



Hogeschool Gent

Departement INWE – vakgroep bouwkunde

Schoonmeersstraat 52 – 9000 Gent

Stabiliteitsstudie van het stadhuis van Brugge

Stability analysis of the town hall of Bruges

2012-2013

Masterproef tot verkrijging van de graad van

Master in de Industriële Wetenschappen: bouwkunde

promotoren: prof. ir. P. Ampe

ir. L. Van Cauter

De Cuyper Davy

De Witte Colin

Raeymaekers Andreas

Stabiliteitsstudie van het stadhuis van Brugge



Stability analysis of the town hall of Bruges

Woord vooraf

Alvorens deze opdracht aan te vangen willen wij graag onze dank betuigen aan de verschillende mensen en organisaties die dit onderzoek mee mogelijk maakten.

Vooreerst richten wij in het bijzonder een dankwoord aan dhr. prof. ir. Ampe Patrick en dhr. ir. Van Cauter Leo om ons bij te staan en raad te geven bij ons onderzoek.

Daarnaast betuigen wij ook graag onze dank aan de gebouwendienst van de stad Brugge. Historische documenten werden ons beschikbaar gesteld en de vlotte regeling voor de bezoeken aan het stadhuis van Brugge appreciëerden wij sterk.

Tot slot bedanken wij Hogent, die het mogelijk maakte om dit onderzoek te realiseren.

Davy De Cuyper, Colin De Witte, Andreas Raeymaekers

Gent, mei 2013

Abstract

De Gotische Zaal in het stadhuis van Brugge doet dienst als museum. Het gebouw werd opgetrokken in metselwerk. Door scheurvorming in de oostgevel van de zaal worden de muurschilderingen beschadigd. In dit onderzoek wordt dieper ingegaan op de krachtwerking van de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie op de oostelijke gevel van het stadhuis. Via de eindige elementensoftware ANSYS wordt een structurele en een thermische analyse van een 3D-model van het gebouw uitgevoerd. De resultaten tonen aan dat de toelaatbare spanningen in de gevel op specifieke plaatsen erg overschreden worden. Samen met scheurrapporten, wordt via de resultaten de oorzaak van de scheurvorming bepaald. De spanningen blijken afkomstig te zijn van de spatkrachten die de kruisribgewelven van overbrugging naar de Burgerlijke Griffie veroorzaken. Na het aanbrengen van trekstaven tussen de gemetselde kruisribgewelven, blijkt uit de structurele analyse dat de spanningen de maximale spanningen niet meer overschrijden.

Kernwoorden: ANSYS, eindige elementenmethode, stadhuis Brugge, scheurvorming, historisch metselwerk.

Abstract (Engels)

The Gothic Hall in the town hall of Bruges serves as museum. The walls of the building consist of masonry. Due to the cracks in the eastern wall of the hall, the murals are damaged. In this study, the influence of the bridge to the 'Burgerlijke Griffie' is analyzed on the eastern wall of the town hall. By using the finite element software ANSYS, a structural and thermal analysis of a 3D-model of the building is carried out. The results show that the maximal normal stress is exceeded on specific parts of the facade. Together with the crack reports, the cause of the cracking is determined by the results. The stresses are provided by the horizontal forces of the crossed-ribbed vault of the bridge to the 'Burgerlijke Griffie'. After applying tensile bars between the masonry vaults, analysis shows that the stress doesn't exceed the maximum stress anymore.

Keywords: ANSYS, finite element method, town hall Bruges, cracking, historic masonry.

Inhoud

Woord vooraf	4
Abstract	5
Inhoud.....	6
1. Literatuurstudie	10
1.1. Inleiding	10
1.2. Studie van het stadhuis	14
1.2.1. Inleiding.....	14
1.2.2. Buitenmuren	15
1.2.3. Kelder	18
1.2.4. Gelijkvloers	19
1.2.5. Eerste verdieping.....	23
1.2.6. Zolder	27
1.2.7. Overbrugging Blinde Ezelstraat.....	30
1.2.8. Historische gebeurtenissen	33
1.3. Historisch metselwerk	34
1.3.1. Inleiding.....	34
1.3.2. Eigenschappen.....	35
1.3.3. Scheurvorming	47
1.4. Structurele analyse	54
1.4.1. Inleiding.....	54
1.4.2. Numerieke rekentechnieken	55
1.4.3. ANSYS.....	57
1.4.4. Modellerings	58
2. Probleemstelling.....	60
3. Afbakening onderzoeksveld	60
4. Onderzoeksmethode	61
5. Scheurinspectie.....	63

5.1. Opmeting van de scheur	63
5.2. Inspectie van de scheur.....	67
5.2.1. Kelder	67
5.2.2. Gelijkvloers	68
5.2.3. Eerste verdieping.....	70
5.2.4. Zolder	72
5.3. Verwerking resultaten Huggenberger.....	74
5.4. Scheurrapporten.....	76
6. Belastingen op het gebouw.....	83
6.1. De dakconstructie	83
6.2. Daklasten	88
6.2.1. Vaste lasten.....	88
6.2.2. Mobiele lasten	89
6.2.3. Totale last	92
6.3. Tussenvloeren.....	95
6.3.1. Tussenvloer gelijkvloers – eerste verdieping	95
6.3.2. Tussenvloer eerste verdieping - zolder.....	98
6.4. Krachtenwerking overbrugging naar Burgerlijke Griffie.....	101
6.4.1. Gewelfwerking afdekking Blinde Ezelstraat.....	102
6.4.2 Gewelfwerking afdekking keuken.....	105
6.4.3 Voor –en achtergevel Burgerlijke Griffie.....	107
6.5. Conclusie krachtenwerking in het stadhuis	109
7. 3D – Model.....	110
7.1. Algemeen	110
7.2. Gevels.....	111
7.3. Tussenvloeren.....	113
7.3.1. Tussenvloer gelijkvloers – Gotische Zaal	113
7.3.2. Tussenvloer Gotische Zaal - zolder.....	114

7.4. Opmerkingen	116
8. Handberekingen.....	118
8.1. Eigengewicht gevels.....	118
8.2. Eigengewicht tussenvloeren.....	121
8.3. Conclusie handberekening	122
9. Verwerking in ANSYS.....	123
9.1. Inleiding	123
9.2. Preprocessing: model gebruiksklaar maken	124
9.2.1. Voorafgaande instellingen.....	124
9.2.2. Geometrisch model.....	125
9.2.3. Materiaaleigenschappen instellen.....	128
9.2.4. Elementen definiëren.....	130
9.2.5. Mesh	133
9.3. Solution	141
9.3.1. Thermische analyse	141
9.3.2. Structurele analyse bestaand model.....	143
9.4. Postprocessing.....	146
10. Resultaten van de analyses	148
10.1. Algemeen.....	148
10.2. Resultaten bestaand model	150
10.2.1. Afspraken	150
10.2.2. Verklaring krachtenwerking.....	150
10.2.3. Normaalspanningen volgens de X –richting	153
10.2.4. Normaalspanningen volgens de Y–richting	155
10.2.5. Normaalspanningen volgens Z –richting.....	157
10.2.6. Plaats van de scheur	174
10.2.7. Totale vervorming van de oostgevel	175
10.3. Aanbrengen van een oplossing.....	176

10.3.1. Voorstel oplossing.....	176
10.3.2. Resultaat oplossing.....	178
11. Conclusie.....	183
Lijst met Figuren.....	185
Lijst met Tabellen.....	191
Lijst met scheurrapporten.....	192
Referentielijst.....	193
Lijst met bijlages.....	195

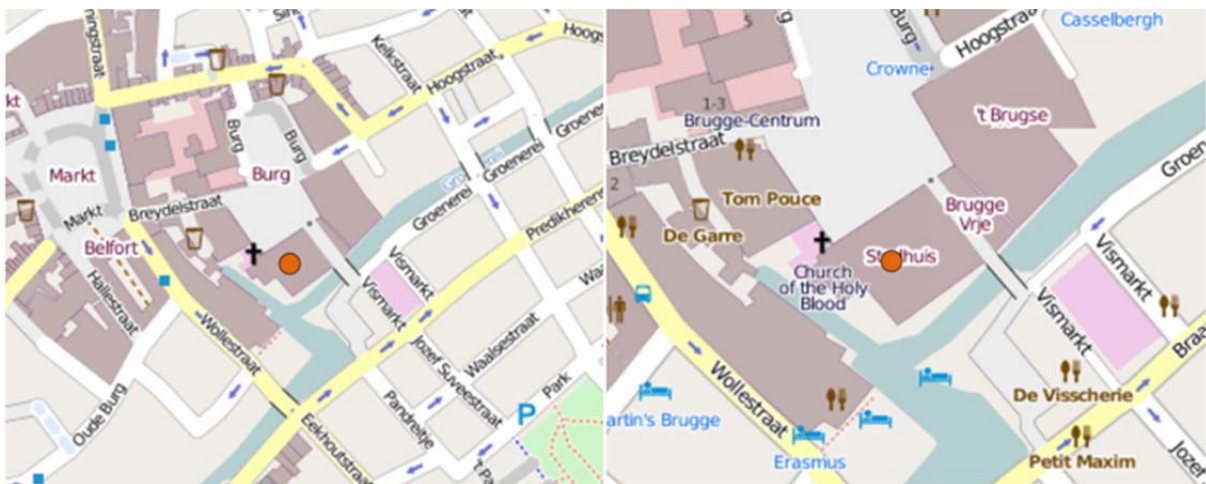
1. Literatuurstudie

1.1. Inleiding

Het behoud van historische gebouwen is een groot aandachtspunt in veel landen wereldwijd. Wetenschappers en ingenieurs voeren onderzoeken om oude gebouwen te renoveren en te onderhouden. Deze doeleinden roepen op om structuren uit metselwerk beter te begrijpen (Hradil, Žák, Novák, Lavický, 2001). Het zijn ook het disciplines die een gespecialiseerde kennis vragen. Dit komt door de voortdurende verandering van materialen en bouwtechnieken. Deze kennis omvat verschillende vakgebieden zoals (Lourenço, 2001):

- archeologie om bouwtechnieken uit het verleden te reconstrueren;
- geschiedenis van de architectuur en bouwkunde;
- structurele vormen in de architectuur;
- gebruik van traditionele bouwmaterialen;
- consolidatie en vervanging van traditionele bouwmaterialen.

Het stadhuis van Brugge bevindt zich op de Burg nr. 12. Het huidige gebouwencomplex wordt ten oosten begrensd door de Blinde Ezelstraat, ten zuiden door de Reie, ten westen door de Basiliek van het Heilige Bloed en ten noorden door de Burg (zie Figuur 1).



Figuur 1: ligging stadhuis (Gilté & Vanwalleghem, 1999)

Vanaf 1280 vergaderen de schepenen van Brugge in het "Ghyselhuus", dat zich toen op het adres van het huidige stadhuis bevond. Naast een vergaderruimte was er ook een gevangenis in ondergebracht. In het vierde kwart van de 14de eeuw werd dit vervallen gebouw afgebroken en begon de bouw van het stadhuis. Het duurde 40 jaar om het stadhuis van Brugge (zie Figuur 2) te bouwen. De bouwwerken vingen aan in 1376 en eindigden in 1421. Ten gevolge van onlusten met Gentenaars werden de werken stilgelegd van 1380 tot 1385. J. Roegiers, M. Saghen en J. van Rijsel vormden een team om het stadhuis te ontwerpen en te bouwen. Het huidige gebouw is fasegewijs tot stand gekomen. Het hoofdgebouw wordt beschouwd als het eerste monumentale, middeleeuwse stadhuis van onze gewesten. Ten zuiden van dit oudste gedeelte van het stadhuis bevond zich toen het Beenhouwerstraatje. Door uitbreidingen van het stadhuis in zuidelijke richting werd deze straat geleidelijk aan ingenomen door gebouwen (Gilté & Vanwalleghem, 1999).



Figuur 2: stadhuis Brugge

De stabiliteitsstudie van een grote oude structuur uit historisch metselwerk, zoals het stadhuis, is een multidisciplinaire taak van verschillende activiteiten. Deze activiteiten zijn (Roca, Cervera, Pelà, Clemente & Chiumenti, 2012):

- historisch onderzoek voeren naar waardevolle informatie over de bouw van het stadhuis en relevante gebeurtenissen rond het stadhuis;
- experimenteren op de gebruikte materialen;
- opstellen van een structurele analyse van het gebouw met eindige elementensoftware;
- evolutie van de vervorming van het gebouw opvolgen.

historisch onderzoek:

Opzoeken naar historische documenten vormt een belangrijke aanvulling voor de structurele analyse. Dit historisch onderzoek kan informatie opleveren die een beter inzicht geeft in de opbouw van de constructie. Zo kunnen uitgevoerde renovaties krachten met zich meebrengen die spanningen veroorzaken in de structuur waardoor de stabiliteit van het gebouw in gevaar wordt gebracht. Deze uitgevoerde renovaties kunnen nog steeds een invloed op de huidige toestand van het gebouw hebben. Informatie over historische gebeurtenissen moet nauwkeurig bekeken worden. Natuurlijke gebeurtenissen zoals aardbevingen kunnen aanzienlijke schade teweeggebracht hebben (Roca, Cervera, Pelà, Clemente & Chiumenti, 2012).

experimenteren:

Experimenten uitvoeren op de gebruikte materialen is meestal een noodzakelijke stap vooraleer van start kan gegaan worden met de structurele analyse. Dit zijn zorgvuldig gecontroleerde experimenten op grootschalig en kleinschalig gebied. Experimenten op gehele metselwerkconstructies bevinden zich in het grootschalig gebied. Op kleinschalig gebied kunnen er bijvoorbeeld testen worden uitgevoerd op een muurtje, gebouwd in het labo. Daarnaast moeten er ook testen worden uitgevoerd op de verschillende metselwerkcomponenten. Met de resultaten van deze testen kunnen de eigenschappen van het materiaal, zoals de elasticiteitsmodulus, bepaald worden. De waarden van deze eigenschappen worden dan gebruikt bij de structurele analyse (Lourenço, 1998).

structurele analyse:

De structurele analyse wordt gebruikt om de prestaties van de constructie te karakteriseren bij verschillende belastingen. Aan de hand hiervan wordt inzicht bekomen in het structurele gedrag van het metselwerk en kan de metselwerkstructuur worden beoordeeld. Analysemodellen die in staat zijn om typische problemen verbonden aan historische structuren te duiden, zijn hierbij noodzakelijk (Lourenço, 1998).

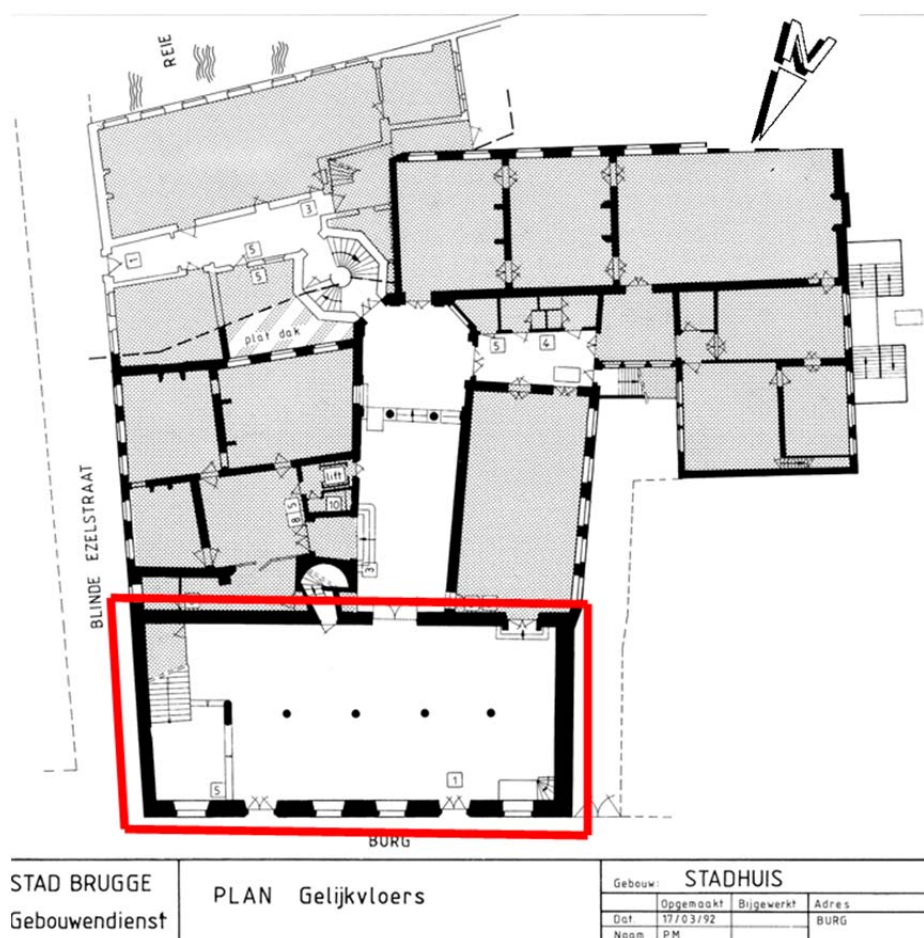
opvolging:

Door de toestand van het gebouw regelmatig te controleren, kan de evolutie van de vervorming worden bepaald. Zo wordt het duidelijk indien de geleden schade al dan niet gestabiliseerd is.

1.2. Studie van het stadhuis

1.2.1. Inleiding

Bij dit onderdeel wordt enkel het oudste gedeelte van het stadhuis (zie Figuur 3) bestudeerd. Voor het onderzoek is het irrelevant om de uitbreidingen naar de Reie toe onder de loep te nemen. Dit hoofdgebouw staat los van de andere bouwgedeeltes van het stadhuis omdat die later werden aangebouwd. Op Figuur 3 is duidelijk waar te nemen dat de muren van het oude gedeelte ook dikker zijn dan de andere. Het gebouw is opgebouwd uit 2 bouwlagen. De verschillende ruimtes zijn de kelder, het gelijkvloers, de eerste verdieping en de zolder.



Figuur 3: hoofdgebouw stadhuis (gebouwendienst stad Brugge, 1992)

Eerst worden de buitenmuren besproken. Daarna komen de verschillende bouwlagen van het gebouw aan bod met daarbij de functie van de ruimtes, de gebruikte bouwtechnieken en de renovaties gedurende de geschiedenis van het gebouw. Tot slot wordt er dieper ingegaan op de historische gebeurtenissen in de buurt van het stadhuis van dichterbij bekeken.

1.2.2. Buitenmuren

Alle buitenmuren van het gebouw bestaan uit metselwerk van Lediaanse kalkzandsteen. Enkel de zuidelijke muur bestaat uit baksteen. De noordgevel (zie Figuur 2) en de westgevel bevatten een frontgevel uit natuursteen (Gilté & Vanwalleghem, 1999). De dikte van de laag metselwerk uit natuursteen is onbekend.

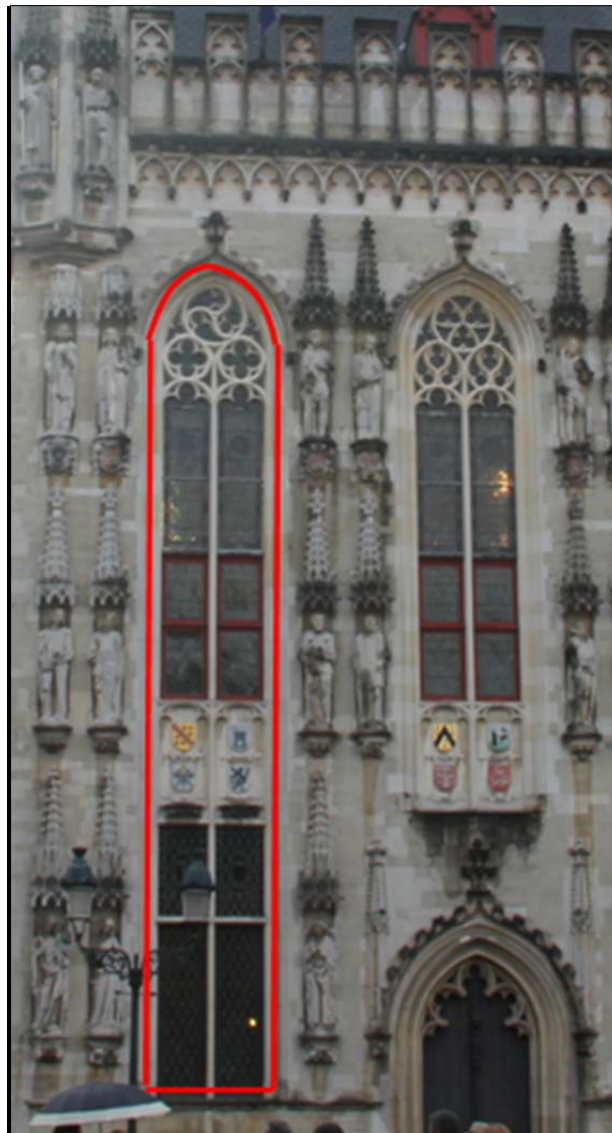


Figuur 4: oostgevel

De oostgevel (zie Figuur 4) bevat twee vensternissen op het gelijkvloers die dicht gemetseld zijn. Daarnaast bevinden zich op de zolderverdieping twee kleine ramen. De zwarte ankers dienen om structurelementen van de tussenvloeren aan te spannen tegen de gevel. Hierover wordt meer uitleg gegeven bij de vloer tussen de eerste verdieping en de zolder (zie 1.2.4.).

De zuid- en westgevel zijn van buitenaf niet zichtbaar. Dit komt door de uitbreidingen van het stadhuis in zuidelijke richting en de aanbouw van de Basiliek van het Heiligbloed in westelijke richting. De westgevel bevat net als de oostgevel twee ramen op de zolderverdiepingen en verschillende ankers. Nu bevinden zich tal van deur- en trapopeningen in de oorspronkelijke zuidelijke buitenmuur. Daarom kan de zuidelijke muur nu gezien worden als een binnenmuur (zie bijlages I-IV.).

De noordgevel is de voorgevel van het gebouw. Voor het eerst werd hier de typische Brugse travee toegepast. Een travee is een begrip in de vlakverdeling van een gevel. Hierin is een travee de oppervlakte waarbij de gevel zich in de lengterichting begint te herhalen. Dit komt overeen met de breedtes van deuren en vensters (Oostdijk, 2009). Figuur 2 toont dat de noordgevel verdeeld is in zes traveeën. Typisch aan het Brugse travee is dat de ramen van verschillende verdiepingen in één gevelnis zijn opgevat (zie Figuur 5).



Figuur 5: Brugs travee

Figuur 2, Figuur 5 en Figuur 6 tonen aan dat de voorgevel rijkelijk versierd is met beelden en wapenschilden. Het stadhuis heeft een laatgotische stijl. De beelden worden op consoles geplaatst. Enkele beelden tonen figuren uit het Oude en Nieuwe Testament. Andere beelden geven de respectievelijk heersers van Vlaanderen weer zoals graven, gravinnen, aartshertogen en keizers. De wapenschilden waren oorspronkelijk van de verschillende deelgemeenten van Brugge. Doorheen de geschiedenis van het gebouw werden de beelden en wapenschilden vaak vernield. Dit gebeurde onder andere tijdens de Franse Revolutie en beide wereldoorlogen. Tal van beeldhouwers en kunstenaars zorgden voor de wederopbouw van de beelden en de wapenschilden. J.Geefs, P. De Wispelaere en M. Witdouck zijn enkele van die beeldhouwers. Bovenaan Figuur 2 is afgebeeld dat de gekantelde borstwering van de voorgevel versierd is met erkertorentjes (Gilté & Vanwalleghem, 1999).



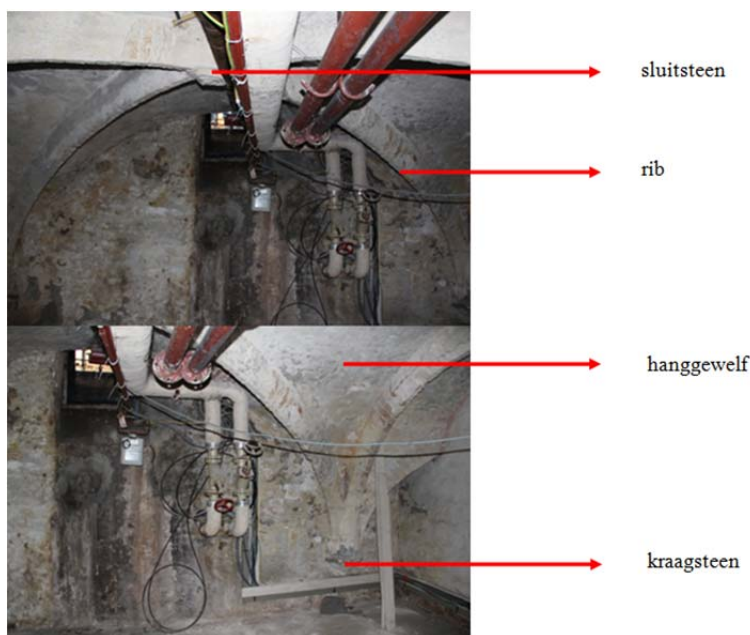
Figuur 6: beelden en wapenschilden aan noordgevel

Het zadeldak bevat tal van dakkapellen (zie Figuur 2). De nok werd versierd met een vorstkam. Oorspronkelijk bevond de linkse ingang van het stadhuis zich in de eerste travee. In 1766 werd deze ingang vervangen door een raam en in de tweede travee werd een nieuwe ingang gebouwd. Vandaag wordt deze ingang niet meer gebruikt. De deur bestaat er nog wel, maar de nis is dicht gemetseld. De twee symmetrische deuren in de tweede en de vijfde travee dragen bij tot de esthetiek van het gebouw. Beide zijn afgewerkt met spitsboogportalen in gotische stijl (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

1.2.3. Kelder

In de kelder worden de technische installaties voor elektriciteit en verwarming ondergebracht (zie bijlage I). Nutsleidingen worden ook hier verzameld. Via trapluiken aan de oostelijke en de westelijke kant is de tweebeukige kelder toegankelijk. Later werd via zuidelijke gevel een nieuwe ingang voorzien langs de binnenzijde van het gebouw.

Het plafond van de kelder bestaat uit kruisribgewelven (zie Figuur 7). Deze zijn deels van natuursteen en deels van baksteen. De sluitstenen hebben de vorm van een rozet. De kruisribgewelven steunen op kraagstenen en pijlers (Gilté & Vanwalleghem, 1999). Kruisribgewelven zijn gewelven op een vierhoekige grondslag met de ribben als dragende elementen. De gewelfkappen steunen op de ribben. Deze worden met baksteen dicht gemetselt. De ribben kruisen elkaar in het midden en komen samen in een sluitsteen. Een kraagsteen is een steen die uit de muur steekt en het beginpunt van de rib draagt. In de gotische bouwkunst is vaak gebruik gemaakt van het kruisribgewelf. De invoering van de gewelfrib wordt zelfs gezien als het begin van de gotiek. De gewelven zijn vaak aangebracht over langgerekte of vierkante traveeën. In de late gotiek werd de kruisvorm van het gewelf aangevuld met hulprribben, waardoor complexere vormen zoals het stergewelf en het netgewelf ontstonden (Van Hoek, 2008).

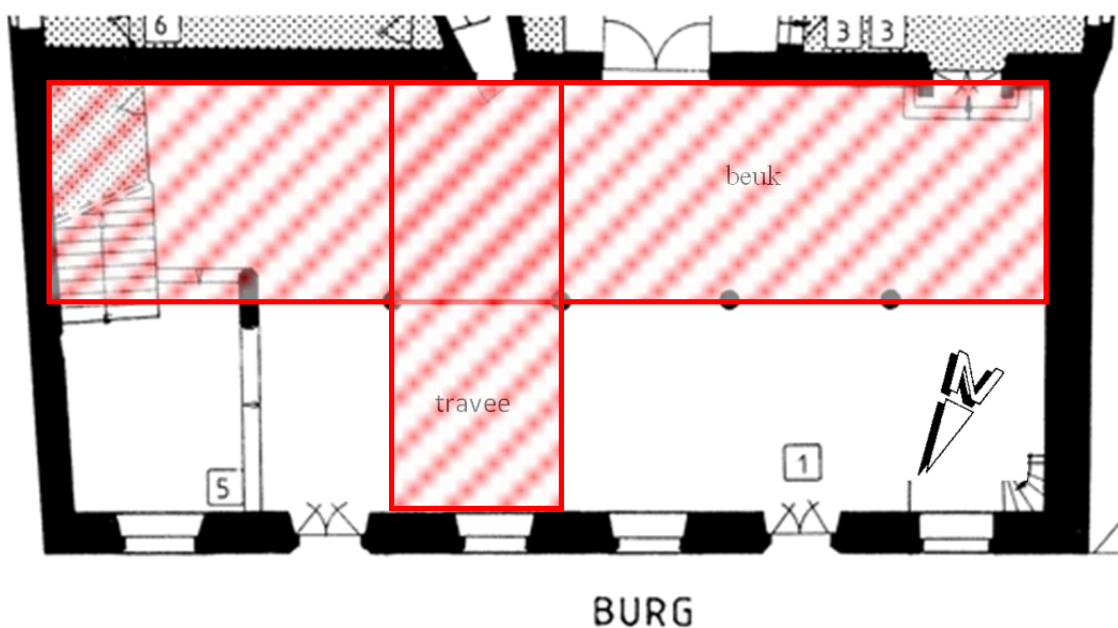


Figuur 7: kruisribgewelf

De tussenvloer werd afgewerkt met keramische tegels (zie Figuur 9). Er is geen verdere informatie over de vloeropbouw tussen het kruisribgewelf en de vloerafwerking beschikbaar. Over de funderingen van het gebouw bestaat ook geen beschikbare informatie.

1.2.4. Gelijkvloers

Het gelijkvloers wordt gebruikt als inkomhal (zie bijlage II). Via de rechtse ingang van de noordelijke gevel, kan het gebouw van op de Burg betreden worden. Naast de travee beschreven bij de gevels (zie 1.2.1.), heeft de term ook een tweede betekenis. Een travee is ook de ruimte met als breedte de afstand tussen twee kolommen en met als lengte de afstand tussen de noordelijke en de zuidelijke muur. Het gelijkvloers wordt ingedeeld in 6 traveeën en 2 beuken (zie Figuur 8). Een beuk is hier de ruimte tussen de rij kolommen en de naastliggende muur.



Figuur 8: grondplan gelijkvloers met aanduiding van travee en beuk (gebouwendienst stad Brugge, 1992)

Aan de westelijke muur staat een etalage met informatieve teksten over de geschiedenis van Brugge. In de inkomhal bevinden zich ook tal van schilderijen en beelden uit de Brugse geschiedenis. De inkomhal doet dus ook deels dienst als museum.

