal einde dat mooi overliep in een klein opstandje. Door de platheid van koepel zullen er wel nogal wat spatkrachten uitgeoefend worden op de verticale muur.

Een cirkelvormige koepel kan zonder ondersteuning gebouwd worden. De parallelkrachten verklaren waarom dat mogelijk is: de koepel is zelfdragend op elk moment van zijn constructie, daar de horizontale spatkracht door gewapende parallellen overgebracht wordt naar de andere helft (cf. de parallel als funiculair §6.5.4.2). Hierin verschilt de koepel duidelijk van bogen, die gesteund worden door dikke muren, of getrokken door een trekstand. De spatkracht zal in koepels pas een rol spelen in de stabiliteit van het geheel wanneer er gebruik wordt gemaakt van verticale steunen zoals hier.

6.9.1 Vervormingen

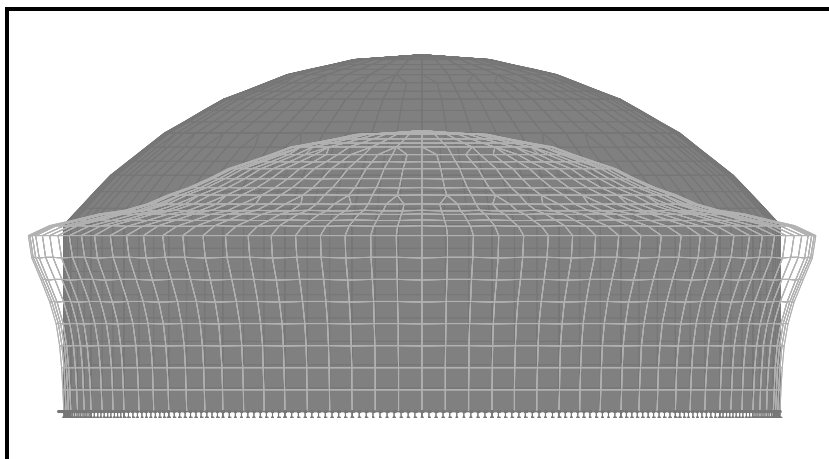
De oorzaak van het uitblijven van trekspanningen in de hier bestudeerde afgesneden koepel ligt in zijn vervorminggedrag. Een platte koepel die een verticale uniforme belasting ondergaat zal immers ook willen 'uitzakken' aan zijn top, maar nu zullen de meridianen onderaan ook naar binnen willen bewegen (i.t.t. de neiging om naar buiten te bewegen bij diepe koepels). Dit is duidelijk te zien in figuur 3.65a, die de vervorming van het koepeldeel op zich voorstelt, onder uniforme verticale belasting. De

meridianen dwingen de parallellen daarbij om in te korten, en de weerstand van deze laatsten zorgt voor druk alom. Er is weinig verbeeldingskracht nodig om in te denken hoe een ronde muur zich zal vervormen onder zijn eigen gewicht (figuur 3.65b). We hebben hier dus twee ideale structuren, beide werken zuiver op druk, en lenen zich daardoor perfect tot vervaardiging uit beton.



Figuur 3.65a: Vervorming van een koepeldak, afgesneden op de neutrale lijn

Figuur 3.65b: Vervorming van een muur



Figuur 3.65c: Vervorming van de samengestelde koepel

Maar als het koepeldeel op het cilinderdeel komt te staan blijken de twee delen elkaar sterk te beïnvloeden (figuur 3.65c). Het gewicht van de koepel wil de muren van de cilinder uiteen duwen. De vervorming van het koepeldak doet denken aan die van de diepere koepels, eveneens met een parallelzone die niet vervormt, maar deze bevindt zich nu veel lager. Dit alles vindt natuurlijk zijn oorzaak in de spatkrachten die een niet-

hemisfeer kenmerken, en die in de figuur 3.65a nog opgenomen werden door de volle grond.

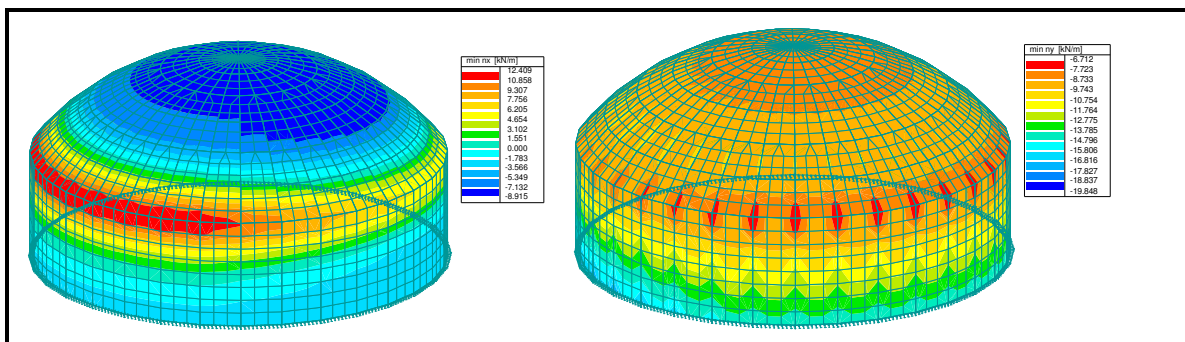
Voor een diepte/lengte verhouding $h \approx L/6$ ($\varphi = \pi/2$ hemisfeer) geeft de bolschaal bij een verticale verdeelde belasting nagenoeg uitsluitend verticale actie N_φ op de ondersteuning. Wanneer de richting van de ondersteuning verschilt van de raaklijn aan de meridianen, wordt de schaalkracht N_φ ontbonden in een kracht volgens de ondersteuning (hier een verticale kracht V) en een horizontale kracht (de spatkracht H). Hoe platter de koepel des te groter is de spatkracht. De muur die aan zijn basis ingeklemd zit ondergaat aan zijn boven-eind deze horizontaal gerichte krachtscomponent. De vervorming is typisch voor een puntlast op het uiteinde van een eenzijdig ingeklemde ligger. De basis van het koepeldeel hangt vast aan de muur en rekt dus mee uit. Daar waar in het ideale geval (bij een hemisfeer op een muur) de reacties die de koepel ondersteunen als meridiaankrachten in de koepel geleid werden is de omtrekreactie nu eerder horizontaal. En omtrekreacties die niet evenwijdig zijn aan de meridianen induceren buigende momenten.

De maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen zijn dubbel zo groot als in de hemisfeer, doordat de muur de koepel plat trekt en de koepel de muur ombuigt:

Maximale verplaatsing	-0.033 mm	BG1	aan de top.
Maximale rotatie	-0.033 mrad	BG1	een knoop aan de randbalk.

6.9.2 Interne krachten

Hoewel de theorie ons 'beloofd' had dat er geen trek zou optreden in een koepel afgesneden op de neutrale vezel, blijkt dit voordeel verloren te gaan bij plaatsing van het koepeldak op een rechte muur. Vanaf de kroon tot aan de rand blijven de parallellen in het koepelgedeelte inderdaad relatief lang onder druk staan, de neutrale vezel ligt ver naar onder (figuur 3.66). En dan loopt de trek ineens hoog op, tot $n_x = 12.409$ kN/m. Zoals bij de vervormingen (§6.9.1) reeds aangehaald werd, is deze trek te verklaren aan de hand van het fenomeen van de spatkrachten, voorkomend in niet-hemisferen geplaatst op rechte muren. De koepelrand wordt gedwongen om de buitenwaartse beweging van de muur te volgen, beweging waartegen de parallellen zich verzetten door trekspanningen te ontwikkelen.



Figuur 3.66: min nx, min ny

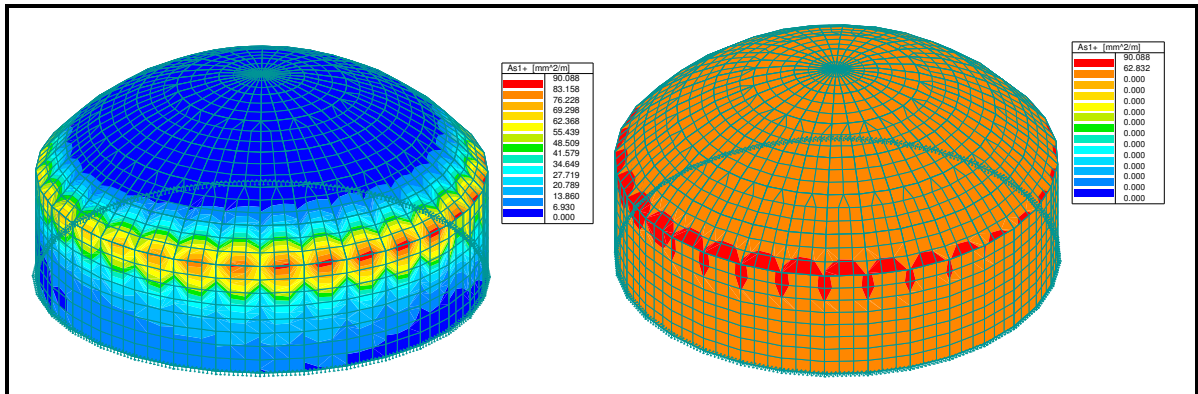
De meridianen blijven hier volledig onder druk werken. De drukspanningen bevinden zich tussen de grenzen $n_y = -6.712$ kN/m tot -19.848 kN/m.

In het koepeldeel herkent men nog een beetje van de figuren uit vorige scenario's die de meridiaankrachten uitbeelden. Logischerwijs nemen de meridiaankrachten toe van boven naar beneden, vooral onder invloed van het eigen gewicht. Aan de rand gekomen, waar de koepel overgaat in de muur, worden de drukkrachten echter plots kleiner: -6.712 kN/m. Dit is over heel de tekening de kleinste drukspanning volgens de meridianen, en is in strijd met de natuurlijke afdracht van de zwaartekracht, die zich steeds moet ophopen. Vermoedelijk heeft deze lagere drukkracht te maken met een compensatie door trekkrachten in de overgangszone. Ook dit is terug te brengen op het verhaal van de spatkrachten. Van dan af lopen de drukspanningen op naar beneden zoals bij de gewone koepels (bvb. de hemisfeer in figuur 3.49 en algemeen alle zware constructies), door de accumulatie van drukspanningen t.g.v. gewicht en andere verticale verdeelde belastingen.

6.9.3 Wapening

6.9.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes

Hoewel een grote zone geen wapening nodig heeft, is de oorspronkelijke opzet van deze koepel-muur constructie toch verloren gegaan doordat er blijkbaar meer wapening nodig is voor de ringbalk, dan voor de hemisfeer (figuur 3.67 t.o.v. figuur 3.50). Daar volstond men nog met twee eenvoudige netten kippengaas, hier wordt al een benodigde **As1+** behaald van 90.088 mm²/m. Die kan niet meer gedekt worden door kippengaas, zoals te zien is op de rechterfiguur 3.67 waar de legende verschaald is en het oranje gebied een benodigde wapeningsoppervlakte van 62.832 mm²/m voorstelt (d.i. de hoeveelheid staal per meter bij kippengaas).

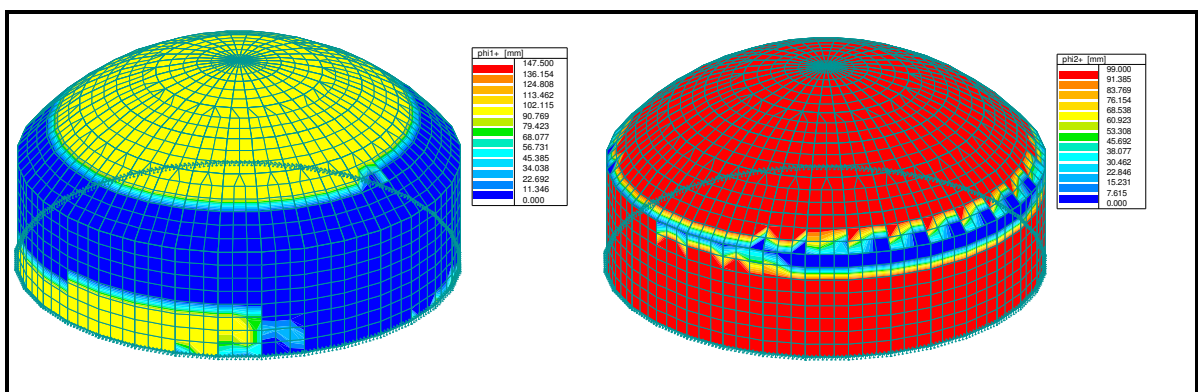


Figuur 3.67: As1+

Hetzelfde geldt voor **As2+** ($0 \text{ mm}^2/\text{m} \leq \text{As2+} \leq 43 \text{ mm}^2/\text{m}$), **As2-** ($0 \text{ mm}^2/\text{m} \leq \text{As2-} \leq 39 \text{ mm}^2/\text{m}$), **As1-** ($0 \text{ mm}^2/\text{m} \leq \text{As1-} \leq 90 \text{ mm}^2/\text{m}$). Enkel voor de schuifwapening blijft steeds gelden: **Ass** = $0 \text{ mm}^2/\text{m}$.

6.9.3.2 Maximale staafdiameters

Voor de eisen naar **phi1+** (figuur 3.68) kunnen we twee gebieden onderscheiden: het basis- en kroongebied enerzijds, waar er met maximale diameters 100 mm eenvoudig te voldoen is aan GGT, en anderzijds een vrij groot randgebied waar geldt dat de maximale staafdiameter schommelt tussen 0 mm en 11 mm. Hetzelfde geldt voor **phi1-**. De staven op de tweede rij, in de richting van de meridianen, mogen globaal genomen 99 mm bedragen, enkel aan een beperkte zone aan de rand geldt **phi2+** en **phi2-** $\leq 7.6 \text{ mm}$.



Figuur 3.68: phi1+, phi 2+

6.9.3.3 Maximale staafafstanden

Voor **s1+** geldt dat men voldoet aan de GGT en scheurcontrole wanneer staven hoogstens op een afstand van 1092 mm van elkaar staan in de koepel en de muur. In een overgangszone van ca. 50 cm lengte op de muur en 50 cm op de koepel zijn de toegelaten staafafstanden beperkt tot 24 mm. **s2+** bedraagt in het basis- en kroongebied overal 1033 mm, in de overgangszone lokaal 0 mm, maar vooral 150 mm.

Het patroon van **s2-** is gelijkaardig aan **s2+**: overal is een afstand van 1024 mm tussen de staven toegelaten, behalve aan de knik: slechts een onrealistische 0 mm à 78mm.

Aan de binnenzijde geldt voor de wapening in parallel-richting een maximale **s1-** die het kleinst is in de overgangszone: 34 mm. Voor het overige deel, aan de basis en aan de kroon, wordt dit gauw veel hoger: 1095 mm en meer. Men kan besluiten dat men de koepel mag wapenen met kippengaas, maar dat er extra wapening moet voorzien worden in de overgangszone koepel-muur.

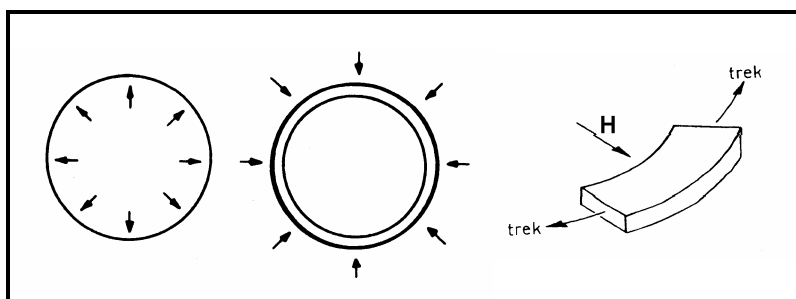
6.9.4 Oplossing

We zitten dus met twee ideale structurele componenten, waarvan de som ver van volmaakt is. Het enige, en grote probleem aan deze koepel bevindt zich duidelijk in de overgangszone tussen de twee gedeelten. Het is dus een kwestie van dit euvel weg te werken. Volgende oplossingen dienen zich aan:

6.9.4.1 Ringbalken

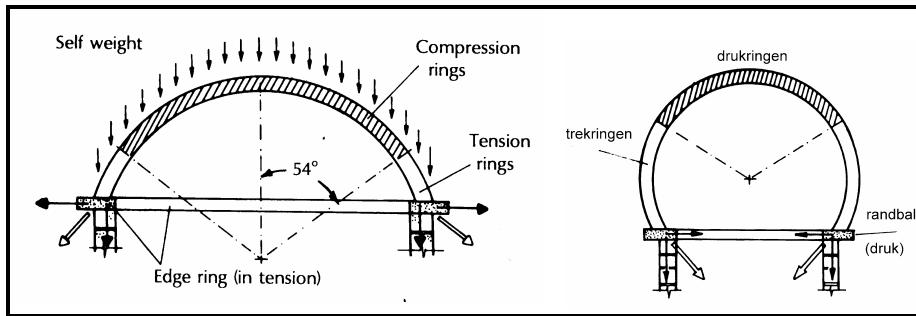
Tenzij de steun sterk genoeg is, of er zijdelingse steunconstructies aanwezig zijn wordt er in de koepelconstructie vaak gebruik gemaakt van een ringbalk op het draagvlakniveau.

Die ringbalk levert dan de spatkracht H . De inwendige krachten in de spatring zijn zuivere normaalkrachten, een ring is immers een kabelvorm (figuur 3.69).



Figuur 3.69: De parallel als funiculair voor uniforme radiale krachten

Voor de platte koepel uit dit scenario zijn er trekkrachten in de ring (rechterfiguur 3.69, linkerfiguur 3.70), maar algemeen hangt dit af van de zin van de richtingsverandering van het draagvlak naar de raaklijn (druk in rechterfiguur 3.70). De ringbalk is dus de tegenhanger van de trekstangen bij bogen, met dat verschil dat de ring de radiale spatkrachten omzet tot ringkrachten.



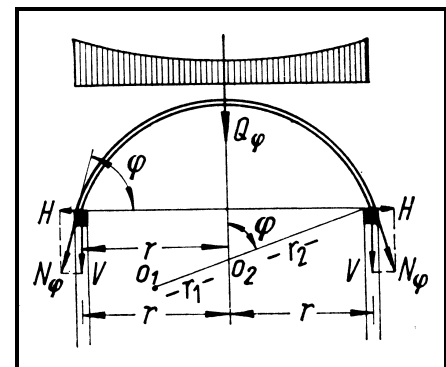
Figuur 3.70: De spatkracht is een druk- of trekkracht, afhankelijk van de hoekverdraaiing

We stellen de koepel voor door de omwentelingsschaal uit figuur 3.71. Deze is axiaalsymmetrisch belast en wordt ondersteund door een bakstenen muur. N_φ splitsen we op in een horizontale (H) en een verticale (V) component. De schaal is verstijfd door een ring, die zal belast worden in trek Z door de inwerking van de H krachten. Er geldt:

$$\begin{cases} V = -N_\varphi \cdot \sin \varphi = \frac{Q_\varphi}{2\pi r} \\ H = -N_\varphi \cdot \cos \varphi = \frac{Q_\varphi}{2\pi r} \cot \varphi \\ Z_R = H \cdot r = -N_\varphi r \cos \varphi = \frac{Q_\varphi}{2\pi} \cot \varphi \end{cases}$$

En dus, met $\varphi=51^\circ$ en $Q_\varphi=2.5 \text{ kN/m}^2$: $V = 128 \text{ N/m}$; $H = 104 \text{ N/m}$; $Z_R = 322 \text{ N/m}$.

De ringtrekkracht bedraagt 322 N/m . Een snelle handberekening geeft als nodige ringwapening: $322 \text{ N/m} / 220 \text{ N/mm}^2 = 1.464 \text{ mm}^2/\text{m}$, wat bijna 10 keer minder is dan in §6.9.3.1).

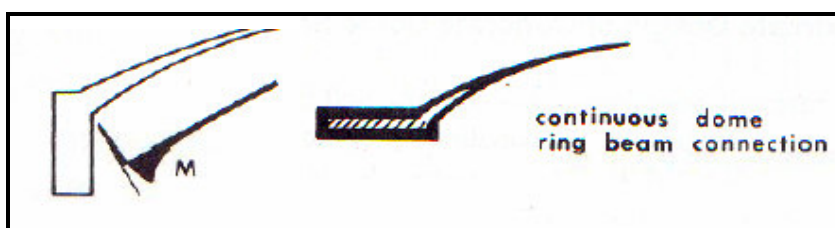


Figuur 3.71: Ontwerp van een ringbalk

Belangrijk is dat men hier weer rekening houdt met incompatibiliteit van de verplaatsingen. De ringbalk wil radiaal verplaatsen onder invloed van de spatkracht (naar buiten bij ondiepe, naar binnen bij diepe bolkappen), maar de schaal wil vervormen volgens de interne parallel-membraankrachten (naar binnen bij ondiepe, naar buiten bij diepe bolkappen, figuur 3.70). Schaal en ring zijn echter monolithisch, en op het

contactvlak werken bijkomende krachten om deze continuïteit te behouden. Deze 'buigkrachten' kunnen niet voorzien worden door de membraantoestand, en in de nabijheid van het contactvlak ontstaat een verstoring van de membraantoestand, een 'buigtoestand'. Om de bewegingen compatibel te maken kan men de spatring voorspannen. Maar vaak heeft de verstoring geen praktische betekenis, en blijft ze beperkt tot een klein deel van het koepeloppervlak (figuur 3.72 a).

Bovendien, wanneer de meridiaankracht niet door het zwaartepunt van de doorsnede van de ringbalk gaat, wordt de balk aan wringing onderworpen. En als de schaal en de balk monolithisch aan elkaar sluiten, zal verder de schaalrand onderworpen worden aan buiging. Deze storingen kunnen gedempt worden door de spatring te incorporeren in de schaal, of door vloeiende overgangskrommen of nog door een plaatselijke verdikking van de schaalwand (figuur 3.72 b).



Figuur 3.72: a) Uitdempen van randstoringen b) Vloeiende overgang tussen ringbalk en schaal

Samengevat kunnen we als vraagteken bij deze oplossing stellen dat wanneer de koepelrand samenvalt met de neutrale lijn, er geen spanningen zijn in de onderste parallel, en er dus geen trekking nodig is, maar wel een ringbalk.

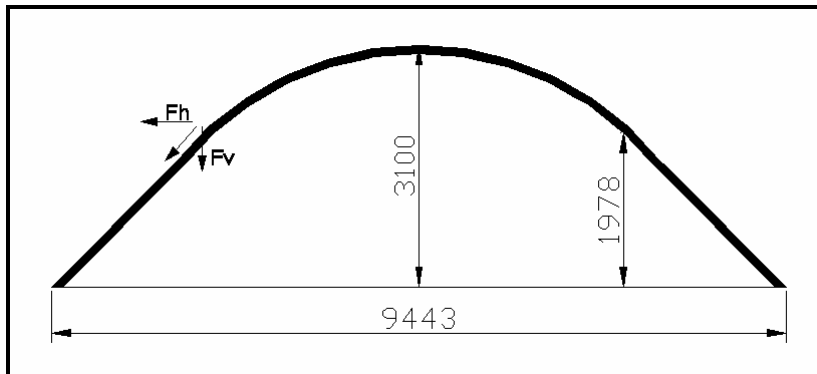
6.9.4.2 Schuine muren

We besluiten dat er steeds trek optreedt bij het gebruik van verticale steunen. De oplossing voor de problemen die men krijgt bij de aansluiting van de koepel op de muur ligt dan ook voor de hand: een schuine muur (of schuine kolommen) die dieper in de grond wordt aangezet, en daar de belasting kan afdragen naar de volle grond. In dat geval worden de gehele meridiaankrachten rechtstreeks door de steun opgenomen en overgebracht naar de fundering, zoals de verticale opstand bij de hemisfeer.

6.9.5 Besluit

We besluiten met het volgende voorstel voor de koepelgeometrie, zoals weergegeven in figuur 3.73. De koepel combineert een koepeldak, afgesneden op de neutrale lijn, met muren die geheld zijn volgens de raaklijnen aan de koepel. De koepel beschikt dan over een bruikbaar volume, maar zonder dat er zich onregelmatigheden en trekspanningen voordoen in de overgangszone. De combinatie van twee drukstructuren blijft in dit geval een drukstructuur.

We zullen aan dit voorstel geen scenario wijden in ESA-Prima Win. In scenario 6 zullen we de koepel vormgeven als een kettinglijn, wat hier nauw bij aansluit. Deze koepel simuleren we wel in EPW.



Figuur 3.73: Voorstel tot een gunstige combinatie van een koepeldak en een schuine muur

6.10 Scenario 6: Koepelgeometrie afgeleid uit de 'kettinglijn' [37]

De vorm van een koepel met cirkelvormig grondplan is het resultaat van de rotatie van een boog om de boog-as. Als de boog op zich stabiel is, zal de koepel dit ook zijn, bovendien zullen er dan enkel meridiaankrachten in de koepel werken.

In §2.1.1 werden funiculairen en kettinglijnen behandeld. Een kabel neemt onder een belasting altijd een evenwichtsvorm aan, eigen aan deze aangrijpende belasting. Daar de kabel wezenlijk een trekstructuur is zal hij omgedraaid onder zuivere druk werken bij diezelfde belasting. Dat is gunstig want een druk zonder buigend moment geeft in de boogdoorsneden een gelijkmatige spanningsverdeling, de gehele oppervlakte van de doorsnede wordt dan optimaal benut.

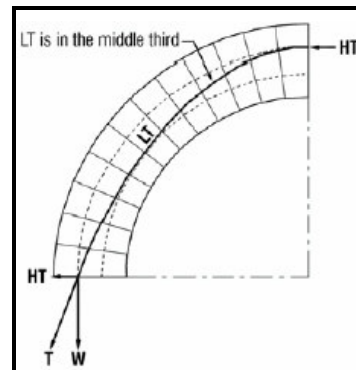
Het evenwicht van een alleenstaande boog kan afgeleid worden uit de druklijn. Dit is het verloop van de resultante van het gewicht en de spatkracht op ieder punt. Het komt er dus op aan een gepaste vorm te geven aan de doorsnede van de koepel. Het profiel moet zo goed mogelijk de druklijn volgen, excentriciteiten zorgen immers voor buiging en dwarskrachten.

Maar wat als de belasting verandert? Zelfs als een stenen boog funiculair is voor een bepaalde set lasten, gaat dit niet op voor alle sets lasten die zich zullen voordoen. Een boog is stabiel en de vorm past zich niet aan passen zoals een kabel: in elke boog treedt een combinatie op van druk en buiging.

Er zit een zekere speling in de stabiliteit van een boog dankzij de werkelijke dikte van de boog. Zolang de druklijn in het middelste derde van de boog blijft, is de boog stabiel (figuur 3.74). Wanneer de druklijn meer naar binnen zit zal de boog naar buiten willen openbreken. Zit ze meer naar buiten dan zal de boog willen inklappen.

Van Heinz Isler leerden we de term funiculaire

oppervlakken: hierbij wordt de funiculaire vorm bepaald voor de dominante belasting waarvoor dan uitsluitend membraanspanningen optreden en buiging wordt geminimaliseerd. Voor de vorm van een betonnen boog wordt vanwege de grote betonmassa doorgaans de funiculair van het eigen gewicht gekozen (de kettinglijn). Bijkomende levende lasten geven aanleiding tot wat buigspanningen, kritiek in beton, maar als we puntlasten buiten beschouwing laten valt dat zeer goed mee. Sneeuw- en



Figuur 3.74:
HT = horizontale spatkracht
W = gewicht van de belasting
T = resultante van HT en W
LT = druklijn (= omgekeerde kettinglijn)

windbelasting worden immers uniform verdeeld over het koepeloppervlak en zullen vooral aanleiding geven tot membraankrachten.

6.10.1 Opmaken van een gunstig koepelprofiel

In §2.1.1 werd reeds vermeld dat:

- Wanneer de hoofdbelasting het eigengewicht is, de funiculaire vorm een kettinglijn zal zijn.
- Wanneer de hoofdbelasting de sneeuwbelasting is, de funiculaire vorm een parabool zal zijn.
- Wanneer de hoofdbelasting een combinatie is van de twee, de funiculaire vorm zich situeert tussen kettinglijn en parabool.

Voor de eenvoud van de berekening gaan we uit van een parabool, niet van een kettinglijn*. Om het een en ander te verduidelijken vertrekken we met drie vormen, drie verschillende parabolen. De eerste is de 'funiculaire afgeleide' van de sferische koepel in El Alto; een tweede is iets steiler en vervaardigd uit adobe; een derde 'koepel' is een traditionele bouwwijze die men terugvindt in Tsjaad en is veel steiler dan de eerste twee. Om de vergelijkingen van de parabolen op te stellen wordt steeds gebruik gemaakt van de momentenlijn $M_{\max} = qL^2/8$ (cfr. een eenvoudige ligger op twee steunpunten) en de spatkracht ($H = qL^2/8h$, in tegenstelling tot een ligger, die een roloplegging heeft). Op elk punt van de boog met abscis x en ordinaat y wordt het moment gegeven door $M(x) = qx^2/2$. Via het rotatie-evenwicht kan een uitdrukking voor de hoogte van dat punt geschreven worden als $y(x) = M(x)/H = (qx^2/2)/(qL^2/8h) = 4h(x/L)^2$. Dit geeft de parabolische vergelijkingen van de koepelvormen in functie van de pijl en de diameter van de koepel. Grafisch wordt dit weergegeven in figuur 3.75.

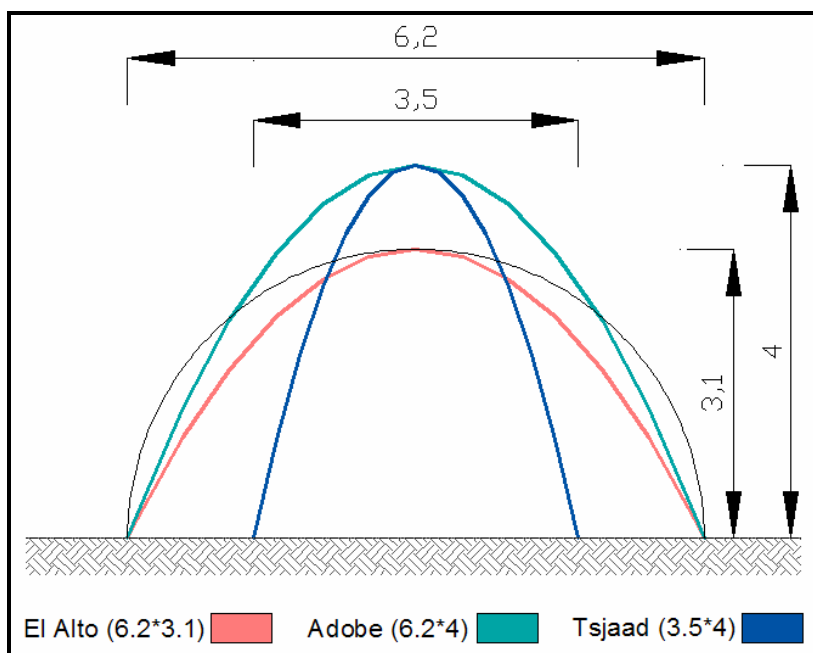
Tabel 3.9: Geometrische eigenschappen van de parabolen

naam	ρ [kg/m ³]	d [m]	q [N/m]	L [m]	$M_{\max}$ [Nm]	h [m]	H [N]	vergelijking parabool
El Alto	2500	0.1	2500	6.2	12012	3.1	3875	$y = 0,323 x^2$
Adobe	980**	0.40	3920	6.2	18836	4	4709	$y = 0,416 x^2$
Tsjaad	2500***	0.1	2500	3.5	3828	4	957	$y = 1,306 x^2$

* In de formule van de kettinglijn komt de onbekende horizontale kracht éénmaal binnen en éénmaal buiten een hyperbolische cosinusfunctie voor. We zouden H dan moeten zoeken door trial and error. Een andere mogelijkheid zou zijn de kettinglijn a.h.v. polfiguren te construeren.

** Dichtheid van adobe die gestabiliseerd werd met 10% vlaslemen.

*** incorrect, in werkelijkheid wordt er gedroogde modder gebruikt. We gebruiken deze waarde ter illustratie van de vorm, niet voor de berekening van interne krachten.



Figuur 3.75: Vorm van funiculairen t.o.v. het referentiemodel

Voor de vorm van de parabool doet het er niet toe of men rekent met 40 cm adobe of 10 cm beton, of 30 cm mest,... In de formule voor $y(x) = M(x)/H = (qx^2/2)/(qL^2/8h) = 4h(x/L)^2$ valt q immers weg. H zal wel recht evenredig met q toenemen bij een zwaarder materiaal met een grotere dikte.

