‘Entering RDM’

Rapport van het afstudeerproject op RDM Centraal station

Afstudeerlabs: Architectural Engineering & Building Technology
Mentoren: Jan Engels
Arjan van Timmeren
Student: Wouter Bak
1342533

Inhoudsopgave

Glossarium 4
Deel I 4
Deel II 4
Deel III 4
Deel I 5
1. Architectuur 5
1.1 Opdrachtomschrijving 5
1.1.1 Achtergrond 5
1.1.2 Ontwerpvraagstukken 9
1.1.3 Het ontwerp 9
1.1.4 Ontwerp uitgangspunten 10
1.1.5 Onderzoeken 11
1.2. Entering RDM 12
1.2.1 Stedenbouwkundige locatie 12
1.3. Architectonisch ontwerp 14
1.3.1 Eerste concept 15
1.3.2 Tweede concept 16
1.3.3 Functionele indeling 19
1.3.4 Structurele indeling 23
1.3.5 Gevels 31
1.3.5.1 Uitstraling en systematiek 31
Deel II 38
2. Onderzoek energie 38
2.1 Trias energetica 38
2.1.1 Reduceren van de vraag; passieve maatregelen 38
2.1.2 Duurzaam opwekken; actieve maatregelen 41
2.2 Energieconcept 45
2.2.1 Klimaatconcept 45
2.2.2 Samenhang maatregelen 46
2.2.3 Energieberekeningen 47
Deel III 52
3. Onderzoek bamboe 52

3.1 Onderzoek; inhoud en doel 52
3.2 Wat is bamboe? 53
3.3 Mechanische eigenschappen 57
3.4 Bamboe stammen 58
3.4.1 Vorm van de constructie 59
3.5 Bestaande verbindingen 64
3.5.1 Onderzoeksmethode: Verbindingen in categorieën 64
3.5.2 Categorie 1. 67
3.5.3 Categorie 2. 70
3.5.4 Categorie 3. 76
3.5.5 Categorie 4. 76
3.5.6 Categorie 5. 78
3.5.7 Categorie 6. 82
3.5.8 Categorie 7. 84
3.5.9 Categorie 8. 84
3.5.10 Algemene conclusie verbindingen in het ontwerp van de serres 85
3.6 Ontwikkeling nieuwe verbindingen 86
3.6.1 Nader onderzoek verbindingen categorie 2 en 6 86
3.6.2 Nader onderzoek hulpstukken verschillende richtingen en andere materialen 89
3.7 Conclusies onderzoek verbindingen 97
4. Bronnen 100
4.1 Boeken 100
4.2 Dissertaties en (afstudeer)rapporten 100
5. Bijlagen 101
5.1 Bijlage 1: Tekeningen 101
5.2 Bijlage 2: Lenotec produktinformatie 116
5.3 Bijlage 3: Finnjoist produktinformatie 118
5.4 Bijlage 4: Gebrand hout produktinformatie 120
5.5 Bijlage 5: Maastoren klimaatconcept 124
5.6 Bijlage 6: Warmtekrachtkoppeling produktinformatie 125
5.7 Bijlage 7: Berekeningen EPW en EPU resultaten 129
5.8 Bijlage 8: Constructieberekening bamboe bogen 132
5.9 Bijlage 9: Bamboe Composieten 133

Glossarium

De verklarende woordenlijst die de woorden verklaard die in dit verslag belangrijk zijn en in de context van het verslag wellichteen andere betekenis hebben dan wordt aangenomen.

Deel I

Duurzaam(heid): Voorzien in behoefte van het heden zonder het vermogen van toekomstige generaties om in hun behoeften te voorzien in gevaar te brengen (Brundtland, 1987).
Specifieker gaat het in dit project om energiehuishouding en materiaalgebruik op een duurzame manier.
Dus voorzien in de energie en materiaal behoefte van het project (heden), zonder dat de voorraad voor toekomstige generaties daarmee in gevaar komt.

Deel II

Trias energetica: De Trias energetica is een stappenplan voor duurzaamheid, specifiek voor energie. Dit stappenplan is een afgeleide van de Trias Ecologica, een stappenplan voor duurzaamheid in het algemeen.
Beide stappenplannen bestaan uit drie stappen (trias):

- Reduceren van de vraag (van bronnen)
- Duurzaam opwekken van de vraag (gebruik van oneindige bronnen)
- Slim gebruiken van enidige bronnen

(bron)

Deel III

Cyclus: De cyclus die hier wordt bedoeld is de gehele levenscyclus van de soort. Het gaat hierbij om de groei, kap en aangroei van een (planten- of boom-) soort. Hoe korter deze cyclus, hoe eerder de soort weer aan kan groeien, hoe duurzamer.

Deel I

1. Architectuur

1.1 Opdrachtomschrijving

In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op de achtergrond en stedenbouwkundige situatie van de opdracht en de omschrijving van de ontwerpopgave zoals deze is gesteld aan het begin van het traject in juni 2009.

1.1.1 Achtergrond

Een korte beschrijving van de stedenbouwkundige situatie en de doelstellingen van de Gemeente Rotterdam voor de havengebieden.

Afb. 1. Europoort Rotterdam, nieuw havengebied

Rotterdam is bezig alle havenactiviteiten te verplaatsen naar de Eerste en Tweede Maasvlakte aan de Noordzee (afbeelding 1). Dit creëert voor de Gemeente een groot stedenbouwkundig en architectonisch vraagstuk voor de ontwikkeling van oude havengebieden in de stad (afbeelding 2). Dit vraagstuk gaat gepaard met de doelstelling van Gemeente Rotterdam om voor 2025 de uitstoot van CO2 te halveren.

In de ontwikkeling van de oude havengebieden gaat het dus behalve functionele ontwikkeling van de gebieden, om deze meer onderdeel te laten zijn van de stad, ook om een duurzame ontwikkeling in de breedste zin van het woord.

Afb. 2. Wilhelminapier Rotterdam, vernieuwd oud havengebied

Dit afstudeerproject vindt plaats op de 'RDM campus', het voormalige terrein van de Rotterdamse Droogdok Maatschappij te Rotterdam. Er is een begin gemaakt met de ontwikkeling van het gebied door een aantal onderwijsinstellingen hier te huisvesten die samen met kleine bedrijven zijn gericht op de innovatie markt. De onderwijs instellingen die hier nu een plaats hebben gevonden zijn het Albeda college en de Academie van Bouwkunst Rotterdam. Zij werken nauw samen met kleine innovatieve bedrijven die ook hun plaats hebben gevonden in dit gebied.

Het gebied kenmerkt zicht door de enorme schaalgrootte en de ruige uitstraling die horen bij het industriële havengebied (afbeelding 3).

Afb. 3. Impressie plangebied

Het dorpje Heijplaat wordt volledig ingesloten door deze voormalige industrie, wat een vreemde gewaarwording geeft als men van het industriële gebied het woongebied ingaat of andersom; de enorme schaal- en functie verandering doet desillusionerend aan.

Als Architectural Engineering afstudeergroep hebben wij onze eigen visie geprojecteerd op het gebied, de RDM campus, het dorpje Heijplaat en het Quarantaine eiland, en met die visie een stedenbouwkundig plan gepresenteerd waarbinnen iedereen een functie heeft gekozen om daar een gebouw voor vorm te gaan geven. De functie die onderwerp is van deze opdracht is het zogenaamde 'RDM centraal', het centrale overstappunt van het gebied, op de kaart (volgende pagina) aangegeven met 1.

Na een analyse van het gebied te hebben gemaakt zijn de volgende uitgangspunten gesteld voor het masterplan:

- RDM is een satelliet gebied: verbonden met de stad maar met een eigen karakter
- Wat op RDM kan, kan niet in Rotterdam Centrum (dat geldt niet voor de functies an sich, maar wel voor bijv. de doelgroep)
- Onderverdeling in functie gebieden:
    1. Quarantaine eiland – recreatie
    2. Campus – conceptueel wonen (studenten) en onderwijs
    3. Centrum –verscheidenheid aan functies
    4. Wonen & Werken
    5. Creatieve maakindustrie – innovatieve bedrijven
- Ruigheid van het bestaande gebied behouden
- Schaalgrootte per deelgebied of zelfs op gebouwniveau oplossen

Op de volgende pagina is dit Masterplan in een kaart weergegeven (afbeelding 4).

1. Transferium RDM Centraal
2. Transferium & Museum
3. Marketing instituut
4. Verwencentrum
5. Aula / Conferentie / Expositie
6. Science Centre / LAB
7. Woningen experimenteel
8. Exp. drijvende woningbouw
9. Winkelcomplex (Mall)
10. Indoor sportcomplex
11. Bibliotheek en kenniscentrum
12. Relaxcentrum
13. Sport en recreatiecomplex
14. Sport en recreatiecomplex
15. Woon en zorgcomplex gehandicapten

Afb. 4. Locatie vlekkenplan met gebouwlocaties

1.1.2 Ontwerpvraagstukken

Met het ontwerp moet een antwoord gegeven worden op de volgende vragen.

- Hoe ziet een overstappunt eruit voor het RDM terrein dat energetisch, financieel en constructief een sluitend ontwerp vormt met direct gerelateerde functies?

Deze zijn onder te verdelen in de volgende sub vragen:

- Hoe ziet een overstappunt eruit voor een gebied als het RDM terrein?
- Hoe kan een plaats worden gegeven aan de verschillende vervoersstromen auto, lightrail en veerpont, zodat deze iets betekenen voor de omliggende functies en de omgeving?
- Welke functies zijn in een overstappunt op de RDM gewenst; energetisch, functioneel aansluitend en financieel?
- Hoe kan het gebouw/ensemble energetisch worden geoptimaliseerd, gebruik makend van de verschillende vervoersstromen en de schil van het gebouw/ensemble?
- Hoe wordt de structuur vormgegeven zodat het geheel wordt ervaren als drager voor elkaar?
- Welke materialen kunnen worden gebruikt vanuit het duurzaamheid perspectief, inclusief in acht neming van hergebruik?

1.1.3 Het ontwerp

Een textuele omschrijving van de programmatische inhoud en technische uitdagingen van het ontwerp.

Het ontwerp omvat een overstappunt voor persoonlijk en openbaar vervoer met als herkenningspunt en publiekstrekkers ondersteunende business functies.
Het overstappunt biedt plaats voor lightrail en veerpont als openbaarvervoermiddelen en parkeerplaatsen voor de auto en de fiets. Daarbij bieden de gebouwen plaats voor commerciële functies, horeca, hotel faciliteiten, congres faciliteiten en office on demand. Deze functies zijn gericht op snel zakendoen en faciliteren en stimuleren dan ook allemaal de zakenwereld als zodanig.

Het geheel van dit ensemble gebouwen moet energetisch sluitend worden en energie opwekken voor het ensemble en eventueel de directe omgeving.
Niet alleen moet het gebouw/ensemble energetisch sluitend worden, het ontwerp moet ook een duurzame uitstraling krijgen, zonder dat het de snelheid van de functies ondermijnd. Het ontwerp zal gebruik maken van diverse innovatieve, passieve en actieve manieren van energie besparing

en opwekking. Hierbij moet gedacht worden aan klimaatbeheersing, licht en verlichting, materiaalgebruik en energetisch gebruik van oppervlak.
Daarnaast moet het de duurzame toekomst faciliteren en stimuleren door toepassing van nieuwe manieren van openbaar en persoonlijk vervoer en de faciliteiten die hiervoor nodig zijn.

1.1.4 Ontwerp uitgangspunten

Hier worden de voornaamste uitgangspunten voor het ontwerp kort aangestipt om het ontwerp later op te beoordelen en te evalueren. Deze uitgangspunten zijn opgesteld voordat een gedegen locatie onderzoek en stedenbouwkundig deelplan is gemaakt. De concrete uitgangspunten worden later in het rapport uitgebreid besproken.

Hoofduitgangspunt van het ontwerp richt zich op energie gebruik van de gebouwen. Het uitgangspunt is een gebouw te ontwerpen dat wat betreft energie zelfvoorzienend is, dus evenveel energie opwekt als het verbruikt.

Door het duurzame karakter van het ontwerp ligt ook in het gebruik van duurzame materialen en systemen een belangrijk uitgangspunt. Het grootste deel van deze keuzes zal de tweede helft van het project behelzen, maar ook in de eerste fase zal onderzoek worden gedaan naar materiaalgebruik en duurzame systemen.

De onderste verdiepingen van de gebouwen moet de verschillende vervoersstromen faciliteren en verbinden, betreffende lightrail, boot, auto, fietsen en mensen. Typische station functies wordt een plaats gegeven zoals kleine winkeltjes, kaartjesautomaten en informatiebalies cq loketten. Daarbij wordt ruimte gemaakt voor horeca en een lobby voor de hotelkamers. Alle functies worden door middel van de onderste verdiepingen ontsloten, deze zullen dus voornamelijk een ontsluitingsfunctie herbergen die in ieder geval deels 24 per dag toegankelijk zal moeten zijn.

De gebouwen staan op een locatie die grenst aan twee belangrijke stedenbouwkundige schalen; het dorp Heijplaat en het grootschaliger terrein van de RDM en andere voormalige havenactiviteiten die aan de kant van de stad liggen. De gebouwen zullen qua vormgeving en uitstraling aan moeten sluiten op deze twee schalen van bebouwing.

1.1.5 Onderzoeken

De belangrijkste onderzoeken worden kort beschreven zodat een overzicht ontstaat van de onderzoeken en de input van het ontwerp. De onderzoeken worden verderop in het rapport uitvoerig besproken.

1.1.5.1 "Entering RDM"

Het architectonische onderzoek in de eerste fase van het project heeft zich gericht op de stedenbouwkundige inpassing en de combinatie van de functies. Waar wordt welke functie geplaatst en hoe wordt deze gekoppeld aan het stedenbouwkundige netwerk en andere functies? In dit onderzoek is een analyse gemaakt van de directe stedenbouwkundige omgeving en de invloed van het masterplan op de locatie. Uit sit onderzoek zijn uitgangspunten gekomen voor het ontwerp.

1.1.5.2 Energie

Het bouwtechnische onderzoek in de eerste fase heeft zich gericht op de verschillende energiestromen van de functies. Hieruit moest een sluitende energie cyclus komen binnen het ensemble. Daarbij is onderzoek gedaan naar innovatieve manieren van gebouwbeheersing (klimaat, stroomvoorziening, verlichting) en duurzaam transport om te zorgen dat de energiebehoefte wordt geminimaliseerd, de energie behoefte zo veel mogelijk wordt opgewekt met niet eindige bronnen en ten slotte een duurzaam gebruik van eventuele eindige bronnen *(trias energetica)*.
De koppeling van functies is hier een belangrijk item geworden. Tijdens dit onderzoek heeft een constante wisselwerking plaatsgevonden met het architectonische onderzoek. Dit onderzoek is dus constant input geweest voor het architectonisch onderzoek en het architectonisch onderzoek op haar beurt weer input voor het bouwtechnische onderzoek.

1.1.5.3 Materiaalgebruik

Gerelateerd aan het onderzoek naar energie in de gebouwen is binnen hetzelfde onderzoeksveld gekeken naar duurzaam materiaalgebruik, met de Cradle-to-Cradle filosofie als leidende gedachte. Deze filosofie gaat uit van een wereld zonder afval, met andere woorden een wereld waarin alles wordt hergebruikt. Dit onderzoek is nauw gerelateerd aan de structuur van het gebouw, omdat voor de structuur veel materiaal nodig is. In de eerste fase van het project is voor de gebouwdelen een materiaal voor de hoofddraagconstructie bepaald. Voor sommige delen is hierbij direct gekeken naar de aansluitingen van deze materialen op elkaar en de uitstraling van de aansluitingen en afwerkingen.

1.2. Entering RDM

In dit hoofdstuk wordt een korte omschrijving gegeven van het stedenbouwkundige onderzoek en de invulling daarvan. Ook de uitgangspunten die hieruit voortkomen worden hier besproken.

1.2.1 Stedenbouwkundige locatie

Als onderdeel van het materplan is een stedenbouwkundige invulling gegeven aan de deelgebieden (afbeelding 5).

Kernpunt in dit deelgebied is het verbinden van de verschillende functies. Dit is opgelost door een verbindende route te maken die vanaf de Nieuwe Maas in het Noorden loopt naar de haveninham in het Zuiden. Deze nieuwe verbinding verbindt de drie nieuwe projecten in dit deelgebied met elkaar en de stedenbouwkundige omgeving. Dit zijn van Noord naar Zuid: RDM Centraal, het RDM kantoorgebouw en het RDM museum.

Bij het aanleggen van de verbinding is gekozen het parkeren en de hoofdontsluiting van het gebied ondergronds te leggen. Hierdoor ontstaat een nieuw verkeersvrij openbaar gebied rond de verbinding. Deze wordt deels als groenstrook en deels als verhard oppervlak (pleinen) ingevuld. De groenstrook verbindt de ingang van het gebied met het woon- en werkgebied in het Oosten. Het verharde oppervlak is verdeeld in twee pleinen, die enige schaal geven aan het enorme oppervlak en beide een andere functie vervullen.

Het meest Noordelijke plein vervult de functie van aankomstplein waar horecafuncties aan liggen. Het plein wordt aan de ene zijde begrensd door RDM centraal en het RDM kantoorgebouw en aan de andere zijde door het hoger liggende Zuidelijke plein.
Het Zuidelijke plein kan worden gebruikt voor kleine evenementen en wordt door een twee rijen grote bomen afgeschermd van de rest van het gebied. De evenementen worden gefaciliteerd door een aantal (grote) horeca functies aan dit plein. De parkeergarage wordt via het Zuidelijke plein ontsloten met het gebied.

Aan de Maaszijde van het deelgebied wordt de lightrail geplaatst. Aan deze zijde wordt het gebied ook nog ontsloten door een veerdienst naar Rotterdam Centrum. Het gebied aan de Maas kenmerkt zich door de afscheiding van het achtergebied, het dorpje Heijplaat, en de daarmee gepaard gaande schaalvergroting.
De afscheiding van het dorpje Heijplaat is een heel sterk element in de stedenbouwkundige situatie. In de invulling van het deelgebied is besloten deze afscheiding sterk te houden. Dit wordt

gedaan door de bestaande lintbebouwing, die gesloopt wordt, te vervangen door nieuwe lintbebouwing. RDM centraal zal een onderdeel worden van deze lintbebouwing.

Een ander sterk element in dit gebied is het oude directiegebouw van de RDM. In dit monumentale pand is sinds kort de Academie van Bouwkunst Rotterdam gevestigd.

Afb. 5. Nieuwe stedenbouwkundige situatie

Dit gebouw is het begin van de hierboven genoemde lintbebouwing en vormt nu het opvallendste front richting de Maas. Om het getransformeerde gebied extra aan te zetten moet het gebouw van RDM Centraal een nieuw front gaan vormen.

De uitgangspunten die volgen uit deze stedenbouwkundige situatie zijn de volgende:

- doorzetten van stedenbouwkundige lijn in de vorm van lintbebouwing
- creëren van een nieuw front voor het gebied richting de Maas
- aansluiten op de grote schaal van het deelgebied aan de Maas

1.3. Architectonisch ontwerp

Hier worden de belangrijkste architectonische keuzes besproken. Deze zijn de belangrijkste input voor het onderzoek naar de energetische cyclus. Er wordt over stedenbouwkundige inpassing, functies, energie en vormgeving geschreven.

De eerste uitgangspunten volgend uit de stedenbouwkundige analyse en invulling, hiervoor besproken, zijn:

- doorzetten van stedenbouwkundige lijn in de vorm van lintbebouwing
- creëren van een nieuw front voor het gebied richting de Maas
- aansluiten op de grote schaal van het deelgebied aan de Maas

Uit dezelfde stedenbouwkundige invulling komt de eerste functie naar voren: Horeca (aan het plein).

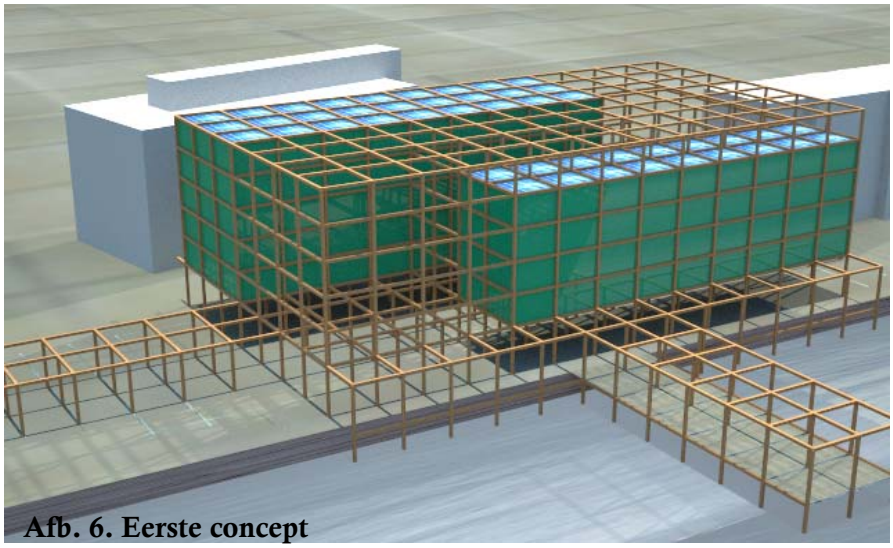
Het onderzoek naar functies gelegen aan een openbaar vervoer knooppunt heeft geresulteerd in functies die in aanmerking komen voor deze combinatie:

- hotel
- kantoor
- commerciële functies (winkels)
- congresfuncties (veelal in combinatie met hotel)
- horeca

De plaats van het gebouw aan de Maas, met een fantastisch uitzicht op de bezonde kant van de Maas en Maasoevers, is ook een mooie plek om te wonen. Hoewel woningen vaak een eindje van een openbaar vervoer knooppunt afliggen vanwege de (geluids)overlast, is het toch de moeite waard woningen in het plan op te nemen, vanwege het uitzicht. Hierbij moet dan wel aandacht besteedt worden aan het aspect overlast.

In wisselwerking met de energetische cyclus en logistiek in het gebouw zijn de functies onderverdeeld over verschillende vleugels in het gebouw.
Het hotel wordt met de woningen en aanverwante horeca in één vleugel ondergebracht, de kantoren, commerciële functies en congres functies in een andere vleugel.

Om te voldoen aan de gestelde uitgangspunten vanuit de stedenbouwkundige invulling is gekozen voor twee volumes.
Één volume sluit aan op de lintbebouwing, het andere zorgt voor een nieuw front richting de Maas.
De volumes zijn lineair van vorm, enerzijds om de lintbebouwing door te zetten en een relatie aan te gaan met elkaar, anderzijds om de lineairiteit van de functie als openbaar vervoersknooppunt aan te zetten. De lightrail is tussen de twee volumes ingelegd, waardoor deze ook een lineaire relatie krijgen. De lineaire volumes sluiten qua afmetingen aan op de schaal van de huidige bebouwing van het gebied. Door de bestaande en nieuwe afsluiting van Heijplaat van de rest van het gebied, blijft deze overgang behouden.



Afb. 6. Eerste concept

1.3.1 Eerste concept

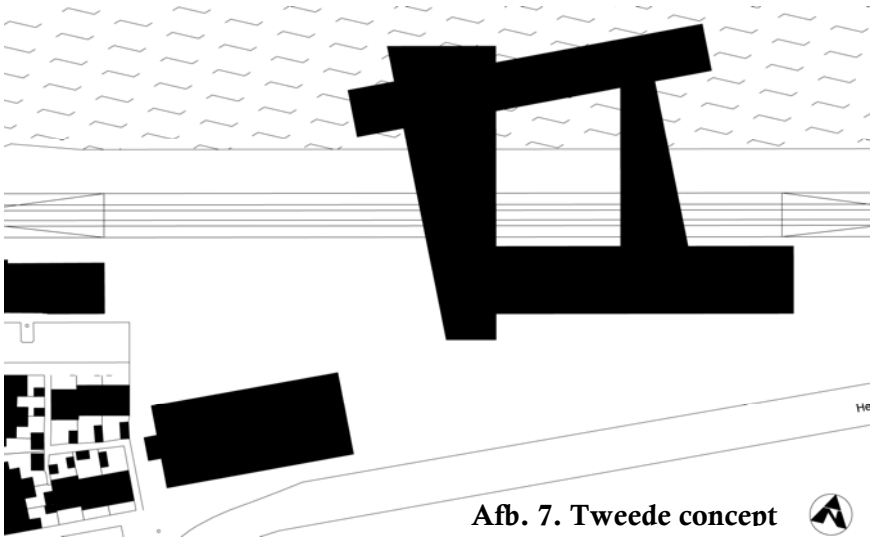
Het eerste architectonische concept (afbeelding 6) naar aanleiding van de genoemde uitgangspunten waren twee parallelle lineaire volumes die door één atrium werden verbonden. De ene vleugel was hotel en de ander kantoor en congres, zoals hierboven beschreven. Het geheel werd verbonden door een grid structuur in hout, die tevens zorgde voor de hoofddraagconstructie. Dit was de input voor een energetisch model.

1.3.1.1 Invloed overgang eerste/tweede concept

In het energetische onderzoek is gekeken naar de werking van atria en serres in combinatie met verschillende functies. Een onderzoek van Joachim Eble leidde ertoe dat is gekozen voor twee atria of serres. Hij gebruikt deze serres verschillend, namelijk één als buffer ruimte tussen binnen en buiten en één als zonneschoorsteen voor natuurlijke ventilatie van het gebouw.

Een interpretatie van het onderzoek van Eble heeft geleid tot het toepassen van een koude en warme serre. De serres staan met elkaar in verbinding waardoor ze elkaar kunnen koelen of verwarmen. Door de ventilatielucht van het gebouw door de serres te voeren wordt de lucht voorverwarmd- of gekoeld.

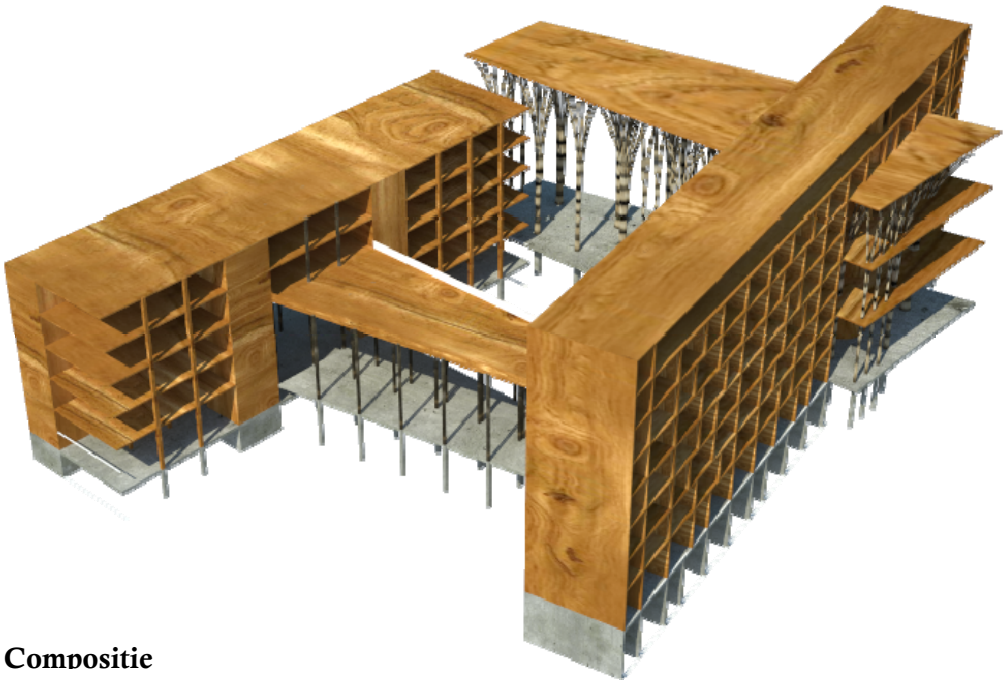
De serres dragen behalve klimatologisch, ook architectonisch functioneel bij aan het gebouw. Beide dienen als ingangszone voor de verschillende functies.



Afb. 7. Tweede concept

1.3.2 Tweede concept

Het tweede architectonische concept volgt uit bovenstaande en bestaat uit het volgende (afbeelding 7):
Twee lineaire (dichte) volumes verbonden door twee serres die elk ingangsfuncties omvatten. Één van de volumes staat op het land en zet daarmee de lintbebouwing en afsluiting van Heijplaat door. Het andere volume staat in het water en maakt daarmee het nieuwe front. Ook hier is de lightrail tussen de gebouwen geplaatst om de relatie tussen de lightrail en de gebouwen lineair aan te zetten.



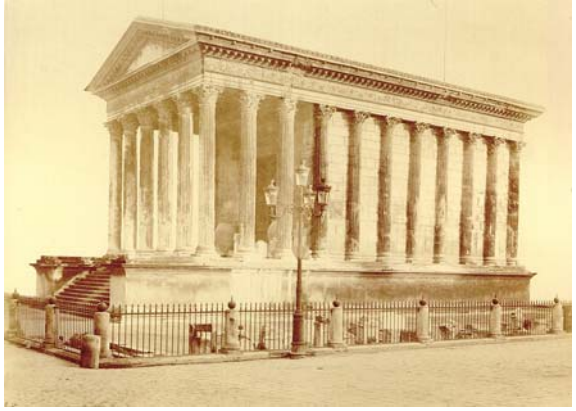
Afb. 8. Compositie

De lineaire volumes zijn geplaatst op lijnen van de directe stedenbouwkundige omgeving en maken een hoek van ongeveer 11 graden ten opzichte van elkaar. Ook de serres zijn vormgegeven op basis van deze lijnen, waardoor wigvormige volumes zijn ontstaan (afbeelding 8).
Dit concept is de basis van het plan in zijn huidige vorm.

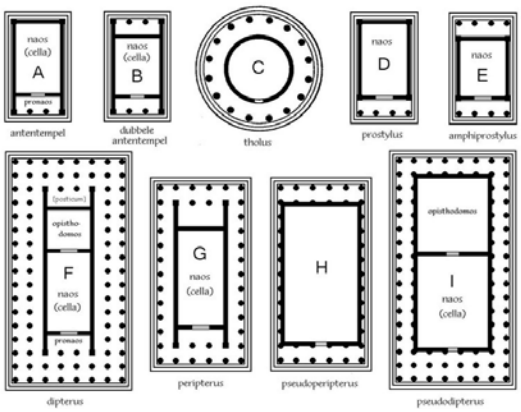
1.3.2.1 Uitgangspunten

De compositie van de vier verschillende volumes is uit de volgende uitgangspunten ontstaan:

- nieuw front = smal, hoog en lang (lineair en meest aanwezige volume)
- afsluiting gehele gebied = smal, hoog en lang
- doorzetting lintbebouwing = gelijke afmetingen als naastliggende bebouwing om de relatie te versterken
- ingeklemd volume als koude serre = aan alle zijden terughoudend ten opzichte van dichte volumes (interieure ruimte)
- doorstekend volume als warme serre = aan alle zijden los van de dichte volumes (stedenbouwkundige ruimte)
- warme serre heeft architectonische en stedenbouwkundige ruimte voor andere expressie (afbeelding 8)



Afb. 9. Maison Carré. Nimes



Afb. 10. Griekse tempels

- klassieke indeling: basis, midden, top en de gevels vrij (afbeelding 9 en 10)
- zachte, warme uitstraling contrasterend met omgeving (afbeelding 11 en 12)

Afb. 11. 4e Gymnasium, A'dam

Afb. 12. Kinderboerderij, Almere

- dynamische uitstraling dag/nacht, zomer/winter en in gebruik/niet in gebruik (afbeelding 13 en 14)

Afb. 13. Kinderboerderij, Almere

Afb. 14. Kinderdagverblijf, Uithoorn

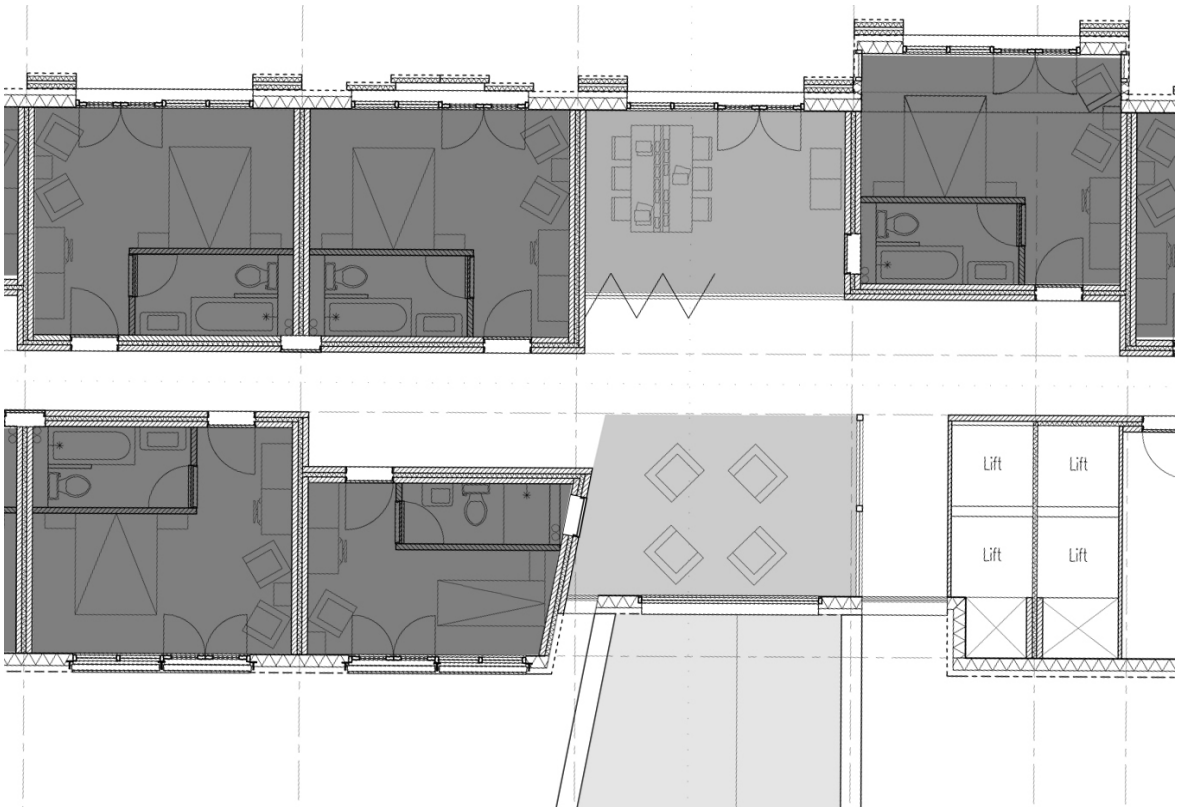
1.3.3 Functionele indeling

De functionele indeling van het gebouw is gebaseerd op de scheiding van functies, zoals eerder beschreven.
Het meest noordelijke volume behuist de hotelkamers, de woningen en aanverwante functies, het zuidelijke volume behuist de kantoor- en congres functies.

De dichte volumes zijn, zoals gezegd, opgedeeld in zones. Deze zones lopen over de lengterichting van de volumes en verdelen de volumes in verkeers- en verblijfsruimtes. (afbeelding) Omdat de verkeersruimtes minder hoogte behoeven is in die zones een verlaagd plafond aangebracht waar al het horizontale leidingwerk boven is verwerkt. Hierdoor kon met een kleinere verdiepingshoogte afgedaan worden, dus een compacter gebouw gemaakt worden.

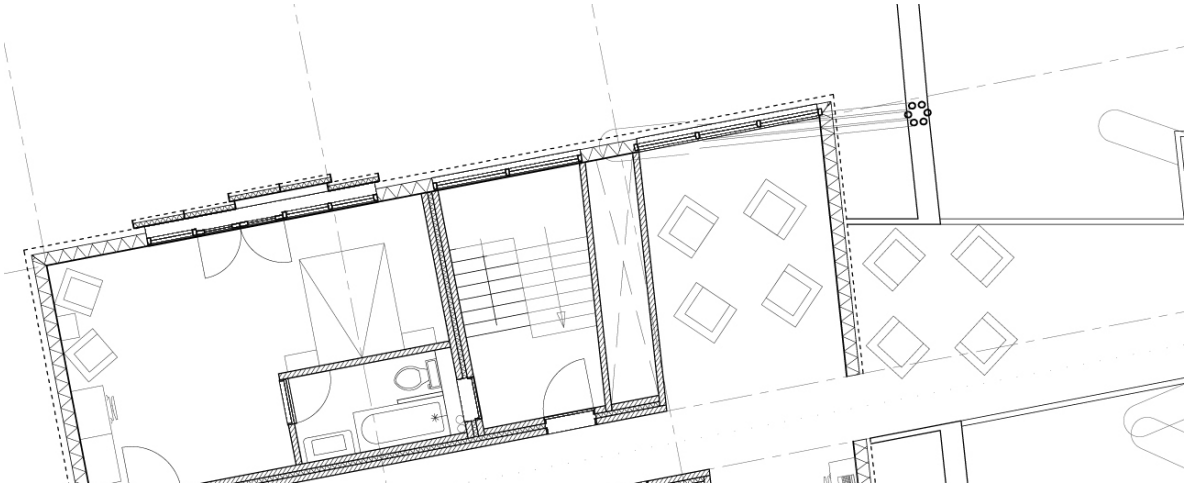
1.3.3.1 Hotel

Het hotel volume is ook verticaal in zones opgedeeld. Het onderste deel is faciliterende horeca waar de ontbijtzaal op de onderste verdieping is gelegen, vlak boven het water. Daarboven bevindt zich de lobby bar met de keuken en voorraad daarnaast. Op de eerste verdieping beginnen de kamers. Op de kopse kanten zijn 2 grote gezinskamers gesitueerd, die ook aan de zijgevels openingen hebben. Daartussen zijn 12 twee persoons kamers en 2 één persoonskamers per verdieping gemaakt.



Afb. 15. Plattegrond fragment openbaar-prive

Het hotelconcept is ook weer een opdeling in zones (afbeelding 15): de kamer is de privé zone (donkergrijs), aan de gang zijn ruimtes gemaakt waar men zich terug kan trekken in thematische ruimtes, een semi-privé zone (medium grijs), in de serres zijn ruimtes gemaakt waar zicht is op de lobby en de openbare ruimte, een semi-openbare zone (licht grijs), ten slotte zijn alle openbare functies in het gebouw uiteraard ook vanuit het hotel toegankelijk, de openbare zone (lichter grijs).

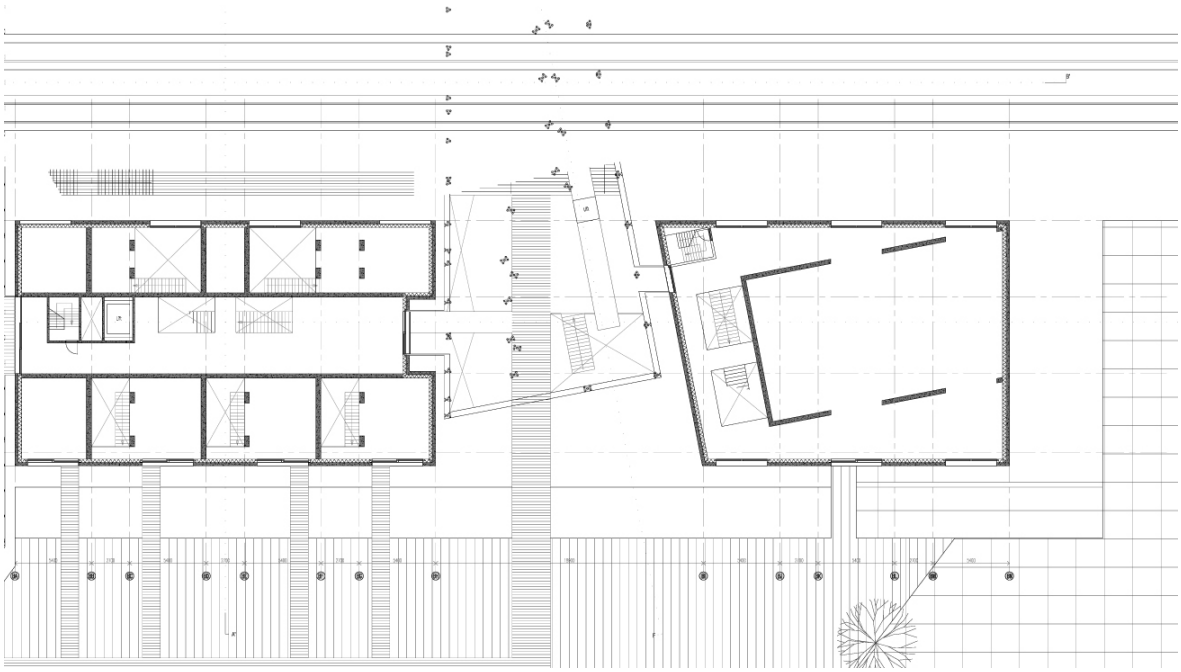


Afb. 16. Plattegrond fragment besloten ruimte

De thematische ruimtes zijn ingedeeld in thema's als lezen, werken en samenkomst en kunnen afgesloten worden van de gang.
Sommige ruimtes zijn extravert in beleving, hebben dezelfde gevelindeling als de kamers, andere ruimtes zijn juist besloten en krijgen daglicht door een grote pui waar de gevelbekleding voorlangs loopt (afbeelding 16).

1.3.3.2 Kantoor/Congres

Het kantoor- en congresvolume is behalve op verkeers- en verblijfszone, ingedeeld op hoofd functie in verdiepingen. De onderste twee verdiepingen (-1 en bg) aan de westzijde biedt ruimte voor winkels en/of horeca, die gelinkt zijn het openbaar vervoer en het voorliggende plein. De oostzijde van deze verdiepingen wordt ingenomen door de aanvoer en afvoer van hotelgoederen en de backoffice van de receptie (afbeelding 17).



Afb. 17. Plattegrond fragment BG ingang hotel

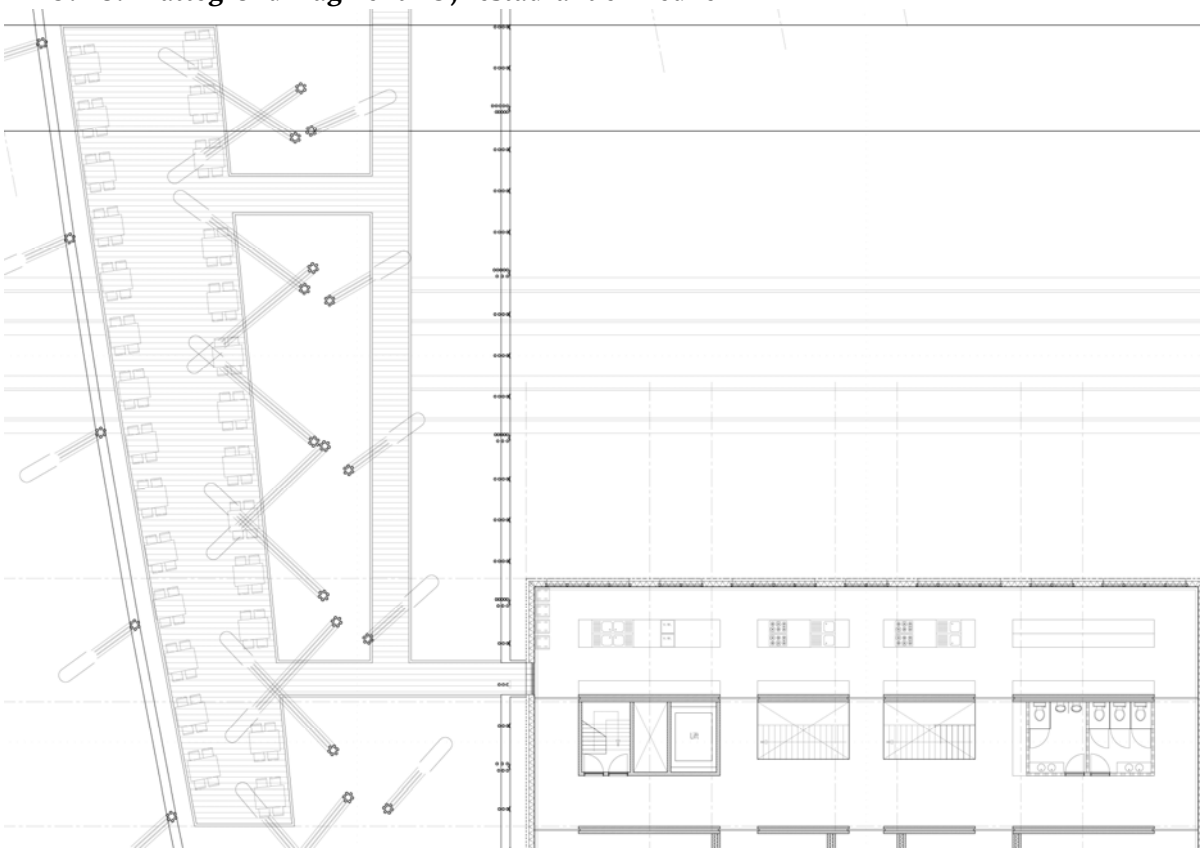
De eerste verdieping wordt geheel in beslag genomen door de ondersteunde kantoor functie. Hier wordt alle administratie voor het congres en het hotel geregeld.
De verdiepingen daarboven zijn ingedeeld in vergaderruimtes en hoorzalen, met maximale capaciteit van 108 mensen. Uitzondering hierop is de keuken van het restaurant in de warme serre die een deel van de noordwest vleugel in beslag neemt op de derde verdieping.
Op het dak is een terras aangebracht dat kan worden gebruikt door alle gebruikers van het gebouw en wat gefaciliteerd wordt door de net besproken keuken.