Aan oostelijke kant bevindt zich de receptie. Hier moeten bezoekers betalen om zich via de stenen trap naar de Gotische Zaal en de rest van het museum op de eerste verdieping te begeven. Ter hoogte van de balie staat een tussenmuur met twee spitsboogvormige doorgangen (zie Figuur 9). Deze tussenmuur draagt een deel van de zoldering van deze ruimte. De linkse doorgang leidt naar de brede stenen trap. Deze trap werd samen met de trapleuning geconstrueerd in de periode 1894-1898 door P. Mestdagh (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

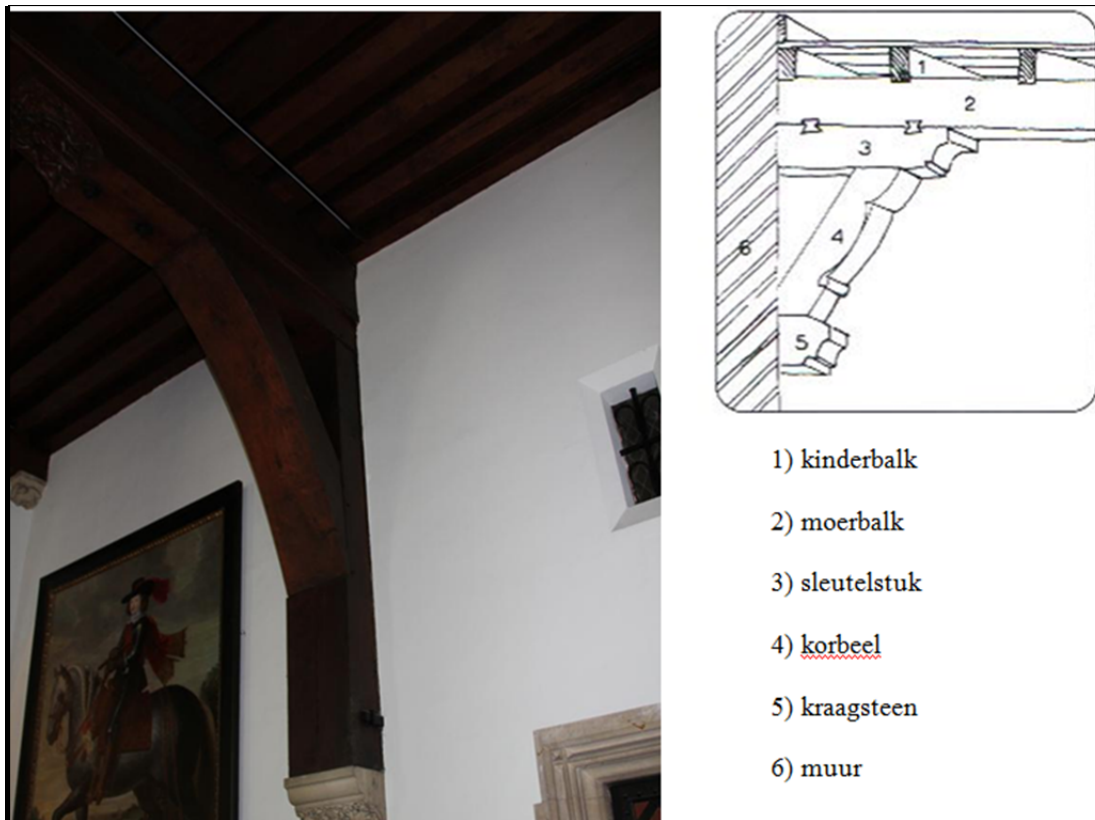
In de zuidelijke muur werd een toegang tot de "Nieuwe Schepenkamer" via natuurstenen portaal in neorenaissancestijl aangebracht. Dit is de grote doorgang in de vierde travee. M. D'Hondt verrichtte deze doorgang in 1897. Tegen de lange muren hangen smeedijzeren lantaarns waarvan E. en A. de Voogt de ontwerpers zijn (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

Figuur 9 toont een foto van de inkomhal getrokken vanaf de westelijke muur. De hierboven vernoemde zaken worden duidelijk afgebeeld op de foto.



Figuur 9: inkomhal met aanduiding van linker spitsboogportaal

De zoldering van deze ruimte bestaat uit 2 verschillende delen. Het deel van de tussenmuur tot de westelijke muur wordt overdekt door een constructie van houten balken, ondersteund door houten korbelen. De lengte van de overspanning is de afstand tussen de noordelijke- en de zuidelijke muur, wat de draagrichting ook meteen bekend maakt. Het werkingsprincipe van korbelen wordt getoond in Figuur 10.



Figuur 10: draagconstructie van tussenmuur tot westelijke muur (Joost Devree, 2013)

Moerbalken worden in de richting van de overspanning geplaatst op onderling gelijke afstand. Deze moerbalken bestaan uit ijzeren T-balken die bekleed zijn met eikenhout. Bovenop de moerbalken worden eikenhouten kinderbalken transversaal opgelegd. Zij zijn kleiner uitgevoerd en liggen onderling op een kleinere afstand. Op zijn beurt komt bovenop deze kinderbalken een plankenvloer. De afwerking van de vloer gebeurt met groene en gele keramische tegels. Via een driehoeksconstructie tussen sleutelstuk, korbeel en verticale balk wordt de belasting op de tussenvloer overgedragen naar de kraagsteen. Dit zijn figuratieve, natuurstenen consoles die ontworpen werden door P. De Wispelaere in 1898 (Gilté & Vanwalleghem, 1999). Deze zijn ingeklemd in de muur. De krachten worden via de muur afgeleid naar de funderingen. De principetekening op Figuur 10 toont een korbeel zonder verticale balk, terwijl er in de realiteit wel zo'n balk aanwezig is. Toch blijft de principewerking ongeveer dezelfde.

Halverwege de overspanning bevinden zich Dorische zuilen (zie Figuur 11) uit natuursteen. Zij vormen een tussensteunpunt voor de moerbalken. In 1766 werden deze zuilen geplaatst. Toen werden nog stenen gewelven gebruikt. In de periode van 1890 - 1905 werden deze gewelven vervangen door de houten zoldering van vandaag (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

Net als bij de tussenvloer van de kelder en gelijkvloers zijn de verschillende tussenlagen van de vloer niet geheel bekend.



Figuur 11: Dorische zuilen

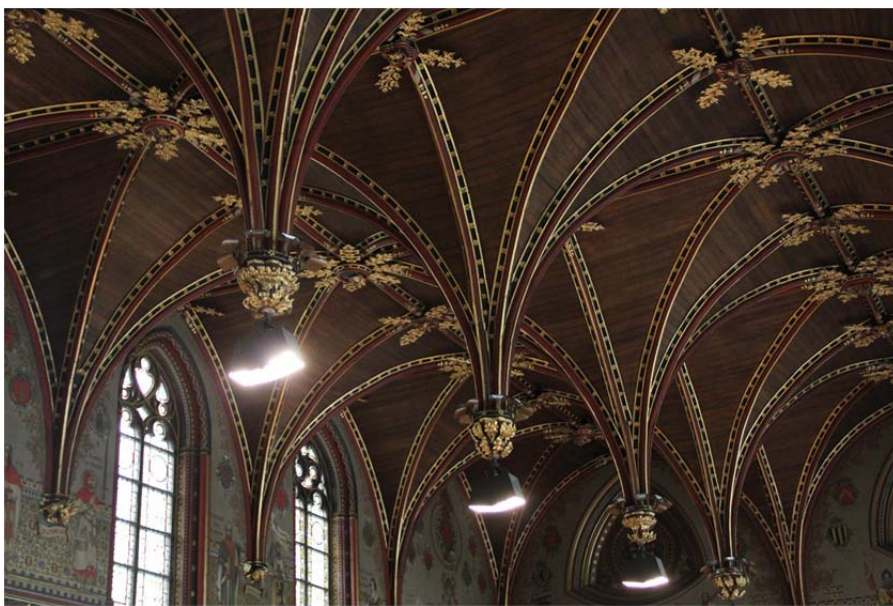
Het andere stuk tussenvloer omvat de draagconstructie tussen de oostelijke muur en de tussenmuur met spitsboogvormige doorgangen (zie Figuur 12). Hier worden in vergelijking met het andere deel van de zoldering van het gelijkvloers, de moerbalken meteen op de kraagstenen gelegd. De driehoeksconstructie is hier niet aanwezig. Het is ook zo dat de overspanning transversaal ligt ten opzichte van de zoldering van de westelijke muur tot de tussenmuur.



Figuur 12: draagsconstructie van tussenmuur tot oostelijke muur

1.2.5. Eerste verdieping

Op de eerste verdieping bevindt zich de Gotische Zaal (zie bijlage III). Gedurende de werkweek wordt deze zaal gebruikt als museum. In het weekend kan de zaal ook dienst doen voor plechtigheden zoals huwelijken en huldigingen. Oorspronkelijk bestond deze ruimte uit twee delen, namelijk de grote en de kleine schepenkamer. In de periode van 1890-1905 werd deze ruimte tot één grote zaal gevormd, namelijk de Gotische Zaal. Aan het plafond hangen gepolychromeerde kruisribgewelven uit hout (zie Figuur 13). De gouden randen en kraagstenen geven thematische voorstellingen weer van jaargetijden, maanden en natuurelementen. Deze kraagstenen zijn nog oorspronkelijk en onder meer het werk van J. van Valenciennes en G. Van der Houtmeersch (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

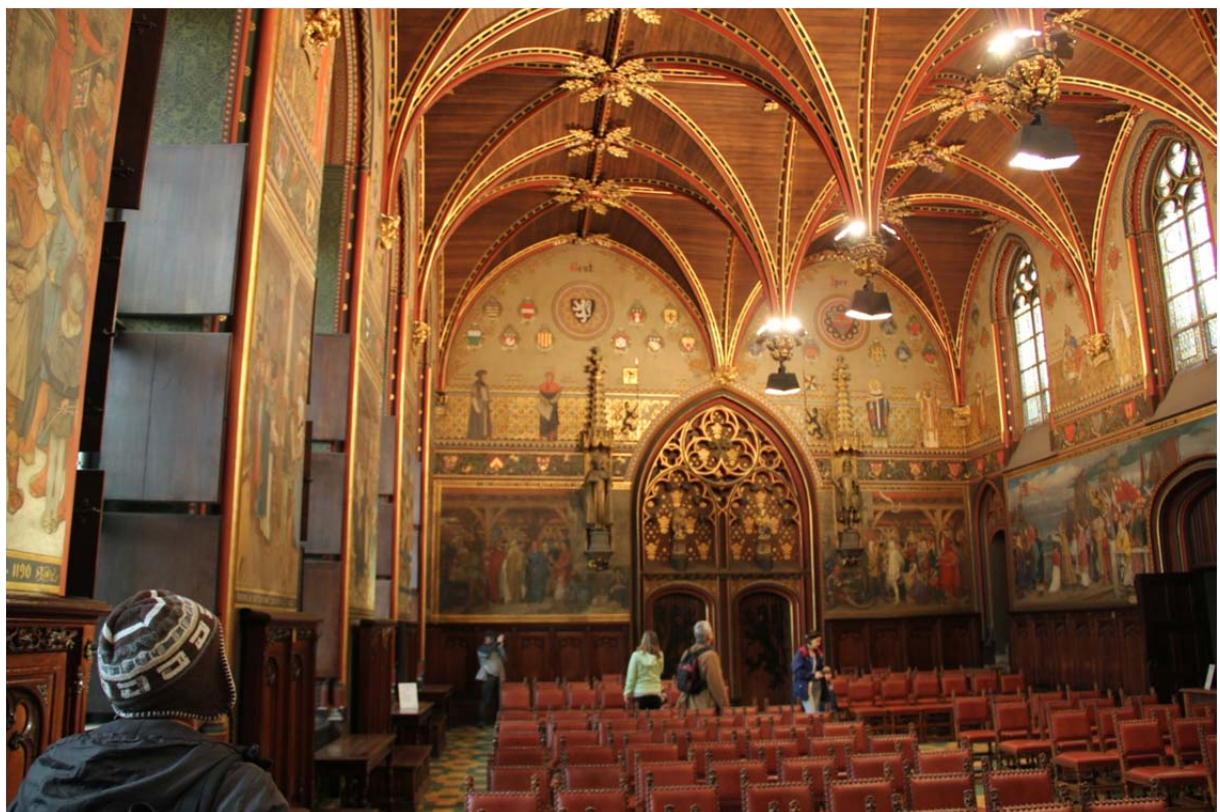


Figuur 13: gepolychromeerde houten kruisribgewelven

De muurschilderingen rondom de zaal werden gemaakt door A. en J. Devriendt. Deze schilderingen tonen belangrijke taferelen uit de Brugse geschiedenis. Net onder de muurschilderingen bevindt zich de eikenhouten sokkellambrisering, ontworpen door F. Devriendt-Scourrion. Aan de westelijke muur prijkt een monumentale pronkschouw (zie Figuur 14), in 1895 geschonken door het Provinciebestuur. Via de oostelijke muur is de doorgang naar de Burgerlijke Griffie mogelijk (zie 1.2.6.). De doorgang bestaat uit gekoppelde korfboogdeuren, opgenomen in hoge spitsboogomlijsting met blind maaswerk en schildhouders van West-Vlaanderen en Brugge (zie Figuur 15). Naast de doorgang werden nissen geconstrueerd met daarop bronzen beelden van stadspatroon Sint Donatius en eerste steenlegger Lodewijk Van Male. De zuidelijke muur bevat twee korfboogvormige en twee spitsboogvormige deuren. Zij worden aanzien als sobere varianten van de portalen in de voorgevel (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

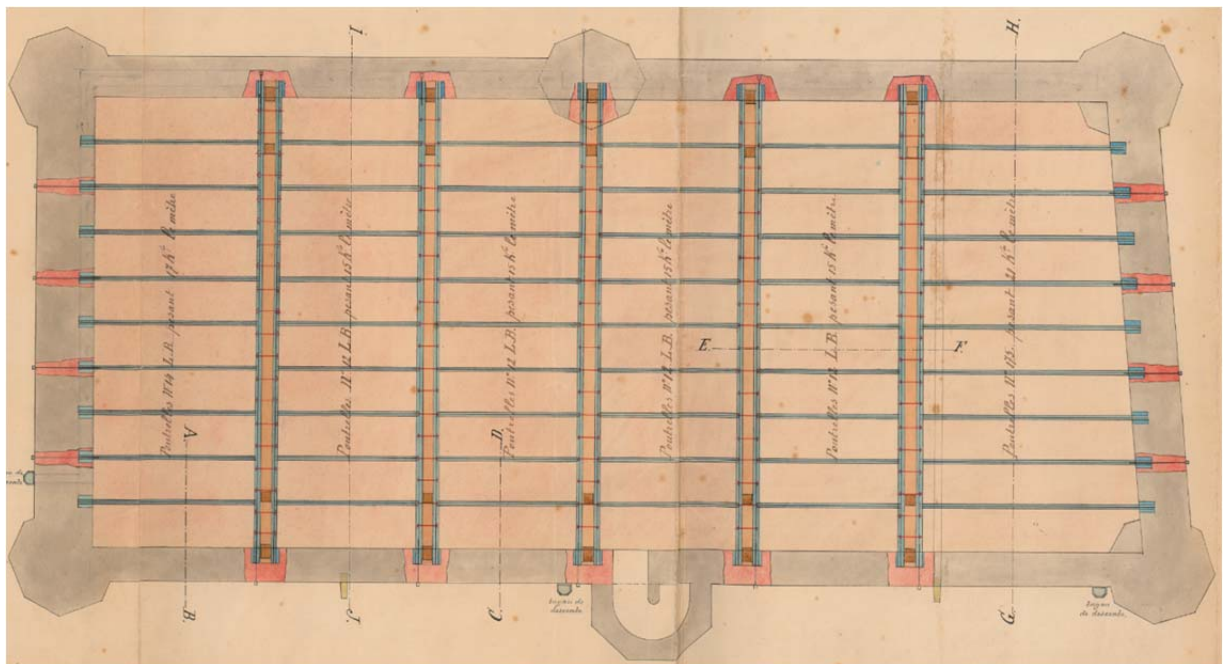


Figuur 14: westelijk muur Gotische Zaal

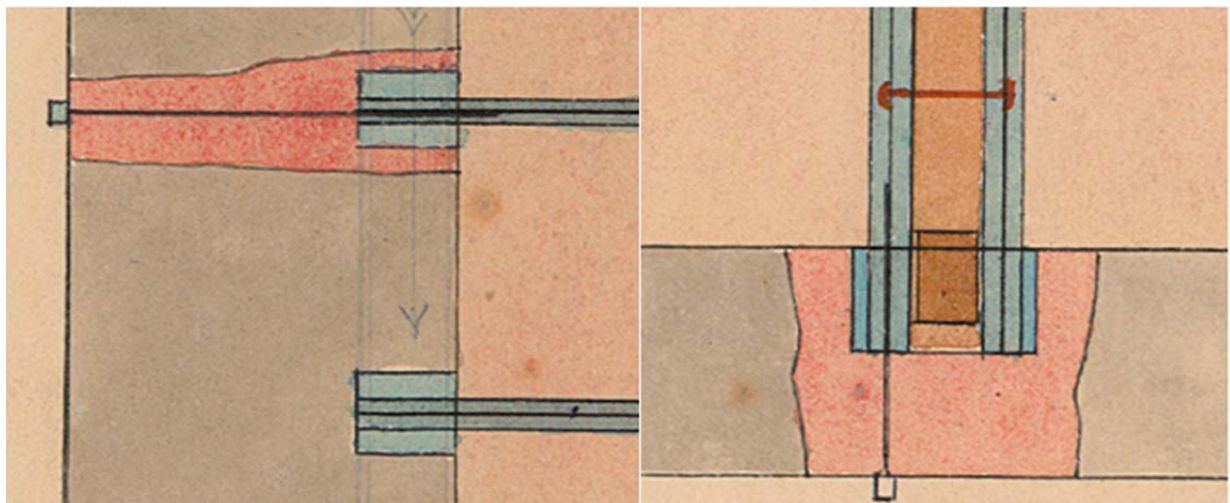


Figuur 15: oostelijke muur Gotische Zaal

De vloer tussen de eerste verdieping en de zolder is een staal-betonvloer. Stenen gewelven met I-profielen vormen een combinatie met een druklaag uit beton (zie Figuur 22). De betonnen druklaag ligt op de stenen gewelven. De stenen gewelven worden gedragen door ijzeren langsliggers. Deze langsliggers bevinden zich op regelmatige afstand van elkaar en worden ingeklemd in de oostelijke en de westelijke muur (zie Figuur 16). De langsliggers worden ondersteund door de dwarsdragers. Deze dwarsdragers zijn groter uitgevoerd dan de langsliggers. De dwarsdragers worden ingeklemd in de noordelijke en de zuidelijke muur. De houten hanggewelven worden opgehangen aan de dwarsliggers.



Figuur 16: maaswerk van dwarsliggers en langsligger boven Gotische Zaal (stadsarchief Brugge, 2013)

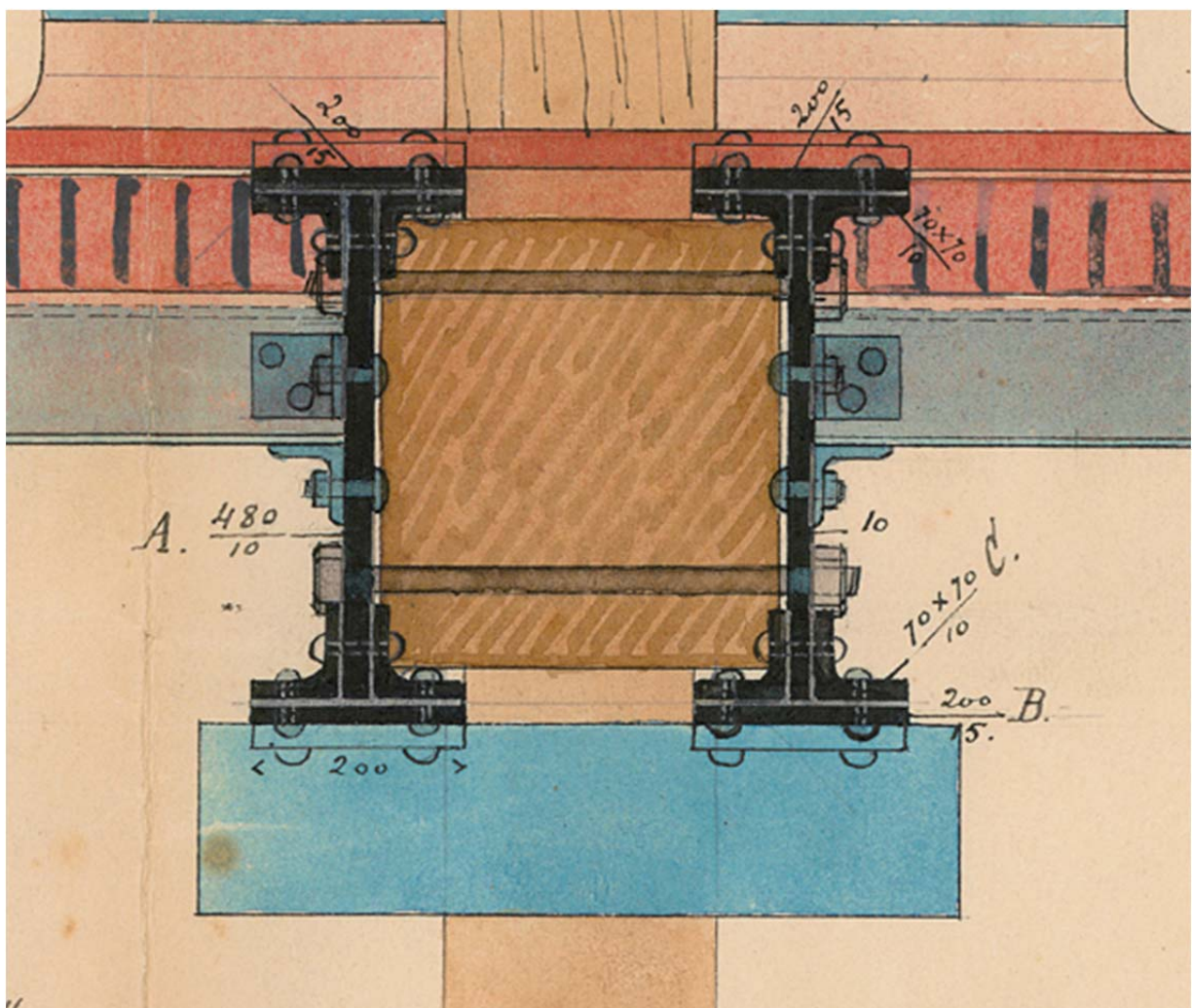


Figuur 17: detail verankering langsligger; detail verankering dwarsligger (stadsarchief Brugge, 2013)

Figuur 17 toont de trekankers die bevestigd zijn aan de dwars- en langsliggers. Zo worden de profielen aangespannen aan de gevels. De zwarte ankers zijn enkel zichtbaar op de oostgevel (zie Figuur 4).

De dwarsliggers bestaan uit twee I-profielen die aan elkaar bevestigd zijn met moeren en bouten. De bouten gaan door een houten balk die zich tussen de profielen bevindt (zie Figuur 18). De dwarsliggers worden extra ondersteund door houten korbelen. Zijn worden via een console gedragen door de muur. Dit houten korbeel wordt ook aangespannen door trekankers (zie Figuur 22).

Oorspronkelijk stonden er houten zuilen in de Gotische Zaal. Door de ophanging van de hanggewelven werden de zuilen in 1766 weggenomen (Gilté & Vanwalleghem, 1999).



Figuur 18: doorsnede dwarsligger (stadsarchief Brugge, 2013)

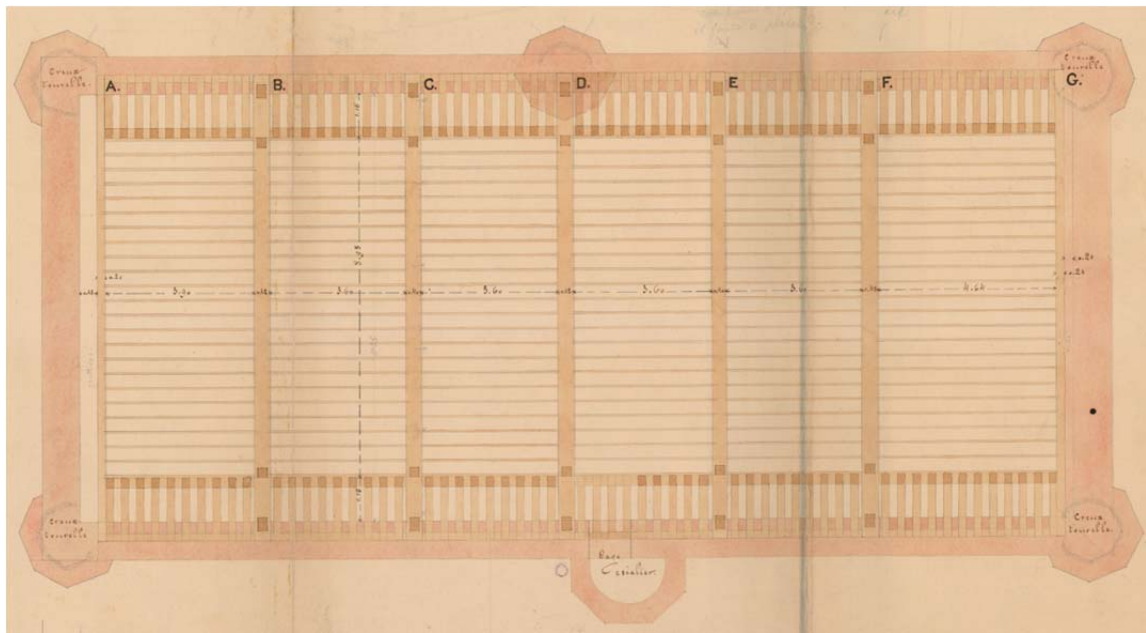
1.2.6. Zolder

De zolder is een leegstaande ruimte (zie bijlage IV). Hier staat de houten dakconstructie. In de oostelijke en de westelijke muur bevinden zich twee ramen symmetrisch ten opzichte van de nok van het dak (zie Figuur 19). Het dak werd samen met de tussenvloer in de periode van 1890-1905 geconstrueerd (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

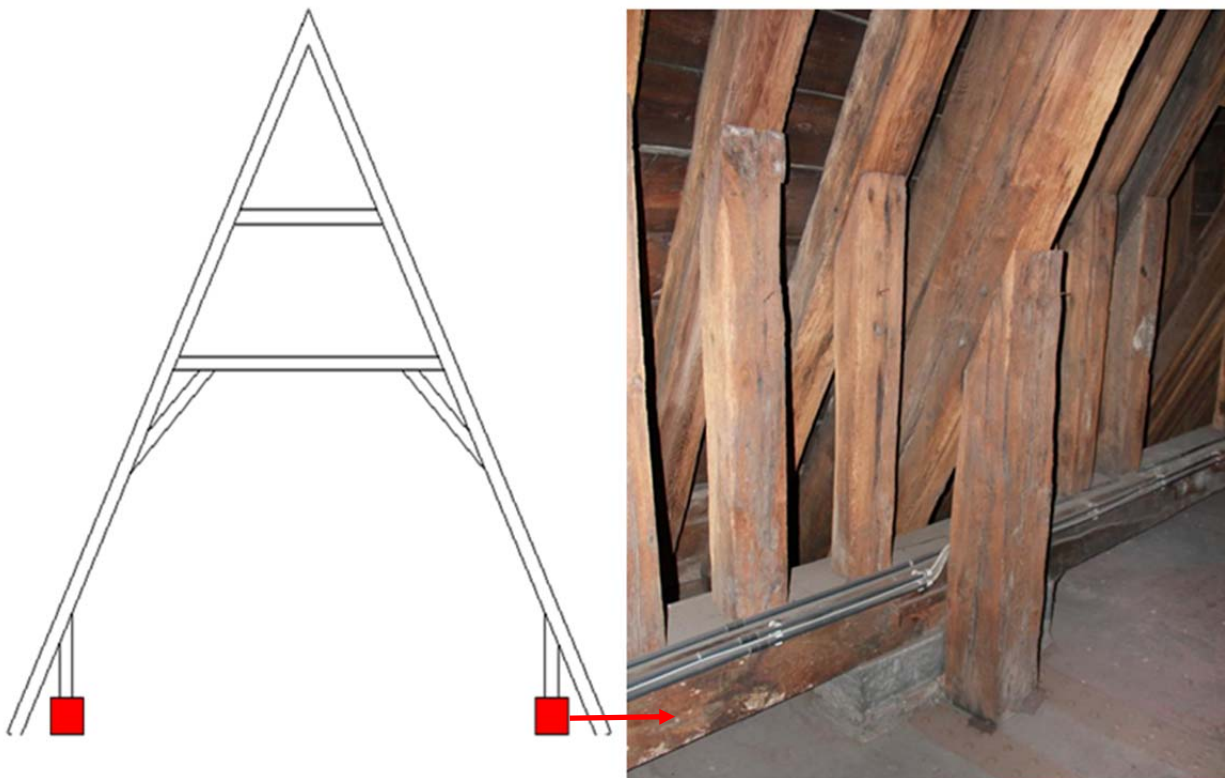


Figuur 19: zolder

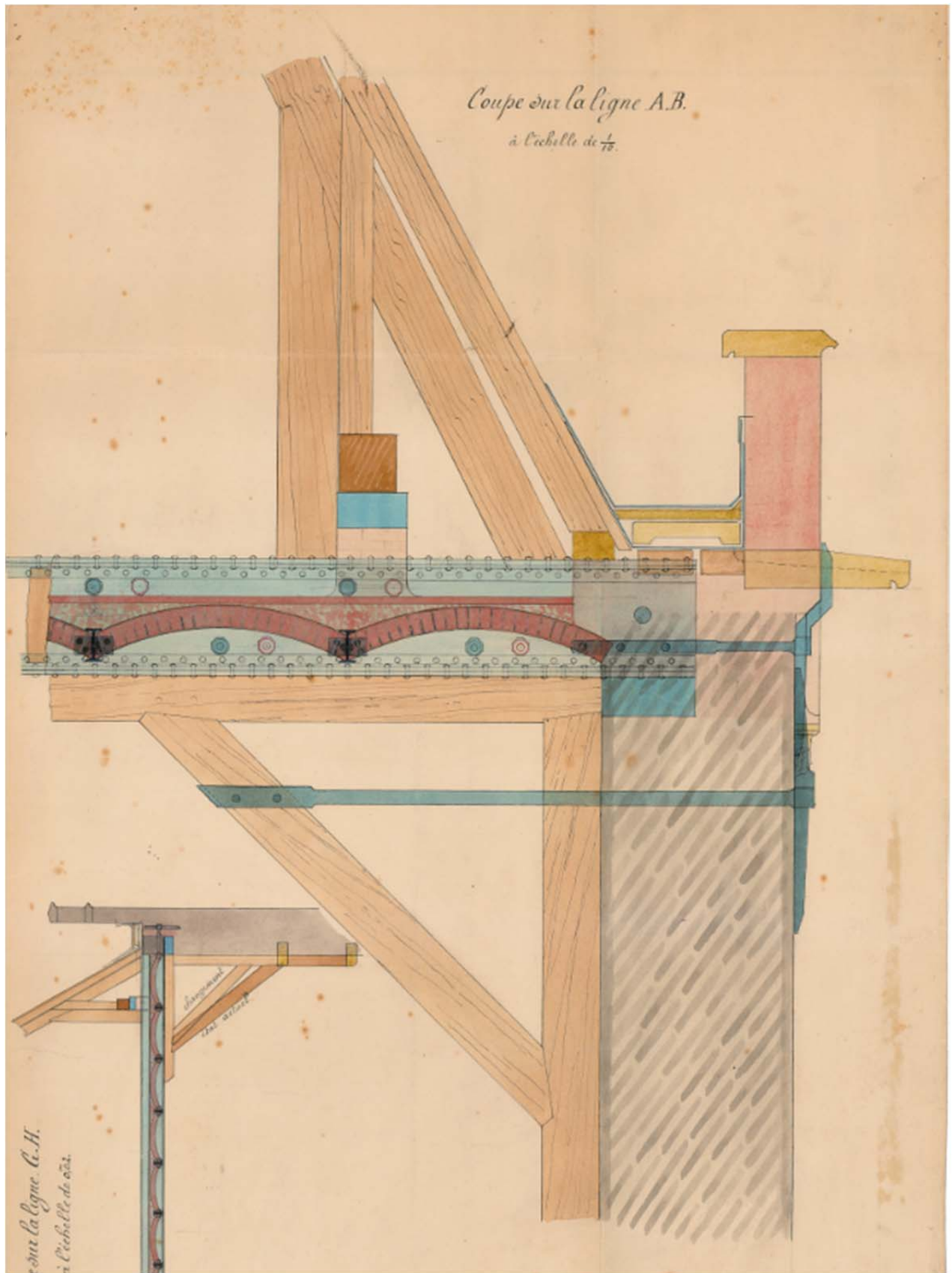
Het dak is een spantendak waarbij de spanten op een gelijke afstand van elkaar geplaatst werden (zie Figuur 20). Tussen de twee beuken staat een rij houten kolommen waarop een houten balk is bevestigd. De functie van die balk is de dakconstructie in het midden ondersteunen. De kolommen steunen op de dwarsliggers van de onderliggende tussenvloer (zie Figuur 19). Figuur 21 toont welke vorm de spanten tussen de dwarsliggers aannemen. De belasting op deze spanten wordt overgedragen op een houten balk die evenwijdig loopt met de noordelijke de zuidelijke muur. (zie rode arcering op Figuur 21). Deze balk wordt opgelegd op een slof uit natuursteen ter hoogte van de dwarsliggers (zie Figuur 21). Hier neemt het spant ook een andere vorm aan. Hier steunt het spant rechtstreeks op de dwarsligger. Figuur 22 toont het principe van de krachtenoverdracht van het dak naar de muren. Aan de oostelijke en de westelijke muur worden de belastingen op de spanten rechtstreeks via de muren afgeleid naar de funderingen (zie figuur 19). De spanten worden betimmerd met houten planken. De afwerking van het dak gebeurt met leien dakpannen.