Spatkrachten blijven altijd bestaan, de kabelvorm voor het gewicht heeft immers nooit een verticale raaklijn. Men heeft dan wel heeft geen trekringen nodig, maar als dergelijke koepels een verticale opstand krijgen is er wel een ringbalk nodig. De spatkracht kan geminimaliseerd worden door de optimalisatie van het boogprofiel. Dit is belangrijk voor een zwak materiaal als adobe. Bij een cirkelvormige koepel uit gewapend beton, worden de spatkrachten omgezet tot trekkrachten in de parallellen. Wegens de enorm kleine trekkracht van adobe, zal een adobe koepel geen weerstand kunnen bieden aan deze trek, zelfs al is het materiaal 'gewapend' met vlaslemen. De omzetting van radiale spatkrachten naar tangentiële trek mislukt. De koepel spat aan zijn basis uiteen, en er ontstaan verticale scheuren vertrekkend vanaf de basis naar boven.

Het is dus van groot belang dat men bij adobe koepels de kracht H klein houdt. Voor een eenparig verdeelde verticale belasting q is $H = qL^2/8h$. De eis tot kleine H kan dan praktisch omgezet worden in een grote (h/L) -verhouding. Vooral de diameter van dergelijke koepel heeft vanwege de kwadratische term een grote invloed op H . Deze is in woningen echter gebonden aan een bruikbaar vloeroppervlak, waardoor 3.1 m toch een minimum is. Dit verschuift de oplossing naar een grote pijl van de koepel. In

Tsjaad heeft men dat goed begrepen. Inderdaad is het aanschouwelijk dat de steile (groene) koepel in de figuur 3.75 minder spatkrachten zal induceren dan de rode variant zoals hij bestaat in El Alto.

In EPW zullen we de rode (betonnen) versie uit figuur 3.75 simuleren. Die sluit het dichtste aan bij de bestaande koepel, die berekend werd in Capsol.

6.10.2 Reacties

Bekijkt men de tabel 3.10 die de globale extremen van reacties in steunpunten geeft. Men stelt vast dat de extreme Rx en Ry vergroot zijn t.o.v. scenario 2, en dat Rz verkleind is. Omdat het profiel van de paraboloïde binnen dat van de sfeer valt (figuur 3.75) is het gewicht kleiner, wat de afname van Rz gedeeltelijk verklaart. Een ander deel van de verklaring ligt in de toegenomen spatkracht op de grond en de daardoor verkleinde verticale component van de afgedragen belasting.

Tabel 3.10: Extreme reacties op de 'kettinglijn'-koepel – waardes in knopen

Steunpunt	knoop	combi	Rx [kN]	Ry [kN]	Rz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
29	642	6	1.18	-0.38	2.14	0.00	0.00	0.00
10	787		-1.18	-0.38	2.14	0.00	0.00	0.00
3	1070	5	0.10	1.10	2.29	0.00	0.00	0.00
19	127	6	-0.00	-1.44	2.57	0.00	0.00	0.00
	408		-0.04	-1.34	2.59	0.00	0.00	0.00
3	120	3	-0.00	0.26	0.51	0.00	0.00	0.00

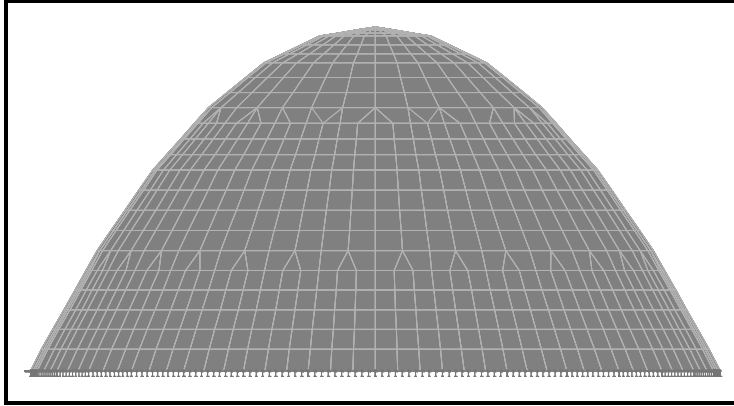
6.10.3 Vervormingen

Maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen:

Maximale verplaatsing -0.008 mm BG1 dit is de top.

Maximale verplaatsing -0.010 mrad BG2 dit is een knoop aan de onderrand.

Voor het eerst zijn de vervormingen afgenomen. Men ziet ook geen buigvervorming in de vervormingsfiguur 3.76.

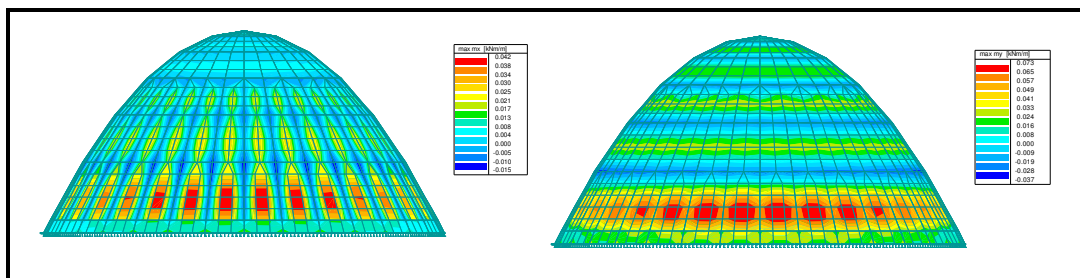


Figuur 3.76: Vervorming van de 'kettinglijn'-koepel onder het eigengewicht

6.10.4 Interne krachten

Het grootste moment **mx** bedraagt in de paraboloïde 0.042 kNm (figuur 3.77). In de hemisfeer is het moment om de x-as met de grootste absolute waarde $\min mx = -0.041$ kNm; gelijkaardig op het eerste zicht, maar men moet zich herinneren dat de koepel uit scenario 1 een 2D macro was. Hier doet de buiging zich duidelijk voor in (het midden van) de grootste platen onderaan*, waar ook bij de hemisfeer de wind zich het krachtigst voordoet.

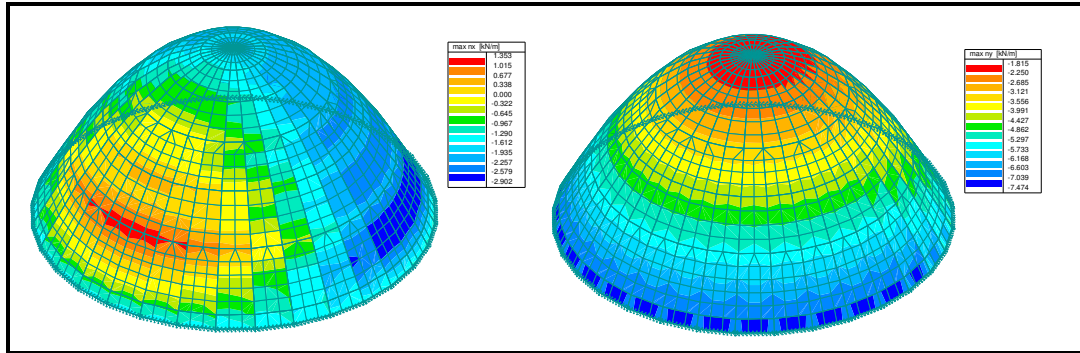
Het grootste moment om de y-as doet zich op dezelfde plaatsen/platen voor, met $\max my_{\max} = 0.073$ kNm (rechterfiguur 3.77). Dit ten opzichte van 0.196 kNm bij de hemisfeer.



Figuur 3.77: max mx, max my in UGT

Bekijkt men de tekeningen in figuur 3.78. In de parallellen onderaan de koepel bestaan er nog kleine trekkrachten **nx** (1.353 kN/m maximaal), die uitsluitend het gevolg zijn van windkrachten. Dit is een verschil van één grootteorde met 12.288 kN/m die in een hemisfeer wordt gehaald. Het verloop van de meridiaan krachten **ny** wordt niet veel beïnvloed door de koepelvorm, de druk gaat van -1.815 kN/m bovenaan (wat iets minder is wegens de scherpe top) tot -7.474 kN/m aan de basis.

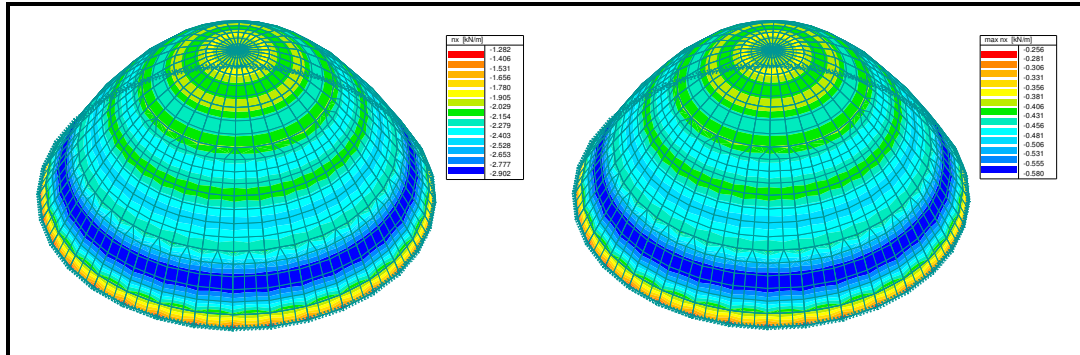
* cf. voor het tekenen van de parabool in AutoCad werd voor $\Delta x = 0.5$ m genomen, meer naar de randen van de parabool – waar die steiler is – resulteerde dat in grote verschillen tussen twee opeenvolgende y-ordinaten dus grotere platen



Figuur 3.78: max nx, max ny in UGT

Men ziet in de figuren 3.79 dat wanneer de wind niet in rekening wordt gebracht, en de koepel enkel belast wordt met verticale uniform verdeelde belastingen, de trekkrachten uit de parallellen helemaal verdwijnen!

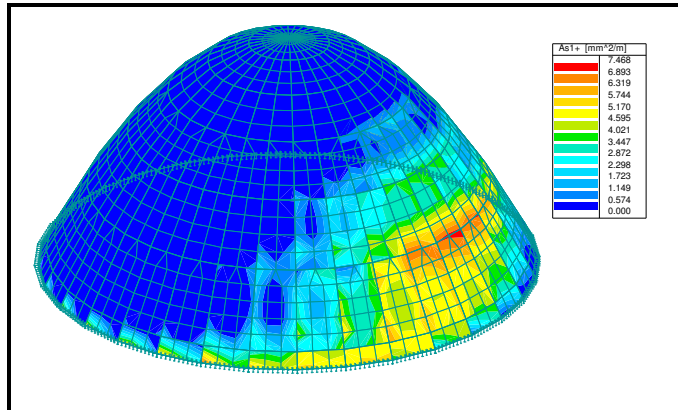
Inderdaad, als de meridianen de kabelvorm van de belasting hebben, dan verdwijnen ook de krachten in de parallellen daar de meridianen alleen al volmaakt evenwicht behouden. De koepel bestaat als het ware uit oneindig veel op zichzelf stabiele bogen. In dergelijke structuur zal geen buiging optreden, enkel druk en trek. De kettinglijnform of parabool zal daarom ook zeer gunstig zijn voor openingen.



Figuur 3.79: nx (BG1), max nx (BG1,3). Er is steeds druk onder de gecombineerde werking van sneeuw en het eigen gewicht

6.10.5 Wapening

De grootste wapeningsoppervlakte die gevraagd wordt in laag Ls1+ is **As1+=7.468 mm²/m** (figuur 3.80). Dit is 5 maal minder dan in een hemisfeer en louter het gevolg van windwerking. Als er geen wind zou zijn zou er in principe geen wapening nodig zijn, in tegenstelling tot bij de hemisfeer, waar er onder $\varphi = 51^\circ$ altijd wapening nodig is. Hetzelfde geldt in de andere drie wapeningslagen.



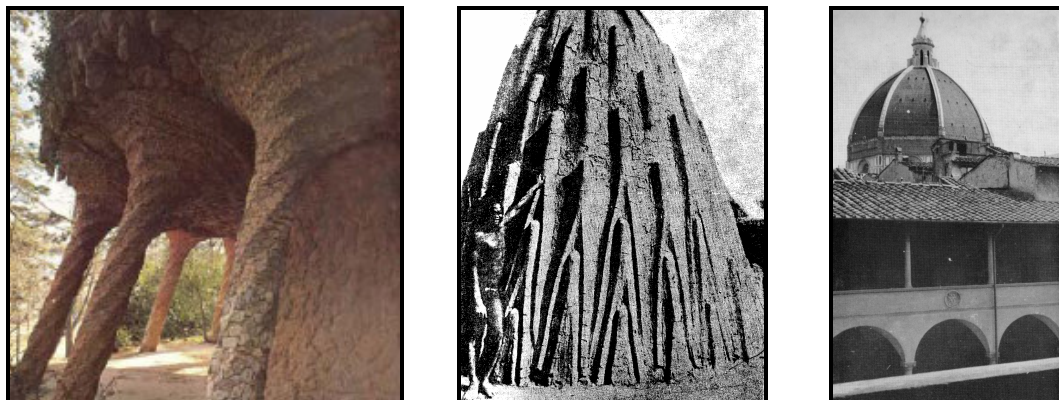
Figuur 3.80: As1+

6.10.6 Besluit

Deze uiteenzetting moge duidelijk maken dat de kettinglijn en parabool ideale vormen zijn om bogen uit te vervaardigen, zowel als basis voor de koepelvorm, als in het opzicht van openingen in de koepel.

Gaudi wist dat bij de constructie van arcades in het Park Güell (figuur 3.81a).

Brunelleschi paste een parabolische geometrie toe in zijn beroemde koepel van de Dom van Florence (figuur 3.81b): een ongewapende koepel, met een ringbalk (een soort ceintuur) in de basis om de onderliggende constructie te sparen.

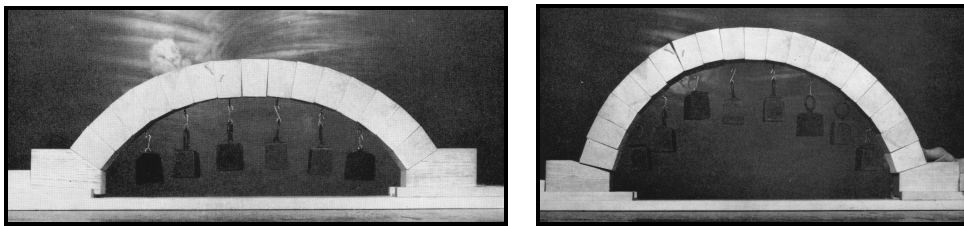


Figuur 3.81 a) Druklijnen in het Park Güell; b) Steile kettinglijn-koepel in Tsjaad; c) De koepel van de Dom van Florence

De inwoners van Tsjaad zijn al eeuwen vertrouwd met de optimale koepelvorm. Dit geeft een unieke traditionele woningbouw zoals men kan zien in figuur 3.81 c. [38] Zelden is de mens er met zo weinig middelen in geslaagd een constructietype uit te denken dat zo rationeel is, dat zich zodanig geadapteerd heeft aan de eigenschappen van een materiaal en aan de vereisten van eenvoud en economie dan in Tsjaad. De trekkrachten zijn er zodanig klein dat zelfs de modder hen kan dragen. Bovendien is de

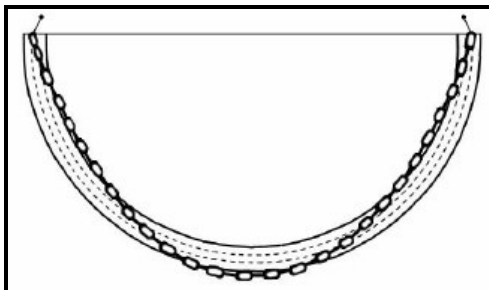
constructie altijd stabiel gedurende de vervaardiging, door de stelselmatige opbouw in ringen, zoals de Inuït dat ook doen met ijsblokken. Anders gezegd: dit gebeurt zonder stellingen of dure luchtvormen.

Wil men echter de bolvormige Monolithic Dome Airform blijven hanteren, dan stellen we het volgende voor: Wanneer de pijl van een cirkelboogsegment een kwart van de overspanning bedraagt (of: $\varphi \approx 53^\circ$), dan benadert het cirkelsegment een paraboolsegment (dit brengt ons bij de 'neutrale lijn'-koepel op schuine muren uit scenario 5). Beschouwt men vanuit dit oogpunt de figuren 3.82 a en b. In Figuur 3.82 a is een modelboog geconstrueerd die een cirkelsegment volgt met $h=L/4$, nauw aansluitend met de parabolische 'natuurlijke' druklijn. In figuur 3.82 b wordt het segment verlengd tot een hemisfeer. De vorm komt dan niet langer overeen met de natuurlijke druklijn. Er ontstaan momenten die ertoe leiden dat de verbindingen onder trek zich openen. [39]

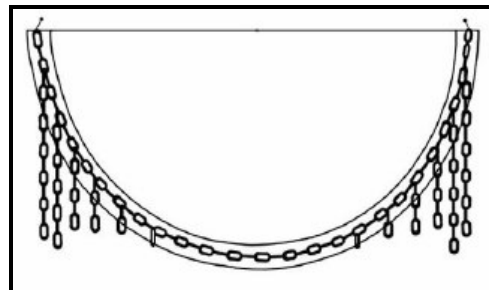


Figuur 3.82: a) Benadering van een parabool b) Cirkelvormige boog

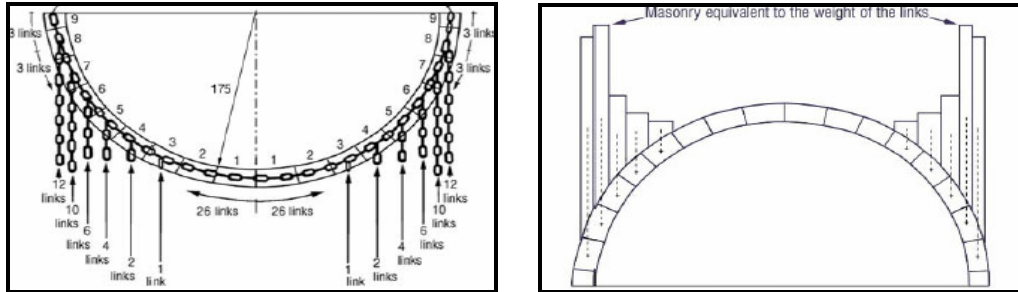
Een andere manier om te vertrekken van cirkelvormige bogen behelst het toevoegen van gewicht op de zijkanten van de koepel. Dit kan geïllustreerd worden a.h.v. bijkomende kettingkjes die men aan de kettinglijn hangt, tot de funiculair samenvalt met de cirkelboog (figuur 3.83). [37]



1. Ketting vrij opgehangen



2. Ketting belast met kleine stukjes ketting



3. Segmenten met het aantal verbindingen 4. Theoretische gewichten met baksteen.
 Figuur 3.83 overgang van een druklijn naar een hemisfeer door extra gewicht toe te voegen

Tenslotte kan men er voor kiezen om toch een hemisfeer te bouwen, maar met een geleidelijke verdikking van de schaalwand naar onder toe, zodat

- de spanningen daar beperkt worden (grotere oppervlakte),
- de weerstand tegen buiging vergroot (grotere hefboomsarm),
- de spatkrachten voor een klein deel door de koepel zelf 'in toom' gehouden worden.

6.11 Scenario 7: Grote koepel

Dit scenario gebruiken we slechts beperkt. De grote koepel in El Alto is bedoeld om een aantal vrijgezellen te huisvesten. De koepel heeft een diameter van 9.15 m en is dus 1.5 keer groter dan zijn kleine versie uit scenario 4. De dikte van de schaal blijft echter 10 cm. Het binnenklimaat van deze koepel werd niet berekend in Capsol. We willen hier een idee krijgen van de benodigde wapening, en we kijken de invloed van de grootte van de koepel na.

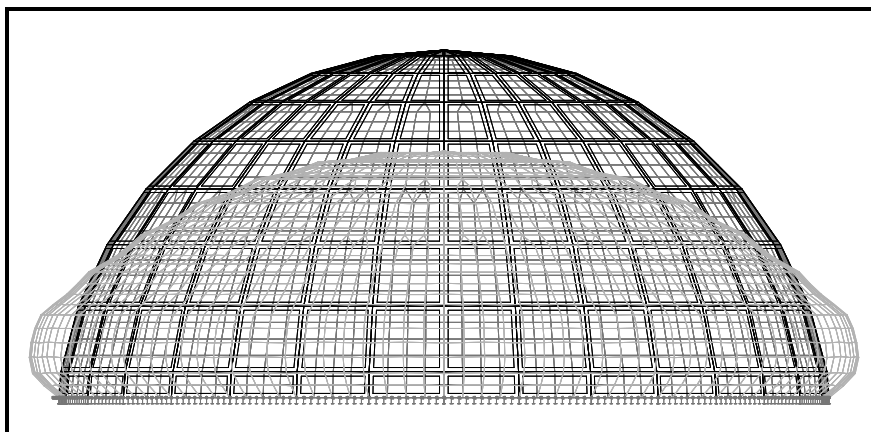
6.11.1 Vervorming

Maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen:

Maximale verplaatsing -0.032 mm BG1 aan de top.

Maximale rotatie -0.035 mrad BG1 een knoop aan de onderrand.

De figuur 3.84 die de vervorming onder het eigengewicht voorstelt is natuurlijk gelijk aan die uit scenario 4 (figuur 3.60), enkel de schaal zal verschillen.

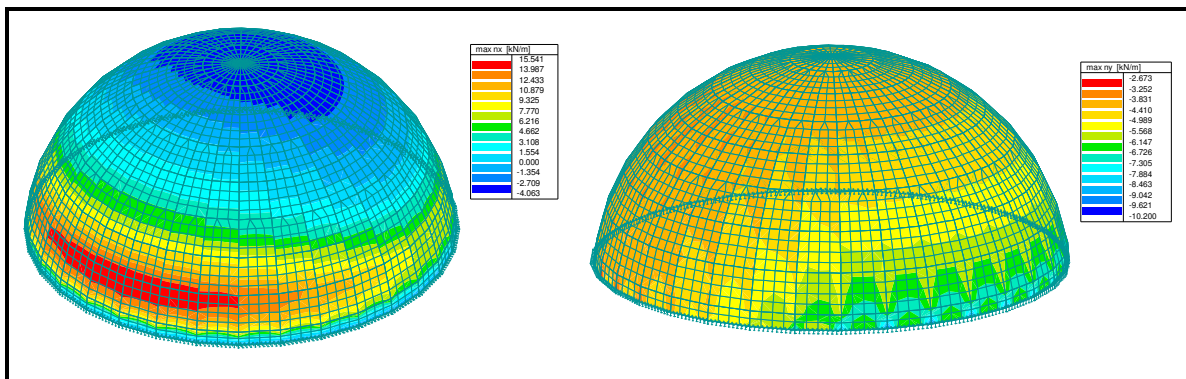


Figuur 3.84: Vervorming van de grote koepel door het eigen gewicht

6.11.2 Interne krachten

De maximale parallelkracht bedraagt onder UGT 15.541 kN/m, t.o.v. $\max \mathbf{n}_{\max} = 10.055$ kN/m in zijn kleinere tegenhanger (scenario 4, figuur 3.61). De minimale parallelkracht is een drukkracht van $\min \mathbf{n}_{\min} = -8.782$ kN/m (6.694 kN/m in de kleinere versie). Hoewel in beide gevallen φ hetzelfde is (48°), het gebruikte materiaal ook hetzelfde is (beton met volumieke massa 2500 kg/m^3), maakt de grotere straal het verschil in de formule van de membraankrachten (§3.2.1).

De membraankrachten in de lokale y-richtingen zijn drukkrachten gelegen tussen $\max \mathbf{ny}_{\max} = -2.673 \text{ kN/m}$ en $\min \mathbf{ny}_{\min} = -28.521 \text{ kN/m}$, en door het grotere gewicht hier in absolute waarde meer dan bij scenario 4 (figuur 3.62).

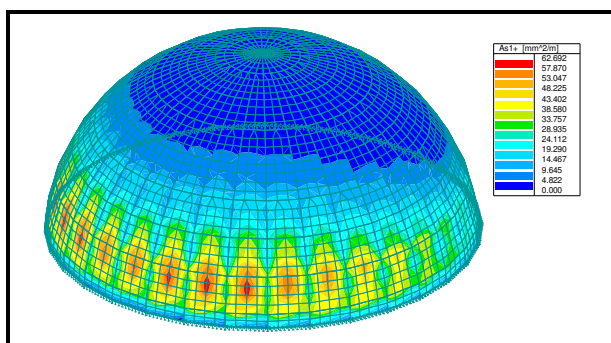


Figuur 3.85: max nx, max ny in UGT

Het patroon van de max **qxy** onder de UGT is volledig identiek aan de hemisfeer maar de schaal is ongeveer verdubbeld: beide grenzen zijn dubbel zo groot als bij de hemisfeer. Men heeft immers een grotere koepeloppervlakte, de wind accumuleert zich over een groter oppervlak en de schuifkrachten klimmen dus hoger in waarde.

6.11.3 Wapening

6.11.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes



Figuur 3.86: As1+

De grotere membraankrachten in deze grotere koepel worden niet verdeeld over een dikkere schaalwand, die blijft 100 mm, waardoor de spanningen en wapeningshoeveelheden zullen oplopen. De benodigde wapeningsoppervlakte aan de

buitenzijde, gelegen volgens de parallellen, is maximaal **As1+=62.7** mm²/m aan de verstoorde randzone (figuur 3.86), oppervlakte die geleverd kan worden door het kippengaas.

De benodigde staaloppervlakte voor alle andere wapeningslagen vertonen het zelfde patroon als As1+ met als grenzen: $0 \text{ mm}^2/\text{m} \leq \mathbf{As2+} \leq 13.6 \text{ mm}^2/\text{m}$, $0 \text{ mm}^2/\text{m} \leq \mathbf{As2-} \leq 13.7 \text{ mm}^2/\text{m}$, $0 \text{ mm}^2/\text{m} \leq \mathbf{As1-} \leq 68.7 \text{ mm}^2/\text{m}$. De bovengrens van As1- ligt iets boven de staaalhoeveelheid die door kippengaas geleverd kan worden. Uit scenario 2 bleek dat de eisen gesteld aan een gesegmenteerde koepel ietwat strenger waren dan de eisen gesteld aan een volmaakte halve bol. Dit kwam doordat de gesegmenteerde koepel is opgebouwd uit platen en dus voor een groter deel op buiging werkt. De kans is groot dat deze grote koepel in zijn geheel in werkelijkheid genoeg heeft aan kippengaas. Maar van zodra er openingen in de koepel komen zal dit fijnmazig net niet meer volstaan.

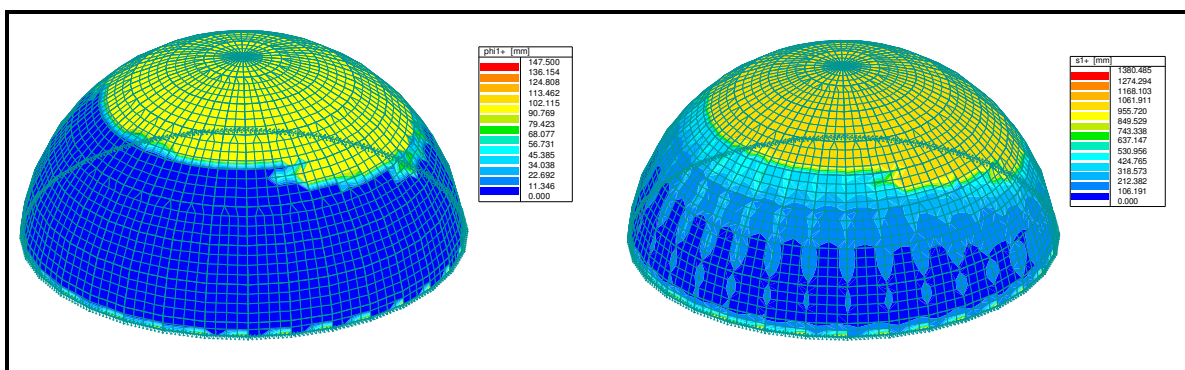
Er is geen schuifwapening nodig, **Ass=0**.

6.11.3.2 Maximale staafdiameters en staafafstanden

Het gebied rond de kroon voldoet gemakkelijk aan de GGT, er is daar geen gevaar voor scheuren wanneer de staven in de parallellen niet dikker zijn dan **phi1+=148** mm (figuur 3.87). In de lagere regionen moeten de staafdiameters kleiner zijn dan 11 mm. Enkel aan de onderrand mag het lokaal meer zijn.

phi2+ is over het algemeen 100 mm. **phi2-=99** mm. **phi1-** vertoont hetzelfde patroon als phi1+.

s1- en **s1+** (figuur 3.87) vertonen dezelfde tekening, beide schommelen tussen 100 mm en 1400 mm staafafstand, op enkele plaatselijkheden na. Algemeen geldt dat **s2+=s2-=1000**, enkel aan de onderrand treden lokaal variaties op voor s2+ tussen 222 mm - 1300 mm (net als phi2+).



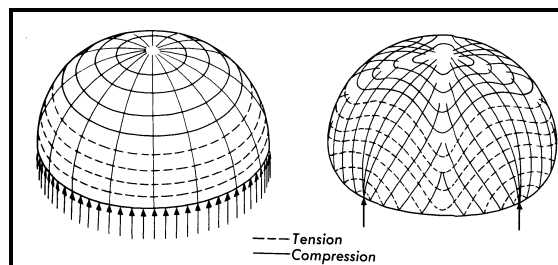
Figuur 3.87: phi1+, s1+

6.11.4 Besluit

Uit scenario 4 kwam voort dat de vorm van de grote koepel gunstiger was dan een hemisfeer. Men zou verwachten dat een grotere koepel met deze gunstige vorm ook goed presteert, maar dat geldt enkel wanneer men de wanddikte mee verschaalt. Enkel zo zullen de toegenomen membraankrachten gelijkaardige beperkte spanningen opleveren.

6.12 Scenario 8: Koepel met openingen & Scenario 9: Koepel met randverstijfde openingen

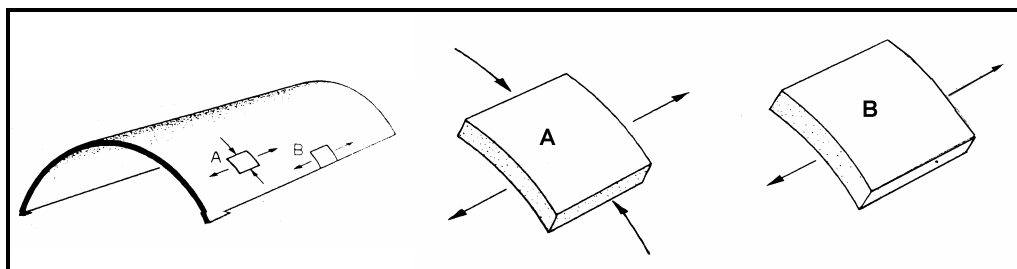
De membraantheorie onderstelt een continue ondersteuning. Zo verandert het membraanspanningspatroon in een koepel die ondersteund wordt door kolommen (discreet en bovendien verticaal), volgens figuur 3.88. De membraanspanningstoestand zal zich slechts



Figuur 3.88: Hoofdspanningslijnen onder eigengewicht

in de buurt van de kroon instellen. Nabij de steunpunten moet men rekening houden met randstoringen: buiging en wringing door de lokale krachten.

Hetzelfde geldt als delen van de koepel uitgesneden worden. Raam- en deuropeningen verstoren het natuurlijke krachterspel en zij veroorzaken eveneens buiging van de schaalwand. Figuur 3.89 toont dat een schaaldeeltje middenin de schaal in alle richtingen normaalspanningen kan overbrengen, terwijl dit niet mogelijk is voor schaaldeeltjes aan de buitenrand: er kunnen hier uitsluitend spanningen overgebracht worden evenwijdig met de schaalrand.