1.3.3.3 Serres

De serres zijn de verbindende elementen waar ook verschillende ontsluitingsfuncties in zijn opgenomen, waarbij de warme serre functioneert als ontsluiting van het openbaar vervoer en de koude serre als ontsluiting van het hotel. In de serres zijn ook verblijfsfuncties opgenomen.

In de warme serre hebben deze een openbaar karakter en zijn gelinkt aan het openbaar vervoer knooppunt. Hier bevinden zich wachtruimtes met kiosken voor de nodige versnaperingen, een restaurant dat bovenin de serre hangt als twee baldakijnen die de ruimte opdelen in de hoogte. Twee routes, eveneens uitgevoerd als baldakijnen in de hoge ruimte, leiden naar het restaurant, de keuken en de toiletten van het restaurant en een dakterras op het zuidelijke volume (afbeelding 18).

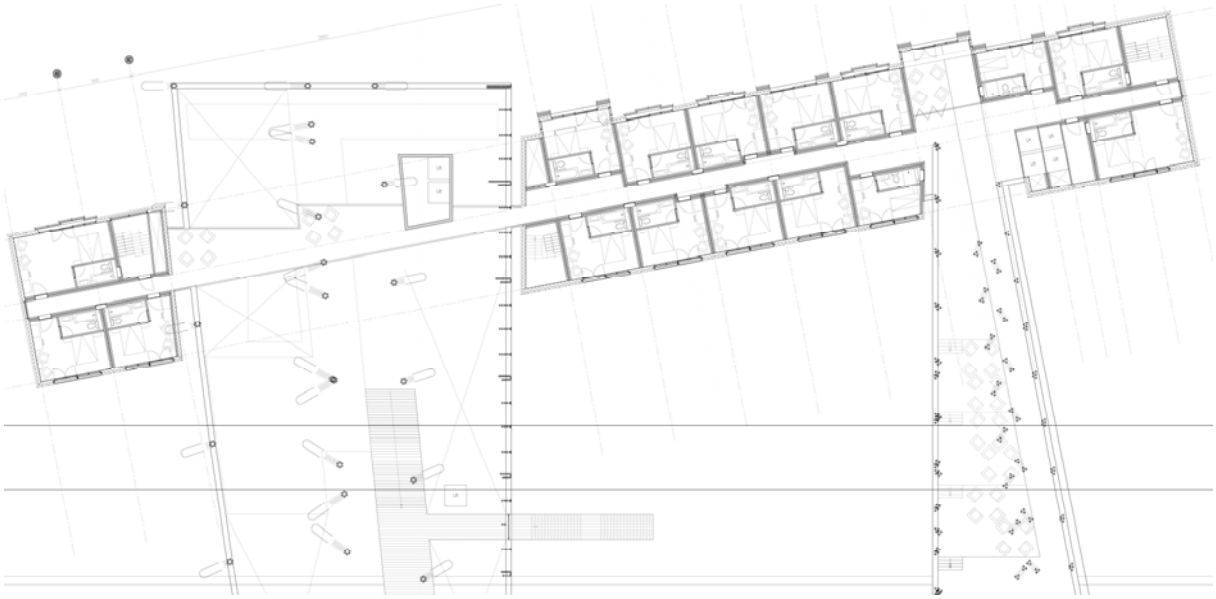
Afb. 18. Plattegrond fragment +3, restaurant en keuken



In de koude serre hebben de verblijfsruimten een meer besloten karakter en zijn gelinkt aan het hotel en de congresruimten. Bij binnenkomst in de koude serre is een receptiebalie geplaatst, die de regie bedient over alle niet-openbare functies, behalve de woningen. Vanaf dit nivo zijn alle congresfuncties ontsloten.

Een trap en lift leiden naar de overbrugging van de lightrail waar de lobby begint. Een doorgaande route leidt naar de hotelkamers. De lobby is ingedeeld in terrassen die aflopen naar de bar (afbeelding 19 en 20).

Afb. 19. Plattegrond fragment BG serres hotel



Afb. 20. Plattegrond fragment +1 serres hotel

1.3.4 Structurele indeling

De structurele indeling van de gebouwen is gebaseerd op de functies die de volumes behuizen: voor de hotel vleugel is gekozen voor een structuur op basis van de hotelkamers; voor de kantoor en congresfuncties is een structuur gekozen op basis van zone indeling van gebruiks- en verblijfsruimte en verkeersruimte. Daarbij zijn twee grote congreszalen sturend voor de structuur van het zuidoostelijke deel van het gebouw (afbeelding 22).

1.3.4.1 Natuurlijk materiaalgebruik

Uiteraard is in de structurele indeling rekening gehouden met materiaalgebruik.
Het belangrijkste uitgangspunt voor het materiaalgebruik is duurzaamheid. Het tweede, tevens belangrijke, uitgangspunt is een contrasterende relatie aangaan met de ruige stedenbouwkundige omgeving.

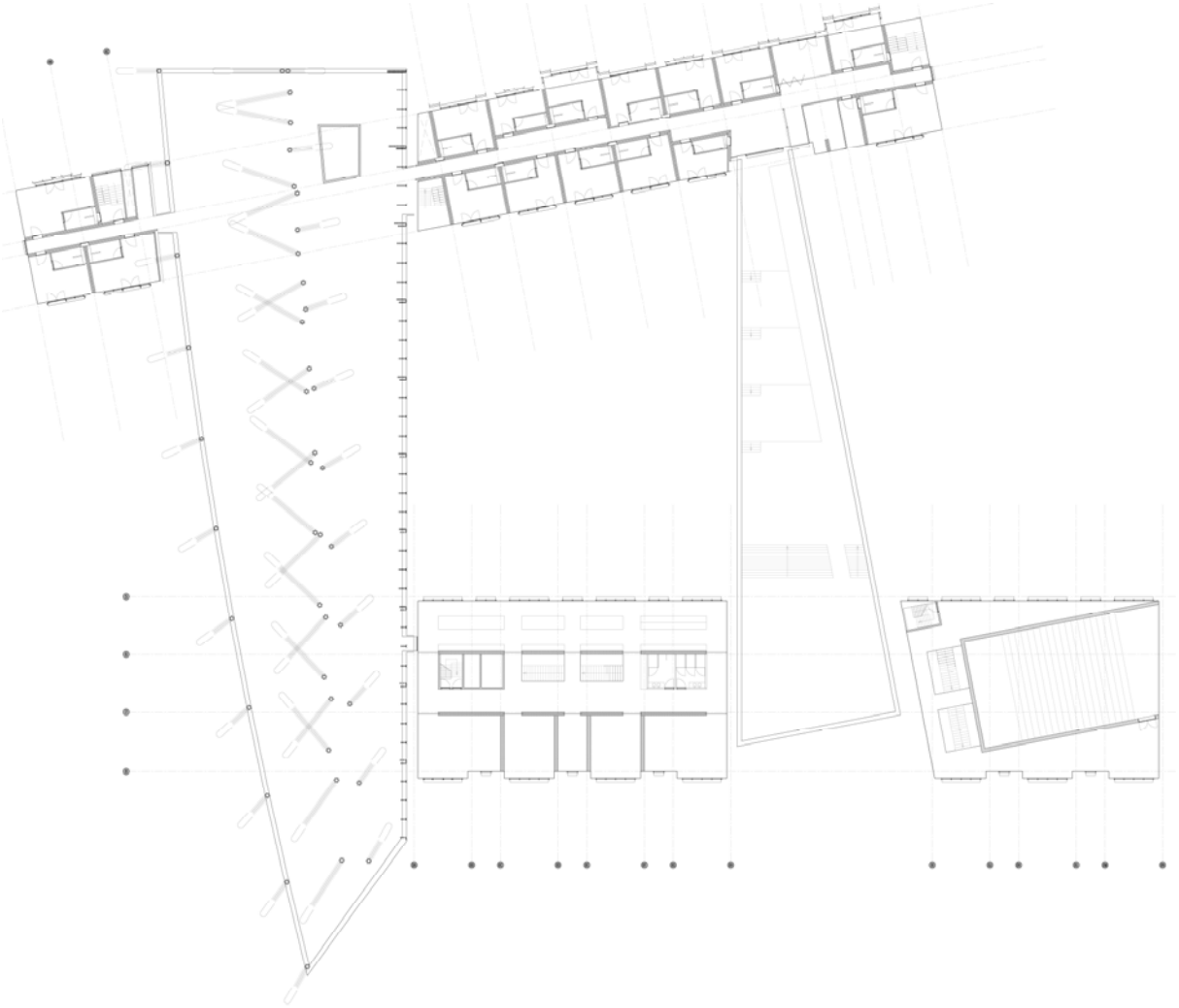
Afb. 21. Lenotec

Uit deze uitgangspunten is gekozen voor natuurlijke materialen voor alle volumes, waarbij onderscheid is gemaakt in open en dichte volumes.
De dichte volumes zijn opgetrokken uit kruislings verlijmde massief houten wanden en vloeren (Lenotec, afbeelding 21).

1.3.4.1a Hout

Lenotec is gebaseerd op vurenhout en de uitvoering op multiplex. Door de lagen kruislings te verlijmen heeft het materiaal geen specifieke richting (zoals niet gekruist hout wel heeft).

Hierdoor kan met een midere houtkwaliteit gewerkt worden en kunnen hele stabiele constructies ontworpen worden, grenzend aan hoogbouw (ca 10 lagen). Door de volumes in schijven op te bouwen, met een aantal kernen als extra stabiliserende elementen kan een hele stijve constructie worden gemaakt (afbeelding 22).

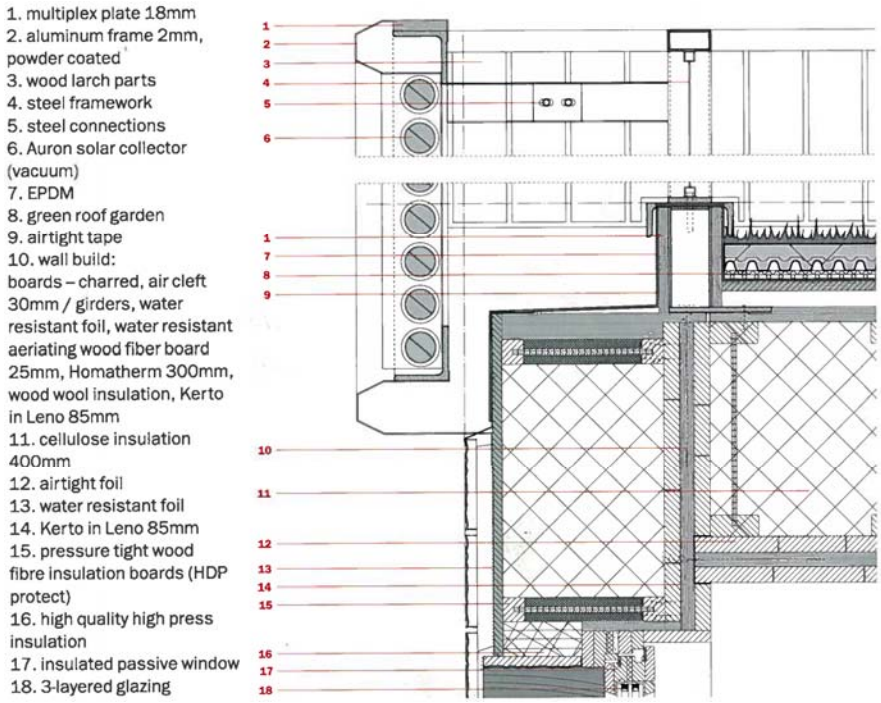


Afb. 22. plattegrond structurele indeling

(bijlage 2: Lenotec)

Ten behoeve van het minimaliseren van het energieverlies is gekeken naar een andere oplossing voor de constructie van de gevels, namelijk één die in dezelfde maat een grotere warmteweerstand heeft. Ik ben hierbij uitgekomen op een ander product van finnforrest (de nederlandse leverancier van Lenotec), namelijk Finnjoist (afbeelding 23).

Afb. 23. Finnioist elementen



Afb. 24. Dakdetail steigereiland 2.0 FARO

Finnjoist is een product dat is ontwikkeld voor het passiefhuis concept (bijlage 3).
Het is een houten I profiel dat toegepast wordt in gevels om zo ruimte te maken voor een dik isolatiepakket, zonder een koudebrug te genereren. Hierdoor is het mogelijk een Rc waarde van 6,5 te realiseren, met behoud van de geveldiepte en toch op de gevel af te kunnen dragen met de vloeren (afbeelding 24).

1.3.4.1b Bamboe

De open volumes zijn opgebouwd uit bamboe, in de vorm van bogen. In hoofdstuk ... komt uitgebreid aan bod hoe deze constructie is opgebouwd en gemaakt.

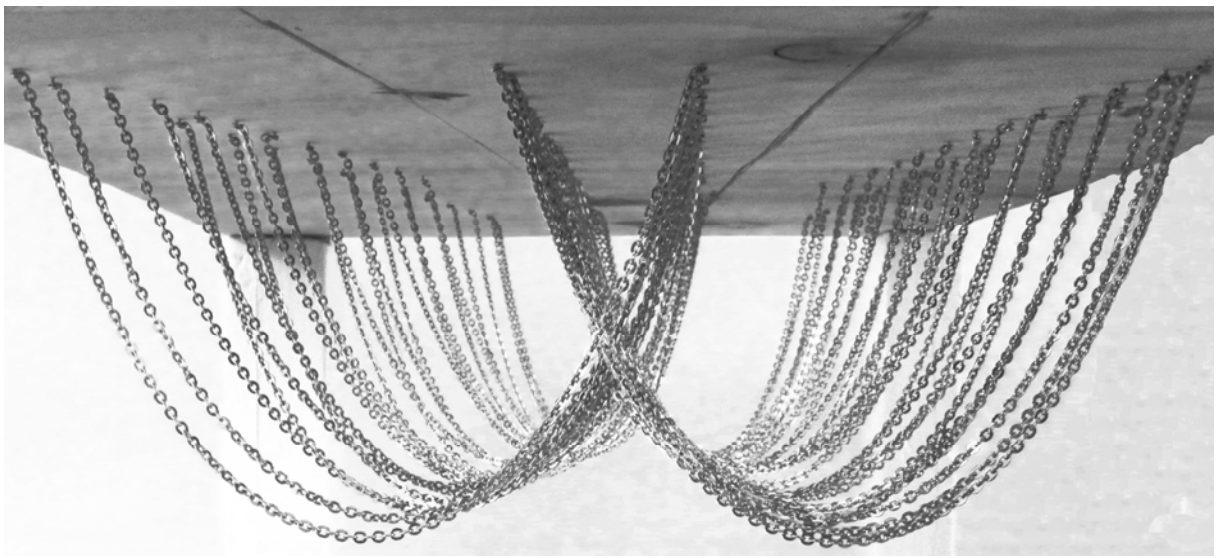
Afb. 25. Aanzicht pleinzijde

In afbeelding 25 is te zien dat de serres heel verschillend zijn in afmeting, uitvoering en indeling. De structuur van de serres zorgt al voor een deel van de klimatisering van de serres; de warme serre heeft een heel open structuur, terwijl de koude serre een dichtere structuur heeft.

Afb. 26. Interieur Notre Dame, Geneve

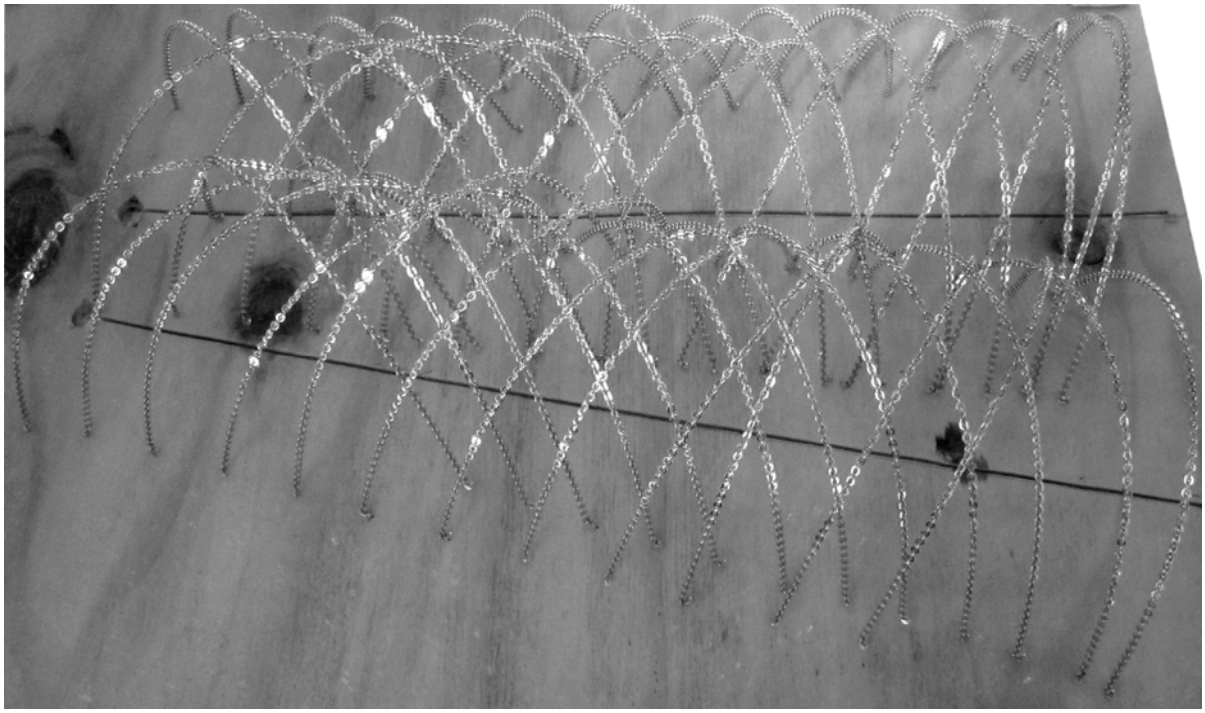
De structuur van de serres bestaat uit bogen van bamboe. Na de gedachte de constructie op te zetten met boomvormige kolommen (zie afbeelding 7), is uit de doorsnede van de serres het idee van de boogvorm gekomen. De warme serre is hierin leidend geweest met zijn smalle en hoge vorm als referentie naar de Gotiek (afbeelding 26).

Door de a-symmetriche vorm en het streven naar repeterende elementen, uit praktische overweging en uit de Gotiek, is een studie gedaan naar repeterende bogen in een wigvormige ruimte. Om de krachten zo efficënt mogelijk door de bogen af te laten dragen is teruggegrepen op de ketting techniek van Antoni Gaudi uit de laat 19e eeuw (afbeelding 27 en 28).

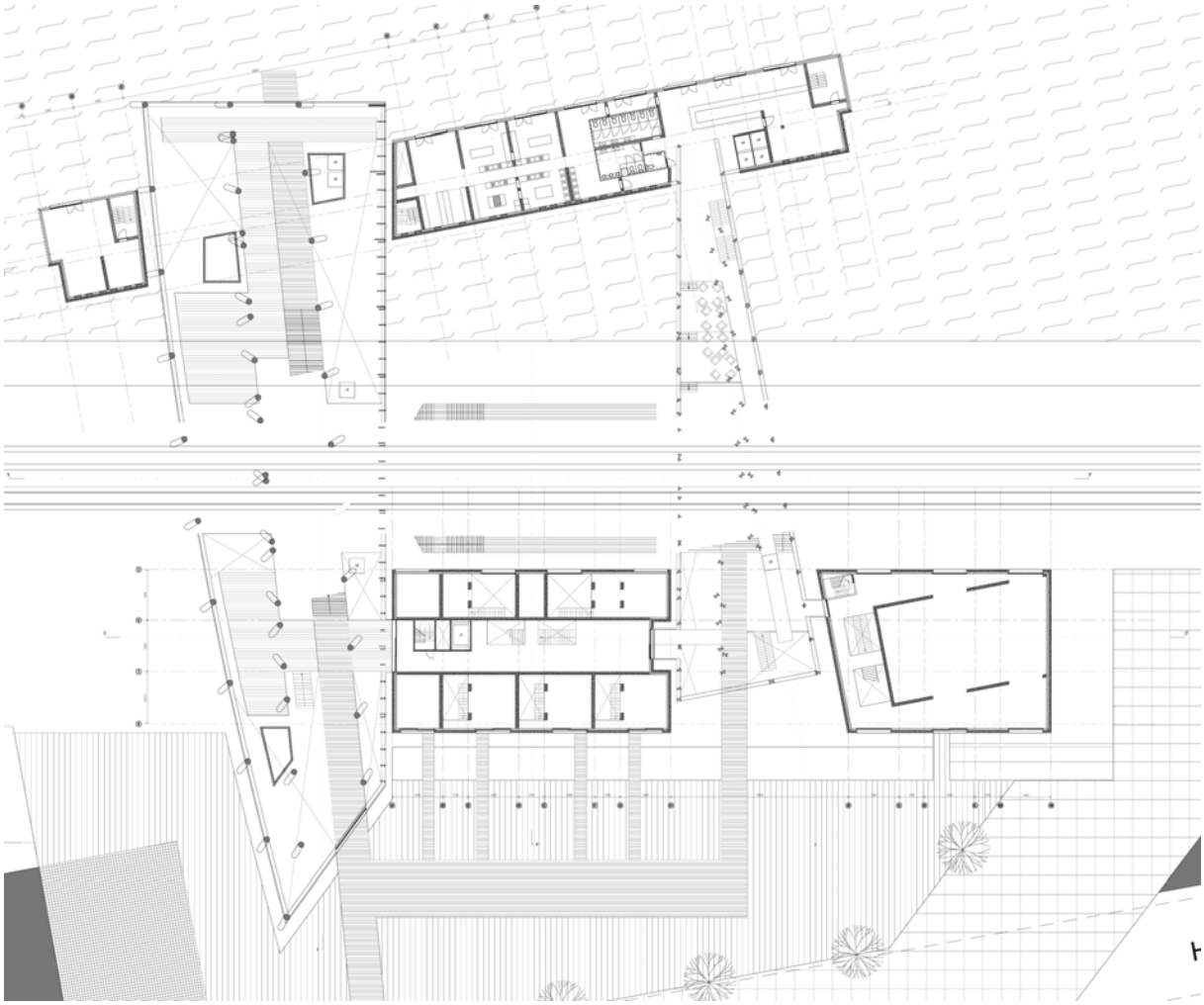


Afb. 27. Kettingmodel warme serre

Na deze studies zijn voor de warme en koude serre verschillende structuren gekozen. Beide structuren zijn gebaseerd op de grootste boog van de serre die op een vaste stramienmaat wordt uitgezet. Door de bogen een bepaalde hoek te verdraaien kunnen ze de wigvorm genereren. De hoeken tussen de bogen zijn echter allemaal verschillend.



Afb. 28. Kettingmodel warme serre



Afb. 29. Plattegrond BG

Voor de warme serre is een variant bedacht met verschillende hele en halve bogen, waarmee aan de westzijde een gebogen vorm is gemaakt om de architectonische en stedenbouwkunidge ruimte te benutten voor een andere expressie (hoofdstuk 1.3.2.1). Deze bogen landen aan weerszijden van een doorgaande route die het openbaar vervoer bedient (hoofdstuk 1.3.3.3 en afbeelding 29). Aan de Noord-, Zuid- en Oostzijde maken verticale kolommen de ruimte af.

Voor de koude serre is ook gebruik gemaakt van hele en halve bogen, deze zijn echter op dezelfde boog gebaseerd. Daarbij zijn hier in de zijgevels verticale kolommen toegevoegd om de ruimte af te sluiten en de gevel op aan te sluiten (afbeelding 29).

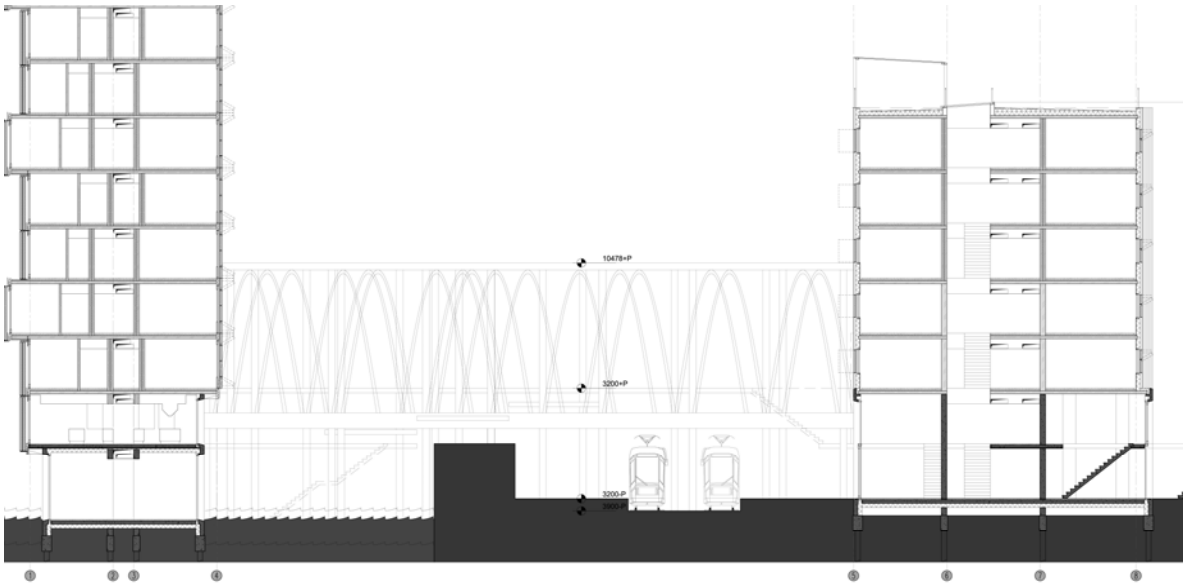
Door de vloeren in de warme serre en de grotere afstand tussen de bogen zijn de kolommen en bogen hier veel zwaarder uitgevoerd dan de kolommen en bogen in de koude serre.

Door de stammen een eindje uit elkaar te bundelen komt er licht door de kolommen en bogen, waardoor de bogen en kolommen veel slanker lijken dan ze in werkelijkheid zijn (zie afbeelding 30).

Afb. 30. Samengestelde kolom

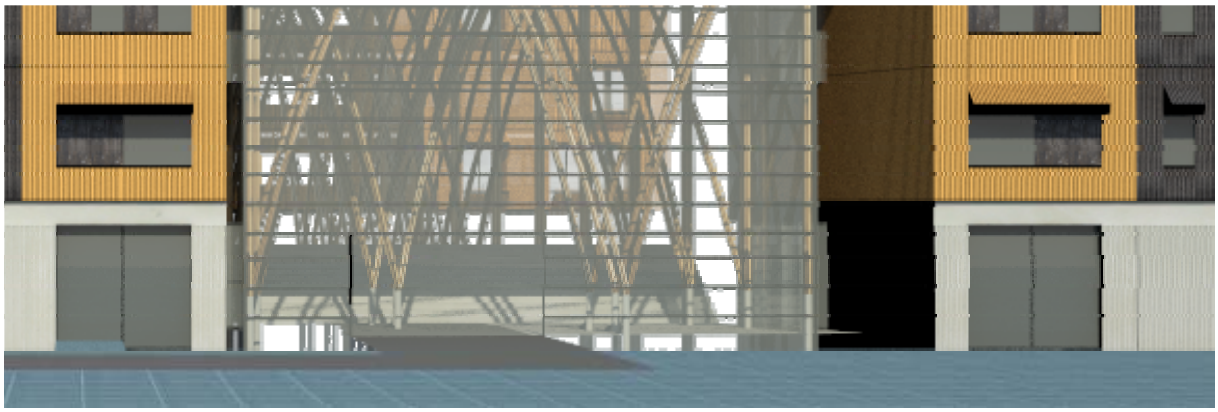
1.3.4.2 Beton

De onderste verdiepingen, dienend aan het openbaar vervoer, hebben een heel ander uitstraling dan de verdiepingen daarboven. Dit vindt zijn oorsprong in verschillende uitgangspunten.
Het eerste uitgangspunten is de klassieke opvatting van architectuur. Het gehele gebouw heeft de klassieke structuur van basis, midden en top.
Het tweede uitgangspunt is de vermijding van natuurlijke materialen in contact met (grond)water. Natuurlijke materialen zijn niet goed bestand tegen contact met (grond)water als er ook zuurstof bij kan komen, op de grens van water en lucht.
Deze twee uitgangspunten hebben geleid tot de keuze voor een betonnen basement, voor alle volumes. Daarbij is de structuur van de hoger gelegen verdiepingen overgenomen, alleen grover uitgevoerd.
De twee gesloten volumes en de warme serre hebben allen een betonnen basement van twee verdiepingen, de verdiepingen waarin zich het openbaar vervoer, commerciële functies en horeca in afspelen. Het hotel volume heeft daarbij aan de maaszijde één verdieping beton en aan de landzijde twee (zie afbeelding 31).



Afb. 31. Doorsnede dichte volumes

De koude serre, die in alle richtingen terughoudend is ten opzicht van de omgevende volumes, heeft een betonnen basement van 1½ verdieping, zodat ook het basement terughoudend is ten opzichte van de rest (zie afbeelding 32).



Afb. 32. Aanzicht fragment koude serre

1.3.5 Gevels

Hierin worden de gevels besproken met hun systematiek, uitstraling en bijdrage aan de energiehuishouding.

1.3.5.1 Uitstraling en systematiek

Uitgangspunt voor de gevel is een zachte, warme uitstraling, contrasterend met de ruige stedenbouwkundige omgeving. Ook hier is gekozen voor natuurlijk materiaal, namelijk hout. Het hout is in verticale latten aan de gevels bevestigd, om een relatie aan te gaan met het directie gebouw van de RDM, die voornamelijk verticaal geleed is.

Afb. 33. Aanzicht RDM directiegebouw

De hotelgevels bestaan uit beuken van 5,4m, gebaseerd op de beukmaat van de hotelkamers. Hier en daar is een uitzondering gemaakt, namelijk bij de aansluitingen op de serres en op de plaatsen van verticaal transport.
Voor de binnen- en buitengevels is gezocht naar een verschillende uitstraling, zonder dat echt een contrasterende, andere wereld wordt betreden. In paragraaf 1.3.5.2 wordt daar verder op ingegaan.

Voor de buitengevel van de kantoor volumes is een andere systematiek gekozen.
Uitgangspunt voor deze gevel is een aansluiting op de verticale geleding van het RDM directiegebouw, waar dit volume een voortzetting van is.

Het RDM directiegebouw heeft zowel in gevelopeningen als metselwerkpenanten een verticale geleding (afbeelding 33).

Omdat de kantoor functie zich meer leende voor een horizontale geleding, is er gekozen voor een geleding die meegaat in de metselwerkpenanten van het directiegebouw.
De gevel is verdeeld in stukken van 5,4m en 2,7m die elkaar afwisselen. De stroken van 2,7m liggen terug ten opzichte van de stroken van 5,4m en hebben een andere afwerking. De afwerking is dezelfde houtsoort, maar dan gebrand, zodat een zwart-zilveren gevelbekleding ontstaat (afbeelding 34).

Afb. 34. Fragment gebrand houten gevelbekleding

Gevelbekleding van gebrand hout is een Japanse techniek om de bekleding een hoge duurzaamheid te geven, het hout wordt namelijk waterafstotend, zonder toevoegingen aan het hout (bijlage 4).

1.3.5.2 Energie en dynamiek

In het energetisch concept is gekeken naar het zoveel mogelijk reduceren van de energetische vraag, zoals dat in stap één van de '*Trias Energetica'* gebeurt.

De eerste maatregel in het aanpakken van de gevels is een zo hoog mogelijke warmteweerstand bereiken in de dichte geveldelen. Echter in de gevelopeningen kan misschien nog wel veel meer besparing gehaald worden.
Uitgangspunt hiervoor is het uitzicht en contact met buiten vanuit, met name, de hotelkamers en toch een hoge warmteweerstand.
Tweede uitgangspunt is de dynamiek van dag en nacht, zomer en winter en in gebruik en niet in gebruik. Daarbij zijn de gevels op elke oriëntatie en met elke achterliggende functie verschillend, om de dynamische relatie tussen energieverbruik, ruimtegebruik en externe bronnen tot uiting te laten komen.
Een aantal voorbeelden hebben tot het idee geleid om door middel van luiken het energieverlies tot een minimum te beperken (afbeelding 35 en 36).

Afb. 35 Villa Röling, Kudelstaart, Paul de Ruiter

Afb. 36 Gemeentehuis Hengelo, atelier PRO

Door het gebruik van luiken hoefde geen concessies gedaan te worden aan de grootte van de gevelopeningen (ca 2/3^{e} van het geveloppervlak), terwijl een gestreefde minimale absolute opening kan worden gehaald (max. 1/4^{e} van het geveloppervlak.

De luiken op de verschillende oriëntatie van de gevels zijn ook anders uitgevoerd. Ook de achterliggende functies hebben hier een invloed op.

Afb. 37. Gevelfragment Noordgevel

De luiken in de Noordgevel van hotel volume zijn horizontaal schuivend uitgevoerd. De gevel is vrijwel vrij van zoninstraling, de luiken hoeven in open toestand dus geen zon tegen te houden, waardoor ze schuivend uitgevoerd kunnen worden (afbeelding 37).

De luiken in de Zuidgevel van de gebouwen zijn uitgevoerd als hefluiken. Door de luiken op deze manier uit te voeren, fungeren ze in geopende stand gelijk als zonwering. De hoek van de luiken

in geopende stand is zo gekozen, dat de winterzon eronderdoor schijnt en zo meewerkt aan het genereren van warmte in de winter (afbeelding 38).

Afb. 38. Gevelfragment Zuidgevel kantoorvleugel

De luiken in de gevels in de Noordgevel van het kantoor en congres volume zijn uitgevoerd als harmonikaluiken (afbeelding 39).
In de zomer zal de Noordgevel 's avonds enige ongewenste instraling hebben. Door de laagstaande zon heeft het geen zin om de luiken als zonwerende hefluiken vorm te geven. Daarom is gekozen voor de uitvoering zoals afgebeeld, zodat de laagstaande zon uit de afgebeelde hoek geweerd kan worden en zo minder koeling nodig is.

Afb. 39. Ambassade Rome, Cepezed

Bij de openingen in de Oost- en Westgevels loopt de gevelbekleding voor de openingen langs, waardoor alleen wanneer de zon haaks op de gevel staat direct zonlicht binnen kan dringen. Op alle andere tijdstippen komt er alleen difuus licht binnen. Men kan door de spleten tussen de houten latten heen naar buiten kijken, waardoor wel altijd een relatie bestaat tussen binnen en buiten. De latten op de kopgevels zijn dwars op de gevel aangebracht, zodat er meer uitzicht is en minder direct zonlicht binnen komt.

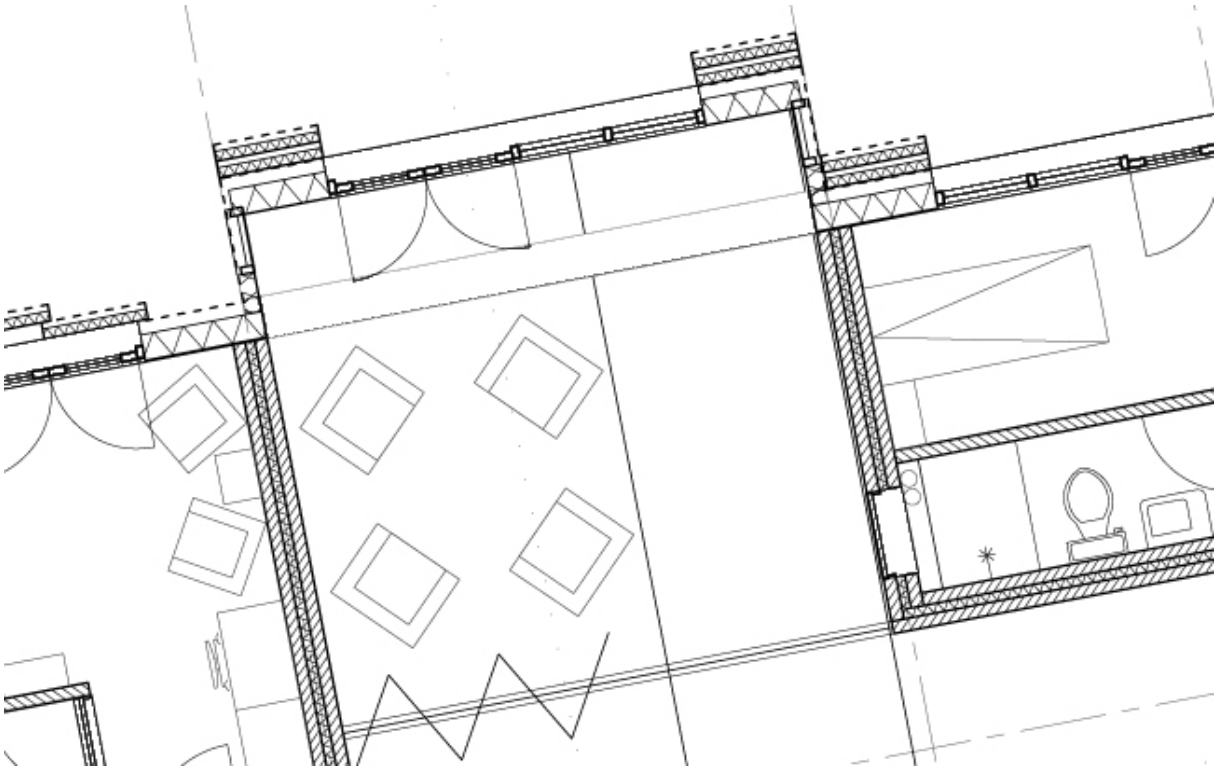
De dynamiek in de gevels komt voort uit het open of dicht staan van de luiken en heeft natuurlijk veel te maken met de afwerking daarachter. De luiken dekken alle openingen en uitzonderingen (doorvalbeveiligingen, vloerafwerkingen) in de gevel af, wat de dynamiek al versterkt.
De dynamiek wordt verder versterkt door de puien een ruige zwarte behandeling te geven. Aan de buitenzijde worden de puien namelijk afgewerkt met een verduurzaamd, fijnbezaagd vurenhout, zwart afgewerkt (afbeelding 40).

Afb. 40. Natuurbelevingscentrum De Oostvaarders, Drost + Van Veen

Afb. 41. Gevelfragment, Zuidgevel hotel

Het verschil tussen de binnen- en buitengevels van het ensemble komt naar voren in de ritmiek van de gevelbekleding. De buitenzijde is regelmatig verdeeld in latten van 60mm breed en een tussenruimte van 30mm.
De binnengevels echter hebben drie verschillende maten, 30, 60 en 90mm, die zich in een patroon van 1,8m herhalen over de gevel. Ook hier zijn de tussenruimtes 30mm (afbeelding 41).

Zoals gezegd zijn de kopgevels, maar ook de openingen in de zijkanten van de uitstekende hotelkamers (afbeelding 42), ook uitgevoerd in latten van 30*60mm, maar dan haaks op de gevel.



Afb. 42 Plattegrond fragment uitstekende ruimte

Deel II

2. Onderzoek energie

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek toegelicht. De belangrijkste input en output wordt genoemd. Van alle toegepaste maatregelen zal een berekening gemaakt worden, die hier wordt toegelicht en waar de conclusies uit worden besproken.

2.1 Trias energetica

Zoals in de opdrachtomschrijving is besproken is de aanpak gebaseerd op de methode van de *´Trias Energetica´*.
Deze houdt de volgende stappen in:

- reduceren van de vraag naar energie
- duurzaam opwekken van energie
- eventueel efficiënt gebruik van niet-duurzame bronnen

Het doel van dit onderzoek is een gebouw te ontwerpen dat aan de eerste twee stappen genoeg heeft om in zijn behoefte van energie te voorzien.
Op deze methode is nog een variant gebaseerd die de laatste stap vervangt voor een nieuwe eerste stap: het uitwisselen van energie tussen verschillende functies. In dat kader zijn de functies in het plan bij elkaar gezocht op warmte overschot en warmte vraag.
Deze *'nieuwe Trias Energetica'* ziet er dus als volgt uit:

- potentieel van uitwisseling van energie tussen verschillende functies (op lokaal nivo)
- reduceren van de vraag naar energie
- duurzaam opwekken van het resterende deel

2.1.1 Reduceren van de vraag; passieve maatregelen

Bij het reduceren van de vraag naar energie zijn een aantal *passieve maatregelen* bekeken. Deze passieve maatregelen worden hieronder kort toegelicht.

2.1.1.1 Isolatie en detaillering

De eerste stap in het reduceren van de vraag naar energie is het minimaliseren van de verliezen. Dit kan worden gedaan door een hoge isolatie waarde te geven aan de gevels (met het dak als 5^{e} gevel beschouwd).
Naast het isoleren van de dichte elementen in de gevel is een minimalisatie van de warmte doorgang via de gevelopening van een groot belang. Het toepassen van goed isolerende beglazing is de eerste maatregel om dit te bereiken.

Daarnaast moet extra aandacht worden besteed aan de aansluitingen tussen de verschillende bouwdelen, om tot een kierdichte aansluiting te komen en zo de verliezen verder te verminderen. Zoals in hoofdstuk '1.3 Architectonisch ontwerp' al is besproken wordt het minimaliseren van de verliezen versterkt door toepassing van geïsoleerde luiken. De luiken zorgen ervoor dat de gevelopeningen voor een groot deel van de dag niet de verliezen hebben van gevelopeningen, maar gelijke verliezen hebben met de dichte geveldelen.

2.1.1.2 Natuurlijke ventilatie

Door het gebouw natuurlijk te ventileren is voor de ventilatie geen energie nodig.
Daarnaast geeft natuurlijke ventilatie vaak een positief imago aan een ruimte, omdat de ventilatie direct zelf geregeld kan worden. *'Zelf een raampje openen'* is dan ook een veel gebruikte term en metafoor voor het zelf regelen van de ventilatie in een ruimte.

Nadelen van natuurlijk ventileren zijn de grote verliezen die hiermee gepaard gaan, zowel bij natuurlijke afvoer als bij natuurlijke toevoer.
Bij natuurlijke afvoer wordt het warmteverlies van de al geproduceerde warme lucht groter, bij natuurlijke toevoer wordt ook nog eens koude lucht van buiten ingevoerd die zorgt voor een extra warmtevraag.
Mechanische ventilatie echter vraagt energie voor het rondpompen van lucht, wat energie kost en een voorbehandeling van lucht, wat energie kost. Met name voor het voorbehandelen van lucht bestaan een aantal duurzame maatregelen die ik verderop in hoofdstuk 2.1.1.5 verder zal behandelen.

De oplossing balanceert ergens in het midden; mechanische ventilatie met voorbehandeling van de lucht in de winter, natuurlijke ventilatie met koelere lucht, of lucht met hogere snelheid, van buiten in de zomer. Ik zal in hoofdstuk '2.2 energieconcept' deze balans verder toelichten, vooral hoe deze in het ontwerp is toegepast.

2.1.1.3 Serre, atrium of passage

Door een glasoverkapte ruimte te gebruiken wordt een klimaat tussen binnen en buiten gecreëerd. Deze ruimte dient als buffer en verlaagt de warmteverliezen van de aanliggende ruimten. Daarbij kan deze ruimte worden ingezet als voorverwarmer van ventilatielucht, zodat minder energie nodig is de ventilatie lucht op de gewenste temperatuur te krijgen. Een derde, belangrijk voordeel van deze ruimten is de bijdrage
aan een natuurlijke ventilatie. Door de opwarming van de lucht in deze ruimten ontstaat een natuurlijke trek waarmee, zeker op kleine schaal, geventileerd kan worden.

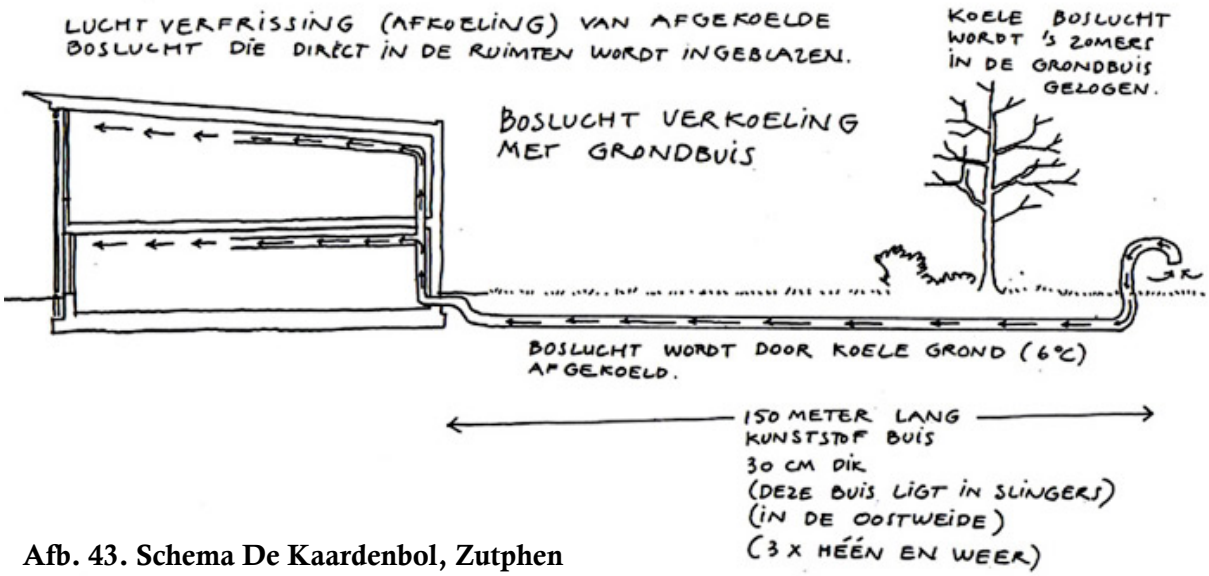
Deze ruimten worden zowel bij woongebouwen als bij utiliteitsgebouwen toegepast, vaak in andere schaal.
Bij woongebouwen zijn deze ruimten veelal woninggebonden en dus kleine schaal, waar ze bij utiliteitsbouw vaak gebouwgebonden zijn en dus grote(re) schaal.