Figuur 20: grondplan spantendak (stadsarchief Brugge, 2013)



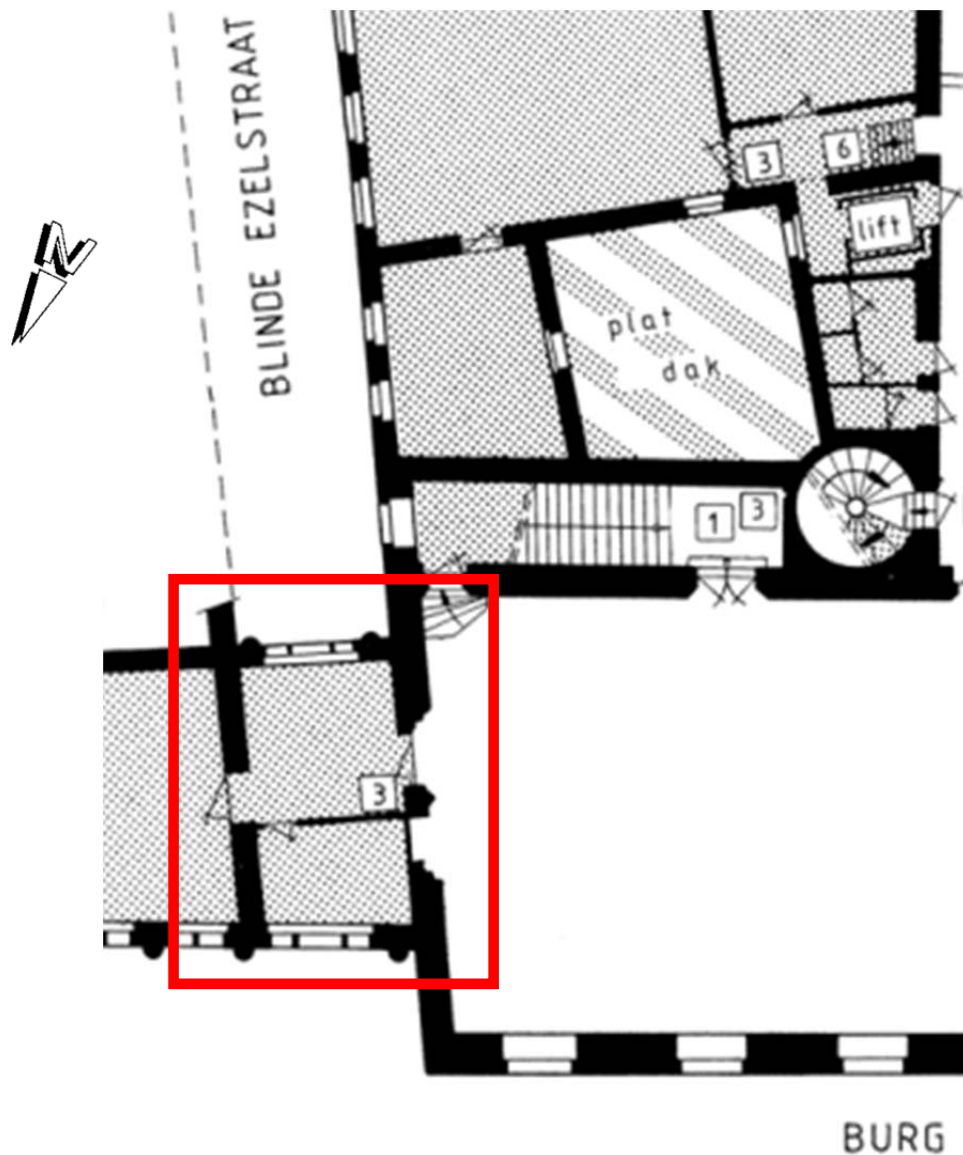
Figuur 21: vorm spanten



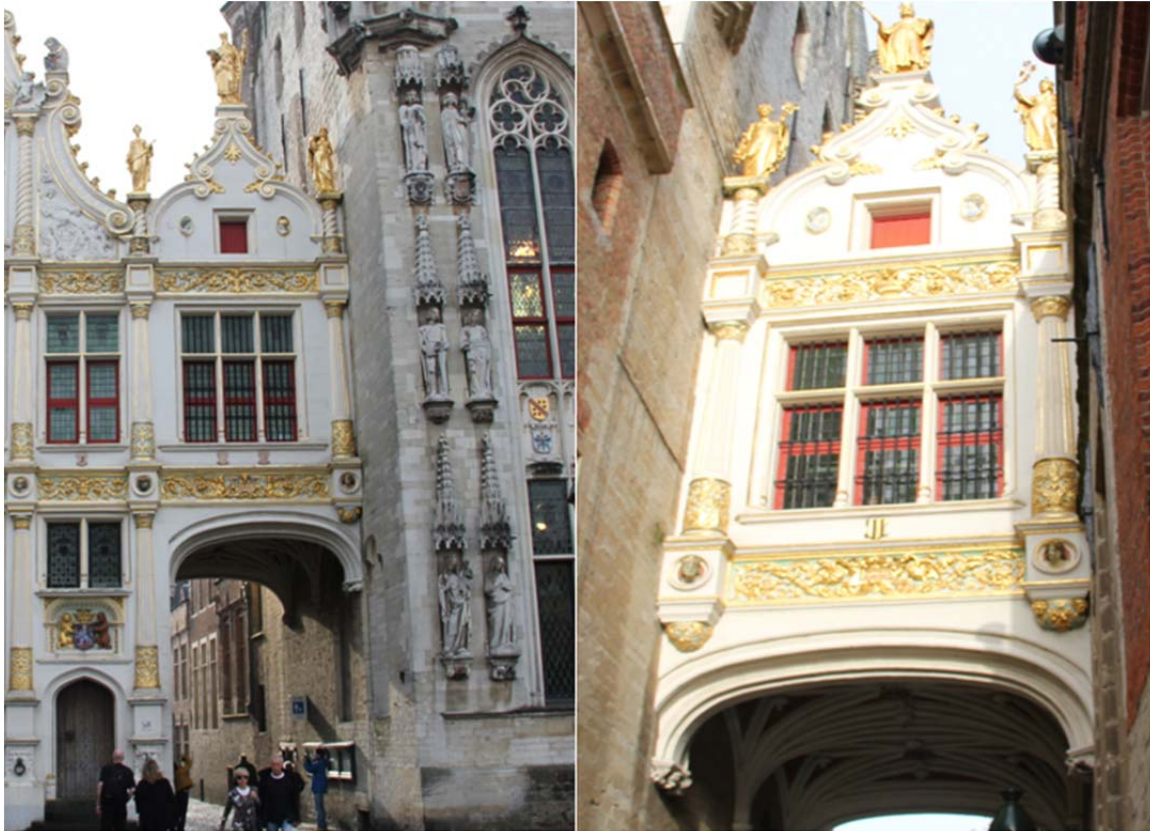
Figuur 22: krachtenoverdracht van dak naar buitenmuur (stadsarchief Brugge, 2013)

1.2.7. Overbrugging Blinde Ezelstraat

In de loop van de 16e eeuw werd de overbrugging geconstrueerd bij de bouw van de Burgerlijke Griffie (Gilté & Vanwalleghem, 1999). Deze doorgang overbrugt de Blinde Ezelstraat en wordt verbonden aan de oostgevel van het stadhuis op de eerste verdieping (zie Figuur 23). Het noordelijke deel doet dienst als keuken. Het zuidelijke deel wordt als doorgang gebruikt naar de vergaderzaal in de Burgelijke Griffie.



Figuur 23: grondplan overbrugging Blinde Ezelstraat



Figuur 24: gevels overbrugging

De gevels van de overbrugging (zie Figuur 24) bestaan uit metselwerk van baksteen. Deze gevels zijn afgewerkt in dezelfde stijl als de gevels van de Burgerlijke Griffie zelf. De stijl is een vroeg voorbeeld van de renaissance-architectuur in Vlaanderen. Deze architectuur wordt gekenmerkt door het inpassen van een renaissanceschema op een traditionele, gotische wandstructuur. Het ontwerp werd opgemaakt door de steenhouwer J. Wallot. Meester-metselaar C. Sixdeniers voerde de werken uit. De bekronende beelden werden door meester-steenhouwer W. Aerts naar patronen van schilder S. Pieters gevormd. De natuurstenen gevel en de beelden werden door J. Zutterman gepolychromeerd (Gilté & Vanwalleghem, 1999).

Als draagvloer voor de overbrugging werd een kruisribgewelf uit natuursteen gebruikt. De gewelfvleugels bestaan uit baksteen (zie Figuur 25). Het kruisribgewelf heeft meer ribben dan het standaard kruisribgewelf. Hierdoor wordt de belasting op het hanggewelf beter verspreid over de ribben en is de kracht op de verschillende ribben minder groot dan bij een normaal kruisribgewelf. Net als bij de vloer tussen het gelijkvloers en de kelder worden hier ook kraagstenen in de muur verwerkt. Deze kraagstenen zijn ook van natuursteen. De sluitsteen werd afgewerkt met een artistieke versiering. De vloerafwerking bestaat uit grijze balatum. Als dak van de overbrugging werden 2 standaard kruisribgewelven gebruikt (zie Figuur 26). Over de verschillende tussenlagen van dak en vloer is geen informatie beschikbaar.



Figuur 25: draagconstructie overbrugging



Figuur 26: dak overbrugging

1.2.8. Historische gebeurtenissen

Op 11 juni 1938 kreeg België te maken met een aardbeving. Deze had een kracht van 5,6 op de schaal van Richter en een maximale intensiteit van VII op de 12-delige schaal van Mercalli. Het epicentrum van de aardbeving werd gelokaliseerd in Ronse (zie Figuur 27). Het is de op één na zwaarste aardbeving ooit in België. De aardbeving veroorzaakte veel schade in Vlaanderen en werd gevoeld tot in Noord-Frankrijk, Noord-Nederland, het zuid-oosten van Engeland, het westen van Duitsland en in Luxemburg. In heel België was er sprake van scheuren in muren en vernielde schoorstenen (Koninklijke sterrenwacht van België, 2013). Er bestaat geen verdere informatie over de geleden schade aan het stadhuis.



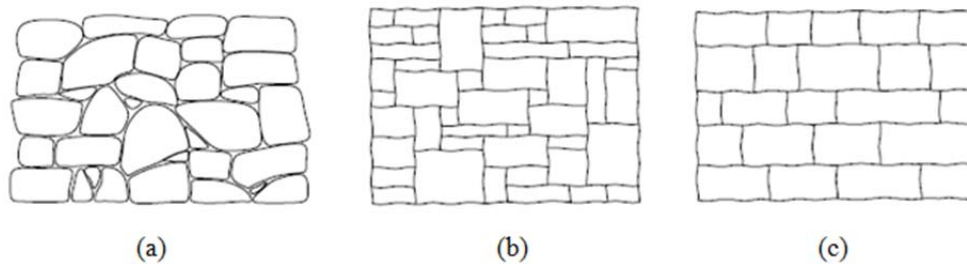
Figuur 27: Ronse (Google maps, 2013)

In het verleden werden talrijke concerten en evenementen georganiseerd op de Burg. In de toekomst zijn ook tal van deze activiteiten gepland op dit plein. Door de hoge frequentie van de muziek en de opbouw van de evenementen waarbij veel vrachtwagens passeren, worden telkens trillingen gecreëerd dicht bij het stadhuis. Deze trillingen kunnen schade veroorzaken aan het gebouw.

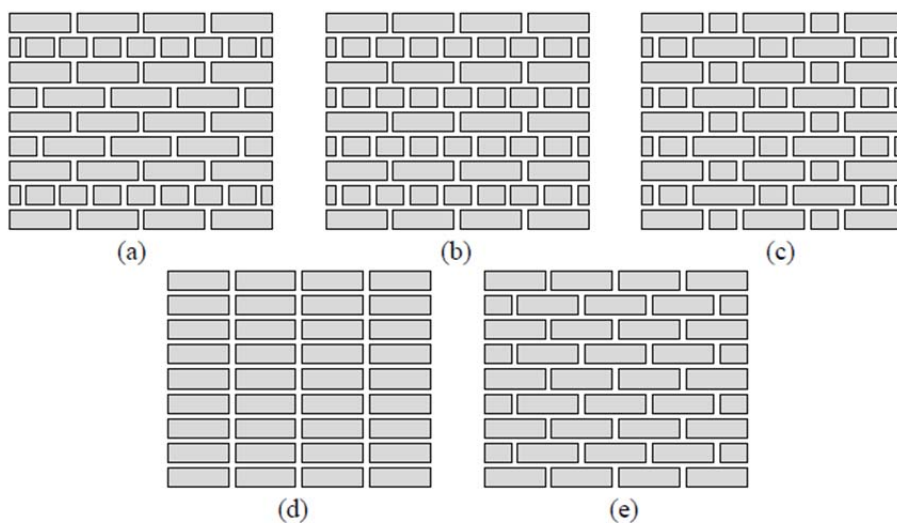
1.3. Historisch metselwerk

1.3.1. Inleiding

Metselwerk is het oudste composietmateriaal in de bouw dat nog steeds wereldwijd wordt gebruikt. Het is een heterogeen materiaal dat bestaat uit bouwstenen en mortel. De bouwstenen zijn materialen zoals bakstenen, betonblokken en natuurstenen. Mortel is een specie die meestal bestaat uit cement, water en zand. Klei, bitumen en lijm zijn voorbeelden van andere materialen die als mortel gebruikt worden. De bouwstenen worden met elkaar verbonden door de mortel. Het is een eenvoudige techniek die al lange tijd succesvol wordt toegepast. In de loop van de tijd ontstonden er ontelbare variaties van bouwstenen (zie Figuur 28), metselwerkverbanden (zie Figuur 29) en toepassingen in structuren. De keuzes van deze variaties berusten vooral op de lokale cultuur en welvaart, de kennis van materialen en gereedschappen, de beschikbaarheid van materialen en architecturale redenen. Het draagverband is de toegepaste bouwtechniek bij het stadhuis van Brugge (zie Figuur 4).



Figuur 28: verschillende soorten metselwerk uit steen: (a) steenslagmetselwerk; (b) arduinmetselwerk; (c) metselwerk uit gevormde hardsteen



Figuur 29: verschillende soorten verbanden: (a) Amerikaans verband; (b) Engels verband; (c) Vlaams verband; (d) hoopverband; (e) draagverband

1.3.2. Eigenschappen

De eigenschappen van het metselwerk als geheel worden beïnvloed door een groot aantal factoren. Zo spelen volgende invloeden een belangrijke rol (Eslami, Ronagh, Mahini & Morshed, 2012):

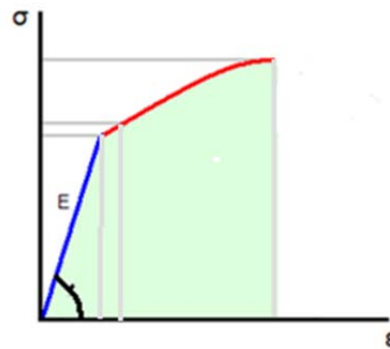
- materiaaleigenschappen van de bouwstenen en de mortel;
- anisotropie van de bouwstenen;
- afmetingen van de bouwstenen;
- voegbreedte;
- kwaliteit vakmanschap van de metselaars;
- mate van uitharding.

Metselwerk wordt aanzien als duur en fragiel. Daarom zijn er maar weinig middelen ingezet voor het onderzoek naar structureel metselwerk op gebied van bestaand erfgoed. De huidige uitvoeringscodes zijn onderontwikkeld en er is een gebrek aan kennis over het gedrag van dit composietmateriaal. Het mechanisch gedrag van de verschillende types metselwerk heeft in het algemeen een gemeenschappelijk kenmerk: een zeer lage treksterkte. Deze eigenschap is zo belangrijk dat het de vorm van oude constructies heeft bepaald (Lourenço, 1998).

De moeilijkheden bij het uitvoeren van analyses op structuren uit historisch metselwerk zijn vrij groot. De variabiliteit van het metselwerk zelf in een specifieke structuur is een lastig gegeven om in numerieke gegevens om te zetten. Daarnaast is het onmogelijk om een monster te reproduceren met evenwaardige eigenschappen. Daarom werden de meeste experimentele onderzoeken verricht in het domein van baksteen/blok metselwerk (Lourenço, 1998). Een groot aantal parameters beschrijft de mechanische eigenschappen, geometrie, verbindingseigenschappen van de bouwstenen en mortel. Om het gedrag van een metselwerkconstructie zo goed mogelijk na te bootsen, is het correct invoeren van deze parameters in een analysemodel heel belangrijk. Veel eigenschappen zijn reeds in de bibliotheek van eindige elementensoftware terug te vinden (Gabor, Ferrier, Jacquelin & Hamelin, 2006). Andere eigenschappen dienen experimenteel bepaald te worden voordat de structurele analyse kan van start gaan.

De elasticiteitsmodulus van het metselwerk is een bepalende eigenschap voor de mate van vervorming. Het is kenmerkend voor eenzelfde type metselwerk en het kan bepaald worden uit testen in het labo. Bij die testen worden muurtjes onderworpen aan een spanning. Die spanning zal een vervorming aan het metselwerk teweeg brengen. Binnen het elastisch gebied beantwoorden deze vervormingen aan de wet van Hooke. De wet van Hooke zegt dat vervormingen onder de proportionaliteitsgrens lineair evenredig zijn met spanning. Boven deze grens is de wet niet meer van toepassing. Na het overschrijden van de elasticiteitsgrens zullen de vervormingen blijvend zijn en zal

het materiaal zich in het plastisch gebied bevinden (Duyck, Vandewyngaerde & Vanderlinde, 2012). Spanning en vervorming worden voorgesteld in een spanning-rekdiagram zoals afgebeeld op Figuur 30. De twee gebieden zijn hierop duidelijk te zien. Het elastisch gebied wordt afgebeeld met een blauwe lijn. Het plastisch gebied wordt afgebeeld met een rode lijn. Het lineaire verband tussen spanning en vervorming is de elasticiteitsmodulus.



Figuur 30: algemeen spanning-rekdiagram

Een tweede belangrijk materiaaleigenschap die uit het spanning-rekdiagram kan afgeleid worden, is de breukspanning. Dit is de spanning waarbij breuk in het metselwerk optreedt. Bij metselwerk zal een brosse breuk optreden, de breukspanning zal bij gevolg de grootste spanning zijn die tijdens de proef kon aangebracht worden. De experimentele waarden kunnen vergeleken worden met de numerieke waarden die bekomen worden uit de eindige elementenanalyse.

Voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus en de breukspanning van het metselwerk wordt beroep gedaan op het experimenteel onderzoek "*Onderzoek naar het gebruik van eindige elementenmethodes ANSYS (Workbench) en 3D modelleringen bij de studie van de stabiliteit van metselwerkconstructies voor de berekening van vervormingen van de constructie onder dynamische lasten*" van Duyck, Vandewyngaerde & Vanderlinde uit 2012. Voor het uitvoeren van het onderzoek worden muurtjes gemetseld van ongeveer 1m². Deze muurtjes hebben een verschillende hebben in 3 richtingen loodrecht op elkaar. Deze muurtjes dienen in elk van deze richtingen beproefd te worden. Daarom zijn volgende proeven uitgevoerd:

- drukproef loodrecht op de langse voegen;
- drukproef evenwijdig met de langse voegen;
- trekproef loodrecht op de langse voegen;
- trekproef evenwijdig met de langse voegen;
- test op doorbuiging loodrecht op het muurvlak.

drukproef loodrecht op de langse voegen:

Het muurtje uit metselwerk wordt onderaan ondersteund door een stalen ligger en bovenaan belast met een eenparig verdeelde lijnlast (zie Figuur 31). Drie meetklokken, worden opgesteld om continu de relatieve verplaatsing op te meten. De eerste klok staat bovenaan, de tweede onderaan en de derde in het midden van de constructie. Hieruit kan de relatieve lengteverandering van het metselwerk afgeleid worden. Vervolgens wordt met de waarden van de aangebrachte spanningen σ , de elasticiteitsmodulus E berekend. Dit door gebruik te maken van de wet van Hooke: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$.

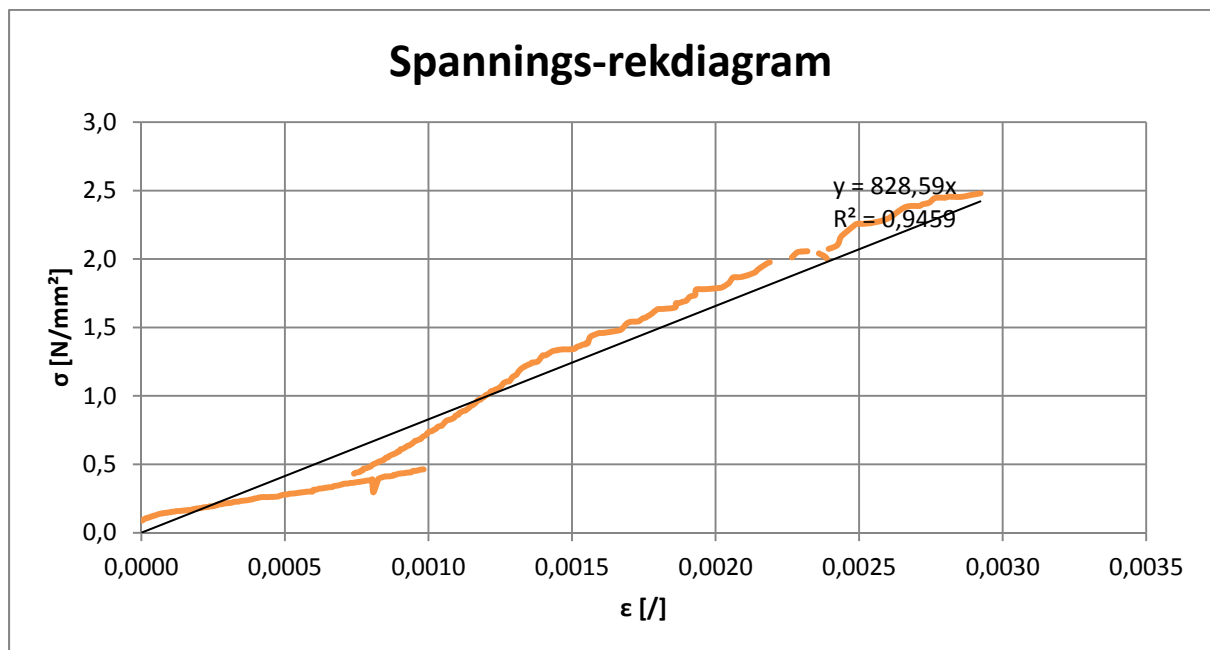


Figuur 31: opstelling drukproef loodrecht op langse voegen

Uit het spanning-rekdiagram van Figuur 32 is af te lezen dat de spanning en de rek overwegend lineair toenemen tot aan een spanning van ongeveer 2,5 N/mm². Voorbij deze spanning neemt de rek nog amper toe en treden er al relatief grote barsten op in de constructie.

Bij deze proef is er amper verschil tussen de lineaire functie van het elastisch gebied en die van het plastisch deel. Een lineaire benadering voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus volstaat.

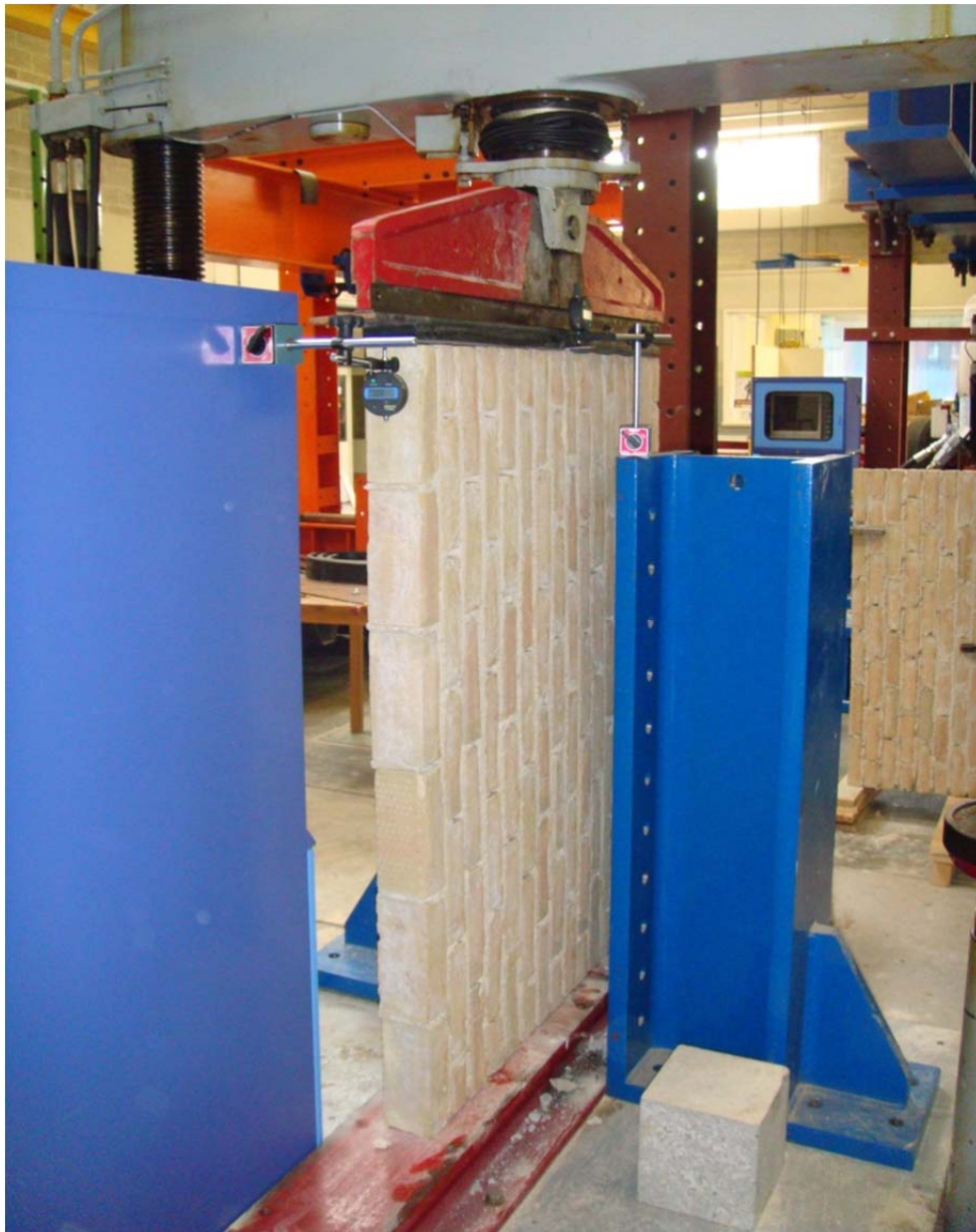
- elasticiteitsmodulus $E = 828,59 \text{ N/mm}^2$
- breukspanning: $\sigma_b = 2,5 \text{ N/mm}^2$



Figuur 32: spanning-rekdiagram drukproef loodrecht op langse voegen

drukproef evenwijdig met de langse voegen:

Deze proef verloopt bijna identiek aan de voorgaande proef. Het enige verschil bestaat erin dat de druk nu evenwijdig met de langs voegen wordt uitgeoefend (zie Figuur 33). Praktisch komt dit erop neer dat het metselwerk nu een kwartslag wordt gedraaid. De proefopstelling is dezelfde als bij de voorgaande proef.



Figuur 33: opstelling drukproef evenwijdig op langse voegen

Bij deze proef is er een duidelijk verschil te zien tussen het elastisch gebied en het plastisch gebied. Bij een spanning van $0,1 \text{ N/mm}^2$ is er een knik te merken in het spanning-rekdiagram (zie Figuur 34). Om de nauwkeurigheid te vergroten en rekening te houden met het plastische gebied wordt het spanning-rekdiagram benaderd als een bilineaire functie. Dit zijn twee lineaire functies:

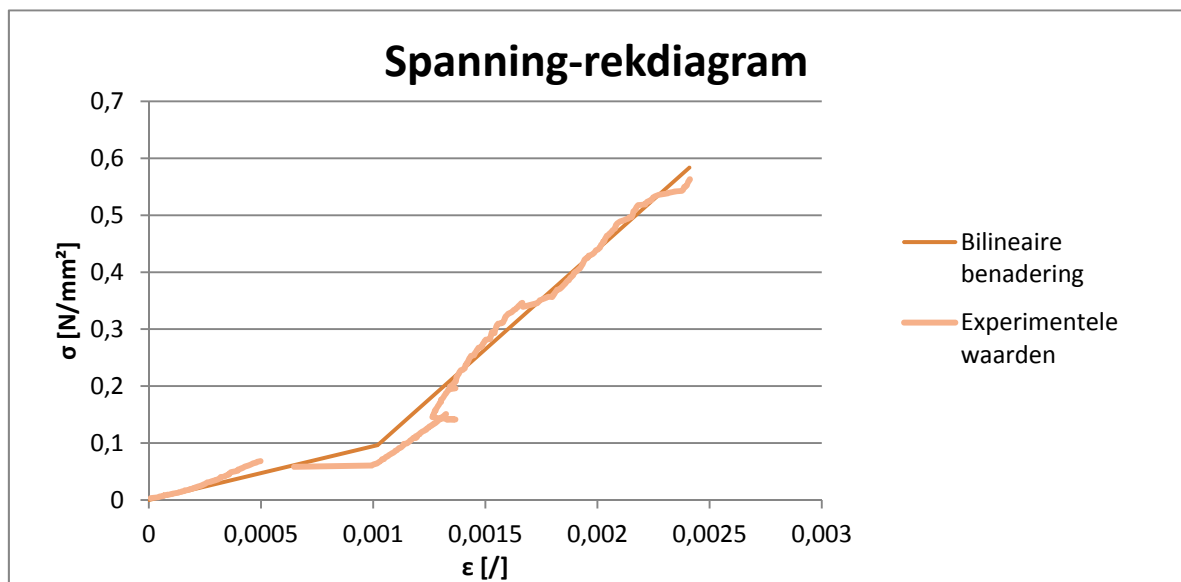
- de eerste lineaire functie benadert het elastisch gebied;
- de tweede lineaire functie benadert het plastisch gebied.

Voor elk van deze lineaire functies kan nu een elasticiteitsmodulus berekend worden.

De grens tussen het elastisch gebied en het plastisch gebied ligt op een spanning van $0,1 \text{ N/mm}^2$:

- elasticiteitsmodulus elastisch gebied ($0,0 \text{ N/mm}^2 - 0,1 \text{ N/mm}^2$) : $E = 94,318 \text{ N/mm}^2$;
- elasticiteitsmodulus plastisch gebied (vanaf $0,1 \text{ N/mm}^2$) : $E = 350,15 \text{ N/mm}^2$.

De breukspanning σ_b bedraagt $0,55 \text{ N/mm}^2$.



Figuur 34: spanning-rekdiagram drukproef evenwijdig met de langse voegen

trekproef loodrecht op de langse voegen:

Bij deze proef wordt een staalplaat bovenop het metselwerk gelijmd met epoxylijm (zie Figuur 35). De staalplaat heeft een dikte van 10mm. Deze dikte garandeert een voldoende hoge buigstijfheid van de staalplaat om een eenparig verdeelde trekbelasting op aan te brengen.

De trekkracht wordt uitgeoefend door middel van een takel. Tussen de takel en de staalplaat wordt een dynamometer geplaatst die de grootte van de trekkracht continue meet. Er wordt net als bij de voorgaande proeven beroep gedaan op drie meetklokken om de relatieve lengteverandering te bepalen.