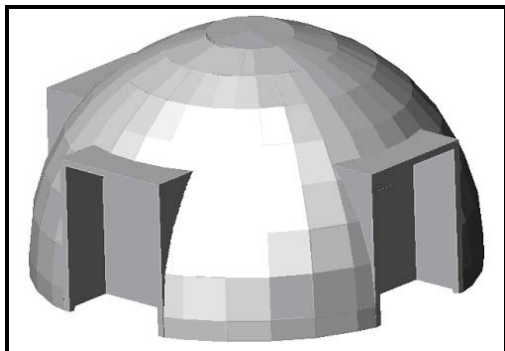


Figuur 3.89: Krachtoverdracht door een element A in het midden van een schaal t.o.v. een element B aan de schaalrand.

Om nu zowel de schaalvervorming (compatibiliteit van de verplaatsingen, zie scenario 1 §6.5.3.1) als de continuïteit van de ondersteuning te respecteren, en de reacties altijd in de richting van de meridianen te sturen (zie scenario 5 §6.9.4.2), moet de schaal eigenlijk rusten op talrijke, wrijvingsloze gewrichten waarvan de rolbaan haaks op het schaaloppervlak staat.

In deze scenario's wordt het spanningsbeeld onderzocht van een koepel met volgende kenmerken: Materiaal: beton C12/15, dikte: 10 cm, opstand: 30 cm, drie rechte openingen.

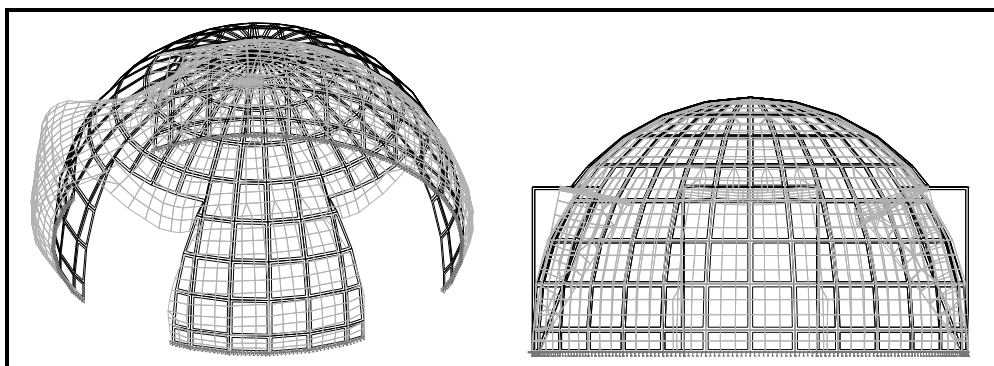
De openingen vormen constructief zwakke zones en hun effect op het globale en lokale structureel gedrag van de koepel wordt nagegaan in scenario 8. In scenario 9 wordt uiteindelijk de werkelijke koepel ingevoerd, zoals hij in El Alto bestaat, met randverstijvingen langs de openingen (figuur 3.90). Na de plaatsing van de ramen wordt de restructuur in de openingen onderaan opgemetseld, maar dat metselwerk staat dan volledig los van de koepelmonoliet dus is in EPW niet ingevoerd als een bijdrage tot de structuur



Figuur 3.90: De koepel zoals hij werd ingevoerd in scenario 9

6.12.1 Vervormingen

Figuur 3.91a stelt de vervorming voor onder het eigen gewicht zonder randverstijvingen. Er is duidelijk zeer veel vervorming langs de openingen. In figuur 3.91b wordt deze vervorming gedeeltelijk belemmerd door toevoeging van drie randverstijvers per opening. Men kan zich indenken dat er hierdoor heel wat spanningen zullen optreden in de verstijvers, om de vervormingen te weerstaan.



Figuur 3.91: Vervorming onder eigen gewicht van a) koepel zonder randverstijvers; b) koepel met randverstijvers.

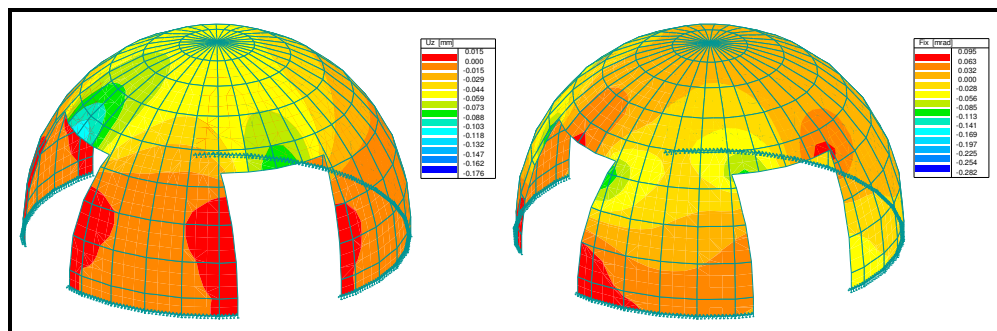
6.12.1.1 Maximale vervormingen in scenario 8: zonder randverstijvers

De maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen zijn:

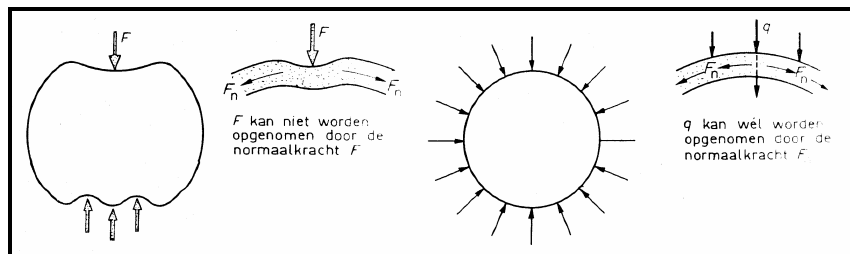
Maximale verplaatsing -0.176 mm BG1. Deze verplaatsing treft een knoop aan de bovenrand van een opening, waar het bovenliggende beton van de koepel op drukt.

Maximale rotatie -0.282 mrad BG1 aan de bovenrand van een opening.

In figuur 3.92 worden de vervorming **Uz** (verplaatsing in verticale richting) en **Fix** (rotatie om de parallel-richting) gegeven. De maximale Uz bedraagt inderdaad 0.176 mm in het midden van de bovenregel van een opening. Dit fenomeen treedt algemeen op boven openingen, en men lost het doorgaans op met lateien, maar in koepels ligt het waarschijnlijk meer voor de hand om de openingen uit te voeren als bogen (figuur 3.93), wat we zullen controleren in scenario's 10 en 11. De maximale rotaties treden op in de hoekpunten van de openingen, zowel onderaan als bovenaan.



Figuur 3.92: Vervormingen Uz en Fix t.g.v. het eigen gewicht



Figuur 3.93: Onmogelijkheid van een plat vlak om loodrechte krachtscomponenten op te vangen zonder buiging op te wekken.

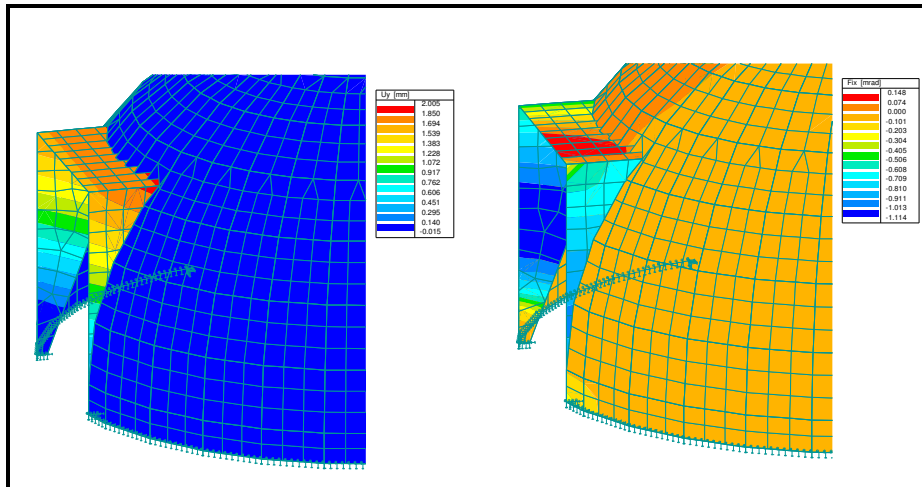
6.12.1.2 Maximale vervormingen in scenario 9: met randverstijvers

De maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen zijn:

Maximale verplaatsing 2.005 mm BG2. Deze verplaatsing treft een knoop aan de bovenrand van een opening, waar het bovenliggende beton van de koepel op drukt.

Maximale rotatie -1.114 mrad BG2 knoop halverwege de hoogte van een opening.

Men ziet al dat deze laatste koepel grotere vervormingen geeft dan de koepel zonder randverstijvingen, het zijn namelijk de verstijvers die deze maximale vervormingen ondergaan. De verstijvers nemen de belasting over van de schaal, vooral aan de bovenkant van de openingen. De verstijvers zelf zijn platen en zullen door deze belastingen sterk uitbuigen. Dit is duidelijk te zien op de figuren 3.94.



Figuur 3.94: Vervorming Uz en Fix t.g.v. de windbelasting

Door de inwerking van de wind bedraagt de verticale verplaatsing Uz maximaal 2 mm in het hoekpunt tussen de hoekpunten waar de verstijver en de schaal samenkomen. De figuur van Fix geeft de buigwerking van de randplaten weer. Een maximum van -1.114 mrad wordt behaald in de middens van de verticale verstijvers.

6.12.2 Interne krachten

6.12.2.1 Interne krachten in scenario 8: zonder randverstijvers

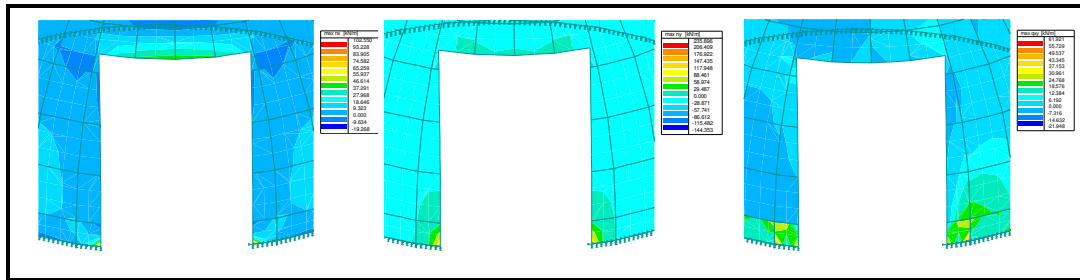
De maximale horizontale spanningen **nx** lopen in de strook boven de openingen en in de onderhoeken op tot ca. 50 kN/m (figuur 3.95). Bovenin de koepel heerst druk, onderin een beperkte trek van 9 à 19 kN/m.

Voor de verticale membraankrachten **ny** heeft de introductie van openingen voor een radicale ommezwaai gezorgd. Waar de meridianen van de volle koepel nog volledig onder druk stonden, speelt er nu veel trek (figuur 3.95). Bovenin de openingen haalt men trekkrachten van 30 kN/m. Langsheen de openingen heerst er nog druk. Onderin de openingen, naar de hoekpunten toe lopen grote trekkrachten op tot 100 kN/m.

Ook de schuifkrachten **qxy** lopen op in de hoeken (figuur 3.95).

Algemeen kan men stellen dat de hoekzones steeds de zwakke plaatsen vertegenwoordigen in constructies met openingen. Daar waar men aan een rand

slechts krachten kan overbrengen evenwijdig aan deze rand, geldt dit gebrek aan hoeken in twee richtingen.



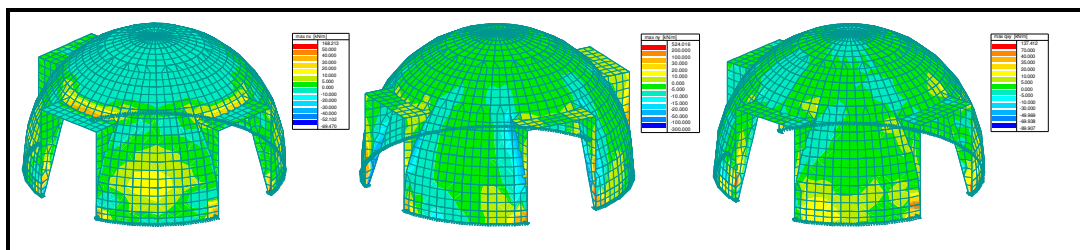
Figuur 3.95: max nx, max ny, max qxy onder UGT

6.12.2.2 Interne krachten in scenario 9: met randverstijvers

Men kan in de linkse tekening van figuur 3.96 nog een klein beetje een bovendee in druk onderscheiden (**nx** van ca. -10 kN/m) en een onderdeel in trek (5 kN/m). In de hoekpunten onderin lopen de trekkrachten in de x-richting op tot 50 kN, en in de bovenregel van de openingen tot 40 kN, tot lokale maxima van 168 kN/m onderin de verstijvers en op de bovenregel.

Voor de verticale membraankrachten **ny** heeft de introductie van openingen voor een radicale ommeezwaai in de membraankrachten gezorgd. Waar de meridianen van de volle koepel nog volledig onder druk stonden, speelt er nu veel trek. Langsheen de openingen zijn er verticale stroken van lichte druk (-5 à -50 kN/m), die naar de hoekpunten onderaan oplopen tot trekkrachten. Op de randverstijvers zelf variëren de verticale krachten van beperkte druk in de bovenregel naar zeer grote trekkrachten van 524 kN/m.

Max **qxy**: de grootste schuifspanningen treft men aan onderin de verstijvers. In de rest van de koepel schommelt de schuifspanning tussen +5 en -5 kN/m.

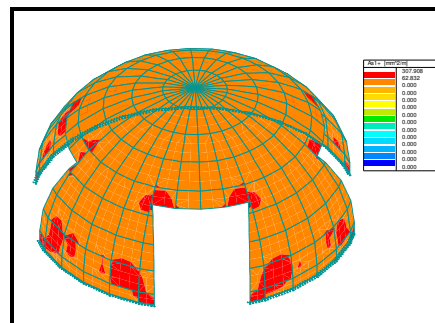


Figuur 3.96: max nx, max ny en max qxy onder UGT

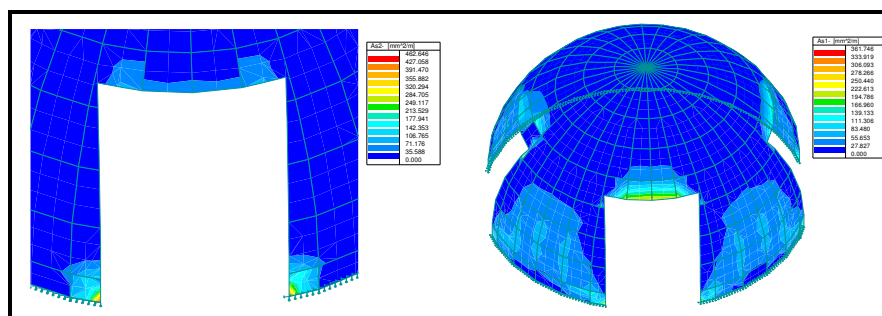
6.12.3 Wapening

6.12.3.1 Benodigde wapeningoppervlaktes in scenario 8: zonder randverstijvers

As1+ bedraagt maximaal 308 mm²/m in de onderste hoekpuntjes van de opening. Op de figuur 3.97 is te zien welke oppervlakte gedekt kan worden met een kippengaas. De probleemzones komen er duidelijk in naar voor: de hoeken van de openingen en (in mindere mate) de onderste gedeelten tussen twee openingen in. Het zijn de zones die veel meer wapening nodig hebben en veel meer eisen stellen m.b.t. scheurcontrole dan een eenvoudige, volledige koepel zoals bijvoorbeeld in scenario 2.



Figuur 3.97: As1+



Figuur 3.98: As2- en As1- in scenario 8

Zéér lokaal bedraagt de wapening in de meridiaan richting **As2+**=1213 mm²/m. Over een zone van 20 cm langs de onderste hoeken is nog tot 90 mm²/m nodig, en de rest van de koepel heeft genoeg aan 0 tot 60 mm²/m.

As2- bedraagt maximaal 462 mm²/m in de hoekpuntjes (links in figuur 3.98). Er is een beperkte zone waar nog ca 70 mm² staal per meter in moet, en in de rest van de koepel volstaat slechts 0 tot 36 mm²/m.

Een sterk gewapende zone moet in de laag Ls1- enkel voorzien worden boven de openingen: **As1-**=250 mm²/m (rechts in figuur 3.98). Ook de onderste hoekpuntjes eisen zeer veel wapening.

Ass is globaal gezien niet nodig, behalve aan de bovenste hoekpuntjes blijken er problemen te zijn.

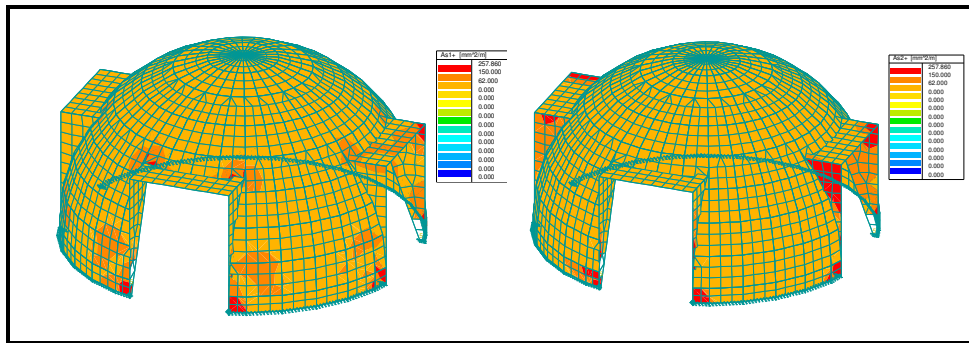
Men mag besluiten dat er enkel in de hoekpunten rond de openingen en boven de openingen veel wapening is vereist. In de rest van de koepel volstaan twee lagen kippengaas.

6.12.3.2 Benodigde wapeningoppervlaktes in scenario 9: met randverstijvers

Er geldt dat de grootste benodigde wapeningshoeveelheid **As1+**, 258 mm²/m bedraagt in de onderste en bovenste hoekpuntjes van de openingen (figuur 3.99), wat 50 mm²/m minder is dan in scenario 8. De zwakke zones blijven wel zwak.

In de verticale richting ziet men dat de randverstijvers zwaar gewapend moeten worden om buigkrachten op te vangen: **As2+** loopt op tot 258 mm²/m (figuur 3.99) en **As2-** geeft hetzelfde.

Enkel zeer lokaal is er schuifwapening **Ass** nodig: aan de onderrandjes van de openingen en aan de bovenhoeken van de randverstijvers. Daar loopt Ass op tot zeer lokaal 16056 mm²/m, wat natuurlijk onrealistisch hoog is.



Figuur 3.99: As1+ en As2+

6.12.4 Besluit

Het maken van openingen in een koepel heeft een zeer grote impact op het krachtenverloop. De oorspronkelijke verdeling in een trek- en een drukzone volgens de parallellen valt nauwelijks nog te onderkennen. Ook in de richting van de meridianen loopt de krachtenafdracht niet zo vloeiend als bij de volle hemisfeer. De afdracht kan zich niet volbrengen door de openingen en de krachten die op de openingen terecht komen moeten zijdelings langsheen de opening geleid worden. Dit is echter onmogelijk bij een rechte opening die enkel horizontale krachtscomponenten zijdelings kan afvoeren, en geen verticale. De verticale krachten zullen aanleiding geven tot buiging van de bovenrand. Meestal wordt dit probleem in de woningbouw opgevangen door een latei boven de opening. In koepels opteert men liever voor een oplossing die beter aansluit bij de geometrie van de schaal. Als men boogopeningen toepast kunnen de krachten eenvoudig afgeleid worden (zie scenario 10 en 11).

Op alle vlakken worden lokale discontinuïteiten vastgesteld: spanningsophopingen, wapeningsconcentraties en extreme eisen om aan de gebruiksgrenstoestand te voldoen. Deze lokale effecten doen zich enerzijds voor aan

knikpunten, punten die niet de unieke continuïteit hebben eigen aan schalen. Anderzijds komen dergelijke storingen ook voor in randen, waar de spanningsoverdracht ook niet in alle richtingen kan verlopen. Om deze ongerijmdheden met de koepeltheorie te vermijden, past men beter afgeronde hoeken toe, met andere woorden, valt de keuze weer op boogopeningen.

Wat de verstijvingen betreft: deze blijken op het eerste zicht eerder een negatief effect te hebben in EPW. Maar dit effect ressorteert vooral op de platen zelf. De 'verstijvers' verstijven de schaal wel, maar vervormen zelf meer door hun buigwerking. Het zijn platen die krachten overnemen van de schaal. Een vergelijking van de benodigde wapeningsoppervlaktes A_{s1+} toont aan dat de verstijvingen wel degelijk zin hebben. De benodigde staaloppervlaktes in de bestaande koepel (figuur 3.99) zijn kleiner dan die in de koepel zonder randverstijvers (figuur 3.97).

6.13 Scenario 10: Koepel met boogopeningen & Scenario 11: Koepel met brede boogopeningen

In scenario 8 en 9 werd duidelijk dat openingen vooral onregelmatigheden geven aan hun hoekpunten. De opzet van dit scenario 10 was dan ook oorspronkelijk bedoeld om te controleren of afronding aan de hoeken hieraan kon verhelpen. Het vergt echter een zeer fijnmazig invoermodel om een boog realistisch te benaderen. De overgangen tussen de platen in het ingevoerde model vertonen te veel knikpunten. Daar hopen de spanningen zich op, in tegendeel tot wat men zou verwachten bij bogen. In een volgend scenario 11 werd daarom de boog groter gemaakt, zodat de ombuiging geleidelijker verloopt, en de knikpunten minder scherp zijn. Er werd besloten om het hier op één opening te houden, daar we vermoedden dat er bij drie openingen onvoldoende materiaal tussen twee openingen in bestond, om een tegengewicht te vormen voor de spatkrachten van de bogen (want dat zijn de openingen tenslotte).

6.13.1 Vervormingen

Er is een duidelijk verschil in vervorming tussen de twee scenario's (figuur 3.100), en het is interessant om hier op in te gaan. Het is waarschijnlijk dat de belangrijkste reden van dit verschil ligt in het aantal openingen. Er zijn drie smalle boogopeningen in de ene koepel, tegenover slechts één brede opening in de andere koepel. De restgebieden tussen twee openingen ondervinden een vergrote kracht doordat zij ook de belastingsafdracht die niet langs de openingen kan gebeuren moeten verzorgen. Bovendien wordt hun doorbuiging versterkt doordat zij langs weerszijden geen weerstand ontvangen van naastliggende materie. Dit in tegenstelling tot een koepel met slechts een enkele opening, waar de doorbuiging van het gebied naast de opening weerstand ondervindt van het nevenliggend cohesief materiaal. Als men de openingen meer spreidt zal het vervormings-versterkende effect waarschijnlijk afnemen, daar er meer gekromd oppervlaktevormend materiaal weerstand biedt.

Wanneer de openingen zich aan weerskanten van de koepel bevinden, zal het versterkende effect wegens symmetrieredenen verdwijnen. Daarnaast valt op te merken dat een koepelvorm die niet de neiging heeft om uit te buigen – zoals een kettinglijn-koepel, deze neiging waarschijnlijk ook niet zal hebben wanneer er openingen in de schaal gemaakt worden.

Algemeen zal de koepel grotendeels zijn unieke werking - te danken aan zijn gekromde en continue oppervlak – behouden door minder 'happen' materiaal weg te nemen. De structuur kan dan overal in twee richtingen werken en waar de krachtswerking ontoereikend is komt het schuifmechanisme tussen.

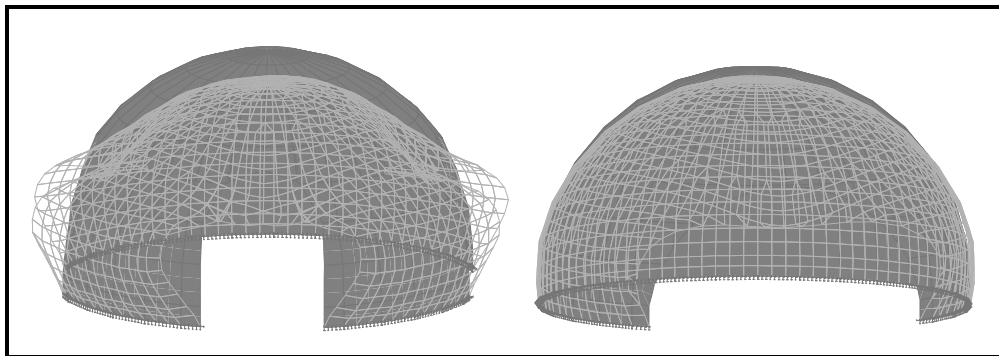
6.13.1.1 Maximale vervormingen in scenario 10: smalle boogopeningen

Maximale verplaatsing	0.093 mm	BG1	bovenaan een opening.
Maximale rotatie	-0.120 mrad	BG1	aan de rand.

6.13.1.2 Maximale vervormingen in scenario 10: brede boogopeningen

Maximale verplaatsing	-0.156 mm	BG1	bovenaan een opening.
Maximale rotatie	0.145 mrad	BG1	op 1.7 m hoogte aan een rand.

Hoewel de koepel zelf meer vervormt in het scenario 10, vervormt de boog meer bij scenario 11. Ter vergelijking kan men een ei nemen en het verschil in breekbaarheid van de platte zijkant t.o.v. de scherpere bovenkant nagaan. Of men kan de slanke gotische spitsgewelven vergelijken met de slechte prestatie van de cirkelvormige bogen van de Romeinen, die zware steunconstructies nodig hebben (cf. de 6 meter dikke muren van het Pantheon).

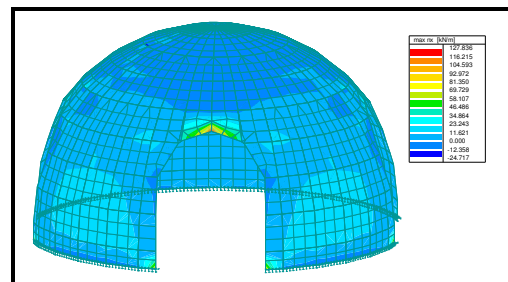


Figuur 3.100: Vervorming van de koepels onder het eigen gewicht a) met smalle boogopeningen b) met brede boogopeningen

6.13.2 Interne krachten

6.13.2.1 Interne krachten in scenario 10: smalle boogopeningen

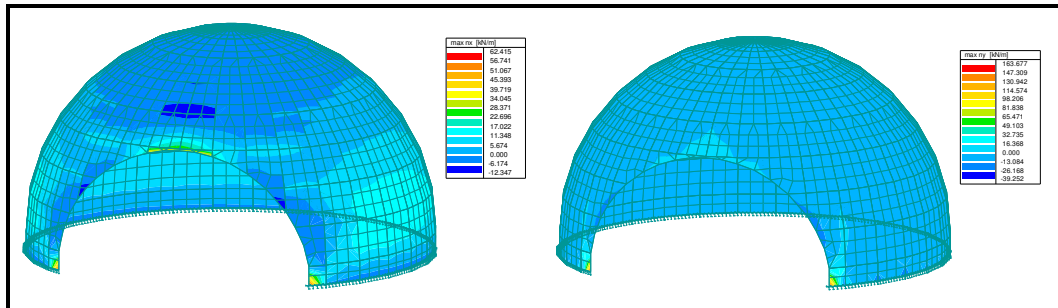
Boven de opening halen de horizontale ringkrachten $n_x = 128 \text{ kN/m}$ (figuur 3.101), wat niet zal overeenkomen met de werkelijkheid. Door het scherpe knikpunt worden de krachten niet goed afgevoerd. Dit scenario schrappen we dan ook.



Figuur 3.101: max n_x in de UGT

6.13.2.2 Interne krachten in scenario 11: brede boogopeningen

Lokaal haalt men voor de parallelkrachten n_x tot 62 kN/m in de onderste hoekpunten (figuur 3.102), tot ca. 35 kN/m boven de opening. Globaal ziet men dat de appelblauwzeegroene zone de grootste trekkracht in het koepeloppervlak vertegenwoordigt: een parallelkracht van ca 11.5 kN/m. Dit komt overeen met de parallelkracht in dezelfde zone in een volle hemisfeer (scenario 2 figuur 3.48). Dat is een voordeel ten opzichte van de koepel met drie openingen (scenario 10 figuur 3.101) waar de maximale trekkracht in de parallellen ca 18 kN bedroeg. Dit is natuurlijk te danken aan de lange strook onafgebroken materiaal die meedraagt in trek – een goede eigenschap van een element in trek. Bovendien heerst er zelfs druk in de parallellen, aan de schuin aflopende randen van de opening. Dit komt door de compenserende drukwerking van de spatkrachten in elk punt van de boog-opening, op de parallellen onder trek. Een schuin aflopende opening heeft in die zin dus een gunstige invloed op de trek in een koepel.



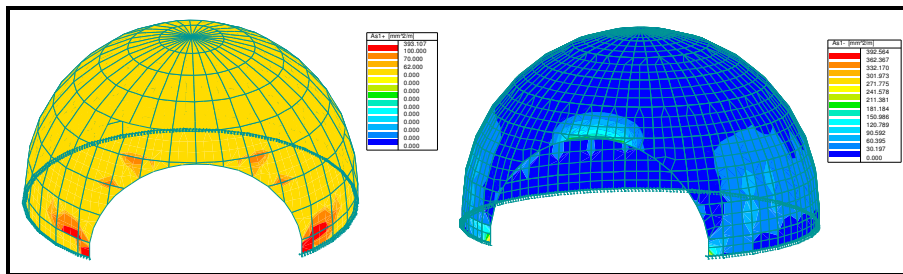
Figuur 3.102: max n_x , max n_y in de UGT

Globaal gezien werken alle meridianen in druk, behalve aan de randen waar men bovenaan tot $n_y = 16.4$ kN/m trekkrachten krijgt, en onderaan langs de hoeken. Vermoedelijk kunnen de verticaal afgevoerde krachten die aankomen bovenaan in het midden van de boog niet goed afgevoerd worden wegens de platheid van de boog: de verticale componenten van de krachtjes evenwijdig aan de boog is bovenaan te klein om deze belastingen op te nemen. Dit resulteert in de verhoogde n_x en n_y aldaar. Bovendien zal de boog er doorbuigen, doordat hij zo plat is (en mogelijk doordat hij een gesegmenteerde opbouw van vlakke platen heeft, in plaats van een gekromd materiaalopbouw) (zie ook figuur 3.93).

6.13.3 Wapening voor scenario 11

In de gele zone van figuur 3.103 volstaat kippengaas om aan de eisen in laag **Ls1+** te voldoen. Lokaal langs de boog krijgt men 70 à 100 mm²/m trekwapening **As1+** (men moet er wel bij vermelden dat dit telkens 'voegzones' betreft en dus een resultaat van het segmenteren kan zijn). Enkel aan de gevoelige onderrand is nog meer wapening vereist, tot 393 mm²/m.

Voor **As1-** komt men in de onderste hoekpuntjes nog waarden tegen van 392 mm²/m, maar langs het grootste deel van de openingsrand volstaat 30 mm²/m. Enkel bovenaan in het midden van de opening is er een zone van ca 180 mm²/m. Dit alles komt overeen met wat zonet besproken werd bij ny (figuur 3.102, §6.13.2.2).



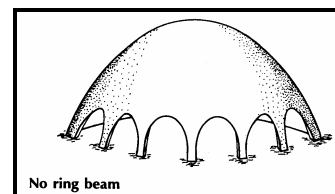
Figuur 3.103: As1+, As1-

Wat **As2+** en **As2-** betreft, hier volstaat overal 53 mm²/m wapeningsdoorsneden behalve lokaal in de onderste hoeken. Ook **Ass** is in principe enkel zeer lokaal nodig aan de hoekpuntjes (1100 mm²/m).

6.13.4 Besluit

Men kan besluiten dat, wanneer men openingen in de koepelbasis wil maken

- men dit best doet met afgeronde hoeken;
- schuin aflopende openingen te verkiezen zijn boven verticale openingen, door de compenserende werking van spatkrachten op trek in de ringen;
- men de bogen niet te plat maakt, zodat er geen krachten op de opening blijven 'liggen';
- men voldoende materiaal tussen de openingen moet laten, om spatkrachten in de ene, en afgedragen belasting in de andere richting, op te vangen. Een ideale plaatsing is tegenover elkaar zodat ze de beweging van de restgebieden niet in eenzelfde mate stimuleren;
- men met de vorige richtlijn geen rekening dient te houden wanneer de koepel een kettinglijnvorm heeft, daar zij niet zal uitbuigen



Figuur 3.104: Koepel met de geometrie van een kettinglijn en gebogen openingen

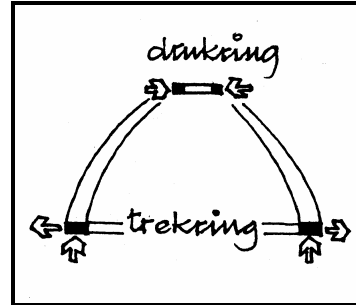
Deze 'richtlijnen' kan men samenvatten in figuur 3.104.