2.1.1.4 Klimaatgevel

De klimaatgevel werkt op dezelfde principes als de glasoverkapte ruimten. Het is een gevel met een ongeklimatiseerde, maar wel geventileerde, ruimte voor de thermische schil die als buffer, overgangszone en natuurlijke trek fungeert. Deze gevel komt in veel verschillende varianten voor, van klimaatraam tot volledige gevelhoge ruimte. Het concept van de klimaatgevel wordt vaak gecombineerd met het principe van een zonneschoorsteen, om uit beide de grootste voordelen te halen.
Het principe hiervan werkt als volgt; de klimaatgevel werkt als buffer en overgangszone, vaak per verdieping, maar in ieder geval in een aantal compartimenten per gevel. Deze compartimenten zijn aangesloten op de zonneschoorsteen zodat daarmee, in een kleine doorsnede, veel trek kan worden gegenereerd en de klimaatgevel natuurlijk geventileerd
kan worden.

2.1.1.5 Voorverwarming of koeling van ventilatielucht

Ventilatielucht kan op een aantal manieren op een passieve manier voorbehandeld worden. De glasoverkapte ruimten en klimaatgevel zijn hier een voorbeeld van.
Een andere manier om de ventilatielucht op een gewenste gematigde temperatuur te brengen is de lucht via de bodem aan te voeren. Verschillende voorbeelden bewijzen het nut hiervan (afbeelding 43).



Afb. 43. Schema De Kaardenbol, Zutphen

De bodem heeft een veel gematigder temperatuur dan de buitenlucht, waardoor de lucht via de bodem in de winter opgewarmd en in de zomer afgekoeld kan worden. Dit gebeurt overigens wel vaak met behulp van een pomp en is dus niet passief. Als er een grote natuurlijke trek kan worden gecreëerd kan dit ook zonder pomp, maar het is aan te raden in ieder geval voor noodgevallen een pomp te installeren (voor kleinschalige projecten is dit vaak niet nodig).
Nog een manier om de aangevoerde lucht enigszins voor te behandelen is de aanvoer over water. Ook water heeft een veel gematigder temperatuurverloop dan de buitenlucht en is dus geschikt om voor te behandelen. Buiten de voorwaarde dat water aanwezig is kan de lucht vrij gemakkelijk geheel passief over het water worden aangevoerd.

2.1.2 Duurzaam opwekken; actieve maatregelen

In dit hoofdstuk worden de actieve maatregelen besproken die kunnen worden toegepast in het ontwerp. Allereerst gaat het daarbij om het reduceren van de vraag, maar bij de actieve maatregelen gaat het vooral om het duurzaam opwekken van energie, omdat de actieve maatregelen veelal opwekkers zijn.

2.1.2.1 Warmteterugwinning

Een goede maatregel om energie te besparen is het terugwinnen van warmte. Hiervoor is het nodig de energiestromen in kaart te brengen in de verschillende seizoenen zodat de teruggewonnen warmte direct kan worden gebruikt. Als dit niet het geval is moet een opslag medium worden gebruikt zoals een aquifer. Hier moet dan rekening gehouden worden met een rendement van dit medium.

Voor warmteterugwinning bestaan een aantal verschillende apparaten met verschillende rendementen. In de berekeningen ben ik uitgegaan van de warmteterugwinning met het hoogste rendement.

2.1.2.2 Warmtepomp

Een warmtepomp is een machine die door middel van een vrij constante bron energie kan genereren voor een gebruiker. Meestal wordt een warmtepomp gebruikt in combinatie met het verwarmingssysteem omdat de output van een warmtepomp warmte is. De warmtepomp kan de volgende bronnen gebruiken:
- bodem
- water
- lucht

Een warmtepomp met als bron de bodem wordt het meest toegepast, omdat de bodem overal aanwezig is en tevens kan worden gebruikt als opslagmedium. Er zijn combinaties gerealiseerd van water en bodem als bron, bijvoorbeeld in de maastoren (bijlage 5, www.devernufteling.eu). Het werkt als volgt: water uit de (warme) bron wordt gekoeld waardoor warmte vrijkomt. Deze warmte wordt gebruikt om het gebouw mee te verwarmen. Dit is de situatie in de winter.
’s Zomers wordt een koude bron gebruikt om een medium (meestal vloeibaar) af te koelen. Hierdoor warmt het water uit de koude bron op dat weer wordt opgeslagen in de warme bron. Het water kan, voor het de warme bron ingaat, eventueel verder opgewarmd worden door de retourlucht van het gebouw. Een warmtepomp wordt steeds vaker toegepast in de gebouwde omgeving, zowel op grote als op kleine schaal. Op kleine schaal wordt vaak gebruik gemaakt van ventilatielucht, zodat dit bijvoorbeeld woninggebonden kan blijven. Op grote schaal wordt vaak gebruik gemaakt van een grotere bron in combinatie met opslag. Opslag van warmte en koude is alleen geschikt voor grote schaal omdat de aanleg van de installatie duur is.
Voor een warmtepomp is behalve de bron nog een energiebron nodig, om te koelen en zo warmte te onttrekken aan de bron. De meeste warmtepomp systemen worden gekoppeld aan het elektriciteitsnet, zodat met bijvoorbeeld zonnecellen of een windmolen de warmtepomp in bedrijf kan worden gehouden zonder fossiele brandstoffen of andere eindige bronnen te gebruiken. Alleen in geval van de laatstgenoemde toepassing valt deze maatregel in de tweede categorie van de *‘trias energetica’*.

2.1.2.3 Warmtekrachtkoppeling

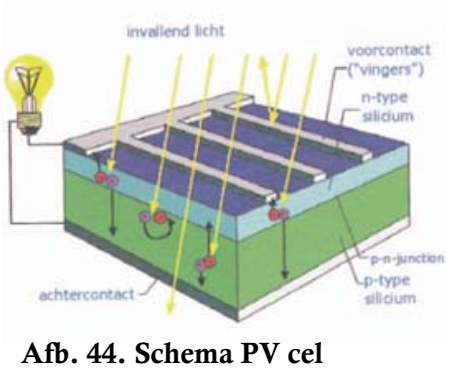
Een warmtekrachtkoppeling is een machine die zowel warmte als elektriciteit opwekt. Het apparaat maakt gebruik van fossiele brandstof en behaalt daarmee een rendement van ongeveer 85 % (bijlage 6, http://www.energieprojecten.nl/edu/ut_wkk.html). Er kan zelfs een rendement

worden behaald van tegen de 100% als ook gebruik wordt gemaakt van de restwarmte op lage temperatuur en de condensatiewarmte van de waterdamp van de rookgassen.
Zoals gezegd werkt de warmtekrachtkoppeling op fossiele brandstof en dus op een eindige bron. Deze maatregel hoort dus niet thuis in de tweede stap van de '*trias energetica'*, maar in de derde stap. De wkk wordt dan ook als zodanig behandeld in het ontwerp en kan pas worden toegepast als uit het onderzoek blijkt dat ik er zonder toegevoegde bronnen niet uitkom.

2.1.2.4 Zonnecellen

Zonnecellen zijn er in drie verschillende hoofdcategorieën:
- mono-kristallijne zonnecellen
- poly-kristallijne zonnecellen
- amorfe zonnecellen

De cellen zijn gebaseerd op halfgeleider materialen die of een elektron te weinig of een elektron teveel hebben, respectievelijk p- en n-type halfgeleiders. Een zonnecel bestaat uit vijf lagen: een n-laag, een p-laag, een scheidingslaag en twee geleider lagen (afbeelding 43).



Afb. 44. Schema PV cel

Door het tekort of overschot aan elektronen gaat een stroom van elektronen lopen die via de geleiders aan een apparaat kan worden verbonden. Op deze manier wordt elektriciteit opgewekt.
Mono-kristallijne zonnecellen zijn het meest voorkomend, maar duur in productie. Onderzoek richt zich op poly-kristallijne zonnecellen en amorfe zonnecellen.

Poly-kristallijne cellen hebben in potentie een hoger rendement maar zijn (nog) duur in productie. Poly-kristallijne cellen maken wel een opmars in de zonnecellen technologie vanwege het hogere rendement.
Amorfe zonnecellen zijn goedkoper in productie, maar hebben een veel lager rendement.
Zonnecellen worden op veel verschillende manieren en schalen toegepast in de gebouwde omgeving, zodat ze vrij gemakkelijk het gat kunnen dichten naar een nul energie gebouw.
Een deel van het gebouw wordt bedekt met zonnecellen, hoeveel komt later aan de orde, met berekeningen ondersteund. Hier wordt ook toegelicht om welke soorten cellen het gaat.

2.1.2.5 Zonnecollectoren

Zonnecollectoren bestaan uit buizen waarin water of een ander medium stroomt dat direct verwarmd wordt door de zon. Deze collectoren kunnen worden gecombineerd met bijvoorbeeld

een boiler of een verwarmingsketel. Hierdoor is minder energie nodig om het water op temperatuur te krijgen.
Zonnecollectoren worden vaak op kleine schaal toegepast, meestal in de woningbouw. De oorzaak hiervan is dat woningen relatief veel warm water gebruiken waardoor het loont om deze techniek toe te passen.

Nieuwe ontwikkelingen in zonnesystemen hebben geresulteerd in een combinatie van zonnecellen en zonnecollectoren, de zogenaamde PV/T panelen. De buizen met vloeistof van de collectoren worden onder de zonnecellen geplaatst, zodat deze zorgen voor de koeling van de zonnecellen. Het rendement is bijna evengroot als de systemen afzonderlijk en scheelt de helft van het oppervlak (afbeelding 45).

Afb. 45. Schema en afbeelding PV/T panelen

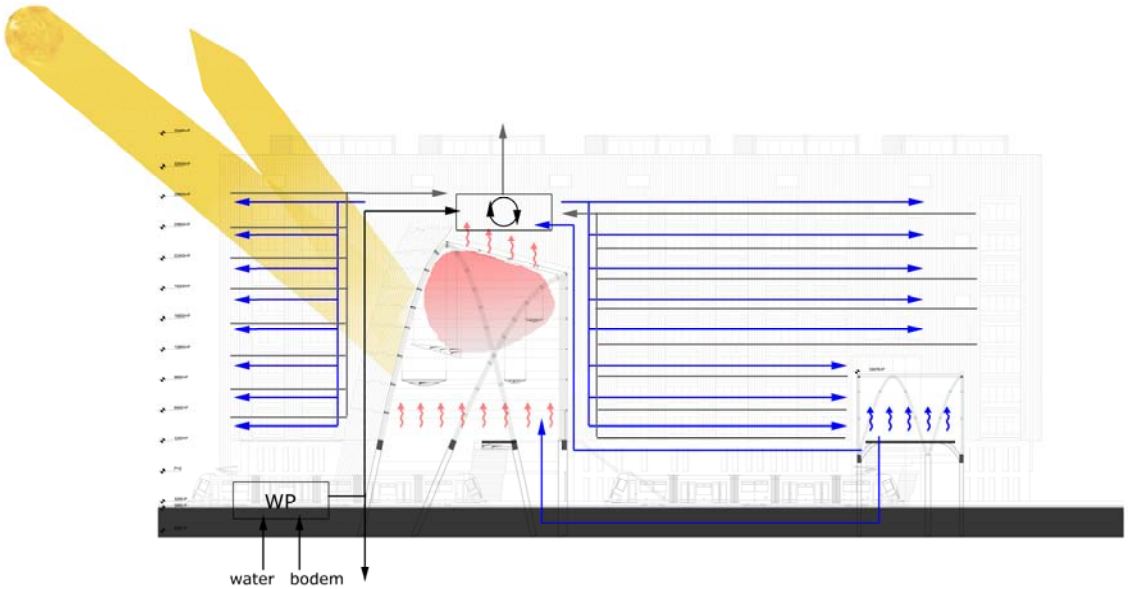
2.2 Energieconcept

In dit hoofdstuk wordt het geheel van energiebesparende en opwekkende maatregelen in het ontwerp besproken. Hierin zal de samenhang worden aangetoond van de verschillende maatregelen, ondersteund met berekeningen.

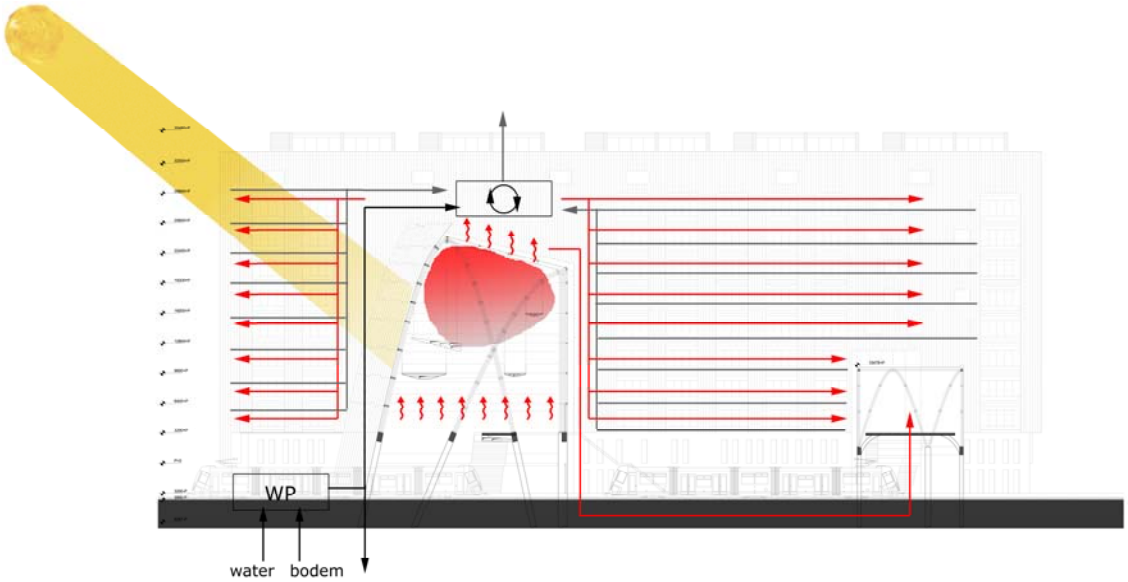
2.2.1 Klimaatconcept

Zoals reeds besproken in '1.3 Architectonisch ontwerp', is het klimaatconcept vooral gebaseerd op de toepassing van twee serres; een warme en een koude serre.

Deze twee serres zijn onderling direct met elkaar verbonden, zodat ze elkaar kunnen koelen en verwarmen.
Uiteraard zijn ze ook op de dichte gebouwdelen aangesloten, waardoor onderstaande schema's van ventilatie ontstaan (zomer- en wintersituatie, afbeelding 46 en 47).



Afb. 46. Schematische doorsnede luchtcircuit zomer



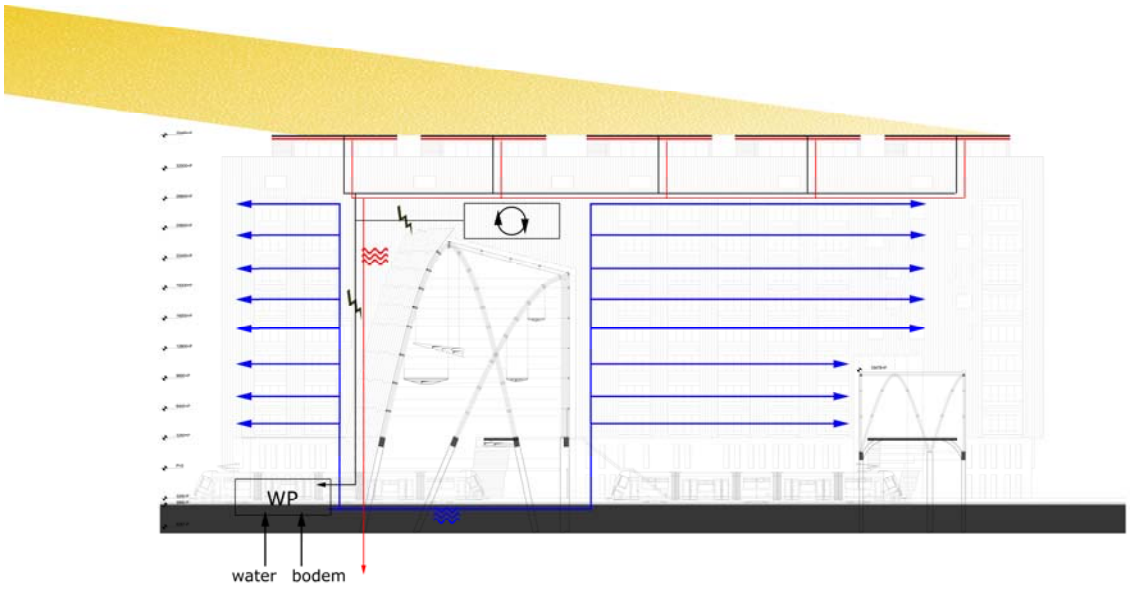
Afb. 47. Schematische doorsnede luchtcircuit winter

De serres worden op een natuurlijke manier geventileerd met lucht dat over het water wordt aangevoerd, om een constantere temperatuur te garanderen. Deze lucht wordt aangevoerd door openingen in de Noord gevels van de serres.

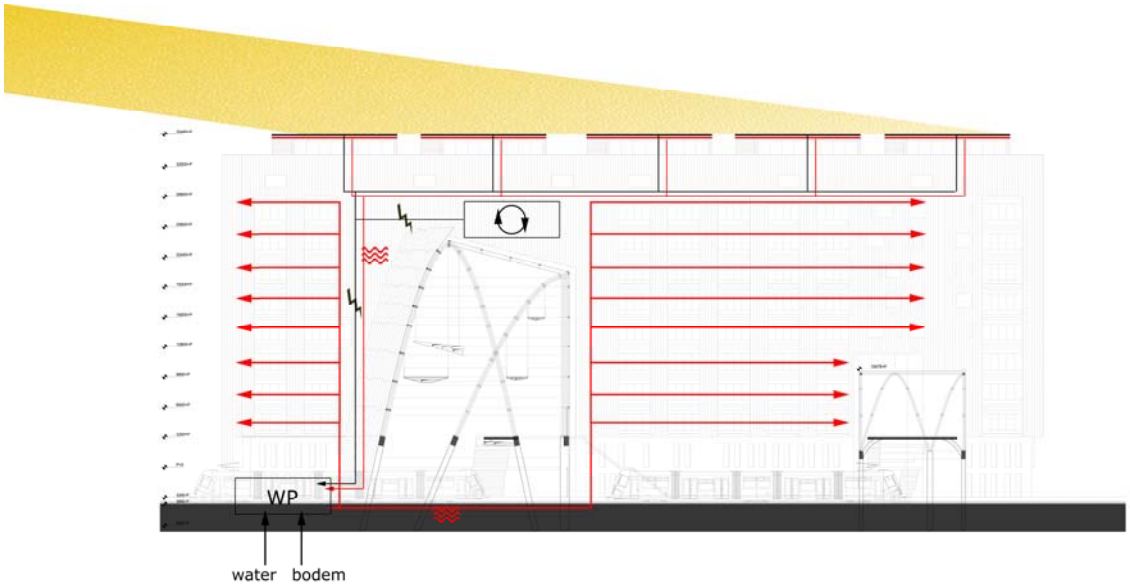
De warmtepomp en vloerverwarming zorgen in de winter voor verwarming en in de zomer voor koeling. Verder wordt de ventilatielucht mechanisch aan- en afgevoerd en voorbehandeld door de serres, de warmteterugwinning en eventueel de warmtepomp als laatste voorbehandeling. Daarnaast worden de ruimtes in de dichte volumes in de zomer op een natuurlijke manier bijgeventileerd, waar gewenst, door de draai-kiep ramen op de kiepstand te zetten.

2.2.2 Samenhang maatregelen

Onderstaande schema's (afbeelding 48 en 49) geven weer hoe het watercircuit en elektriciteitcircuit werken in zomer en winter situatie.



Afb. 48. Schematische doorsnede water- en elektracircuit zomer



Afb. 49. Schematische doorsnede water- en elektracircuit winter

Zoals in hoofdstuk 2.2.1 'klimaatconcept' is besproken verwarmen de serres de ventilatielucht voor, waarna de warmteterugwinning en de warmtepomp de lucht op de gewenste temperatuur brengen.

Lucht wordt in de serres gebracht van over het water. De lucht wordt boven uit de serre gezogen en langs een warmtewisselaar gevoerd om de warmte over te brengen op de verse aanvoerlucht. De lucht uit de serre wordt afgevoerd.

De warmtepomp wordt aangesloten op de zonnecellen, zodat deze de benodigde elektriciteit kunnen opwekken.

Het warm water voor de verwarming, maar vooral voor het tapwater, wordt voorverwarmd door middel van de zonnecollectoren. Dit water wordt vervolgens op temperatuur gebracht door de warmtepomp.

De retourlucht van de ruimtes wordt mechanisch afgevoerd. Deze lucht wordt langs een warmtewisselaar gevoerd, zodat de warmte uit de lucht kan worden gehaald om hergebruikt te worden. Dit gebeurt in de installatieruimten boven de serres in de dichte volumes.

2.2.3 Energieberekeningen

Bij het berekenen van de energiebalans is gebruik gemaakt van de door NEN beschikbaar gestelde programma's EPW (woningen) en EPU (utiliteitsbouw). Deze programma's zijn ontwikkeld om de Energie Prestatie Coëfficiënt te berekenen van gebouwen. Er is weinig aandacht besteed aan deze coëfficiënt, omdat deze voor duurzame gebouwen niet leidend is. De basis van deze coëfficiënt echter is de breuk van een vastgesteld maximaal energieverbruik en het werkelijke energieverbruik van een gebouw.

Uit de gegevens die in de programma's moeten worden ingevuld wordt dus een energie verbruik berekend.

Het gebouw bestaat uit verschillende functies en type volumes (dicht en open, gebouw en serre). De programma's hebben elk hun eigen manier van berekenen en verzameling van gegevens. EPW (woningen) is bestemd voor woningbouw, maar heeft als bijkomende functie dat het serres kan meerekenen. Om deze reden ben ik begonnen met de berekeningen in EPW.

Hieronder (tabel 1) is een overzicht gegeven van de verschillen in energie verbruik na toepassing van verschillende maatregelen (in bijlage 7 zijn de resultaten uit het programma weergegeven).

Versie berekening	Maatregelen	Verbruik per jaar
000 referentie	Zie bijlage … voor invoer	10287236 MJ
001.1 isolatie	Rc waarde dichte gevel 6,5; Gevelopeningen, U waarde 0,6	9618386 MJ (7% minder)
001.2 isolerende luiken	Toevoegen luiken	8985542 MJ (13% minder)
002 serres	Toevoegen van de serres	5619835 MJ (45% minder)
003 voorbehandeling toevoer lucht	Voorbehandelen van de lucht met bodem, water en serres	5357774 MJ (48% minder)
004 warmteterugwinning	Toevoegen van warmteterugwinning	4984979 MJ (52% minder)
005 warmtepomp	Warmtepomp ipv HR ketel	3902850 MJ (62% minder)
006 zonnecellen	Toevoegen van zonnecellen voor elektriciteit	1550251 MJ (85% minder)
007 zonnecollectoren	Toevoegen van zonnecollectoren voor warm tapwater	338171 MJ (97% minder)

Tabel 1. Overzicht energetische maatregelen en energie besparing

Na de berekeningen in EPW zijn een aantal eigenaardigheden naar boven gekomen (zie energiegegevens tabel 2, energieverbruik op jaarbasis). Het valt op dat het vermogen voor warm tapwater ongeveer 35% is van het totaal benodigde vermogen. Dat is een behoorlijk hoog percentage, zeker als ongeveer een derde uit kantoorfuncties bestaat. Dit is te verklaren doordat het programma het geheel berekent als woningen en het warm tapwater gebruik berekent op basis van de oppervlakte.

RESULTATEN - ENERGIEPRESTATIEGEGEVENS

verwarming	Qprim;verw	207235 MJ	
hulpenergie	Qprim;hulp;verw	131889 MJ	
warmtapwater	Qprim;tap	980878 MJ	
ventilatoren	Qprim;vent	456436 MJ	
verlichting	Qprim;vl	732704 MJ	
zomercomfort	Qzom;comf	0 MJ	
koeling	Qprim;koel	181628 MJ	
bevochtiging	Qprim;bev	0 MJ	
comp. PV-cellen	Qprim;pv	-2352599 MJ	
comp. WK	Qprim;comp;WK	0 MJ	
		---	+
totaal	Qpres;tot	338171 MJ	
	Qpres;toel	5757328 MJ	

Tabel 2. Overzicht energie gegevens uit EPW

Om deze eigenaardigheden verder te onderzoeken is het gebouw in EPU doorgerekend. In dit programma kunnen de serres niet worden meegenomen in de warmte berekening en zal dus rekening gehouden moeten worden met een hoger energie verbruik voor verwarming.
In tabel 3 een overzicht van de energiegegevens berekend in EPU (energieverbruik op jaarbasis).

RESULTATEN - ENERGIEPRESTATIEGEGEVENS

Verwarming	Qprim;verw	802163 MJ	
Ventilatoren	Qprim;vent	1373388 MJ	
Warmtapwater	Qprim;tap	433745 MJ	
Pompen	Qprim;pomp	234119 MJ	
Koeling	Qprim;koel	101401 MJ	
Bevochtiging	Qprim;bev	0 MJ	
Verlichting	Qprim;vl	1247885 MJ	
Comp. PV-cellen	Qprim;pv	-2124637 MJ	
Comp. WK	Qprim;comp;WK	0 MJ	
	Qpres;woon	0 MJ	
		----------	+
Totaal	Qpres;tot	2068063 MJ	
	Qpres;toel	8917897 MJ	

Tabel 3. Overzicht energiegegevens uit EPU

Hierin valt inderdaad op dat het energie verbruik voor verwarming erg hoog is vergeleken met het berekende in EPW.
Voor verlichting is echter weer een heel hoog getal gerekend.
In EPU wordt het gebruik van pompen apart berekend, opvallend is dat dit twee keer zoveel is als het vermogen dat nodig is voor koeling. In EPW wordt een waarde gegeven voor hulpenergie bij verwarming, wat een relatie heeft met de waarde in EPU voor de pompen (beide hulpmiddelen).

Om de berekeningen juist te interpreteren en tot een realistische eindberekening te komen is van beide programma´s de meest reële waarde genomen. Daarbij zijn van sommige waardes de equivalenten genomen van het aanwezige oppervlak van betreffende functie in het gebouw.

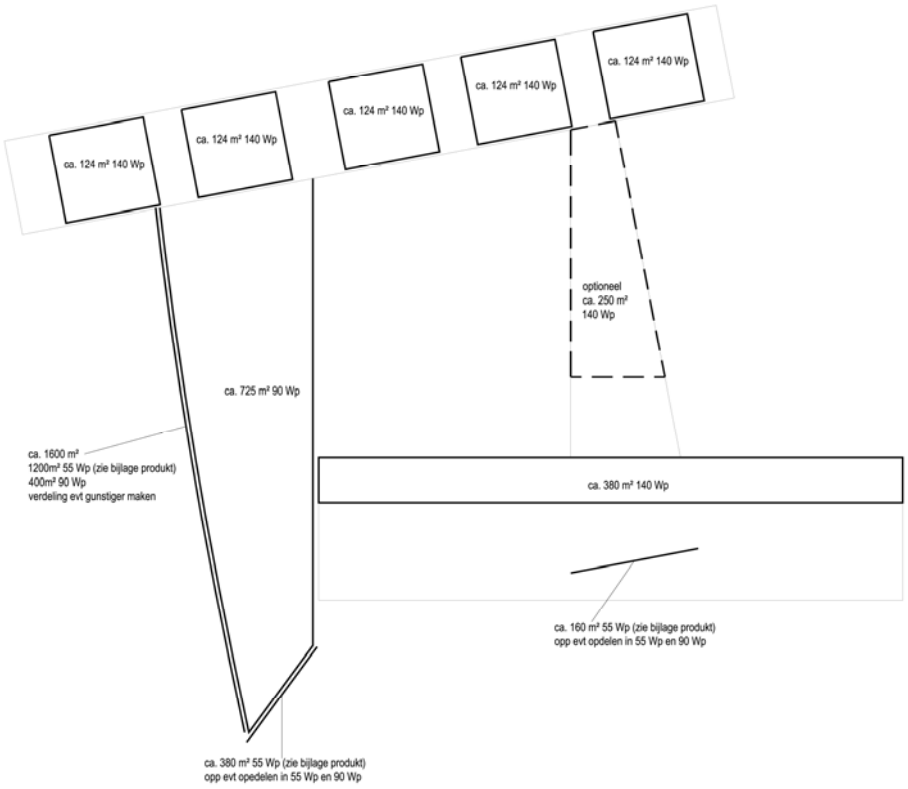
In tabel 4 is een overzicht gegeven van de gebruikte waardes en uit welk programma deze zijn berekend. Alle waarden zijn op jaarbasis gegeven.

Programma	EPU	EPW	Reële waarde	Reden
Type energie				
Verwarming	800617 MJ	339124 MJ	339124 MJ	Serres
Ventilatie	1373388 MJ	456436 MJ	456436 MJ	Serres, WTW, voorbeh.
Tapwater	433745 MJ	980878 MJ	487185 MJ	U-functies, W geïnterpol.
Pompen	234119 MJ	131889 MJ	234119 MJ	Hoogste waarde
Koeling	102248 MJ	181628 MJ	102248 MJ	WP zomer en opslag bodem
Verlichting	1247885 MJ	732704 MJ	990295 MJ	Gemiddelde
PV cellen	-2124637 MJ	-2564859 MJ	-2564859 MJ	Hoogste waarde
Totaal	2630643 MJ	338171 MJ	44548 MJ	

Tabel 4. Overzicht energiegegevens

Opvallend is dat voor de energie afkomstig van de zonnepanelen een verschillende waarde wordt gegeven voor dezelfde gegevens. Dit scheelt ongeveer 20%. Ik heb hierbij de hoogste waarde aangehouden.

Hieronder is een plattegrond weergegeven (afbeelding 50) met daarop aangegeven welke oppervlakken nu doorgerekend zijn, met de bijbehorende Wp waarden van de gebruikte panelen. Ook is aangegeven wat de oppervlakken zijn die eventueel nog bijgeteld kunnen worden om tot een nul energie ontwerp te komen.



Afb. 50. Plattegrond PV oppervlakken en potientiële PV oppervlakken

Deel III

3. Onderzoek bamboe

Onderzoek naar bamboe als constructiemateriaal in de westerse wereld.

3.1 Onderzoek; inhoud en doel

Het onderzoek van dit afstudeerproject gaat over de toepassing van bamboe als bouwmateriaal in de westerse wereld.
Hierbij zijn een aantal uitgangspunten en randvoorwaarden van toepassing voor het gebruik van bamboe.

1) Het eerste uitgangspunt voor het gebruik van bamboe is duurzaamheid. Bamboe heeft een korte cyclus door de hoge groeisnelheid, waardoor de voorraad van bamboe snel weer wordt aangevuld en zo niet zomaar uitgeput raakt.

Een nadeel voor bamboe als ecologische toepassing is de bron van bamboe. De bamboe die geschikt is voor constructieve toepassingen in de bouw groeit in Azië en Zuid-Amerika (Hidalgo, 2003). Een onderzoek door de auteur naar de energetische inhoud van materialen toont aan dat de energie die nodig is voor transport een behoorlijke invloed heeft op de energetische inhoud van natuurlijke materialen (Bak, 2009). Hier moet wel genoemd worden dat de toepassing in het perspectief gezien moet worden van het materiaal wat zou zijn toegepast in de plaats van bamboe.

2) De goede mechanische eigenschappen van bamboe maken het ook praktisch om bamboe toe te passen.
3) Buiten de eerste twee belangrijke uitgangspunten om bamboe constructief te gebruiken in het gebouwontwerp, is de uitstraling van het materiaal natuurlijk erg belangrijk. In alle verschijningsvormen van bamboe is de uitstraling van het materiaal erg bijzonder en daarom de moeite waard om verder te onderzoeken.

A) Randvoorwaarde één voor de toepassing van bamboe in de westerse wereld is de maat- en vorm vastheid. Dit is vooral bij toepassing van de ruwe stammen een uitdaging. De toepassing van ruwe stammen, echter, heeft ook een groot mechanisch voordeel; de stammen zijn een goed voorbeeld van natuurlijke efficiëntie in krachtafdracht (Janssen, 2000).

B) Het toepassen van hele stammen is de tweede randvoorwaarde; een randvoorwaarde die uit de architectuur en duurzaamheid voortkomt. Door het materiaal zoveel mogelijk als grondstof toe te passen, hoeven er minder bewerkingen worden gedaan en kost het minder materiaal, materieel en energie. De (constructieve) opzet van de serres maakt het toepassen van bamboe stammen belangrijk in de architectonische uitstraling.
C) De derde randvoorwaarde voor toepassing van bamboe in de westerse wereld is geringe arbeid, vooral óp de bouwplaats. Arbeid is in de westerse wereld één van de grootste kostenposten van een bouwproject. Vooral de arbeid van (hoog)geschoold personeel óp de bouwplaats is duur. Door een bouwsysteem te ontwerpen waarbij weinig arbeid nodig is, op de bouwplaats, kan veel worden gewonnen voor de toepassing van bamboe in het westen (Nederland in dit geval).

Het onderzoek zal zich vooral richten op de verbindingen van de stammen. Hierbij wordt gekeken naar verschillende knopen van stammen onderling en in verbinding met andere materialen.

Het doel van dit onderzoek is het bewijzen van de beeldwaarde van de nu gepresenteerde gebouwdelen, waarbij de hoofddraagconstructie in de betreffende bouwdelen, de serres, worden opgebouwd uit bamboe. Voor de verbindingen, gevels en vloeren mogen (ook nog) andere materialen worden gebruikt, maar (bij voorkeur) wel natuurlijke materialen (gevels en vloeren). De noord gevel en onderverdiepingen zijn hierbij een uitzondering, die worden voornamelijk in beton uitgevoerd, evenals het glas als transparant materiaal.

3.2 Wat is bamboe?

Bamboe is een natuurlijk materiaal dat uit dezelfde elementen bestaat als hout, namelijk cellulose en lignine. Hoewel dezelfde elementen is het geen boomsoort maar een grassoort. Bamboe behoort tot de zogenaamde houtachtige grote gewassen. Het behoort tot de familie *Gramineae (Poacceae),* subfamilie *Bambusoidae.* Deze familie heeft onderscheidende bladcellen, namelijk tapse cellen (Hidalgo, 2003).
Het belangrijkste verschil tussen bamboe en hout, in uiterlijk, is dat bamboe, in het algemeen (Hidalgo, 2003), niet massief maar hol is. Een tweede verschil is de afwezigheid van noesten en groeiringen, een belangrijk voordeel. Dit is te wijten aan de manier van groeien van bamboe; louter van beneden naar boven, in plaats van, zoals bij bomen, uitdijend in alle richtingen (de jaarringen zijn daar een gevolg van).
Een derde groot verschil met hout is de groeiperiode van bamboe; de hoogste groeisnelheid ooit gemeten van bamboe is 1,2m per dag (*Phyllostachys reticulata* gemeten vlakbij Kyoto in Japan) (Hidalgo, 2003).

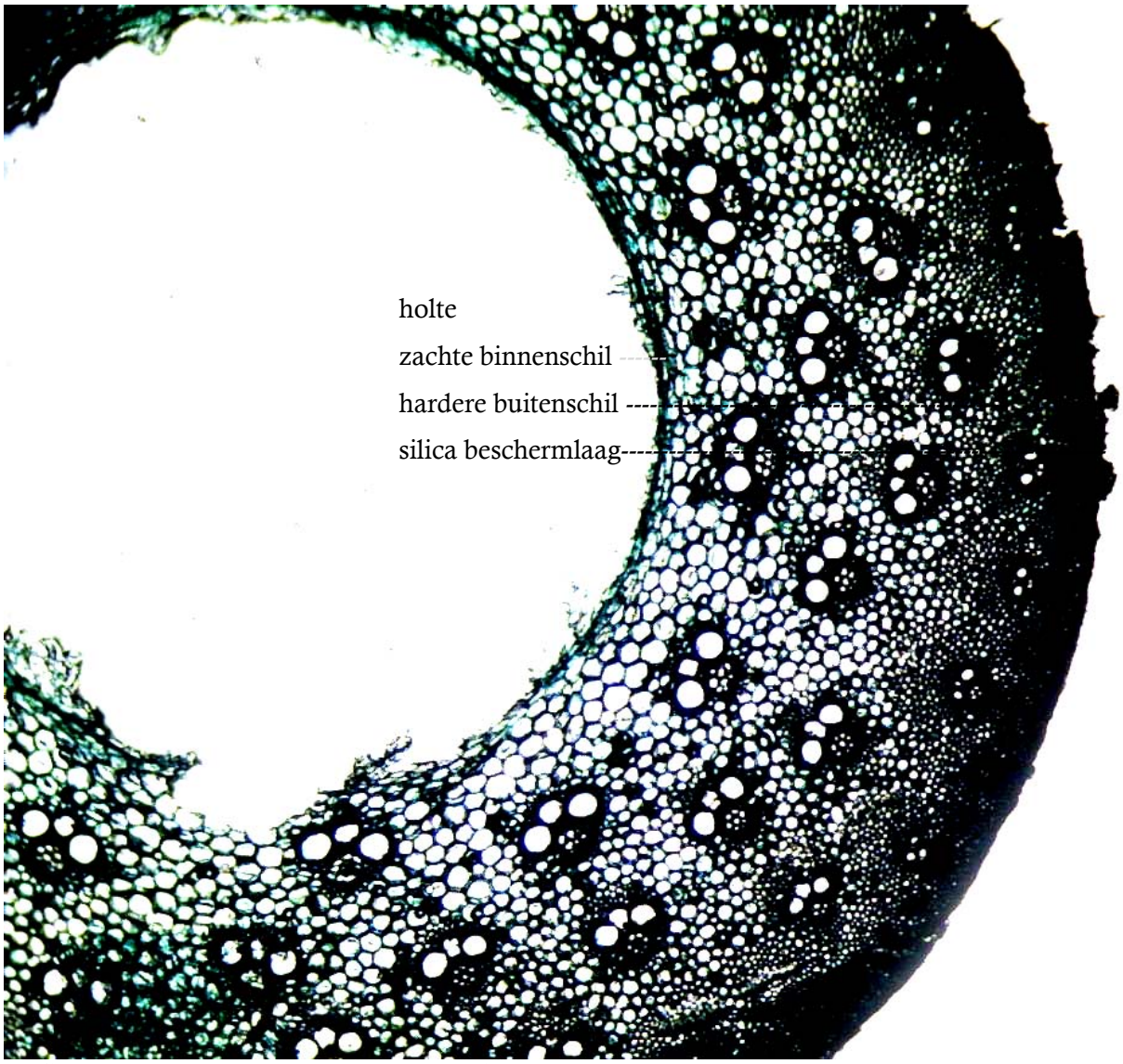
In het kader van duurzaam materiaalgebruik een zeer goede eigenschap. Daarbij heeft bamboe zeer goede mechanische eigenschappen. Deze laatste twee eigenschappen maken bamboe tot een gedegen concurrent van langzaam groeiende hardhoutsoorten, vooral in de toepassing als composiet (zie hfdst 3.7).

Bamboe is een verzamelnaam voor vele soorten (1000-1500 soorten nu bekend, Van der Lugt 2008) die erg verschillen in eigenschappen. Er zijn grote verschillen tussen de soorten in grootte, vorm, kleur, verdeling en configuratie van ringen, mechanische eigenschappen en klimatologische voorkeur. Sommige soorten kunnen 40m worden met stammen van 30cm in doorsnede (*Dendrocalamus giganteus, India*), sommige worden maar enkele centimeters hoog met een doorsnede van enkele millimeters (*Raddiella, Guinea's, Zuid Amerika*).
Naar schatting zijn ongeveer 50 bamboe soorten geschikt als constructie materiaal (Van der Lugt 2008), waaronder de genoemde *Dendrocalamus giganteus* en de bekende Colombiaanse soort *Guadua angustifolia*, beter bekend als kortaf *Guadua*.

Het onderzoek zal zicht richten op de laatste soort, omdat hier veel constructies mee zijn gemaakt, oa door de Colombiaanse architect Simon Vélez, en omdat deze soort als één van de weinige soorten redelijk verkrijgbaar is in grote hele stammen (70-120mm in diameter) in Nederland.

Bamboe heeft cellulosevezels in één richting (de lengterichting) die bijeen worden gehouden door een matrix van lignine. De dichtheid van de vezels neemt toe van binnen naar buiten. De buitenzijde heeft een beschermende laag van silica (SiO_2).
Een bamboestam bestaat uit de volgende onderdelen (afb. 51):

- een holte
- een zachte binnenschil
- een steeds harder wordende buitenschil en
- een beschermende laag van silica



Afb. 51. Röntgen opname van een bamboe scheut 40x vergroot

De bamboestam heeft ringen waar de stam nagenoeg massief is en waartussen zich de holtes bevinden. De ringen hebben per stam een redelijk regelmatige afstand van elkaar en de stam is, in het algemeen, ongeveer rond in doorsnede (afb. 52) (er bestaan ook bamboesoorten die van nature in vierkante doorsnede of massief groeien. De meeste afwijkende vormen komen echter alleen voor bij bepaalde afwijkende klimatologische omstandigheden. Als deze omstandigeheden verdwijnen, verdwijnen ook de afwijkende vormen in/van het bamboe) (Hidalgo, 2003).

Afb. 52. Langsdoorsnede van een bamboe stam; de holtes en ringen zijn duidelijk te onderscheiden

3.3 Mechanische eigenschappen

Zoals kort aangegeven in hoofdstuk 3.1 heeft bamboe goede mechanische eigenschappen. De mechanische eigenschappen worden bepaald door de vezelrichting, de verbindende lignine matrix en de toename van vezels van binnen naar buiten. De toename van de vezels in de wand zorgen voor een hele effieciënte manier van kracht afdracht; daar waar de arm (afstand zwaartepunt tot uiterste vezel) het grootste is, is de vezeldichtheid ook het grootste.

De vezels lopen in de lengterichting van de stam, bijeen gehouden door de lignine matrix haaks op de stam. De vezelrichting zorgt ervoor dat bamboe erg geschikt is voor toepassingen onder trekbelasting. Zoals gezegd neemt de dichtheid van de vezels toe van binnen naar buiten. Hierdoor is bamboe vooral geschikt voor toepassingen waarbij buiging optreedt. De druksterkte van bamboe is relatief klein. Voor de meeste materialen is de toepassing onder drukbelasting niet de maatgevende factor, maar de weerstand tegen buiging (knik in kolommen bijvoorbeeld). Voor bamboe geldt het omgekeerde, daarbij is de druksterkte wel de maatgevende factor.

De vorm van een bamboestam (globaal gezien cirkelvormig) maakt het een geschikt materiaal voor constructieve doeleinden. Janssen (2000) toont aan dat bamboe in de relatie tussen het traagheidsmoment en de diameter ca. 2x effectiever is dan een rechthoekige houten balk. Verder is bamboe erg effectief als het gaat om de relatie tussen dichtheid en mechanische eigenschappen als sterkte en stijfheid (Janssen, 2000). Dit komt voornamelijk door de holte in de stam, waardoor de dichtheid relatief laag is.

Doordat bamboe een natuurlijk materiaal is en in de Westerse wereld nog niet veel wordt toegepast is het moeilijk exacte gegevens te vinden over bamboe. Dit geldt vooral voor bamboe als grondstof; in de vorm van bamboestammen. Als we dit vergelijken met hout is dat vrij logisch; voor hout in de vorm van stammen is het ook moeilijk exacte gegevens te vinden en wordt om die reden ook weinig toegepast.
Dit komt omdat de homogeniteit van natuurlijke materialen niet van buiten te meten is.
Bij beide materialen moeten de gegevens voor toepassing in stammen worden verkregen door middel van testen die situatie afhankelijk zijn. Hierbij zijn verschillende omstandigheden van invloed zoals de soort bamboe (of hout), de klimatologische omstandigheden van de bron en de verbindingen van de stammen. Hout wordt meestal toegepast na een industrialisatie proces waarin de eindproducten onderweg worden gekeurd om in kwaliteitsklassen in te delen zodat kan worden gerekend met de eigenschappen. Ook de verbindingen van hout zijn geclassificeerd.

Voor bamboe zijn tot nu toe alleen nog exacte gegevens bekend als het materiaal wordt gebruikt in de vorm van een composiet (ook na een industrialisatieproces). Voor de verbindingen zijn nog geen classificeringen, die moeten per toepassing worden getest om de eigenschappen te bepalen. Bamboe heeft als bouwmateriaal in verschillende vormen grote potenties. De toepassing van bamboe vezels in composieten, textiel en pulp voor papier heeft grote voordelen in termen van duurzaamheid. De snelle groei van bamboe is hiervan de voornaamste oorzaak, zoals uitgelegd vult het materiaal hierdoor zijn voorraad weer snel aan, waardoor het niet gemakkelijk uitgeput raakt.