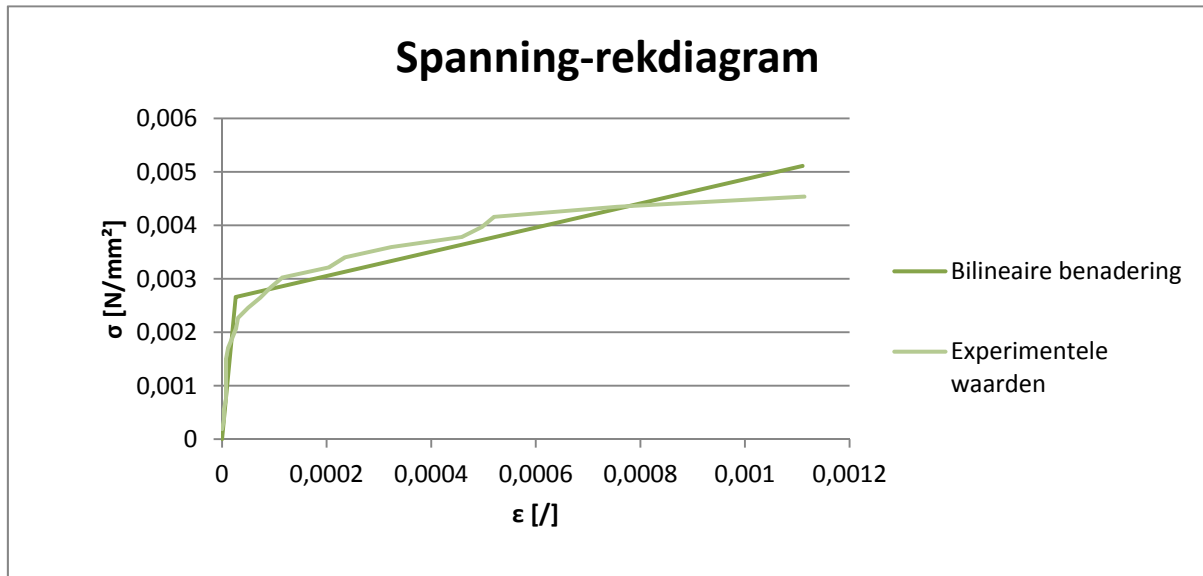


Figuur 35: opstelling trekproef loodrecht op de langse voegen

Figuur 36 toont terug een duidelijk verschil is tussen het elastisch gebied en het plastisch gebied. Daarom is er opnieuw een bilineaire benadering van de bekomen waarden noodzakelijk. De grens tussen het elastisch gebied en het plastisch gebied ligt hier op een spanning van 0,0026N/mm²:

- elasticiteitsmodulus elastisch gebied (0,0 N/mm² - 0,0026 N/mm²): E = 102,34 N/mm²;
- elasticiteitsmodulus plastisch gebied (vanaf 0,0026 N/mm²): E = 2,2633 N/mm².

De breukspanning σ_b bedraagt 0,0045 N/mm².



Figuur 36: spanning-rekdiagram trekproef loodrecht op de langse voegen

trekproef evenwijdig met de langse voegen:

Deze proef verloopt nagenoeg identiek met de trekproef loodrecht op de langse voegen. Het enige verschil bestaat erin dat de druk nu evenwijdig met de langs voegen wordt uitgeoefend (zie Figuur 37). Praktisch komt dit er op neer dat het metselwerk nu een kwartslag wordt gedraaid zodat dezelfde proefopstelling als bij de voorgaande proef kan gebruikt worden. Bij deze proef wordt er ook nog een staalplaat aan de onderzijde van de muur gelijmd die vervolgens aan de grond wordt verankerd. Dit blijkt nodig omdat het eigengewicht van de muur niet volstaat om te beletten dat de muur wordt opgeheven.

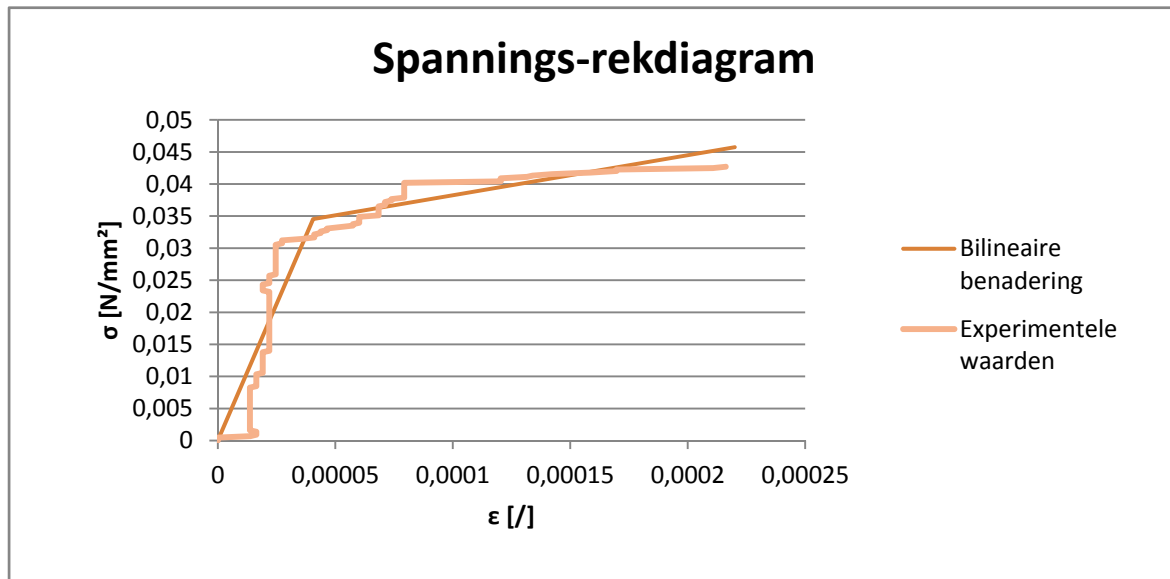


Figuur 37: opstelling trekproef evenwijdig met de langse voegen

De grens tussen het elastisch gebied en het plastisch gebied ligt hier op een spanning van $0,035 \text{ N/mm}^2$ (zie Figuur 38):

- elasticiteitsmodulus elastisch gebied ($0,0 \text{ N/mm}^2 - 0,035 \text{ N/mm}^2$): $E = 851 \text{ N/mm}^2$;
- elasticiteitsmodulus plastisch gebied (vanaf $0,035 \text{ N/mm}^2$): $E = 62,465 \text{ N/mm}^2$.

De breukspanning σ_b bedraagt $0,043 \text{ N/mm}^2$.



Figuur 38: spanning-rekdiagram trekproef evenwijdig met de langse voegen

horizontale doorbuigproef loodrecht op het muurvlak:

Bij deze proef is het bepalen van de elasticiteitsmodulus niet relevant voor het onderzoek. Wat wel relevant is, is de breukspanning bij horizontale druk loodrecht op het muurvlak.

De proef bestaat eruit om een metselwerkmuur zodanig te kantelen dat de voor- en achterzijde horizontaal liggen (zie Figuur 39). De muur wordt ondersteund op twee liggers die een vrije overspanning realiseren van één meter. Vervolgens wordt in het midden van de overspanning op de horizontale zijde een houten lat aangebracht om op deze manier een eenparig verdeelde lijnlast aan te brengen. De belasting wordt in stappen verhoogd door gebruik te maken van stalen schijven van 1kg en 10kg.



Figuur 39: opstelling horizontale doorbuigproef loodrecht op het muurvlak

Bij een belasting van 980N zal de muur bezwijken. Hieruit kan de breukspanning van de muur bepaald worden.

Dikte muurtje: 90mm - Lengte muurtje 1200mm

$$\text{Moment bij breuk } M_b = \frac{\text{belasting} \times \text{lengte}}{4} = \frac{980 \text{ N} \times 1200 \text{ mm}}{4} = 294000 \text{ Nmm}$$

$$\text{Traagheidsmoment } I_{xx} = \frac{\text{lengte} \times \text{breedte}^3}{12} = \frac{1200 \text{ mm} \times 90^3 \text{ mm}}{12} = 72900000 \text{ mm}^4$$

$$\text{Weerstandsmoment } W_{xx} = \frac{I_{xx}}{e} = \frac{72900000 \text{ mm}^4}{45 \text{ mm}} = 1620000 \text{ mm}^3$$

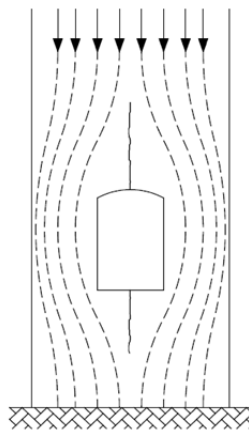
$$\text{breukspanning } \sigma_b = \frac{M_b}{W_{xx}} = \frac{294000 \text{ Nmm}}{1620000 \text{ mm}^3} = 0,1815 \text{ N/mm}^2$$

1.3.3. Scheurvorming

Scheuren in gebouwen tonen aan hoe de constructie reageert of gereageerd heeft op externe en interne invloeden. In vele gevallen betekenen scheuren dat het gebouw vraagt om aandacht. Bij structuren uit beton en staal moeten scheuren vermeden worden. Bij metselwerk daarentegen, zullen scheuren dikwijls betekenen dat de structuur zich zelf al heeft aangepast aan de opgelegde invloeden, en dat alle onmiddellijke gevaar geweken is. Om deze reden kunnen metselwerkstructuren intelligente structuren genoemd worden. Door te scheuren corrigeren zij de fouten in het ontwerp en in de uitvoering. Toch moet er nagegaan worden of deze scheuren niet betekenen dat er wat fout loopt aan de krachtswerking van het gebouw. Indien dit het geval is moeten maatregelen genomen worden om de standzekerheid te van het gebouw te vrijwaren. Wanneer de scheuren geen nadelig effect hebben op de veiligheid van de constructie, moet er toch onderzocht worden of deze scheuren niet nadelig zijn voor de afwerkingelementen. Dit zijn elementen zoals de binnen- en de buitenpleisters. Verder moet gecontroleerd worden of de scheuren reeds gestabiliseerd zijn. In dat geval kan een definitieve restauratie van de gebouwfwerking uitgewerkt worden. Is de toestand nog niet stabiel, dan moeten gepaste maatregelen getroffen worden om de te verwachten verdere beweging in voldoende mate toe te laten (Van Gemert & Ignoul, 2001). Hieronder volgt een overzicht van mogelijke oorzaken van scheurvorming in historisch metselwerk.

krachtenuitwaaiering boven openingen:

Typerend voor metselwerk is dat er scheuren optreden die te maken hebben met het structureel gedrag van het gebouw. Door de geringe treksterkte van het metselwerk, zullen door de krachtenuitwaaiering scheuren ontstaan boven openingen. Figuur 40 toont een scheur aan een raamopening (Van Gemert & Ignoul, 2001).

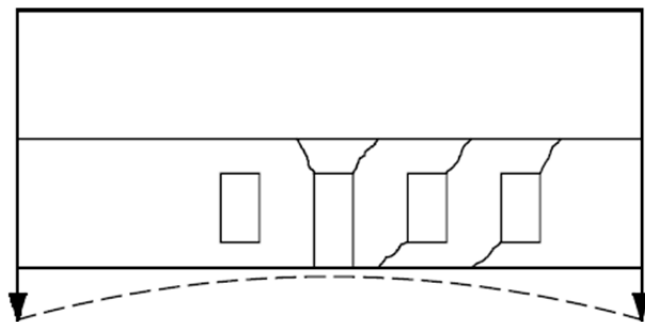


Figuur 40: scheur boven opening (Van Gemert & Ignoul, 2001)

differentiële zettingen van de funderingen:

Een andere belangrijke scheuroorzaak in metselwerk is de differentiële zettingen van de funderingen (zie Figuur 41). Deze zettingen kunnen verschillende oorzaken hebben (Van Gemert & Ignoul, 2001):

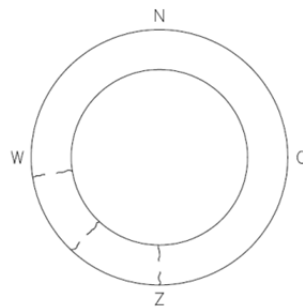
- verschillend draagvermogen van de grond, vb. deels ophoging, deels uitgraving;
- verschillende belastingen;
- verschillende soorten funderingen, vb. deels op zool en deels op palen;
- verandering van de grondeigenschappen, vb. door vorst- en dooi of door grondwaterverlaging.



Figuur 41: zettingscheuren (Van Gemert & Ignoul, 2001).

dagcyclus zonbestraling:

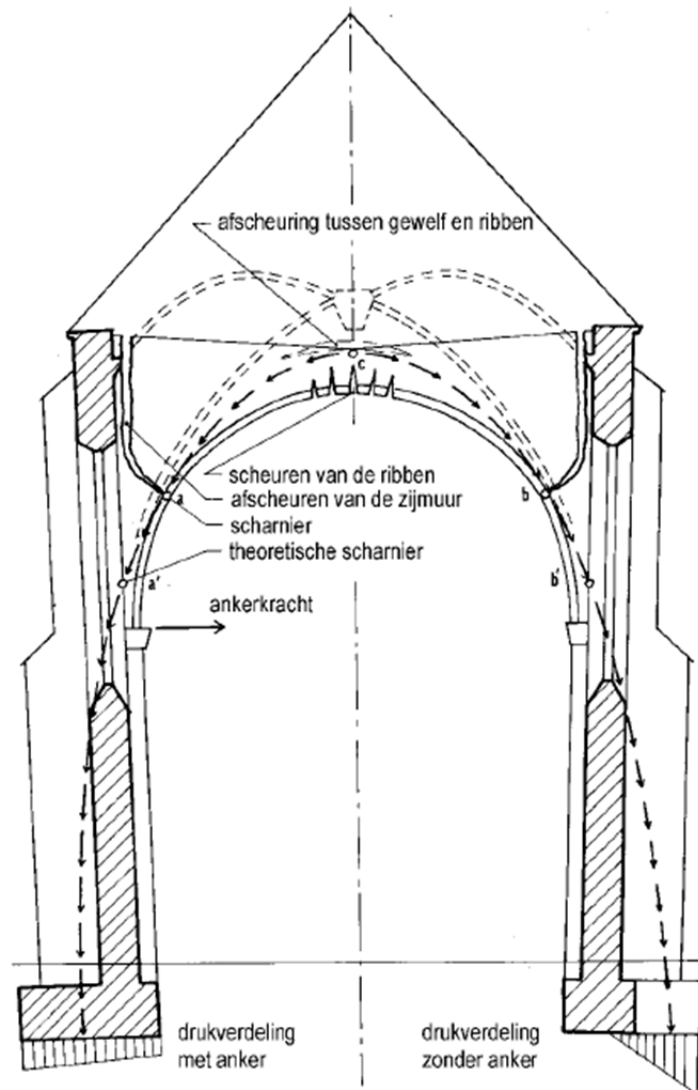
Door de dagcyclus van de zon kunnen er door de bestralingen ook scheuren ontstaan (zie Figuur 42). Dit is zowel geldig voor ronde structuren, als bij rechthoekige. Typerend hiervoor zijn de verticale scheuren die optreden aan de hoeken van gebouwen, aan de aansluiting van de gevels (Van Gemert & Ignoul, 2001).



Figuur 42: scheurvorming ten gevolge van zonbestraling (Van Gemert & Ignoul, 2001).

spatkrachten bij kruisribgewelven:

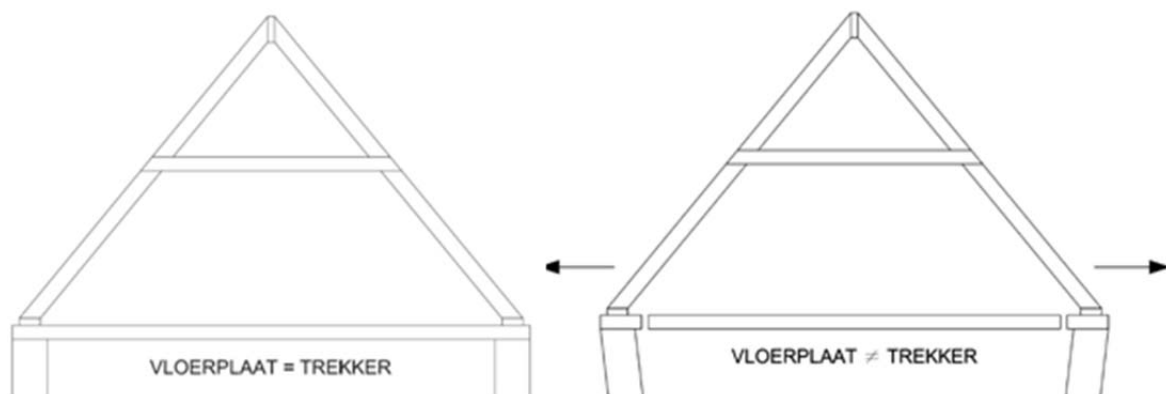
Bij kruisribgewelven zorgen spatkrachten voor eventuele scheurvorming . De spatkrachten vanwege de gewelven concentreren zich in de ribben. Door deze spatkrachten worden de steunmuren zijwaarts weggeduwd. De gewelven zijn erg stijve en onvervormbare schalen, en volgen de zijwaartse beweging van de muren niet. Daardoor ontstaat een breukpatroon zoals getoond in Figuur 43 (Van Gemert & Ignoul, 2001).



Figuur 43: scheurvorming bij kruisribgewelf (Van Gemert & Ignoul, 2001)

spatkrachten bij spantendak:

Wanneer in een constructie schuine of gebogen onderdelen voorkomen, kunnen hierdoor horizontale spatkrachten ontwikkeld worden. Dit is het geval bij spantendaken. De schade wordt vermeden door de onderzijde van de spantbenen te verbinden met een trekker. Als de vloer deze functie van trekker moet waarmaken, moet deze natuurlijk daartoe voldoende capaciteit hebben. Ontbreekt de nodige continuïteit in de vloer, dan zullen scheuren en uitbuigingen optreden, zoals getoond in Figuur 44 (Van Gemert & Ignoul, 2001).



Figuur 44: scheurvorming bij vloerplaat dak (Van Gemert & Ignoul, 2001)

temperatuurgradiënten:

Door differentiële thermische verplaatsingen tijdens het gebruik of bij het hardingsproces van betonelementen, kunnen scheuren in het metselwerk ontstaan. Een temperatuursgradiënt in vloerplaten zal doorbuiging van de platen en uitbuiging van de steunkolommen veroorzaken. Temperatuursgradiënten in structurelementen roepen steeds verplaatsingen en rotaties op. Worden deze verhinderd dan kunnen zeer grote spanningen optreden, zelfs bij kleine uitwendig waarneembare vervormingen (Van Gemert & Ignoul, 2001).

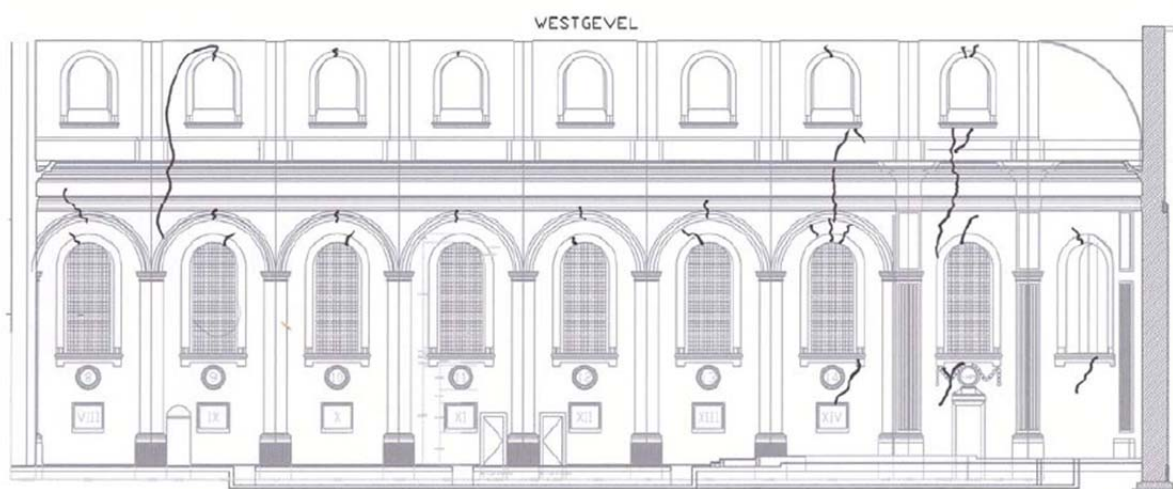
trillingen en horizontale belastingen:

Structurele muren van historische gebouwen uit metselwerk werden ontworpen om verticale krachten te weerstaan. Trillingen en horizontale belastingen, zoals aardbevingen en wind, veroorzaken ernstige krachten in en uit het vlak van de muren van deze gebouwen. Zo worden dwarskrachten en momenten gevormd onder horizontale belastingen (Kanit & Döndüren, 2010). Het gedrag en de schade van structuren uit historisch metselwerk worden sterk beïnvloed door deze belastingen. Er ontstaan geringe scheuren of in sommige gevallen bezwijkt de constructie (Gabor, Ferrier, Jacquelin & Hamelin, 2005). De hoge massa, de slechte verbindingen en opnieuw de zeer lage treksterkte van het metselwerk lijken de belangrijkste redenen voor de slechte prestaties op gebied van trillingen bij gebouwen uit historisch metselwerk (Eslami, Ronagh, Mahini & Morshed, 2012). Zelf wanneer de gebouwen zich in gebieden bevinden met laag risico voor aardbevingen, blijft de veiligheid en de bescherming van de gebouwen tegen uitzonderlijke gebeurtenissen van groot belang (Roca, Cervera, Pelà, Clemente & Chiumenti, 2012).

lange termijnprocessen:

Voorbeelden van scheurvorming door lange termijnprocessen zijn kruip en verweking. Het effect van kruip is dat er zich onder constante spanning toenemende vervorming kan ontwikkelen in steenachtige materialen. (Roca, Cervera, Pelà, Clemente & Chiumenti, 2012). Verweking is een geleidelijke afname van de mechanische weerstand onder een doorlopende verhoging van vervorming op een materiaalstructuur. Het is een opvallend kenmerk van halfbrosse materialen zoals baksteen, mortel, keramiek, steen of beton. Door een geleidelijke interne scheurvorming kunnen deze materialen hierdoor bezwijken. Zo'n mechanisch gedrag wordt algemeen toegeschreven aan de heterogeniteit van het materiaal, de aanwezigheid van verschillende fases tijdens de constructie en materiaaldefecten. Zelfs voorafgaand aan de belasting, bevat mortel microscheuren door het uitharden ervan. De bakstenen bevatten insluitel en microscheurtjes als gevolg van krimp tijdens het brandproces. Steen bevat ook insluitels en microscheurtjes. De beginspanningen, scheurtjes en verschillende inwendige stijfheden en sterktes veroorzaken progressieve scheurvorming wanneer het materiaal wordt onderworpen aan progressieve vervorming. Bij maximale belasting begint een versnelling van interne scheurvorming. Daardoor ontstaat de vorming van uitwendige scheuren. De uitwendige scheuren zijn onstabiel, wat betekent dat de belasting moet verminderen om een ongecontroleerde groei te voorkomen (Lourenço, 1998).

In het pleisterwerk van de muren van de Sint-Quintinuskerk te Zonhoven is een belangrijke scheurvorming opgetreden ter hoogte van de kolombogen en de zijvensters. Voor de uitwerking van een restauratie van het interieur stelde zich de vraag naar de oorzaken van deze scheurvorming, en of deze scheuren al dan niet gestabiliseerd waren. Daarbij werd opgemerkt dat sinds de laatste schilderwerken van het interieur in de jaren 60 de scheuren zich blijkbaar opnieuw aftekenden in het pleisterwerk. Bij een eerste onderzoek ter plaatse werd vastgesteld dat de meeste scheuren een wel bijzonder patroon vertoonden. De grootste scheuropening bevonden zich onderaan ter hoogte van de kolombogen, en sluiting van de scheuren meer bovenaan in het metselwerk. Het globale scheurschema van het wordt getoond in Figuur 45 (Van Gemert & Ignoul, 2001).

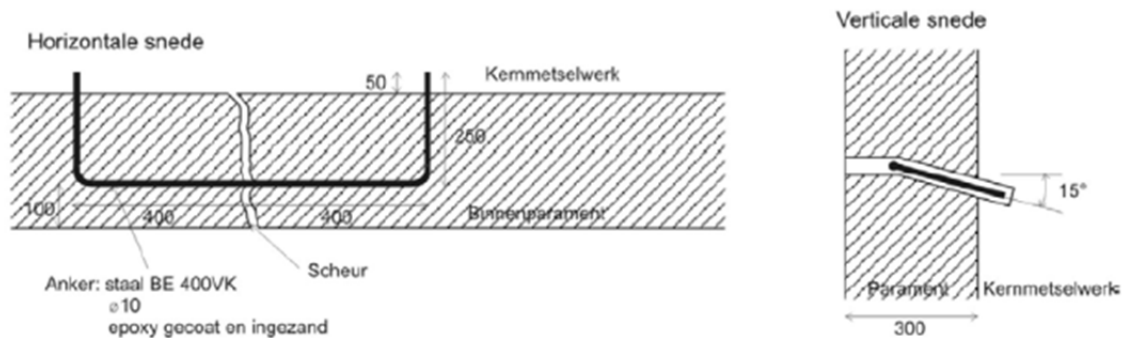


Figuur 45: scheurvorming in Sint Quintinuskerk (Van Gemert & Ignoul, 2001)

Uit Figuur 45 konden volgende belangrijke besluiten getrokken worden (Van Gemert & Ignoul, 2001):

- de opgetreden scheurvorming is wel degelijk te wijten aan differentiële zettingen van de funderingen;
- de zettingen van de funderingen zijn nagenoeg volledig voltooid, zodat geen extra zettingen moeten gevreesd worden, tenzij de grondkarakteristieken zouden veranderen door bijvoorbeeld verlaging van de grondwatertafel;
- het opnieuw aftekenen van de scheuren in het pleisterwerk is te wijten aan thermische werkingen, omdat de scheuren niet hersteld werden;
- de scheuren moeten geconsolideerd worden, om hernieuwd aftekenen van de scheuren doorheen het vernieuwde pleisterwerk te beletten.

Op basis van deze besluiten werd voorgesteld om de scheuren te consolideren met een ternair kalk-puzzolaan-cement specie, in combinatie met een mechanische verankering volgens het principe in Figuur 46 (Van Gemert & Ignoul, 2001).



Figuur 46: kalk-puzzolaan-cement specie in combinatie met mechanische verankering (Van Gemert & Ignoul, 2001)

1.4. Structurele analyse

1.4.1. Inleiding

Analysetechnieken zijn essentieel om het gedrag van constructies uit historisch metselwerk en het belang van de verschillende invloedsfactoren te begrijpen. Dit groot aantal invloedsfactoren maakt de structurele analyse van historische bouwwerken een moeilijke taak. (Lourenço, 1998). De moeilijkheden die bestaan bij het gebruiken van de bestaande kennis voor de analyse van historische structuren zijn aanzienlijk. Meestal zijn de opvallendste gebreken of onduidelijkheden (Lourenço, 2001):

- gebrek aan geometrische gegevens van het gebouw;
- gebrek aan informatie over de binnenste kern van structurele elementen, zoals tussenvloeren;
- hoge kost voor het bepalen van mechanische eigenschappen van gebruikte materialen;
- grote variabiliteit van de mechanische eigenschappen als gevolg van vakmanschap en gebruik van natuurlijke materialen;
- onbekende bestaande schade in de structuur.

1.4.2. Numerieke rekentechnieken

Verskillende methoden zijn ontwikkeld en toegepast voor de analyse van metselwerkconstructies. Deze methodes zijn als volgt kort te beschrijven (Kanit & Döndüren, 2010):

- geometrische belastingsfactor;
- lineaire elastische eindige elementenmethode;
- niet-lineaire elastische eindige elementenmethode.

De methode van de geometrische belastingsfactor werkt volgens het principe van de minimale dikte van de muur om de belastingen te kunnen opvangen. Vervormingen kunnen bij deze methode niet worden bepaald. De resultaten van de analyse hangen vooral af van de beslissingen van de ingenieur. (Kanit & Döndüren, 2010).

De eindige elementenmethode wordt meestal gebruikt om simulaties van structureel gedrag van metselwerk te verkrijgen. Met wiskundige beschrijving van de relatie tussen spanning en verplaatsing van een punt van het lichaam, wordt het materiaalgedrag beschreven. Deze mathematische beschrijving wordt doorgaans een constitutief model genoemd. Constitutieve modellen, die van belang zijn voor de praktijk, zijn normaal ontwikkeld volgens een benadering. Daarin worden de waargenomen mechanismen vertegenwoordigd op zo'n manier dat simulaties redelijk overeenkomen met experimenten. Het is niet mogelijk om constitutieve modellen met alle interactie van de mechanismen van een bepaald materiaal te proberen formuleren. Dit omdat elk constitutief model een vereenvoudigde weergave is van de realiteit (Lourenço, 1998). Bij de berekening van objecten via de eindige elementenmethode wordt het object in kleine deeltjes ingedeeld. De vervorming aan de grens van één zo'n deeltje is gelijk aan de vervorming ter hoogte van het aangrenzende deeltjes. Deze verdeling gebeurt steeds in een eindig aantal mazen. Dit wordt de mesh genoemd. Het aantal mazen en de vorm ervan bepalen de nauwkeurigheid van de berekening. De nauwkeurigheid stijgt bij het verkleinen van de maasgrootte. Dit heeft als gevolg dat de berekening een stuk complexer wordt. Daarom moet er een afweging gemaakt worden tussen de gewenste nauwkeurigheid en het aantal mazen waarin de constructie wordt onderverdeeld. De vorm van de mesh moet steeds in relatie zijn met het rekenmodel. Meestal wordt geopteerd voor een driehoekige vorm. Deze vorm bestaat namelijk uit een minimaal aantal hoekpunten, knopen genoemd, waardoor het aantal vergelijkingen beperkter blijven en dus de berekeningen minder complex worden. De berekening van een dergelijke mesh gebeurt aan de hand van een matrixvergelijking. Hierbij worden de verschillende mazen aan elkaar gelinkt door de hoekpunten, de knopen. Aan de hand van deze knopen kan voor elke maas een evenwichtsvergelijking opgesteld worden. Per knoop worden drie vergelijkingen opgesteld, één voor elke richting van verplaatsing. Bijkomend wordt gesteld dat de knopen van naastliggende mazen steeds dezelfde verplaatsingen ondergaan. Op deze manier worden alle elementen met elkaar gelinkt en kan de vervorming van het geheel bepaald worden. Ter hoogte van de steunpunten worden er aan

de knopen randvoorwaarden opgelegd waardoor deze geen verplaatsing zullen ondergaan. (Vandedrinck, 2012).

De vervormingen gevormd in het metselwerk onder werkende belasting kunnen berekend worden met de lineaire elastische eindige elementenmethode. Hierbij wordt het metselwerk beschouwd als een geheel van afzonderlijke elementen waarbij elk type element zich anders zal gedragen. Daarentegen kunnen de bezwijktoestand en bezwijkbelasting niet bepaald worden. Vervormingen, bezwijktoestanden en spanningstoestanden in de metselwerkconstructie kunnen worden berekend bij niet-lineaire elastoplastische eindige elementenmethode. Deze methode laat toe om het gedrag van het materiaal voor en na de belasting te beschrijven. Daarnaast kunnen de uiteindelijke draagkracht, de verplaatsingscapaciteit en de reactie op trillingen bepaald worden (Uva & Salerno, 2006). Het grootste nadeel van deze rekentechniek dat het metselwerk, inclusief onvolmaaktheden, wordt voorgesteld door een continue geheel. Daarom is het noodzakelijk om een anisotroop metselwerk voor te stellen met equivalente vervormings- en sterkteparameters (Kanit & Döndüren, 2010).