6.14 Scenario 12: Koepel met een horizontaal dakraam

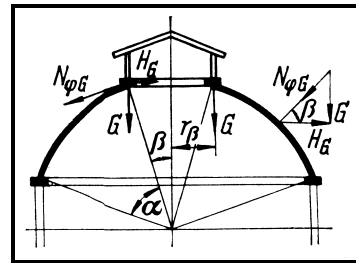
Dit scenario is een eerste test op de structurele gevolgen van de plaatsing van openingen die in Capsol gunstig gebleken is, voor het capteren van zonnewarmte.

Zoals er onderaan in een hemisfeer trekwapening nodig is, zo wordt omgekeerd in de kroon van de koepel, bij plaatsing van een daklantaarn, vaak een drukring aangebracht. Door de lantaarn is de schaal onderworpen aan bijkomende verticale krachten G , die zich opsplitsen in een horizontale (H_G) en een meridionale ($N_{\varphi G}$) component. $N_{\varphi G}$ wordt opgenomen door de schaal, H_G wordt overgedragen op de ring, die daarbij onder druk D komt te staan. Er geldt [27]:

$$\begin{cases} N_{\varphi G} = \frac{-G}{\sin \beta} \\ H_G = G \cot \beta \\ D_R = -r \cdot H_G = -G \cdot r_\beta \cdot \cot \beta \end{cases}$$



Figuur 3.105: Trekking en drukring



Figuur 3.106: Berekening drukwapening

Stel dat er een raam op de opening geplaatst wordt. Voor de eenvoud een plat glas, zonder profiel. Met een $\rho=2500 \text{ kg/m}^3$, een dikte van 0.004 m en een oppervlakte van 4.6 m^2 , geeft dit verdeeld over de rand van de opening (7.6 m) een lijnlast van $G = 0.0605 \text{ N/mm}$. Met $\beta = 22^\circ$, $r_\beta = 1186 \text{ mm}$, zijn $N_{\varphi G} = 160 \text{ N/m}$; $H_G = 60 \text{ N/m}$ en $D_R = -178 \text{ N/mm}$. Aldus laat een snelle berekening met de hand een schatting van de nodige drukwapening toe, rekening houdend met de karakteristieke druksterkte van beton $C12/15 \text{ fck}=12 \text{ N/mm}^2$ en de drukkracht in de ring:

$$A_{\text{beton}} = D_R / 12 = 14.83 \text{ mm}^2 \sim \text{slechts een doorsnede van } 3.50 \text{ mm } 4.50 \text{ mm beton}$$

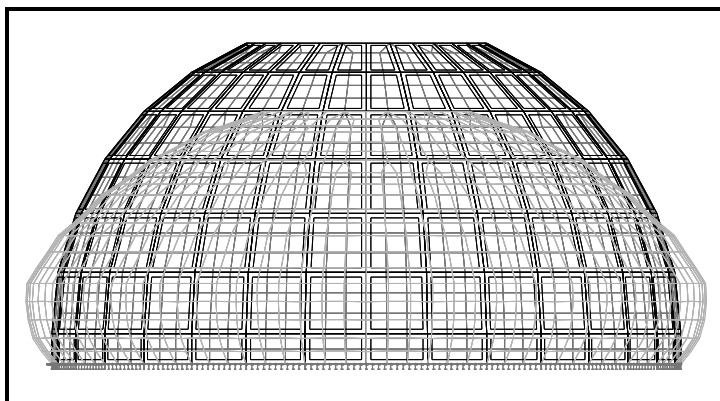
Stel dat een minimum wapeningspercentage van 0.6% voorzien wordt:

$0.006 \cdot A_{\text{beton}} = 0.006 \cdot 14.83 \text{ mm}^2 = 0.089 \text{ mm}^2 \sim 4\emptyset 0.18 \text{ mm}$ dit is werkelijk heel weinig staal. De resulterende drukspanning in het beton zal zich dan situeren rond:

$$\sigma_{\text{beton}} = D_R / (15.75 \text{ mm}^2 + 15 \cdot 0.1) = 10.3 \text{ N/mm}^2.$$

6.14.1 Vervorming

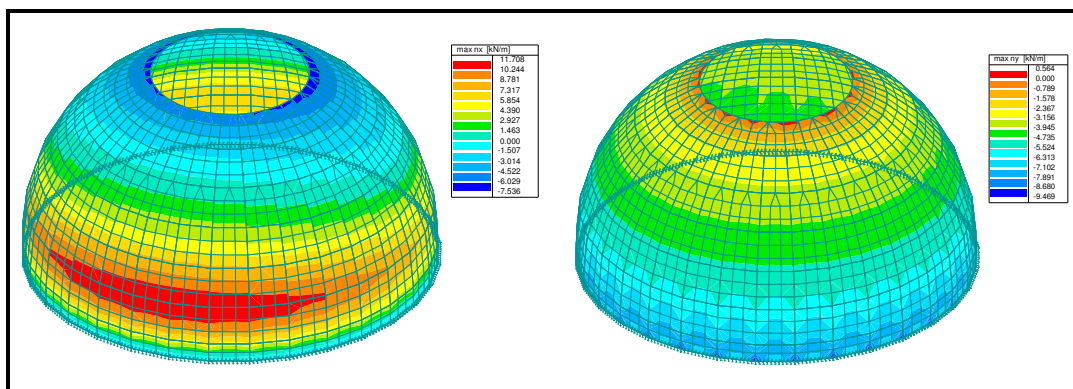
Het vervormingsbeeld (figuur 3.107) heeft gewoon een knip gekregen.



Figuur 3.107: Vervorming van de koepel met dakopening (zonder lijnlast op de lantaarn)

6.14.2 Interne krachten

Op het eerste zicht is er in het spanningsbeeld **nx** geen invloed te onderkennen van de openingen (figuur 3.108). De grootste trekkrachten in de parallellen zijn, met $\max nx_{\max} = 11.708 \text{ kN/m}$, kleiner dan bij de volle versie. Het spanningsbeeld in de parallellen blijft ongewijzigd bij toevoeging van de opening, en de openingsrand. Dit komt natuurlijk omdat er een opening werd uitgesneden in de vorm van een parallel.



Figuur 3.108: max nx, max ny in de UGT

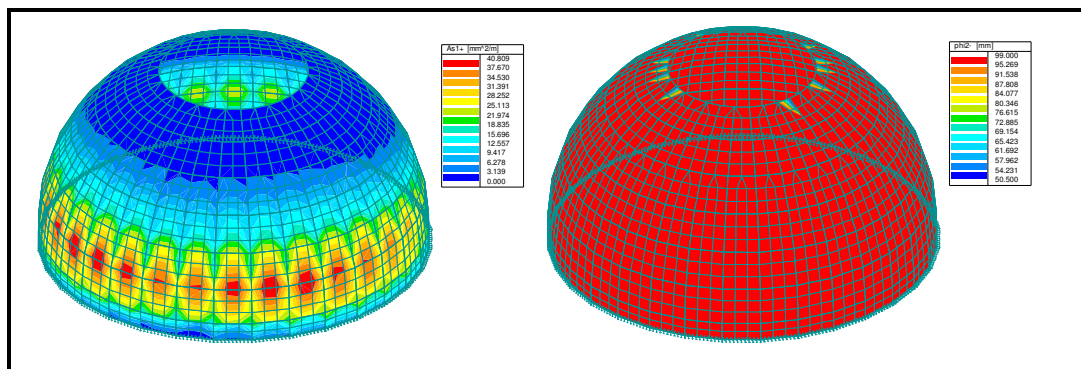
Wat de meridianen betreft is er een weinig trek langsheen de omtrek van de uitsparing. Met de lijnlast erop halen de trekkrachten in de meridianen een waarde van maximaal **ny**=0.533 kN/m onder UGT (figuur 3.108), deze is zelfs iets groter indien er geen lijnlast is. Waarschijnlijk is de platheid van de schaal daar verantwoordelijk voor, de openingsrand zal in zijn eigen opening willen 'vallen'. De drukwapening die hierboven beschreven werd lijkt fout (men heeft immers een positieve ny) maar men

moet bedenken dat deze werkt voor de druk in de parallelrichting. Of de spanningen in de meridianen aan de omtrek van de opening zodanig oplopen dat er in lagen Ls2+ en Ls2- extra wapening nodig is zal blijken.

6.14.3 Wapening

6.14.3.1 Zonder lijnlast

Voor alle lagen geldt dat men mag terugvallen op wat door EPW berekend werd in scenario 3. Enkel de laag Ls2- aan de binnenzijde in de richting van de meridianen vertoont ongerijmdheden. Globaal genomen zijn hier ook diameters van 99 mm toegelaten, maar kleine stoorzones omringen de opening. Hier is 50.5 mm de ondergrens voor de toegelaten staafdiameters, iets wat net nog haalbaar is met een kippengaas met maaswijdten 5 cm. De kleinste maximale staafafstand om in deze laag aan scheurcontrole te voldoen bedraagt 982 mm.



Figuur 3.109: As1+, phi2-

6.14.3.2 Met lijnlast

Voor de **As1+** van de koepel met een bijkomende randbelasting aan de opening geldt: 40.909 mm²/m. Gek genoeg zijn hier de ongerijmdheden qua staafdiameter en staafafstand verdwenen.

In beide gevallen mag over de hele koepel nog steeds een kippengaas toegepast worden. Dit in tegenstelling tot de koepels met openingen onderaan, in de 'gevaarzone', de zone waar de parallellen onder trekspanning stonden.

6.14.4 Besluit

De kroonzone in een koepel is een gunstige plaats om uitsparingen te voorzien, zowel constructief als bouwfysisch. Enerzijds laat de horizontale positie van een opening veel zonnewarmte binnen, anderzijds is de bovenste zone een neutrale zone, met geringe invloed op het globaal structureel gedrag. De afronding van de opening en

de situering ervan in de drukzone van de koepel vermijdt spannings- en dus wapeningsconcentraties. Dit is een groot voordeel gezien de complexiteit van het gebruik van verschillende wapeningssets. Hier volstaat de vertrouwde kippengaas, die in repen kan worden aangebracht. Zie hiervoor ook het voorbeeld van de alternatieve bouwwijze in deel 1 van deze scriptie §3.3.

Het maken van dergelijke opening is ook veel meer vanzelfsprekend dan het maken van een rechthoekige opening die totaal in tegenstrijd is met het gekromde koepelvlak. Het construeren verloopt veel natuurlijker. Als men de koepel in lagen opbouwt komt het er gewoon op neer op de gewenste hoogte te stoppen met materiaal aan te voeren. Er dient te worden vermeld dat er natuurlijk nog een ingang nodig is.

Welke reden ze er ook voor mogen hebben (ongewenste ijsberen, tocht, opstijgende warmte...), de Inuit kruipen langs een tunneltje hun iglo binnen, wat de koepelwerking intact laat. Voor El Alto stellen we een afgeronde deuropening voor – bijvoorbeeld met parabolische vorm (of een cirkelsegment met hoogte 25 cm op een - tot 1m - taps toelopende opening).

6.15 Scenario 13: Betonnen koepel met dakramen en deur & Scenario 14: Betonnen koepel met dakramen, deur en laag adobe

Blijkbaar valt in de koepel in El Alto de optimale locatie van raamopeningen ten aanzien van zonnewinsten samen met de veiligste locatie van openingen ten aanzien van krachtswerking. Allerlei factoren samen legden onze keuze voor de plaats en de vorm van de openingen vast:

- de inrichting van de woning: lichtinval in alle woonvertrekken
- praktische beschouwingen: entree
- overwegingen met betrekking tot de privacy van de bewoners: ramen niet naar elkaar gericht
- warmtewinsten: noordelijk gerichte opening vangt meeste warmte en moet dus grootst zijn
- minimalisering van de wapening: vermijden van spanningsconcentraties, wens om alle nodige staaloppervlakte te kunnen dekken met kippengaas
- eenvoud van uitvoer: afronden van openingen (gebruik van autobanden)

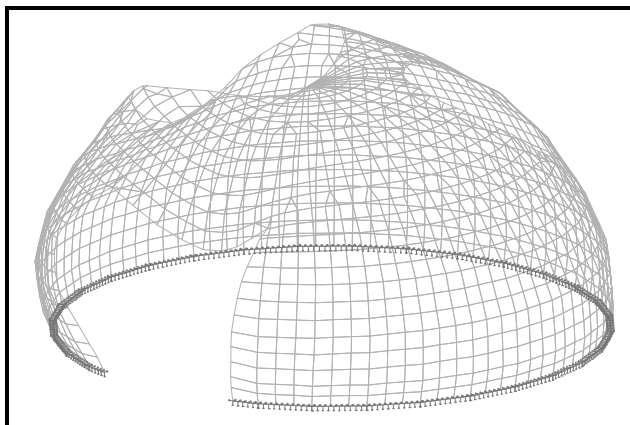
6.15.1 Vervormingen

De maximale vervormingen door de drie belastingsgevallen is gelijk voor de beide scenario's:

Maximale verplaatsing - 0.066 mm BG1 in het midden van de deurbovenregel

Maximale rotatie - 0.071 mrad BG1 aan de bovenrand van de deuropening.

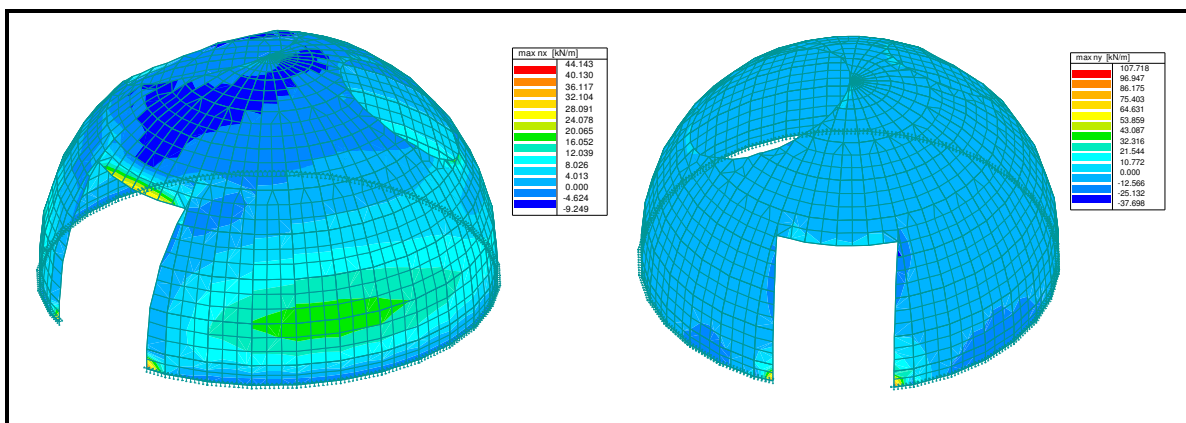
De maximale vervormingen bevinden zich boven de deuropening, niet in de buurt van de dakopeningen. Hetzelfde is te zien in figuur 3.110 die weergeeft hoe de constructie zal vervormen door haar eigen gewicht. Hier ziet men dat de deuropening meer vervormt dan de cirkelvormige dakopeningen. Vooral de bovenregel wordt getroffen door buiging en verplaatsing.



Figuur 3.110: Vervorming in knopen t.g.v. het eigen gewicht

6.15.2 Interne krachten

Voor de krachten in de ringen geldt in UGT globaal genomen nog steeds dat er bovenin druk heerst (figuur 3.111 a). Er is nog steeds een zone van minimale krachtwerking – daar waar in de volle koepel de neutrale parallel zat, en aan de verticale randen naast de deuropening. In de schaal zelf onder de neutrale vezel loopt trek op tot ca $n_x = 20$ kN/m. Onderaan die deuropening wordt de trek het grootst: 44 kN/m. Als er geen adobe op de koepel ligt komt dit maximum op 35 kN/m. Langs de bovenrand van de scherpe deuropening krijgt men te maken met oplopende trek tot maximum 28 kN/m. De cirkelvormige openingen vertonen geen randstoringen waar ze in de drukzone zitten. Waar ze in de trekzone terecht komen loopt de trek op tot ca 24 kN/m (idem voor koepel zonder adobe). Verder is het patroon van n_x voor de koepel zonder adobemassa identiek, alleen de schaal is iets kleiner. De massa adobe op de koepel maakt ook de drukkrachten in de parallellen groter, maar de neutrale vezel blijft natuurlijk op dezelfde lijn liggen.

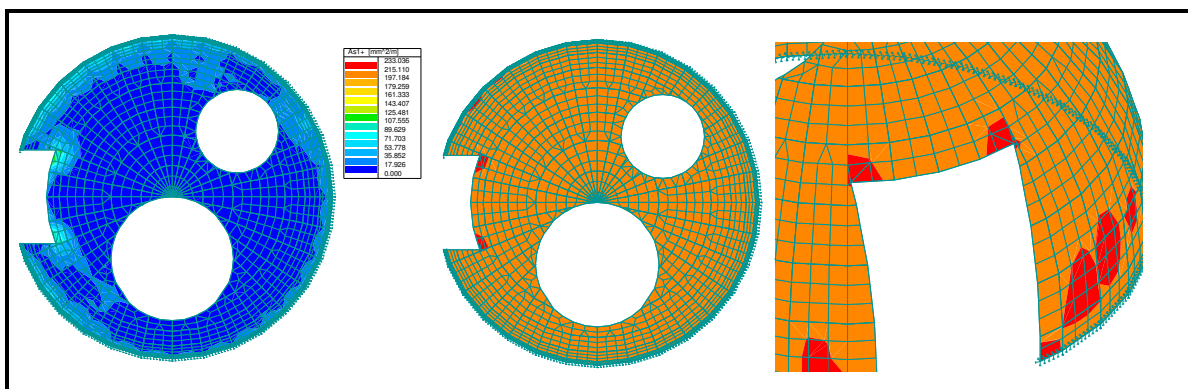


Figuur 3.111: a) max n_x b) max n_y in UGT

De toevoeging van adobe heeft voor een grote toename van de trekkrachten in de ribben gezorgd (figuur 3.111 b), van 84 kN/m naar 108 kN/m, dit echter zeer lokaal aan de onderste hoeken van de deuropening. Ook aan de onder- en bovenrandjes van de ronde openingen vindt men positieve waarden van 10 a 20 kN/m, een groot verschil met de koepel die geen extra adobemassa moet dragen want daar ligt de trek onder de ronde openingen tussen de 0 en 8 kN/m. Het grootste deel van de koepel blijft echter in druk, dit is identiek voor de koepel met of zonder toevoeging van adobe. Al is natuurlijk de druk groter in de zwaarder belaste koepel maar dat is geen struikelblok in beton.

6.15.3 Wapening

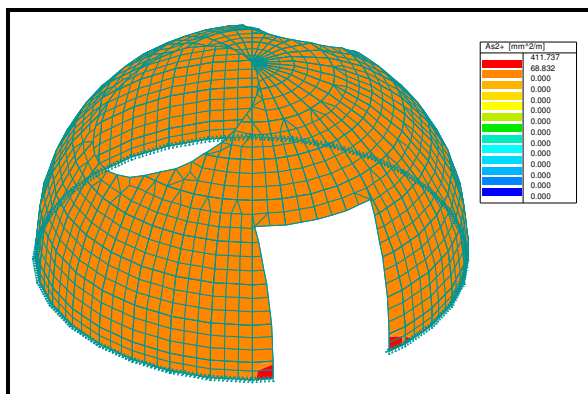
De hiernavolgende figuren betreffen scenario 14.



Figuur 3.112: As1+ (op EPW gegenereerde schaal en op eigen-'kippengaas'-schaal)

De wapeningshoeveelheden (figuur 3.112) tonen ons dat we niet moeten vrezen voor de eventuele spanningsophopingen die aangetoond werden onderaan de ronde openingen. Men ziet dat rond deze openingen kippengaas (oranje gehatched) nog toereikend is om de benodigde **As1+** te leveren (**As1-** geeft ongeveer hetzelfde beeld). De enige probleemzone die zich voordoet is de deuropening.

As2+ en **As2-** geven dezelfde tekening en schaal (figuur 3.113). Op de figuur zijn duidelijk twee van de steeds weerkerende unieke probleemzones (-punten) te zien. Bovenaan de deuropening doet zich blijkbaar geen overmatige trek voor in de verticale richting.



Figuur 3.113: As2+

6.15.4 Besluit

Enkel de wapeningstekeningen voor scenario 14 werden besproken, daar de toevoeging van 30 cm dikke adobe laag noodzakelijk bleek voor een goede warmtehuishouding. Het moge duidelijk zijn dat dit scenario in EPW als strengste naar voor kwam in de wapeningsberekening. Men moet daarbij opmerken, dat blijkbaar ook in dit strengere scenario over het algemeen kan volstaan worden met twee lagen kippengaas als wapening. De hoekzones aan de deuropening blijven in alle gevallen problematisch. In de werkelijke koepels is hier randverstijving aangebracht. De gunstige invloed daarvan werd aangetoond in scenario's 8 en 9, maar alleszins zullen boogopeningen zich beter inpassen in de natuur van de koepelwoning (scenario 11).

De enige probleemzone die zich voordoet is de deuropening. Als dit probleem wordt uitgeschakeld, kunnen we stellen dat we een zeer gunstige compositie gevonden hebben, op alle vlakken. Een doordachte keuze van de plaatsing van de ramen zorgt er voor dat er voldoende materiaal tussen de drie openingen zit, dat er minstens één grote opening naar het Noorden is gericht om er zoveel mogelijk zonlicht te vangen, en dat – rekening houdend met de inrichting van de woonst – de vertrekken die wegens privacyredenen volledig omsloten zijn, zenitaal licht ontvangen. De plaatsing van de ramen is dus gunstig naar warmtehuishouding toe, naar constructie toe, en voor het welbevinden van de bewoners. In zulke kleine woningen namelijk, die eigenlijk slechts uit één ruimte bestaan, zijn drie openingen in de koepelbasis teveel: er is te weinig ruimte om zich te kunnen 'verschuilen'. Naar wapeningshoeveelheden toe ziet men ook de duidelijke voordelen in van de ronde openingen in het dak. Alvast twee problematische rechthoekige openingen kunnen zo geëlimineerd worden, de derde kan uitgevoerd worden als boog, zoals besproken in scenario 6, 10 en 11.

6.16 Scenario 15: Betonnen koepel met dakramen, deur, laag adobe en verdikking van de wanden onderaan

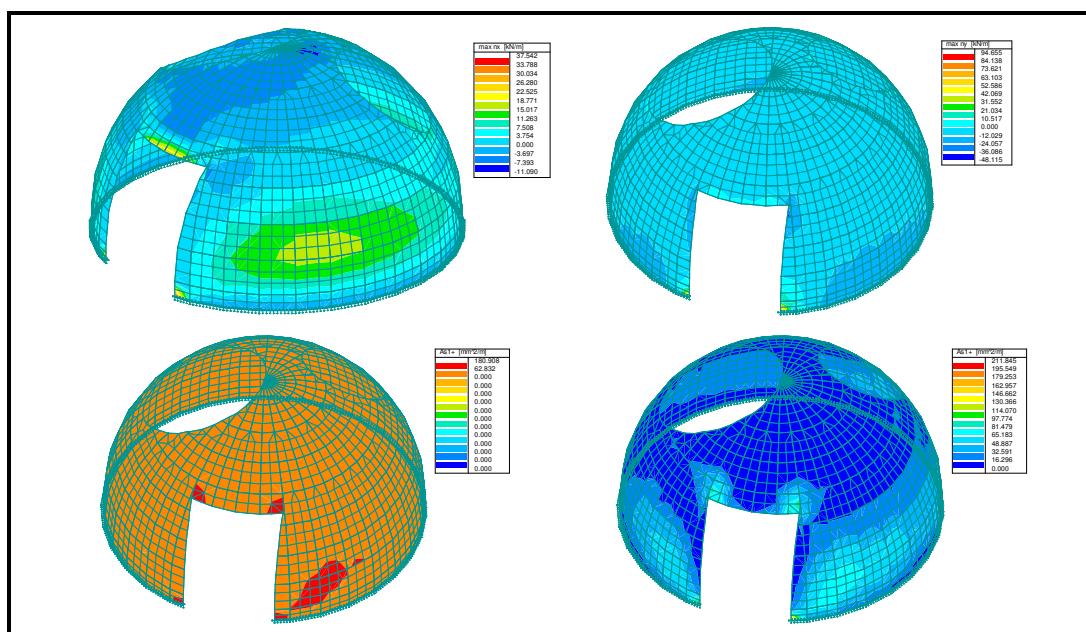
Er werd een graduele verdikking van de wanden voorzien in de onderste 4 lagen 'platen', van 10 cm naar 20 cm in het gebied dat in koepels doorgaans het meeste doorbuigt. De extra verdikking bovenop de 10 cm schaaldikte loopt tot onder de dakramen. De bovenregel van de deur hoort hier dus net niet meer bij.

We denken dat de krachten, spanningen en wapeningen zullen afnemen door deze ingreep, doordat men dan beschikt over meer gewicht dat voor meer druk ('voorspanning') zal zorgen, een grotere oppervlakte waarover de krachten worden uitgespreid, en een grotere hefboomsarm in het buigend moment.

De interne krachten (figuur 3.114) nemen inderdaad iets af. **nx** van 44 kN/m naar 38 kN/m, en de positieve meridiaankrachten **ny** van 107 kN/m naar 94 kN/m.

De vereiste wapeningsdoorsnede (figuur 3.114) bedraagt ten hoogste **As1+** = 211 mm²/m (t.o.v. 233 mm²/m in scenario 14). De oppervlakte die niet genoeg heeft aan een kippengaas-wapening is zeer weinig afgenomen. **As2+** is afgenomen van 411 mm²/m naar 366 mm²/m, maar geeft nog steeds de lokaliteiten van in figuur 3.113.

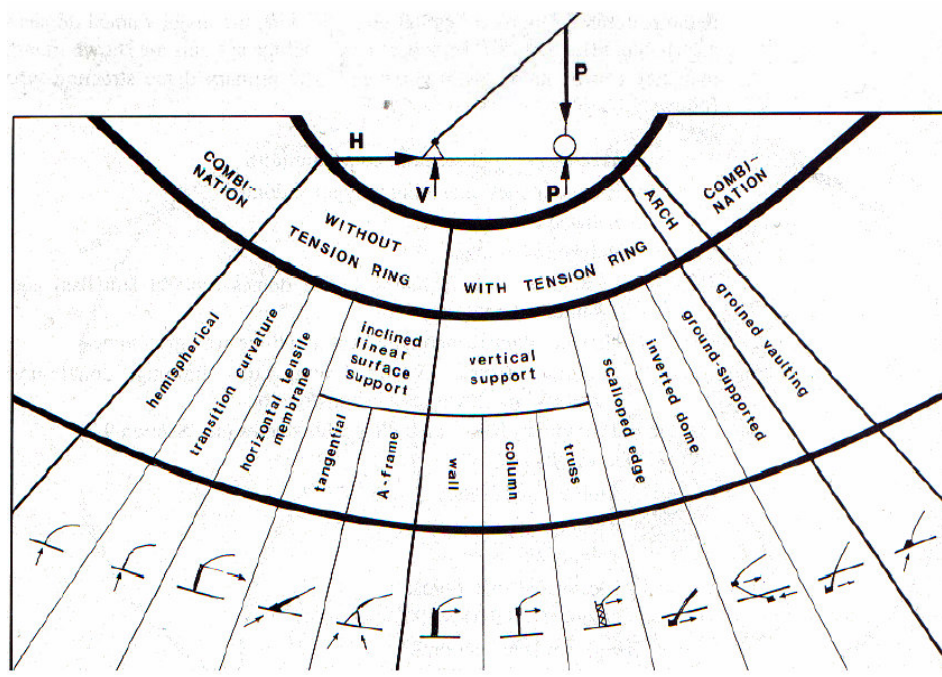
We besluiten dat de verdikking in dit bijzondere geval weinig effect heeft gesorteerd, waarschijnlijk omdat de extreme waardes te 'extreem' zijn om met een eenvoudige ingreep te neutraliseren.



Figuur 3.114: max nx, max ny in UGT, As1+ (figuur 3.115)

6.17 Scenario 16: Roloplegging & Scenario 17: Inklemming

Er zijn tal van ondersteuning mogelijk voor schalen, zoals wordt weergegeven in figuur 3.115. In de voorbije scenario's hebben we er al een paar besproken. De volgende scenario's onderzoeken de directe invloed van de vrijheidsgraden van de ondersteuning, op basis van een koepel op rollen, en een ingeklemde koepelbasis.

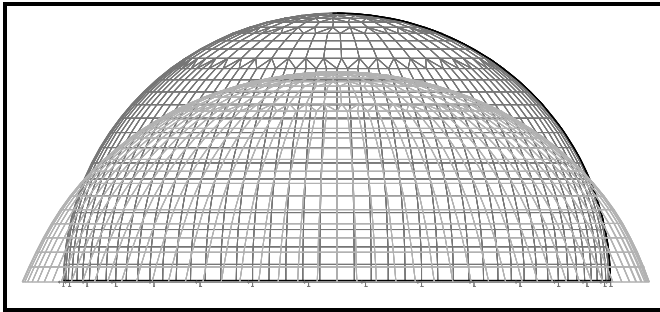


Figuur 3.115: Gamma ondersteuning voor schalen

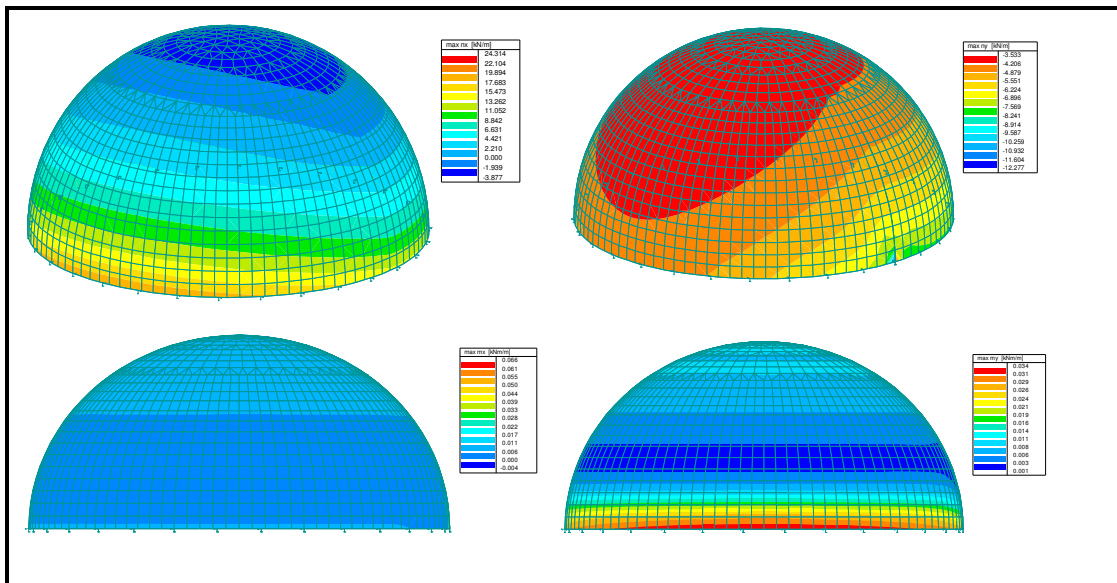
6.18.1 Scenario 16: Roloplegging

Afgaande op de theorie is een groot deel van de buiging in koepels het gevolg van de onverenigbaarheid tussen de ondersteuning en de natuurlijke vervorming van de koepel onder belasting. Het is interessant om dit in EPW na te gaan. Hiervoor veranderen we onze randvoorwaarden. In plaats van vaste ondersteuning in de drie richtingen, laten we de radiale beweging van de koepelbasis toe door middel van een roloplegging in de lokale y -richting, en vervangen we de vaste belemmering in X door een veer (met de stijfheid van beton) gedefinieerd in het lokale assenkruis van de koepelbasis. We stellen ook in dat de koepel in de z -richting niet 'vasthangt' aan de fundering of de grond, d.w.z. de belemmering in de verticale richting betreft enkel druk. De koepel zal dan onder het eigengewicht een vorm aannemen zoals weergegeven in figuur 3.116. Deze vorm doet denken aan de kettinglijn, wat waarschijnlijk niet toevallig is. Een kabel opgehangen in twee vaste punten neemt dankzij zijn flexibiliteit een bepaalde vorm aan onder zijn eigen

gewicht, hoewel de steunpunten vast zijn. Wat hier gebeurt is gelijkaardig: de geometrie van een halve betonnen bol die onder invloed van zijn eigen gewicht een evenwichtsvorm in druk zoekt. Deze zoektocht mag dan enigszins belemmerd worden door de rigiditeit van het beton, de eliminatie van steunpunten verleent er een zeker vrijheid aan. De evenwichtsvorm, met name de omgekeerde kettinglijn, zal daardoor niet volledig bereikt kunnen worden, maar men komt toch al in de buurt.