Als bouwmateriaal komen de verschillende composieten en de ruwe stammen in aanmerking voor toepassing. De composieten zijn al in opmars in de westerse wereld, voornamelijk in afwerkingen als vloer-, plafond- en wandafwerkingen en in meubels. Recente ontwikkelingen in bamboe composieten als balken en kozijnen tonen ook hier grote potenties die qua eigenschappen te vergelijken zijn met hardhout soorten. Hierdoor wordt het imago van bamboe als 'poor men's timber' langzaamaan verbeterd.

3.4 Bamboe stammen

Het gebruik van bamboe stammen vraagt een grote aanpassing van het imago van bamboe in de (westerse) wereld. Zoals gezegd zijn bamboe stammen erg efficiënt in het gebruik van materiaal als toepassing van constructiemateriaal. Het grootste obstakel om te overkomen is het bepalen van de fysieke eigenschappen. Er is een classificering nodig van verschillende bamboe soorten en hun herkomst om deze fysieke eigenschappen te documenteren. Tot nu toe worden bamboe stammen bij gebruik per partij en toepassing getest om de fysieke (mechanische) eigenschappen te bepalen.

Afb. 53. Bamboestammen in een bos

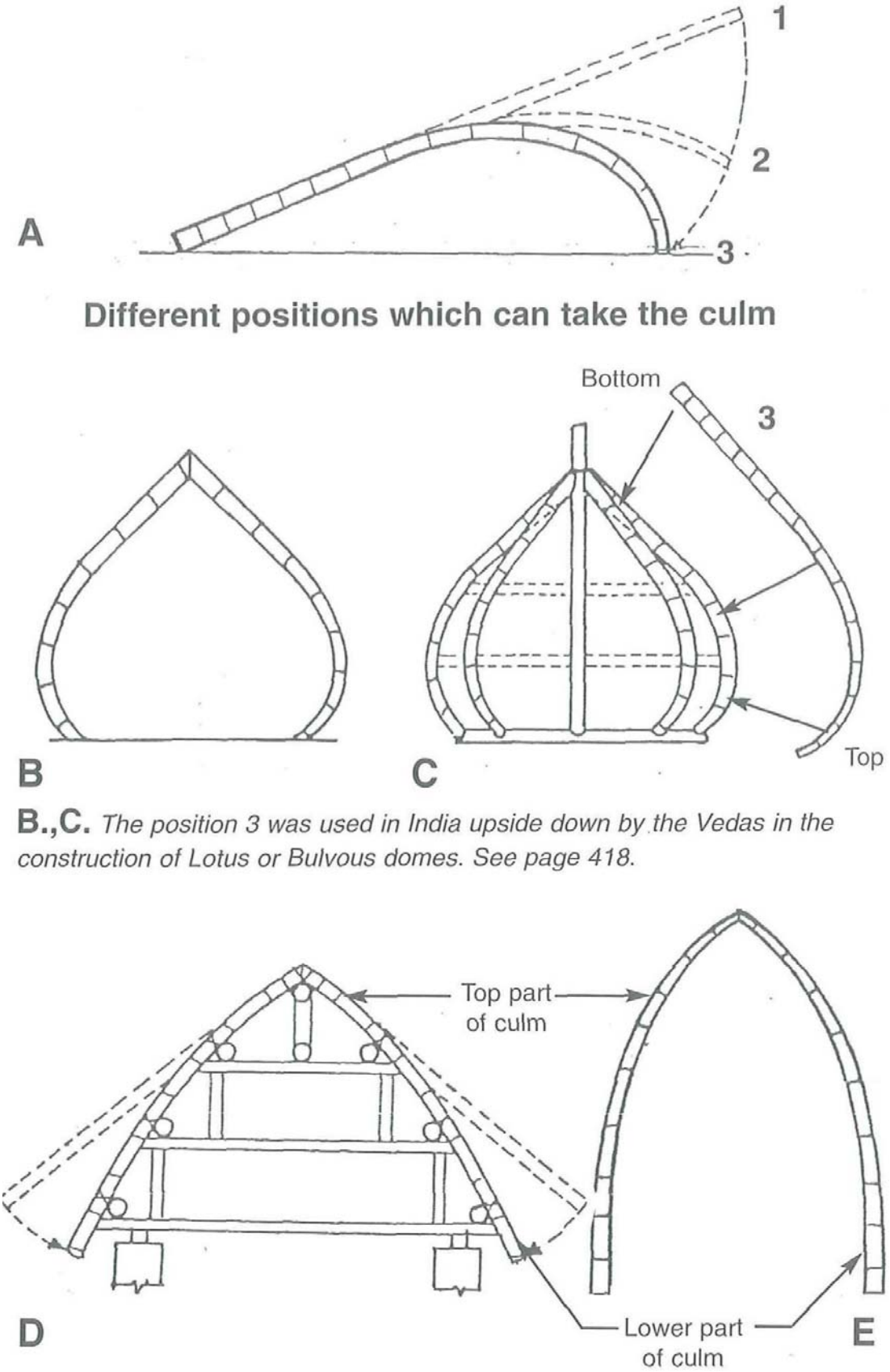
Een ander groot obstakel voor het toepassen van bamboe stammen als constructiemateriaal zijn de verbindingen. Bamboe is hol, glad, niet constant in diameter (taps toelopend naar boven) en (wand)dikte, niet volledig rond en de ringen zijn onregelmatig verdeeld over de stam (per stam verschillend). Dit maakt het verbinden van de stammen moeilijker dan bij andere cirkelvormige constructie onderdelen zoals stalen buizen of houten stokken.

De derde uitdaging bij de toepassing van bamboe stammen is de kwetsbaarheid. Omdat bamboe een natuurlijk materiaal is, is het gevoelig voor vocht en insecten. De geïmporteerde stammen zijn (bijna) altijd al behandeld tegen de meest voorkomende schimmels en insecten, maar vocht blijft een probleem, dit is per soort afhankelijk (Hidalgo, 2003). Voor de soort hier onderzocht, *Guadua Angustifolia*, geld dat de voorbehandeling afdoende is tegen schimmels en insecten (behalve termieten), mits geen ophoping van vocht ontstaat (Hidalgo, 2003). Bamboe is dan ook niet geschikt om buiten te gebruiken (in de termen van de westerse bouwwereld; langdurig bestand tegen weersinvloeden). In eerste plaats is het dus zaak om bamboe te beschermen tegen de invloeden van buiten; bamboe moet worden gebruikt in een overdekte ruimte, waar directe blootstelling aan hemelwater onmogelijk is. Bij het verbinden van de stammen is het noodzakelijk dat de stammen worden afgesloten, zodat er geen vocht in de stam kan komen, als dat risico aanwezig is. Dit geldt zowel voor de open uiteinden als de eventuele perforaties van de stam om te verbinden.

3.4.1 Vorm van de constructie

Er zijn dus nogal wat uitdagingen in het gebruik van bamboe stammen. Niet alleen de bovengenoemde problemen moeten worden opgelost, ook de vorm die gemaakt moet worden vergt nader onderzoek; de boogvormen in de constructie zijn moeilijk om te maken.

A) Het eerste probleem is de lengte van de bogen. Er zijn bamboe soorten die in deze lengte groeien, maar het verschil in diameter tussen de onder- en bovenkant loopt op tot 10 cm of meer (Hidalgo, 2003). Om de bogen te maken moeten de stammen dus verlengd worden.
B) Het tweede probleem is de stijfheid van de (gedroogde) stammen. Dit is in principe een goede eigenschap van bamboe, maar als er een gebogen vorm gemaakt moet worden werkt de stijfheid tegen. Als de stammen al in deze vorm gebogen kunnen worden komen er grote krachten op de uiteinden die opgevangen moeten worden (zoals in afbeelding 54 met een ring of trekstang wordt gedaan).
C) Een derde probleem is het relatief kleine oppervlak van de doorsnede. Hierdoor moeten de stammen worden gebundeld, wat, net als bij het verlengen, een verbinding nodig heeft. Deze bundels moeten vervolgens weer verbonden worden aan elkaar, aan stammen in andere richtingen en aan andere materialen.

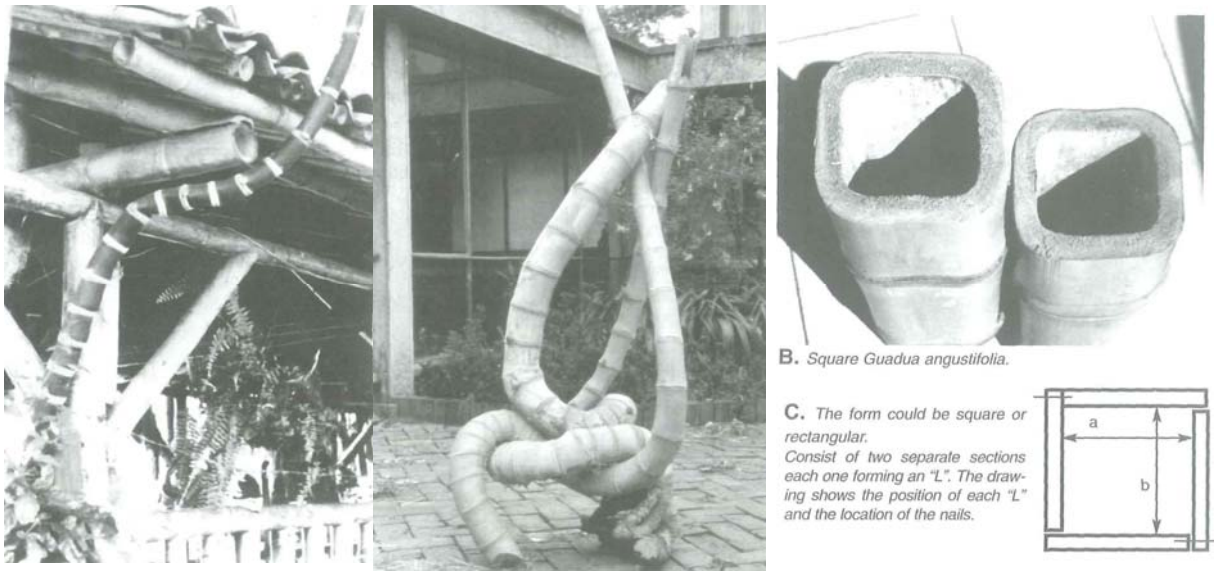


 Afb. 54. Verschillende manieren om een gebogen vorm te maken met bamboestammen

De genoemde problemen hebben dus vier soorten verbindingen nodig, die grote krachten op moeten kunnen nemen:

a) verlengen
b) bundelen
c) verbindingen naar andere richtingen
d) verbindingen naar andere materialen

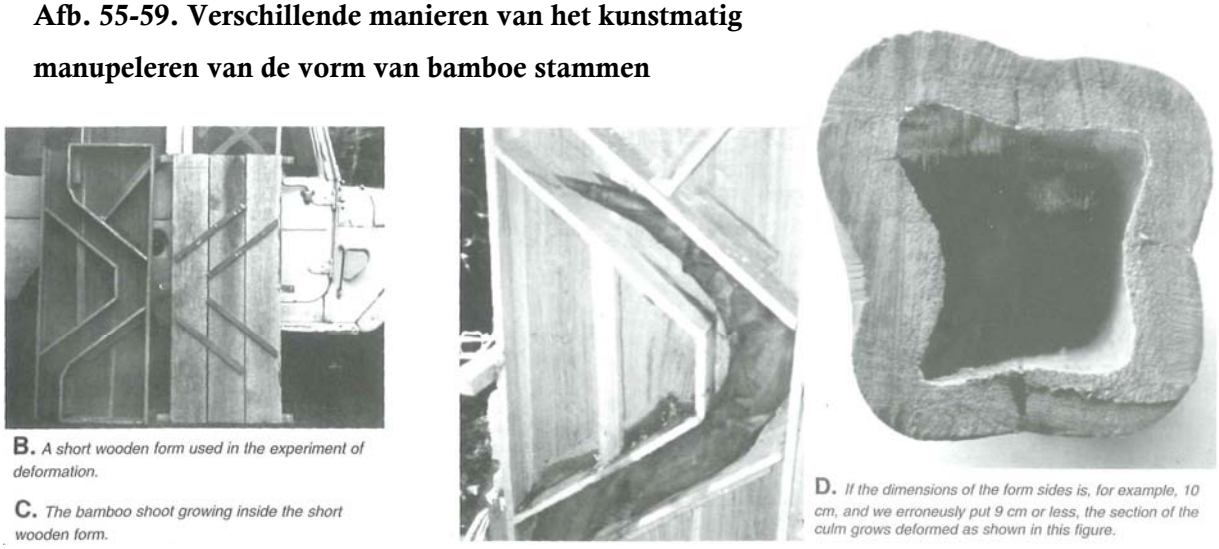
Voor het probleem van de gebogen vorm bestaat echter nog een andere oplossing; het gebogen laten groeien van de stammen.
In afbeelding 55-61 is weergegeven hoe het mogelijk is bepaalde vormen te laten groeien door de bamboe in een mal te laten groeien. Daarmee kunnen de meest uiteenlopende vormen worden verkregen; zelfs een onnatuurlijke vierkante stam behoort tot de mogelijkheden.



B. *Square Guadua angustifolia.*

C. *The form could be square or rectangular. Consist of two separate sections each one forming an "L". The drawing shows the position of each "L" and the location of the nails.*

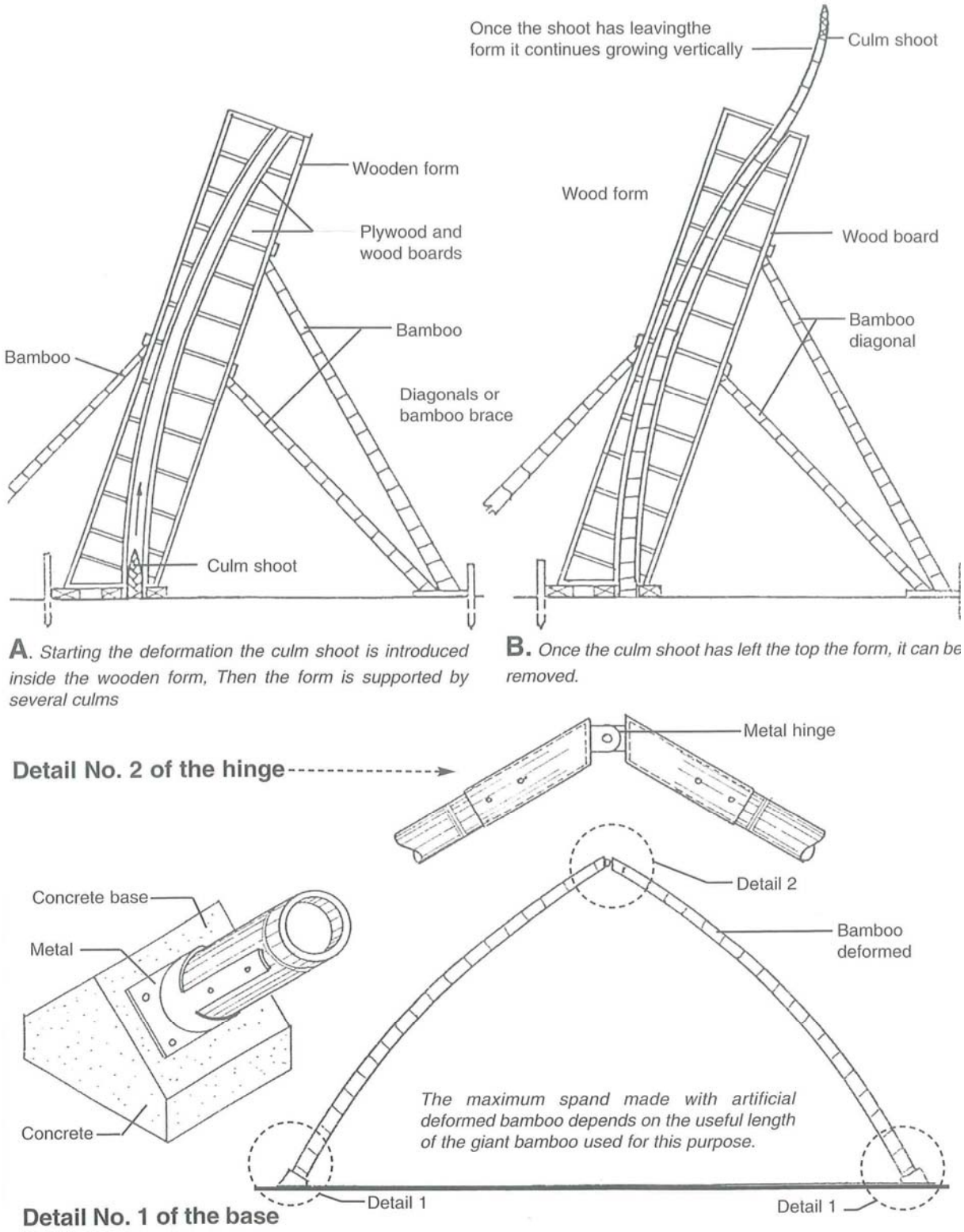
Afb. 55-59. Verschillende manieren van het kunstmatig manupeleren van de vorm van bamboe stammen



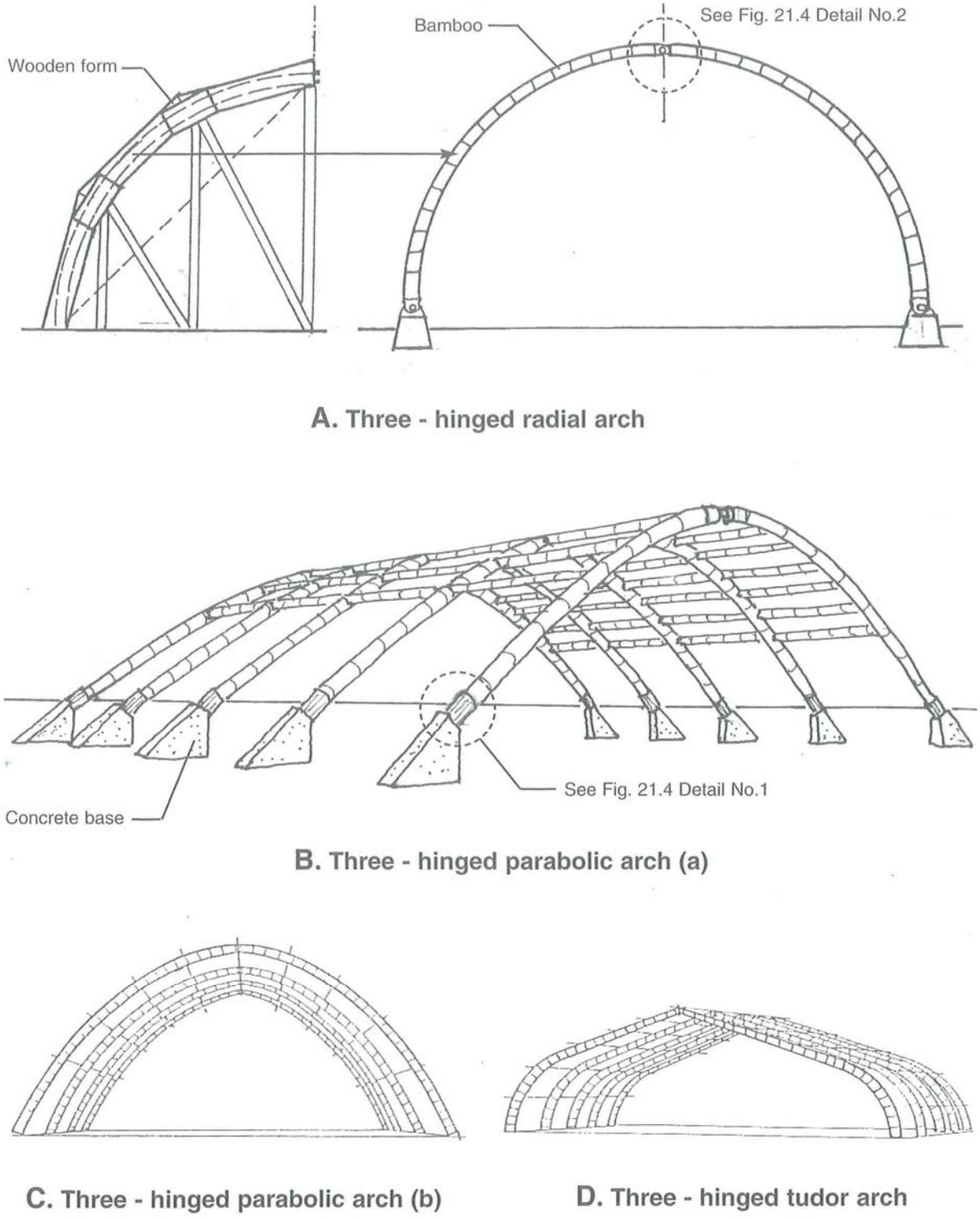
B. *A short wooden form used in the experiment of deformation.*

C. *The bamboo shoot growing inside the short wooden form.*

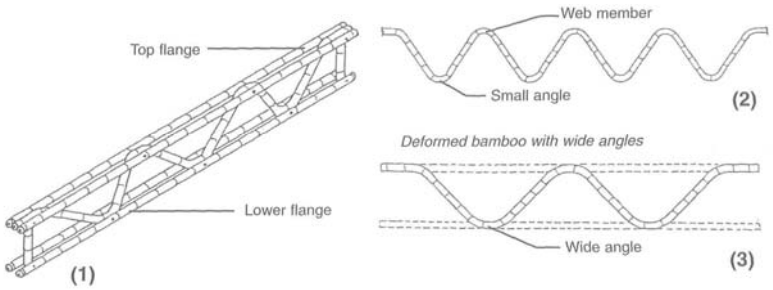
D. *If the dimensions of the form sides is, for example, 10 cm, and we erroneusly put 9 cm or less, the section of the culm grows deformed as shown in this figure.*



Afb. 60. Kunstmatig manupeleren van de vorm van bamboe stammen en de vormen die daarmee gemaakt kunnen worden



Afb. 61. Kunstmatig manupeleren van de vorm van bamboe stammen en de vormen die daarmee gemaakt kunnen worden



3.5 Bestaande verbindingen

De ontwikkeling van de verbindingen is al een lange tijd onderwerp van onderzoek, waarbij veel verschillende oplossingen zijn aangedragen om de verbindingen gemakkelijker te maken. Die oplossingen zijn vooral gericht op het standaardiseren van de verbindingen.
Om deze gestandaardiseerde verbindingen tot stand te brengen worden allerlei andere materialen toegepast zoals staal, hout en cement.
De verbindingen zijn in een aantal categorieën in te delen, bijvoorbeeld op basis van de manier van aansluiten van de stammen (Janssen, 2000). Deze categorieën worden in het volgende deel besproken.

3.5.1 Onderzoeksmethode: Verbindingen in categorieën

In dit hoofdstuk wordt besproken hoe te werk is gegaan in het categoriseren en beoordelen van de verschillende verbindingen die zijn onderzocht.
Te beginnen met een categorisering volgens Jules Janssen (Janssen, 2000), omdat die een goed overzicht geeft van de typen verbindingen.

3.5.1.1 Categorieën volgens Janssen

Janssen (2000) beschrijft in zijn boek 8 categorieën met verbindingen:

1. volle doorsnede verbindingen
2. binnenzijde naar parallelle elementen
3. (binnenzijde naar haakse elementen)
4. doorsnede naar parallelle elementen
5. doorsnede naar haakse elementen
6. buitenzijde naar parallelle elementen
7. (buitenzijde naar haakse elementen)
8. gespleten bamboe verbindingen

Waarbij categorie 3. en 7. theoretische verbindingen zijn waar hij geen praktijkvoorbeelden bij heeft gevonden. Hij bespreekt deze categorieën verder niet.

In categorie 1. vallen de meeste verbindingen, zeker die in traditionele bamboe bouw voorkomen.
In categorie 2. vallen de meeste recent ontwikkelde verbindingen, waaronder met hout en cement.
In categorie 4. worden verbindingen besproken die met de doorsnede worden verbonden. De meeste verbindingen vallen echter in categorie 5 door de pinnen en bouten die worden toegepast.
In categorie 5. worden verbindingen besproken met bouten en pinnen.

In categorie 6. worden maar een paar verbindingen besproken, waaronder zowel traditionele als moderne verbindingen.
In categorie 8. worden de verbindingen met gespleten bamboe besproken. Deze vallen eigenlijk buiten het systeem, maar worden besproken omdat ze, volgens Janssen erg belangrijk zijn in het onderzoek naar verbindingen. In dit onderzoek worden ze wel genoemd, maar bij voorbaat uitgesloten door één van de uitgangspunten die in hoofdstuk 3.5.1.5 worden genoemd, namelijk het gebruik van hele stammen.

3.5.1.2 Verbindingen in het ontwerp van de serres

Het ontwerp vraagt oplossingen voor specifieke details. Het onderzoek richt zich daarom op de specifieke knopen die voorkomen in het ontwerp.
Daarom zijn de bovenstaande verbinding typen ook in een andere indeling geplaatst, zodat een gemakkelijker overzicht ontstaat voor het onderzoek. Hier zullen ook andere gevonden knopen bij ingedeeld en besproken worden om het overzicht compleet te maken.

De indeling is gemaakt door aan te geven voor welke soort verbinding de knoop geschikt is. Daarbij is, zoals besproken in hoofdstuk 3.4.1, onderscheid gemaakt tussen:

a) verlengen
b) bundelen
c) verschillende richtingen verbinden
d) aan andere materialen verbinden

Op deze manier ontstaat een overzicht voor de bestaande knopen en hoe ik deze kan toepassen in het ontwerp.

3.5.1.3 Verbindingen en krachten

Bij de genoemde indelingen zal ook de weerstand tegen de verschillende belastingtypen genoemd worden, te weten:

I. druk belasting
II. trek belasting
III. schuif belasting

Zo kan in één keer worden afgelezen welke verbinding geschikt is voor welke soort verbinding en welke krachten deze kan opnemen.

3.5.1.4 Uitgangspunten

De algemene uitgangspunten voor het gebruik van bamboe (verbindingen) in het ontwerp zijn hieronder opgesomd.

1. werken met hele stammen
2. verbindingen moeten het ranke karakter van de bamboestammen versterken; de verbindingen zijn ondergeschikt aan de bamboestammen
3. alle details moeten gedekt worden, van fundering naar gevel en tussenvloeren tot dak. De gevels en het dak hebben een glazen bekleding.
4. de verbindingen moeten geschikt zijn voor de bouwwereld in het westen; weinig arbeid en maatvast
5. de verbindingen moeten demontabel zijn om de stammen her te gebruiken, de stammen te vervangen wanneer nodig of het gebouw wordt gedemonteerd (zo kunnen de onderdelen gemakkelijk worden gescheiden)

3.5.1.5 Eindoordeel

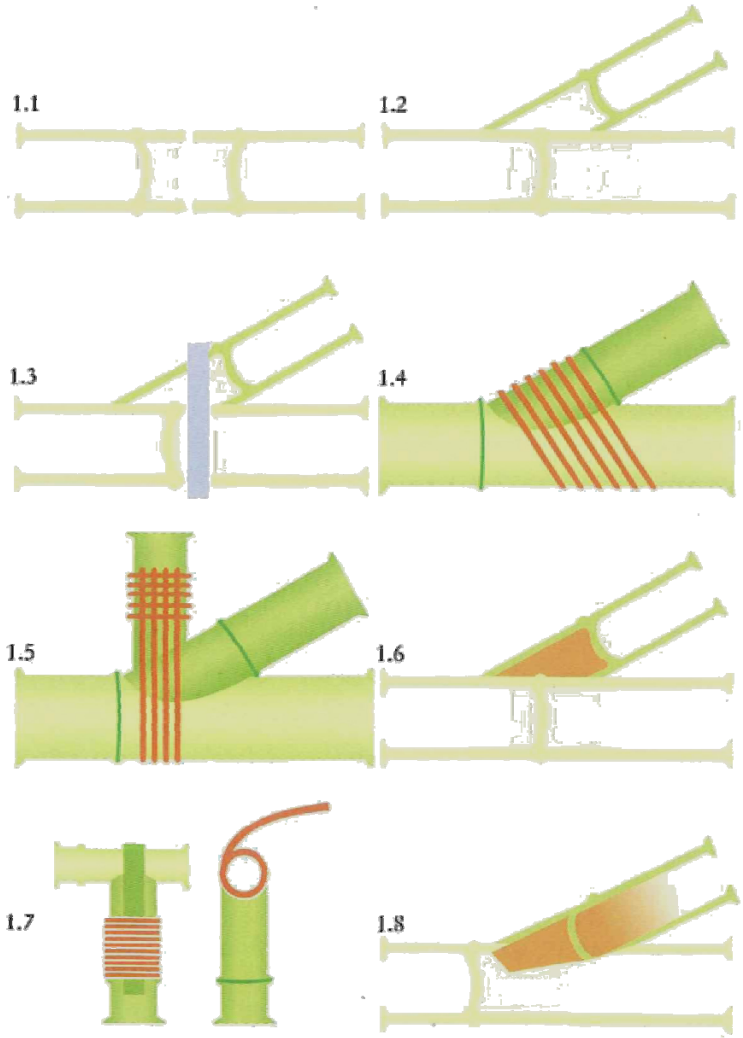
Zoals genoemd zullen de verschillende verbindingen beoordeeld worden op bruikbaarheid in het ontwerp.
Hierbij is ook weer onderscheid gemaakt tussen een aantal categorieën;

- niet bruikbaar,
- verder onderzoek (niet bruikbaar in huidige vorm maar de moeite waard om verder te onderzoeken),
- bruikbaar combi (bruikbaar in combinatie met een andere verbinding),
- bruikbaar (in huidige vorm).

3.5.2 Categorie 1.

Verlengen, bundelen en verschillende richtingen

Zoals gezegd vallen de meeste (traditionele) verbindingen in deze categorie. In afbeelding 62 een kort overzicht.



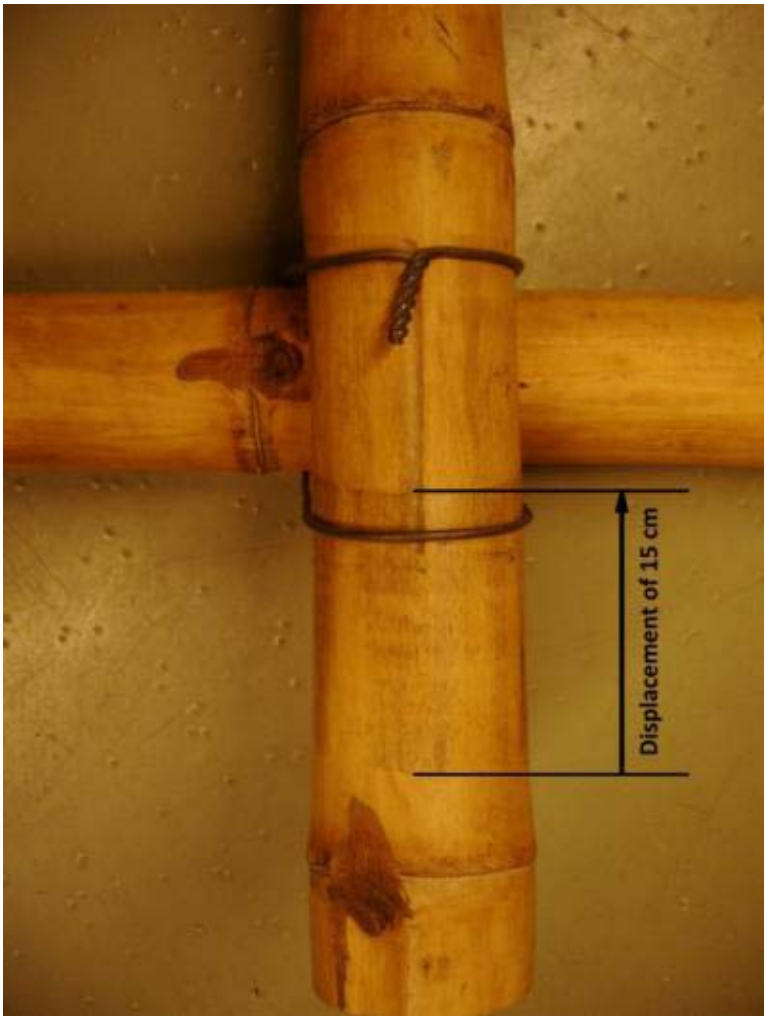
Afb. 62. Overzicht verbindingen categorie 1

1.1 is de meest eenvoudige verbinding in deze categorie, maar tegelijk de meest theoretische. Deze verbinding kan alleen druk opnemen.

1.2 wordt veel toegepast in vakwerken en kan alleen druk en schuifkrachten opnemen. Deze verbinding vraagt een groot vakmanschap.

1.3 en 1.4 lossen de problemen van 1.2 op, maar zijn evengoed moeilijk in toepassing. 1.3 hoort eigenlijk in categorie 5 en 1.4 in categorie 7. Door de pin in 1.3 wordt schuiven van de verbinding voorkomen. In 1.4 gebeurt dit door de binding. Zelfs als een krimpende binding wordt gebruikt zal deze verbinding alleen schuifkrachten kunnen opnemen na enige verplaatsing (dit wordt ook aangetoond door Rinske Wessels in haar afstudeerproject aan de TU Delft) (afbeelding 63).

1.5 is een verbinding die wordt toegepast in vakwerken. In de verticale stam wordt druk opgenomen en in de diagonaal trek. De verticale stam houdt de diagonaal op zijn plek waardoor geen verplaatsing kan optreden.
1.6 is een mortel (of met hout of ander materiaal) gevulde verbinding die voorkomt dat de diagonaal splijt. Het vocht in de mortel kan in de bamboe trekken en leiden tot een zwakke verbinding of splijting van de bamboe. Met hout of een ander droog materiaal is dit wel een goede verbinding.
1.7 wordt heel veel toegepast in traditionele bouw in Azië. Een stuk van de verticale stam wordt om de horizontale stam gebonden en vast gemaakt met een binding. Moeilijk bij schuifbelasting.
1.8 is een verbinding die veel in hout wordt toegepast, maar bij bamboe geen zin heeft door de holle stammen.



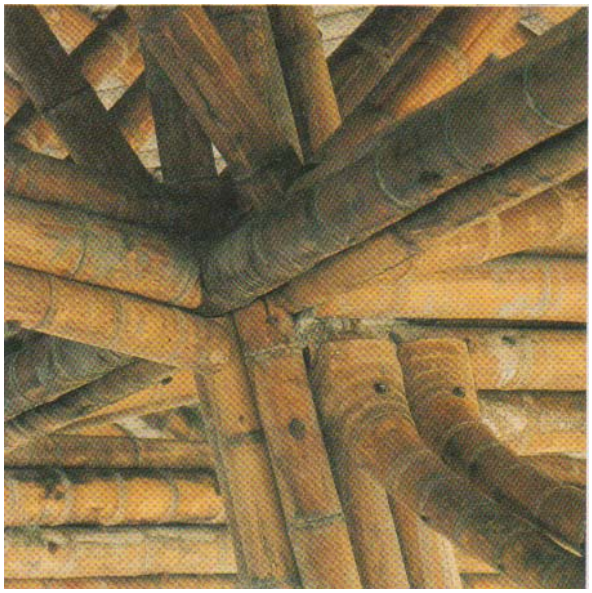
Afb. 63. Knoop met Delftse draadtool na een test op schuifbelasting (Rinske Wessels, 2009)

De traditionele verbindingen kosten allemaal veel tijd om te maken en vergen veel vakmanschap waardoor ze in de westerse wereld duur zijn.
De principes van 1.5 en 1.6 zijn het meest veelbelovend. 1.5 omdat hier gewerkt wordt met een goed verstand van de krachtafdracht in een vakwerkverbinding; het verticale element voorkomt dat de diagonaal verschuift. 1.6 is veelbelovend omdat hier de vulling voorkomt dat de diagonaal gaat splijten en wordt het conact oppervlak vergroot, waardoor een stevigere verbinding ontstaat.
Deze principes zijn bewezen in de hierna getoonde toepassingen (afbeelding 64-68).
Het nadeel van 1.5 is de verwerkingstijd, bij 1.6 is dit de 'natte', onomkeerbare verbinding.
Dit leidt tot de eindconclusie dat deze verbindingen niet bruikbaar zijn in het ontwerp.

Afb. 64. Steigerbouw van bamboe in Shanghai, China

Afb. 65. Phenomena building in Zurich en Rotterdam (expositie

Afb. 66. Detail Phenomena building in Zurich en Rotterdam (expositie gebouw). De verbinding is gemaakt met houten proppen en deuvels



Afb. 67. ZERI paviljoen (expositie gebouw) van Simon Vélez. De verbindingen zijn gemaakt met mortel

Afb. 68. Detail ZERI paviljoen in de maak.

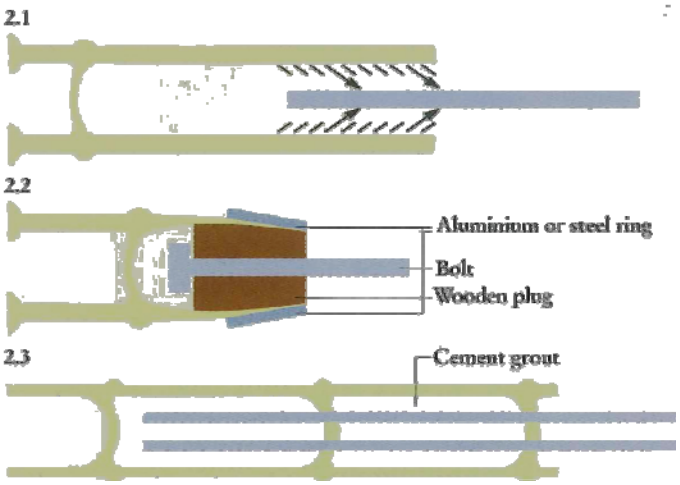
3.5.2.1 Conclusie categorie 1

Uit de analyse van de verbindingen kan worden geconcludeerd dat de enige verbinding die in aanmerking komt voor toepassing in het ontwerp verbinding 1.6 is met als opvulling van de stam een droog materiaal. De andere verbindingen werken niet goed (1.1, 1.3, 1.8), of zijn arbeidsintensief (1.2,1.4, 1.5 en 1.7), of zijn niet demontabel (1.6 met mortel of hars). Verder onderzoek zal gericht moeten zijn op een droge verbinding die minder arbeidintensief is dan 1.6 met een houten vulling.

3.5.3 Categorie 2.

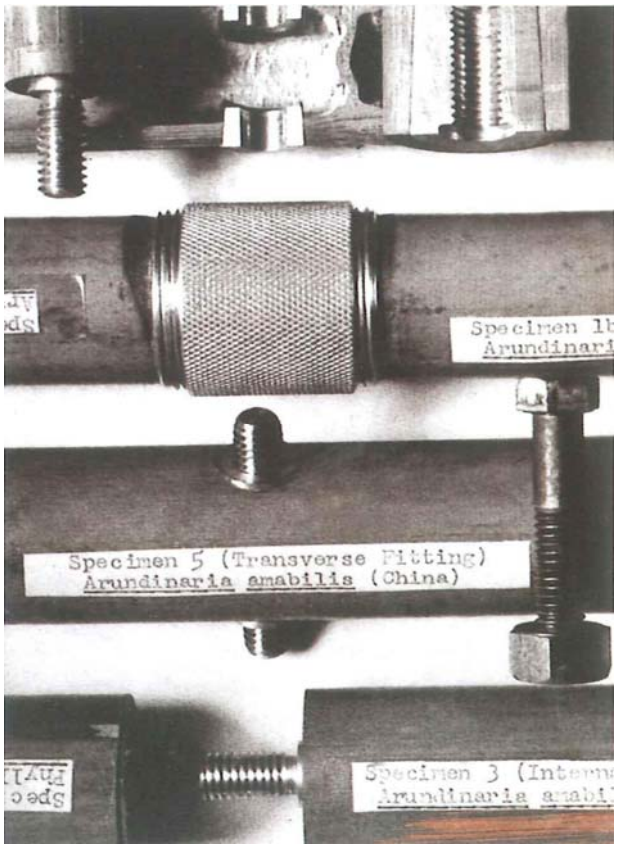
Verlengen en andere materialen

In afbeelding 69 een kort overzicht van deze verbindingen.
2.1 geeft het principe aan van deze categorie.
2.2 is gemaakt met behulp van een houten prop, maar deze prop kan ook van staal of mortel zijn, wat 2.3 aangeeft. 2.2 is erg geschikt onder druk belasting, hoewel een trek belasting ook kan worden opgenomen.



Afb. 69. Overzicht verbindingen categorie 2

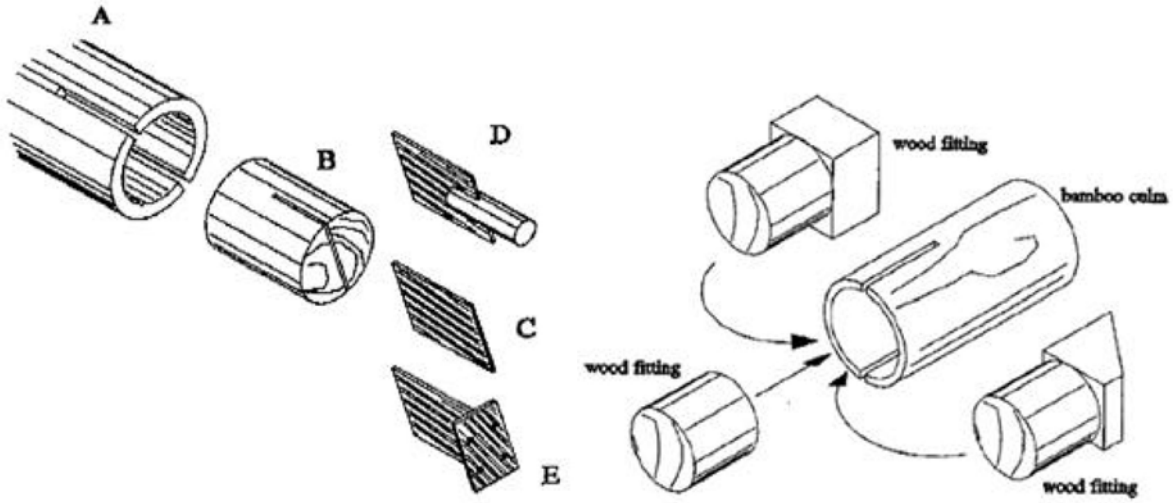
2.3 kan zowel onder druk als trek worden belast (schuiven is hier niet van toepassing). 2.3 is wel een bewerkelijke verbinding en heeft de genoemde problemen van mortel (verbinding 1.6).
Afbeelding 70 laat voorbeelden zien van verschillende stalen toevoegingen die de stammen verbinden. De mogelijke toepassingen zijn hier vooral sport benodigdheden en meubels. Dit is te wijten aan de geringe diameter van de gebruikte stammen. Hierdoor zijn er kleinere absolute maattoleranties voor de stalen verbindingen.
Deze categorie is een veelbelovende in de westerse bouwwereld, omdat het verbinden (op de bouwplaats) gemakkelijk wordt en dus minder tijd kost (minder arbeid=minder kosten). Daarbij blijft de stam intact, waardoor de kracht van de stam behouden blijft en de kans op splijten klein is. Er moet wel aandacht besteedt worden aan het toevoegen van stalen of houten elementen, zodat maat- en vorm verschillen kunnen worden opgevangen.



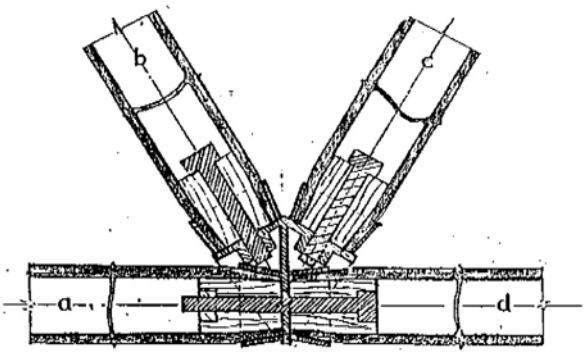
Afb. 70. Diverse verbindingen uit categorie 2

Dit type verbindingen is geschikt voor toepassing na verder onderzoek. Het onderzoek moet zich dan richten op de maat- en vorm verschillen van de stammen, die bij grote diameter van de stammen relatief groot kan zijn (met name de vorm van de doorsnede kan boven de cm afwijken van rond).

Hieronder een aantal andere voorbeelden van dit type verbindingen (afbeelding 71-92).



Afb. 71 en 72. Houten proppen en (stalen) hulpstukken in de holte van de stam die het contactoppervlak vergroten en de verbinding makkelijker maken



Afb. 73. Houten proppen en (stalen) bouten in de holte van de stam die het contactoppervlak vergroten en de verbinding makkelijker maken.
(C.H. Duff 1941)

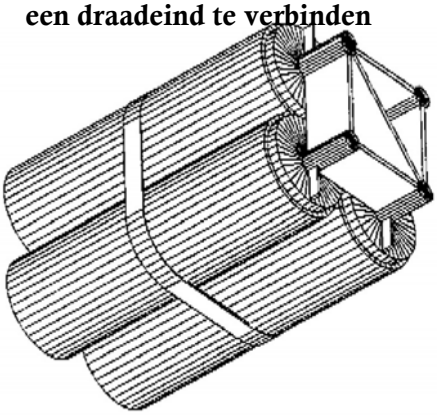
Afb. 74. Verbinding ontwikkelt door Simon Vélez. De verbinding is gemaakt met draadeind in mortel.