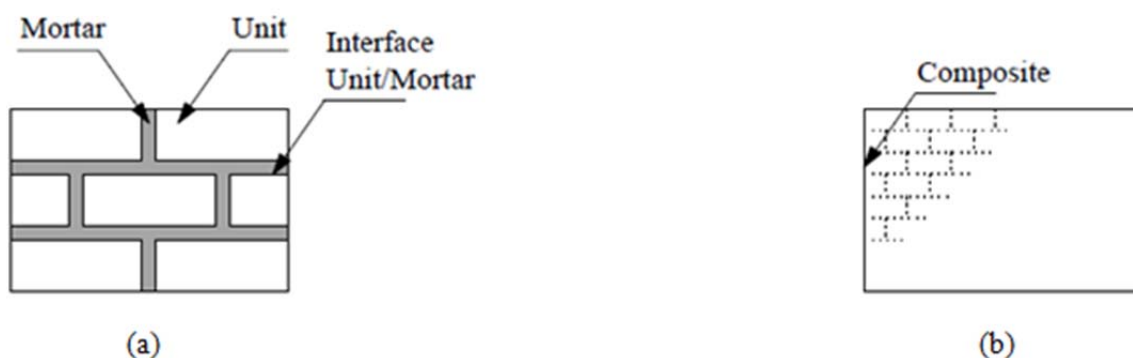
1.4.3. ANSYS

Voor de eindige elementenanalyse in het computerprogramma ANSYS, wordt het concept van het homogeen materiaal gebruikt. Deze macromodellering (zie 1.4.4.) van de structuur is voldoende nauwkeurig om het globaal gedrag van een structuur uit historisch metselwerk te bekomen (Eslami, Ronagh, Mahini & Morshed, 2012). ANSYS is een programma dat de prestaties en mogelijke breuken weergeeft bij verschillende ladingen in een virtueel medium. Het programma toont hoe een hele constructie zich zal gedragen in elk klein stukje van het systeem. De resultaten kunnen worden verkregen in de vorm van tabellen en beelden. De oplossingen van zeer complexe vergelijkingen kan gevonden worden met ANSYS. Daarom kan het gebruikt worden om bakstenen metselwerk te onderzoeken. Om de structurele analyse te verkrijgen met ANSYS, moeten opeenvolgende procedures uitgevoerd worden. Een eerste stap is het voorstellen van het fysieke gedeelte van de constructie. Het geometrisch model wordt gemodelleerd door de grafische interface van ANSYS. De tweede stap omvat de introductie van de materiaaleigenschappen. Hiervoor wordt de materialenbibliotheek gebruikt in ANSYS. Daarnaast dienen eigenschappen die niet in de bibliotheek zitten, zelf berekend te worden. De derde stap is het verdelen van de constructie in driedimensionale elementen (mesh). Als laatste stap worden de randvoorwaarden ingevuld. Na de voltooiing van het modelleringsproces in ANSYS wordt een stijfheidmatrix verkregen met het programma en een verplaatsingsmatrix als uitkomst. Hieruit volgen de resultaten van de structurele analyse (Kanit & Döndüren, 2010).

1.4.4. Modelling

Metselwerk is een materiaal dat duidelijke directionele eigenschappen vertoont als gevolg van de mortelvoegen die fungeren als vlakken van zwakte (zie figuur 42). Afhankelijk van het niveau van nauwkeurigheid en de eenvoud, is het mogelijk om volgende modelleringstrategieën aan te nemen (zie Figuur 47) (Calderini & Lagomarsino, 2008):

- micromodellering: het metselwerk wordt nauwkeurig ingegeven met de verschillende bestanddelen;
- macromodellering: maakt geen onderscheid tussen individuele eenheden en verbindingen, maar behandelt het metselwerk als een homogeen anisotroop continuüm.



Figuur 47: (a) micromodellering; (b) macromodellering

Studies die gebruik maken van micromodellering zijn nodig om een beter beeld te geven over het lokale gedrag van metselwerkstructuren (Lourenço, 2001). Door de nauwkeurige beschrijving van het materiaal heeft de micromodellering een sterke fysieke basis. Deze indeling is geschikt voor analyse van eenvoudig metselwerk zoals enkele muren, structurele details en architectonische elementen. Zo wordt er zeer nuttige informatie verkregen over de micromechanica van het metselwerk (Calderini & Lagomarsino, 2008).

Macromodellen zijn van toepassing wanneer de structuur is samengesteld uit massieve wanden met voldoende grote afmetingen. Het is duidelijk dat macromodellering meer praktijkgericht is en één van de betrouwbaarste methodes. Dit omdat er voor een macromodellering minder tijd en geheugen nodig is, wat neerkomt op een goedkopere modellering. Daarnaast leidt deze indeling tot een gebruiksvriendelijkere meshgeneratie. Deze vorm van modelleren is het meest waardevol als compromis tussen nauwkeurigheid en efficiëntie (Lourenço, 2001). Met deze modelleringvorm kan bij de structurele analyse het gedrag van het metselwerk direct beschreven worden. Hierbij kunnen ook tijdsgebonden spanningen en reacties op trillingen verkregen worden. Dit zowel voor metselwerk in het elastisch en het niet-elastisch gebied. Ondanks de wereldwijde ontwikkeling van

homogenisatietechnieken in het elastische gebied, zorgt de formulering in het niet-elastische gebied voor diepgaande conceptuele problemen (Calderini & Lagomarsino, 2008).

De ene modelleringstrategie is niet beter dan de andere, omdat de keuze van de strategie afhangt van het toepassingsgebied. Nauwkeurige micro- of macromodellering van metselwerkstructuren vereist een grondige experimentele beschrijving van het materiaal (Calderini & Lagomarsino, 2008). Elk van beide visies heeft een hoge theoretische waardigheid en een aantal voordelen. Toch, als deze twee visies elk zelfstandig worden bekeken, onthullen beide visies duidelijk gebreken. In de laatste jaren heeft de wetenschappelijke gemeenschap zich gerealiseerd dat er een redelijke compromis moet komen tussen de twee. Daardoor worden hoge computerkosten verkleind maar wordt toch uitgegaan van een continue product met een goed gefundeerde mechanische basis (Uva & Salerno, 2005).

2. Probleemstelling

In de Gotische Zaal van het stadhuis van Brugge bevinden zich scheuren aan de oostelijke muur. Wanneer de scheurvorming ontstond is onbekend. De scheuren bevinden zich dwars door recent gerestaureerde muurschilderingen. Aangezien het gebouw en de zaal historisch erfgoed zijn, moet deze schade zorgvuldig worden aangepakt.

In het verleden is al onderzoek uitgevoerd naar de scheurvorming in het gebouw. Toen zijn er geen specifieke oorzaken gevonden. Gezien de nieuwe schade is verder stabiliteitsonderzoek noodzakelijk. Uit de literatuurstudie is gebleken dat er verschillende oorzaken mogelijk zijn, onder andere de overbrugging van de kruisribgewelven, funderingsproblemen, trillingen rondom het gebouw, thermische spanningen,

3. Afbakening onderzoeksveld

4. In dit onderzoek wordt dieper ingegaan op de aansluiting van de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie op de oostgevel. Het onderzoek omvat de studie over de spanningen op de oostgevel, onder invloed van de inwerkende krachten op het stadhuis en die van de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie.

Voor aanvang van dit onderzoek wordt een literatuurstudie opgesteld. Hierbij wordt informatie verzameld over het stadhuis van Brugge die relevant is voor het onderzoek. De structurelementen, de functies van de verschillende ruimtes en de uitgevoerde renovaties worden hierin besproken. Daarnaast worden de materiaaleigenschappen van het metselwerk gezocht. Deze eigenschappen worden gebruikt bij het opstellen van het ANSYS-model. De materiaaleigenschappen die reeds in de bibliotheek van ANSYS zitten, worden aangevuld met deze eigenschappen. Een overzicht van soorten scheurvorming geeft een beter inzicht in de mogelijke oorzaken van de scheuren in de oostelijke muur. Tot slot van de literatuurstudie wordt algemene informatie verzameld over ANSYS en de structurele numerieke analyse in het algemeen. Zo kan het stabiliteitsonderzoek in ANSYS met een basiskennis aangevat worden.

Met een afstandsmeter en een totaalstation worden het gebouw en de scheuren op de oostelijke muur opgemeten. Daarnaast wordt met een Huggenberger de evolutie van de scheurbreedtes opgemeten. Met behulp van een distomat worden de diktes van de muren en de afmetingen van de verschillende ruimtes bepaald. Deze meetgegevens worden samen met de informatie uit de studie van het stadhuis gebruikt bij het ontwerpen van het 3D-model van het gebouw. Dit 3D-model wordt getekend in het programma Autocad. Aan de hand van de meetgegevens van de scheuren en de evolutie van de scheurbreedtes worden scheurrapporten opgesteld.

De verschillende belastingen die inwerken op het gebouw worden berekend aan de hand van de studie van het stadhuis, het materiaalonderzoek en de opmeting van het gebouw. Samen met het 3D-model worden deze belastingen ingeladen in de eindige elementensoftware ANSYS. Hier worden de structurele en de thermische analyse uitgevoerd. Uit de bekomen resultaten van deze analyses wordt de stabiliteit van de structuur bepaald. Bij negatieve resultaten zullen de spanningen in de oostelijke muur buiten de aanvaardbare grenzen liggen. Aan de hand van de scheurrapporten en de resultaten moet de oorzaak van de scheurvorming gezocht worden. Een mogelijke oplossing moet numeriek in het ANSYS-model ingegeven worden. Dit zullen bijvoorbeeld krachten zijn die op de oostelijke muur worden geplaatst en zo de mogelijke oplossing voorstellen. Daarna kan de structurele analyse opnieuw uitgevoerd worden. Dit proces kan herhaald worden tot de resultaten aanvaardbaar worden. Dan liggen de spanningen in de oostgevel binnen de aanvaardbare grenzen.

5. Scheurinspectie

5.1. Opmeting van de scheur

Een gedetailleerde tekening van de muur waarin de scheuren zich bevinden, is essentieel om een correcte interpretatie te krijgen van het scheurverloop. Daar de scheuren zichtbaar zijn van op het gelijkvloers, de eerste verdieping en de zolder, is het nodig om van op deze niveaus een opmeting uit te voeren.

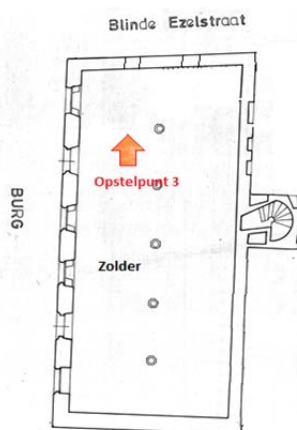
Voor het opmeten van de oostelijke muur en de scheuren die zich op deze muur bevinden, wordt een totaalstation gebruikt. Het gebruik van een totaalstation zal een deel met en een deel zonder reflector gebeuren. De hoogtes van de verschillende ruimtes zal de opmeting beperken tot het reflectorloos opmeten met een totaalstation. Bij reflectorloos meten, meet men vanuit één opstelpunt de volledige gevel van het niveau op (zie Figuur 48, Figuur 49 en Figuur 50).



Figuur 48: opstelpunt totaalstation in Gotische Zaal



Figuur 49: opstelpunt totaalstation op gelijkvloers



Figuur 50: opstelpunt totaalstation op de zolder

Eerst wordt het totaalstation opgesteld in de Gotische Zaal. Aangezien er geen vaste opstelpunten met gekende coördinaten zijn, dient er zelf een assenstelsel vastgelegd te worden. Er worden twee opstelpunten gekozen. Als eerste punt wordt een centraal punt gekozen zodat de volledige oostelijke muur goed zichtbaar is vanuit dit punt (zie Figuur 48). Om geen negatieve coördinaten te krijgen tijdens de opmeting, wordt aan dit punt coördinaat (1000,1000,100) gegeven. Het tweede punt wordt zodanig gekozen een lijn tussen de twee punten bekomen wordt die ongeveer evenwijdig ligt met de oostelijke muur. Dit punt is het back sight point (BSP). Het wordt ingesteld als coördinaat (1000,2000,100). Na het inlezen ligt het assenstelsel vast volgens deze twee punten en kan er vervolgens worden gestart met de opmeting.

Om vanuit de eerste verdieping naar het gelijkvloers of naar de zolder te gaan kan zowel de verplaatsingsmethode als de achterwaartse insnijding gebruikt worden. Via de verplaatsingsmethode worden twee punten buiten opgemeten door de ramen heen van de eerste verdieping. Na het opstellen op het gelijkvloers of zolder, worden die 2 punten opnieuw opgemeten. Met behulp van de methode van de achterwaartse insnijding kan de coördinaat van het opstelpunt op het gelijkvloers of zolder bepaald worden.

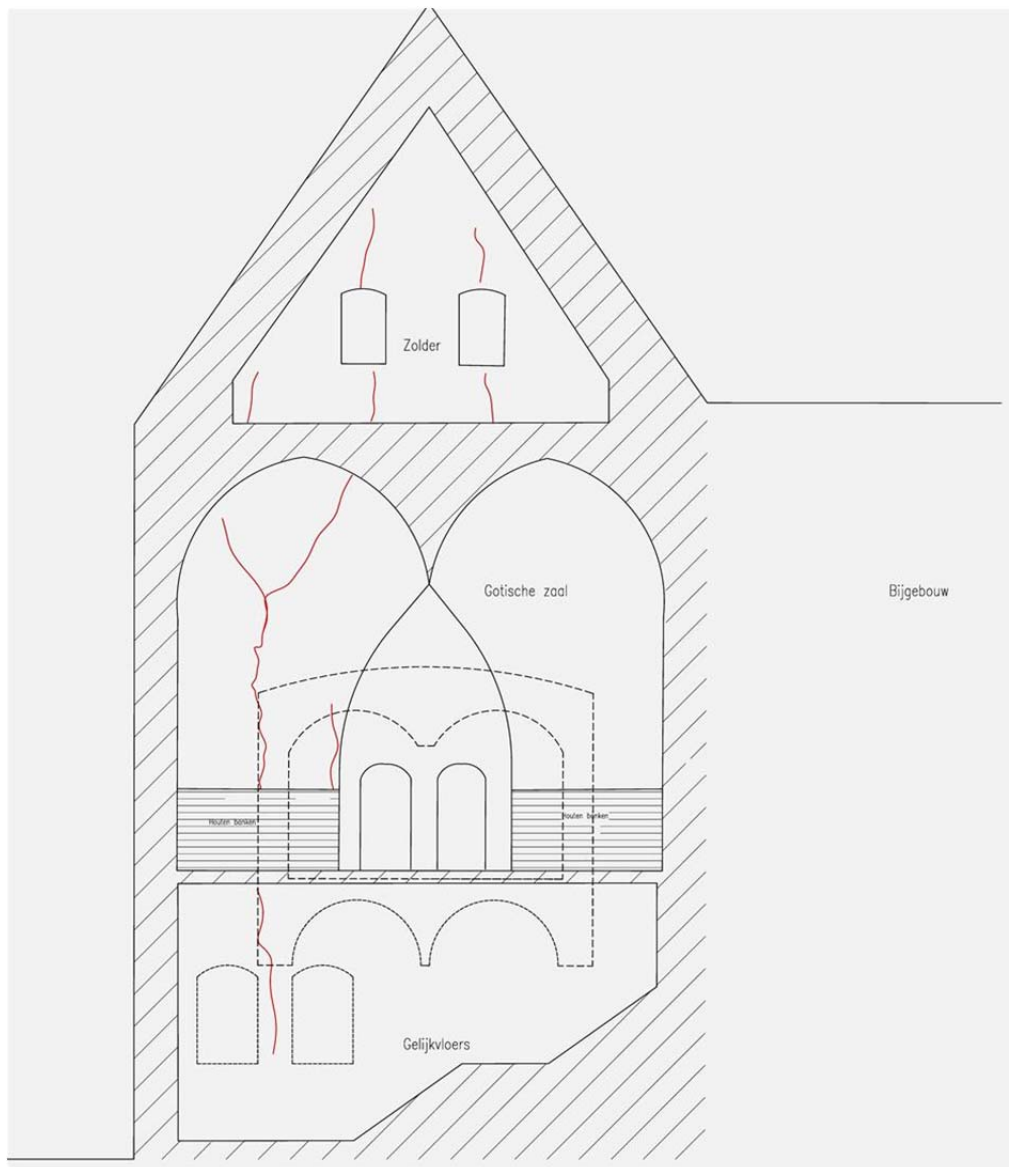
De andere methode, de verplaatsingsmethode, is hier eenvoudiger toe te passen omdat de zichtbaarheid door de ramen van de Gotische Zaal beperkt is. Vanuit de Gotische Zaal wordt er via verschillende tussenstappen naar beneden toe opgemeten. Elke tussenstap is een meetpunt. Eens het gelijkvloers bereikt is, wordt het totaalstation opnieuw centraal opgesteld zodat de volledige oostelijke muur zichtbaar is (zie Figuur 49: opstelpunt totaalstation op gelijkvloers). Nadien wordt het totaalstation via verschillende meetpunten naar buiten verplaatst, zodat de buitenomtrek van de aangebouwde overbrugging over de Blinde Ezelstraat kan worden opgemeten. Als laatste wordt via de Burg naar de dakopeningen van de zolder gemeten, om zo te kunnen verplaatsen tot op zolder. Eens dit punt opgemeten is, kan het opstelpunt op zolder terug vastgelegd worden. Zo is het mogelijk om de totale opmeting van de scheurvorming op zolder uit te voeren (zie Figuur 50: opstelpunt totaalstation op de zolder).

Tijdens het verplaatsen wordt het BSP steeds dubbel opgemeten ter controle. Achteraf bleek dit een goede keuze omdat er één maal tijdens het verplaatsen iets verkeerd liep waardoor alle meetpunten die achter deze verplaatsing werden opgemeten, verdraaid stonden. Aan de hand van het controlepunt konden de verkeerde meetpunten opnieuw verdraaid worden in de juiste richting.

Hoe hoger het aantal meetpunten per lengte eenheid van de scheur, hoe hoger de nauwkeurigheid het scheurenplan bij gevolg zal hebben. Per 25cm wordt er een punt van de scheur opgemeten. Naast de scheur worden alle belangrijke punten van de gevel opgemeten, zoals de omtrek van de gevel, de deuropeningen, de raamopeningen, de vensternissen, Tijdens het opmeten wordt ervoor gekozen om geen gebruik te maken van codering, waarbij de tekening in Pythagoras automatisch getekend

wordt. Deze keuze is gemaakt om de snelheid van het meten op te drijven en de kans op fouten te reduceren. Er was slechts een beperkte tijd voorzien om de totale oostelijke muur op te meten. Een goede voorbereiding van de meting en nauwkeurige notities moeten helpen bij het verwerken van de gegevens. Ieder meetpunt wordt opgemeten als punt, met telkens een specifiek puntnummer, zodat achteraf de punten van de scheur, de omtrek van de muur en dergelijke duidelijk herkenbaar zijn. Ook wordt er een extra schets van de gevel gemaakt waarop de puntnummers geschreven zijn. Dit maakt het mogelijk om achteraf zonder fouten de muur te reconstrueren.

Het inladen van de coördinaten gebeurt via Pythagoras. In Pythagoras worden geen wijzigingen aan de velddata aangebracht aangezien er geen gebruik gemaakt wordt van codering. De data wordt direct geëxporteerd naar een Autocadbestand. In het Autocad model wordt er een puntenwolk van velddata gevormd. Via Properties -> Design -> Attributes -> Pointnumber kan de naam van elk meetpunt gevonden worden. Dit maakt het mogelijk om de juiste punten met elkaar te verbinden en zo tot een correct en precies scheurenplan te komen (zie Figuur 51).



Figuur 51: opmeting oostgevel: scheurverloop

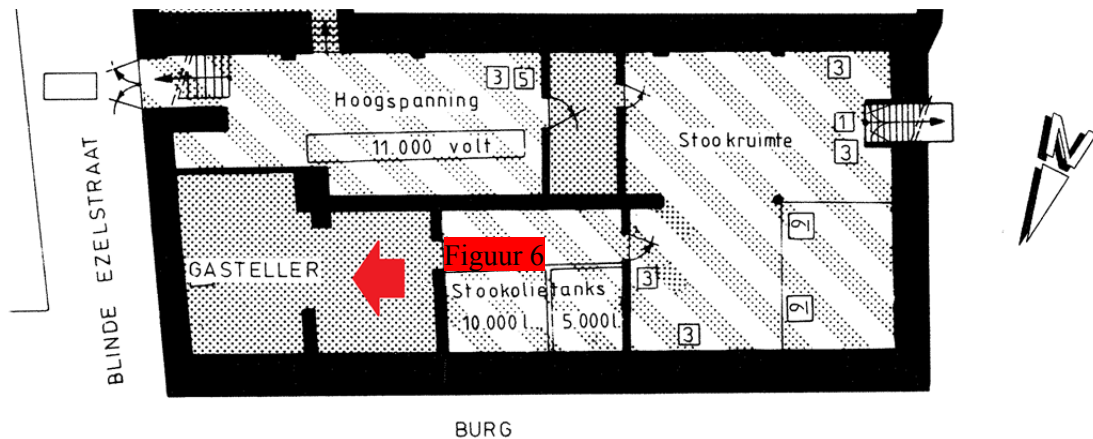
Na het tekenen van alle lijnen, bogen en schuren wordt een 3D-tekening van de gevel gevormd. Een aanzicht van die 3D-tekening loodrecht op de gevel is voldoende om een correcte tekening van het scheurverloop te krijgen. Op Figuur 51: opmeting oostgevel: scheurverloop is onderaan het gelijkvloers te zien met de stenen trap. Daarboven bevindt zich de Gotische Zaal met de gebogen houten siergewelven aan het plafond. Nog een verdiep hoger is de zolder met zadeldak. In stippellijn is het aangebouwde overbrugging met zijn gebogen gewelven te zien. De rode lijnen stellen de scheuren voor. Een groot plan is achteraan dit onderzoek bijgevoegd.

Het brugje over de Blinde Ezelstraat sluit aan op de gevel juist tussen de twee scheuren in de Gotische Zaal. Dit wekt het vermoeden op dat de oorzaak van de scheurvorming wel eens bij de spatkrachten van het brugje kan liggen. Latere analyses zullen dit moeten uitwijzen.

5.2. Inspectie van de scheur

5.2.1. Kelder

De start van de inspectie gebeurt in de kelder van het stadhuis. De kelder bestaat uit vijf ruimtes. De hoogspanningsruimte, de stookruimte, de stookolietanks, de ruimte met de gasteller en een tussenruimte (zie Figuur 52). De twee ruimtes die aan de oostgevel palen zijn de hoogspanningsruimte en de ruimte met de gasteller. In de hoogspanningsruimte is er geen scheur op te merken aan de oostgevel.



Figuur 52: grondplan kelder bij scheurinspectie

Figuur 53 is een foto getrokken vanuit de ruimte waar de gasteller zich bevindt. Na het grondig inspecteren van de oostelijke muur werden er geen scheuren vastgesteld. Hieruit kan besloten worden dat de oorzaak van de scheurvorming niet in de fundering van het stadhuis te zoeken is.



Figuur 53: scheurinspectie kelder

5.2.2. Gelijkvloers

Op dit niveau start de scheur slechts als een haarbreedte. Hoe hoger de scheur, des te breder deze wordt, waardoor de scheur ook beter waarneembaar blijkt te zijn. Meer specifieke info over de scheur is terug te vinden in scheurrapport 1.

Op een hoogte van 2,38m en 3,30m vanaf de vloerpas zijn controlepunten vastgelegd om de beweging van de scheur op te meten. De controlepunten zijn bevestigd door een ander studie bureau dat op hetzelfde ogenblik een onderzoek voert met betrekking tot de scheurvorming. Een controlepunt bestaat uit twee kleine plaatjes waarin een putje gemaakt is (zie Figuur 54). In de putjes passen de meetpennen van de Huggenberger, een meettoestel die de beweging van een scheur tot op 0,001mm nauwkeurigheid kan opmeten. Dit meettoestel was tijdens het onderzoek ter beschikking gesteld door Hogent.



Figuur 54: detailscheur gelijkvloers

De scheur werd gedurende het onderzoek drie keer opgemeten met de Huggenberger, in Tabel 1 zijn de meetresultaten te vinden. De waarden op zich hebben geen enkele betekenis. Deze dienen onderling vergeleken te worden. Het belang draait om de verschillen tussen de drie metingen.

Tabel 1: meetresultaten Huggenberger gelijkvloers

	20/03/2013	24/04/2013	23/05/2013
Scheur op 2,38m	5,773mm	5,778mm	5,775mm
Scheur op 3,30m	5,673mm	5,672mm	5,671mm

De scheurbreedte is opgemeten met een scheurbreedtekaartje van het studiebureau Triconsult. Op het kaartje zijn lijntjes aangebracht met verschillende lijndiktes, dit tot op 0,05mm nauwkeurig. De breedte van de scheur wordt vergeleken met deze lijndiktes. De scheurbreedte wordt bepaald door de lijn die het best overeen komt met de breedte van de scheur op de bepaalde hoogtes.

Op 2,38m wordt een scheurbreedte van 0,15mm gemeten, op 3,30m eveneens een zelfde scheurbreedte van 0,15mm.

5.2.3. Eerste verdieping

Op de eerste verdieping is de scheur duidelijker waar te nemen. Er zijn twee scheuren aanwezig. Een scheur die begint op een horizontale afstand van 1,90m van de noordelijke binnenwand en een scheur die begint op een horizontale afstand van 3,61m van de noordelijke binnenwand. De scheuren zijn niet zichtbaar vanaf de vloer door de lambrisering die loopt tot op 1,88m van de vloer. Vanaf die hoogte gaat de scheur golvend verticaal omhoog tot op 6,26m. Daar splitst de scheur in een linkertak en een rechtertak. Beide takken lopen schuin (ongeveer 45°) door tot aan het plafond, zie het bijgevoegd plan of Figuur 51: opmeting oostgevel: scheurverloop. De rechterscheur is eveneens zichtbaar vanaf 1,88m en loopt verticaal omhoog tot op een hoogte van 3,83m.

Meer specifieke info over deze scheuren is terug te vinden in scheurrapporten 2 en 3.

Ook hier wordt de breedte van de scheur opgemeten met het scheurbreedtekaartje van het studie bureau Triconsult (zie Figuur 55). De scheurbreedte van de linkerscheur op een hoogte van 2,02m bedraagt 0,55mm, bij de rechterscheur is de scheurbreedte op dezelfde hoogte 0,40mm.



Figuur 55: opmeting scheurbreedte met Triconsul –kaartje

De linkerscheur is dus breder dan de rechterscheur. Daarnaast is er ook een horizontale verschuiving van de muur loodrecht op de wand waar te nemen. Zo is het muurgedeelte links van de linkerscheur dieper gelegen dan de rechterkant. De rechterkant komt als het ware een klein beetje vooruit gelegen.



Figuur 56: linkerscheur in de Gotische Zaal

Op de linkerscheur (zie Figuur 56) is ook een controlepunt aangebracht om de beweging van de scheur op te meten. Op de rechterscheur is dit niet aangebracht. Het controlepunt is aangebracht op een hoogte van 2,02m van de vloer. Hoger zijn geen controle punten aangebracht, daar het verboden is om een ladder te gebruiken ter bescherming van de muurschilderingen in de Gotische Zaal. Het controlepunt is ook drie keer opgemeten met de Huggenberger (zie Tabel 2).

Tabel 2: meetresultaten Huggenberger Gotische Zaal

	20/03/2013	24/04/2013	23/05/2013
Scheur op 2,02m	6,140mm	6,141mm	6,138mm

5.2.4. Zolder

Op de zolder zijn drie scheuren duidelijk waar te nemen. De linkerscheur is de fijnste van de drie, ze start onderaan en is zichtbaar tot op een hoogte van 1,18m van de vloerpas. De middelste en rechterscheur zijn grove scheuren. Deze scheuren starten onderaan en worden onderbroken door de raamopeningen. Boven deze openingen lopen ze vervolgens door. Ze zijn zichtbaar tot aan de dakspanten, hoger zijn deze moeilijk waarneembaar daar de toegankelijkheid moeilijk is.

Meer specifieke info over de drie scheuren zijn terug te vinden in scheurrapporten 4,5 en 6.

Uit de opmeting van de oostgevel met het totaalstation blijkt dat de linkse scheur en de middelste scheur (zie Figuur 57) op de zolder een vervolg is van de linker- en rechtertak van de linkse scheur in de Gotische Zaal. Omdat enkel deze twee scheuren op de zolder belangrijk lijken voor het onderzoek, zijn enkel op deze twee scheuren controleplaatjes aangebracht. Deze plaatjes werden niet aan de rechtse scheur aangebracht.



Figuur 57: middelste scheur zolderverdieping

De controleplaatjes van de Huggenberger zijn op de linkerscheur aangebracht op 85cm hoogte, op de middelste scheur zijn ze aangebracht op 95cm hoogte.

Tabel 3: meetresultaten Huggenberger zolder

	20/03/2013	24/04/2013	23/05/2013
Scheur links op 0,85m	5,832mm	5,830mm	5,835mm
Scheur midden op 0,95m	5,585mm	5,586mm	5,588mm

De drie scheuren zijn elk op twee hoogtes gemeten. De resultaten zijn in Tabel 4 te vinden.

Tabel 4: scheurbreedtes zolder

	0,5m hoogte	1m hoogte
Scheur links	0,70mm	0,90mm
Scheur midden	4,63mm	4,39mm
Scheur rechts	2,31mm	2,78mm

De linkerscheur is nog meetbaar met het breedtekaartje van Triconsult (zie Figuur 58). De middelste en rechterscheur zijn te wijd opengescheurd om gebruik te maken van het kaartje. Deze worden opgemeten met een digitale schuifmaat (zie Figuur 59).



Figuur 58: opmeten scheurbreedte zolder m.b.v. scheurkaartje



Figuur 59: opmeten scheurbreedte zolder m.b.v. digitale schuifmaat

Er is geen horizontale verschuiving loodrecht op de gevel waar te nemen, daar dit wel het geval was in de Gotische Zaal.

5.3. Verwerking resultaten Huggenberger

De aparte waarden onderling hebben geen enkele betekenis. Om de beweging van de scheur te waar te nemen wordt het verschil genomen tussen de waardes gemeten op de drie verschillende tijdstippen (zie Tabel 5, Tabel 6 en Tabel 7).

gelijkvloers:

Tabel 1: meetresultaten Huggenberger gelijkvloers

	20/03/2013	24/04/2013	23/05/2013
Scheur op 2,38m	5,774mm	5,778mm	5,775mm
Scheur op 3,30m	5,673mm	5,672mm	5,671mm

Tabel 5: beweging scheur gelijkvloers

	Verplaatsing op 24/04 t.o.v. 20/03	Verplaatsing op 23/05 t.o.v. 24/04
Scheur op 2,38m	+0,004mm	-0,003mm
Scheur op 3,30m	-0,001mm	-0,001mm

eerste verdieping:

Tabel 2: meetresultaten Huggenberg Gotische Zaal

	20/03/2013	24/04/2013	23/05/2013
Scheur op 2,02m	6,140mm	6,141mm	6,138mm

Tabel 6: beweging scheur Gotische Zaal

	Verplaatsing op 24/04 t.o.v. 20/03	Verplaatsing op 23/05 t.o.v. 24/04
Scheur op 2,02m	+0,001mm	-0,003mm

zolder:

Tabel 3: meetresultaten Huggenberger zolder

	20/03/2013	24/04/2013	23/05/2013
Scheur linker op 0,85m	5,832mm	5,830mm	5,835mm
Scheur midden op 0,95m	5,585mm	5,586mm	5,588mm

Tabel 7: beweging scheuren zolder

	Verplaatsing op 24/04 t.o.v. 20/03	Verplaatsing op 23/05 t.o.v. 24/04
Scheur linker op 0,85m	-0,002mm	+0,005mm
Scheur midden op 0,95m	-0,001mm	+0,002mm

De beweging van de scheur varieert tussen 0,001mm en 0,005mm, Deze waarden zijn zo klein dat ze te verwaarlozen zijn. De reden van deze kleine resultaten is wellicht te danken aan de korte tijdspanne tussen de eerste en laatste meting. Die periode bedraagt slechts twee maanden.



Figuur 60: opmeten scheur met behulp van de Huggenberger

5.4. Scheurrapporten

Van iedere scheur wordt per verdiep een scheurrapport opgemaakt. Deze scheurrapporten kunnen dienst doen voor de scheuropvolging. De scheurrapporten werden opgesteld op 20 maart 2013. Aan de hand van deze resultaten kunnen de evoluties van de verschillende scheuren bijgehouden worden.

Er waren nog geen scheurrapporten opgesteld van de oostelijke muur. Het is dus niet mogelijk te vergelijken met vroeger opgemaakte scheurrapporten.