Figuur 3.116: Vervorming t.g.v. eigen gewicht, bij een roloplegging



Figuur 3.117: max nx , max ny , max mx en max my in UGT

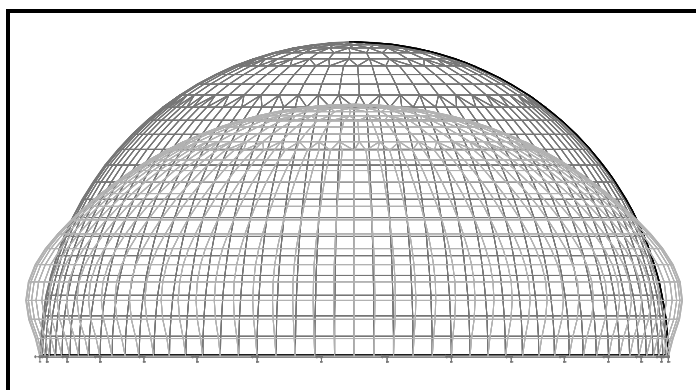
De trekspanningen in de parallellen bereiken $nx=24.314$ kN/m, het dubbele van wat met vaste steunpunten gekregen werd. Dit komt omdat de basis van de koepelrand niet wordt tegengehouden. De meridianen krijgen alle kansen om open te spatten, en ze trekken bij die beweging hard aan de parallellen. ny blijft steeds druk. De maximale buiging treft nu de onderrand van de koepel. In waarde ligt de buiging om x- en y-assen hoger dan bij de vaste steunpunten: $mx= 0.066$ kN/m (0.010 kN/m in scenario 1),

$m_y = 0.034 \text{ kN/m}$ (0.012 kN/m in scenario 1).

Doordat er dubbel zoveel trek in de parallellen is, is er ook veel wapening nodig. De buigmomenten om de lokale x-assen zijn inderdaad afgenomen (0.006 kNm/m t.o.v. 0.017 kNm/m bij de scharnierende opleg), en er zijn geen buigingsconcentraties:

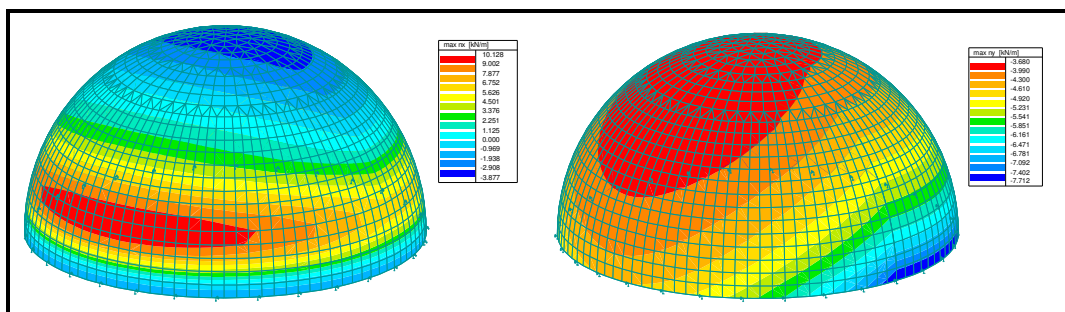
6.18.2 Scenario 17: Inklemming

Het is mogelijk om met EPW de vervorming van de gewapende koepel te modelleren. Dit vraagt echter veel input, terwijl het effect zich vooral aan de basis zal voordoen. Men kan eenvoudig een idee krijgen van de invloed van de wapening op de vervorming door de ondersteuning te wijzigen. In plaats van een scharnierende oplegging, met drie rotatie-vrijheidsgraden, zetten we de rotaties om de x- en y-assen af, net zoals de wapening in x- en y-richting deze rotaties zal belemmeren. We krijgen dan het volgende beeld van de vervormde koepel (figuur 3.118)

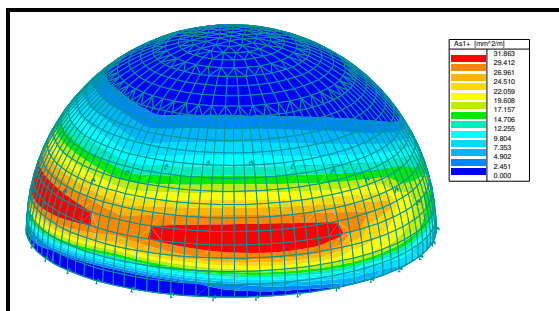


Figuur 3.118: Vervorming t.g.v. het eigen gewicht

De interne krachten n_x bedragen nu maximaal 10.1 kN/m (figuur 3.119). Deze zijn kleiner dan 12.3 kN/m (scenario 1), waarbij de rotaties wel werden toegelaten. De meridiaankrachten n_y blijven gelijk (-3.680 kN/m t.o.v. -3.691).



Figuur 3.119 : max n_x en max n_y in UGT



Figuur 3.120: As1+

De nodige wapening in de parallelrichting **As1+** bedraagt hier ca. 32 mm²/m (figuur 3.120), wat minder is dan de 38 mm²/m die bij de scharnierende oplegging nodig was. Wanneer men bedenkt dat eenzelfde ondersteuningsvoorwaarde bekomen wordt wanneer de koepelrand gedeeltelijk wordt ingegraven in de grond, wordt het nut van de wapeningsberekening duidelijk. In vorige vervormingstekeningen bleek duidelijk dat er randstoringen waren door de ondersteuning, waar men met diepe koepels niet aan kon ontkomen. Deze storingen ontstonden doordat de parallellen niet konden bewegen zoals de membraantheorie hen voorschrijft. Maar ook bleek dat deze randstoringen snel uitdempten, door de stijfheid van de parallellen (§6.5.3.1).

6.18.3 Besluit

Stel dat men een koepel (langs buitenaf) ingraaft tot op de neutrale lijn. In het ondergrondse gedeelte biedt de gronddruk weerstand tegen de radiale krachten in de koepel, en houdt zo de trekkrachten in de parallellen in evenwicht. Daarnaast verhindert het grondpakket dat de schaal uitbuigt en is er geen buigwapening nodig. Bovengronds is alles in overeenkomst met de membraantheorie. Dergelijke koepel is dus een versie van het type dat in dit scenario onderzocht werd.

Zelfs als men de koepel niet zodanig diep ingraaft kan men dit effect bekomen. Net boven de grond is de koepel dan in principe vrij om te vervormen. Echter, de inklemming laat zich er nog voelen en deze biedt weerstand tegen de vervorming.

6.18 Scenario 18: Adobe sfeer

Het materiaal adobe zit niet standaard in ESA-Prima Win. We definiëren zelf een adobe met minimale mechanische eigenschappen zoals geëist door de 'New Mexico Earthen Building Materials Code' [40]. Alle waarden weergegeven in tabel 3.11 worden in EPW ingevoerd. Ter vergelijking worden ook de waarden voor het referentiemateriaal C12/15 opgenomen in de tabel.

Tabel 3.11: mechanische eigenschappen adobe vs. beton

Code	EC2	Internationale Code
Naam	C12/15	Adobe
E modulus, secans [MPa]	26000	690
Poisson coëfficiënt	0.2	0.2
Specifiek gewicht [kg/m ³]	2500	980
Thermische uitzetting [mm/m.K]	0.01	*
Kar. cilinderdruksterkte f_{ck} (28) / bezwijksterkte [MPa]	12	2.786
Gem. treksterkte f_{ctm} (28) / treksterkte [MPa]	1.6	0.38
Cementklasse	Langzame verharding	

6.18.1 Schaaldikte 10 cm

De maximale vervormingen onder de belastingsgevallen bedragen:

Maximale verplaatsing 0.354 mm BG2 dit is de top.

Maximale rotatie -0.548 mrad BG2 dit is een knoop aan de rand.

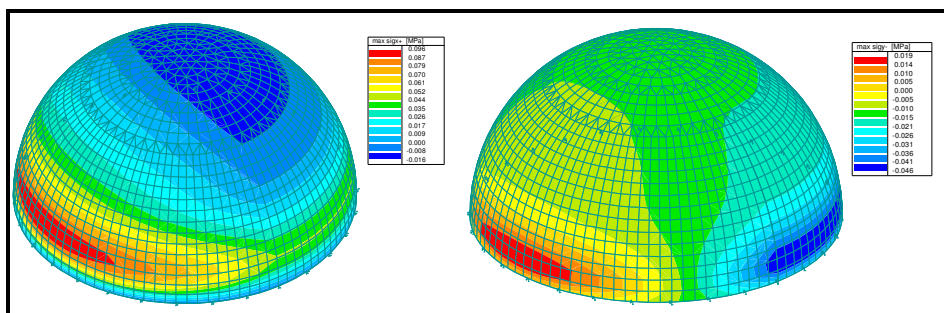
Dit zijn grote waardes ten opzichte van het stijve beton.

Het belastingsgeval met de meeste impact blijkt hier de wind te zijn. De windbelasting hebben we in EPW gedefinieerd als een kracht van 0.7 kN/m², wat in de buurt komt van het eigengewicht van adobe 0.98 kN/m².

De grootste trekspanningen doen zich voor in de parallellen, met $n_x=0.096$ MPa (figuur 3.121). Omdat adobe niet is opgenomen in de Eurocode baseren we ons voor de beoordeling van de spanningen op de materiaalsterktes. Vergelijking van n_x met de vier maal grotere treksterkte van het adobe 0.38 MPa (tabel 3.11) duidt op een veilige toepassing van adobe voor de vervaardiging van koepels. De drukspanningen in de meridianen blijven binnen een zeer veilige marge.

We kunnen dus stellen dat het mogelijk is om een halve bol uit te voeren in adobe. Wat adobe geeft in een koepel met openingen, wordt in het laatste scenario 19 nagegaan.

* N.v.t., we doen geen onderzoek naar thermisch-structureel gedrag.



Figuur 3.121: max sigx+, max sigy- in UGT

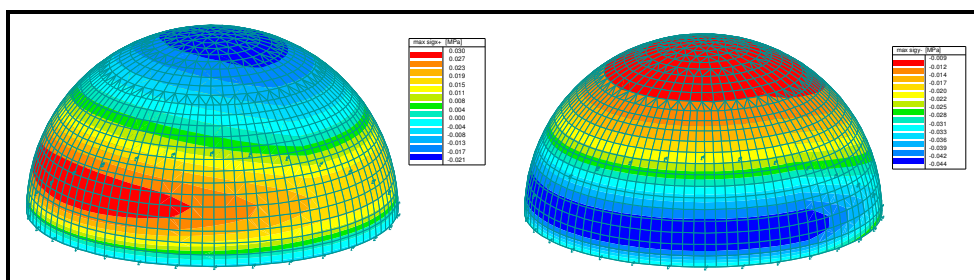
6.18.2 Schaaldikte 40 cm

De maximale vervormingen van de drie belastingsgevallen zijn nu:

Maximale verplaatsing -0.224 mm BG1 dit is de top.

Maximale rotatie 0.089 mrad BG1 dit is een knoop aan de rand.

BG1, het eigengewicht, is nu -3920 N/m² (60% meer dan beton). Het belang van de wind neemt af bij dikkere adobe schalen. De vervormingen zijn aanzienlijk afgenomen door de verdikking van de schaal. De toename van de dikte biedt een grotere hefboomsarm bij de weerstand tegen buiging, en een grotere oppervlakte waarover de krachten verspreid kunnen worden. De vier maal grotere dikte zorgt dus voor een beperking van de spanningen, zoals in figuur 3.122 is weergegeven betreffende de parallelspanningen, die met een maximum van 0.030 MPa nog maar een derde bedragen van de waarden bekomen in figuur 3.121. De meridiaanspanningen die hoofdzakelijk het rechtstreeks gevolg zijn van de gewichtsafracht, blijven gelijkaardig aan de waarden van figuur 3.121, door de combinatie groter gewicht – grotere dikte.



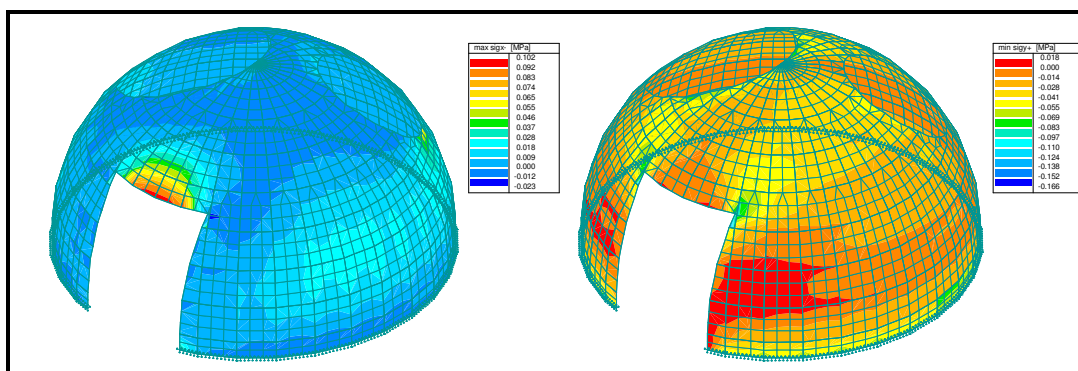
Figuur 3.122: max sigx+, max sigy- in UGT

6.18.3 Besluit

Men doet er goed aan om bij adobe constructies te opteren voor een grotere dikte. Het gewicht blijft beperkt door de relatief lage dichtheid, de kritieke trekspanningen nemen af, de spatkracht wordt minder gevaarlijk en de warmtecapacitieve en isolerende eigenschappen komen goed tot hun recht.

6.19 Scenario 19: Adobe koepel met dakramen en deur

In Capsol kwamen we tot het besluit dat een koepel die voor de volledige 40 cm dikte uit adobe vervaardigd is, net iets beter presteert op thermisch vlak, dan de betonnen koepel bedekt met 30 cm adobe. Uit scenario 18 bleek dat adobe geschikt is als materiaal van de koepel. We kijken in dit scenario of de invoer van openingen, nodig om de thermische prestatie te verkrijgen, deze geschiktheid niet ondermijnt.



Figuur 3.123: max sigx-, max sigy+

Als men de spanningen in de figuren 3.123 vergelijkt met de sterktes van adobe, ziet men dat er enkel problemen optreden boven de deuropening ($\text{max sigx-}_{\text{max}} = 0.102$ MPa, bijna drie maal groter dan de treksterkte), en een beetje lokaal onder de ronde dakopening. Het probleem van de deuropening kan opgelost worden door een boogvorm toe te passen. Er is geen enkel probleem in het kroongebied van de koepel, hoewel het percentage opening daar redelijk groot is ten opzichte van de hoeveelheid materiaal. De openingen maken dat er minder materiaal – minder gewicht, maar ook minder schaalwerking is. In werkelijkheid worden hier ramen geplaatst, wat wellicht iets andere spanningspatronen zal geven.

De constructiemethode van een adobe koepel zal dezelfde kunnen zijn als de constructie van de EcoShell I, maar de wapening zal anders uitgevoerd moeten worden dan in het bestaande referentiemodel, daar de adobe te grof is om samen te werken met het staal. Een fijnmaziger kippengaas zou beter zijn, of men zou op zoek kunnen gaan naar een geschikt vezelmateriaal dat voor de bevolking makkelijk te verkrijgen is, zoals stro, hennep,...

7. Synthese van de structurele analyse

In deze synthese worden de overwegingen gegeven die bij het kiezen van een koepelvorm gemaakt moeten worden. Omdat de structuurberekening eerder de bouwfysische berekeningen volgt dan andersom, doen we geen uitspraak over hoe de koepel er *moet* uitzien. We zouden kunnen zeggen dat het een kettinglijn *moet* zijn, maar dan zou het kunnen zijn dat de compactheid, of de raamoriëntaties, of andere bepalende zaken veranderen t.a.v. bij de hemisfeer, waardoor het warmtetransport gaat verschillen. Zo zou de oorspronkelijke intentie zoekraken.

In dit opzicht kunnen de configuraties uit scenario 14 en 19 gezien worden als voorstellen die het dichtste aanleunen bij onze gecombineerde doelstelling bouwfysisch-structureel optimaal gedrag. Het betreft dan wel hemisferen, en niet de constructief gunstigere kettinglijn, maar de hemisfeer geeft wel de beste compactheid. Bovendien geven de ingrepen in de vorm van de openingen een veel beter spanningsbeeld dan bij de referentiekoepel in El Alto.

Algemeen komt het er in een koepel op aan om het concept zo uit te denken dat er zich overal **membraanspanningen** ontwikkelen en geen buigspanningen. Op die manier wordt de doorsnede van de stenen schaal volledig benut.

- Hiervoor moet de koepel goed gebogen zijn. De efficiëntie van een koepel is gebaseerd op de kromming, die een veelheid aan alternatieve spanningspaden toelaat en de optimale vorm voor de overdracht van veel verschillende belastingstypes geeft. De koepel zal dan stijf en sterk zijn door zijn vormweerstand.
- De parallellen moeten cirkelvormig zijn opdat ze de funiculairen zouden vormen voor uniform verdeelde verticale belastingen.
- De ideale vorm voor een koepel is ongetwijfeld de kettinglijn (/ parabolöide). De krachtsafdracht van het eigengewicht en sneeuwbelastingen verloopt in dergelijke koepels zonder tussenkomst van de parallellen (m.a.w. zonder dat er trek kan ontstaan), en zonder excentriciteit ten opzichte van het middenvlak (m.a.w. zonder dat er buiging kan ontstaan).
- Wanneer men toch sferische koepels wil maken is de hoek die de koepel met de grond maakt zeer belangrijk. Platte koepels zullen doorgaans op druk werken, in diepe koepels zal trek optreden en moet men de schaal wapenen.

- De ondersteuningen moeten verzorgd worden zodat er weinig buiging wordt gegeneerd in een klein deel van de schaal. Zo moeten ze in het verlengde liggen van de raaklijnen aan de meridianen van de koepel, om zuivere normale reacties in de koepel te induceren. Dit is vooral belangrijk wanneer men bolsegmenten als dakkoepels op muren plaatst.

Lokale trekspanningen en algemeen spanningsconcentraties treden op in discontinuïteiten van het schaaloppervlak. Dit wil zeggen in knikpunten of aan randen. In dubbelgekromde oppervlakken primeert de membraanspanningstoestand op de buigtoestand. Om ze te vermijden moeten de openingen veel aandacht krijgen. Hun plaats en vorm zijn cruciaal. Zeker bij een adobe koepel, waar hoge wapeningshoeveelheden niet evident zijn (slechte aanhechting tussen staal en adobe), moet hieraan gedacht worden. Men kan spanningsophopingen vermijden door te zorgen voor een vloeiend traject voor de krachtsafdracht.

- Schuin afopende openingen waarbij de krachten steeds in twee loodrechte richtingen kunnen afgevoerd worden, in plaats van rechthoekige openingen waarop de krachten 'blijven liggen'. Ook het gebruik van afgeronde openingen in plaats van knikken valt hier onder. Boogopeningen zijn in dit opzicht ideaal.
- Met betrekking tot de ondersteuning moet men in acht nemen dat schalen zeer efficiënt verdeelde belastingen kunnen weerstaan, maar problematisch reageren op geconcentreerde lasten. Een doorlopende ondersteuning draagt dus de voorkeur. Zo moet men de overbrugging ter plaatse van de deuropening goed verzorgen, d.m.v. een latei of liefst een boogvorm.

Het is altijd veiliger om het **natuurlijke krachtverloop** te volgen dan een vorm op te dringen aan een structuur.

- De druklijn (omgekeerde kettinglijn) bleek een uitstekende vorm te zijn (scenario 6, §6.10) voor een koepel (en voor openingen).
- In een hemisfeer met een parallelvezel die de betonnen koepel opdeelt in trek en druk, moet men de openingen bovenaan in de drukzone steken. Onderaan is het belangrijk dat de parallellen in hun geheel weerstand kunnen bieden aan de spatkrachten van de meridianen, omdat de weerstand van beton alleen niet genoeg is. Als de ring niet vol is, en de symmetrie wegvalt, is de weerstand kleiner. Daarentegen heeft beton genoeg druksterkte om verhoogde drukspanningen bovenin de koepel op te vangen.

De wapening: In een hemisfeer is de kans reëel dat te trekspanningen in de onderste parallellen de koepelbasis doen scheuren. Men moet dus voldoende wapening plaatsen, maar de koepel mag ook niet te zwaar gewapend worden. Te veel wapening werkt scheuren in de hand (bvb. krimpscheuren door het harde klimaat waarin het beton moet uitharden). Dit is ons inziens fout gebeurd in El Alto. Daar wilde men op zeker spelen en geen risico's nemen naar aanleiding van de het onervaren zijn van de bouwers-bewoners. Men koos er voor dikke wapeningsstaven die als een raster over de koepel heen gelegd zijn. Zulke dikke staven zijn echter nefast naar scheurcontrole toe, en bovendien laten zij van de 10 cm dikke betonschaal slechts 8 cm over.

Het is beter om een fijn wapeningsnet te voorzien, dat bovendien eenvoudiger te plaatsen is dan een raster van afzonderlijke wapeningsstaven. Wij opteren voor kippengaas (d 2mm, mesh 50 mm), dat in de meeste scenario's volstaat (uitgezonderd lokale extremen rond scherpe randen) en – menen wij - overal ter wereld beschikbaar is. Bovendien is kippengaas ook geschikt als versterking van adobe.

Een nog fijnere verdeling van het staal krijgt men met vezelwapening. Zo kozen we in de berekeningen met Capsol en ESA-Prima Win één van de talrijke adobetypes, met name adobe die gestabiliseerd is met 10 % vlasleem. In die zin is deze adobe reeds gewapend, maar men kan er aan denken om ook hennep in het kleimengsel te mengen.

In §6.5.6 werden de industrieel vervaardigde staalvezels Dramix toegelicht. Deze zouden een goede oplossing zijn voor de betonnen constructie, daar zij een geïntegreerd deel kunnen uitmaken van het monolithic dome proces met luchtvormen en spuitbeton.

Al is adobe vaak een meer economische en ecologische keuze als bouw materiaal, en biedt het in El Alto volgens de berekeningen met Capsol een betere warmteisolatie, beton heeft welbepaalde voordelen die andere, traditionele materialen (zoals adobe, hout, stro...) niet hebben:

- Er is veel minder brandgevaar dan bij constructies met hout
- Er is geen gevaar voor termieten, die leven op hout
- De koepel elimineert ook het risico op andere insecten en beestjes die leven in de muren, omdat er geen holtes zijn in de muren zoals bij adobe
- Beton vergaat niet zoals hout dat doet
- Beton wordt niet weggespoeld met regenvlagen zoals adobe
- Gewapend beton is erg sterk

DEEL 4:

BESLUIT

De huidige betonnen koepel presteert niet goed in extreme klimaten. Per klimaat waar men de koepel wil bouwen moet men nagaan wat de passieve maatregelen zijn om een behaaglijk binnenklimaat te bekomen.

Voor een koud klimaat met een constante en hoge zonne-irradiantie, heeft de optimale koepelwoning volgens de bouwfysische en structurele studie de volgende kenmerken:

- Qua constructiemateriaal biedt adobe de meeste voordelen, zowel naar warmtehuishouding (isolatie, capaciteit), als naar economie (goedkoop en onmiddellijk voorhanden), als naar ecologie (geen industrieel productieproces) en naar uitvoeringstechniek (gebruikelijk materiaal) toe. Men kan wel opmerken dat adobe minder duurzaam is dan beton, daar het geen weerstand biedt tegen zware en langdurige regenval en eventueel andere natuurfenomenen.
- Uit de structurele analyse bleek dat de optimale vorm voor de koepel eerder een paraboloïde (of kettinglijn) zal zijn dan een hemisfeer.
- De positie van de ramen is van groot belang voor zowel het binnenklimaat als het structureel gedrag van de koepelwoning. Door deze bovenin te plaatsen kan de zonnestraling optimaal benut worden. Daarnaast treden er in dit gebied enkel drukspanningen op, in tegenstelling tot de basiszone, waardoor er minder gevaar is voor trekspanningsconcentraties, die nefast zijn voor de betonnen structuur. Door de hoge positie van de ramen is er geen inkijk mogelijk, wat resulteert in meer privacy, een waarde waar de Aymara-indianen veel belang aan hechten.
- Door de openingen af te ronden worden spanningsconcentraties vermeden. In de kroonzone kiezen we volledig cirkelvormige ramen, de deuropening wordt het best parabolisch uitgevoerd.

Dit besluit is enkel geldig voor de bouwfysische, structurele en economische aspecten van het koepelwoningbouwsysteem in El Alto. Er zijn echter ook andere factoren van belang. Zo mag men de culturele-etnische factoren niet over het hoofd

zien wil men een duurzame oplossing naar voor brengen voor het huisvestingsprobleem. Als een hulporganisatie enkel adobe stenen ter beschikking stelt en een nieuwe bouwvorm oplegt, is het zeer twijfelachtig dat deze door de bevolking geadapteerd zal worden. In dit opzicht heeft een koepelconstructie meer kans om ingang te vinden wanneer een nieuw materiaal gebruikt wordt. Zo heeft beton een statuswaarde voor de arme Boliviaanse bevolking.

Om met deze aanmerking rekening te houden in de optimale koepel is het nodig een betonnen dragende structuur te bedekken met een isolerende laag adobe. Structureel presteert dergelijke koepel ook beter dan de adobe variant, beton heeft betere en meer gekende mechanische eigenschappen. De samenstelling beton-adobe combineert de goede isolerende eigenschappen van adobe en de grote capaciteit van beton.

LITERATUURLIJST

- [1] <http://www.solidhouse.nl> (gelezen 25 mei 2006).
- [2] <http://www.monolithic.com> (gelezen 25 mei 2006).
- [3] KRANENBURG, R.H., Buurtconsolidatie en urbane transformatie in El Alto. Een longitudinaal onderzoek naar veranderingsprocessen in de voormalige periferie van La Paz, Bolivia. Proefschrift Universiteit Utrecht, Nederland, 2002, 220 p.
- [4] TURNER, J., The squatter settlement, an architecture that works. Architectural design, Londen, U.K., John Wiley & Sons, 1968, 355-360.
- [5] ANTEZANA, M.V., El Alto desde Al Alto II, Ciudad en emergencia. Unitas.
- [6] http://www.plan-belgie.org/waar/zuidamerika/bolivia/chagas_rapportage (gelezen 15 april)
- [7] VERHOEVEN K., Een plek om te schuilen. De Standaard, 2005, p.24.
- [8] DAVIS I., Shelter after disaster. Oxford, Oxford Polytechnic Press, 1978, 127 p.
- [9] Encarta Encyclopedie. Winkler Prins. Microsoft Corporation/Het Spectrum (CD-ROM), 1993-2004.
- [10] Tentoonstelling van 23 oktober 2005 tot 26 maart 2006: Alter Architecture. Hier, elders & anders. Persbericht. <http://www.fondationpoularchitecture.be> (gelezen 8 februari 2006)
- [11] <http://www.camerounhotel.com/index7.php?id=7> (gelezen 24 mei 2006)
- [12] CHILTON, J., The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture: Heinz Isler. Great Britain, RIBA publications, 2000, 170 p.
- [13] TRUYENS K., Eartships. Eindwerk Sint Lucas Antwerpen, 2002-2003.
- [14] ZWEIFEL C., Alternative Forming System for small diameter concrete domes. Theses College of Engineering and Technology Brigham Young University Provo, Utah. <http://www.monolithic.com/thedome/theses/> (gelezen 8 februari 2006)
- [15] PHYSIBEL. Capsol version 4.0. Computer program to calculate multizonal transient heat transfer. Capsol handleiding. 2002, 75 p.
- [16] INNOVA AirTech Instruments. Thermal Comfort. Denmark, 32 p.
- [17] JANSSENS A., Bouwfysische aspecten van gebouwen. Cursus BA1, Faculteit ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, 2003-2004.
- [18] NBN B62-002. Berekening van warmtedoorgangscoefficiënten van wanden en gebouwen. Januari 1987, 47 p.

- [19] HENS H., Toegepast bouwfysica en installaties 3/2a. Gebouw, energie, verwarming, ventilatie. Leuven, Uitgeverij Acco, 1996 (2^{de} druk 2002), 219 p.
- [20] VAN LONDERSELE E. & DE RIDDER S., Analyse van concepten voor lage-energie woningbouw. Eindwerk RUG, 2002-2003.
- [21] NEN 2916. Energieprestatie van utiliteitsgebouwen. 1998, 127 p.
- [22] VERSELE A., Het gebruik van adobes: Een techniek met toekomst. <http://www.alexis-versele.be/upload> (gelezen 12 april 2006).
- [23] WILSON Q., Adobe Questions and Answers: Ask the expert advice. <http://www.greenhomebuilding.com/QandA/adobeQandA.htm> (gelezen 11 april 2006)
- [24] prEN ISO 13370. Thermal performance of buildings. Heat transfer via the ground. Calculation methods. 1998.
- [25] Organic Thermal Mass. <http://www.organicbuilding.com/index.mvc?ArticleID=72> (gelezen 12 april 2006)
- [26] LANDSBERG H.E., LIPPMANN H., PAFFEN K.H. & TROLL C., World maps of climatology. Berlin-Göttingen-Heidelberg, Heidelberger Akademie der Wissenschaften, 1963, 26 p.
- [27] FISCHER, L., Theory and Practice of shell structures. Berlin, Munich, Wilhelm Ernst & Sohn, 1968, 541 p.
- [28] HANAOR, A., Principles of structures. Oxford, Blackwell Science, 1998, 182p.
- [29] SALVADORI, M. & HELLER, R., Structure in architecture. New Jersey, Prentice Hall inc, 1963, 370 p.
- [30] VAN IMPE, R. Ruimtelijke constructies. Cursus burgerlijk ingenieur bouwkunde, Faculteit ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, 2005-2006.
- [31] NORTIER J. W., Algemene constructie leer voor bouw- en waterbouwkundigen. Stam Technische Boeken, Culemborg, 1978.
- [32] <http://www.kuleuven.be/bwk/materials/Teaching> (gelezen 13 maart)
- [33] THOMAS, P., Gewapend beton: Organische berekeningen. Cursus BA2, Faculteit ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, 2000-2001.
- [34] SCIA Group. Esa-Prima Win. Handleiding.
- [35] NBN B15-002. Eurocode 2: Berekening van betonconstructies. Deel 1.1: Algemene regels en regels voor gebouwen, BIN, Brussel, 1999.
- [36] <http://www.bekaert.com> (gelezen 27 mei 2006)
- [37] <http://www.earth-auroville.com/index.php?nav=menu&pg=vault&id1=2> (gelezen 20 december)

- [38] TORROJA E., Les structures architecturales: Leur conception et leur réalisation. (Franse vertaling door CHAULET A.), Paris, Editions Eyrolles, 1969.
- [39] ROSENTHAL, H.W., Structural decisions. The basic principles of structural theory, their application tot the design of buildings and their influence on structural form. London, Chapman & Hall Ltd, 1962, 417 p.
- [40] New Mexico Earthen Building Materials Code
<http://www.angelfire.com/nm2/swdesert/newmexicostatebuildingcode.html>
 (gelezen 5 mei 2006)

FIGURENLIJST

Figuren: 3.1, 3.4, 3.7, 3.21, 3.34, 3.72, 3.115

VAN IMPE, R. Ruimtelijke constructies. Cursus burgerlijk ingenieur bouwkunde, Faculteit ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, 2005-2006.