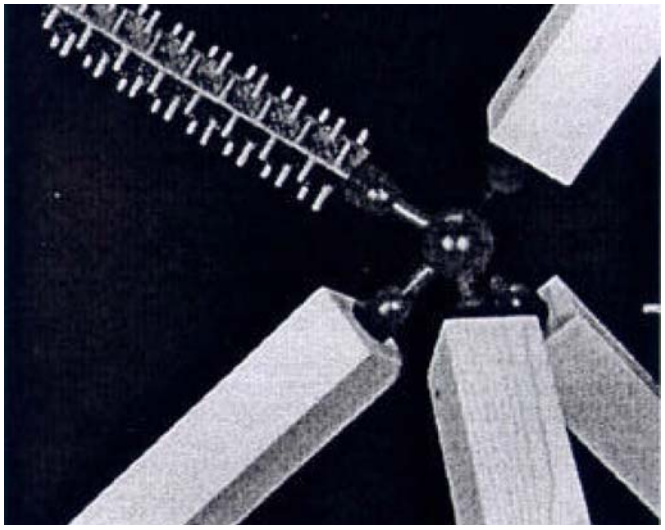
Afb. 75-80. Verbinding ontwikkelt door CONBAM (een Duitse bamboespecialist).

De verbinding is gemaakt door een draadeind met een kunsthars aan de stam te verbinden en daar vervolgens de hulpstukken aan te maken.

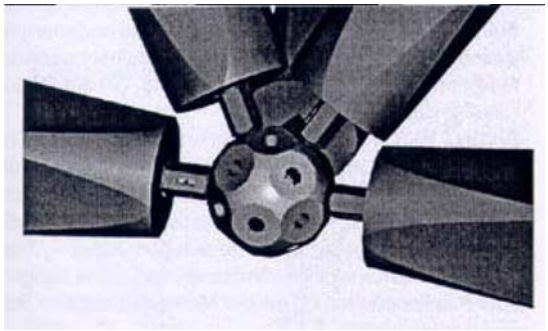
Afb. 81 en 82. Houten proppen en (stalen) bouten verbonden met een stalen element om verschillende richtingen op elkaar aan te sluiten.

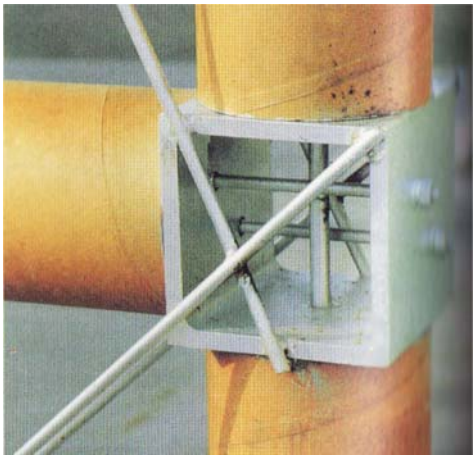
Afb. 83. Stalen hulpstukken om te bundelen en een draadeind te verbinden

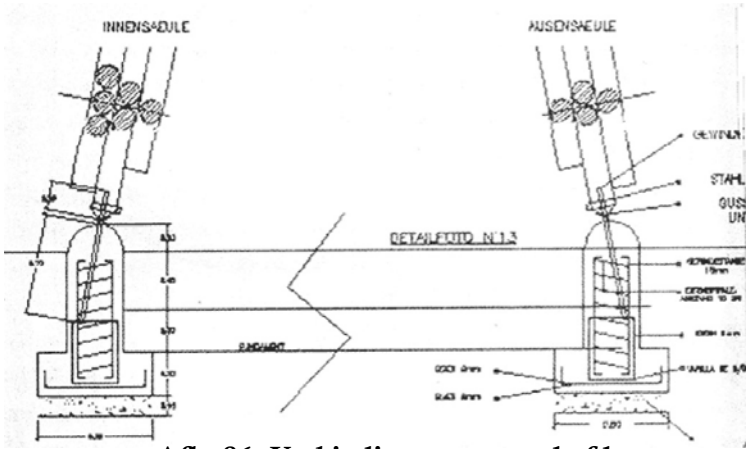




Afb. 84 en 85. Stalen hulpstukken om een ruimtevakwerk te maken. Afb. 84. In de bamboestam verbinden met hars of mortel, afb. 85. Stalen schoen om de stam heen







Afb. 86. Verbinding met mortel of hars met stalen hulpstukken, 87. Verbinding met staaldraad en stalen platen (Renzo Piano), 88. Verbinding met mortel en staal op betonnnen voet (Simon Vélez), 89. Verbinding met Aluminium hulpstuk (papieren kokers, Shigeru Ban), 90. Verbinding met stalen buizen in de stam (Shoei Yoh), 91. Doorsnede fundering ZERI paviljoen (Simon Vélez), 92. Funderingdetail met beton (Christoph Toengens, CONBAM)

3.5.3.1 Conclusie categorie 2

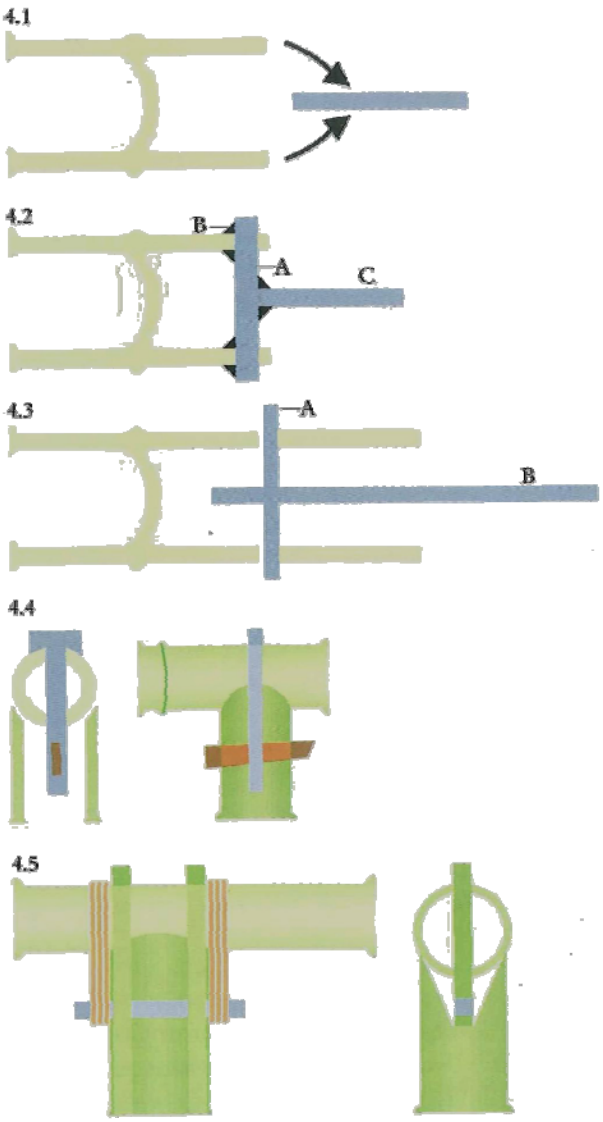
Zoals gezegd zijn de verbindingen in deze categorie veelbelovend, maar moeten ze verder worden onderzocht. Het onderzoek moet zicht richten op de maat- en vormverschillen van de stammen. Daarbij hebben alle voorbeelden een intermediair nodig om een verbinding te maken in een andere richting of om de stammen te bundelen. Ook hiervoor is nader onderzoek gewenst, specifiek op de verbindingen die gemaakt moeten worden in het ontwerp.

3.5.4 Categorie 3.

3.5.5 Categorie 4.

Verlengen en andere materialen

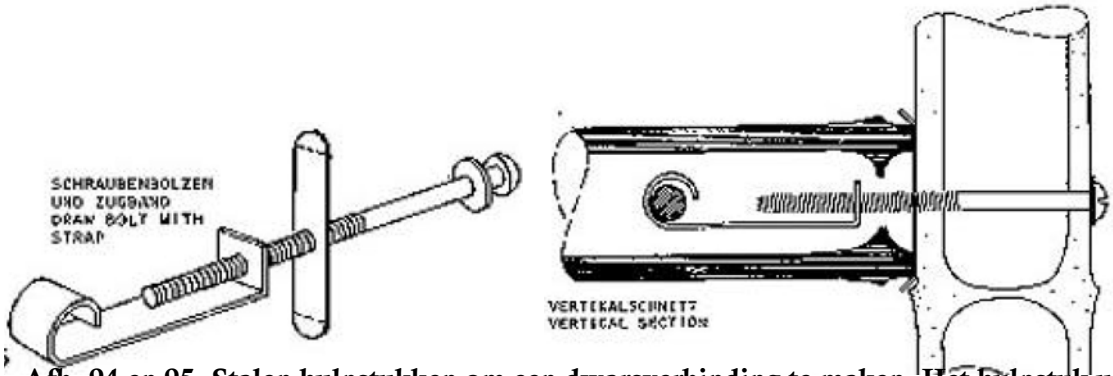
4.1 geeft het principe weer van deze categorie verbindingen.
4.2 is gemaakt met een rondvormige plaat en een pin dit gelijmd zijn op de bamboe stam. Deze verbinding is in de praktijk nooit gezien, omdat het lijmen van de plaat een probleem is.
4.3 verbetert de verbinding van 4.2 door penetratie van de stam. Als pin A extern wordt gefixeerd een prima verbinding, wanneer gebout, kan de bamboe splijten. Deze verbinding is vooral geschikt onder trek belasting.
4.4 wordt ook niet in de bouwpraktijk gezien door de zwakke weerstand tegen trek door de beperkte schuifweerstand.
4.5 bestaat uit twee bamboe pinnen en een stalen pin die met elkaar worden verbonden en door een binding met de horizontale stam worden verbonden.
4.4 en 4.5 worden veel toegepast in tuinhekken in Azië, waarbij 4.5 ook in de bouw kan worden toegepast, geschikt voor elke belasting.



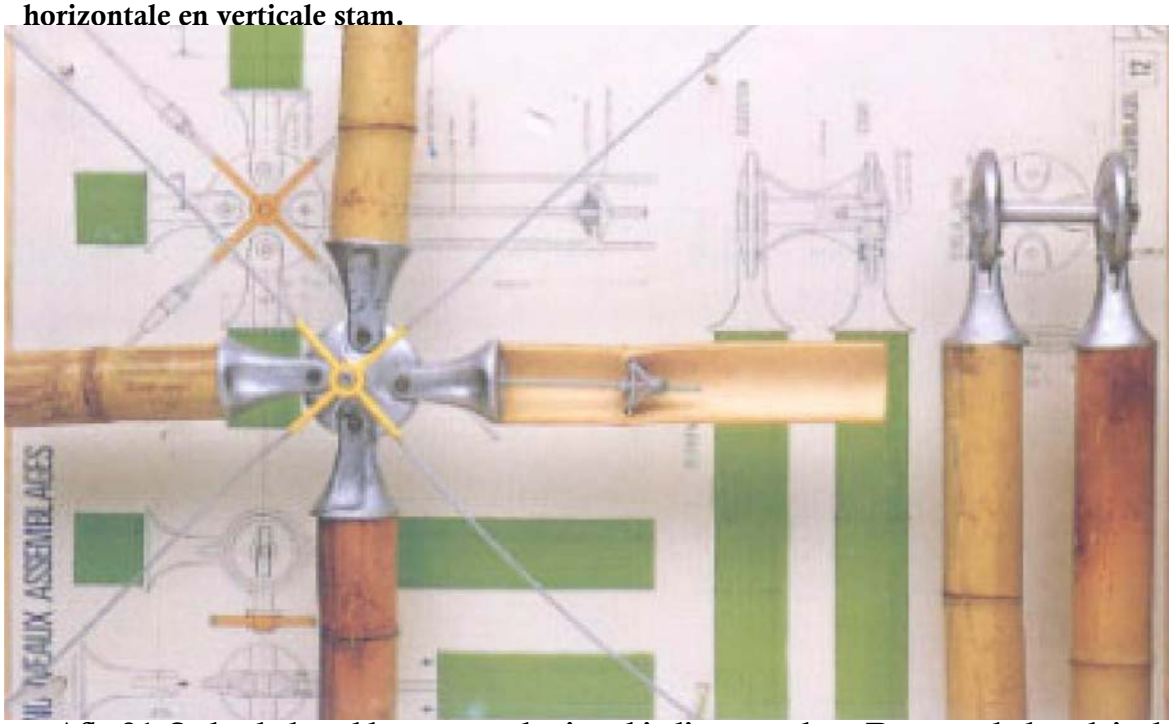
Afb. 93. Overzicht categorie 4

Penetratie van de stam maakt de stam zwakker, waardoor een overdimensie of toevoeging nodig is. Daarbij kan de stam gaan splijten. Dit kan ook worden opgevangen door een toevoeging (binding of band om de stam).
In verschillende onderzoeken (Hidalgo, 2003; Janssen, 2000; Van der Lugt, 2004) wordt aangeraden de bamboestammen zoveel mogelijk intact te houden. Penetratie zorgt niet alleen voor splijten en verzwakking van het materiaal op zich, maar ook voor risico op aantasting door schimmels en insecten. Als de stam wordt gepenetreerd, moet het gat ook weer worden afgedicht, zodat schimmels en insecten niet de stam kunnen binnendringen en aantasten.

Door het geringe oppervlak waarmee wordt verbonden is dit type verbinding moeilijk bruikbaar in de bouw. Hieronder een aantal voorbeelden van verbindingen die hierop inspelen (afbeelding 94-96).



Afb. 94 en 95. Stalen hulpstukken om een dwarsverbinding te maken. Het hulpstuk uit afb. 94 wordt op de manier van afb. 95 toegepast. Hierdoor wordt de kracht overgedragen door de hulpstukken en de doorsnede en wand van respectievelijk de horizontale en verticale stam.



Afb. 96. Stalen hulpstukken om een kruisverbinding te maken. Door een hulpstuk in de stam te laten en deze met een bout aan de kopplaat te verbinden wordt de doorsnede van de ring benut om de verbinding te maken. Een moeilijke verbinding, omdat de binnenzijde van de stam niet altijd evengoed bereikbaar is (Renzo Piano).

3.5.5.1 Conclusie categorie 4

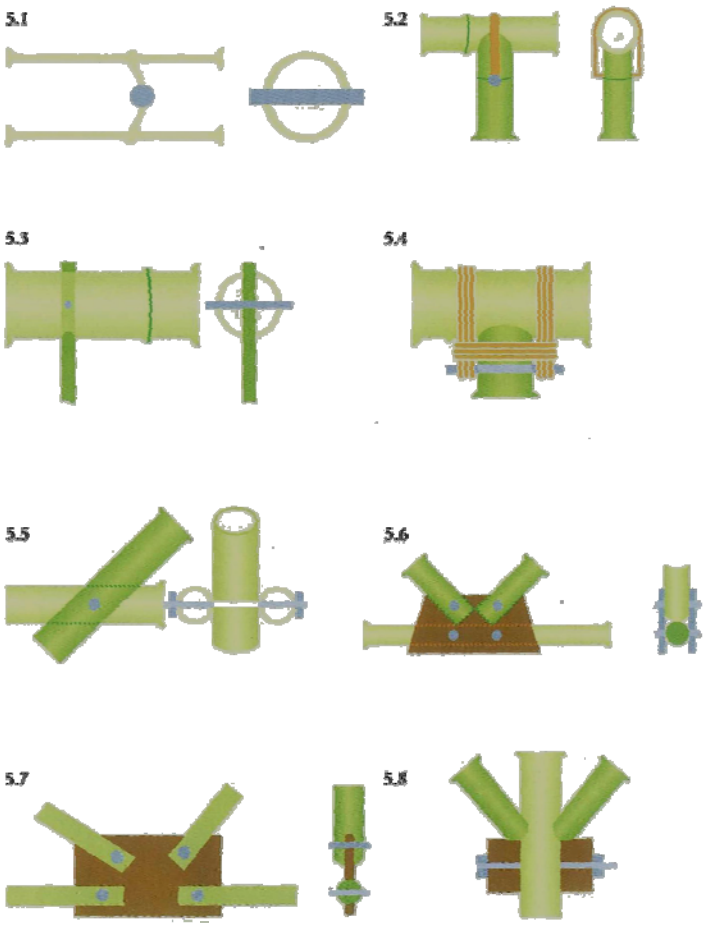
De eindconclusie is dat dit type verbindingen niet bruikbaar is voor het ontwerp. Dit is vooral te wijten aan de aanwezigheid van de verbinding. Om een groot verbindingsoppervlak te krijgen is veel materiaal nodig, waardoor de knopen meer opvallen. Dit past niet in de gestelde uitgangspunten. Wel kan geleerd worden van de manier waarop een intermediair wordt ingezet en vormgegeven.

3.5.6 Categorie 5.

Verlengen, bundelen, verschillende richtingen en andere materialen

Zoals gezegd zijn de pinnen en bouten hier de verbindende elementen. Afbeelding 97 geeft een overzicht.

5.1 is weer het principe.
5.2 maakt gebruik van een binding die om de pin wordt gebonden om de elementen aan elkaar te maken. Deze wordt veel gezien in tuinhekken, maar is ongeschikt voor de bouw omdat het geen schuifkracht kan opnemen.
5.3 kan in de bouw alleen als trekverbinding worden toegepast door de zwakte van de bamboepin.
5.4 lijkt op 4.5 en kan zowel druk als trek opnemen. Ook hier is het opnemen van schuifkrachten een probleem.
5.5 wordt vaak gebruikt in

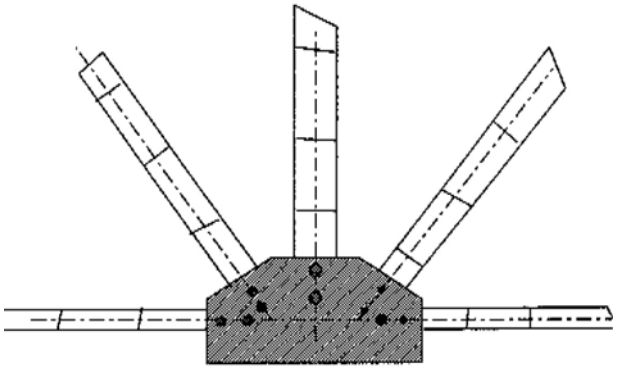


Afb. 97. Overzicht categorie 5

vakwerken. De horizontale elementen zijn dubbel en de verticale en diagonale enkel. De bouten kunnen zorgen voor splijten van de bamboe wanneer ze te strak worden aangedraaid.
Deze verbinding kan het beste worden gecombineerd met de verbinding van een verticaal onderdeel om grote dwarskrachten in de verbinding op te vangen (zoals bij verbinding 1.5).
5.6 en 5.7 hebben plaatmateriaal als toevoeging, toegepast aan beide zijden of in het midden. Deze verbinding komt ook wel voor in gelijmde vorm. Doordat de stammen open blijven, is dit moeilijk om toe te passen.
5.8 is een verbinding die veel wordt gezien in Zuid-Amerika. Een houten blok wordt aan de stam gebout en ondersteunt de diagonalen. De verbinding komt ook wel voor met bamboe stammen in plaats van een houten blok. Deze kunnen zowel in horizontale als verticale positie worden toegepast, waarbij de verticale positie de voorkeur heeft, omdat deze samen met het doorgaande element op de fundering kan worden gefixeerd en afschuiven in de verticale richting daardoor vrijwel onmogelijk is.

Alle verbindingen in deze categorie hebben als nadeel dat de bamboestam moet worden gepenetreerd, waardoor het (een deel van) zijn kracht verliest en kans heeft op splijten. Dit moet worden opgevangen door het verbindende intermediair, een toevoeging tegen splijten of een extra stam. Zoals genoemd moet het gat weer worden gedicht, hoewel dit hier geen probleem is, omdat het verbindende element het gat al afdicht.

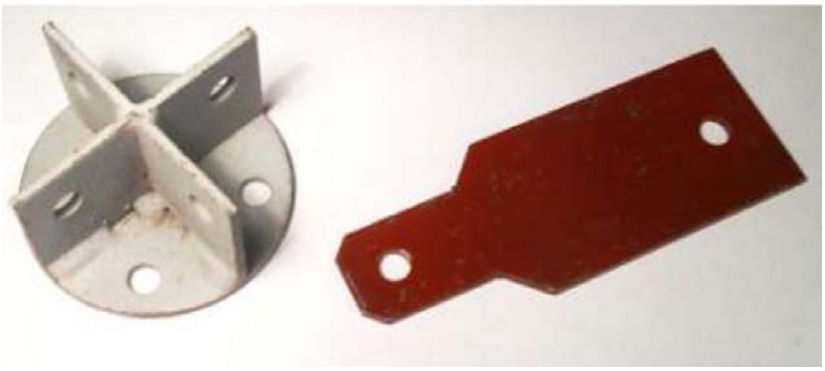
Hieronder een aantal praktijkvoorbeelden (afbeelding 98-105).

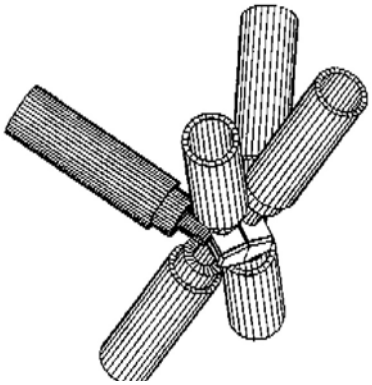


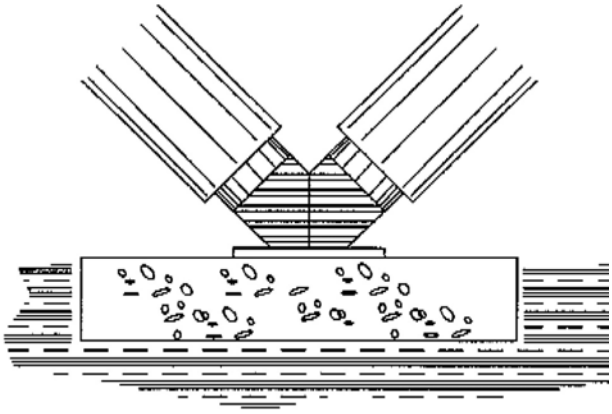
Afb. 98. 5.8 met een verticale toevoeging, afb. 99. Met bouten gebundelde elementen verbonden met stalen strippen

Afb. 100. Stalen strippen verbonden met een ring om de stam, verbonden met bouten. Hoge perforatiegraad van de stam

Afb. 101. Een wel hele forse stalen verbinding van bundels stammen uit verschillende richtingen op een betonnen voet. De stammen zijn door middel van toevoegingen in de stammen verbonden met de stalen schoen.







Afb. 102. Stalen verbindingen

Afb. 103. Een toepassing van de verbindingen uit afb. 102. De stammen zijn inwendig verbonden, afb. 104. De stammen worden inwendig verbonden aan stalen strippen die met bouten aan het beton worden verbonden, afb. 105. Vergelijkbaar met afb. 86 (categorie 2), inwendig verbonden door mortel, hars of proppen.

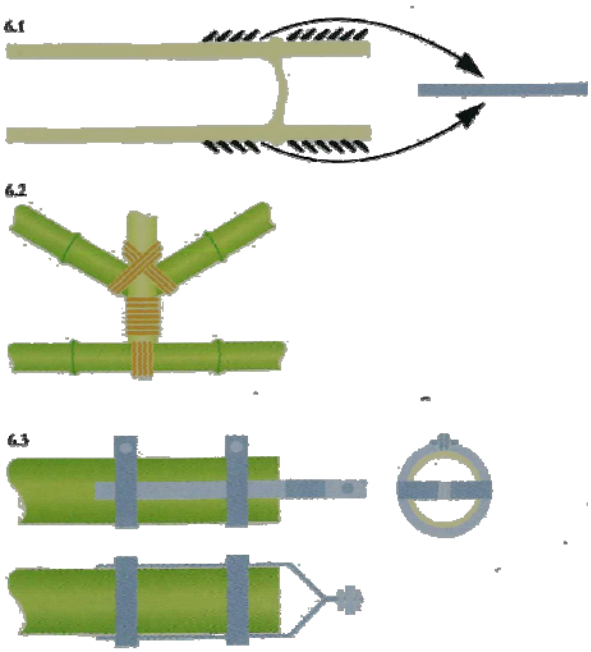
3.5.6.1 Conclusie categorie 5

Evenals in categorie 4 is het verbindingsoppervlak hier klein. De voorbeelden uit categorie 4 zijn ook hier van toepassing in het oplossen van dit probleem. Het eindoordeel is dat dit type verbinding niet bruikbaar is in het ontwerp door de prominente aanwezigheid van de verbinding. Verder kan hier de conclusie worden getrokken dat een intermediair nodig is om verschillende richtingen aan elkaar te verbinden en de stammen te bundelen. Hoewel de primaire verbinding niet geschikt is voor toepassing, kunnen de intermediairs in de voorbeelden wel nader worden bestudeerd om tot een geschikte vorm te komen.

3.5.7 Categorie 6.

Verlengen en andere materialen

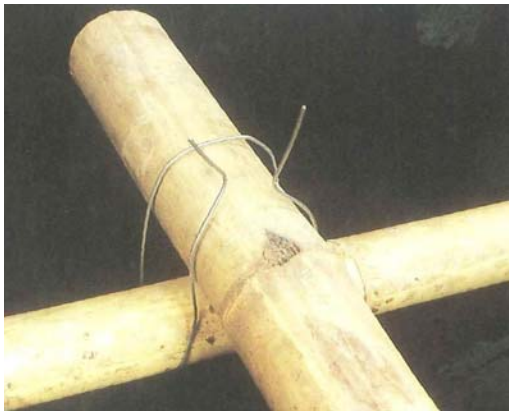
6.1 geeft het principe van de verbinding weer. Traditioneel wordt binding gebruikt, in de moderne variant stalen klemmen (lijkend op slangenklemmen).
6.2 is de traditionele variant en 6.3 de moderne variant. De moeilijkheid zit in de strakke verbinding tussen de binding en de stammen.



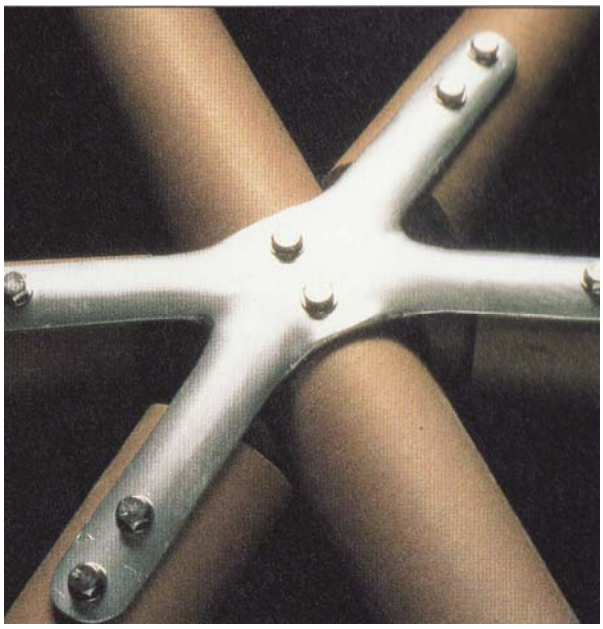
Afb. 106. Overzicht categorie 6

In Delft is een verbinding met staaldraad ontwikkeld die dit principe aanhoudt, maar ook hier is het probleem de strakke binding (afbeelding 63).
Als deze niet strak genoeg is kan de verbinding geen schuifkracht opnemen. Een te strakke verbinding kraakt de stam (dit geldt vooral voor de moderne variant). Druk en trek op de verbinding zijn geen probleem.

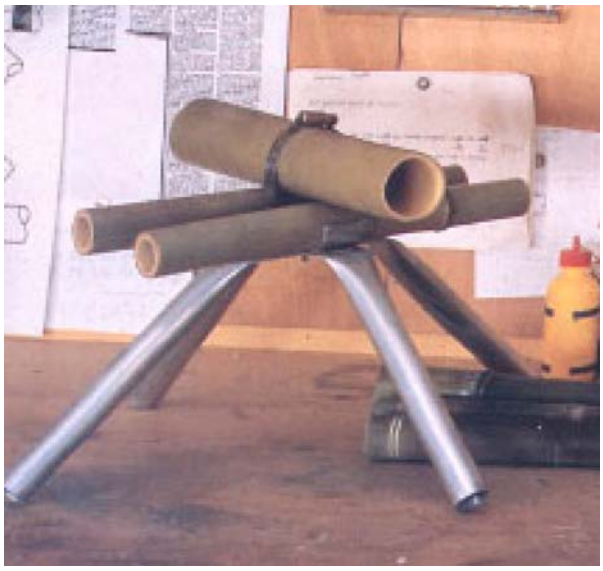
Hieronder weer een aantal praktijkvoorbeelden van dit principe. De meeste van deze verbindingen ogen nogal grof, zoals ook vergelijkbare verbindingen in categorie 2 (afbeelding 107-110).



Afb. 107. 'Delftse draadverbinding' uit Janssen, 1981



Afb. 108. Verbinding met stalen plaat en bouten (papieren kokers, Shigeru Ban)



Afb. 109. Verbinding met stalen strippen, kokers en slangenklemmen (Renzo Piano)

Afb. 110. Verbinding met houten tussenstuk en bouten (kleine diameter stammen, Cristoph Toengens) Door de afstand tussen de stammen een hele chique verbinding. De bouten verstoren het beeld een beetje en maken de bamboe zwakker (bij deze diameter is dat niet een groot probleem, omdat de verhouding diameter en wanddikte klein is)

3.5.7.1 Conclusie categorie 6

Uit esthetisch oogpunt wordt deze categorie verbindingen beoordeeld op verder onderzoek. De verbinding is hier, net als bij categorie 4 en 5 erg aanwezig en leidt af van de bamboe stammen. Er is hier gekozen voor verder onderzoek, omdat voor het bundelen van de stammen en het aansluiten op andere materialen dit principe goed kan worden toegepast. Het onderzoek moet zich richten op een gemakkelijke verwerking en een mooie verbinding.

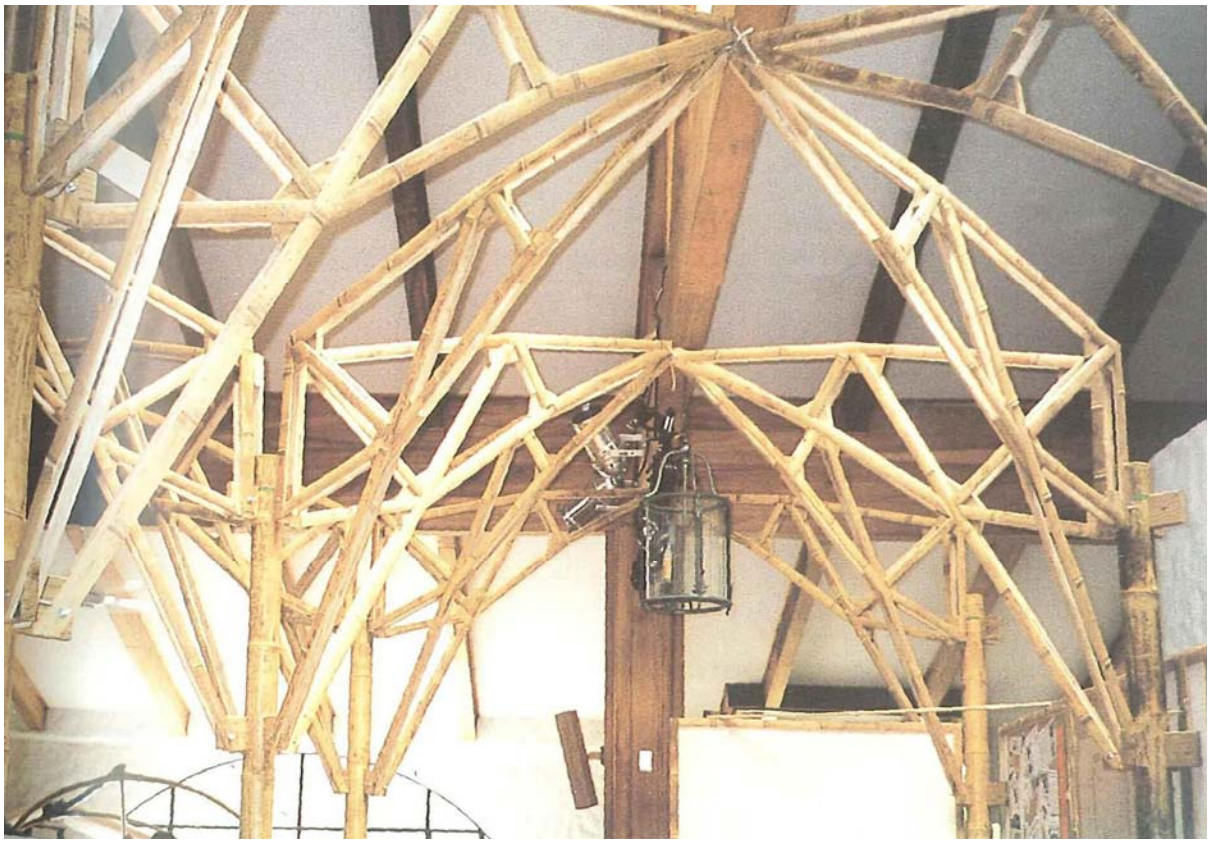
3.5.8 Categorie 7.

3.5.9 Categorie 8.

Verlengen, bundelen, verschillende richtingen en andere materialen

In categorie 8 bespreekt Janssen alleen de afbeeldingen van gespleten bamboe. Het heeft volgens hem toekomst omdat een aantal nadelen van stammen worden overkomen. Bamboe kan in zoveel stukken worden gespleten dat een groot, vlak oppervlak ontstaat, wat de verbindingen een stuk makkelijker maakt.
Lijm, strips, nagels en schroeven kunnen nu worden gebruikt om de verbindingen te maken. Daarbij kan het zachte weefsel uit de binnenzijde worden verwijderd, wat de bamboe als grondstof aantrekkelijker maakt.
Hiernaast een aantal voorbeelden van toepassingen van gespleten bamboe; deurkozijnen en een vakwerkconstructie (afbeelding 111-113).

Afb. 111 en 112. Deurkozijn, verbinding met stalen strip



Afb. 113. Vakwerkconstructie van gespleten bamboe, de verbindingen zijn gemaakt met houten tussenstukken en nagels

3.5.9.1 Conclusie categorie 8

Deze categorie wordt beoordeeld op niet bruikbaar door het toepassen van gespleten bamboe. Zoals in de uitgangspunten genoemd is gesteld dat hele stammen moeten worden gebruikt.

3.5.10 Algemene conclusie verbindingen in het ontwerp van de serres

Uit de conclusies van de besproken verbindingen komt naar voren dat slechts 2 categorieën (categorie 2 en 6) nader onderzocht kunnen worden voor toepassing in het ontwerp. Het gaat hierbij puur om het maken van de verbinding met de bamboe stam. Uit categorie 1 kan verbinding 1.6 onderzocht worden, hoewel het principe van deze verbinding lijkt op de verbindingen in categorie 2 en 6 en de gebruikte vulling een intermediair is.
Uit categorie 4 en 5 kunnen de intermediairs verder onderzocht worden.

Opvallend is in de eerste plaats dat vrijwel overal een hulpstuk wordt gebruikt voor de overgang naar andere richtingen en materialen.
In de tweede plaats is het erg opvallend dat bijna nergens met meerdere stammen in dezelfde richting wordt gewerkt. Voor de toepassing in de serres is dit een absolute noodzaak, vanwege de krachten die moeten worden opgevangen.

3.6 Ontwikkeling nieuwe verbindingen

De principes van categorie 2 en 6 zijn goed vergelijkbaar; beide gaan over de verbinding van bamboo met een element dat parallel loopt aan de richting van de stam. Het verschil is dat voor categorie 2 de binnenzijde wordt gebruikt als contactoppervlak, waar dat bij categorie 6 de buitenzijde is.

Één van de uitgangspunten is dat de verbinding ondergeschikt moet zijn aan de bamboe stam(men). Om die reden komen de verbindingen van categorie 2 het eerst in aanmerking om nader te onderzoeken.

3.6.1 Nader onderzoek verbindingen categorie 2 en 6

In het geval van verbinding 2.2 wordt alleen het uiteinde van de stam gebruikt om de verbinding te maken. Om de verbinding steviger te maken moet het contactoppervlak vergroot worden. Verbinding 2.3 doet dit door een vloeistof in meerdere holtes te laten vloeien. Hierbij wordt de verbinding niet alleen gegarandeerd door een groter oppervlak aan de binnenzijde van de wand, maar ook door gebruik te maken van de ringen in het midden van de bamboe.
Het is echter niet mogelijk dit met een droge vulling te bereiken.

Om toch tot een groter oppervlak te komen zou een groter hulpstuk kunnen worden gebruikt, zoals bij de droge variant van verbinding 1.6. Dit heeft als nadeel dat veel arbeid voor nodig is om het hulpstuk op maat te krijgen, door de maat- en vormverschillen van de bamboe. In het zoeken naar een oplossing voor dit probleem kwam het idee naar voren om het principe van een ballenhoofd van een fietsstuur te gebruiken (afbeelding 114).

Afb. 114. Principe knelverbinding gebaseerd op ballenhoofd

Om de knelverbinding te maken in de stam is gebruik gemaakt van twee stukken bamboe van een kleinere diameter dan de te verbinden stam, zodat deze in de stam kunnen worden gelaten. Door deze stukken schuin af te zagen, krijgen ze bij het aandraaien een grotere diameter en knellen ze in de grotere stam. Hierdoor wordt een groot contactoppervlak verkregen.
Het nadeel van deze verbinding is dat de grote stam van binnen uit kan gaan splijten. Om dit tegen te gaan is een uitwendig element nodig die het splijten voorkomt.

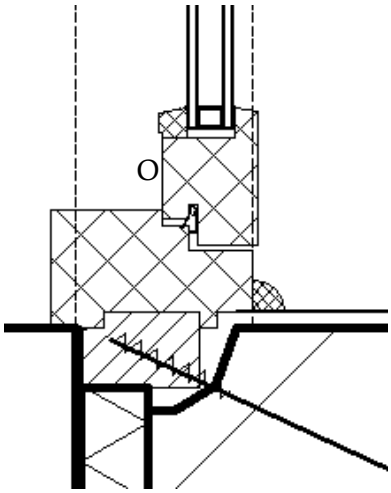
Met deze verbinding is verder gegaan met het onderzoek, omdat de verbinding aan alle uitgangspunten voldoet.
Het principe om de stammen te verlengen vraagt alleen nog om een toevoeging die het splijten van de stammen van binnen uit tegen gaat. Om dit te ontwikkelen is gekeken of dit gecombineerd kan worden met één van de andere verbindingen.

Allereerst is een manier gezocht om de stammen te bundelen. Uit een vereenvoudigde constructieberekening komt naar voren dat voor de warme serre 6 stammen nodig zijn om alle krachten op te vangen (bijlage 10).
Om de bogen evengoed een slanke uitstraling te geven is uitgegaan van een bundeling van de stammen met tussenruimte, zoals te zien is in afbeeling 110 en 115.

Afb. 115. Principe bundeling van 6 stammen

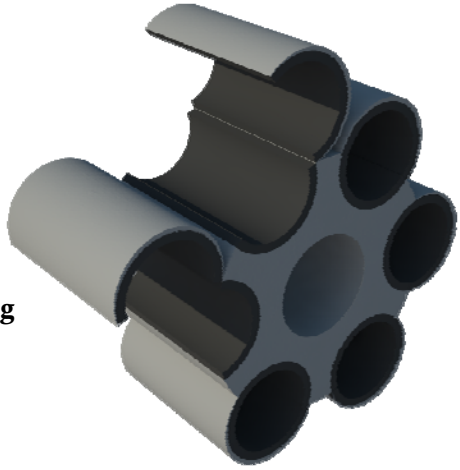
Uitgangspunten bij het bundelen van de stammen zijn dat de stammen niet gepenetreerd mogen worden en een kracht uitgeoefend moet worden op de buitenzijde van de stam, om splijten tegen te gaan door de verbinding voor het verlengen van de stammen. Hier komt het principe van categorie 6 weer aan bod; verbinding van de stam parallel aan de richting van de stam door gebruik te maken van de buitenzijde van de stam.
Om een verbinding mogelijk te maken om de stam heen, moet een hulpstuk worden gebruikt dat de maat- en vormverschillen van de stam kan opnemen.

Hierbij is gekeken naar de manier waarop een gevelopening wind- en waterdicht wordt gemaakt; door middel van een sponsachtig materiaal, namelijk celrubber. Dit materiaal moet strak om de stam heen worden gemonteerd, om het contactoppervlak van de verbinding te maximaliseren. Om deze reden is gekozen voor een element dat om de stam heen scharniert en wordt gefixeerd, zoals ook een raam scharniert en wordt gefixeerd, om zo het celrubber aan te drukken om de wind en het hemelwater buiten te houden (afbeelding 116).



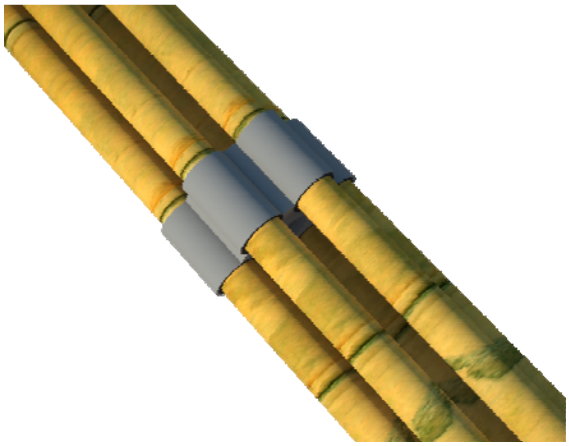
Afb. 116. Detail raamaansluiting

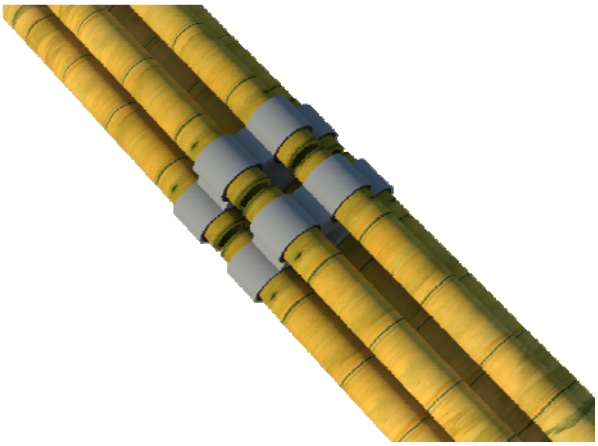
Per hulpstuk zijn 6 van deze scharnierende verbindingen nodig die gekoppeld moeten worden en als geheel de vorm nastreven van de houten verbinding in afbeelding 115 (afbeelding 117).



Afb. 117. Stalen bundel element

De maakbaarheid en krachtafdracht van dit element hebben geresulteerd in een stalen element dat de stammen moet bundelen. Nadeel van het staal is het gewicht van het element (9 kg).
In eerste instantie is dit element bedacht als afdekking van het hulpstuk dat de stammen, of eigenlijk de draadeinden uit de stammen, verbindt. Uiteindelijk is ervoor gekozen het bundel element niet 1x per verlenging toe te passen, maar een kleiner element te gebruiken dat 2x wordt toegepast per verlenging (afbeelding 118 en 119).





Afb. 118. en 119. Stalen bundel element; uit één stuk, in twee delen

Dit heeft een aantal voordelen:

1. de elementen kunnen zo geplaatst worden dat het knelelement en het bundelelement exact op hetzelfde deel van de stam werken
2. de stammen kunnen gebundeld aangeleverd worden en hoeven op de bouwplaats alleen gemonteerd te worden (verlenging en aansluitingen in andere richtingen en aan andere materialen)
3. het resultaat heeft een slankere uitstraling, is minder aanwezig (zie afbeelding 118 en 119)

3.6.2 Nader onderzoek hulpstukken verschillende richtingen en andere materialen

Zoals gezegd is voor de verbindingen een hulpstuk nodig om alle typen verbindingen die nodig zijn in het ontwerp, te weten:

a) verlengen
b) bundelen
c) verschillende richtingen verbinden
d) aan andere materialen verbinden

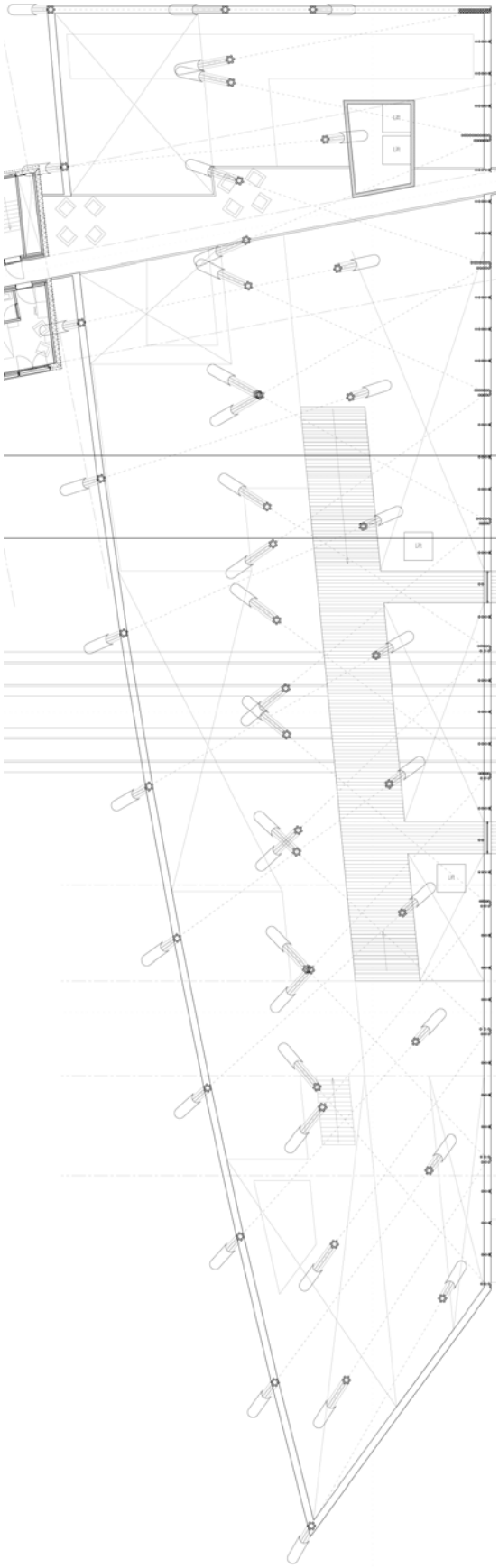
In het vorige hoofdstuk zijn de verbindingen en hulpstukken voor het verlengen en bundelen al besproken. Voor het verlengen is nog een element nodig dat de twee draadeinden verbindt, voor de verbindingen in verschillende richtingen en aan ander materialen is ook nog een hulpstuk nodig.