Er worden zes scheurrapporten opgemaakt:

- scheurrapport 1: oostelijke muur stadhuis Brugge – gelijkvloers;
- scheurrapport 2: oostelijke muur stadhuis Brugge – 1^{ste} verdieping, scheur 1;
- scheurrapport 3: oostelijke muur stadhuis Brugge – 1^{ste} verdieping, scheur 2;
- scheurrapport 4: oostelijke muur stadhuis Brugge – 2e verdieping, scheur 1;
- scheurrapport 5: oostelijke muur stadhuis Brugge – 2e verdieping, scheur 2;
- scheurrapport 6: oostelijke muur stadhuis Brugge – 2e verdieping, scheur 3.

Fiche van de schadeverschijnselen

Datum vaststelling: 20/03/2013

Scheurrapportnummer: 1

Vastgesteld door: De Cuyper Davy, De Witte Colin, Raeymaekers Andreas

Plaats/Lokaal: Oostergevel Stadhuis Brugge – gelijkvloers

Detail schadeverschijnsel:

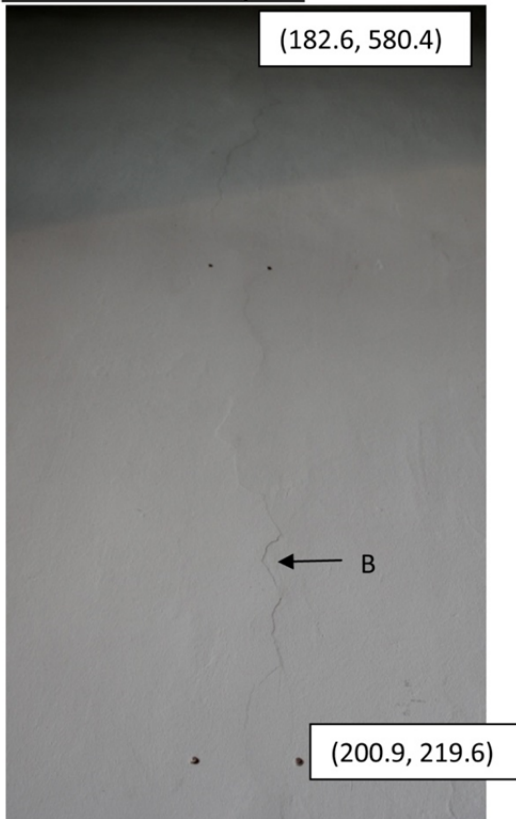
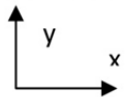


Foto 1: detailbeeld gelijkvloers



Assenstelsel bevindt zich in de Linkerbenedenhoek. Coördinaten in cm.

Gedetailleerde omschrijving:

- Aard schadeverschijnsel
 - Structurele schade
 - Bouwfysische schade
 - Afwerkingschade
 - Gebruiksschade
- Kenmerken van de scheur
 - Start scheur: (200.9cm, 219.6cm)
 - Einde scheur: (182.6cm, 580.4cm)
 - Soort scheur: fijne scheur
 - Verloop: verticaal
 - Scheurbreedte (op plaats B): 0.15mm
 - Scheurlengte: 391,3cm
 - Ouderdomsindicatie: geen
 - Breukvlakken: effen
 - Scheurmeter: breedte-kaartje Triconsult
- Beschrijving van de scheur:

De scheur is zichtbaar vanaf een ± 2.20 m hoogte en loopt grillig verticaal omhoog tot aan het plafond.

Algemeen Beeld:



Foto 2: Algemeen beeld gelijkvloers

Grondplan:

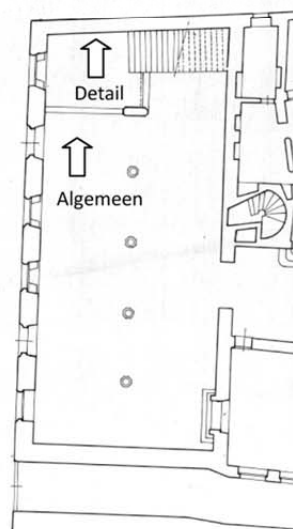


Foto 3: Grondplan gelijkvloers

Fiche van de schadeverschijnselen

Datum vaststelling: 20/03/2013

Scheurrapportnummer: 2

Vastgesteld door: De Cuyper Davy, De Witte Colin, Raeymaekers Andreas

Plaats/Lokaal: Oostgevel Stadhuis Brugge – 1^{ste} verdieping

Detail schadeverschijnsel:

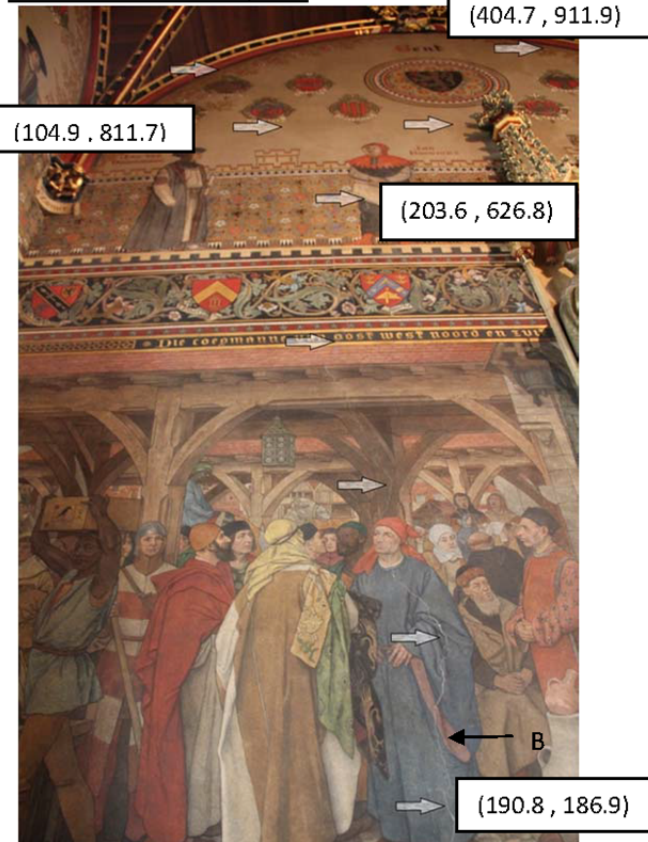
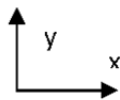


Foto 1: Detailbeeld gotische zaal scheur 1



Assenstelsel bevindt zich in de Linkerbenedenhoek. Coördinaten in cm.

Gedetailleerde omschrijving:

- Aard schadeverschijnsel
 - Structurele schade
 - Bouwfysische schade
 - Afwerkingschade
 - Gebruiksschade

- Kenmerken van de scheur
 - Start scheur: (190.8cm, 186.9cm)
 - Splitsing scheur: (203.6cm, 626.8cm)
 - Einde scheur 1 na splitsing (104.9cm, 811.7cm)
 - Einde scheur 2 na splitsing (404.7cm, 911.9cm)
 - Soort scheur: fijne scheur
 - Verloop: verticaal
 - Scheurbreedte (op plaats B): 0.55mm
 - Scheurlengte tot aan splitsing: 450.1cm
 - Scheurlengte linkerboventak: 219.6cm
 - Scheurlengte rechterboventak: 352.9cm
 - Ouderdomsindicatie: geen
 - Breukvlakken: Rechtervlak ligt iets vooruit geschoven t.o.v. Linkervlak
 - Scheurmeter: breedte-kaartje Triconsult

- Beschrijving van de scheur:

De scheur is niet zichtbaar vanaf de vloer omdat er een houten want geplaatst is voor de gevel tot op 1.88m. Vanaf die hoogte gaat de scheur golvend verticaal omhoog tot op 6.26m. Daar splitst de scheur in een linkertak en rechertak. Beide takken lopen schuin (45°) door tot aan het plafond.

Algemeen Beeld:

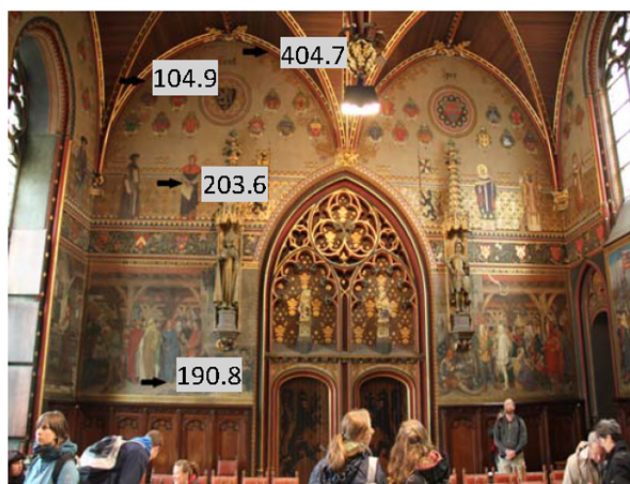


Foto 2: Algemeen beeld gotische zaal scheur 1

Grondplan:

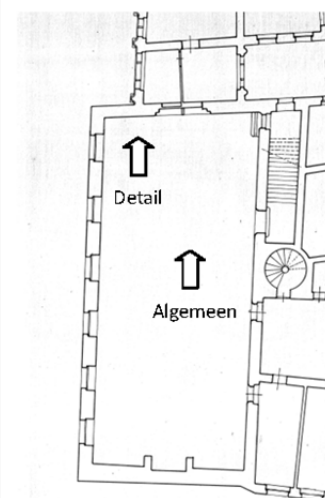


Foto 3: Grondplan Gotische zaal scheur 1

Fiche van de schadeverschijnselen

Datum vaststelling: 20/03/2013

Scheurrapportnummer: 3

Vastgesteld door: De Cuyper Davy, De Witte Colin, Raeymaekers Andreas

Plaats/Lokaal: Oostgevel Stadhuis Brugge – 1^{ste} verdieping (Gotische Zaal)

Detail schadeverschijnsel:

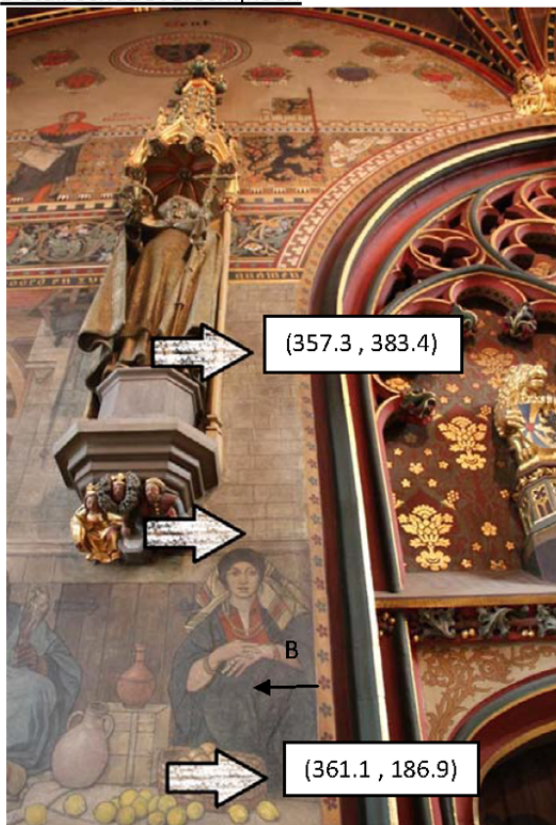
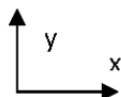


Foto 1: Detailbeeld Gotische zaal scheur 2



Assenstelsel bevindt zich in de Linkerbenedenhoek. Coördinaten in cm.

Gedetailleerde omschrijving:

- Aard schadeverschijnsel
 - Structurele schade
 - Bouwfysische schade
 - Afwerkingschade
 - Gebruiksschade

- Kenmerken van de scheur
 - Start scheur: (361.1cm, 186.9cm)
 - Einde scheur: (357.3cm, 383.4cm)
 - Soort scheur: fijne scheur
 - Verloop: verticaal
 - Scheurbreedte (op plaats B): 0.45mm
 - Scheurlengte: 200.7cm
 - Ouderdomsindicatie: geen
 - Breukvlakken: Rechtervlak ligt iets achteruit geschoven t.o.v. Linkervlak
 - Scheurmeter: breedte-kaartje Triconsult

- Beschrijving van de scheur:

De scheur is niet zichtbaar vanaf de vloer omdat er een houten want geplaatst is voor de gevel tot op 1.88m. Vanaf die hoogte gaat de scheur recht en verticaal omhoog tot op een hoogte van 3.83m.

Algemeen Beeld:

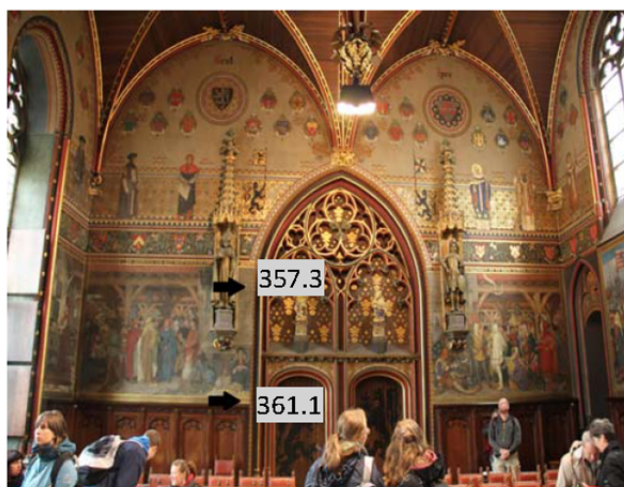


Foto 2: Algemeen beeld Gotische zaal scheur 2

Grondplan:

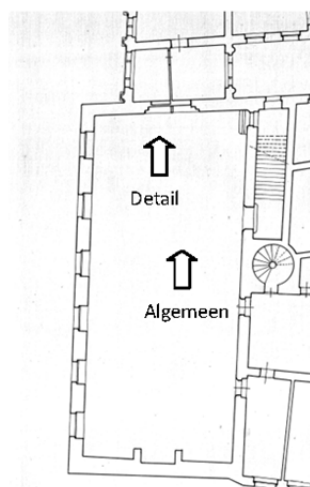


Foto 3: Grondplan Gotische zaal scheur 2

Fiche van de schadeverschijnselen

Datum vaststelling: 20/03/2013

Scheurrapportnummer: 4

Vastgesteld door: De Cuyper Davy, De Witte Colin, Raeymaekers Andreas

Plaats/Lokaal: Oostgevel Stadhuis Brugge – 2^e verdieping (Zolder)

Detail schadeverschijnsel:

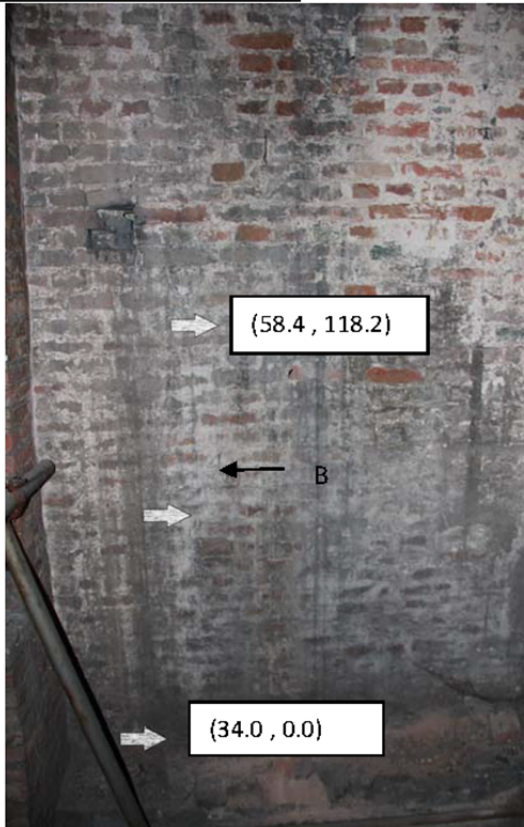
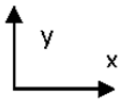


Foto 1: Detailbeeld zolder scheur 1



Assenstelsel bevindt zich in de Linkerbenedenhoek. Coördinaten in cm.

Gedetailleerde omschrijving:

- Aard schadeverschijnsel
 - Structurele schade
 - Bouwfysische schade
 - Afwerkingschade
 - Gebruiksschade
- Kenmerken van de scheur
 - Start scheur: (34.0cm, 0.0cm)
 - Einde scheur: (58.4cm, 118.2cm)
 - Soort scheur: fijne scheur
 - Verloop: verticaal
 - Scheurbreedte op 1m hoogte (B): 0.90mm
 - Scheurlengte: 122.2cm
 - Ouderdomsindicatie: geen
 - Breukvlakken: geen
 - Scheurmeter: breedte-kaartje Triconsult
- Beschrijving van de scheur:

Op de zolder zijn 3 scheuren zichtbaar. Deze linkerscheur is de fijnste scheur van de 3. Ze is zichtbaar vanaf de tussenvloer tot op een hoogte van 1.18m. De grootste scheurbreedte is 0.9mm op 1m hoogte.

Algemeen Beeld:

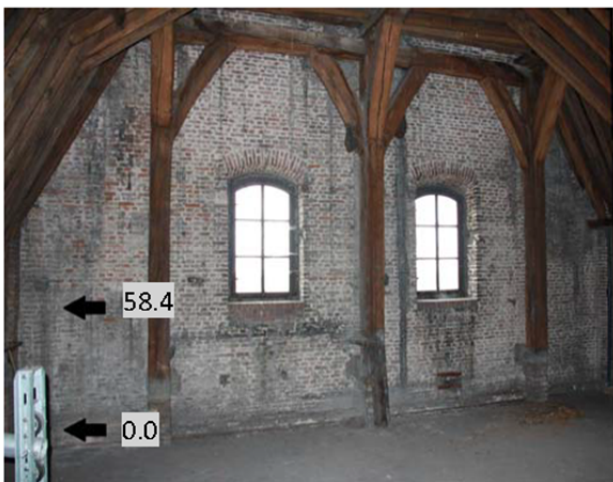


Foto 2: Algemeen beeld zolder scheur 1

Grondplan:

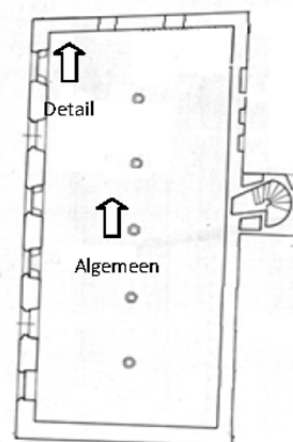


Foto 3: Grondplan zolder scheur 1

Fiche van de schadeverschijnselen

Datum vaststelling: 20/03/2013

Scheurrapportnummer: 5

Vastgesteld door: De Cuyper Davy, De Witte Colin, Raeymaekers Andreas

Plaats/Lokaal: Oostgevel Stadhuis Brugge – 2^e verdieping (Zolder)

Detail schadeverschijnsel:

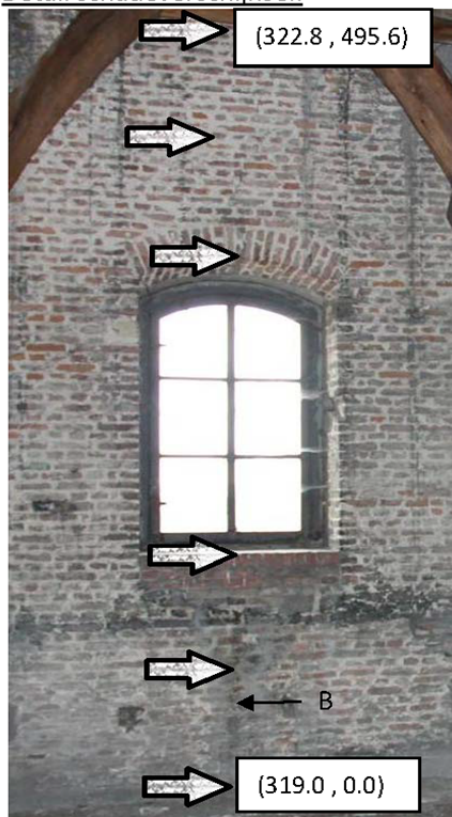
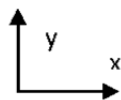


Foto 1: Detailbeeld Zolder scheur 2



Assenstelsel bevindt zich in de Linkerbenedenhoek. Coördinaten in cm.

Gedetailleerde omschrijving:

- Aard schadeverschijnsel
 - Structurele schade
 - Bouwfysische schade
 - Afwerkingschade
 - Gebruiksschade

- Kenmerken van de scheur
 - Start scheur: (34.0cm, 0.0cm)
 - Einde scheur: (58.4cm, 118.2cm)
 - Soort scheur: grove scheur
 - Verloop: verticaal
 - Scheurbreedte op 1m hoogte (B): 4.63mm
 - Scheurlengte: 190.8cm + 118.7cm
 - Ouderdomsindicatie: geen
 - Breukvlakken: geen
 - Scheurmeter: breedte-kaartje Triconsult

- Beschrijving van de scheur:

Op de zolder zijn 3 scheuren zichtbaar. Deze is de middelste scheur.

Ze is zichtbaar vanaf de tussenvloer en loopt via het raam door tot aan de houten spanten.

Waarschijnlijk loopt de scheur daarboven nog door, maar dit is niet meer zichtbaar.

Algemeen Beeld:

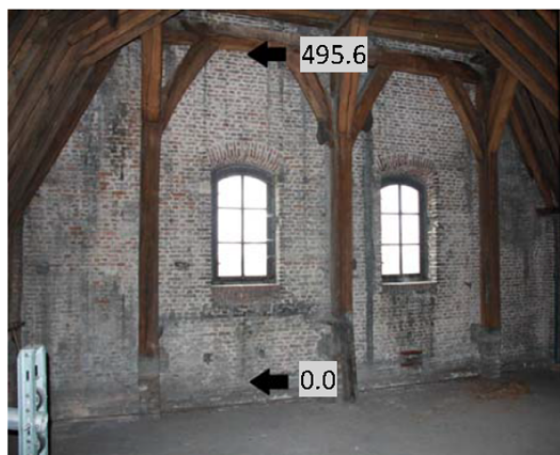


Foto 2: Algemeen beeld Zolder scheur 2

Grondplan:

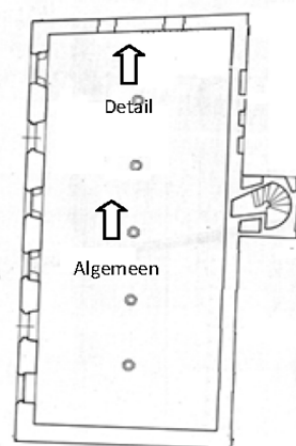


Foto 3: Grondplan zolder scheur 2

Fiche van de schadeverschijnselen

Datum vaststelling: 20/03/2013

Scheurrapportnummer: 6

Vastgesteld door: De Cuyper Davy, De Witte Colin, Raeymaekers Andreas

Plaats/Lokaal: Oostgevel Stadhuis Brugge – 2^e verdieping (Zolder)

Detail schadeverschijnsel:

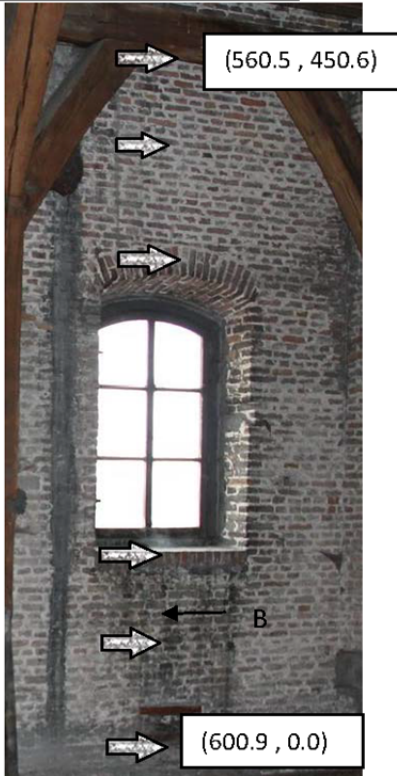
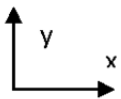


Foto 1: Detailbeeld Zolder scheur 3



Assenstelsel bevindt zich in de Linkerbenedenhoek. Coördinaten in cm.

Gedetailleerde omschrijving:

- Aard schadeverschijnsel
 - Structurele schade
 - Bouwfysische schade
 - Afwerkingschade
 - Gebruiksschade
- Kenmerken van de scheur
 - Start scheur: (34.0cm, 0.0cm)
 - Einde scheur: (58.4cm, 118.2cm)
 - Soort scheur: grove scheur
 - Verloop: verticaal
 - Scheurbreedte op 1m hoogte (B): 2.78mm
 - Scheurlengte: 118.3cm + 124.7cm
 - Ouderdomsindicatie: geen
 - Breukvlakken: geen
 - Scheurmeter: digitale schuifmaat
- Beschrijving van de scheur:

Op de zolder zijn 3 scheuren zichtbaar. Deze is de rechtse scheur.

Ze is zichtbaar vanaf de tussenvloer en loopt via het raam door tot aan de houten spanten.

Waarschijnlijk loopt de scheur daarboven nog door, maar dit is niet meer zichtbaar.

Algemeen Beeld:



Foto 2: Algemeen beeld Zolder scheur 3

Grondplan:

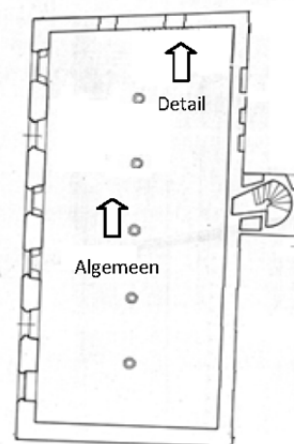


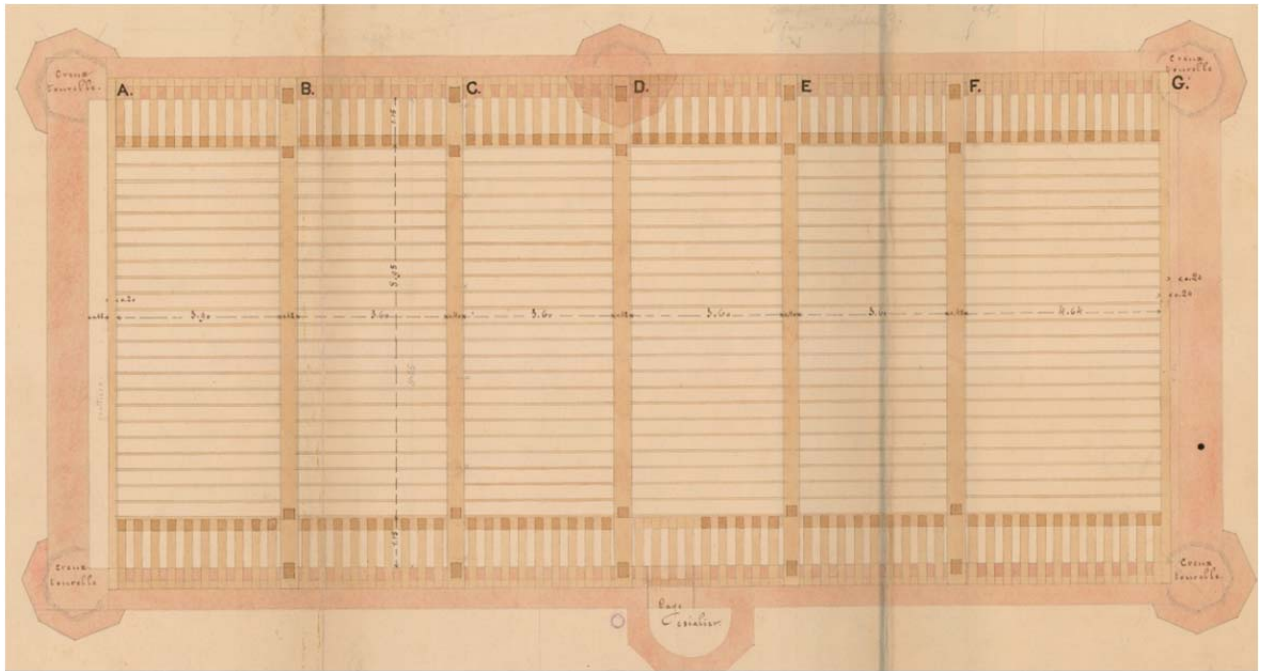
Foto 3: Grondplan zolder scheur 3

6. Belastingen op het gebouw

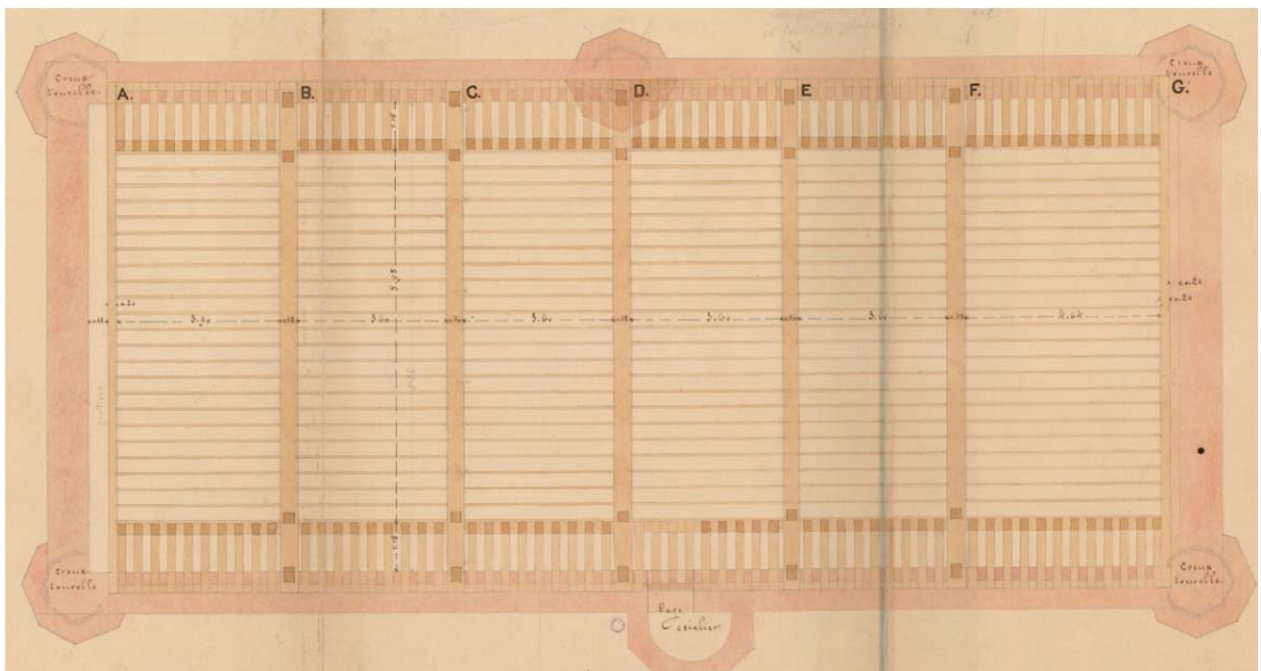
6.1. De dakconstructie

De eerste belasting die van naderbij bekeken wordt, is de dakconstructie. Het dak is een spantendak. Dit is voor een dergelijk gebouw opvallend, daar men in die tijd (eind 19e eeuw) veelal gebruik maakte van gordendaken (spanten op grotere afstand, met daarbij tussengordingen tussen de spanten).

In de situatie van het stadhuis staan de spanten op 50 cm van elkaar geplaatst. Op



Figuur 61 is een schets te zien van het dakenplan van de verbouwingen van Delacenserie.