Figuren: 3.5, 3.6, 3.8, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.23, 3.24, 3.106

FISCHER, L., Theory and Practice of shell structures. Berlin, Munich, Wilhelm Ernst & Sohn, 1968, 541 p.

Figuren: 3.2, 3.3, 3.9, 3.16, 3.17, 3.25, 3.27, 3.35, 3.14, 3.88

SALVADORI, M. & HELLER, R., Structure in architecture. New Jersey, Prentice Hall inc, 1963, 370 p.

Figuren: 3.10, 3.11, 3.38, 3.40, 3.41, 3.69, 3.70, 3.104

HANAOR, A., Principles of structures. Oxford, Blackwell Science, 1998, 182p.

Figuren: 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.35, 3.42, 3.64, 3.69, 3.89, 3.93

NORTIER J. W., Algemene constructievoor voor bouw- en waterbouwkundigen. Stam Technische Boeken, Culemborg, 1978.

Figuur : 3.18b

TORROJA E., Les structures architecturales: Leur conception et leur réalisation. (Franse vertaling door CHAULET A.), Paris, Editions Eyrolles, 1969.

Figuur: 3.22, 3.105

OOSTERHOFF, J., Kracht en vorm, de draagconstructie van bouwwerken eenvoudig verklaard. Delftse Universitaire Pers, Faculteit der Bouwkunde, Technische Universiteit Delft, Nederland, 1990, 46-51.

Figuur: 3.26

<http://www.kuleuven.be/bwk/materials/Teaching> (gelezen 13 maart)

Figuren: 3.74, 3.81a, 3.83

<http://www.earth-auroville.com/index.php?nav=menu&pg=vault&id1=2> (gelezen 20 december)

Figuren: 3.81c, 3.82

ROSENTHAL, H.W., Structural decisions. The basic principles of structural theory, their application tot the design of buildings and their influence on structural form. London, Chapman & Hall Ltd, 1962, 417 p.

Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep
Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: Prof. Dr. B. VERSCHAFFEL

Appendices

bij
Bouwfysische en structurele analyse van een koepelwoningbouwsysteem
door
Sarah SACRE en Laure WILS

Promotor: Prof. Dr. Ir. Arch. A. JANSSENS
(Scriptiebegeleider: M. DEKOONING)

Academiejaar 2005-2006

APPENDIX A:

BOUWGIDS SOLIDHOUSE

Solid House foundation

info@solidhouse.nl www.solidhouse.nl



Building Guide for a SolidHouse

Building steps SolidHouses

Step 1

Clear the ground of all constructions and organic material. Level the ground. The ground should have the same firmness all over.



Step 2

Put a stick at the center of the structure and with a stick on a rope draw the circle for the foundation. Dig the ringfoundation.



Step 3

Make forming boards with pieces of plywood, strung together on two parallel rebar's. Use these to stake out the perimeter of the foundation.



Step 4

Connecting horizontal and vertical rebar's of the foundation.



Step 5

Layout the necessary pipes for sanitation.



Step 6

With cement make 'cookies' of about 2,5 cm height. Put them at every other crossing of re-bars in the foundation. Lifting the whole structure up to allow for embedding of the rebar.



Step 7

Pour out the concrete for the foundation, starting at one edge and gradually working towards the other side. Use some kind of vibrator (mechanical or manual) to make sure the concrete fills every nook of the foundation and to prevent air-pockets.



Step 8

Make sure the concrete is evenly distributed and level. The total thickness should be about 10 cm.



Step 9

Take care while carrying the concrete around that you don't damage or fill-up the sanitary-pipes.



Step 10

Create a gutter at the edge of the foundation where the dome shell will be erected.



Step 11

Normally after 24 to 48 hours the concrete is set and the forming boards can be removed. Clean them well and they will serve for the next foundation.



Step 12

Decide where to put the metal strips to connect the airform onto the floor. Drill holes in the foundation accordingly.



Step 13

Use the metal strips and the screws to connect the airform to the floor. While working on the inside it is helpful to already start the airpump to provide the workers with some fresh air and give a bit more space to work.



Step 14

If available use a rubber strip or apply paste between the airform and the foundation. This will help to avoid excess air loss once the airform is inflated.



Step 15

Inflate the airform, pay attention that nobody on purpose or accidentally steps on the airform while inflating. Even though the pressure is not that high, the forces are great and can easily inflict damage.



Step 16

Inflate the airform until totally inflated. Make sure the rebars will not damage the airform.



Step 17

Create a pressure gauge to control the air pressure in the airform to prevent distortion of the dome shape.



Step 18

Build any kind of stairs to be able to reach the top of the airform.



Step 19

The first rebars are placed at the top of the airform.



Step 20

The rebars of the dome shell are connected with the vertical rebars of the foundation.



Step 21

Add other rebars making sure the distance between them is never more than 25 cm and that the circles are always at the outside.



Step 22

Use plywood to form the doors and windows.



Step 23

Apply extra rebars around door and window frames for extra strength. The rebars are bend following the plywood formwork.



Step 24

Make concrete 'cookies' with the height agreed upon (normally around 5 cm) and connect them at crossings of re-bars. They will be used to control the thickness of the concrete layer of the dome.



Step 25

Make layout for electrical and water infrastructure. Attach piping to rebar. Use pieces of foam to create open spaces inside the SolidHouse to apply connectors for electricity / water. (remove foam when concrete is set)



Step 26

Make forming boards with pieces of plywood, strung together on two parallel rebars. These forming boards are used to keep concrete at lower vertical shell part in place.



Step 27

Above the forming boards apply the first layer by 'shooting' the concrete against the air-form.



Step 28

Use the stairs for putting the concrete at the top of the dome. Take care not to step on the airform. If you have to step on the airform, at least take off shoes.



Step 29

Place the second layer starting at the top. Make sure that all distance-holders are well covered to guarantee the correct thickness of the concrete.



Step 30

Polish the last layer of concrete until it is smooth. This also helps to prevent cracks.



Step 31

When the concrete of the dome is set, this depends on the climate, disconnect the airform from the foundation, clean and carefully take out of the dome.



Step 32

Place 1,5 cm. extra cement on the inside of the dome to cover up the visible rebar.



Step 33

Place window-frames, door-frames, windows and doors and internal walls according to design.



Step 34

Placing of internal walls.



The Solid House Foundation dedicates her work to help create communities worth living and working in.

For additional information, questions or comments, please contact us at:

**Solid House Foundation
F.C. Dondersstraat 29
3572 JB Utrecht
The Netherlands**

Tel: (+31) (0)30 27 10 928
Fax: (+31) (0)30 27 17 562

e-mail: info@solidhouse.nl



APPENDIX B:

EINDVERSLAG PROJECT NAYAN UTAJA IN EL ALTO, BOLIVIA

Solid House Foundation

info@solidhouse.nl www.solidhouse.nl



Project Nayan Utaja in El Alto, Bolivia



Een aantal van de trotse bouwers / bewoners van het project Nayan Utaja

Programma voor sociale huisvesting in El Alto, Bolivia



Samenvatting

Het project 'Nayan Utaja' vond plaats te Villa Mercedes B in El Alto te Bolivia gedurende de periode december 2003 tot en met augustus 2005. In die tijd is voldaan aan de doelstelling om 8 SolidHouses te bouwen voor en door jongeren, waarbij het idee was hen tevens op te leiden in het seriematig bouwen en afwerken van huizen. Verder was er begeleiding voor, tijdens en na de bouw van de groep met hierbij speciale aandacht voor de groepsdynamiek die juist in de Aymara-cultuur erg belangrijk is. Nu het project is afgerond en het financiële overzicht is opgemaakt, is het terrein overgedragen aan de jongeren.

Voor dit project werd samengewerkt met de lokale partijen:

1. Ingenieros & Arquitectos Asociados (IAA)
2. Alprad Jr.

De financiële partners aan de Nederlandse zijde waren:

1. NCDO
2. Rotaryclub Utrecht



Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inhoudsopgave	3
1. Beschrijving project	4
2. Tijdsverloop.....	5
2.1 Verwerving terrein	5
2.2 Technische problemen.....	5
2.3 Sociale onrusten	5
2.4 Afbouw binnenkant.....	6
3. Financiën.....	7
3.1 Ballon	7
3.2 Terrein.....	7
3.3 Bouwkosten.....	7
3.4 Organisatie-, reis- en verblijfskosten	8
4. Korte termijn doelstellingen.....	9
5. Lange Termijn Doelstellingen.....	10
5.1 Voorbeeld project.....	10
5.2 Bouwervaring met SolidHouses	10
5.3 Lange levensduur SolidHouse	11
5.4 Groepsontwikkeling.....	11
6. Conclusie	12
6.1 Technisch.....	12
6.2 Educatief.....	12
6.3 Sociaal.....	12
6.4 Financieel.....	12
Bijlagen:	13



1. Beschrijving project

Het project Nayan Utaja ('Mijn Huis' in de Aymara-taal) is door de Solid House Foundation in Bolivia opgezet voor en met een groep van 28 straatjongeren uit La Paz. Deze groep raakte verbonden met elkaar door de oprichting van een eigen 'vakbond': AlPrad, vereniging van schoenpoetsers van de Prado (de centrale straat van La Paz). In een kleinschalig huisvestingsproject hebben de jongeren zelf hun eigen woningen leren bouwen, uitgaande van de koepelvorm zoals die door de SHF wordt ingezet om goede en duurzame resultaten te bereiken op het vlak van armoedehuisvesting. Dit project werd mede mogelijk gemaakt door de financiële hulp van de Rotary Club Utrecht West en de NDCO. Dit project werd tevens het eerste project van de Solid House Foundation (SHF), die werd opgericht om de huisvestingsproblemen in ontwikkelingslanden aan te pakken.

In El Alto kocht de SHF een terrein aan waarop zes kleine en twee grote koepels werden gebouwd. De kleine koepels hebben een doorsnede van 6 meter en een oppervlakte van ongeveer 30 vierkante meter en zijn bestemd voor jonge gezinnen. De twee grote koepels hebben een doorsnede van 9 meter en 65 vierkante meter vloeroppervlak. Daarvan is er één bestemd voor vrijgezellen en de andere voor werkplekken en bijeenkomsten. Samen vormen de koepels een kleine leefgemeenschap. De jongeren hebben de koepels zelf helpen bouwen, opgeleid door SHF en in samenwerking met bouwbedrijf IAA. Het bouwbedrijf was zo tevreden over de inzet van een aantal schoenpoetsers dat het zeven jongens in vaste dienst heeft genomen.

Eén van de jongeren is Javier (23). Tot voor kort woonde hij met zijn vrouw en zoontje aan de rand van El Alto in een éénkamerwoning van 10 vierkante meter, met muren van leem en een dak van golfplaten. Eten deed hij tegenover zijn huisje in de even kleine woning van zijn moeder, waar ook nog het gezinnetje van zijn zus woonde. Javier heeft vanaf zijn zevende jaar als schoenpoetsers gewerkt in het centrum van La Paz, van zonsopgang tot zonsondergang. Naar school ging hij in de avonduren. Nu hij een vaste baan heeft bij het bouwbedrijf en is verhuisd naar een koepelwoning ziet hij de toekomst voor hem en zijn gezin zonnig in. Javier: "De bouw verdient ongeveer twee keer zoveel als schoenen poetsen. Met de koepelwoning ben ik erg blij: hij is een stuk groter dan het vorige huis en heeft een keuken en badkamer."





2. Tijdsverloop

De eerste concrete bijeenkomsten met de jongeren over dit project vonden plaats in november 2003. De planning was dat vanaf dat moment voor het hele traject ongeveer driekwart jaar nodig zou zijn. Dit is uiteindelijk een stuk langer geworden. Er zijn een viertal redenen aan te wijzen voor deze vertraging, welke hieronder nader toegelicht zullen worden:

1. verwerving van legaal terrein verliep moeizaam;
2. technische problemen bij bouw eerste koepel;
3. sociale onrusten met blokkades;
4. afbouw aan binnenkant vergde veel nieuwe vaardigheden.

2.1 Verwerving terrein

Bij het opmaken van de planning was gebleken dat er met grote regelmaat terreinen beschikbaar waren in El Alto die voldeden aan de eisen van de groep: dicht bij openbaar vervoer, goede verbinding met het centrum en duidelijke zichtbaarheid vanaf de doorgaande weg. Toen uiteindelijk een terrein gezocht werd voor de koop bleek dat het overgrote deel van de verkopers niet beschikte over de benodigde papieren. Dit was lang niet altijd duidelijk bij het begin en regelmatig zijn we een paar weken verloren voordat besloten kon worden niet verder te gaan met dat specifieke terrein. Uiteindelijk is in juli 2004 een terrein gevonden dat meer dan voldeed aan alle eisen.

2.2 Technische problemen

De technische problemen concentreerden zich vooral rond het opgeblazen krijgen en houden van de ballon (de ballon is het noodzakelijke onderdeel waar omheen SolidHouses worden geconstrueerd). Bij het vooroverleg met het bouwbedrijf tijdens het beschrijven van het project leek het geen enkel probleem om een pomp te regelen die aan de eisen zou voldoen. Echter de pomp moet minstens drie dagen continu draaien en dat vergt een kwaliteit die niet beschikbaar bleek te zijn. Ook was de lekkage onderaan de ballon groter dan verwacht. Hierdoor moest de pomp een behoorlijk volume per minuut aan lucht kunnen blazen. Ook dat was een probleem omdat de vorm van de turbine niet optimaal was. Uiteindelijk werd besloten tot het laten maken van een pomp. Dit verliep niet onmiddellijk goed maar nadat er een aantal technici veranderingen aan het ontwerp hadden aangebracht is een pomp gemaakt die genoeg druk opleverde. Voor de veiligheid zullen wij voortaan met twee pompen gaan werken (één als reserve).

2.3 Sociale onrusten

Bij de aanvang van het project waren er grote sociale onrusten in Bolivia. Deze hebben gedurende een groot deel van het project regelmatig weer de kop op gestoken. Één van de eerste dingen die gedaan wordt bij dit soort onrusten is het blokkeren van wegen. Regelmatig was het onmogelijk om op de werkplaats te komen, soms alleen met vertraging van uren. Zeker in de periodes waarin er met beton werd gewerkt zorgde dit voor vertraging omdat deze zaken in één dag gedaan moesten worden, hiervoor bleek de werkdag regelmatig tekort. In de ontwikkelingslanden waar de SHF werkt kunnen verschillende soorten sociale onrusten voorkomen. Vermijden is haast onmogelijk maar het is belangrijk om de veiligheid voor de medewerkers van de SHF en het project juist te taxeren. Eventueel kan er dan tijdig besloten worden tijdelijk het gebied te verlaten, hetgeen voor Bolivia ook een keer nodig bleek.



2.4 Afbouw binnenkant

De afbouw aan de binnenkant was iets wat uiteindelijk ook door de jongeren zelf gedaan moest worden. Zij werden hierin bijgestaan en onderwezen door twee Nederlandse vrijwilligers die specifiek hiervoor naar het project waren gekomen. Op het moment dat begonnen moest worden bleek dat de fut om nog weer verder te bouwen bij de meeste jongeren even verdwenen was. Het afbouwen vergde veel nieuwe vaardigheden en na 5 maanden leren en bouwen aan de koepels zelf was dat op dat moment teveel voor velen. Daarbij moesten zij het afbouwen in hun eigen tijd doen en aangezien het merendeel per dag zijn geld moet verdienen bleven er niet veel momenten over om te werken. Pas als een koepel zover was dat de eigenaar erin kon trekken schoot het werk wat meer op omdat dan de avonduren ook besteed konden worden.





3. Financiën

Gedurende het project zijn er een aantal zaken veranderd. Hierdoor werd de verdeling van het budget over de verschillende posten aangepast. In het totaal is het project echter binnen de begroting uitgevoerd. Het budget voor het project bedroeg € 55.354,-. (exclusief de personele kosten van de Solid House Foundation). Het werkelijke eindbedrag is uitgekomen op € 55.261,-.

3.1 Ballon

Budget: € 5.227,-. werkelijk: € 7.064,-.

De belangrijkste reden voor de overschrijding van de begroting in deze post is de onverwachte uitgave voor de importbelasting. Bij het opstellen van de begroting was ons verzekerd dat er geen importbelasting gold voor stichtingen. Bij het importeren bleek dit echter een regel te zijn met zeer veel 'mitsen en maren'. De aanvraag voor het 0%-tarief had 3 maanden voor het importeren al goedgekeurd moeten worden of het had als diplomatieke post aangemerkt moeten worden. Bij nader inzien bleken wij aan geen van deze eisen te kunnen voldoen, onder andere omdat wij een Nederlandse stichting zijn en de ballonnen uit de Verenigde Staten van Amerika kwamen.

3.2 Terrein

Budget € 20.909 werkelijk € 12.114.

Het lange zoeken naar een terrein met officiële papieren heeft ons uiteindelijk het geluk bezorgd een groter terrein te vinden voor een veel lagere prijs. De eigenaar was bezig met het verhuizen naar een stad ver van La Paz vandaan. Daarbij had hij het terrein al lang geleden gekocht maar nog nooit iets gebouwd. Het buurtbestuur had echter aangegeven dat de terreinen waarop op 16 juli 2004 nog steeds niet gebouwd was, opnieuw verkocht zouden gaan worden. Hierdoor had de eigenaar nog maar 5 dagen om óf te bouwen óf te verkopen. In deze situatie hebben wij een heel gunstige prijs kunnen bedingen.

3.3 Bouwkosten

Budget € 22.591, werkelijk € 29.586.

De drie belangrijkste redenen, welke hieronder toegelicht zullen worden, voor de overschrijding in deze post zijn:

1. Alle huizen zijn voorzien van eigen sanitair en keuken;

Al gedurende de eerste stappen van de bouw was er veel belangstelling voor de huizen. Het werd snel duidelijk dat de voorbeeldfunctie niet alleen uit zou gaan van de koepel op zich maar ook van het samenbouwen op één terrein (zogenaamde condominium-constructie). Hierdoor werd het noodzakelijk om het gehele project zo presentabel mogelijk te maken en dit betekende dat alle huizen voorzien moesten worden van een kleine badkamer en een keukenblok (i.p.v. één gemeenschappelijk voorziening voor de hele groep). Tijdens het samenwerken aan de bouw tussen de leden van de groep werd duidelijk dat voor een goede vorm van samenleven een grotere mate van privacy belangrijk was. Dit werd tevens bereikt.

2. Het waterdicht maken met speciale verf / coating viel duurder uit dan begroot;

De klimatologische omstandigheden waaronder werd gewerkt met het beton waren verre van ideaal. Dit had tot gevolg dat de waterdichtheid van het beton slechter was dan verwacht.



Hierdoor was het nodig om meer waterdichte verf te gebruiken en tevens om een post op te nemen voor verf waarmee de koepels bestreken worden na de eerste winter (oktober 2005).

3. Dikkere koepelschil en wapening.

Vanwege de problemen met het goed krijgen van het beton werd samen met de technici van het bouwbedrijf besloten om de koepel niet 7,5 cm dik te maken maar 10 cm en de dikte van de wapening is 10 mm genomen in plaats van de aanbevolen 8 mm. Dit zorgt tevens voor een wat grotere marge voor fouten nodig om het niet altijd even nauwkeurige werk van de leerlingen op te vangen.

De kosten van de twee verschillende vormen koepels komen uit op (incl. afwerking, sanitair, elektriciteit en waterdichte verflagen):

koepel 6m diameter: € 2.400,-

koepel 9m diameter: € 5.300,-

(zie bijlage voor plattegrond)

De kleinschaligheid van dit project resulteert in een relatief hoog bedrag per SolidHouse. Projecten van deze beperkte schaalgrootte zijn onredelijk duur omdat de gebruikte ballonnen worden afgeschreven over slechts enkele gebouwen. Normaal gesproken kunnen er per ballon in principe tussen de 75 en 125 woningen worden geproduceerd. De ballonnen zijn uiteraard nog steeds beschikbaar in El Alto voor gebruik in vervolgprojecten.

3.4 Organisatie-, reis- en verblijfskosten

Budget € 10.866, werkelijk € 6498.

Naast de SHF inzet is veel werk door zeven zeer hardwerkende en bereidwillige vrijwilligers gedaan die zelfs bereid waren hun reis- en verblijfskosten te betalen. De extra personele kosten van SHF personeel neemt de SHF voor haar rekening, in het kader van het experimentele en sociale karakter van het project en de goede startfunctie die het heeft gehad voor de activiteiten van de SHF in het algemeen.



4. Korte termijn doelstellingen

Het opzetten van een proefproject voor de bouw van SolidHouses

In het project zijn acht SolidHouses op het terrein gebouwd welke nu bewoond worden door de actieve leden van de doelgroep. Tevens zijn er nog twee SolidHouses gebouwd op het terrein van en geheel voor rekening van het bouwbedrijf IAA. Zij hebben dit aangeboden om op die manier op een afgeschermd terrein, met alle hulpmiddelen bij de hand, ervaring op te kunnen doen met de bouw. Tevens was op dit terrein een overdekte werkplaats waar uitleg gegeven kon worden aan de leerling-bouwers.

Ervaring met deze wijze van constructie in een ontwikkelingsland

De constructiemethode levert geen onoverkomelijke problemen op in een ontwikkelingsland. Het feit dat de bouw een lineair proces is waar tussen de stappen gerust wat tijd mag zitten past prima bij het niet altijd zeker kunnen zijn van de aanwezigheid van de medewerkers. Behalve bij het storten van het beton vormt een vertraging in het bouwproces geen probleem voor de kwaliteit van het resultaat.

Kritieke punten:

1. juiste mix van het beton, dit is belangrijk voor de stevigheid en de waterdichtheid;
2. het voortdurend nat houden in de eerste week dat het beton gestort is en dan nog regelmatig gedurende twee weken daarna;
3. een juiste dekking van de wapening (minimaal 2,5 cm aan de buitenkant en 1,5 cm aan de binnenkant);
4. een betrouwbare ventilator met een reeds klaar staande back-up.

Ervaring in het onderwijzen van deze constructiemethoden

Belangrijk is dat er op de bouwplaats een rustige, liefst overdekte, plaats is waar de uitleg gedaan kan worden en waar ruimte is om handelingen voor te doen en te laten oefenen. Wij hebben het geluk gehad dat het bouwbedrijf deze ruimte beschikbaar stelde maar voor een volgend project moet het een vereiste zijn.

De bouwmethode blijkt bijzonder geschikt te zijn om over te dragen. Dit onder andere doordat het bouwproces stap voor stap uitgevoerd kan worden met tijd genoeg tussen de stappen om rustig uitleg te kunnen geven. De uitleg is voornamelijk mondeling gedaan met behulp van wat eenvoudige tekeningen, snel gevolgd door praktische oefeningen.

Essentieel is dat degene die vanuit de SHF de bouw begeleidt zich open opstelt ten opzichte van de lokale kennis. Veel oplossingen voor problemen die we tegenkwamen kwamen uit het samen-denken met de lokale werknemers. Ook de ervaring in het werken met het beton in de specifieke klimaten moet lokaal verkregen worden.

Van de leden van de groep bleek dat degene die reeds een gezin hadden meer geïnteresseerd waren in het leerproces dan de vrijgezellen. De vrijgezellen hebben wel mee gewerkt maar zagen het toch meer als een éénmalige werkverschaffing. Terwijl de hoofden van gezinnen meer geïnteresseerd waren in de toekomstmogelijkheden van nieuwe kennis en ervaring.



5. Lange Termijn Doelstellingen

5.1 Voorbeeld project

Al vanaf het eerste begin van de bouw is er veel belangstelling geweest voor de SolidHouses. Hoewel lang niet iedereen zichzelf in een koepel ziet wonen zorgt het er altijd voor dat mensen stil staan bij wat zij als ideaal huis voor zichzelf zien. Op deze manier zorgt het voor het op gang brengen van een bewustwordingsproces. Inmiddels zijn er ook al groepen geweest vanuit andere steden in Bolivia die belangstelling toonden voor het bouw- en organisatieconcept van de SHF. Dit heeft geresulteerd in een aanvullend onderzoek voor de realisatie van huisvesting voor 700 gezinnen, deel van de Federatie van werkende vrouwen van El Alto. De SHF begeleidt hen op dit moment in het onderzoeken van de mogelijkheden om een eigen huisvestingsprogramma op te zetten. Dit onderzoek zal medio November 2005 worden afgerond en is uitgevoerd met financiële ondersteuning van het Fonds Werken aan Wonen van Aedes (koepelorganisatie van woningcorporaties) en PSO (Nederlandse organisatie voor capaciteitsopbouw in ontwikkelingslanden).



5.2 Bouwervaring met SolidHouses

Alle leden van de groep van jongeren die nu in de SolidHouses wonen hebben op één of andere manier bijgedragen aan de bouw. Tegen het einde van het project vormden zij een goed samenwerkend team dat in staat was om in 2 à 3 dagen een hele koepelschil van wapening en beton te voorzien en binnen een week een gewapende fundering te leggen. Hoewel zij dit allen met plezier hebben gedaan is voor een groot aantal toch ook gebleken dat werken in de bouw erg zwaar is, veel zwaarder dan het schoenpoetsen. Bovenal echter is het verlies van vrijheid zodra je in dienst treedt bij een bedrijf een reden om toch weer te kiezen voor het schoenpoetsen op straat.

Echter, degenen die wel in de bouw verder willen vinden daar regelmatig mogelijkheden voor. Op dit moment worden er nog geen andere SolidHouses gebouwd maar hun vaardigheden kunnen met goed resultaat ook ingezet worden in de reguliere bouw. Zij hebben algemene zaken zoals

sanitair en deuren plaatsen geleerd binnen het bouwbedrijf en van twee Nederlandse vrijwilligers die leiding hebben gegeven bij het afbouwen van de binnenkant van de SolidHouses. Afhankelijk van de ontwikkelingen in het hierboven beschreven huisvestingsonderzoek voor de 700 families in El Alto zullen zij ook hun bouwvaardigheden weer over kunnen dragen. De bouwers die vanuit die groep families geselecteerd zullen gaan worden zullen veelal wederom geen bouwervaring hebben. De voormalige schoenpoetsers kunnen een coachende rol krijgen in de uitvoering van dat project.



5.3 Lange levensduur SolidHouse

Op dit moment is het nog te vroeg om hier uitspraken over te kunnen doen. Het is echter het stellig voornemen van de SHF om dit project gedurende vele jaren met regelmaat te bezoeken en evaluaties te maken, zowel op technisch als sociaal gebied.

Wel kan op dit moment al wel vermeld worden dat er vrijwel geen scheuren in het beton zijn ontstaan. Het ontstaan van scheuren is een normaal verschijnsel bij het drogen van beton. Hoogstwaarschijnlijk is het de vorm die dit tegengaat, eventuele scheuren worden door de druk van het gewicht van de koepel bij de vorming sneller dicht gedrukt.

Tijdens elk project met SolidHouses moet voortdurend de kwaliteit van het beton en de techniek van het aanbrengen strikt in de gaten worden gehouden. Hier zal een groot deel van de levensduur van de SolidHouses van af hangen.

Het bouwconcept rondom de opgeblazen ballon is al vele jaren toegepast, voornamelijk in Amerika. Door de ervaringen die men met deze gebouwen heeft te het veilig te stellen dat duurzaamheid juist één van de goede kwaliteiten van deze manier van bouwen is. Door het ontbreken van een afzonderlijke dakconstructie hebben weersinvloeden nauwelijks nadelige effecten voor dit type gebouwen.

Inmiddels heeft de SHF in Nederland onderzoek laten verrichten door het Waterloopkundig Laboratorium in Delft. Ingegeven door rampsituaties in de wereld is onderzocht wat de te verwachten weerstand is die SolidHouses bieden tegen natuurkrachten, zoals die kunnen optreden bij overstromingen tot het niveau van een tsunami. Het positieve resultaat van deze studie bevestigt de SHF in haar keuze om deze bouwtechniek te introduceren in de ontwikkelingswereld.

5.4 Groepsontwikkeling

Ook op dit punt is het te vroeg om enige definitieve conclusies te trekken. Duidelijk is wel geworden dat het samen bouwen aan de koepels de groep verstevigd heeft. Dit is onder andere te merken aan de manier waarop overlegt wordt binnen het project over dagelijkse zaken. Binnen deze vergaderingen is er meer begrip voor elkaars situatie gekomen. Dit wordt tevens versterkt doordat men nu meer van elkaars situatie weet omdat men die deelt en dagelijks meemaakt. Een van de duidelijke gevolgen van het samenwonen is dat er nu één vrouw achter blijft die op alle kinderen past en ze opvangt vanuit school zodat de andere vrouwen kunnen gaan werken.



6. Conclusie

6.1 Technisch

Het bouwen van SolidHouses levert geen problemen op die niet met lokale kennis en ervaring opgelost kunnen worden. Om de kwaliteit van de bouw te kunnen waarborgen is het van groot belang dat er voortdurende controle is op de samenstelling van het beton en de wijze van aanbrengen. Informatie over beide kan het beste bij lokale bouwspecialisten ingewonnen worden. Zij zijn op de hoogte van de effecten van het klimaat op het beton en de hulpmiddelen die ter plekke worden gebruikt voor het 'schieten' van beton tegen een verticale muur aan. Er is verder geen enkel bijzonder gereedschap nodig voor de bouw. Het is echter wel zeer aan te raden om twee ventilatoren aan te schaffen tegelijk met de aanschaf van de ballonnen.

6.2 Educatief

De bouw van een SolidHouse leent zich uitstekend voor het onderwijzen aan mensen die geen enkele ervaring in de bouw hebben. Doordat de eenvoudige bouwstappen elkaar lineair opvolgen, in tegenstelling tot het moeten doen van verschillende stappen tegelijkertijd, kan er tussendoor rustig de tijd genomen worden voor theorie en praktische oefening. Voor de uitleg is niet veel meer nodig dan een aantal eenvoudige tekening. Veel van de leerlingen konden overigens niet lezen maar konden met de tekeningen prima overweg.

Na de bouw is een filmpje gemaakt waarin in vogelvlucht de fasen van de bouw te zien zijn. Dit zorgt ervoor dat de medewerkers een idee krijgen van het hele proces. De tekeningen helpen vervolgens om de stappen in detail te bespreken.

Zowel het filmpje als de documenten met de bouwstappen zijn opgenomen in de bijlagen.

6.3 Sociaal

Samen leren bouwen en vervolgens een aantal keren toepassen in de bouw van eigen huizen heeft de groep op een geheel nieuwe manier samengebracht. Daar waar zij tot nu toe wel samen leefden op straat en bij elkaar werkten op de plek waar ieder werkte (de Prado in La Paz), was dit voor het eerst dat er gezamenlijk gewerkt werd aan één project. Dit ging niet altijd zonder slag of stoot en gedurende het proces zijn twee leden van de groep uit de groep gezet vanwege niet meewerken. De groep heeft dit zelf in overleg besloten en de overgebleven leden beginnen nu een duidelijk hechtere groep te vormen. In de aankomende jaren moet blijken hoe dit zich voortzet. SHF is voornemens dit sociale proces te blijven volgen.

6.4 Financieel

Afgezien van de personele kosten die door de SHF genomen zijn is het project binnen de begroting afgerond. Voor de SHF is de toch substantiële investering heel waardevol en relevant gebleken. Dit project vervulde een opstartfunctie voor de eigen organisatie, het was het eerste project. Daarnaast werden tevens voorbereidende werkzaamheden voor het vervolgproject ondernomen.



De prijzen van de koepels zijn uitgekomen op:

- koepel 6m diameter: € 2.400,-
- koepel 9m diameter: € 5.300,-

Gezien de veel hogere kwaliteit van fundering en dak is dit een prijs die concurrerend is met traditionele bouw. Het probleem is echter in deze cultuur dat er vrijwel geen waarde wordt gehecht aan kwaliteit of lange gebruiksduur. Voor de meeste mensen geldt slechts één overweging: “welke optie is het goedkoopste“. Het promoten van het SolidHouse-concept in deze cultuur zal dus ook gepaard moeten gaan met uitgebreide uitleg van de waarde van kwaliteit. Hieraan zal in een project extra aandacht besteed moeten worden.