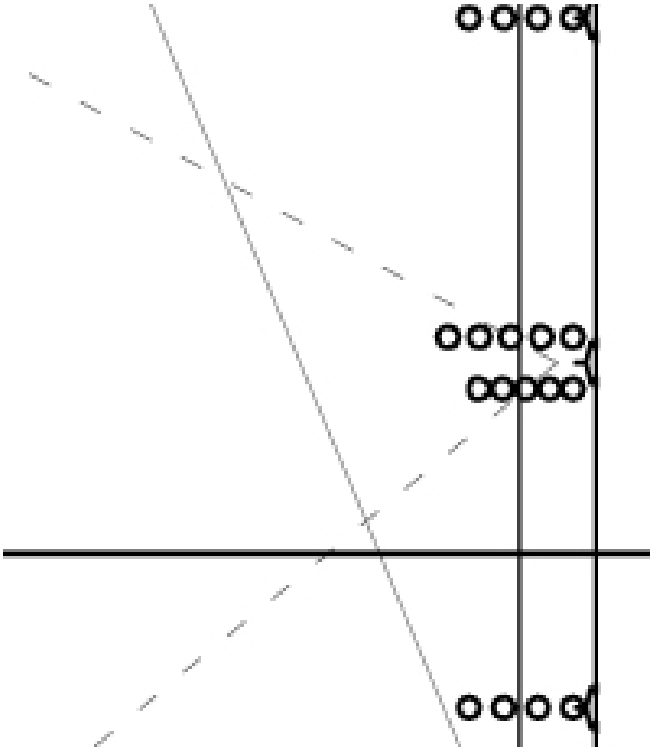
Om tot een makkelijke verbinding te komen is een hulpstuk nodig dat in de westerse bouwwereld aansluiting vindt. Het onderzoek is daarbij uitgegaan naar standaard elementen.
Opvallend is dat de meeste verbindingen met een hulpstuk zoals besproken gebruik maken van stalen verbindingen, in de meeste gevallen verbonden met draadeind of bouten. In het kader van de westerse bouwwereld is dit goed te begrijpen; bijna alle constructieve verbindingen in de huidige bouwpraktijk komen tot stand met bouten en/of stalen hulpstukken, omdat deze gestandaardiseerd zijn (bouten en draadeind) of gemakkelijk te bewerken zijn (staal).

Voor het principe van de knelverbinding is al gewerkt met draadeind en stalen ringen om de bamboe op spanning te krijgen in de stam. Ook voor de bundeling is gekozen voor een stalen verbinding. Uitgangspunt voor de overige elementen is deze ook in staal uit te voeren en aan te laten sluiten op de draadeinden.

In het onderzoek naar de hulpstukken is het belangrijk te weten hoe de verschillende aansluitingen eruit zien; welke richtingen moeten gekoppeld worden en hoeveel en op welke

manier moeten de stammen gebundeld worden. Daarom zijn de stammen en richtingen schematisch weergegeven in afbeelding 120 en 121.

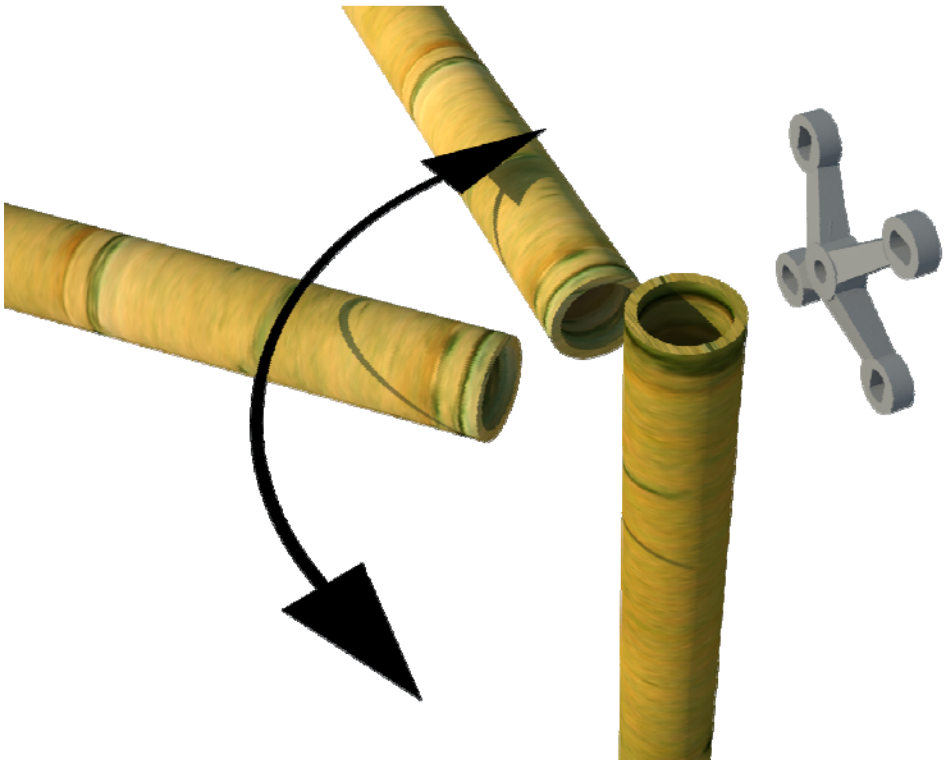




Afb. 120. Plattegrond eerste verdieping warme serre. De leidende aansluitingen, namelijk degene met de meeste aansluit richtingen, bevinden zich aan de linkerzijde aan de gevel en in de top van de bogen aan de rechterzijde.

Afb. 121. De grijze stippellijnen geven de richtingen van de bogen aan. Aan de linkerzijde is te zien dat bij de dubbele kolommen bogen in twee richtingen aangesloten moeten worden. Daarbij moet er een mogelijkheid zijn tot een verbinding tussen de kolommen, in de plattegrond verticaal. Als laatste aansluiting moet de glazen gevel gemonteerd worden op de kolommen. Er komen in dat punt dus 5 richtingen samen, plus de gevel. Om deze verbinding te maken is gekozen om een dubbele kolom te maken, zodat per kolom een boog, een onderlinge verbinding en de gevel aangesloten moet worden.

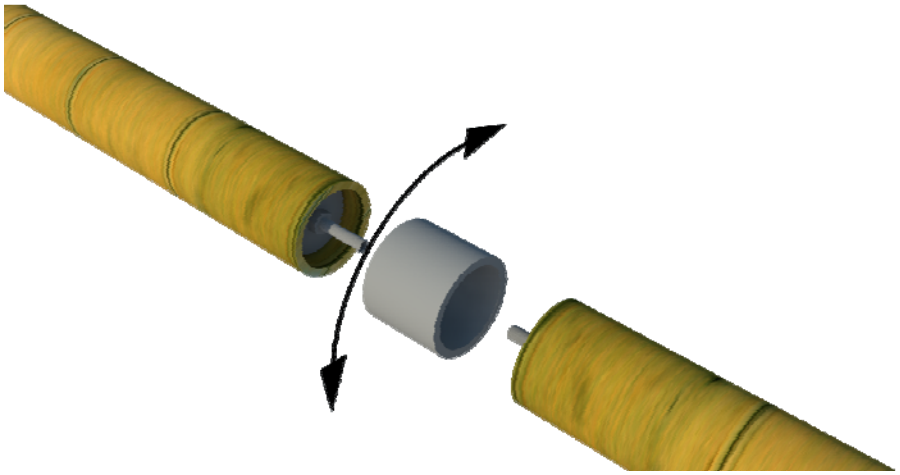
Zoals beschreven in de toelichting van afbeelding 121, moeten de kolommen in vier richtingen aansluitingen maken. Driedimensionaal resulteert dit in het schema zoals in afbeelding 122 weergegeven.



Afb. 122. Schematische weergave van de verbinding in de Oostgevel van de warme serre

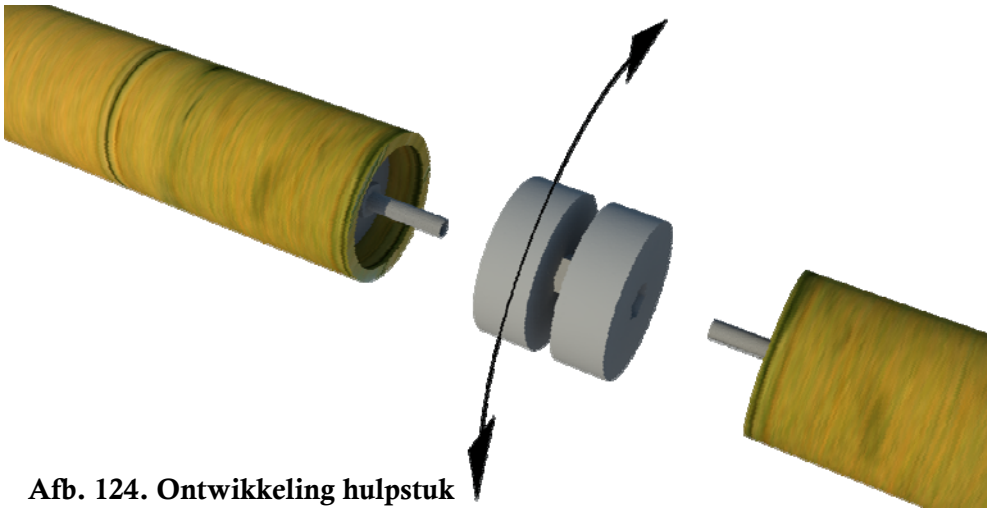
De bamboe onderdelen bestaan uit meerdere stammen, wat de verbinding moeilijker maakt. Daarbij moet één van de stammen onder verschillende hoeken kunnen aansluiten, zoals de pijl aangeeft.

Om tot een ontwerp te komen is allereerst uitgegaan van de hoekverdraaiing, omdat dit één van de moeilijkste paramaters is voor de verbinding. Om een hoeverdraaiing te kunnen maken is een rond element nodig, zoals de verticale stam in afbeelding 122. Dit element moet de draadeinden van het knel element aan elkaar verbinden (afbeelding 123).



Afb. 123. Uitgangspunt hulpstuk

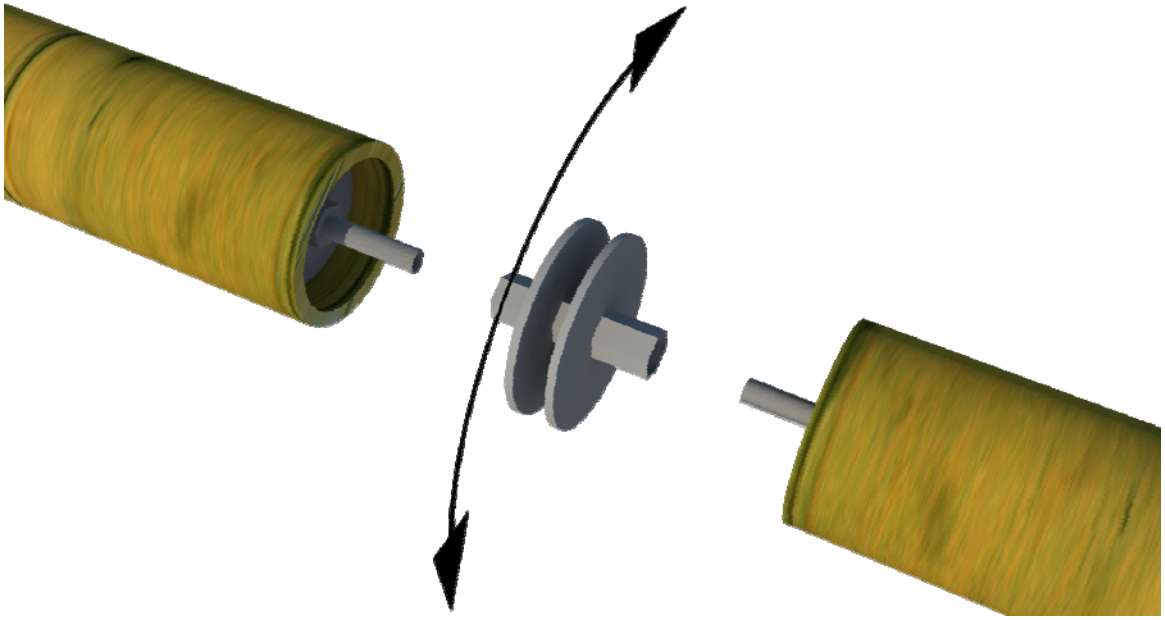
De draadeinden moeten door het hulpstuk in één beweging aan elkaar gemaakt worden. Uit dat uitgangspunt is een hulpstuk ontstaan met een 'normale', rechtse draad en een 'tegengestelde' linkse draad. Dit betekent ook dat de draadeinden in de stam aan de ene zijde rechts en aan de andere zijde links moeten zijn.
Om vervolgens het hulpstuk te kunnen draaien moet een deel van het hulpstuk een vorm hebben die aan te draaien is. Er is daarbij gekozen voor een zeskantige vorm, zodat met een standaard sleutel de stammen aan elkaar gedraaid kunnen worden (afbeelding 124).



Afb. 124. Ontwikkeling hulpstuk

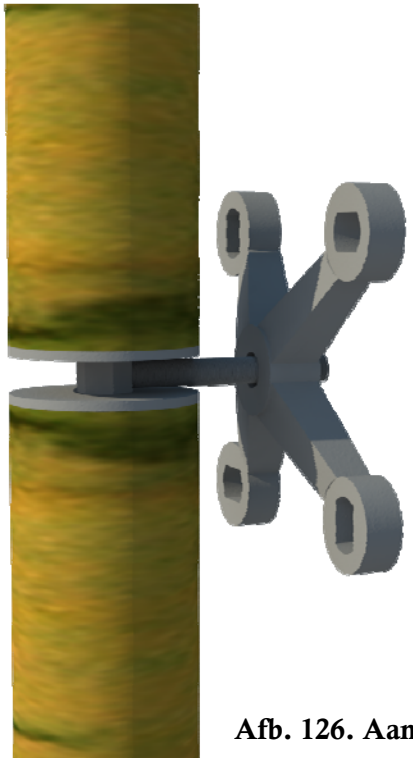
De afmetingen zijn afgeleid van de diameter van de stammen en standaard maten voor de stalen elementen. De aansluiting met de stammen moet dezelfde diameter hebben, of iets kleiner zijn (vanuit het uitgangspunt dat de stammen dominant zijn). Voor de stalen hulpstukken is uitgegaan van draadeind M14 en bijpassende moeren. De moeren moeten in het zeskantige deel van de verbinding gelast kunnen worden en zo komt de koker op 38mm.

Uitgangspunt voor alle hulpstukken is de dominantie van de stammen in de uiteindelijke verbinding. Hier is al een begin mee gemaakt door de vorm en maat van de stammen te benaderen met de hulpstukken. Echter door de vorm- en maatverschillen in de stammen zal de aansluiting zoals in afbeelding 124 afgebeeld nog teveel opvallen. Om die reden is gekozen een deel van het hulpstuk in de stam te laten verdwijnen, zodat alleen nog twee schijven overblijven die de stammen afsluiten. Daartussen bevindt zicht dan de zeskant om alles aan elkaar te draaien (afbeelding 125).



Afb. 125. Definitief ontwerp hulpstuk

De verschillende richtingen aansluiten op dit hulpstuk is nog niet opgelost. Om dit voor elkaar te krijgen zijn de verschillende richtingen uitgesplitst. De gevel wordt direct aangesloten op het hulpstuk (afbeelding 126).

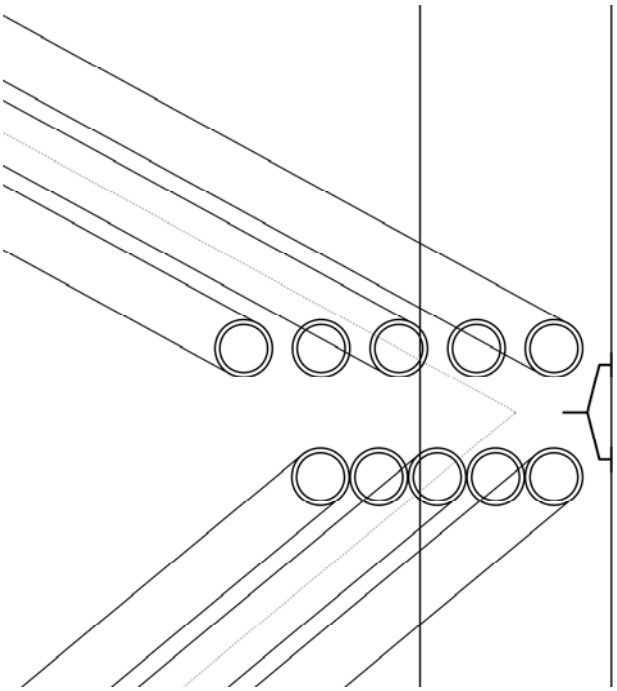


In een gesprek met Octatube over de verschillende verbindingen en de constructieve opzet van de serres kwam naar voren dat in dit ontwerp het glas ingezet kan worden om de stabiliteit van de serres te creëren. Hierdoor zijn geen aansluitingen meer nodig haaks op de kolommen, parallel aan de gevel.

Één van de kernproblemen in het ontwerp is de aansluiting van de bogen in verschillende richtingen. Om de verbindingen zoveel mogelijk in massa te kunnen produceren moet dit opgelost worden met dezelfde verbindingen.

Afb. 126. Aansluiting hulpstuk-gevel

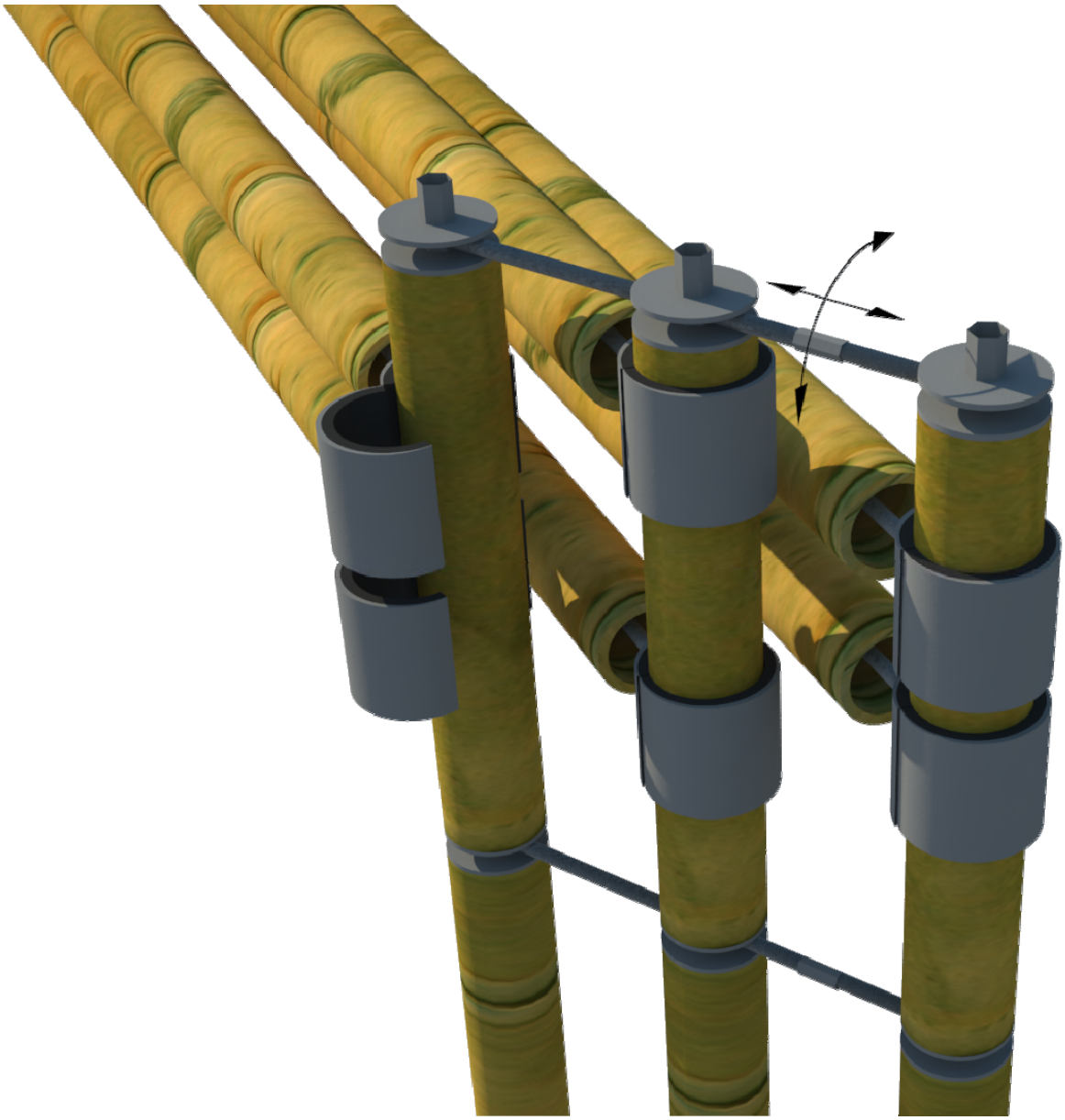
Het eerste uitgangspunt hiervoor is dat de samengestelde kolommen alleen in de diepte (oost-west) een grote maat mogen krijgen. Om vervolgens de bogen onder verschillende hoeken aan te sluiten moeten de kolommen op verschillende afstanden van elkaar kunnen staan (afbeelding 127).



De bogen bestaan uit 6 stammen die in drie parallelle paren aansluiten op de kolommen. Om deze aansluiting mogelijk te maken zijn voor de kolommen in ieder geval drie stammen nodig.
De verbinding is vervolgens volgens het principe van de zevende categorie bedacht; een aansluiting die gebruik maakt van de buitenzijde van de stam, haaks op de richting van de stam.

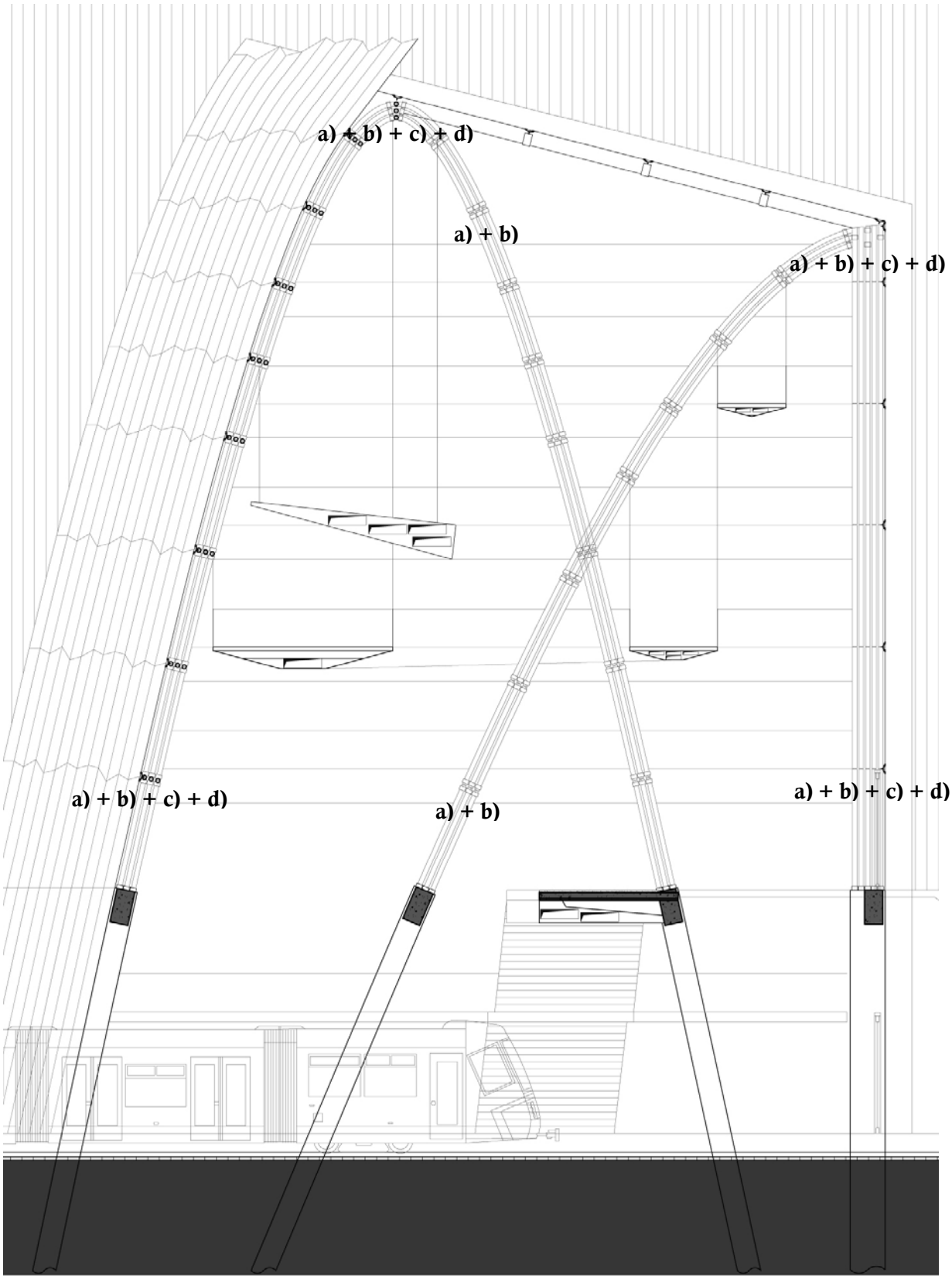
Afb. 127. Aansluiting bogen onder verschillende hoeken

Opvallend detail, Janssen heeft hier geen voorbeelden van gevonden. Het verschil tussen de verbinding zoals Janssen die beschrijft en de hier ontwikkelde verbinding zoals in afbeelding 128 is het hulpstuk wat hier wordt gebruikt. Hierdoor valt de verbinding in categorie 6 en maakt het hulpstuk de haakse hoek mogelijk (afbeelding 128).



Afb. 128. Aansluiting bogen onder verschillende hoeken

De principes van alle verbindingen zijn nu ontworpen; a) verlengen (afbeelding 114 en 125), b) bundelen (afbeelding 119), c) verschillende richtingen (afbeelding 128) en d) andere materialen (afbeelding 126). In de doorsnede (afbeelding 129) is het overzicht weergegeven welke verbindingen zich waar bevinden.



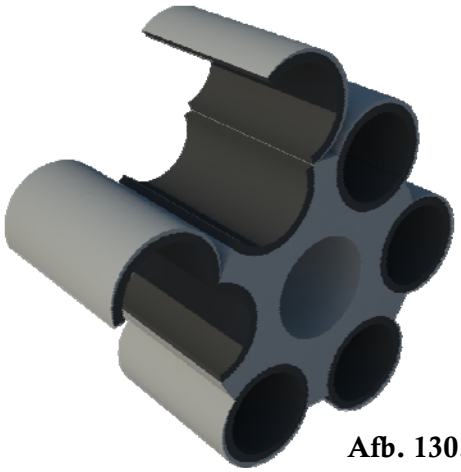
Afb. 129. Doorsnede overzicht verbindingen

3.7 Conclusies onderzoek verbindingen

Tijdens de ontwikkeling van de nieuwe verbindingen zijn een aantal dingen opgelost en een aantal achtergebleven.
De 4 verschillende verbindingen zijn allemaal ontwikkelt en zijn vergelijkbaar in principe en uitvoering. Dat deel van het onderzoek is dan ook geslaagd. Daarbij is een nieuwe manier van verbinden gevonden die gebruik maakt van de meest veelbelovende principes zonder het aantasten van de de bamboe stam.

Echter tijdens het maken van de prototypes bleek al snel dat het maken van de verbindingen wel veel tijd kost, in tegenstelling tot het monteren van de elementen op de bouwplaats.
De kern en de oplossing voor dit probleem ligt in twee dingen: het materiaal dat is gebruikt en de methode van fabricage. Deze twee oorzaken zijn nauw verbonden.

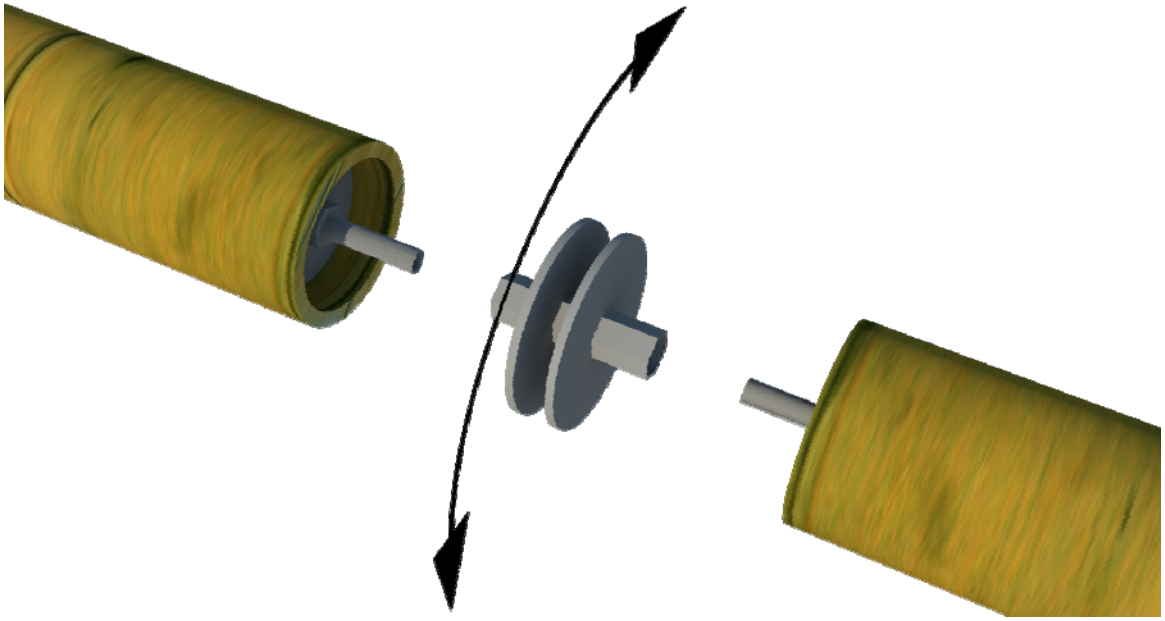
De verbinding om de stammen mee te bundelen kostte het meeste tijd in fabricage (afbeelding 130).



Afb. 130. Verbinding ten behoeve van bundelen van de stammen

Er is voor deze verbinding, net als alle andere verbindingen, gebruik gemaakt van stalen onderdelen die in en aan elkaar zijn gelast. Met name het lassen van de onderdelen kost veel tijd die niet verminderd kan worden. Het maken van de onderdelen was ook een tijdrovende klus, maar dit kan volledig geautomatiseerd worden als dat nodig is. Voor het optimaliseren van de fabricage is verder onderzoek nodig. Dit onderzoek zal zich op de volgende aspecten moeten richten: fabricagetijd van de verbinding en het reduceren van het gewicht van de verbinding. Hierbij spelen de fabricage methode en het materiaal een grote rol.

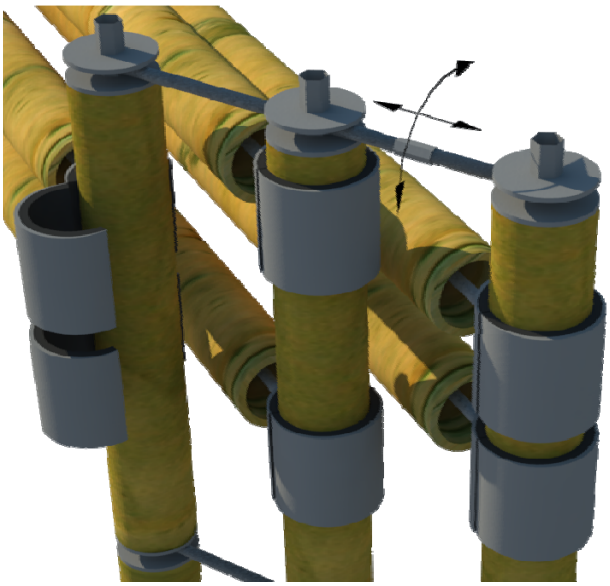
De tweede verbinding die in prototype relatief veel tijd kostte is het hulpstuk om de stammen te verlengen (afbeelding 131).



Afb. 131. Verbinding ten behoeve van het verlengen van de stammen

De oplossing hiervoor lijkt op het eerste gezicht een vrij eenvoudige: draaien van het onderdeel uit een massief stuk staal. Dit in plaats van het lassen van losse onderdelen.
Nadelen van draaien is dat geen zeskant kan worden verkregen met deze methode en relatief veel materiaal wordt verloren.
Hierdoor is ook voor de fabricage van deze verbinding verder onderzoek nodig. Dit onderzoek zal zicht dan moeten richten op de fabricagetijd van de verbinding met minimalisatie van het gewicht en het gebruikte materiaal.

Voor de laatste verbinding (afbeelding 132) geldt hetzelfde als de hiervoor besproken verbindingen, maar in mindere mate.



Het is een vrij eenvoudige verbinding waardoor de fabricagetijd hier veel minder is.
Verder onderzoek zal zich hier beter kunnen richten op een manier om de schaaltjes te sluiten. In de prototypes is gebruik gemaakt van boutjes, maar misschien kan een snellere verbinding gevonden worden die de montagetijd nog verder kan verkorten.

Op alle verbindingen kan dus een vervoldonderzoek plaats hebben gericht op fabricage en materiaalgebruik. In het materiaalgebruik moet uiteraard gelet worden op het opnemen en overbrengen van de krachten. Daarbij speelt de bewerkbaarheid van het materiaal een grote rol. In eerste instantie is voor staal gekozen omdat dit materiaal zo gemakkelijk te bewerken is. Een alternatief voor staal is aluminium, niet in de laatste plaats door de lagere dichtheid.
Daarbij kan dit materiaal gemakkelijker machinaal bewerkt worden, waarbij de eerste verbinding, die voor het bundelen, misschien uit één stuk gefreesd kan worden. Het gewicht zal daarmee niet kleiner worden, maar groter, wat jammer zou zijn. Voor de kleinere verbindingen is aluminium minder geschikt, omdat het minder weerstand biedt tegen de krachten die opgenomen en overgebracht moeten worden.

In het onderzoek is uitgegaan van het ontwerp zoals dat aan het begin van het onderzoek ontwikkeld was. Uit het onderzoek zijn een aantal aanpassingen gedaan in get ontwerp, waarvan de vorm van de grote serre de belangrijkste is. De benadering is dus naar de verbinding toe geweest waarbij de verbinding een reflectie tot stand heeft gebracht van het ontwerp.
De benadering kan natuurlijk ook andersom worden gezien: het ontwikkelen van een verbinding waarmee een ontwerp wordt gemaakt dat weer een reflectie geeft op de verbinding.
Uit het onderzoek blijkt dat veel architecten en bamboe specialisten zich bezig hebben gehouden met het verbinden van bamboe. Dit is te begrijpen vanuit de eigenchappen van het bamboe en de potentiële toepassing ervan in de bouw.

Ik vond het inspirerend om met bamboe te werken en de mogelijkheden en onmogelijkheden van het materiaal te ontdekken. Buiten alle moeilijkheden die bamboe met zicht meebrengt is het een supersterk, duurzaam en voor al erg mooi materiaal om toe te passen in de bebouwde omgeving. Met dit onderzoek wil ik dan ook vooral mensen inspireren om dit materiaal en zijn mogelijkheden verder te onderzoeken.

4. Bronnen

4.1 Boeken

Oscar Hidalgo López (2003) *Bamboo: The gift of the Gods.* Colombia: D'VINNI

Jules J.A. Janssen (1988) *Building with Bamboo: A handbook.* England: Intermediate Technology Publications

Jules J.A. Janssen (1991) *Mechanical Properties of Bamboo.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers

Jules J.A. Janssen (2000) *Designing and Building with Bamboo.* China: INBAR

Walter Liese et al. (2003) *Bamboo preservation compendium.* New Delhi: Centre for Indian Bamboo Resource and Technology

I.V. Ramanuja Rao et al. (1996) *Bamboo, people and the environment.* New Delhi: INBAR

4.2 Dissertaties en (afstudeer)rapporten

Wouter Bak (2009) *Energy of building materials: a C2C manual.* Delft: Technische Universiteit Delft

Jules J.A. Janssen (1981) *Bamboo: in building structures.* Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven

Chiel Koenen (2010) *Bamboe als constructief bouwmateriaal: In Noordwest Europa.* Delft: Technische Universiteit Delft

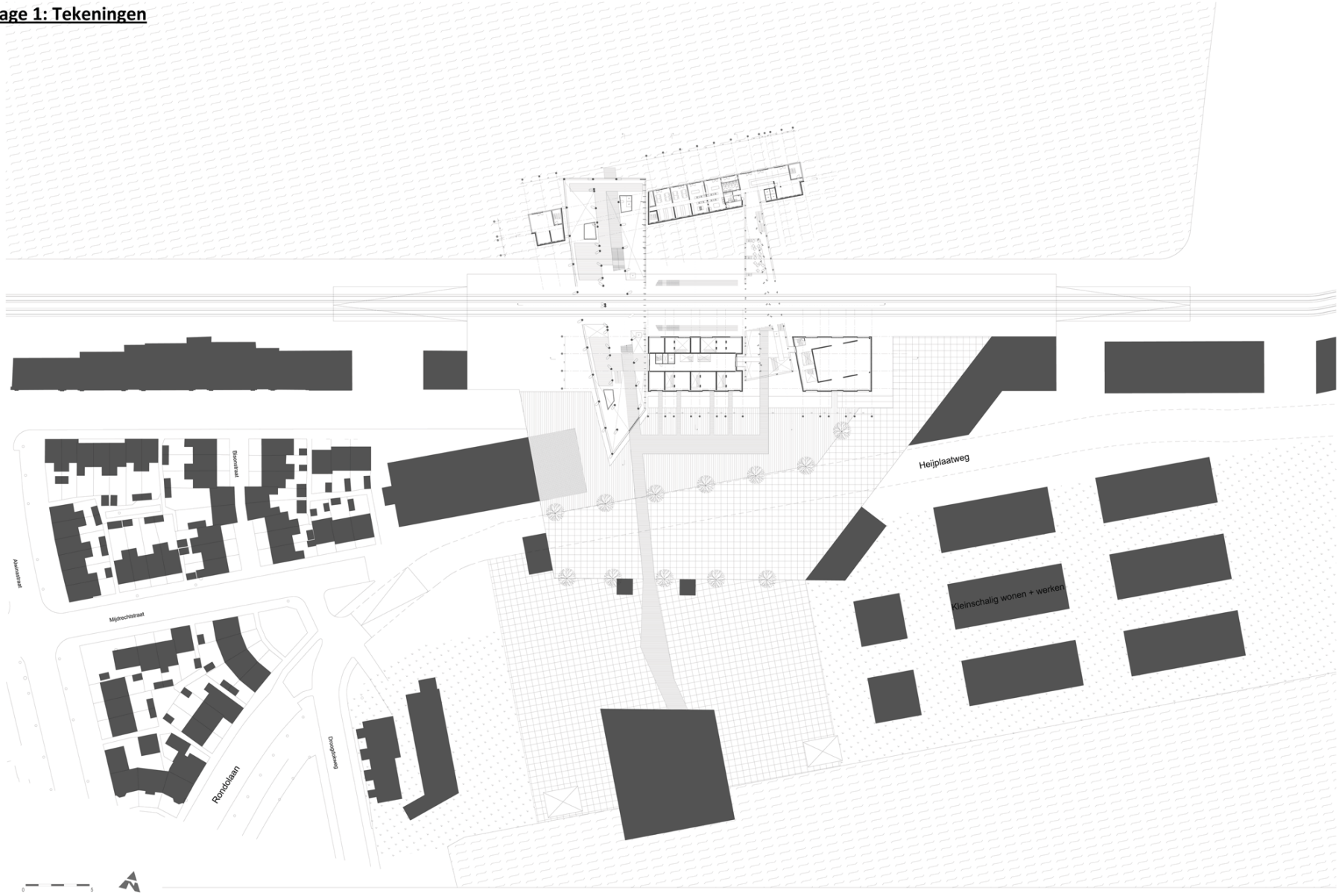
Pablo van der Lugt (2003) *Bamboe als alternatief bouwmateriaal in West Europa?* Delft: Technische Universiteit Delft

Pablo van der Lugt (2008) *Design Interventions for Stimulating Bamboo Commercialization.* Delft: Technische Universiteit Delft

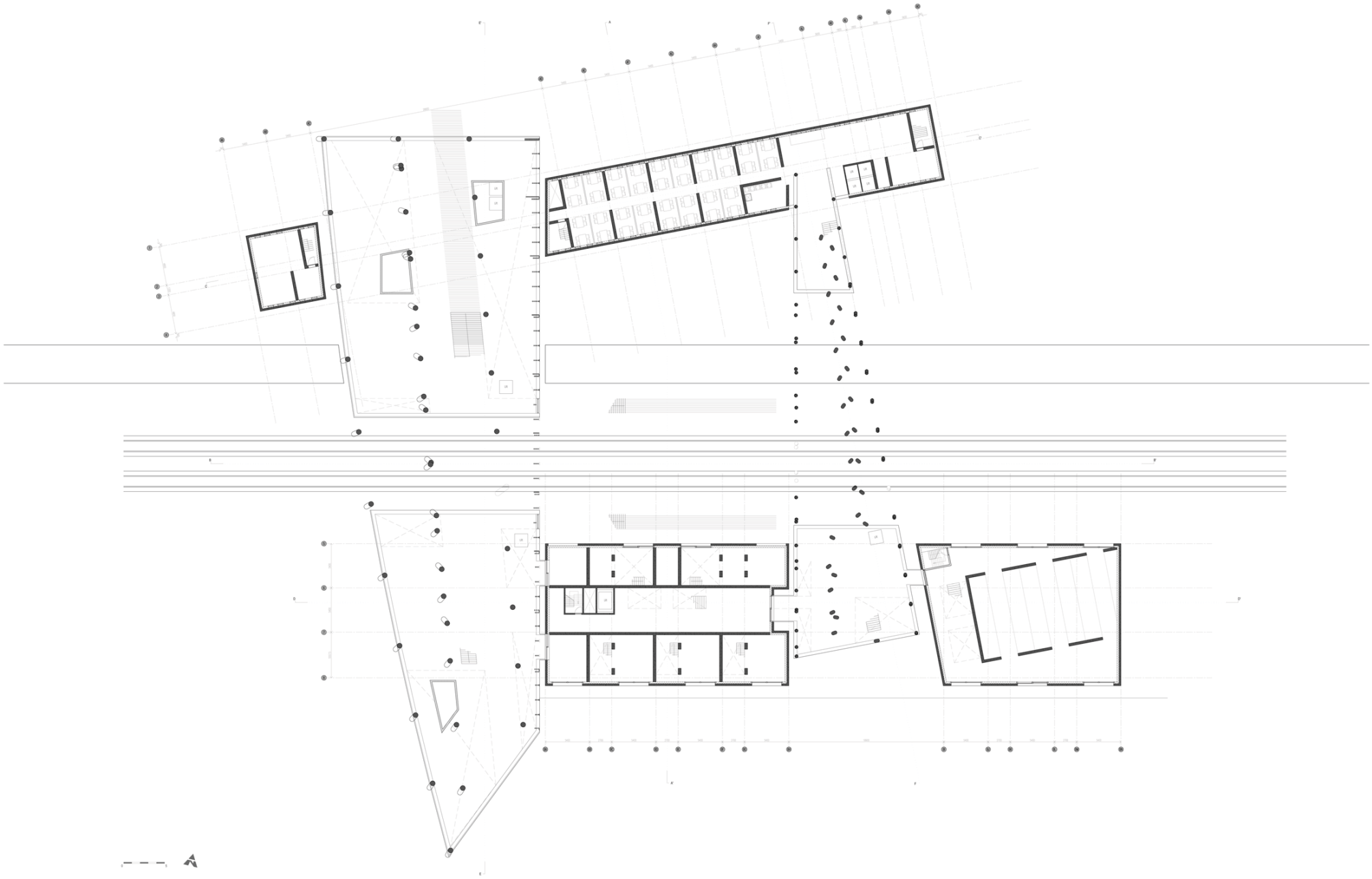
Rinske Wessels (2009) *Sustainable building products for the lower income groups of Santa Cruz de la Sierra in Bolivia.* Delft: Technische Universiteit Delft