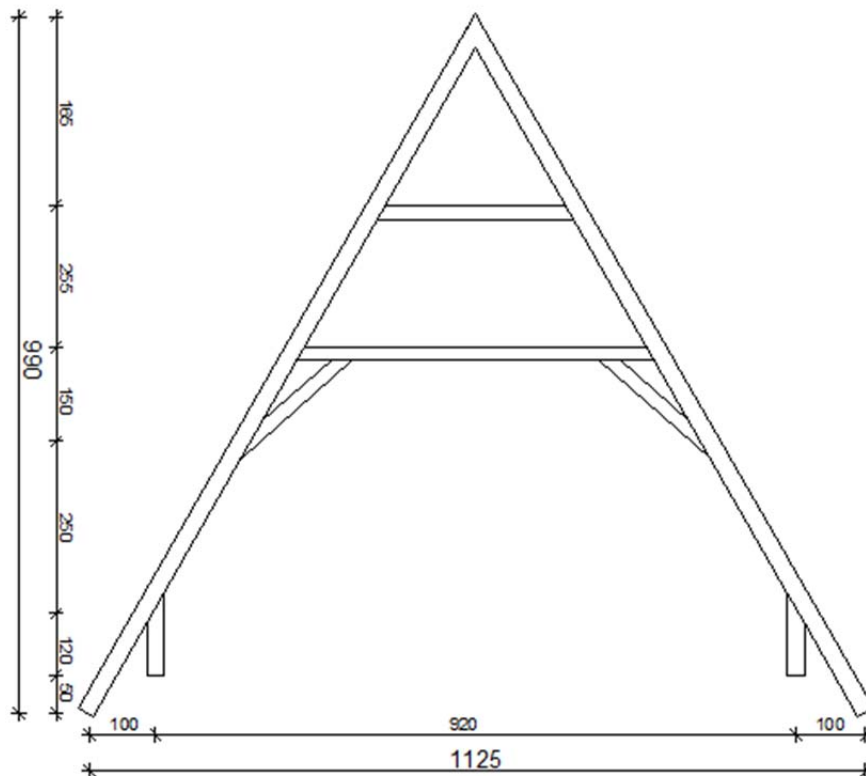


Figuur 61: grondplan spantendak

De vorm van de spanten werd ter plaatste met behulp van een totaalstation en distometer opgemeten.

Voor de balken van de spanten werd gebruik gemaakt van eiken houten balken. De hoofdbenen van de spanten hebben een sectie van 25cm x 25cm. Voor de tussenbalken werd gebruik gemaakt van houten balken met sectie 20cm x 20cm. De dakconstructie is aldus een zware houten constructie.

Op Figuur 62 zijn de afmetingen van de spanten te zien. Daarbij staat het hoofdspant onder een hoek van 60°. Op 5,70 meter van de bovenkant van de betonplaat (afdekking Gotische Zaal) is er nog een tussenschot aanwezig. Dit tussenschot is afgedekt met houten planken. Deze tussenvloer wordt echter niet gebruikt en is slechts toegankelijk met een klein trapladdertje. Het tussenschot dient als trekker, om de doorbuiging in de hoofdspanten te reduceren. De schuine trekkers in de spanten dienen voor het verminderen van de doorbuiging in het onderste deel van de spanten.



Figuur 62: dakspant

De krachtenwerking per spant wordt berekend met behulp van de rekensoftware van Powerframe, Buildsoft. Daarbij dient eerst de geometrie getekend te worden. Daarna moet het materiaal toegekend worden. De laatste stap omvat de steunpunten bepalen. Volgende steunpunten worden van naderbij bekeken:

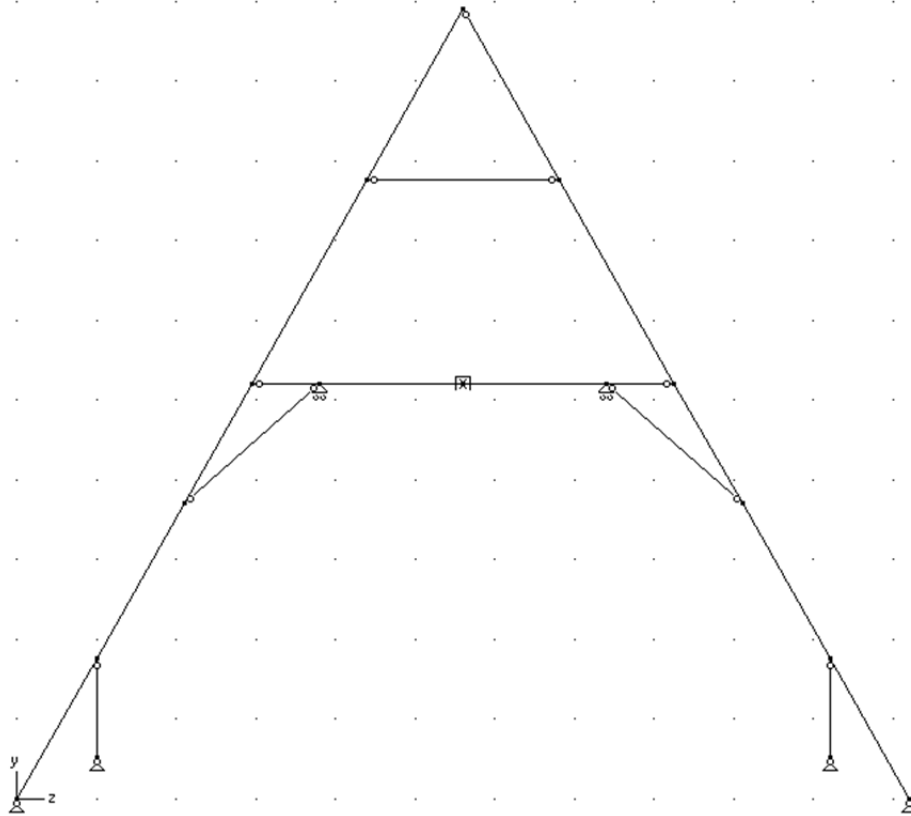
- De twee uiterste steunpunten van het spant staan op de kopgevel. Deze steunpunten belemmeren een verplaatsing in de X, Y en Z richting.
- De tussensteunpunten op 9,20 meter van elkaar belemmeren ook een verplaatsing in de X, Y en Z richting. Deze punten worden ondersteund door een houten ligger, deze ligger wordt geplaatst op grote sloffen uit natuursteen (zie Figuur 63). De sloffen steunen vervolgens op de tussenliggers. (afmetingen 70x30x30cm)



Figuur 63: steunpunt dakspant

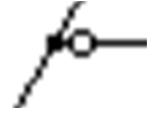

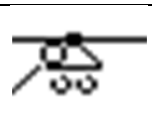
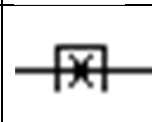
- Ter plaatse van het tussenschot is er ook een steunpunt, in het midden van de houten ligger. De houten ligger wordt ondersteund door een houten kolom die draagt naar de onderliggende tussenliggers (afdekking Gotische Zaal). Dit steunpunt belemmert een verplaatsing in verticale richting (de doorbuiging) door de houten balk onder dit steunpunt. De horizontale verplaatsing kan niet worden verhinderd.
- De verplaatsing in het vlak wordt verhinderd door de balken tussen de spanten, daarbij kunnen de spanten in het vlak niet kippen.
- Op een hoogte van 5,70 meter, tussen de schuine trekkers, zijn ook balken geplaatst. Deze balken hebben echter niet de functie om verticale krachten over te brengen, ze zorgen enkel om het kippen van de spanten tegen te gaan en verhinderen de verplaatsing in het vlak.
- De verbinding van de houten balken zijn scharnierend, ze kunnen geen momenten overdragen. Daarbij zijn de spanten de hoofdelementen en worden er scharnieren aangebracht aan de tussenelementen.

Op Figuur 64 is het spant te zien met de gebruikte steunpunten, opgesteld in Powerframe: Tabel 8: gebruikte symbolen powerframe geeft de gebruikte symbolen weer.



Figuur 64: dakspant powerframevoorstelling

Tabel 8: gebruikte symbolen powerframe

	Scharnierende knoop.		Belemmerde verplaatsing in de X, Y en Z – richting.
	Belemmerde verplaatsing in het vlak.		Belemmerde verplaatsing in het vlak, alsook verticaal.

6.2. Daklasten

De belastingen op het dak worden opgesplitst in twee belastingen. De permanente lasten, die het eigen gewicht van het dak vertegenwoordigen, en daarnaast ook de mobiele lasten (sneeuw- en windbelasting).

6.2.1. Vaste lasten

Voor het eigen gewicht van het dak dient een schatting te worden gemaakt van de gewichten van de gebruikte materialen. De precieze gegevens van de daksamenstelling zijn niet gekend. Maar door een goeie inschatting ter plaatse kan een vrij nauwkeurige belasting worden bepaald.

Het eigen gewicht van de spanten wordt verrekend in Powerframe zelf, dit is afhankelijk van de afmetingen van het spant en het eigen gewicht van hout. Er wordt gerekend met een eigen gewicht voor eikenhout van 700kg/m^3 .

De afdekking van de spanten gebeurt met houten planken. Bij schatting worden de planken 2cm dik genomen.

Bovenop deze planken worden tengellatten gemonteerd. Deze hebben een sectie van $2,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$. De tengellatten worden om de 45cm op de planken geplaatst.

Als voorlaatste worden de pannenlatten gemonteerd. Deze bestaan ook uit hout. Gebruikelijke maten voor pannenlatten zijn latjes van $3\text{cm} \times 3\text{cm}$, welke alle 30cm worden geplaatst.

De afdekking van het dak gebeurt met natuurleien. Natuurleien wegen 40kg/m^2 .

Tabel 9 geeft de schatting weer van de permanente daklast.

Tabel 9: schatting permanente daklastdak

Houten planken	$0,02\text{ m} \times 700\text{ kg/m}^3$	14 kg/m^2
Tengellatten	$(0,025\text{ m} \times 0,025\text{ m} / 0,45\text{ m}) \times 700\text{ kg/m}^3$	1 kg/m^2
Pannenlatten	$(0,03\text{ m} \times 0,03\text{ m} / 0,30\text{ m}) \times 700\text{ kg/m}^3$	$2,1\text{ kg/m}^2$
Natuurleien		40 kg/m^2
Totale daklast (per m²)		$57,1\text{ kg/m}^2$
Last per spant (alle 50cm)	$57,1\text{ kg/m}^2 \times 0,5\text{ m} = 28,6\text{ kg/m}$	

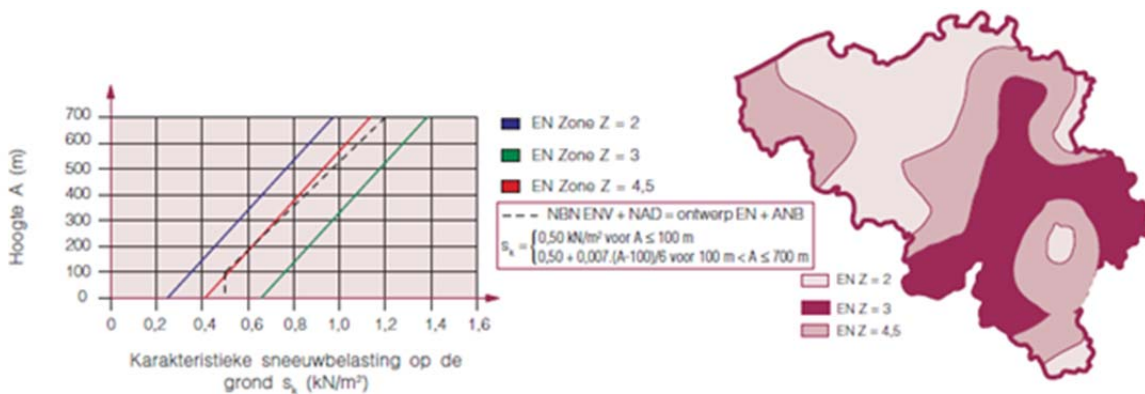
6.2.2. Mobiele lasten

De mobiele lasten op het dak worden opgesplitst in sneeuw –en windbelastingen. Voor het bepalen van deze lasten wordt gebruik gemaakt van de Eurocodes.

Sneeuwlast:

Voor de sneeuwbelasting dient er gebruik gemaakt te worden van de norm NBN EN 1991-1-3.

Hierbij geldt als eerste factor de plaats van het gelegen gebouw. Brugge ligt in ‘EN Zone Z = 2’. Daarbij is er een beperkte hoogte ten opzichte van het zeeniveau. De karakteristieke sneeuwbelasting (zie Figuur 65) op de grond, ‘sk’, is daarbij 0,30 kN/m².



Figuur 65: karakteristieke waarden voor sneeuwbelasting op de grond

Naast karakteristieke sneeuwbelasting is ook de helling van het dak bepalend voor de sneeuwlast op het dak. Daarbij is de vormcoëfficiënt μ afhankelijk van de dakhelling. In Tabel 10 is de coëfficiënt in functie van de dakhelling te zien.

Tabel 10: vormcoëfficiënt afhankelijk van de dakhelling

α (helling van het dak ten opzichte van de horizontale)	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \cdot (60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \cdot \alpha/30$	1,6	–

De totale sneeuwlast kan vervolgens berekend worden met:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

Daarbij is -s, de totale sneeuwlast;

- μ_i , de vormcoëfficiënt uit bovenstaande tabel;

- C_e , de blootstellingscoëfficiënt van de plaats aan wind, die de hoeveelheid sneeuw dat zich op het dak ophoopt beïnvloedt, onafhankelijk van de vorm ervan. De door de Eurocode voorgestelde waarde is begrepen tussen 0,8 en 1,2 naargelang van de topografie van de omgeving;

- C_t , de warmtecoëfficiënt van het dak, waarvan de waarde lager is dan of gelijk is aan 1, en afhangt van de temperatuur die heerst onder het dak en van zijn warmtedoorgangcoëfficiënt;

- s_k , de karakteristieke sneeuwbelasting op de grond.

In dit geval geldt $s_k = 0,30 \text{ kN/m}^2$. De vormcoëfficiënt μ_i , is gelijk aan 0,0, daar de helling van het dak gelijk is aan 60° . Daaruit blijkt dat de totale sneeuwlast voor het dak verwaarloosbaar is.

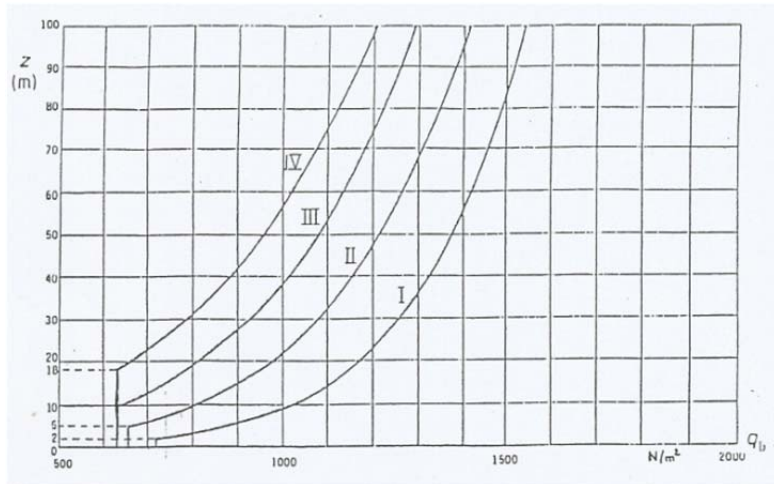
Windlast:

De windlast wordt uit de norm NBN EN 1991-1-4 gehaald, de windnorm. De grootte van de windbelasting is ondermeer afhankelijk van de plaats. Deze zijn opgesplitst in verschillende klassen:

- klasse 1: kustgebied;
- klasse 2: landelijk gebied met alleenstaande gebouwen;
- klasse 3: verstedelijkt gebied;
- klasse 4: verstedelijkt gebied met hoge bebouwing van minsten 10 meter.

De stad Brugge valt onder de klasse verstedelijkt gebied met middelhoge bebouwing. Dit gebied komt overeen met de windklasse 3. Uit de bijhorende tabel van de windnorm wordt de basiswinddruk (N/m^2) bepaald.

Het stadhuis is ongeveer 25 meter hoog. Uit de grafiek op Figuur 65 kan er worden afgeleid dat voor klasse 3 de basiswinddruk op het dak van het stadhuis ongeveer 850 N/m^2 is.



Figuur 66: grafiek basiswinddruk(q_b)

De karakteristieke winddruk wordt daarbij berekend op basis van de gevonden waarde voor q_b :

$$q_p = k_R^2 \times k_T^2 \times k_{\Theta}^2 \times q_b$$

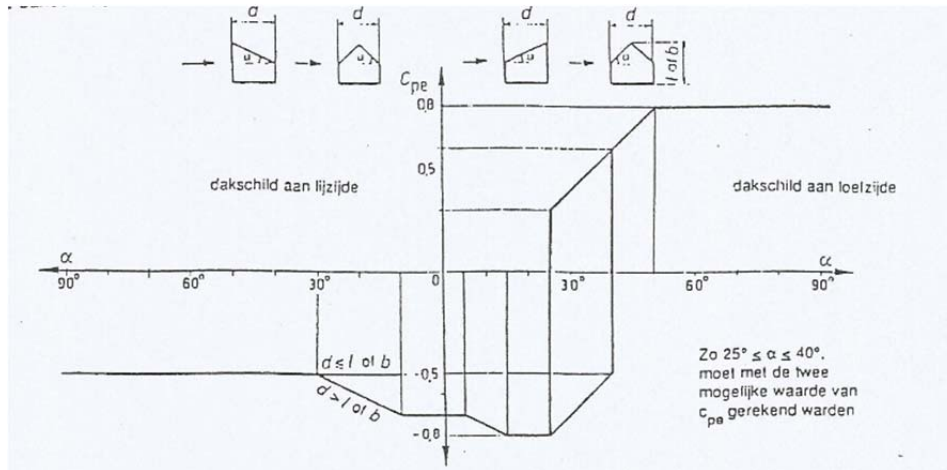
waarin :

- k_R de liggingsfactor is, die de invloed van het reliëf van het terrein uitdrukt. In dit geval is dit 1;
- k_T , een statische factor is die toelaat om een herhalingsstijd voor karakteristieke waarden verschillend van deze van 10 jaar in te rekenen. Hierin is $k_T = 1$;
- k_{Θ} , een verminderingsfactor is toe te passen wanneer de berekende winddruk maar voor één richting zou gelden (NBN B03-002-1 nr. 5.9). In het algemeen stelt men dat de windrichting willekeurig is en is $k_{\Theta} = 1$.

Zo wordt de karakteristieke winddruk voor het dak:

$$q_p = 1^2 \times 1^2 \times 1^2 \times 850 \text{ N/m}^2 = 850 \text{ N/m}^2.$$

Nu de waarde voor de karakteristieke winddruk bepaald is, kan de werkelijke winddruk op het dak bepaald worden. Deze is afhankelijk van de dakhelling. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de lij –en de loefzijde.



Figuur 67: C_{pe} waarden

Voor een dakhelling van 60° kan er worden gesteld dat de C_{pe} aan de loefzijde = 0,8 is. De coëfficiënt aan de lijzijde is -0,5. C_{pi} , de winddruk in het gebouw, kan gelijk gesteld worden aan 0 (zie Figuur 67).

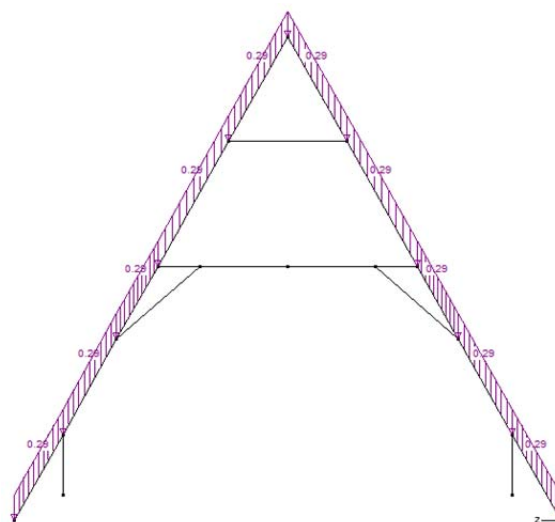
De totale winddruk aan de loef- en lijzijde vervolgens bepaald worden door:

$$q_{loefzijde} = 0,8 \times 850 \text{ N/m}^2 = 680 \text{ N/m}^2 = 340 \text{ N per spant (welke alle 50cm van elkaar staan);}$$

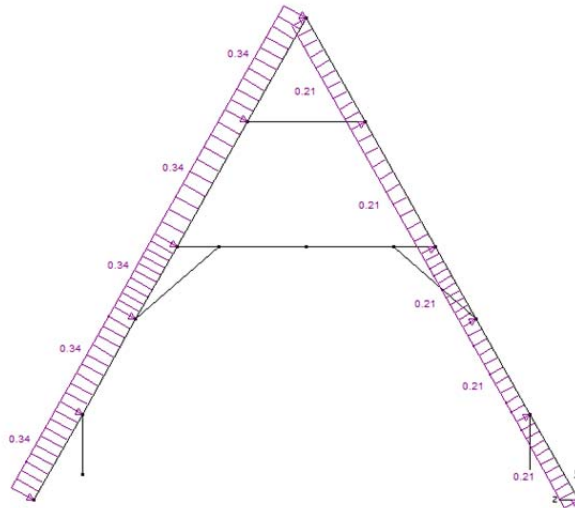
$$q_{lijzijde} = -0,5 \times 850 \text{ N/m}^2 = 425 \text{ N/m}^2 = 212,5 \text{ N per spant.}$$

6.2.3. Totale last

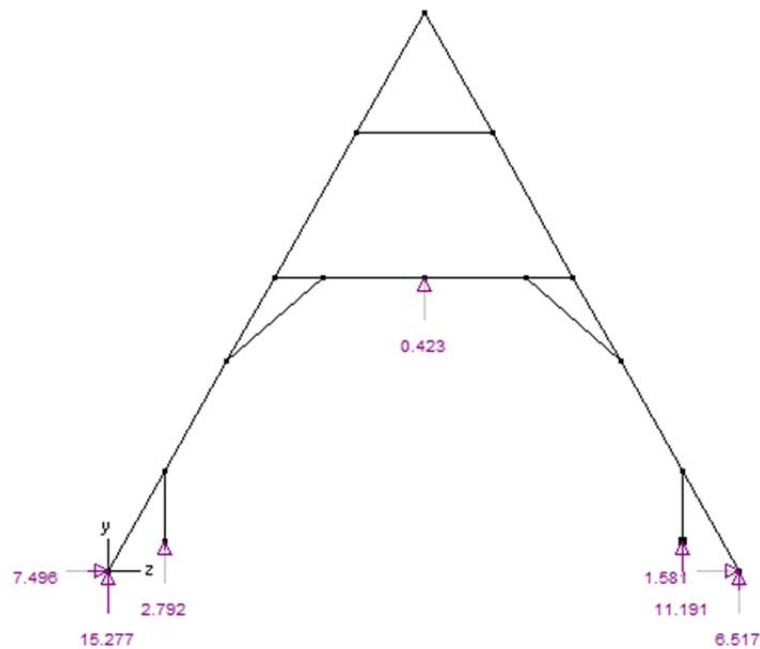
Na het invoeren van zowel de permanente (zie Figuur 68) als mobiele lasten (zie Figuur 69) in Powerframe worden de reactiekrachten berekend.



Figuur 68: permanente lasten dakspant



Figuur 69: mobiele lasten dakspant



Figuur 70: reactie krachten dakspant

De waarden van de reactiekrachten (zie Figuur 70) worden weergegeven in UGT_{max} en zijn per spant. Ook in ANSYS wordt gerekend in UGT. De bekomen spanningen in ANSYS kunnen dan vergeleken worden met de gekende maximale breukspanningen.

Voor het ANSYS –model dienen de krachten per spant niet gekend te zijn, maar wel de krachten die inwerken op de dragende structuur van het stadhuis.

De krachten van de twee buitenste steunpunten worden rechtstreeks op het metselwerk geplaatst. Daar de spanten 50 cm van elkaar staan, levert dit voor het linkse steunpunt (noordgevel) volgende reacties op:

- een drukkracht $F = 30,50 \text{ kN/m}$;
- een spatkracht $F = 15 \text{ kN/m}$.

Hetzelfde geldt voor het rechtersteunpunt (zuidgevel):

- een drukkracht $F = 13 \text{ kN/m}$;
- een spatkracht $F = 22,4 \text{ kN/m}$.

Deze lasten worden gespreid over een vooraf bepaalde oppervlakte in het latere ANSYS –model.

De twee steunpunten die zich op 9,20 meter van elkaar bevinden, worden niet zomaar op de gemetselde gewelven geplaatst. Deze reactiekrachten worden overgedragen naar de tussenliggers van de afdekking van de Gotische Zaal. Deze liggers liggen op een afstand van 4 meter naast elkaar. De lijnlasten worden overgedragen via grote houten balken met sectie 40cm x40cm (= 1,12 kN/m) naar sloffen in natuursteen. Deze sloffen uit hardsteen hebben als afmeting (30x30x70)cm met als eigengewicht 2650 kg/m^3 . Het eigengewicht van deze sloffen komt neer op 170 kg/slof.

Voor het linker steunpunt (noordkant) komt de reactiekracht per steunpunt dan op:

$(2,792 / \frac{1}{2}) \text{ kN/m} \times 4 \text{ m} =$	22,336 kN	(reactiekracht dak)
$1,12 \text{ kN/m} \times 4 \text{ m} =$	4,48 kN	(gewicht houten ligger)
	<u>1,7 kN</u>	<u>(gewicht slof)</u>
	28,50 kN	TOTAAL GEWICHT per steunpunt

Voor het rechter steunpunt (zuidkant) wordt de reactiekracht per steunpunt dan op:

$(1,58 / \frac{1}{2}) \text{ kN/m} \times 4 \text{ m} =$	12,65 kN	(reactiekracht dak)
$1,12 \text{ kN/m} \times 4 \text{ m} =$	4,48 kN	(gewicht houten ligger)
	<u>1,70 kN</u>	<u>(gewicht slof)</u>
	18,85 kN	TOTAAL GEWICHT per steunpunt

Als laatste reactiekracht van het dak wordt het middensteunpunt bekeken. Deze draagt met tussenbalken naar de 2 zijgevels. Deze reactiekracht bedraagt $0,85 \text{ kN/m}$. Wat overeenkomt met 11,35 kN per steunpunt.

6.3. Tussenvloeren

Om de krachtenwerking in de verschillende elementen van het stadhuis te voorspellen, dient er een gerichte schatting van alle massa's gemaakt te worden. Specifieke gegevens en informatie over de tussenvloeren zijn niet gekend. Een inschatting, uitgaande van eigen metingen en visuele inschattingen ter plaatse, kan tot een correcte weergave leiden van de lasten van de tussenvloeren.

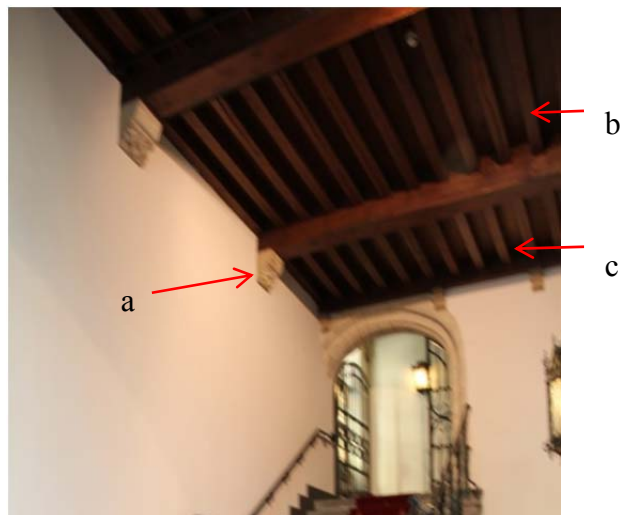
6.3.1. Tussenvloer gelijkvloers – eerste verdieping

Als eerste worden de lasten van de tussenvloer tussen het gelijkvloers en de Gotische Zaal bepaald. Daarbij wordt de tussenvloer in twee delen opgesplitst. Als eerste deel wordt de tussenvloer van de inkomhal bekeken (vloer 0.1), daarnaast wordt ook de tussenvloer boven de trap geanalyseerd (vloer 0.2). De samenstelling van deze vloeren is gelijk; de overspanlengte en draagrichting zijn echter verschillend.

De draagconstructie van de tussenvloer is te zien op onderstaande foto's (zie Figuur 71 en Figuur 72).



Figuur 71: tussenvloer 0.1



Figuur 72: tussenvloer 0.2

De draagconstructie bestaat uit volgende onderdelen:

- Houten moerbalken (sectie: 55x73 cm);
- Kinderbalken (12x16cm, alle 30 cm);
- Houten plankenvloer (dikte 3 cm, inschatting).

Als vloerbedekking van de Gotische Zaal wordt een tegelvloer gebruikt. Bij een inschatting van de gebruikte tegels wordt een tegeldikte van 3 cm vooropgesteld. Tussen de plankenvloer en de tegels kan er een chappe geplaatst worden. Metingen met het totaalstation bewijzen dat het vloerpakket van deze tussenvloer 30cm dik is. Deze afstand is bepaald zonder de moerbalken. Afgaande van de andere afmetingen blijkt dus dat er een chappe van 8cm dient aanwezig te zijn., wat een realistische dikte is.

Voor het inschatten van het gewicht worden volgende zaken aangenomen:

- Houten moerbalken (staan getekend in ANSYS, gewicht wordt daar verrekend)
- Kinderbalken: $((0,12 \times 0,16) / 0,30) \text{ m} \times 700 \text{ kg/m}^3 = 44,8 \text{ kg/m}^2$
- Houten planken: $0,03 \text{ m} \times 700 \text{ kg/m}^3 = 21 \text{ kg/m}^2$
- Chappe: $0,08 \text{ m} \times 1700 \text{ kg/m}^3 = 136 \text{ kg/m}^2$
- Tegelvloer: $0,03 \text{ m} \times 2700 \text{ kg/m}^2 = 81 \text{ kg/m}^2$

Volgens de Eurocode dient er met een mobiele overlast van 200 kg/m^2 gerekend te worden. Dit levert voor deze tussenvloer een totale last op van ‘ 282 kg/m^2 (vast) + 200 kg/m^2 (mobiel)’ of anders gezegd $(2,82+2) \text{ kN/m}^2$ waarmee gerekend zal worden voor de gehele tussenvloer van afdekking gelijkvloers.

De tussenvloer 0.1 draagt volgens de voor –en achtergevel. Dit over een lengte van 12 meter. De moerbalken worden in het midden ondersteund door kolommen in natuursteen. De onderlinge afstand tussen de moerbalken bedraagt 4,25 meter.

De totale lijnlasten in UGT op de moerbalken bedraagt dan:

$$(1,35 \times 2,82 + 1,50 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times (4,25 \text{ m}/2) \times 2 = 28,95 \text{ kN/m}$$

De breedte van een moerbalk is 0,55m. Zodat op de moerbalken een verdeelde last van $52,60 \text{ kN/m}^2$ komt te staan. Op de westgevel komt tussenvloer 0.1 met de helft op deze gevel. De voorziene opleg in het ANSYS –model is echter maar de helft zo groot, dus blijft de verdeelde last ook $52,60 \text{ kN/m}^2$.

Op Figuur 73 is de opleg van de moerbalken te zien. De effectieve krachtenwerking is hierin ongekend. De inschatting van de reactiekrachten op console en metselwerk zijn moeilijk te bepalen, zelfs met een rekensoftware. Daarbij wordt er in het gehele project van uitgegaan van eenzelfde situatie, namelijk de meest nadelige situatie voor het onderzoeken van het metselwerk. Er wordt

verondersteld dat de moerbalken volledig op het metselwerk liggen (met een opleg van 0,40 x 0,55m).



Figuur 73: opleg moerbalken vloer 0.1

Indien de tussenvloer 0.2 van naderbij wordt bekeken, is te zien dat daar dezelfde samenstelling wordt gehanteerd. De tussenafstand van de moerbalken zijn echter kleiner, deze bedragen 3,25 meter. De moerbalken dragen ook in de andere richting, namelijk van de oostgevel naar de tussenmuur. De lengte van de moerbalken varieert tussen de 5 en de 5,65 meter.

De totale lijnlasten op de moerbalken zijn daarbij:

$$(1,35 \times 2,82 + 1,50 \times 2) \text{ kN/m}^2 \times (3,25 \text{ m}/2) \times 2 = 22,12 \text{ kN/m}$$

Hierbij is de breedte van de balk terug 0,55m, wat terug een verdeelde last van 40,22 kN/m² oplevert.

Op Figuur 74 is de terug de opleg te zien. Het is een andere opleg dan van tussenvloer 0.1. Maar voor het model wordt eenzelfde opleg als vloer 0.1 aangehouden. Een opleg van 0,40 x 0,55m.