Bijlagen:

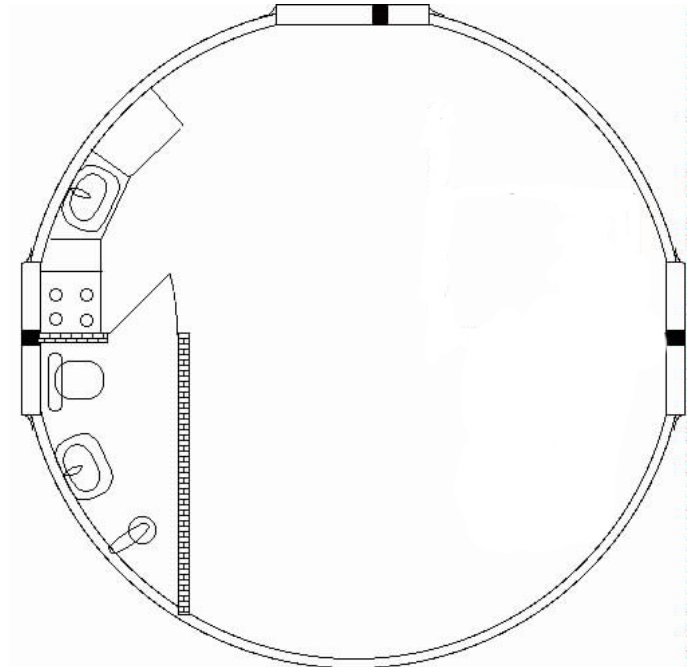
- 1 Plattegronden SolidHouses;

Op CD separaat meegeleverd:

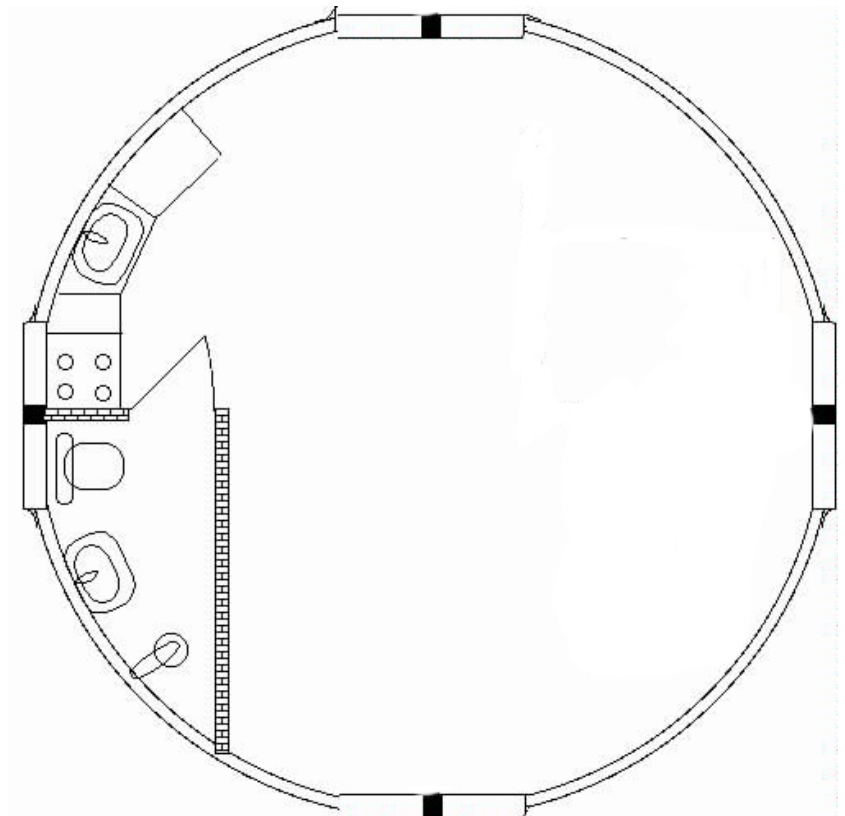
- 2 Financieel overzicht;
- 3 Foto collage enige bouwstappen SolidHouses;
- 4 Foto's bouwstappen;
- 5 Artist Impressions SolidHouses.

**Bijlage 1:**

Plattegrond 6 meter diameter SolidHouse:

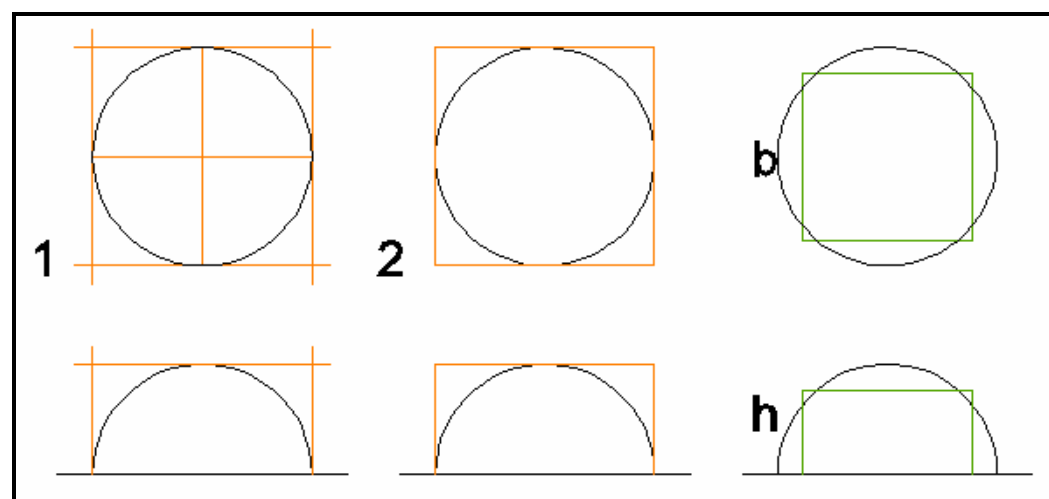


Plattegrond 9 meter diameter SolidHouse:

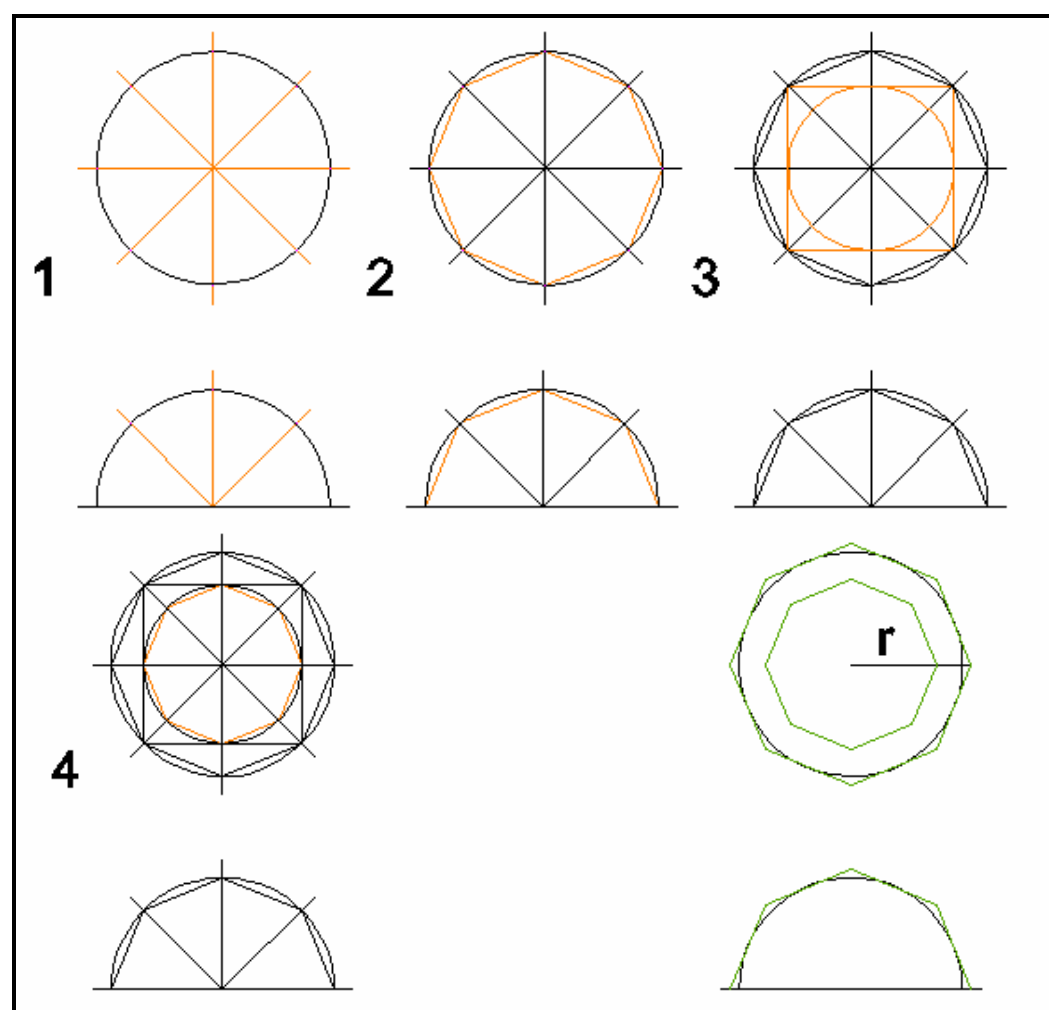


APPENDIX C:

BEPALING VOLUMES

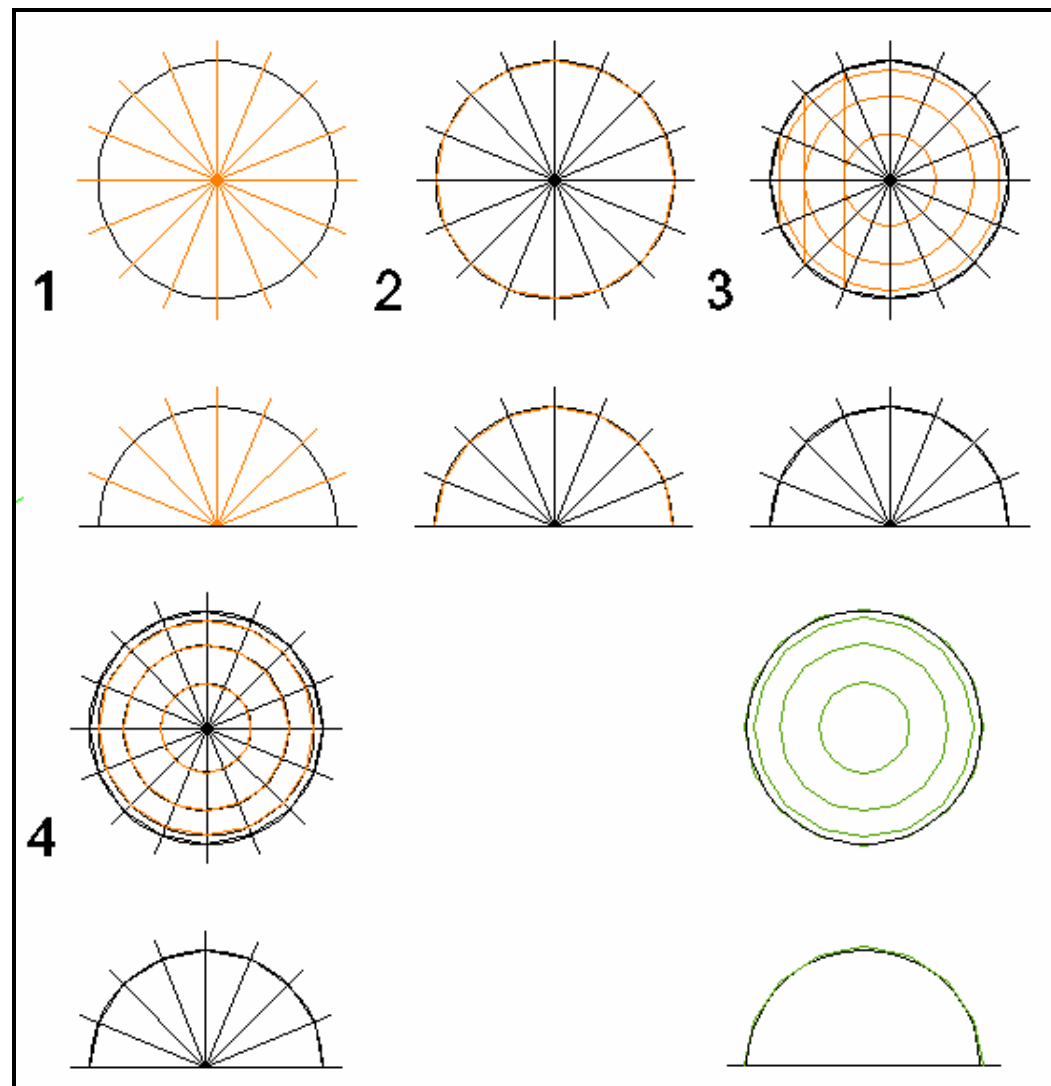
- BalkBepaling met $r = 3,1$ m

Definitief volume

- Ingeschreven achthoekBepaling met $r = 3,1$ m

Definitief volume

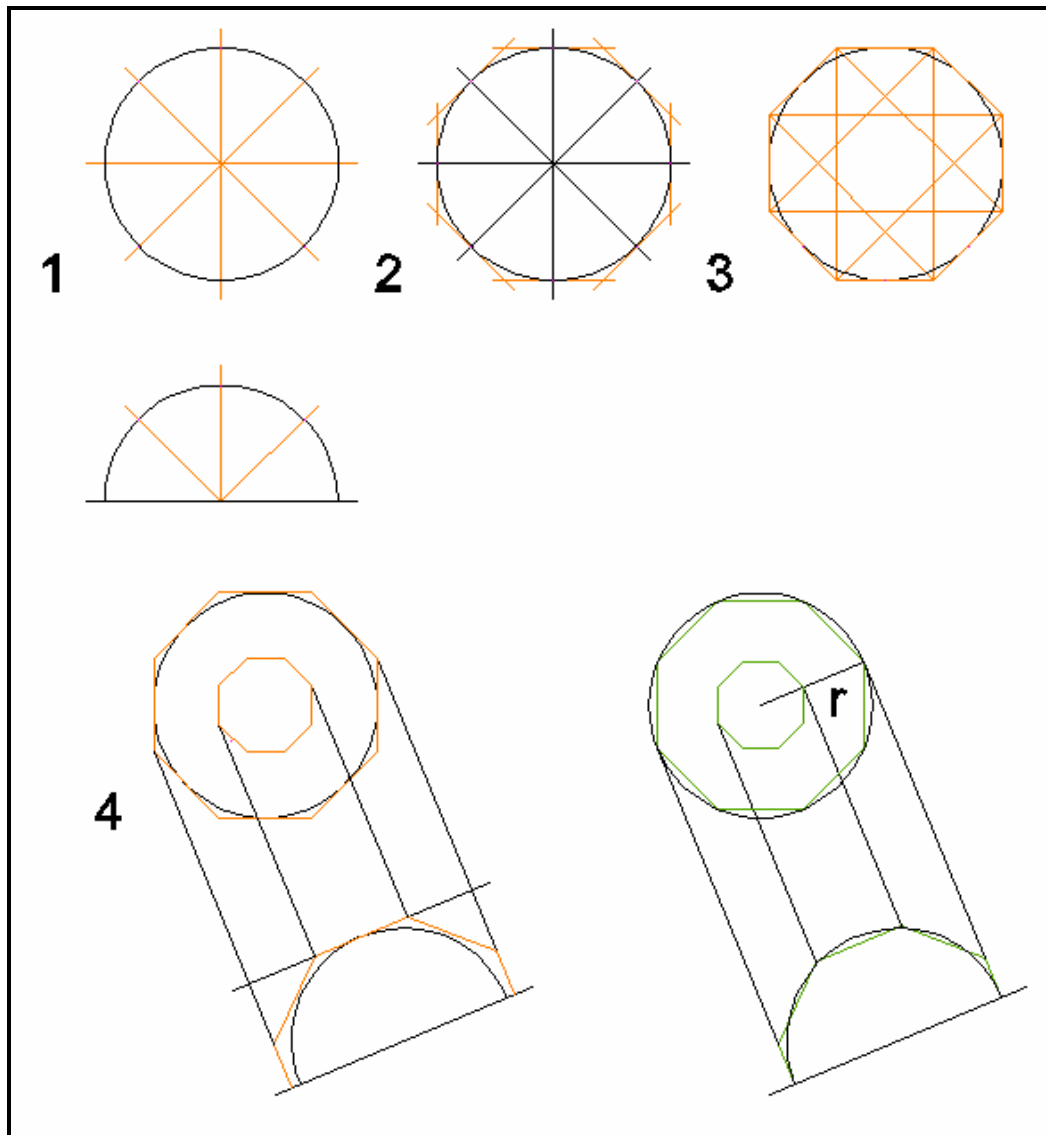
- Ingeschreven zestienhoek



Bepaling met $r = 3,1$ m

Definitief volume

- Omschreven achthoek



Bepaling met $r = 3,1 \text{ m}$

Definitief volume

APPENDIX D:

GEGEVENS WANDEN EN BINNENMUREN

- Gegevens wanden

muur	A [m ²]	oriëntatie [°]	helling [°]	muur	A [m ²]	oriëntatie [°]	helling [°]
muur N	1,18	180	69,06	binnenmuur 1	13,1	-	-
muur NO	5,42	-135	69,06	binnenmuur 2	10,52	-	-
muur O	1,18	-90	69,06	binnenmuur 3	1,74	-	-
muur ZO	5,42	-45	69,06	vloer	30,99	-	-
muurZ	5,42	0	69,06	glas N	0,65	180	90
muur ZW	5,42	45	69,06	glas O	2,08	-90	90
muur W	1,18	90	69,06	glas W	2,08	90	90
muur NW	5,42	135	69,06	deur N	2,1	180	90
dak N	2,12	180	24,15	driehoek N	1,85	180	90
dak NO	2,12	-135	24,15	driehoek O	0,93	-90	90
dak O	2,12	-90	24,15	driehoek W	0,93	90	90
dak ZO	2,12	-45	24,15	driehoek Z	1,85	0	90
dak ZO	2,12	0	24,15	recht N	1,22	180	90
dak ZW	2,12	45	24,15	recht O	1,88	-90	90
dak W	2,12	90	24,15	recht W	1,88	90	90
dak NW	2,12	135	24,15	bovenvlakken	4,55	0	0

- Gegevens binnenmuren

binnenmuren	A [m ²]	zone 1	α_c [W/m ² K]	zone 2	α_g [W/m ² K]
binnenmuur 1	13,1	binnen	3,5	ADIAB	0
binnenmuur 2	10,52	binnen	3,5	ADIAB	0
binnenmuur 3	1,74	binnen	3,5	ADIAB	0

APPENDIX E:

INTERNE WINSTEN SCENARIO 1 EN 2

- Scenario 1

Interne winsten: maandag, woensdag en vrijdag

periode	actieve toestellen	winst [W]	personen	activiteit	winst [W]	totaal [W]
6 - 7h	verlichting	60	ouders en 4 kinderen	opstaan, eten en aankleden	170	1080
7 - 9h			4 kinderen	spelen	110,5	442
12 - 18h	TV, hifi, radio	34	4 kinderen	spelen	110,5	476
18 - 18h30	kookfornuis	101,5	moeder	koken en afwassen	246,5	951,5
	warm water keuken	17				
	TV, hifi, radio	34	vader en 4 kinderen	spelen en TV	110,5	
18h30 - 20h	TV, hifi, radio	34	moeder	huishouden	289	935,5
	verlichting	60	vader	TV	110,5	
			4 kinderen	spelen	110,5	
20 - 6h	-	-	ouders en 4 kinderen	slapen	78,2	469,2

Interne winsten: dinsdag en donderdag

periode	actieve toestellen	winst [W]	personen	activiteit	winst [W]	totaal [W]
6 - 7h	verlichting	60	ouders en 4 kinderen	opstaan, eten en aankleden	170	1080
7 - 9h			4 kinderen	spelen	110,5	442
12 - 16h	TV, hifi, radio	34	3 kinderen	spelen	110,5	365,5
16 - 18h	TV, hifi, radio	34	4 kinderen	spelen	110,5	476
18 - 18h30	kookfornuis	101,5	moeder	koken en afwassen	246,5	561,5
	warm water keuken	17				
	TV, hifi, radio	34	vader en 4 kinderen	spelen en TV	32,5	
18h30 - 20h	TV, hifi, radio	34	moeder	huishouden	289	353
	verlichting	30	vader en 4 kinderen	spelen en TV	110,5	
20 - 6h	-	-	ouders en 4 kinderen	slapen	78,2	469,2

Interne winsten: zaterdag

periode	actieve toestellen	winst [W]	personen	activiteit	winst [W]	totaal [W]
7 - 9h	TV, hifi, radio	34	4 kinderen	spelen	110,5	476
18 - 18h30	kookfornuis	101,5	moeder	koken en afwassen	246,5	951,5
	warm water keuken	17				
	TV, hifi, radio	34	vader en 4 kinderen	spelen en TV	110,5	
18h30 - 19h30	warm water in badkamer	17,5	ouders en 4 kinderen	wassen	170	1037,5
19h30 - 20h	TV, hifi, radio	34	moeder	huishouden	289	935,5
	verlichting	60	vader en 4 kinderen	spelen en TV	110,5	
20 - 6h	-	-	ouders en 4 kinderen	slapen	78,2	469,2

Interne winsten: zondag

periode	actieve toestellen	winst [W]	personen	activiteit	winst [W]	totaal [W]
6 tot 7u	verlichting	60	ouders en 4 kinderen	opstaan, eten en aankleden	170	1080
7 tot 9u	TV, hifi, radio	34	ouders en 4 kinderen	spelen	110,5	697
18 tot 18.30u	kookfornuis	101,5	moeder	koken en afwassen	246,5	951,5
	warm water keuken	17				
	TV, hifi, radio	34	vader en 4 kinderen	spelen en TV	110,5	
18.30 tot 20u	TV, hifi, radio	34	moeder	huishouden	289	935,5
	verlichting	60	vader en 4 kinderen	spelen en TV	110,5	
20 tot 6u	-	-	ouders en 4 kinderen	slapen	78,2	469,2

- Scenario 2

Interne winsten: maandag tot vrijdag

periode	actieve toestellen	winst [W]	personen	activiteit	winst [W]	totaal [W]
6 – 7h	verlichting	60	2	opstaan, eten en aankleden	170	400
18 – 18h30	kookfornuis	101,5	1	koken en afwassen	246,5	509,5
	warm water keuken	17				
	TV, hifi, radio	34	1	TV	110,5	
18h30 - 21h	TV, hifi, radio	34	1	huishouden	289	493,5
	verlichting	60	1	TV	110,5	
21 - 6h	-	-	2	slapen	78,2	156,4

Interne winsten: zaterdag

periode	actieve toestellen	winst [W]	personen	activiteit	winst [W]	totaal [W]
6 – 7h	verlichting	60	2	opstaan, eten en aankleden	170	400
18 - 18h30	kookfornuis	101,5	1	koken en afwassen	246,5	509,5
	warm water keuken	17				
	TV, hifi, radio	34	1	TV	110,5	
18h30 – 19h	warm water in badkamer	17,5	2	wassen	170	357,5
19 - 21h	TV, hifi, radio	34	1	huishouden	289	493,5
	verlichting	60	1	TV	110,5	
21 – 6h	-	-	2	slapen	78,2	156,4

Interne winsten: zondag

periode	actieve toestellen	winst [W]	personen	activiteit	winst [W]	totaal [W]
6 – 7h	verlichting	60	2	opstaan, eten en aankleden	170	400
8 – 18h	TV, hifi, radio	34	2	TV en huishouden	110,5	255
18 – 18h30	kookfornuis	101,5	1	koken en afwassen	246,5	509,5
	warm water	17				
	keuken	34				
18h30 - 21h	TV, hifi, radio	34	1	TV	110,5	493,5
	verlichting	60	1	huishouden	289	
				TV	110,5	
21 – 6h	-	-	2	slapen	78,2	156,4

APPENDIX F: WAARDEN EN BEPALING ZONAFSCHERMING KOEPELWONING

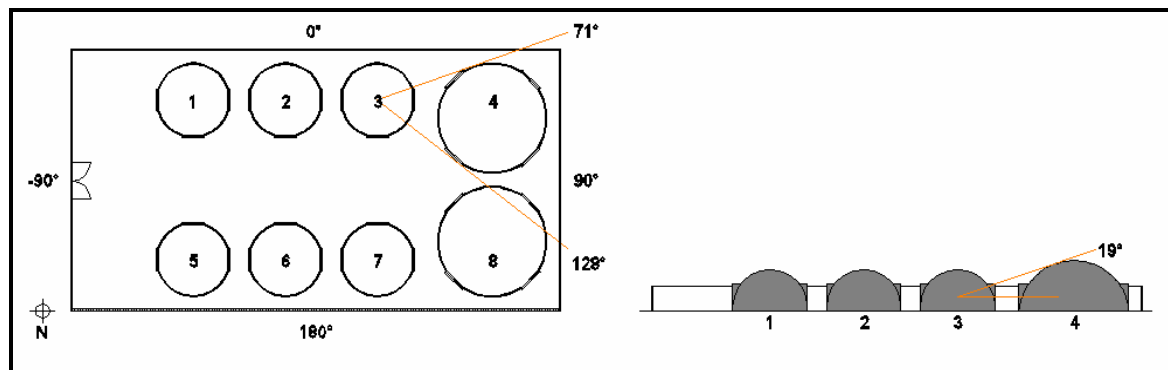
- Zonafscherming van het hele gebouw

Waarden voor de zonafschermingsparameters in El Alto

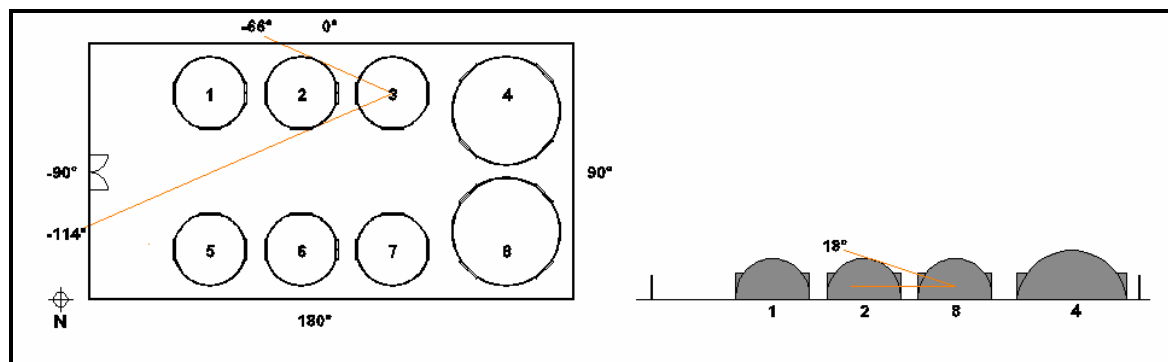
afschermingsobject	min azimut [°]	max azimut [°]	min hoogte [°]	max hoogte [°]
globaal	-180	180	0	5
gebouw 4	71	128	0	19
gebouw 8	122	158	0	12
gebouw 7	-166	166	0	10
gebouw 6	-162	-138	0	9
gebouw 2	-114	-66	0	18
muur N	-124	139	0	3
muur O	-124	-81	0	2
muur Z	-81	75	0	17
muur W	75	139	0	3

Voor de afscherming door de perceelsmuren is de afstand voor het bepalen van de afschermingshoogte de gemiddelde afstand genomen van de woning tot het obstakel. De onderstaande figuren geven de methode weer waarop de zonafschermingsparameters zijn bepaald.

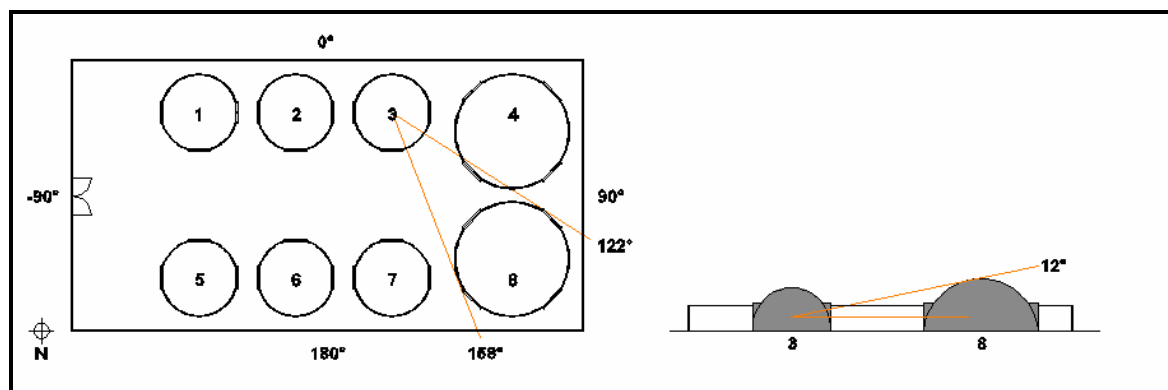
- Door gebouwen



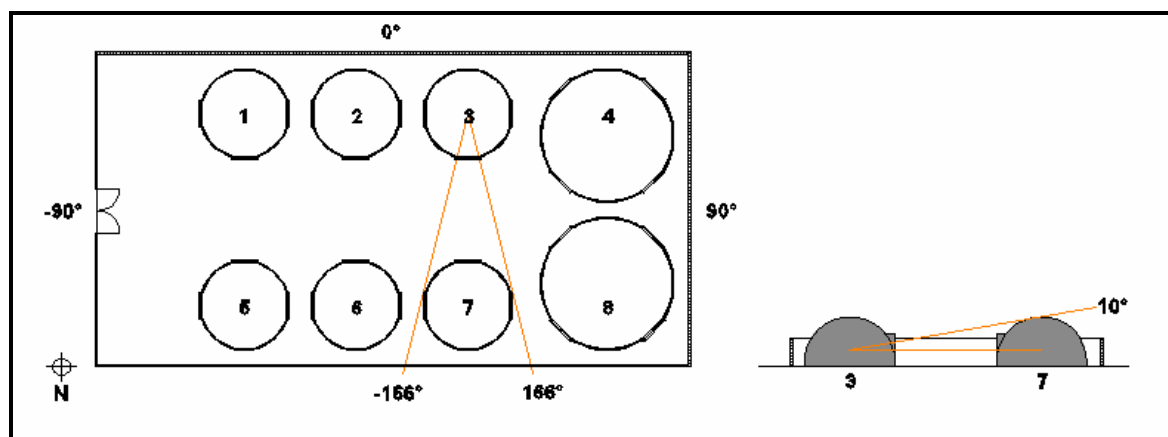
Zonafscherming van woning 3 door woning 4



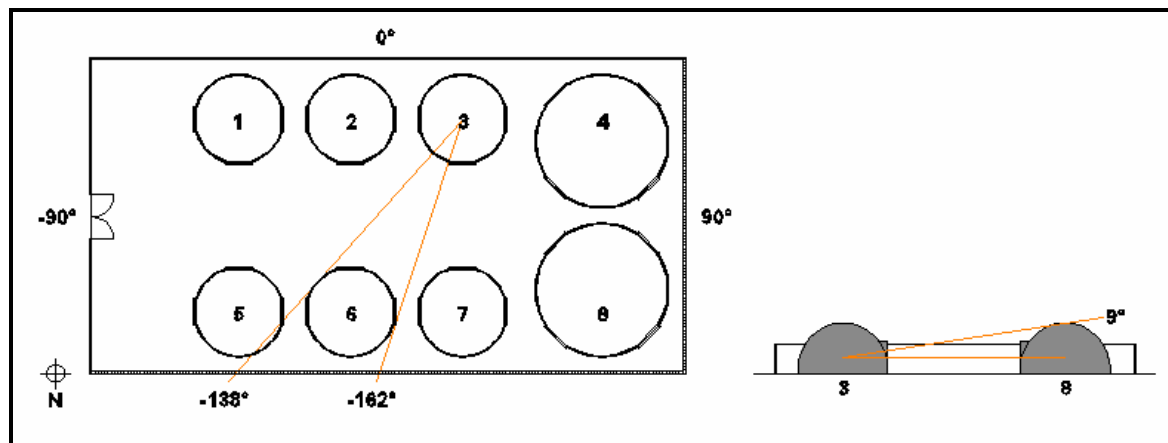
Zonafscherming van woning 3 door woning 2