5. Bijlagen

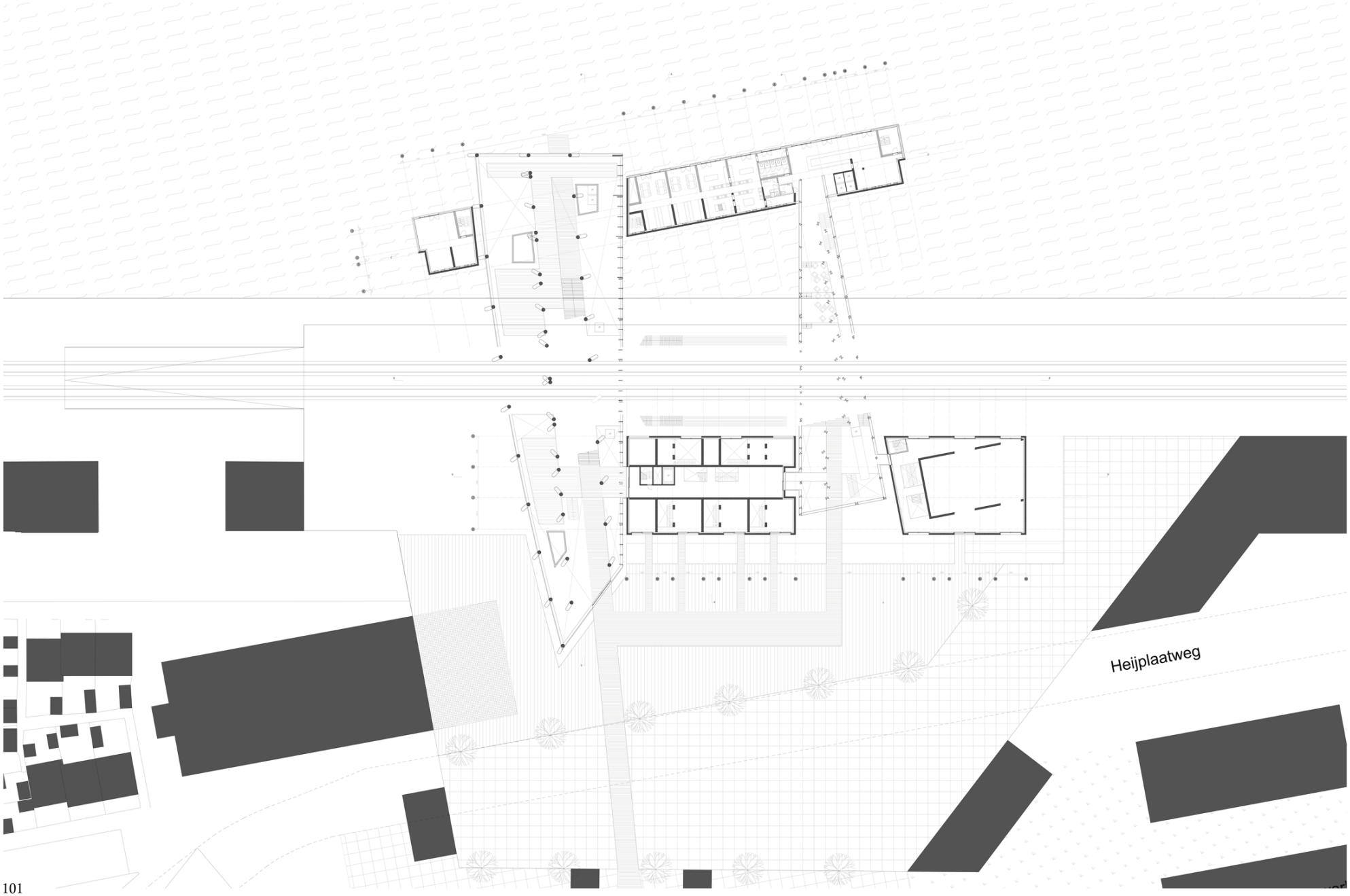
5.1 Bijlage 1: Tekeningen

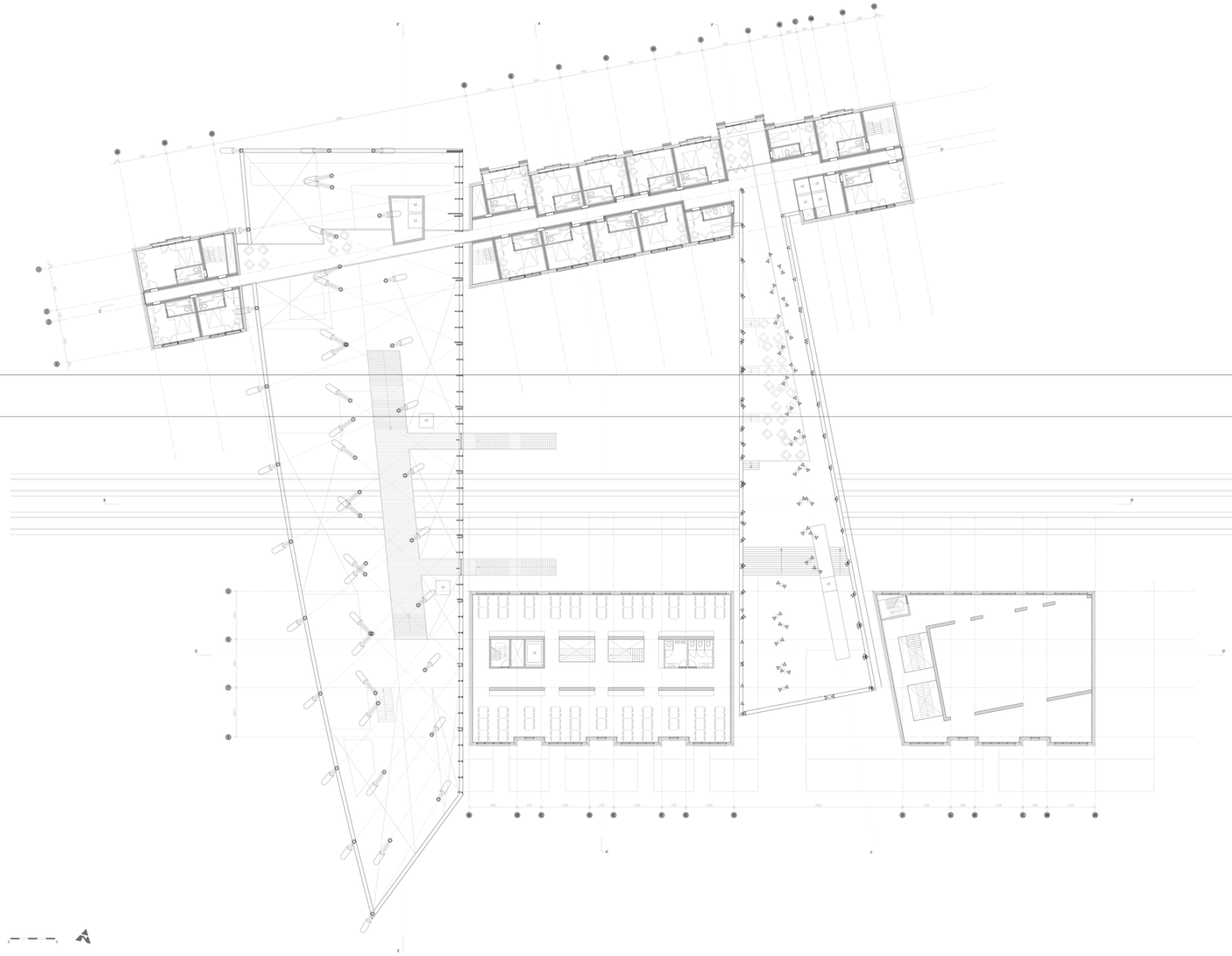


plattegrond bg (P=0)

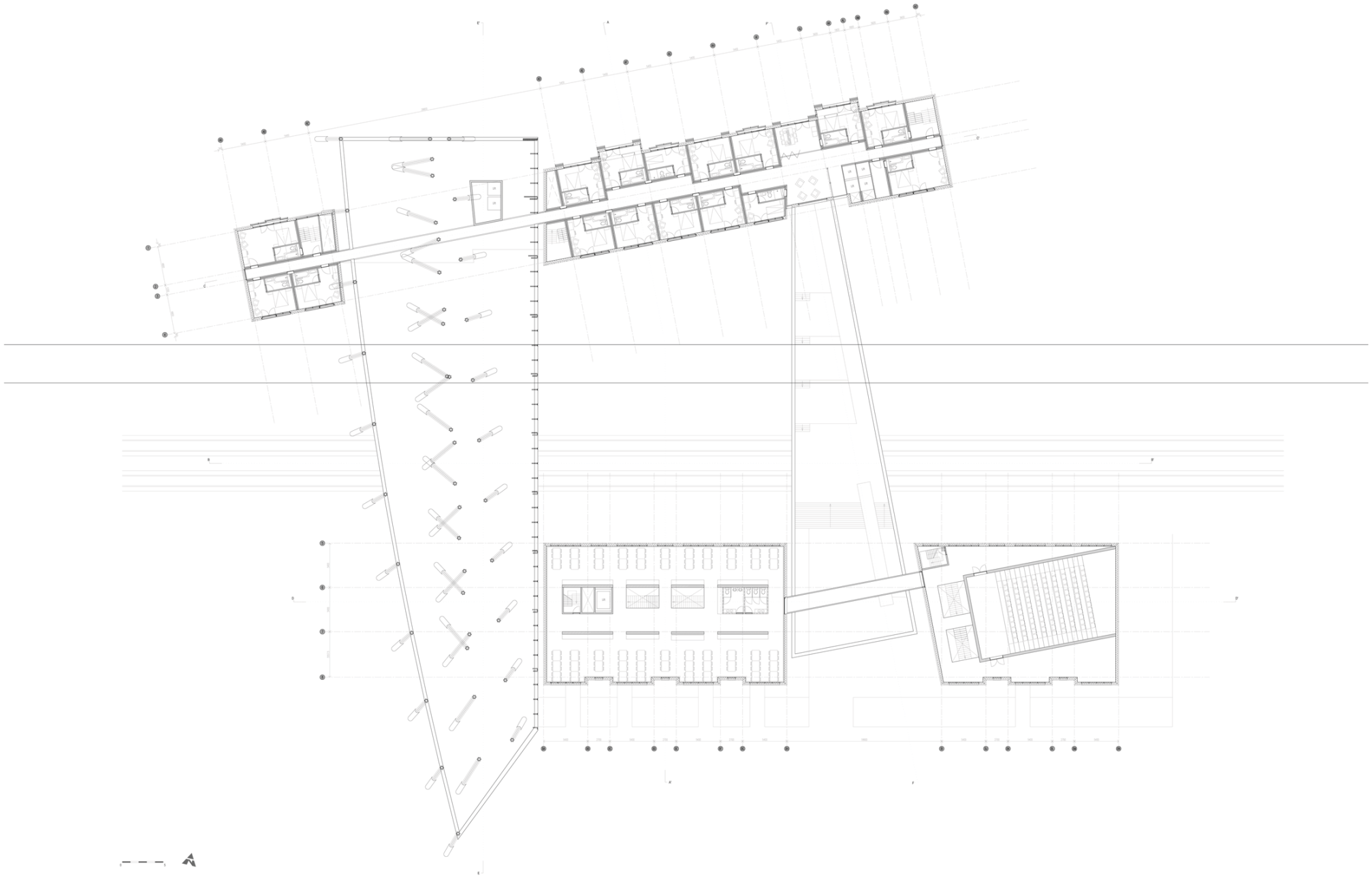


plattegrond -1 (3200-P)

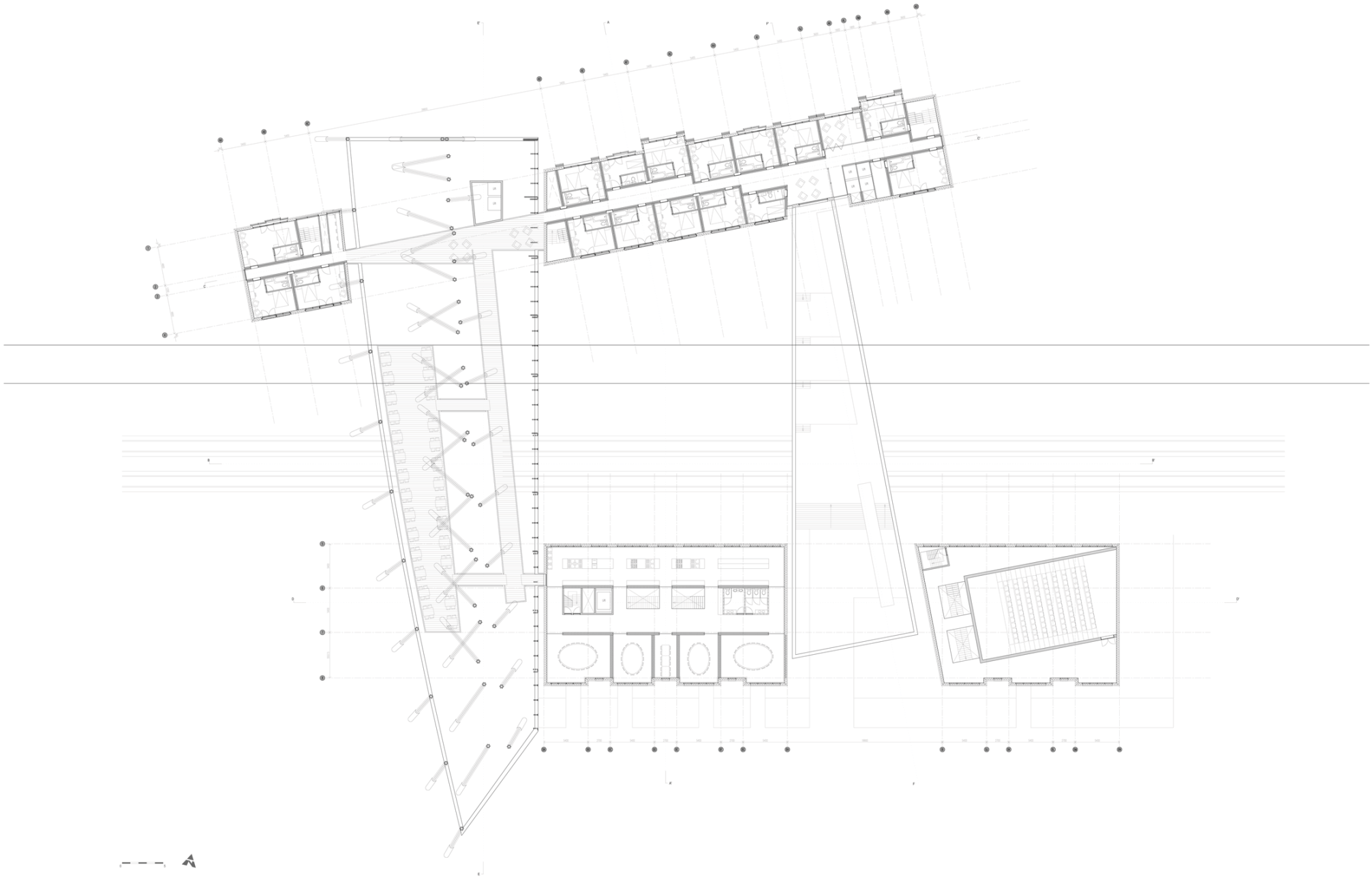

Heijplaatweg



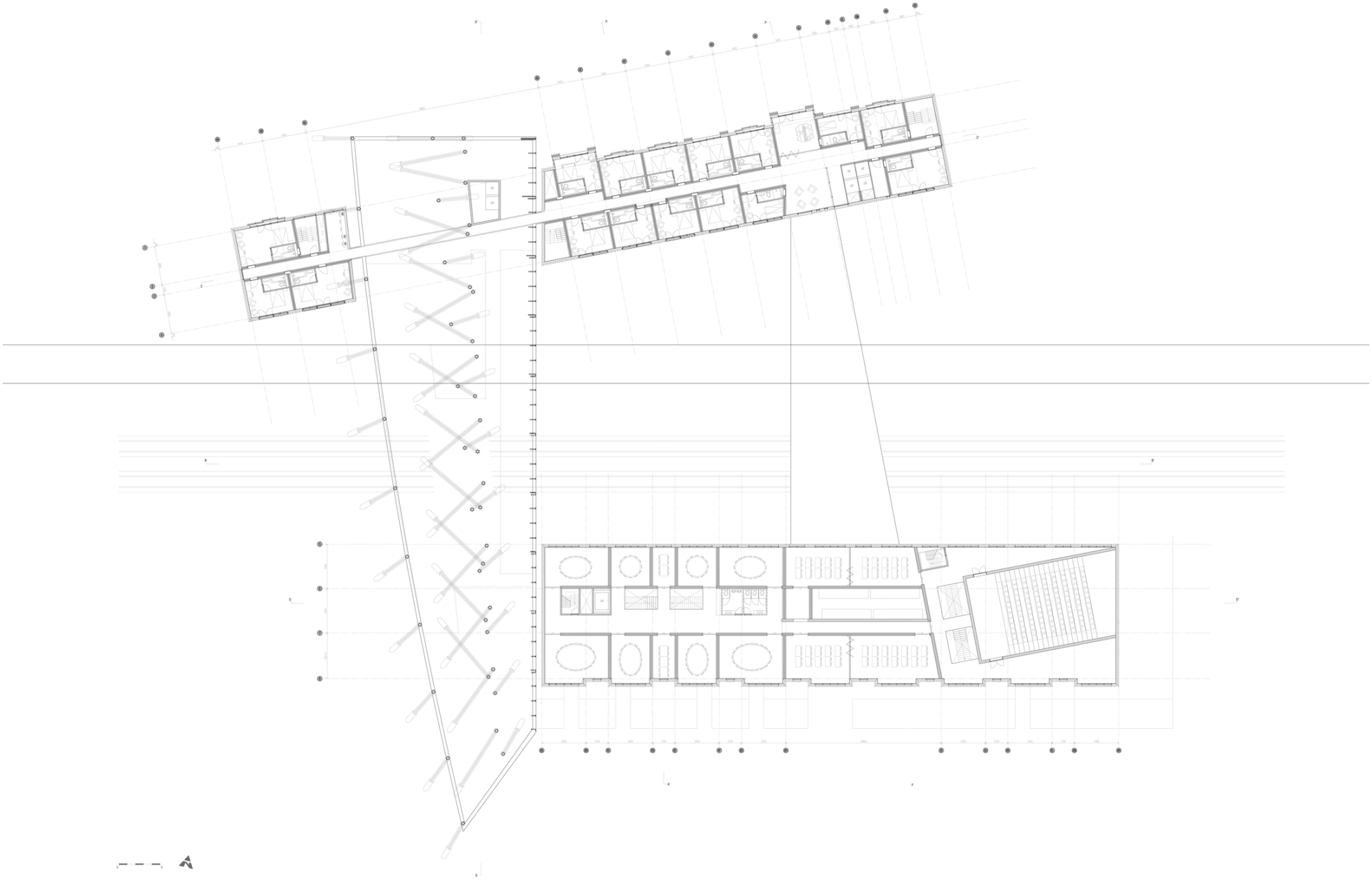
plattegrond +1 (3200+P)



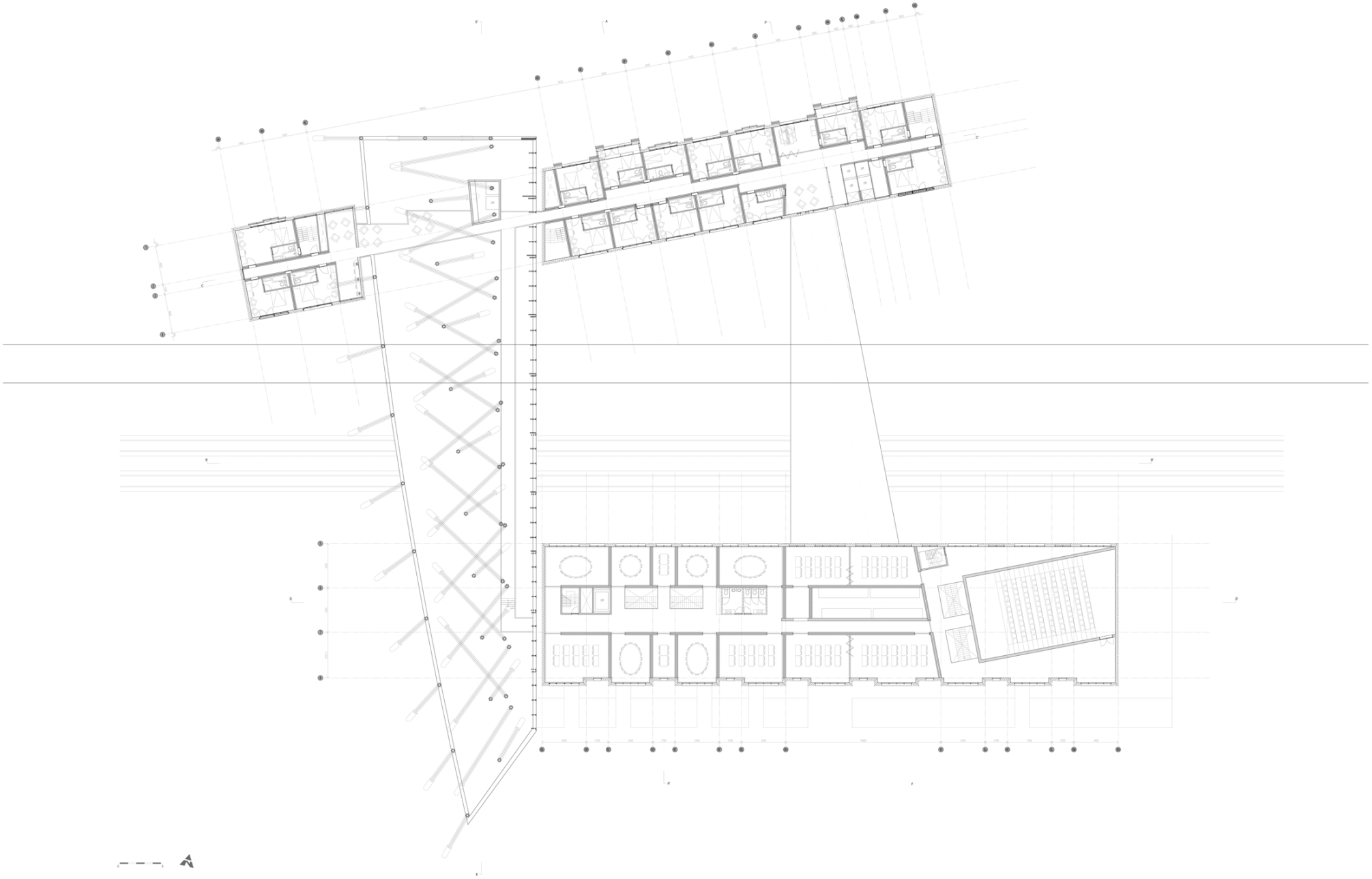
plattegrond +2 (6400+P)



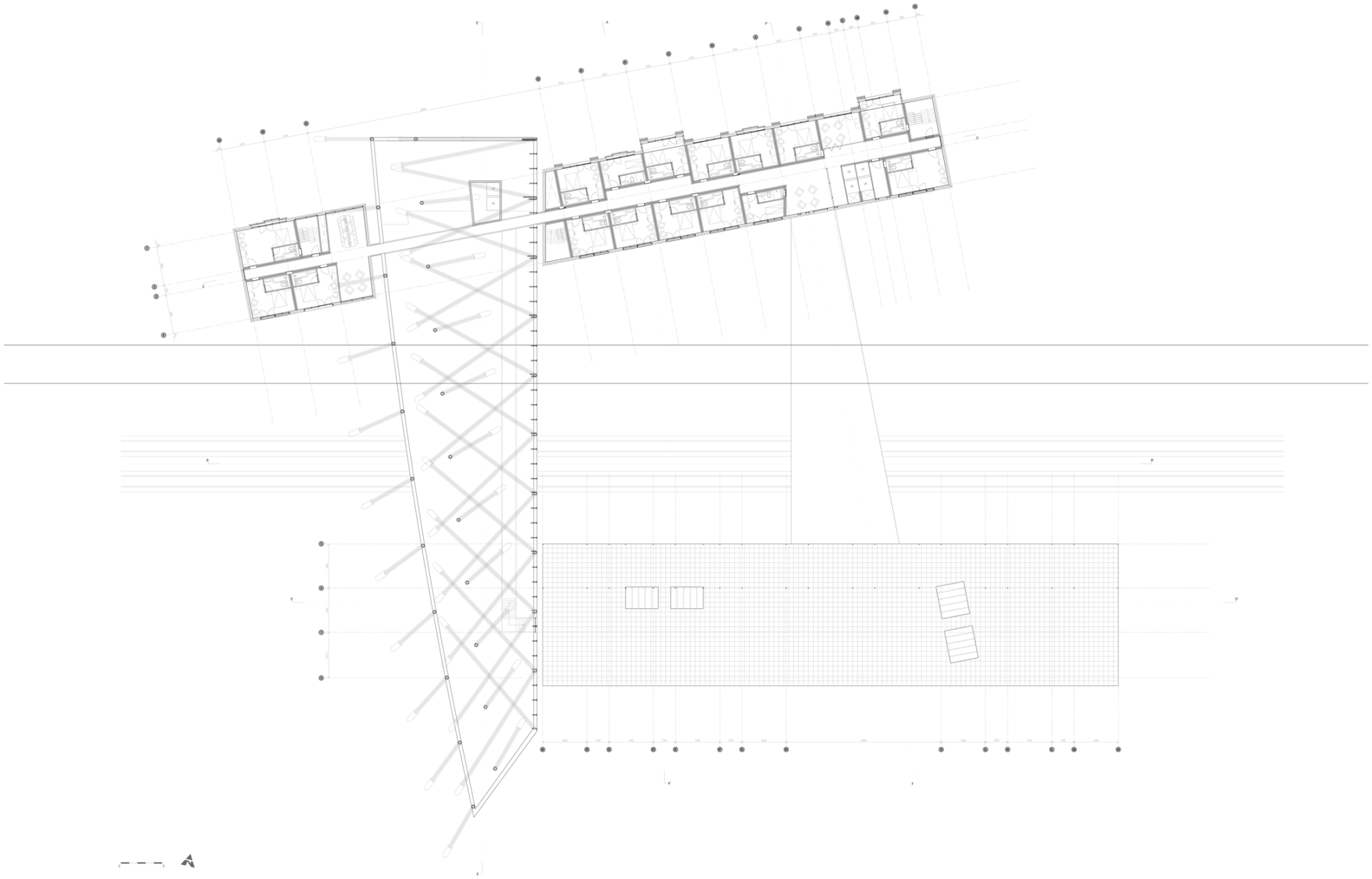
plattegrond +3 (9600+P)



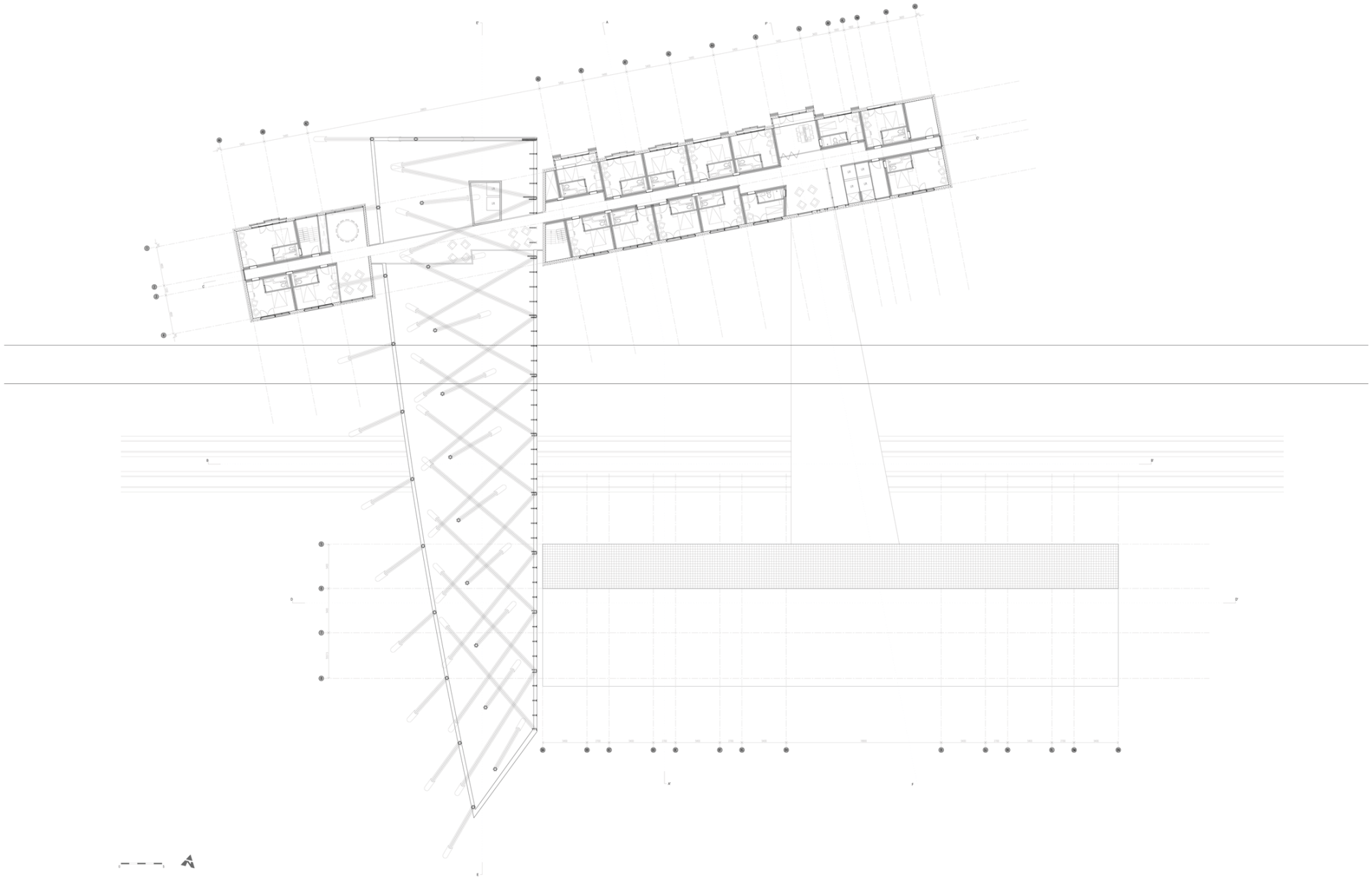
plattegrond +4 (12800+P)



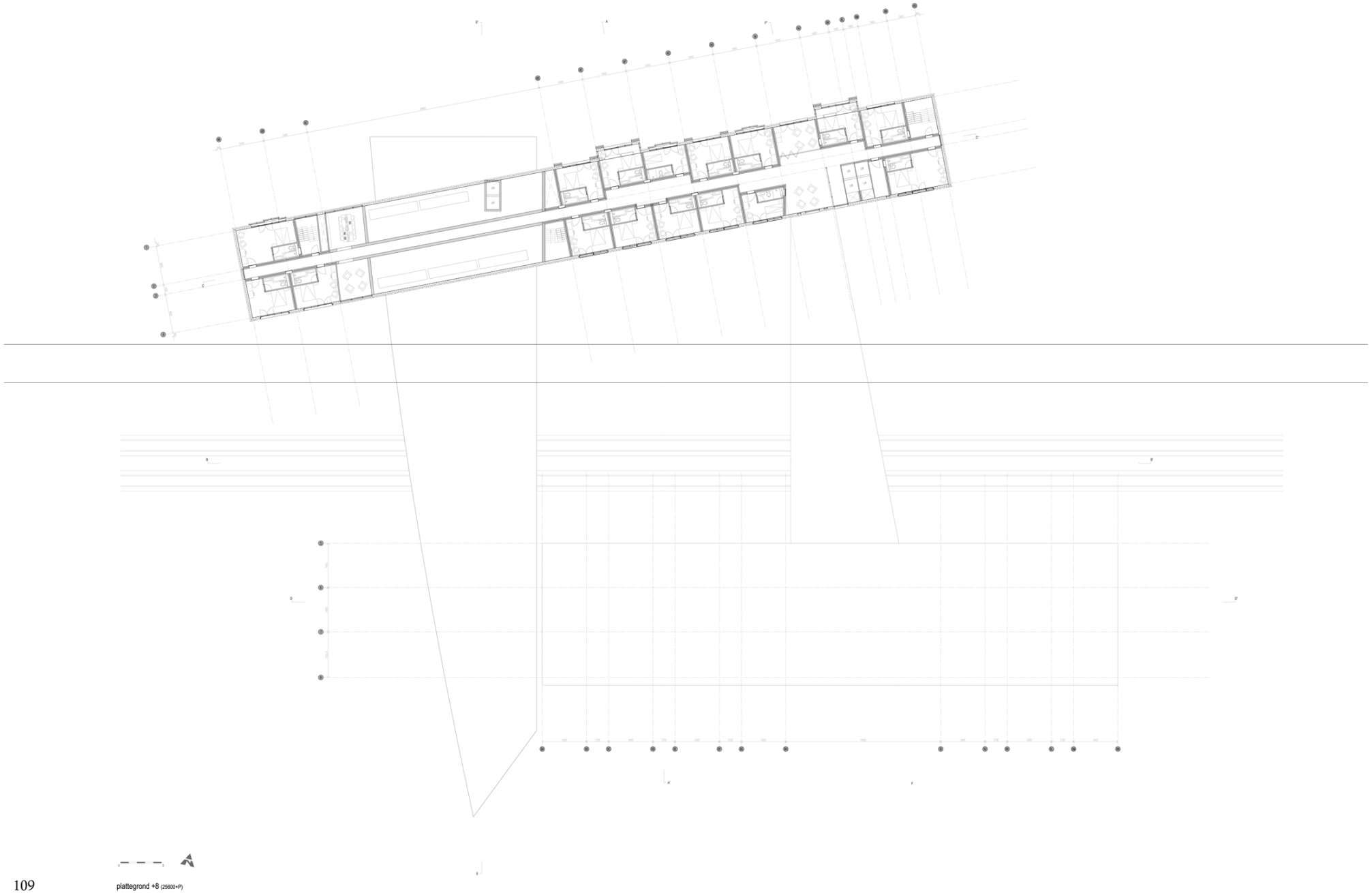
plattegrond +5 (16000+P)



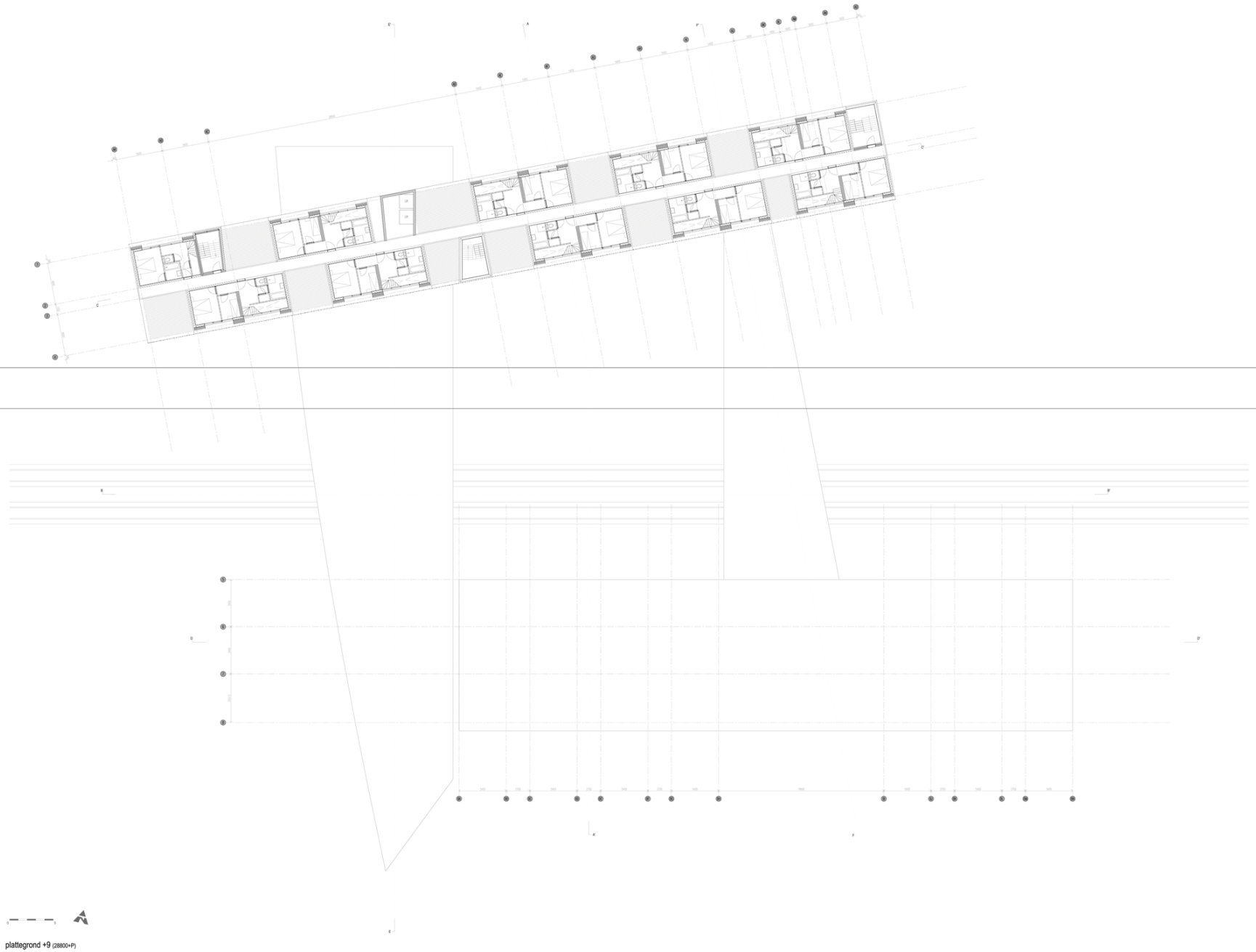
plattegrond +6 (19200+P)



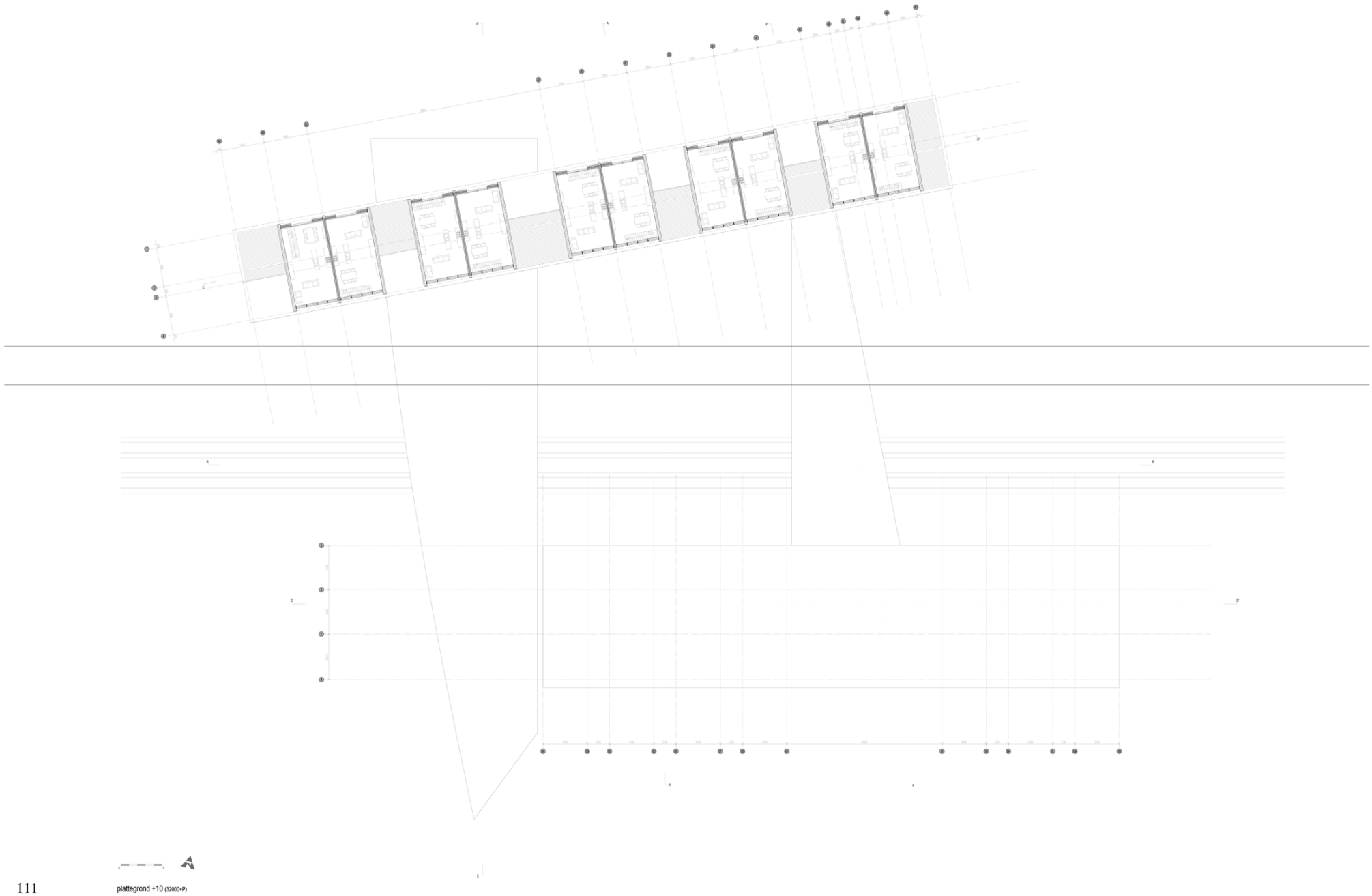
plattegrond +7 (22400+P)



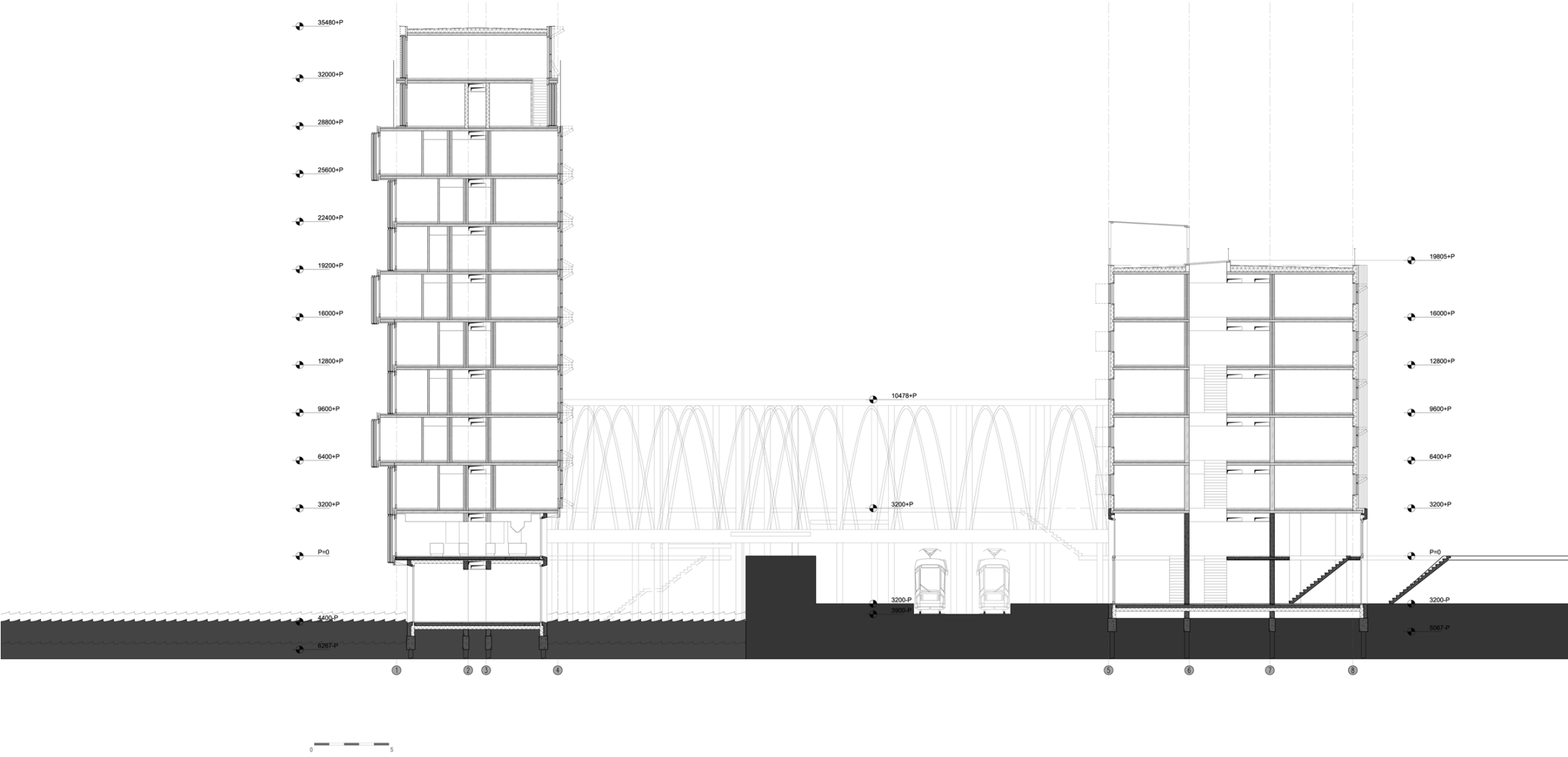
plattegrond +8 (25600+P)



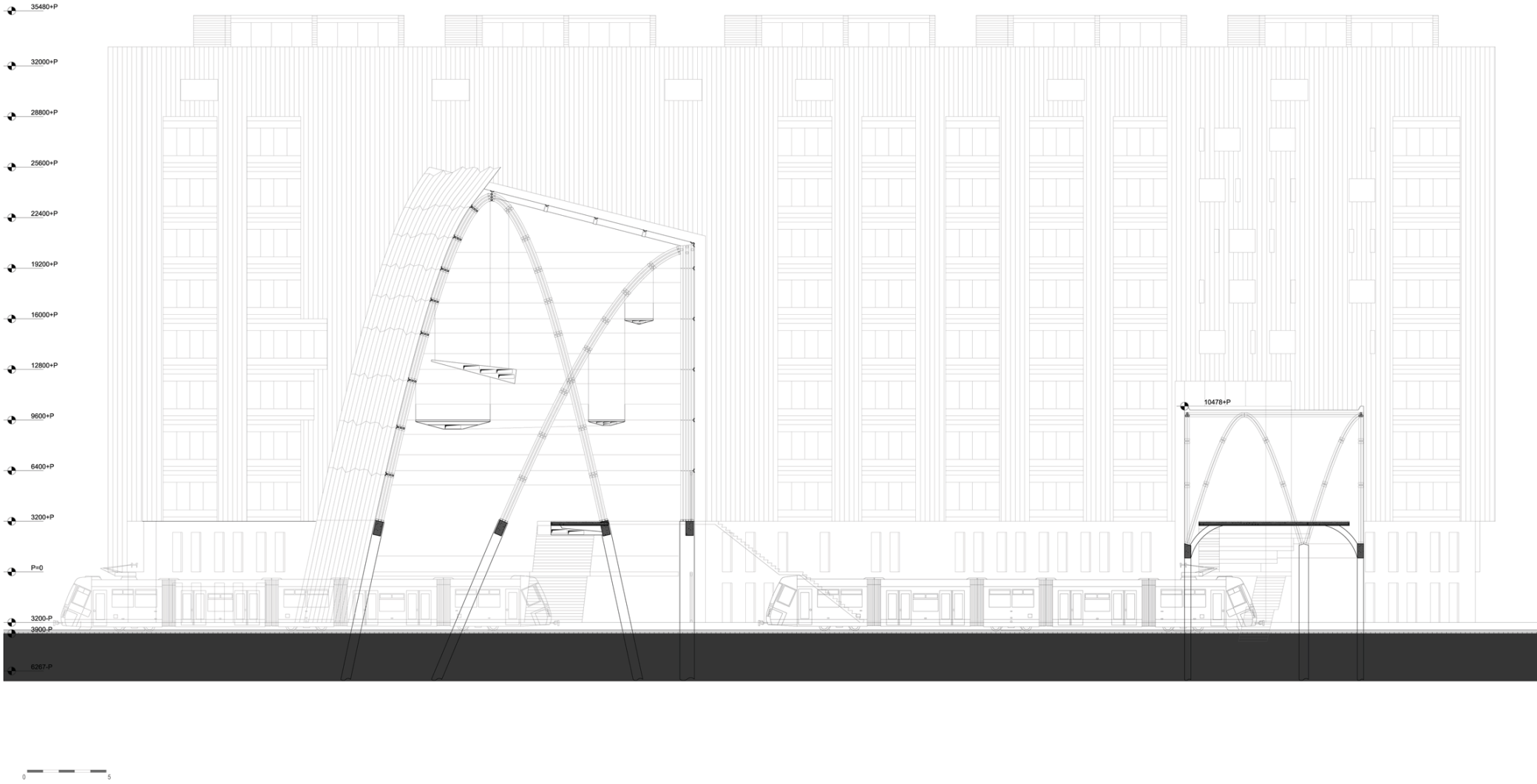
plattegrond +9 (28800+P)



plattegrond +10 (32000+P)



doorsnede A-A'



113 doorsnede B-B'

5.2 Bijlage 2: Lenotec produktinformatie

Leno®

Individuele oplossingen voor de bouw

Leno - staat voor grote en massieve houten bouwelementen. Deze constructieve dak-, wand- en vloerelementen worden opgebouwd uit kruislingsverlijmde vuren houten lamellen en tot op de millimeter nauwkeurig op maat gezaagd. In het door Finnforest ontwikkelde en gepatenteerde productieproces kunnen grote elementen worden geproduceerd, die een grote mate van vrijheid geven voor de ontwerper. Doordat de elementen vacuüm geperst worden, kunnen er ook gebogen (dak- of gevel-) elementen worden geproduceerd. De kruislingse opbouw garandeert met zijn hoogwaardige en duurzame verlijming absolute dimensiestabiliteit (vormvastheid) en buigstijfheid.
Leno biedt als zelfdragend bouwsysteem een grote ontwerpvrijheid (bijvoorbeeld bij grove uitkragingen en/of overstekken) alsmede een hoge bouwsnelheid.

Afmetingen

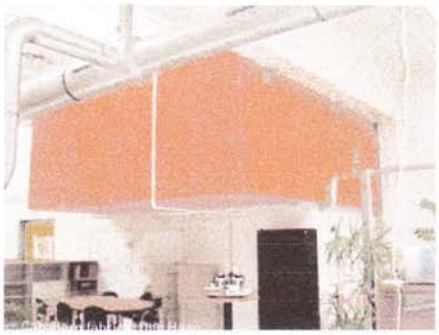
Lengtes: tot 20m1
Breedtes: tot 4,80m1
Diktes: van 51 tot 297mm

De elementen worden individueel op maat gemaakt. De lamelrichting van de buitenste lagen kan zowel dwars als langs worden aangebracht, afhankelijk van de overspanningsrichting. De kant-en-klare elementen worden geleverd in twee oppervlak-kwaliteiten; een basiskwaliteit en een luxe zichtoppervlak-kwaliteit. Uitsparingen voor bijvoorbeeld ramen en/of deuren, kunnen al in de fabriek worden aangebracht. Evenals frezingen voor (elektra-)leidingen en installaties. Zowel standaard verdiepings-, dak - en wandplaten als individuele wensen op het gebied van afmetingen worden kant en klaar als bouwpakket voor montage aangeleverd op de bouwplaats. Zo kunnen complete gebouwen, met bouwfysisch gezien eenvoudige constructies, snel worden geplaatst.

finnforest

Voordelen Lenotec

- Puur hout, ecologisch verantwoord
- Grote mate van ontwerpvrijheid
- Levering grote elementen mogelijk
- Zelfdragend bouwsysteem
- Zeer maatvast
- Door prefabricage, verlaging faalkosten
- Grotere sterkte dan traditioneel gezaagd hout
- Ruwbouw = afbouw
- Lage inbrandtijd, 0,85mm p/min (normaal 1mm)
- Laag houtvochtgehalte, ca. 10 – 12% -> weinig krimp
- Geringere dikte dan beton of standaard houten element
- Gebogen elementen mogelijk
- Verkorting bouwtijd
- Lichter van gewicht t.o.v. beton en metselwerk
- Eenvoudig te bewerken



Toepassingen

- woningen, villa's
- scholen
- kantoren
- multifunctionele centra
- bezoekerscentra
- appartementencomplexen (woningscheidend)
- optopprojecten
- renovaties (verdiepingsvloeren, tussenwanden)
- uitbouwen
- horecagelegenheden
- inrichtingen oude fabriekshallen

Referentie projecten

- Diverse complete Leno woningen, o.a. IJburg Amsterdam
- Natuurbelevingscentrum Oostvaardersplassen, Almere
- Malmö Hus, Almere
- Caballero fabriek, Den Haag
- De Kamers, Vathorst Amersfoort
- Woningen Vondelstraat, Den Haag

Technische kenmerken en Duurzaamheid

Het document met de technische eigenschappen is te downloaden van onze website.
Leno draagt het PEFC-certificaat (geproduceerd van stammen uit duurzaam beheerde bossen).

PEFC

Aanvullende informatie is te downloaden van onze website : www.finnforest.nl

Leno dealer:

finnforest
FINNFOREST HOLLAND B.V.
Schumanpark 9c, NL-7336 AM Apeldoorn, Nederland
T +31 55 538 6610, F + 31 55 538 6620
info@finnforest.nl, www.finnforest.nl

5.3 Bijlage 3: Finnjoist produktinformatie

Finnjoist®

I-Liggers voor balken, stijlen en sporen

Finnforest maakt bouwen efficiënt en snel met Finnjoists. Deze I- liggers worden volgens de modernste technologie geproduceerd en zijn voorzien van hoogwaardige **Kerto®-S** flenzen en een kern van OSB-3.
De productie vind plaats in onze ultra moderne productiefaciliteit in het Britse King's Lynn. Finnjoists hebben een betere sterkte- en gewichtsverhouding ten opzichte van standaard balkhout.
Daarnaast is de **sterkte en stijfheid altijd gegarandeerd.**

Finnjoist in de praktijk

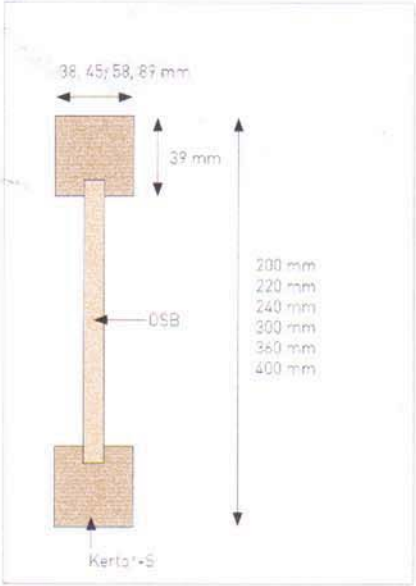
In de uitvoering werken de I- liggers van Finnforest prettiger, met name door het **geringe gewicht** en de **rechtheid**. Meestal kan de ligger door één persoon worden getild en aangebracht. Daarnaast hoeft er niet nagemeten te worden. **Isolatiemateriaal is gemakkelijk aan te brengen** door de extra ruimte.
Door de **vooraf aangebrachte 'knock-outs'** hoeft er niet geboord te worden en kunnen leidingen eenvoudig en snel worden doorgetrokken. Ook **grotere sparingen** zijn mogelijk. Door de **lange lengten** kan er beter geoptimaliseerd worden en blijven er minder restlengten over.

Finnforest

Afmetingen

Met Finnjoist kunt u hoogtes halen tot wel 400 mm

Finnjoists worden standaard geproduceerd in lengtes van 12 en 14 m1. Door deze lange lengtes kan er tot het uiterste geoptimaliseerd worden. Vraag naar de actuele voorraad lengtes.
Verkrijgbare hoogtes: 200, 220, 240, 300, 360 en 400 mm.
Flensbreedtes: 38, 45, 58 en 89mm. De standaard flensdikte is 39mm. Door de keuze van de juiste hoogte en breedte kan een optimale sterkte en stijfheid behaald worden.



Finnjoist voordelen

- Lengtes tot 14 m1
- Hoogte tot 400 mm
- Exacte afmetingen, kleine toleranties
- Rechtheid in 2 richtingen (horizontaal en verticaal)
- Grote stijfheid = kleinere doorbuiging
- ca. 30-40% lager gewicht als traditioneel balkhout
- Geringe koudebrug door slank OSB- lijf
- Uitermate geschikt voor duurzaam en energiezuinig bouwen

Technische kenmerken

De Finnjoists zijn CE - gemarkeerd in klasse 1.
De buigsterkte en stijfheid worden voornamelijk bepaald door de flenzen van **Kerto®-S**. Dit is een gelamineerd fineerhout (LVL) met de fineren in één-richting. De technische gegevens alsmede details en aanwijzingen voor de berekening zijn te downloaden op onze website.
Voor de bevestiging zijn balkschoenen beschikbaar.

Duurzaamheid

De materialen die gebruikt worden voor de productie van Finnjoists (Kerto®-S en OSB-3) zijn PEFC-gecertificeerd.

PEFC

Aanvullende informatie is te downloaden op: **www.finnforest.nl**

finnforest

FINNFOREST HOLLAND B.V.
Schumanpark 9c, NL-7336 AM Apeldoorn, Nederland
T +31 55 538 6610, F +31 55 538 6620
info@finnforest.nl, www.finnforest.nl

Finnjoist dealer:

5.4 Bijlage 4: Gebrand hout produktinformatie

Aangebrand hout

Het woonhuis van Pieter Weijnen van FARO Architecten op Amsterdam-IJburg is in meerdere opzichten een bijzonder huis. Het is een passiefhuis met allerlei nieuwe technieken en materialen en gebouwd volgens de principes van cradle tot cradle. Wat echter direct opvalt, zijn de voor- en achtergevel. Die zijn gitzwart door een bekleding met delen aangebrand larikshout. De zwarte koolstoflaag biedt goede weerstand tegen schimmels en bacteriën en heeft een wisselend esthetisch effect.

Het diepzwarte hout kan onder invloed van wisselende lichtinval van kleur veranderen

(Foto: IC4U, Haarlem)

Aanzicht van de voorgevel met op de begane grond de oranjegele neuslatten

door Joop Wilschut
beeld: FARO Architecten, Lisserbroek (tenzij anders vermeld)

De speciale techniek om hout via aanbranden te conserveren komt uit Japan. Ze binden drie delen cederhout met staaldraad samen tot een koker, waarbinnen ze een vuurtje ontsteken. Het hout brandt dan in tot een diepte van circa 3 tot 5 mm. Uit onderzoek kwam Pieter Weijnen er achter dat deze techniek ook sporadisch in Europa is toegepast. In de Scandinavische landen is er het een en ander mee gedaan, maar ook in het oosten van ons land zijn schuren met aangebrand hout bekleed.

Experimenteren

Weijnen kwam de techniek op het spoor tijdens de Biënnale in Venetië, waar hij werk van de Terunobu Fujimori zag. Hij vond het geweldig. Dat zo'n simpele en oeroude techniek zo'n effect kon hebben. Het is tevens een duurzame bouwmethode; door het aanbranden heb je immers geen verf of beits meér nodig. Veel minder milieubelastend dus.

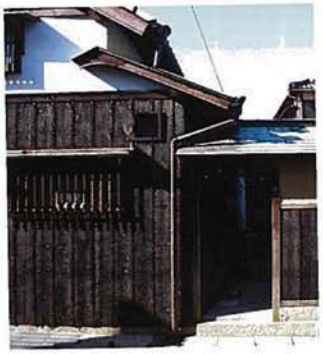
Vrijwel direct ontstond bij hem het idee de gevels van zijn eigen nieuwbouwhuis te bekleden met aangebrand hout. Samen met zijn aannemer is hij naar Japan geweest om de techniek in de praktijk te zien en te leren hoe er mee om te gaan. De Japanners

gebruiken cederhout, maar uit studies van diverse universiteiten bleek lariks beter te zijn. Lariks blijkt het goed te doen in de brandtesten en deze houtsoort heeft eigenschappen die beter geschikt zijn voor het Nederlandse klimaat. Bovendien is lariks een veel voorkomende houtsoort en je hoef het dus niet van ver te halen.
Weijnen is toen gaan experimenteren met de traditionele brandmethode, maar dat leverde een te ongelijkmatig resultaat op. De delen waren op sommige plekken over de helft van de dikte verkoold, terwijl het op andere plaatsen nauwelijks was aangebrand. Het was de bedoeling de 22 mm dikke delen over het gehele oppervlak circa 2 tot 3 mm in te branden. Met een gasbrander over de planken gaan, bleek veel betere resultaten te geven. Op die manier zijn vervolgens in de 'achtertuin' van de bouwplaats de 60 m² aan geveldelen behandeld. Aanbranden na montage zou een te groot risico op brand geven. Het huis is volledig van hout en heeft een open gevelconstructie met folie en houtwolisolatie.

De delen larikshout zijn circa 2 tot 3 mm diep ingebrand

(Foto: IC4U, Haarlem)

Aanzicht van de achtergevel waar iets minder vierkante meters zijn toegepast



Voorbeeld van een woning in Japan met een gevel van aangebrand hout

Horizontaal

De aangebrande delen zijn op drie plaatsen in de gevels van het huis van Weijnen toegepast. In de voor- en de achtergevel zijn ze horizontaal verwerkt als een open gevelbekleding. De betimmering wordt daar in een bepaald ritme afgewisseld met stroken voor daglichttoetreding. Op de onderste twee meter, tot bovenkant voordeur, zijn om de twee

delen oranjegele 'neuslatten' aangebracht. Dit is bedoeld als een esthetisch detail, maar in de praktijk blijkt het nog een praktisch resultaat op te leveren. Het verkoolde hout blijft zwart afgeven. Door de vooruitstekende latten is het risico op besmetting van kleding en dergelijke aanzienlijk minder.
Er zijn ook aangebrande delen lariks-hout met koplatten verticaal verwerkt bij de dakopbouw en er is wat gebruikt voor het plafond in de keuken. In eerste instantie zouden de delen met nieten worden bevestigd, maar naderhand is besloten ze met zwarte schroeven vast te zetten.
Hoe duurzaam de gevelbekleding is in relatie tot weersinvloeden valt nog te bezien. Feit is wel dat er geen onderhoud nodig is. In Japan zeggen ze dat de koolstoflaag 60 tot 80 jaar bescherming biedt tegen aantasting door schimmels en bacteriën. Weijnen vindt 50 jaar al voldoende. Hij heeft ook niets met garanties van fabrikanten te maken. Het risico is voor hemzelf.

Kleurwisselingen

Bouwen op IJburg is welstandsvrij, dus wat Welstand van deze gevelafwerking vindt speelt geen rol. Of zoals Weijnen het zei: "De gevels zouden zwart worden en dat worden ze ook. Alleen ziet het er anders uit dan hout dat behandeld is met carbolineum, koolteer of lijnolie." Het ging de architect om het esthetische effect en dat zal ongetwijfeld bereikt worden. De diepzwarte gevel kan afhankelijk van de daglichtsterkte en de lichtinval voortdurend van kleur veranderen; van gitzwart via blauw naar zilver, grijs, donkerbruin en zelfs wit.

Aanbranden met een gasbrander bleek betere resultaten te geven dan op de traditionele, Japanse manier

(Foto: IC4U, Haarlem)

Detailopname van de aangebrande delen met daartussen de neuslatten

TECHNIPLAN HAALT WARMTE EN KOUDE UIT DE RIVIER

Energiestroom

TECHNIPLAN HEEFT EEN TECHNIEK ONTWIKKELD OM EEN GEBOUW TE VERWARMEN EN TE KOELEN MET THERMISCHE ENERGIE UIT DE MAAS. MET DIT SYSTEEM IS WARMTE-/KOUDEOPSLAG OOK TOEPASBAAR ALS DE BODEM DAARVOOR NIET VOLDOENDE CAPACITEIT HEEFT. 'ZONDER DE EXTRA ENERGIE UIT DE RIVIER ZOUDEN DE ONDERGRONDSE BRONNEN TWEE KEER ZO GROOT MOETEN ZIJN.'

Opslag van warmte en koude in de bodem, vaak gecombineerd met een warmtepomp, is een veelvuldig toegepaste techniek om de temperatuur in gebouwen te regelen. Helaas is onder de grond niet altijd voldoende capaciteit voor een opslagbron voor warm en koud water, wat ook het geval is bij de nieuw te bouwen Maastoren op de Kop van Zuid in Rotterdam. Daarom verzon Techniplan Adviseurs, in opdracht van OVG Projectontwikkeling, een revolutionaire uitbreiding op warmte-/koudeopslag. De duurzame energie stroomt de toren letterlijk binnen, want het gebouw zal ook warmte en koude onttrekken aan de Maas. Bijstoken met fossiele brandstof is niet nodig, dus bij de warmte- en koudeopwekking vindt geen uitstoot van CO_2 plaats. 'De verwarming en de koeling van het gebouw gebeurt met duurzame energie', geeft ing. Dick van der Kooij van Techniplan aan.

Een computertekening van de Maastoren.

KENGEGEVENS

PROJECT
energiesysteem Maastoren

LOCATIE
Rotterdam

INGENIEURSBUREAU
Techniplan

NAAM
Dick van der Kooij

LEEFTIJD
39

TITEL
ing.

OPLEIDING
HTS Werktuigbouwkunde, afstudeerrichting Energiekunde

FUNCTIE
adviseur

MEETPUNTEN

Bij het uitwerken van het plan om de Maas als bron voor duurzame energie te gebruiken baseerde Techniplan zich op meetgegevens over een periode van tien jaar. 'Rijkswaterstaat heeft op diverse plaatsen in Nederland temperatuurmeetpunten in de rivieren aangebracht', vertelt Van der Kooij. 'Uit analyse van de meetdata blijkt dat de Maas een welkome aanvulling is op het duurzame energieaanbod.'

Door het naijleffect bevat de Maas in de herfst nog relatief veel opgeslagen zonnewarmte en thermische energie van stroomopwaarts gelegen industrie. 'Omdat de meeste gebouwen dan al verwarming nodig hebben, biedt de rivier in dit jaargetijde een goed rendement bij het verwarmen van de Maastoren', zegt Van der Kooij. 'Pas wanneer de rivier verder is afgekoeld dan het water van de ondergrondse warmtebron, verwarmen we de toren met behulp van deze bron.' In de lente gebeurt hetzelfde, maar dan omgekeerd. 'Wanneer de rivier nog relatief koud is, gebruiken we dat water om te koelen. Als de Maas een hogere temperatuur bereikt dan het water in de koudebron, dan schakelen we over op de bron in de bodem.' Dit klinkt vrij omslachtig, maar het komt erop neer dat koelen altijd met de koudste bron (water uit de rivier of uit de ondergrondse opslag) gebeurt en verwarmen altijd met de warmste.

Wanneer de thermische energie in de Maas niet direct is te benutten voor het regelen van de temperatuur in de toren, is die wel inzetbaar om de bronnen in de bodem op te laden. 'In vier weken tijd kunnen we voldoende energie aan de bodem toevoegen om het gebouw een jaar lang te verwarmen of te koelen.' Op deze manier maakt het systeem in de zomer duurzaam gebruik van de opwarming van de Maas die stroomopwaarts geloosd koelwater veroorzaakt.

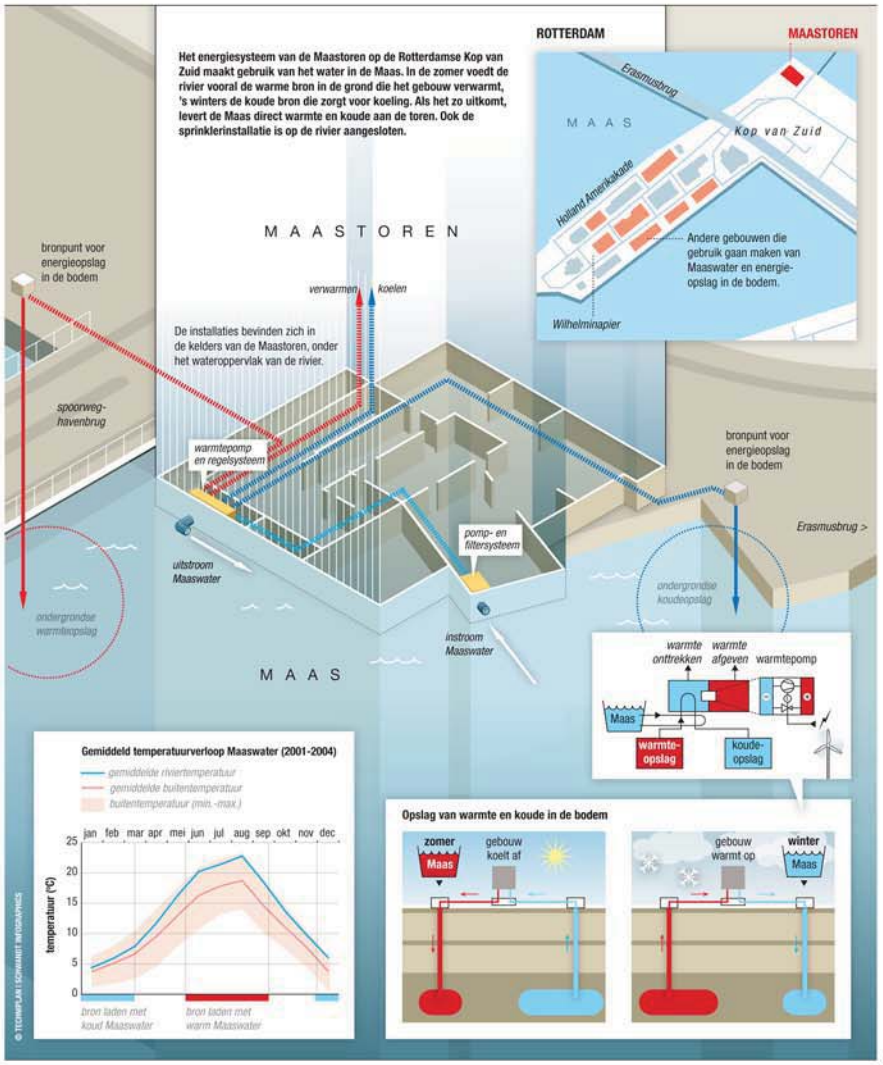
Voor het verwarmen beschikt de Maastoren over een warmtepomp om de temperatuur op een voldoende hoog niveau te brengen. 'Deze pomp verbruikt in vergelijking met gasgestookte ketels zeer weinig energie', zegt Van der Kooij. 'Met een deel elektrische aandrijfenergie produceert de warmtepomp vier delen warmte en drie delen koude.' Voor het koelen heeft het systeem geen extra energetische installaties, zoals koelmachines, nodig.

SUBSIDIE

De ondergrondse opslagbronnen voor warmte en koude hebben een diameter van 70 m. 'Zonder gebruik van de extra energie uit de Maas zou de inhoud van deze buffers bijna twee keer zo groot moeten zijn', geeft Van der Kooij aan. 'Mede dankzij een subsidie is de verwachtte terugverdientijd van de installatie een à twee jaar. Zonder overheidsbijdrage verdubbelt deze tijd.'

De Maastoren, straks met 165 m het hoogste gebouw van Nederland, vormt de eerste toepassing van het nieuwe energiesysteem en is dus een testcase. Er zijn echter al plannen om de techniek ook toe te passen bij een aantal andere kantoorgebouwen op de Kop van Zuid. Van der Kooij is ervan overtuigd dat het systeem een groot succes wordt. 'Deze vorm van energievoorziening wint het van gas en stadsverwarming.' ●

www.techniplan.nl

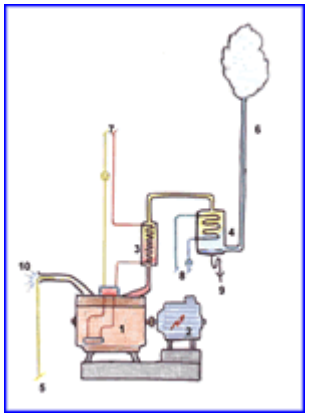


5.6 Bijlage 6: Warmtekrachtkoppeling produktinformatie

WKK (Warmte-KrachtKoppeling)

Hoe werkt wkk?
Het merendeel van onze elektriciteit wordt opgewekt in grote elektriciteitscentrales. Daarbij verdwijnt een groot deel van de energie via het koelwater in rivieren, de zee of door middel van koeltorens in de lucht. Gemiddeld gaat zo zelfs meer dan de helft van de verbruikte energie verloren. In de modernste centrales, die aardgas verstoken in gasturbines, is het verlies nog altijd 45%. In kolengestookte centrales zijn de verliezen beduidend hoger en zijn bovendien de emissies van broeikasgassen en verzurende stoffen, per opgewekte kWh elektriciteit, hoger dan bij aardgas.
In een aantal gevallen heeft men dit verlies gedeeltelijk ondervangen door het koelwater via leidingen naar gebouwen of kassen te brengen: stadsverwarming. Omdat nu het koelwater een hogere temperatuur moet hebben, daalt het rendement voor elektriciteitsproductie. Bovendien gaat er warmte verloren in de lange leidingen en wordt lang niet alle warmte gebruikt. De productie van elektriciteit staat immers voorop bij elektriciteitscentrales.
Een energetisch fraai alternatief is warmte-krachtkoppeling ofwel wkk. Bij wkk worden elektriciteit en warmte tegelijkertijd bij de verbruiker opgewekt. Daarmee worden de verliezen voor transport van warmte en elektriciteit vrijwel geëlimineerd. De warmtevraag staat normaal gesproken voorop bij wkk, zodat vernietiging van warmte nauwelijks voorkomt. Het brandstofverbruik voor de gecombineerde productie van elektriciteit en warmte in een wkk is daardoor een stuk lager dan het verbruik voor de productie van eenzelfde aantal eenheden elektriciteit en warmte afzonderlijk in elektriciteitscentrale en c.v.-ketel. Het totaalrendement voor omzetting van brandstof in elektriciteit en warmte ligt bij een wkk gewoonlijk op 85%. Hogere rendementen zijn mogelijk door ook restwarmte op lage temperatuur te benutten. Als ook de condensatiewarmte van de waterdamp in de rookgassen wordt benut kan het rendement zelfs de 100% benaderen. Dan kun je naar analogie van de hr-ketel spreken van hr-wkk.
Als brandstof voor de wkk wordt in Nederland meestal aardgas gebruikt, maar ook biogas en

stortgas worden wel gebruikt. De wkk levert dan duurzame energie. In principe is elke brandstof mogelijk. De keuze van de krachtbron, die de generator in de wkk aandrijft, hangt samen met de beschikbare brandstof, het gewenste vermogen en de vorm waarin de warmte geleverd moet worden.
In industriële processen, waar meestal grote vermogens nodig zijn en warmte in de vorm van stoom gevraagd wordt, is de gasturbine meestal de aangewezen krachtbron. Gasturbines worden tot zeer grote vermogens gebouwd en ook toegepast in moderne centrales.



Schema van een hr-wkk: 1-gasmotor, 2-generator, 3-rookgaskoeler, 4-rookgascondensor, 5-aardgastoevoer, 6-rookgasfvoer 45 °C, 7-c.v.water 70-85 °C, 8-lagetemperatuursverwarming 30-35 °C, 9-condenswaterafvoer, 10-verbrandingslucht (Klik het schema voor een grotere afbeelding)

Voor de verwarming van kantoren, ziekenhuizen, bedrijfshallen, tuinbouwkassen, e.d. wordt meestal een verbrandingsmotor gebruikt. Een dergelijke motor werkt net als de automotor, maar loopt op aardgas of biogas in plaats van benzine of lpg. Het koelwater van de motor en de warmte van de uitlaatgassen worden gebruikt om c.v.-water op te warmen. Meestal is de maximale c.v.-watertemperatuur dan 80 tot 90 °C. Er zijn ook speciale motoren, die met koelwater van 120 °C werken. Gasmotoren zijn beschikbaar voor vermogens van slechts 5 kW tot 5 of meer MW!
Op heel kleine schaal worden ook al kleine wkk's met Stirlingmotor, microgasturbine of brandstofcel gebouwd. Mogelijk is de brandstofcel een optie voor de toekomst om per woning een wkk te plaatsen. Op dit moment is wkk nog voorbehouden aan grotere energieverbruikers.

Van beide foto's is een grotere versie beschikbaar als u er op klikt.

Milieuvoordelen
Toepassing van wkk levert een duidelijke besparing op in vergelijking tot conventionele elektriciteitsopwekking en verwarming. Daarmee wordt ook een belangrijke bijdrage geleverd

aan vermindering van het broeikaseffect door een lagere emissie van CO_2. De besparing varieert met de keuze van de krachtbron, de besparing op verliezen in het elektriciteitsnet en de vorm waarin de warmte wordt geleverd. Naarmate de warmte op lagere temperatuur wordt gebruikt, neemt de besparing toe. De besparing hangt ook samen met het referentiekader. Het lijkt reëel om als referentie het gemiddelde rendement van elektriciteitscentrales en de emissies uit een mix van de brandstoffen
steenkool en aardgas te gebruiken. Daarnaast kunnen we afhankelijk van de plaats, waar de elektriciteit uit de wkk wordt ingevoerd, nog de besparingen op transportverliezen meenemen. Immers de elektriciteit van een centrale heeft een lange weg, met de daarbij behorende verliezen, te gaan. De elektriciteit uit de wkk is daarentegen direct op de plaats waar het gebruikt wordt. Het Ministerie van Economische Zaken hanteert bij subsidieregelingen momenteel een andere filosofie. Als referentie kiest men het rendement en de emissies van de nieuwste, gasgestookte centrale, de Eemscentrale.

Zuur is, dat door de liberalisatie van de elektriciteitsmarkt wkk's verminderd worden ingezet, terwijl het aandeel kolencentrales toeneemt en kunstmatig goedkope stroom van bruinkoolcentrales wordt geïmporteerd. Dat is ook letterlijk zuur, omdat steenkool en bruinkool naast meer CO_2 ook meer verzurende stoffen de lucht inblazen.
Overigens wordt er gewerkt aan oplossingen om de economische situatie voor wkk te verbeteren door schuiven met de regulerende energiebelasting (REB). Het aardgasverbruik van een wkk is nu vrijgesteld van REB. Investeringen in wkk worden gestimuleerd door investeringsaftrek (EIA).
Wkk is al jaren een belangrijke factor in Nederland. Het aandeel van wkk in de elektriciteitsproductie is zelfs ca. 30 %. Daarmee loopt Nederland voorop in de EU. Het aandeel in het opgestelde vermogen is volgens opgave van Cogen Nederland bijna 40% van het totaal! Wkk is zonder meer de pijler onder de Nederlandse plannen voor reductie van CO_2. Om aan de afspraken van Kyoto te voldoen moet dit vermogen in tien jaar nog bijna verdubbelen. Dat lijkt onder de huidige omstandigheden een onmogelijke opgave. Er zullen bij de huidige lage prijzen voor elektriciteit en hoge prijzen voor aardgas maatregelen nodig zijn om wkk weer economisch rendabel te krijgen. Daar wordt door de politiek nu aan gewerkt. Houd dus moed en blijf plannen maken voor nieuwe investeringen in wkk.

Aandachtspunten
De resultaten van wkk zijn sterk afhankelijk van de daadwerkelijke warmtebenutting. Daarom moet bij de planning van een wkk van tevoren goed onderzocht worden hoeveel warmte er op lange termijn nodig is. Zinvolle besparingsmaatregelen zoals isolatie en terugwinning van warmte uit ventilatielucht moeten meegerekend worden in de bepaling van de warmtebehoefte op lange termijn. Bij ruimteverwarming, waar de warmtebehoefte direct samenhangt met de buitentemperatuur levert meestal de wkk een kwart van het maximaal benodigde vermogen en wordt de rest ingevuld met c.v.-ketel. Erg belangrijk is ook, met name bij kleinschalige wkk, de temperatuur van het c.v.-water en de samenwerking met de c.v.-ketel. Niet alleen neemt de

energiebesparing toe met een lagere watertemperatuur, maar het functioneren van de wkk kan sterk belemmerd worden door de c.v.-ketel, als die het c.v.-water te ver opwarmt. Daarom moeten de ketels zo laag mogelijk worden afgesteld. Wel moet gecontroleerd worden, dat het boilerwater, ter voorkoming van legionella, eens per etmaal boven 60 °C komt. Voor een maximaal rendement en maximale levensduur van de wkk, maar ook van ketels en dergelijke, is controle op de kwaliteit van het c.v.-water belangrijk.

http://www.energieprojecten.nl/edu/ut_wkk.html 2010-05-16

5.7 Bijlage 7: Berekeningen EPW en EPU resultaten

ALGEMENE GEGEVENS

Projectomschrijving	:	aftsuderen
Bestandsnaam	:	O:\Msc 4\energie\gebouw totaal 100517 000.epw
Omschrijving bouwwerk	:	hotel-kantoor-winkels-woningen
Adres	:	
Soort bouwwerk	:	Woongebouw
EPC-eis	:	1.00

INDELING GEBOUW

Type	*Omschrijving zone*	*Ag [m²]*
Verwarmd	1 grond-buiten-serre-ruimte	1049.76
Verwarmd	2 grond-serre-serre-ruimte	1424.00
Verwarmd	3 grond-serre-buiten-ruimte	778.00
Verwarmd	4 ruimte-serre-ruimte-ruimte	854.40
Verwarmd	5 serre-ruimte-ruimte-ruimte	298.64
Verwarmd	6 ruimte-ruimte-buiten-ruimte	699.84
Verwarmd	7 ruimte-buiten-ruimte-ruimte	95.30
Verwarmd	8 serre-ruimte-ruimte-ruimte	256.20
Verwarmd	9 ruimte-ruimte-buiten-ruimte	509.70
Verwarmd	10 ruimte-buiten-buiten-buiten	841.00
Verwarmd	11 serre warm	1315.00
Verwarmd	12 serre koud	637.00
Verwarmd	13 grond-serre-serre-ruimte	2187.00
Verwarmd	14 grond-serre-buiten-ruimte	1804.00
Verwarmd	15 ruimte-serre-ruimte-ruimte	875.60
Verwarmd	16 serre-ruimte-ruimte-ruimte	557.20
Verwarmd	17 ruimte-ruimte-buiten-ruimte	758.20
		---------- +
totaal		14940.84

BOUWKUNDIGE GEGEVENS - TRANSMISSIE

Definitie scheidingsconstructies zone: 1 grond-buiten-serre-ruimte

constructie	*begrenzing*	*constructiedeel*	*A*	*Hkr*	*Rc*	*U*	*ZTA*	*helling*	*zon-*	*beschaduwing*
			[m²]	*[m]*	*[m²K/W]*	*[W/m²K]*	*[-]*	*[°]*	*wering*	
gevel zuid	buiten, Z	1 dicht zuid	103.7		2.50	0.37				
		1 open zuid	207.4			1.10	0.60	90	ja	minimale belemmering
gevel west	buiten, W	1 dicht west	103.7		2.50	0.37				
		1 open west	207.4			1.10	0.60	90	ja	minimale belemmering
gevel noord	buiten, N	1 dicht noord	103.7		2.50	0.37				
		1 open noord	207.4			1.10	0.60	90	ja	minimale belemmering
gevel oost	buiten, O	1 dicht oost	311.0		3.30	0.29				
dak	AVR	1 dicht dak	311.0		3.90	0.24				Rc waarden 2,5 m²K/W, afwijkende waarden berekend vlg opbouw constructie
vloer	kruip	1 dicht vloer	311.0	0.40	2.50	0.13				Gevelopeningen 1/3 van gevelopp.
			---------- +							
Totaal			1866.2							

BOUWKUNDIGE GEGEVENS - INFILTRATIE

qv10;kar/m² van de woonfunctie:	0.200	[dm³/sm²]

BOUWKUNDIGE GEGEVENS - THERMISCHE CAPACITEIT

bouwtype van de woonfunctie:	gemengd licht

INSTALLATIE W - VERWARMING EN HULPENERGIE

Verwarmingssysteem 1 - Verwarming 1

Verwarmingssyteem toegepast op alle zones (1-17)

verwarmingstoestel	type toestel	:	collectieve verwarming (exclusief waakvlam)
	type luchtverwarmer/ketel	:	HR-107 Ketel
	aanvoertemperatuur	:	laag temperatuursysteem (LT)
installatiekenmerken	gebouwgebonden warmtelevering op afstand	:	nee
	afleverset voor warmtapwaterbereiding	:	nee
	individuele bemetering	:	ja
	alle leidingen binnen de woonfunctie	:	ja
	installatie voorzien van buffervat	:	nee
	type verwarmingslichaam	:	vloer- en/of wandverwarming
	opwekkingsrendement (Nopw;verw)	:	0.925 [-]
	systeemrendement (Nsys;verw)	:	1.000 [-]
hulpenergie	aantal ketels-cv/luchtverwarmers met waakvlam	:	0
	gasketels-cv	:	voorzien van ventilator
		:	voorzien van elektronica
		:	circulatiepomp voorzien van pompregeling

INSTALLATIE W - WARMTAPWATER

nr.	*opwekkingstoestel*	*klasse*	*Nopw;tap*	*qv;wp*	*Ag;badr*	*Ag;aanr*	*Lbadr*	*Laanr*	*Lcirc*	*d;inw*	*Qbeh;tap;bruto*
			[-]	*[dm³/s]*	*[m²]*	*[m²]*	*[m]*	*[m]*	*[m]*	*[mm]*	*[MJ]*
1	direct met gas gestookt toestel (...	-	0.500	-	14940.8	14940.8	6-8	8-10	999.9	<= 8	1668389

INSTALLATIE W - VENTILATIE

Ventilatiesysteem 1 - Ventilatie 1

Ventilatiesysteem toegepast op alle zones (1-17)

ventilatievoorziening	:	mechanische luchttoe- en afvoer
type warmteterugwinning	:	geen warmteterugwinning
type voorverwarming	:	geen voorverwarming
aangewezen zones	:	1 grond-buiten-serre-ruimte

INSTALLATIE W - VENTILATOREN

ventilatiesysteem	*type ventilator*
Ventilatiesysteem 1 - Ventilatie 1	gebalanceerde ventilatie, gelijkstroom

INSTALLATIE W - KOELING

Koelsysteem toegepast op alle zones (1-17)

koelsysteem:	type toestel	:	compressiekoelmachine
	vrije koeling	:	nee
	opwekkingsrendement voor koeling (Nopw;koel)	:	1.560 [-]
	systeemrendement voor koeling (Nsys;koel)	:	0.900 [-]

RESULTATEN - ENERGIEPRESTATIEGEGEVENS

verwarming	Qprim;verw	4244273 MJ	
hulpenergie	Qprim;hulp;verw	350308 MJ	
warmtapwater	Qprim;tap	3336778 MJ	
ventilatoren	Qprim;vent	627416 MJ	
verlichting	Qprim;vl	842817 MJ	
zomercomfort	Qzom;comf	0 MJ	
koeling	Qprim;koel	885645 MJ	
bevochtiging	Qprim;bev	0 MJ	
comp. PV-cellen	Qprim;pv	0 MJ	
comp. WK	Qprim;comp;WK	0 MJ	
		---	+
totaal	Qpres;tot	10287236 MJ	
	Qpres;toel	6810711 MJ	

5.10 Bijlage 10: Constructieberekening bamboe bogen

Constructieberekeningen bamboe

Aannames:				
dichtheid ρ (gem)	600 kg/m³	0,094 *ρ 1/7 *max 8,057 N/mm²	σ max druk σ toelaatbaar σ toelaatbaar	(Janssen 2000) (Janssen 2000)
afmetingen buiten diameter D binnen diameter d wanddikte t	 120 mm 98,4 mm 10,8 mm	0,82 *D	voor de meeste bamboe's (Janssen 2000)	
belasting (max) f overspanning (max) l stramienmaat b	4000 N/m² 24,5 m 7,2 m			
formules	f per boog σ toel in stam	(b*l*f)/4 kolommen (π*(D²-d²))/4*σ toel	176400 kN 29837,134 N	
	aantal stammen	**f per boog/σ toel**	**5,912096 stammen**	

5.9 Bijlage 9: Bamboe Composieten

Hier worden kort de produkten besproken die van bamboe composieten worden gemaakt. Dit is van belang omdat deze produkten goede vervangers zijn van hardhout. Er wordt kort op ingegaan omdat hier niet de focus ligt van het onderzoek.

Bamboe wordt in verschillende composieten geproduceerd die veelal gebaseerd en vergelijkbaar zijn met houten composieten.
Plybamboo is één van die composieten, vergelijkbaar met plywood. In deze categorie kunnen we drie verschillende plaatmaterialen onderscheiden, namelijk: Bamboo Mat Board (BMB), Bamboo Particle Board (BPB) en Bamboo Strip Board (BSB) (afbeelding 130-132).

Afb. 130-132. Bamboo Mat Board, Bamboo Particle Board en Bamboo Strip Board

Zoals de namen al aangeven worden deze platen gemaakt van respectievelijk bamboematten, bamboe'particles' en bamboestrips. Deze worden met lijm aan elkaar geplakt en geperst waardoor een plaatmateriaal ontstaat vergelijkbaar met houten plaatmaterialen. Deze drie composieten zijn vooral geschikt voor toepassingen intern, in een droge en uv arme omgeving.
Een andere bamboe composiet is Strand Woven Bamboo (SWB) (afbeelding 133).

Afb. 133. Strand Woven Bamboo balk

Hier worden de bamboe vezels verlijmd en tot plaatmateriaal of tot een balk geperst. Deze produkten hebben een dichtheid van ca. 1000 kg/m^3 en zijn vergelijkbaar met hardhout. De produkten die ervan worden gemaakt zijn ook geschikt voor exterieure toepassingen. Één van die exterieure toepassingen is kozijnen. De balken en platen zijn ook geschikt voor constructieve doeleinden, hoewel de grote dichtheid hier een aandachtpunt is (zware onderdelen).

In het ontwerp worden van de genoemde produkten bamboe kozijnen en vloerdelen toegepast. Deze toepassingen lenen zich het meeste voor het ontwerp, omdat hierdoor geen hardhouten produkten toegepast hoeven te worden en toch een vergelijkbare duurzaamheidsklasse kan worden gehaald.