Zonafscherming van woning 3 door woning 8

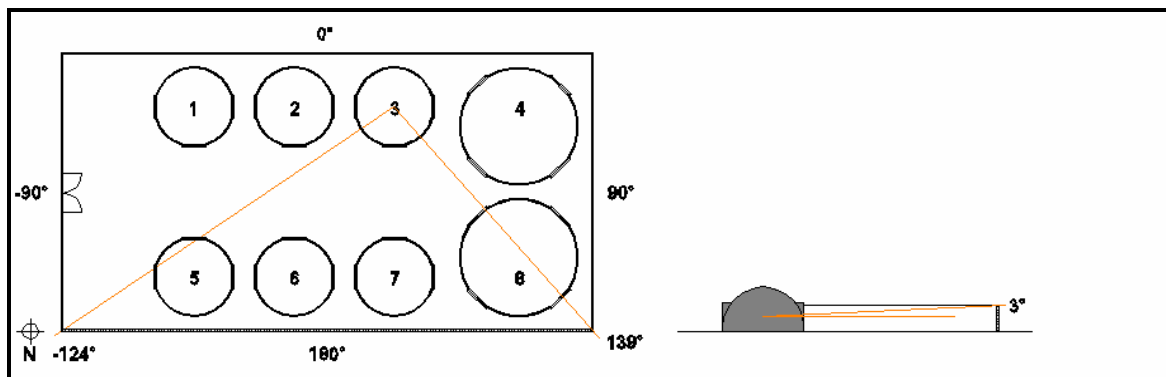


Zonafscherming van woning 3 door woning 7

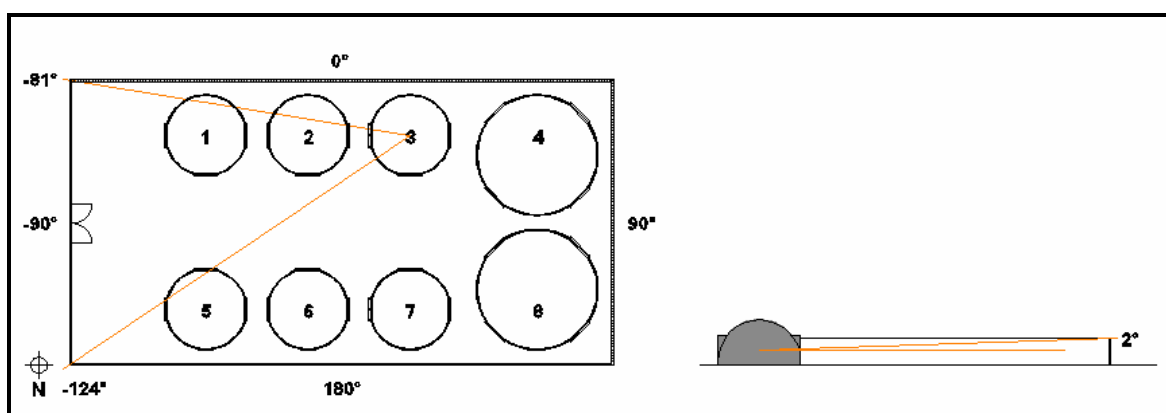


Zonafscherming van woning 3 door woning 6

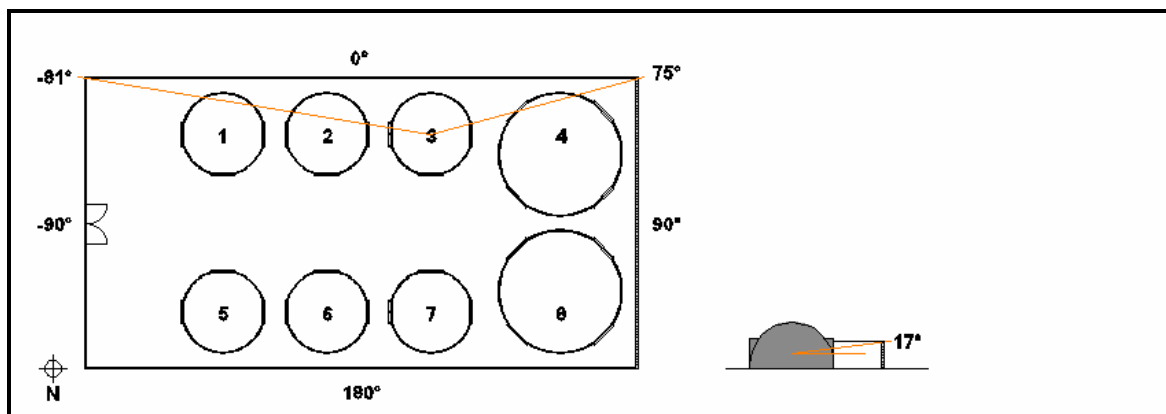
- Door muren



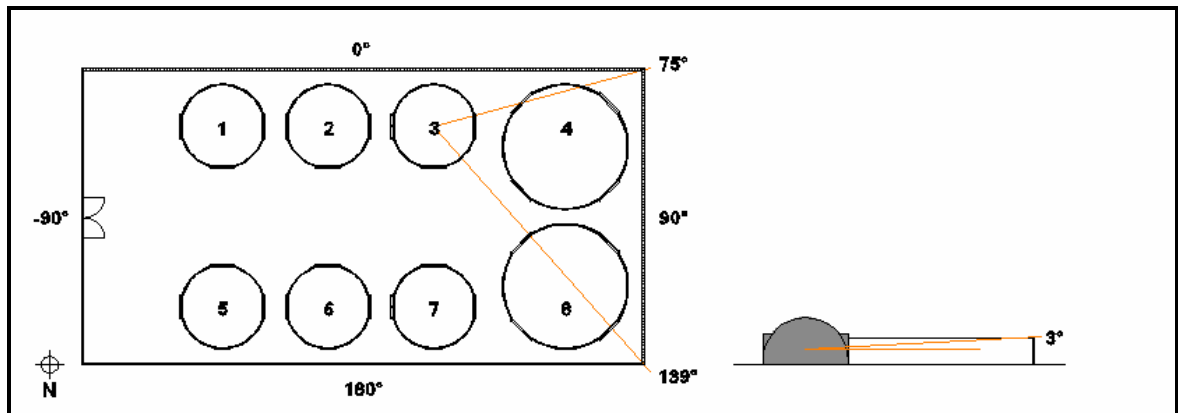
Zonafscherming van woning 3 door de noordelijke perceelsmuur



Zonafscherming van woning 3 door de oostelijke perceelsmuur



Zonafscherming van woning 3 door de zuidelijke perceelsmuur



Zonafscherming van woning 3 door de westelijke perceelsmuur

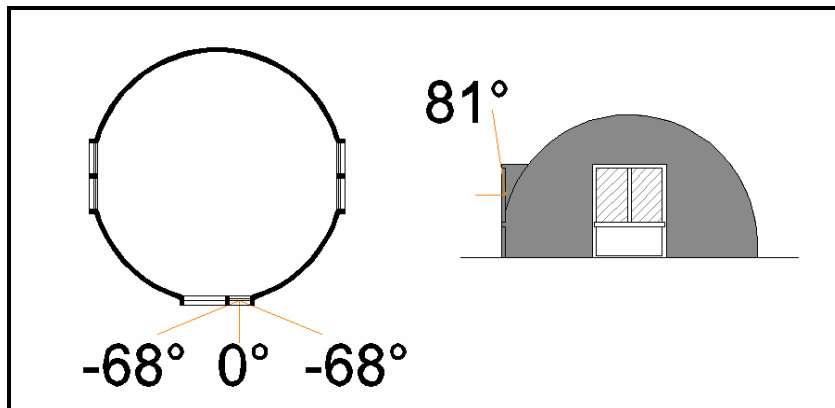
- Zonafscherming van wanden

Waarden voor de zonafschermingsparameters van de wanden

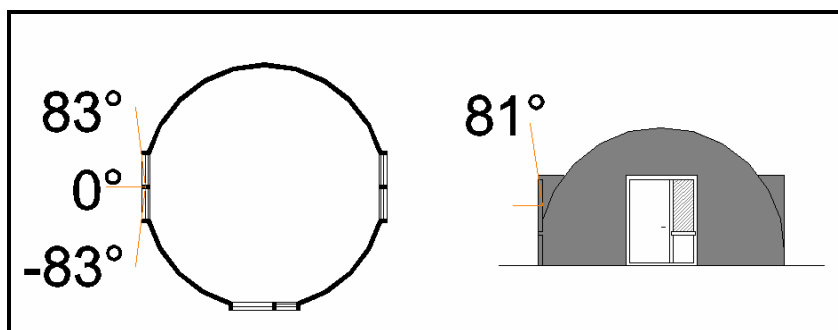
wandnaam	min azimut [°]	max azimut [°]	min hoogte [°]	max hoogte [°]
glas N	-68	68	0	81
glas O	-83	83	0	81
glas W	-83	83	0	81
deur N	-79	79	0	85
recht N	-68	68	0	75
recht O	-83	83	0	75
recht W	-83	83	0	75

De onderstaande figuren geven de manier weer waarop de zonafschermingsparameters voor de luifels bepaald zijn.

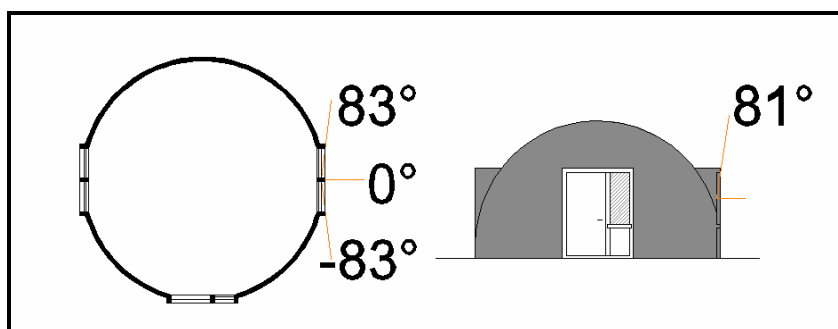
- Ramen



Zonafscherming van noordelijk glas

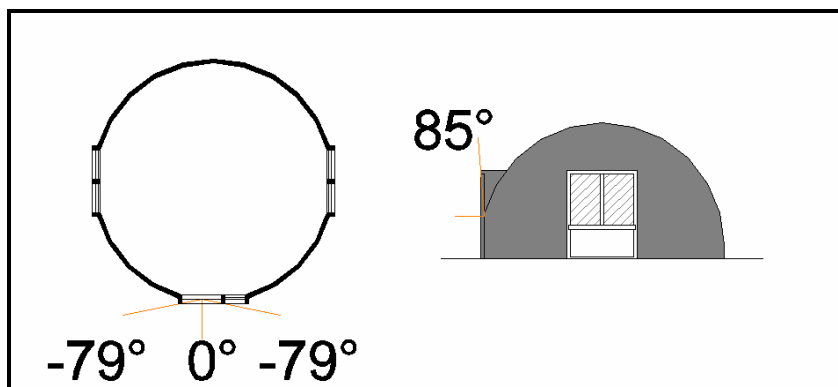


Zonafscherming van oostelijk glas



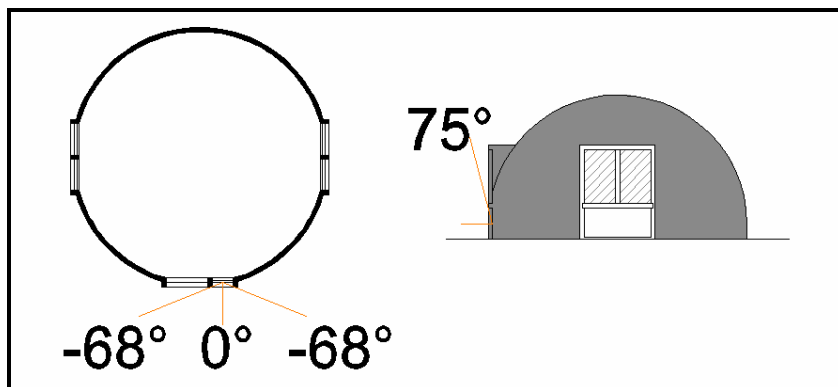
Zonafscherming van westelijk glas

- Deur

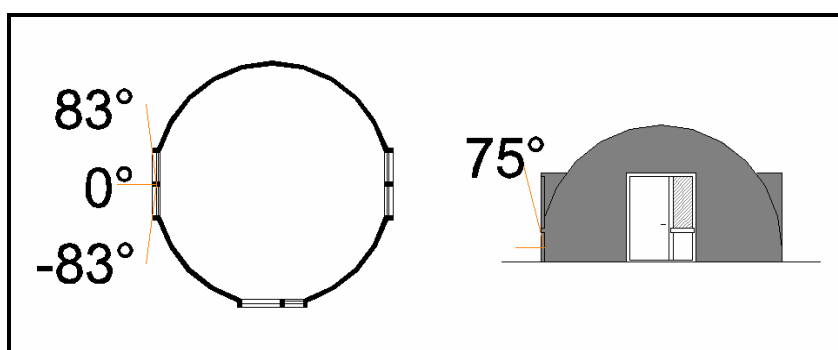


Zonafscherming van noordelijke deur

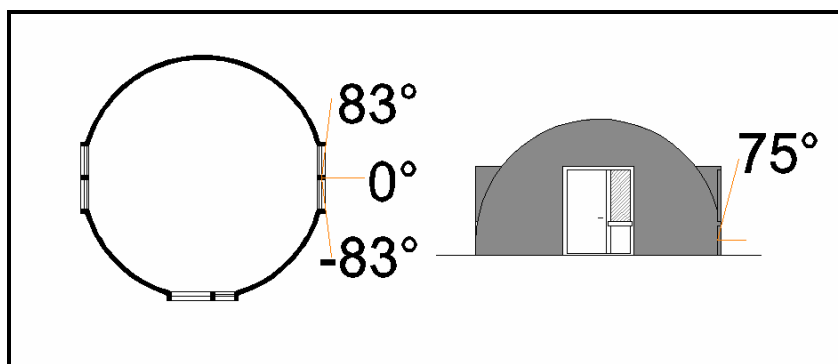
- Rechte muurdelen



Zonafscherming van noordelijk recht muurdeel



Zonafscherming van oostelijk recht muurdeel



Zonafscherming van westelijk recht muurdeel

**APPENDIX G:
WAARDEN EN BEPALING
ZONAFSCHERMING CONVENTIONELE
WONING**

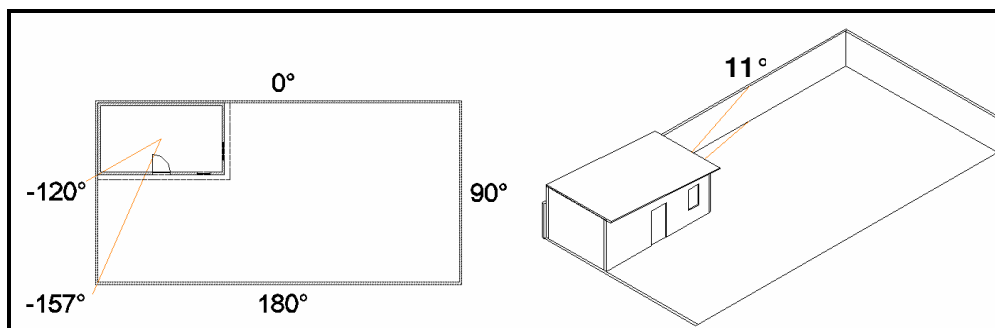
- Zonafscherming van het hele gebouw

Waarden voor de zonafschermingsparameters in El Alto

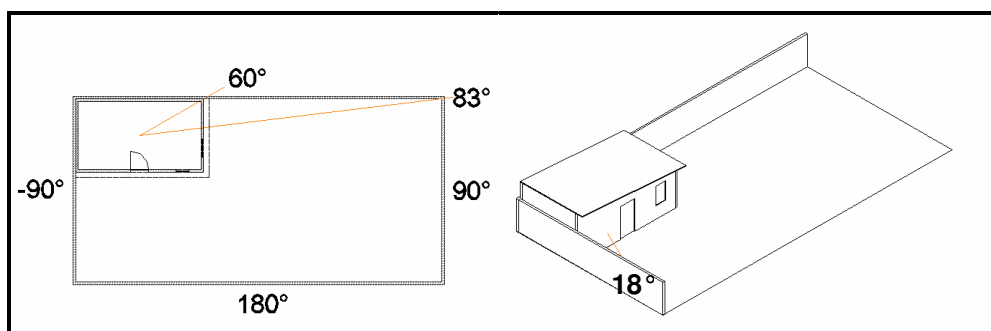
afschermingobject	min azimut [°]	max azimut [°]	min hoogte [°]	max hoogte [°]
globaal	-180	180	0	5
muur O	-157	-120	0	11
muur Z	60	83	0	18
muur W	-156	116	0	18
muur N	83	116	0	9

Voor de afscherming door de perceelsmuren is de afstand voor het bepalen van de afschermingshoogte de gemiddelde afstand genomen van de woning tot het obstakel. De onderstaande figuren geven de methode weer waarop de zonafschermingsparameters zijn bepaald.

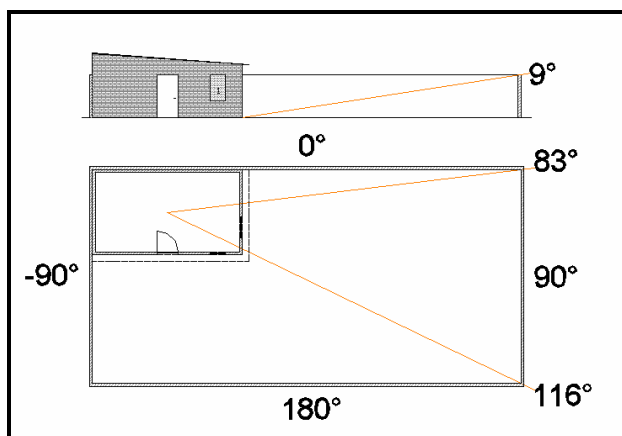
- Door muren



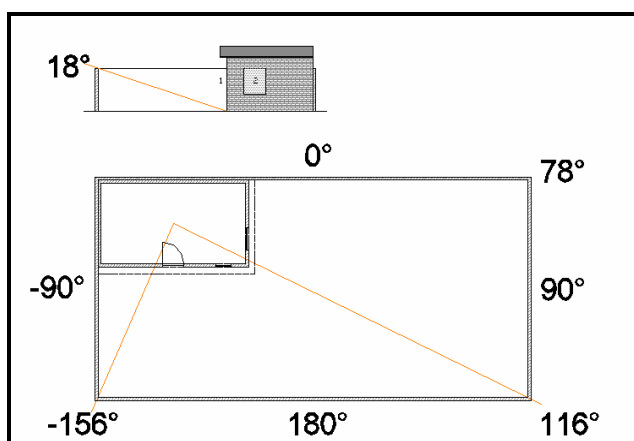
Zonafscherming door de oostelijke perceelsmuur



Zonafscherming door de zuidelijke perceelsmuur



Zonafscherming door de westelijke perceelsmuur



Zonafscherming door de noordelijke perceelsmuur

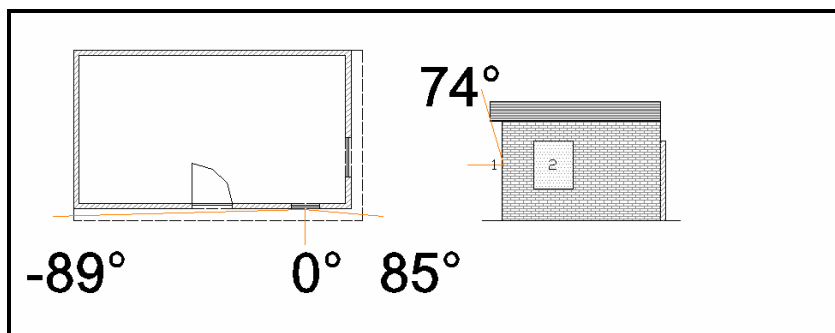
- Zonafscherming van wanden

Waarden voor de zonafschermingsparameters van de wanden

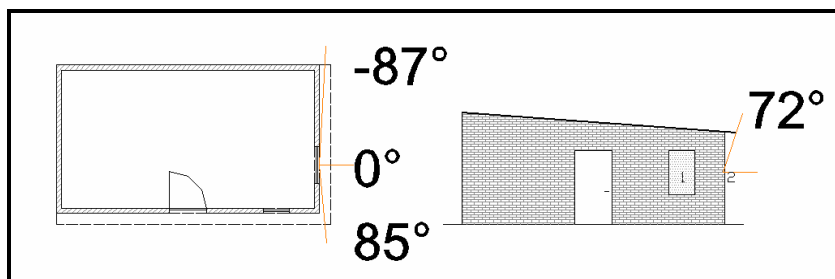
wandnaam	min azimut [°]	max azimut [°]	min hoogte [°]	max hoogte [°]
glas N	-89	85	0	74
glas W	-87	85	0	72
deur N	-88	88	0	79

De onderstaande figuren geven de manier weer waarop de zonafschermingsparameters voor de luifels bepaald zijn.

- Ramen

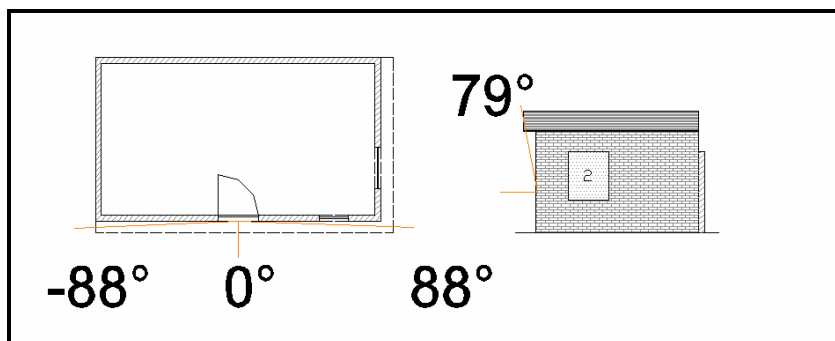


Zonafscherming van noordelijk glas



Zonafscherming van westelijk glas

- Deur



Zonafscherming van noordelijke deur

APPENDIX H:

INVOERGEGEVENS IN CAPSOL REFERENTIEMODEL

3. grond	0	-	-	0	-	-	-
----------	---	---	---	---	---	---	---

<header>
Index
Name
Dynamic calc., ro*c [kg/m³]
Dynamic calc., temp. [°C]
Dynamic calc., infrared rad. [W/m²]
Dynamic calc., free heat [W]

1. buiten	1200T01	I01	-				
2. binnen	1200	-	-	P02			
3. grond	1200	T02	-	-			

----- SOLAR ZONE PARAMETERS -----

Reference to Global horizontal solar radiation: G01
Reference to Diffuse horizontal solar radiation: D01
Reference to Beam horizontal solar radiation: B01
Ground reflection factor: 0.2
Diffuse solar model: MUNEER
Latitude: -
Longitude: -
Solar time zone: 1

----- ZONE VENTILATION -----

<header>
Zone name (source)
buiten
binnen
grond

buiten	-	V01	-
binnen	100	-	0
grond	-	V00	-

----- WALLS -----

<header>
Wall index
Name
Type
Surface [m²]
Orientation [°]
Slope [°]

1. muur N	betonnen muur	1.18	180	69.06
2. muur NO	betonnen muur	5.42	-135	69.06
3. muur O	betonnen muur	1.18	-90	69.06
4. muur ZO	betonnen muur	5.42	-45	69.06
5. muur Z	betonnen muur	5.42	0	69.06
6. muur ZW	betonnen muur	5.42	45	69.06
7. muur W	betonnen muur	1.18	90	69.06
8. muur NW	betonnen muur	5.42	135	69.06
9. dak N	betonnen muur	2.12	180	24.15
10. dak NO	betonnen muur	2.12	-135	24.15
11. dak O	betonnen muur	2.12	-90	24.15
12. dak ZO	betonnen muur	2.12	-45	24.15
13. dak Z	betonnen muur	2.12	0	24.15
14. dak ZW	betonnen muur	2.12	45	24.15
15. dak W	betonnen muur	2.12	90	24.15
16. dak NW	betonnen muur	2.12	135	24.15
17. binnenmuur 1	leem met pleister	13.1	0	90
18. binnenmuur 2	leem met pleister	10.52	0	90
19. binnenmuur 3	leem met pleister	1.74	0	90
20. vloer	betonnen vloer+grond	30.99	0	90
21. glas N	enkel glas	0.65	180	90
22. glas O	enkel glas	2.08	-90	90
23. glas W	enkel glas	2.08	90	90
24. deur N	deur	2.1	180	90
25. driehoek N	betonnen muur	1.85	180	90
26. driehoek O	betonnen muur	0.93	-90	90
27. driehoek W	betonnen muur	0.93	90	90

28. driehoek Z	betonnen muur	1.85	0	90	
29. recht N	betonnen muur	1.22	180	90	
30. recht O	betonnen muur	1.88	-90	90	
31. recht W	betonnen muur	1.88	90	90	
32. bovenzijde	betonnen muur	4.55	0	0	

```

<header>
Wall index
Zone side 1
hg side 1 [W/m²K]
Sun reception side 1 [%]
Zone side 2
hg side 2 [W/m²K]
Sun reception side 2 [%]

```

1. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
2. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
3. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
4. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
5. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
6. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
7. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
8. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
9. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
10. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
11. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
12. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
13. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
14. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
15. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
16. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
17. binnen	253.5	0	*ADIAB*	0	3	0	
18. binnen	253.5	0	*ADIAB*	0	3	0	
19. binnen	253.5	0	*ADIAB*	0	3	0	
20. grond	9993	0	binnen	7.7	3.5	80	
21. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
22. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
23. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
24. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
25. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
26. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
27. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
28. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
29. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
30. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
31. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	
32. buiten	233	0	binnen	7.7	3.5	0	

----- WALLTYPES -----

```

<header1>
Layer index
Name
Type
Pattern number
Thickness [m]
Thermal conductivity [W/mK]
Thermal resistance [m²K/W]
Density [kg/m³]
Specific heat [J/kgK]

```

```

<header2>
Layer index
Nusselt number [-]
Black body radiation coefficient [W/m²K]
Short wave transmissivity [-]
Long wave emission factor on side 1 [-]
Short wave reflection factor on side 1 [-]
Short wave absorption factor on side 1 [-]
Long wave emission factor on side 2 [-]
Short wave reflection factor on side 2 [-]
Short wave absorption factor on side 2 [-]

```

```

<header3>
Angular reflection angle [°]

```


Angular reflection in percent [%]
Angular reflection coefficient [-]

<header4>
Obstacle index
Azi-min [°]
Azi-max [°]
Alt-min [°]
Alt-max [°]

betonnen muur

<header1>

1. beton	NORMAL	340.100	2.200	0.045	2500.0	840
----------	--------	---------	-------	-------	--------	-----

<header2>

1.	-	-	0.0	0.88	0.35	-0.23	0.88	0.75	-0.63
----	---	---	-----	------	------	-------	------	------	-------

<header3>

0.00	0.00	0.35
15.00	0.00	0.35
30.00	0.00	0.35
45.00	0.00	0.35
60.00	0.00	0.35
75.00	0.00	0.35
90.00	0.00	0.35

leem met pleister

<header1>

1. pleister	NORMAL	189	0.010	0.520	0.019	1300.0	840
2. leem	NORMAL	126	0.045	1.130	0.040	2200.0	1000

<header2>

1.	-	-	0.0	0.90	0.79	-0.69	0.00	0.00	1.00
2.	-	-	0.0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00

<header3>

0.00	0.00	0.79
15.00	0.00	0.79
30.00	0.00	0.79
45.00	0.00	0.79
60.00	0.00	0.79
75.00	0.00	0.79
90.00	0.00	0.79

vloer+grond

<header1>

1. grond	NORMAL	1 3.000	1.130	2.655	2200.0	1000
2. beton	NORMAL	340.150	2.200	0.068	2500.0	840

<header2>

1.	-	-	0.0	0.90	0.17	-0.07	0.00	0.00	1.00
2.	-	-	0.0	0.00	0.00	1.00	0.88	0.35	-0.23

<header3>

0.00	0.00	0.17
15.00	0.00	0.17
30.00	0.00	0.17
45.00	0.00	0.17
60.00	0.00	0.17
75.00	0.00	0.17
90.00	0.00	0.17

enkel glas

<header1>

1. glas	NORMAL	2 0.004	0.800	0.005	2500.0	840
---------	--------	---------	-------	-------	--------	-----

<header2>

1.	-	-	0.8	0.94	0.05	0.01	0.94	0.05	0.01
----	---	---	-----	------	------	------	------	------	------

<header3>

[illegible]

glas N 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.8 1.2 35.3 - 1.3 1.3 1.3 1.1 0.6 0.6 1.1
 0.7 1.1 1.1 2.8
 glas O 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.9 1.2 35.5 0.4 - 1.3 1.3 1.1 0.6 0.6 1.1
 0.7 1.2 1.2 2.8
 glas W 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.9 1.2 35.5 0.4 1.3 - 1.3 1.1 0.6 0.6 1.1
 0.7 1.2 1.2 2.8
 deur N 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.9 1.2 35.5 0.4 1.3 1.3 - 1.1 0.6 0.6 1.1
 0.7 1.2 1.2 2.8
 driehoek N 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.9 1.2 35.5 0.4 1.3 1.3 1.3 - 0.6 0.6
 1.1 0.7 1.2 1.2 2.8
 driehoek O 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.8 1.2 35.3 0.4 1.3 1.3 1.3 1.1 - 0.6
 1.1 0.7 1.1 1.1 2.8
 driehoek W 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.8 1.2 35.3 0.4 1.3 1.3 1.3 1.1 0.6 -
 1.1 0.7 1.1 1.1 2.8
 driehoek Z 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.9 1.2 35.5 0.4 1.3 1.3 1.3 1.1 0.6 0.6
 - 0.7 1.2 1.2 2.8
 recht N 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.8 1.2 35.4 0.4 1.3 1.3 1.3 1.1 0.6 0.6
 1.1 - 1.1 1.1 2.8
 recht O 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.9 1.2 35.5 0.4 1.3 1.3 1.3 1.1 0.6 0.6
 1.1 0.7 - 1.2 2.8
 recht W 0.8 3.8 0.8 3.8 3.8 3.8 0.8 3.8 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 10.1 7.9 1.2 35.5 0.4 1.3 1.3 1.3 1.1 0.6 0.6
 1.1 0.7 1.2 - 2.8
 bovenvlakken 0.8 3.9 0.8 3.9 3.9 3.9 0.8 3.9 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 10.3 8.0 1.2 36.1 0.4 1.3 1.3 1.3 1.2 0.6
 0.6 1.2 0.8 1.2 1.2 -

----- POINTS -----

<header>

Point number

Name

Type

Zone name (in zone)

Type (in zone)

Wall name (in wall)

Interface names (in wall)

1. binnen	ZONE	grond	COMFORT	-	-
2. buiten	ZONE	binnen	FLUID	-	-
3. vloer	WALL	-	-	vloer	beton-Side 2

----- POINT VIEWFACTORS -----

1. binnen

muur N	muur NO	muur O	muur ZO
0.9	4.3	0.9	4.3
muur Z	muur ZW	muur W	muur NW
4.3	4.3	0.9	4.3
dak N	dak NO	dak O	dak ZO
1.7	1.7	1.7	1.7
dak Z	dak ZW	dak W	dak NW
1.7	1.7	1.7	1.7
binnenmuur 1	binnenmuur 2	binnenmuur 3	vloer
10.4	8.4	1.4	24.6
glas N	glas O	glas W	deur N
0.5	1.7	1.7	1.7
driehoek N	driehoek O	driehoek W	driehoek Z
1.5	0.7	0.7	1.5
recht N	recht O	recht W	bovenvlakken
1.0	1.5	1.5	3.6

----- CONTROLS -----

<header>

Control index

Sensor point name

Target temperature function reference

Up sensitivity [°C]

Down sensitivity [°C]

Purpose

t min ON [min]

t min OFF [min]

1. binnen T03 1.0 1.0 COOLING 0 0

<header>

Control index

Control type

In point

Injected power [W]

Time constant [min]

In wall

Control walltype

<header>

Control index

Ventilation rate [m³/h]

ON/OFF

Required temperature difference between source & destination zone

Destination (control) zone

1. 223.3 ON 0.0 buiten

<header>

Control index

Ventilation path (zone indexes)

1 1->2->1

----- ALPHANUMERIC REPORT DEFINITIONS -----

<header>

Report item

Report type

Report location 1

Report location 2

Function type

Function parameter

1. t[°C] binnen - mean -

<header> {

Report item

Frequency

Frequency parameter

Scope start [h]

Scope end [h]

Scope start [day]

Scope end [day]

Format (width-precision)

Separator

ON/OFF

}

1. hour - 0 24 1 7 6-1 nihil 1