Figuur 74: opleg moerbalken vloer 0.2

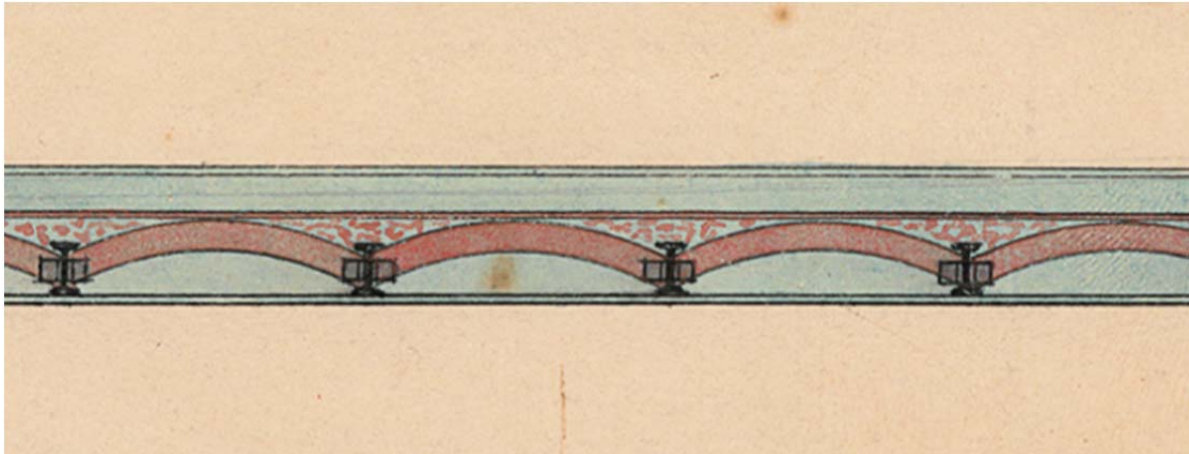
6.3.2. Tussenvloer eerste verdieping - zolder

De massa's van de verschillende onderdelen van de tussenvloer tussen de eerste verdieping en de zolder zijn heel wat moeilijker in te schatten dan voorgaande. Uit het historisch onderzoek blijkt dat deze vloer ook werd vervangen door Delacenserie.

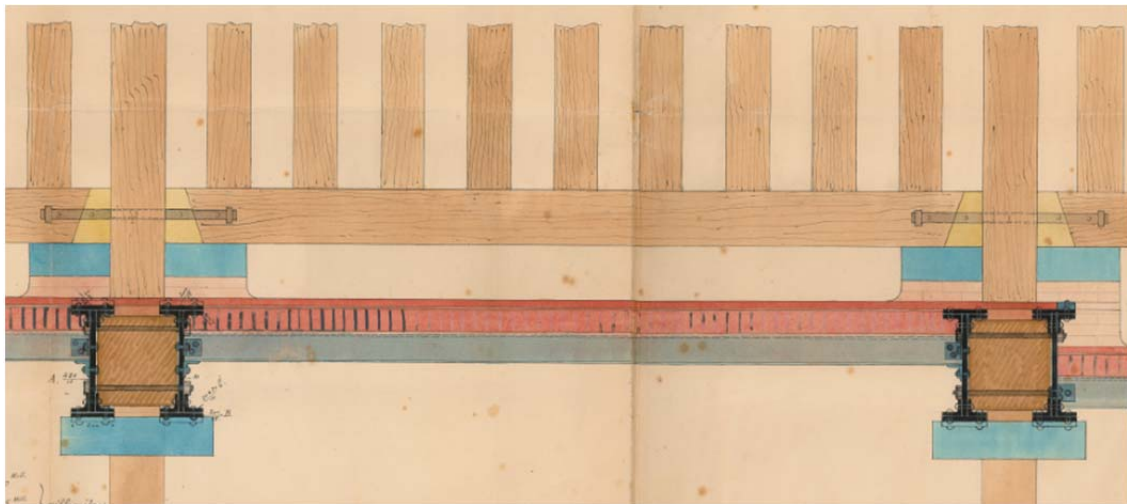
Visueel is op de zolder enkel een betonnen afdekking waarneembaar. Door de houten siergewelven die toegepast worden in de Gotische Zaal, is het ook niet mogelijk om hoogtes en diktes te meten met een totaalstation. Er kan enkel gebruik gemaakt worden van foto's en geschetste plannen van Delacenserie (zie Figuur 75, Figuur 76, Figuur 77 en Figuur 78).



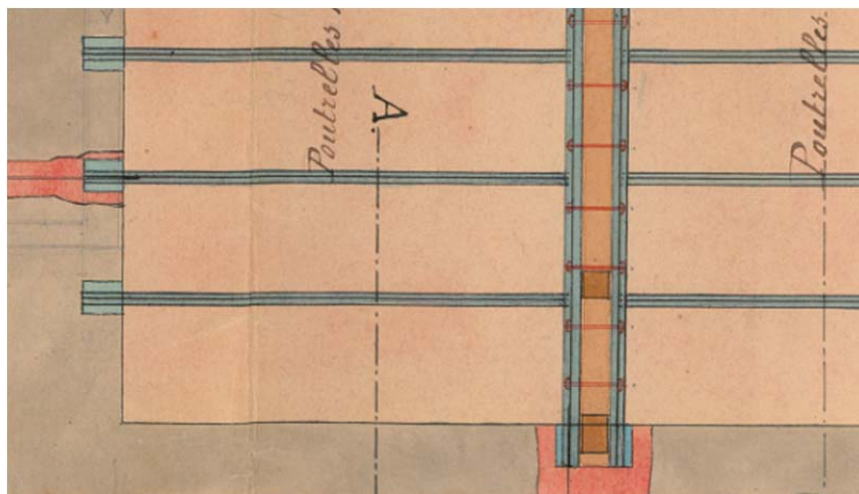
Figuur 75: onderkant gemetselde booggewelven tussenvloer 1^{ste} verdieping –zolder



Figuur 76: dwarsnede tussenvloer 1^{ste} verdieping - zolder



Figuur 77: langsnede tussenvloer tussenvloer 1^{ste} verdieping-zolder



Figuur 78 bovenaanzicht tussenvloer 1^{ste} verdieping-zolder

De tussenvloer is opgebouwd uit een staal - beton vloer. Op de eerste schets (Figuur 76) zijn de gemetselde booggewelven te zien met daarop de een druklaag gestort in beton.

De gemetselde gewelven dragen naar stalen liggertjes die evenwijdig met de voorgevel liggen. Deze I-profielen zijn ook te zien op Figuur 76. Op Figuur 77 is te zien hoe de stalen liggertjes toekomen op de hoofdliggers die loodrecht op de voorgevel staan. Deze liggers bestaan uit 2 I-profielen die aan elkaar zijn vast gebout. Deze I-profielen (5 stuks) dragen van de voorgevel naar de achtergevel met een tussenafstand van 4 meter.

Er kan gesteld worden dat de gemetselde booggewelven 12cm dik zijn. Voor de betonnen druklaag wordt een gemiddelde van 10 cm beton in acht genomen. Dit levert volgende gewichten op:

- 12 cm booggewelven : $0,12 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 216 \text{ kg/m}^2$
- Druklaag beton: $0,10 \text{ m} \times 2500 \text{ kg/m}^3 = 250 \text{ kg/m}^2$

Hier dient men volgens de Eurocode ook met een mobiele overlast van 200 kg/m^2 te rekenen. Dit levert een totaal gewicht van $(4,66+2) \text{ kN/m}^2$ op.

In ANSYS worden de 2 I-profielen theoretisch voorgesteld door middel van houten balken met een sectie van $60 \times 60 \text{ cm}$. Deze liggen allemaal 4 meter van elkaar, wat resulteert in een lijnlast van $37,15 \text{ kN/m}$. Als deze verspreid wordt over de breedte van de balk van 60 cm , levert dit een verdeelde last van $61,95 \text{ kN/m}^2$ op per ligger. De oplegging wordt hier ook theoretisch voorgesteld door een opleg van 40 cm op met metselwerk zoals bij de tussenvloer van afdekking gelijkvloers.

6.4. Krachtenwerking overbrugging naar Burgerlijke Griffie

Een mogelijk belangrijke oorzaak voor de scheurvorming is de krachtenwerking van de booggewelven afkomstig van de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie toe (zie Figuur 79 en Figuur 80). Dat werd in de 16e eeuw tegen het stadhuis aangebouwd. De gebruikte kruisribgewelven werden in de oostgevel van het stadhuis ingekapt, zodat de oostgevel deze belastingen dient op te vangen.



Figuur 79: Burgelijke Griffie foto voorkant

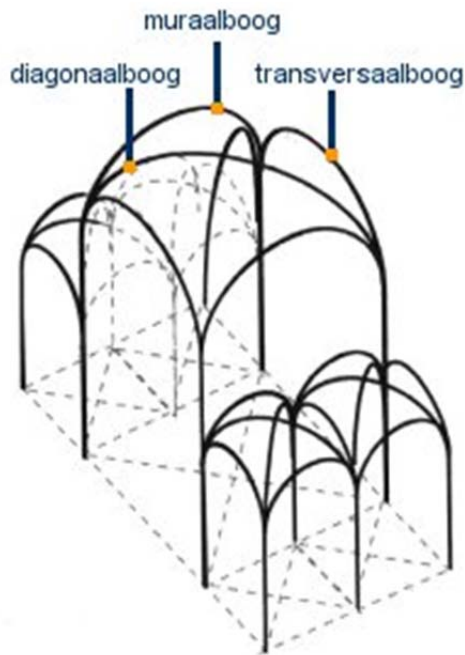


Figuur 80: Burgelijke Griffie, foto achterkant

6.4.1. Gewelfwerking afdekking Blinde Ezelstraat

De overwelving van de Burgerlijke Griffie gebeurt met kruisribgewelven, weliswaar met enkele verstevingen. Voor het bepalen van de krachtenwerking werden deze gewelven voorgesteld als gewone kruisgewelven.

Gemetselde gewelven werden vaak gebruikt in de Gotische tijd. Men kan het onderscheid maken tussen vier –en zesdelige kruisribgewelven. De situatie van de Burgerlijke Griffie leunt het dichtst aan bij de vierdelige kruisribgewelven (zie Figuur 81).



Figuur 81: voorstelling gewelf Burgelijke Griffie

- De muraalboog is een gordelboog die tegen de muur is geplaatst en daardoor onderdeel uitmaakt van de muur;
- Transversaalboog is de boog over de Blinde Ezelstraat. Deze staat dus logischerwijs transversaal op de oostgevel van het stadhuis;
- 2 diagonaalbogen zijn de graten van het kruisgewelf. Dit zijn de dragende lijnen van het gewelf. Daarop komt alle belastingen;
- De tiercerons zijn direct verbonden met het punt waar het gewelf op rust, meestal een zuil of kolom. Dat maakt geen onderdeel uit van de hoofdconstructie, die bestaat uit de gordelboog, de muraalboog en de diagonaalboog.

De ribben bestaan uit natuurstenen tegen de onderzijde van het gewelf. Het gewelfrib begint op een console of in de muur zelf. Boven in het gewelf eindigen de ribben in een sluitsteen of een gewelfsleutel. De precieze krachtverdeling is zoals bij de tussenvloeren moeilijk te voorspellen en wordt daardoor vereenvoudigd berekend.

De reactiekrachten van de gewelven worden berekend in Powerframe. De hoofdribben van het kruisgewelf worden ingevoerd in Powerframe. Op deze hoofdribben worden de belastingen geplaatst, waaruit uiteindelijk de reactiekrachten in de eindpunten kan bepaald worden.

De vaste en mobiele lasten van het gewelf worden van elkaar onderscheiden. Voor de mobiele lasten wordt ook hier gerekend volgens de Eurocode (2kN/m^2). Voor de vaste lasten wordt weer een

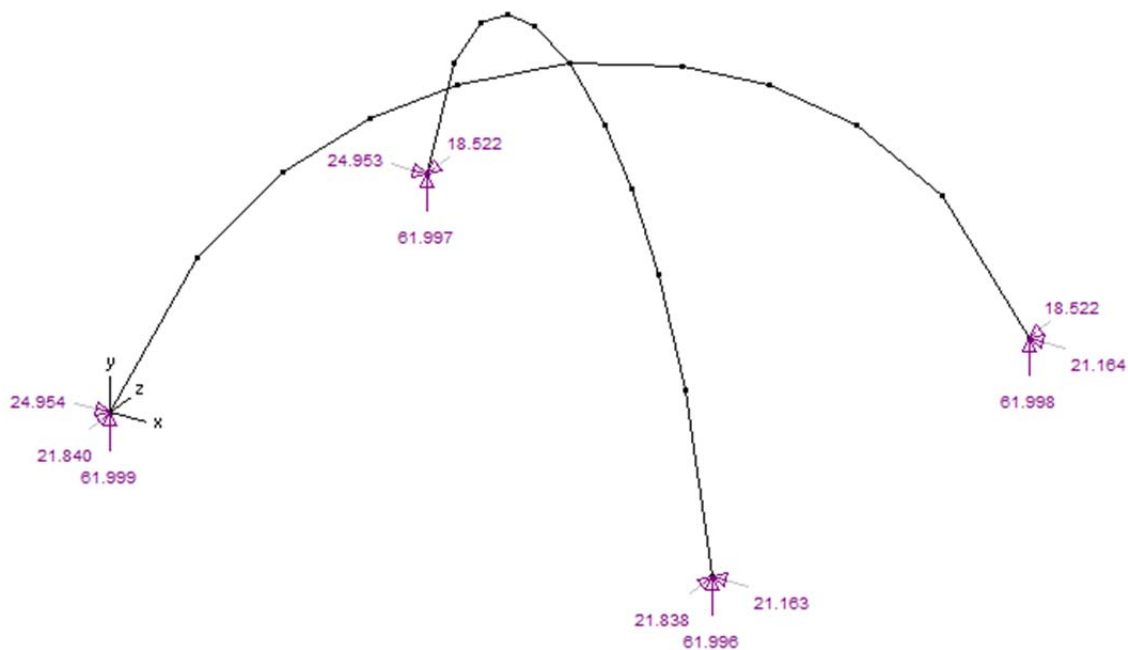
schatting gemaakt, omdat er geen informatie beschikbaar is over deze overbrugging. Er wordt verondersteld dat het gewelf helemaal is opgemetsd met bakstenen tot een effen vloeroppervlakte.

Het volume van de halve bol onder het gewelf ($16,15\text{m}^3$) wordt afgetrokken van de balkvorm die het gewelf in beslag neemt ($4\text{m} \times 3,5\text{m} \times 1,75\text{m}$), zo wordt $8,35\text{ m}^3$ metselwerk bekomen. Dit wordt gelijkmatig verdeeld over het gewelfoppervlakte van 14m^2 . Dit levert een verdeelde last van $0,60\text{m}^3$ metselwerk per m^2 op. Het soortelijk gewicht van metselwerk bedraagt $1800\text{kg}/\text{m}^3$, zodat de het totale eigengewicht $10,8\text{kN}/\text{m}^2$ bedraagt.

Vaste + mobiele lasten samen levert dit $(10,8+2)\text{ kN}/\text{m}^2$ op. Dit levert in UGT een totale last van $17,60\text{ kN}$. De diagonaalribben zijn de dragende structuur van het gewelf. Wanneer de lasten over deze 2 ribben wordt verdeeld levert dit volgende lijnlast:

- $17,60\text{ kN}/\text{m}^2 \times 3,5\text{m} \times 4\text{m} = 179,2\text{ kN}$ totale last gewelf;
- $246,4\text{ kN} / 10,6\text{m} = 23,26\text{ kN}/\text{m}$ lijnlast op hoofddiagonaal.

Waarbij $10,6\text{m}$ de som is van de lengten van de hoofddiagonalen. Deze lasten worden op de ribben geplaatst. Daarbij worden de resultaten op Figuur 82 bekomen voor deze boogwerking.



Figuur 82: reactiekrachten gewelf burgelijke griffie

Het resultaat is een reactiekracht per steunpunt in UGT, die kan worden ontleed in X, Y en Z richting:

1. een verticale kracht van 62 kN in het vlak van de gevel;
2. een kracht loodrecht op het vlak de gevel van 21,2 kN;
3. een horizontale kracht in het vlak van de gevel van 21,85 kN.

De reactiekrachten in het vlak van de gevel (3) zijn tegengesteld aan elkaar. Doordat er twee kruisribgewelven naast elkaar aanwezig zijn, heffen deze krachten (3) elkaar op in het middenpunt. De twee andere reactiekrachten (1) en (2) zijn dubbel zo groot in het middelste contactpunt.

6.4.2 Gewelfwerking afdekking keuken

Naast de afdekking van de Blinde Ezelstraat is de afdekking van de bovenliggende keuken ook gerealiseerd met behulp van kruisribgewelven. Wegens geen verdere documentatie hierover en de beperkte mogelijkheid tot visuele inspectie, worden deze gewelven op dezelfde manier gedimensioneerd als de gewelven van de afdekking van de Blinde Ezelstraat. De enige visuele inspectie die kon gebeuren zijn de foto's genomen in de keuken van de Burgerlijke Griffie zelf (zie Figuur 83, Figuur 84 en Figuur 85).



Figuur 83: kruisgewelf (afdekking keuken van de Burgerlijke Griffie)



Figuur 84: opleg middelpunt kruisgewelf (keuken)



Figuur 85: opleg middelpunt kruisgewelf (keuken)

6.4.3 Voor –en achtergevel Burgerlijke Griffie

Als derde en laatste krachtenwerking van de overbrugging geldt de belasting van de voor- en achtergevel van de Burgerlijke Griffie (zie Figuur 86). Deze heeft ook grote invloed op de krachtenwerking in de oostgevel. Volgende gegevens over de gevels zijn konden worden opgemeten:

- de dikte van deze gevels bedraagt 75cm;
- totale hoogte overbrugging in hoogste punt: 8,55 meter;
- hoogte overbrugging tegen de muur: 7 meter;
- breedte van de overbrugging : 4 meter;
- oppervlakte raam: 2,50m x 2,75m = 6,875 meter.



Figuur 86: Burgelijke griffie, foto achterkant

Er wordt verondersteld dat de spreiding van het metselwerk zal verlopen tot aan de boog. Voor de berekeningen is het vooral interessant een inschatting te maken van de grootte van de reactiekrachten in de gevel. Het is dus zeker aanvaardbaar om te stellen dat de totale belastingen op de gevel een gelijkmatige verdeelde lijnlast is over de gehele boog.

totale Oppervlakte van de gevel:	31,1 m ²
<u>- oppervlakte raam:</u>	<u>- 6,875 m²</u>
totale oppervlakte:	24,25m ²

Met een dikte van 75cm en een soortelijk gewicht van 1800 kg/m³, levert dit een totaal eigengewicht op 327,4 kN op voor de totale voor –en achtergevel. Dit wordt verdeeld over een afstand van 4 meter, wat een lijnlast oplevert van 81,85 kN/m.

Het dak van de Burgerlijke Griffie is een zadeldak dat draagt van de voorgevel naar de achtergevel. De topgevels zijn te zien op de foto's van de Burgerlijke Griffie zelf. De belasting van het dak is verwaarloosbaar in vergelijking met de krachten van de booggewelven en gevels, en worden aldus niet verder in rekening gebracht bij de verdere berekeningen.

De boogwerking, met belasting zoals net bepaald, wordt via Powerframe ingegeven. De resultaten worden in UGT weergegeven (zie Figuur 87).



Figuur 87: boogwerking zijgevels burgerlijke griffie

Er wordt zowel voor de voor –als achtergevel een normaalkracht van 290,60 kN bekomen. De dwarskracht loodrecht op de gevel bedraagt 258,10 kN per steunpunt.

6.5. Conclusie krachtenwerking in het stadhuis

Na analyse van de krachtenwerking in het stadhuis kan er besloten worden dat volgende elementen inwerken op het metselwerk van het stadhuis:

- het dak van het stadhuis;
- houten tussenvloer tussen gelijkvloers en 1^{ste} verdieping;
- gemetselde gewelven van de tussenvloer tussen 1^{ste} verdieping (Gotische Zaal) en zolder;
- de krachtenwerking van de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie (voor –en achtergevel alsook de kruisgewelven).

Van deze vier krachtwerkingen is het dak in mindere mate bepalend. De krachtwerking van de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie lijkt in het eerste opzicht het meest bepalend, daar dit ook de grootste reactiekrachten zijn. Ook de houten tussenvloer van de afdekking gelijkvloers steunt voor een deel (aan de trapkant) op de oostgevel. Een gedeelte van de belastingen werd bepaald door metingen en plannen van Delacenserie. Een ander deel werd bepaald door weloverwogen inschattingen en veronderstellingen. Daarmee wordt een aanvaardbare lastendaling bekomen die ertoe moet helpen om de spanningen in de gevel te definiëren.

7. 3D – Model

7.1. Algemeen

Het 3D -model wordt getekend in Autocad. Dit met de gedachte dat het 3D-Model later in ANSYS zal worden ingeladen, dient er rekening gehouden te worden met de complexiteit van het model. Het model dient zo eenvoudig mogelijk worden opgesteld, maar met voldoende nauwkeurigheid.

Een belangrijke eerste beslissing in het modelleren is de graad van vereenvoudiging vast te leggen. Het stadhuis is een gebouw dat uit metselwerk is opgetrokken, afgewerkt met veel decoratie. Dit is moeilijk te modelleren in een EE-model en het draagt niet bij tot de accuraatheid van de berekeningen. Het doel is om te zoeken welke delen van het gebouw deelnemen in de structurele werking.

Volgende elementen dragen bij tot de structurele werking en worden in het model gedefinieerd:

- het gevelmetselwerk;
- de kolommen op het gelijkvloers;
- de topgevels;
- de gemetselde daktorentjes;
- de kantelen;
- de vereenvoudigde tussenvloeren.

Volgende elementen dragen niet bij tot de structurele werking en worden niet in het model opgenomen:

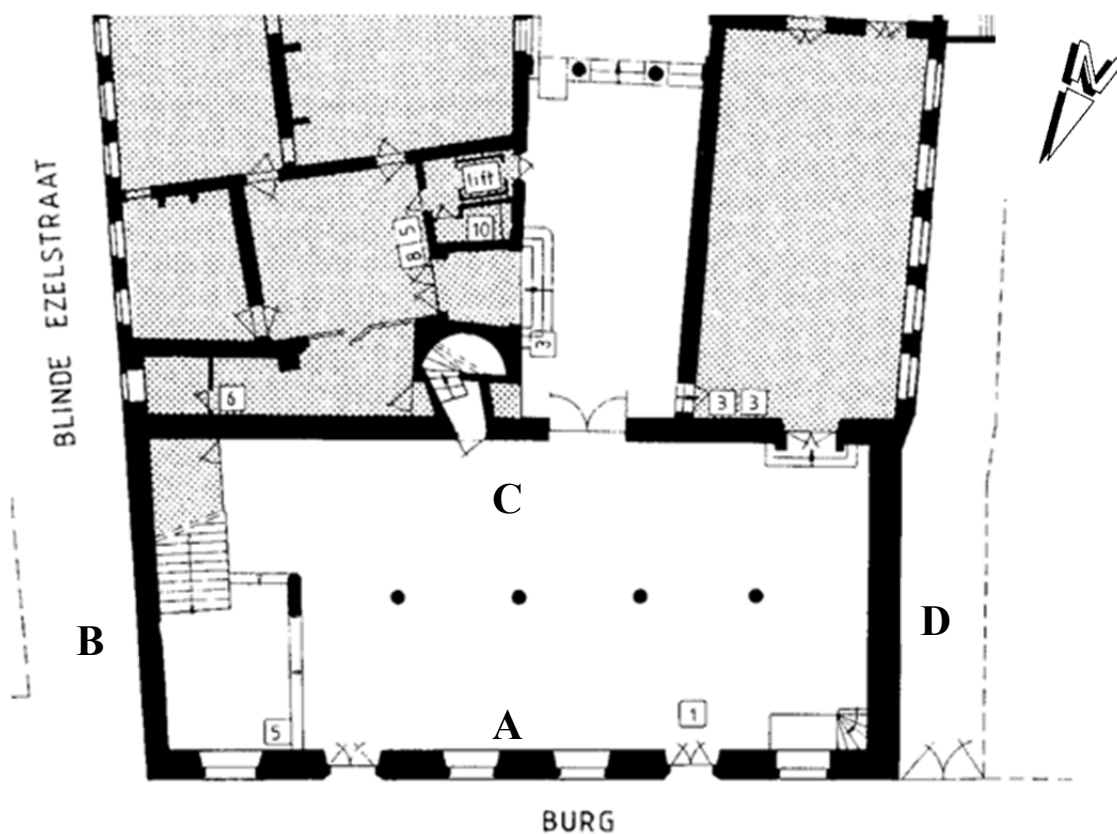
- de houten gewelven in de Gotische Zaal;
- de sierschouw in de Gotische Zaal aan de westgevel;
- de stenen sierbeelden aan de voorgevel;
- hoekjes en kantjes van de openingen worden vereenvoudigd tot de vorm waarmee het deelneemt aan de structurele werking.

De gehele dakconstructie wordt uiteraard wel meegenomen in de berekeningen. De krachtenwerking ervan wordt echter met de hand en met behulp van elementensoftware Powerframe uitgewerkt. De resultaten van deze berekeningen worden later in het ANSYS-model op het metselwerk ingevoerd als uitwendige krachten. (zie hoofdstuk 9: Verwerking in ANSYS)

7.2. Gevels

De start van het 3D-model begint bij de gevels. Wegens de lage nauwkeurigheidsgraad van de beschikbare plannen, diende er voor het opstellen van het 3D –model een opmeting ter plaatse gebeuren. Het hele gebouw wordt met de nodige nauwkeurigheid opgemeten met behulp van een distometer, zodat het latere 3d-model een goede weerspiegeling is van het werkelijke stadhuis. Naast de opmeting van het stadhuis werd in een later stadium de oostgevel gedetailleerd opgemeten met een totaalstation, dit om de scheurvorming in kaart te brengen.

Op Figuur 88 is het beschikbare grondplan van het gelijkvloers te zien. Dezelfde plannen zijn beschikbaar voor zowel de eerste verdieping, de zolder en de kelder. De plannen zijn enkel schetsen en worden enkel gebruikt als leidraad en geheugensteun tijdens de opmeting en bij de verwerking van de resultaten.



Figuur 88: schets gelijkvloer stadhuis

In Tabel 11 zijn de hoofdafmetingen te vinden die bepaald zijn met zowel de distometer en/of het totaalstation. Deze afmetingen werden aangehouden voor het opstellen van het 3D –model en de daarbij horende berekeningen in ANSYS.

Daarbij is:

A = noordgevel

B = oostgevel

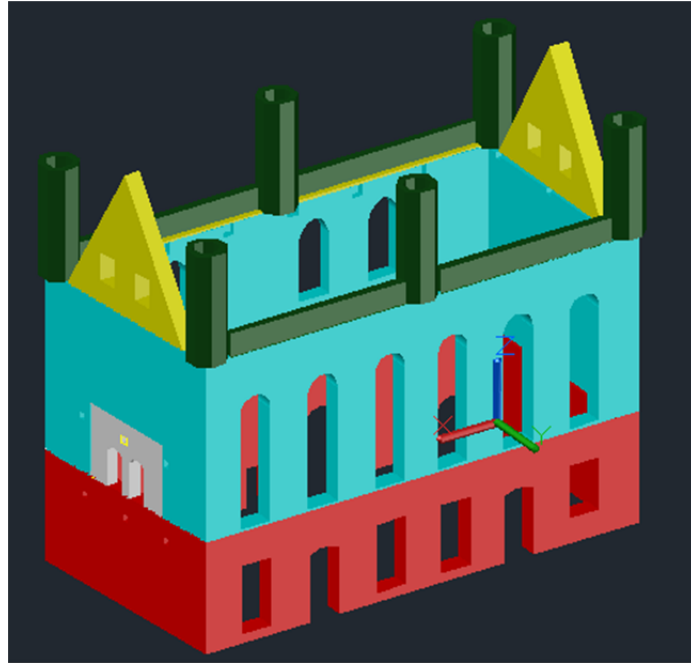
C = zuidgevel

D = westgevel

Tabel 11 hoofdafmetingen stadhuis

	Lengte (cm)	Breedte (cm)
A	2670	113
B	1332	90
C	2790	90
D	1325	113
Hoek tussen A en B: 6°		
	Hoogte (cm)	
H_{Gelijkvloers}	650	
H_{Gotische Zaal}	1045	
H_{Zolder}	760	
Dakhelling = 60°		
Kantelen (gemiddeld): 135cm x 50cm		
Torentjes: Regelmatige achthoek (muurdikte 40cm) – zijde 87cm, hoogte 650cm.		
Afstand tussen kolomen : 425cm		

Figuur 89 geeft een totaalbeeld weer van het Autocad 3D-model, na het uittekenen van de gevels met de bijhorende raamopeningen.



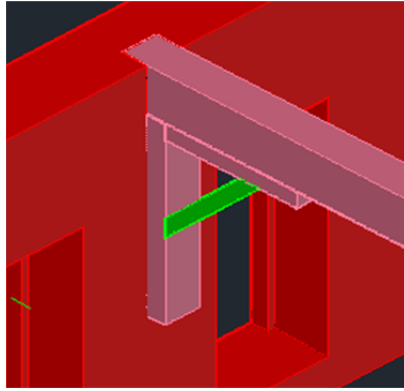
Figuur 89: gevels noord-oostzicht

7.3. Tussenvloeren

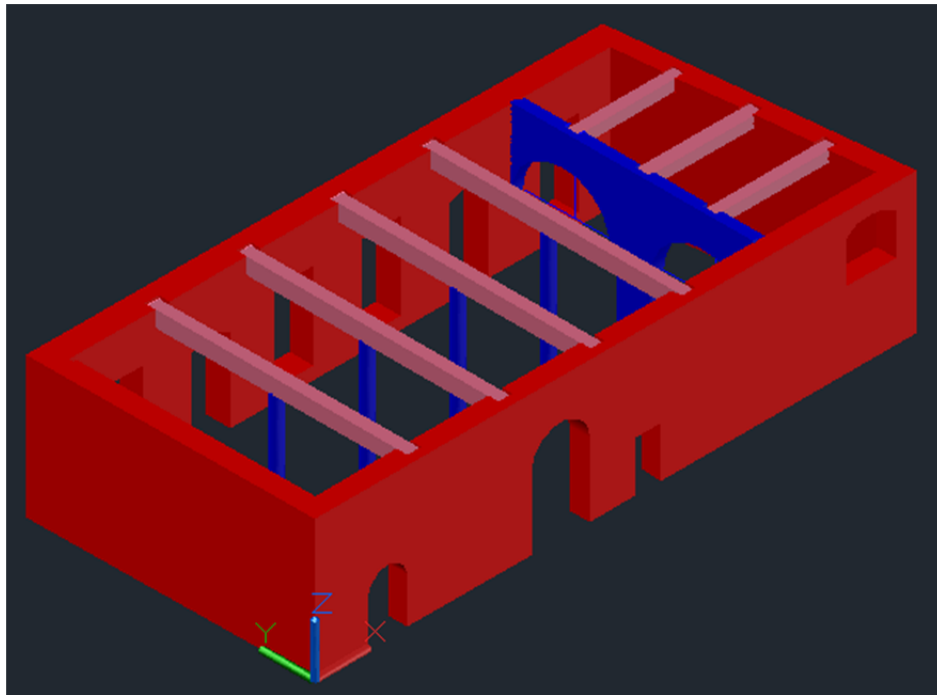
Naast de gevels zijn de tussenvloeren van groot belang voor het voeren van het stabiliteitsonderzoek. De complexiteit van de tussenvloeren kunnen tijdens de berekening in ANSYS een probleem geven. Eerst werden de tussenvloeren getekend zoals ze in werkelijk zijn, maar later werden deze vereenvoudigd omdat er door die complexiteit spanningen berekend worden die er in werkelijkheid niet zijn.

7.3.1. Tussenvloer gelijkvloers – Gotische Zaal

Voor de tussenvloer boven het gelijkvloers wordt gebruik gemaakt moerbalken en korbelen. De korbelen zijn op Figuur 90 in het groen aangeduid. De werking van deze korbelen zijn echter moeilijk te simuleren in ANSYS en de daarbijhorende krachtenwerking is moeilijk te voorspellen. De oplegging wordt daarom vereenvoudigd tot enkel een moerbalk, die op het metselwerk is gelegen (zie Figuur 90). Dit is de meest nadelige situatie (alle belastingen van de tussenvloer komt op 1 kleine oppervlakte).



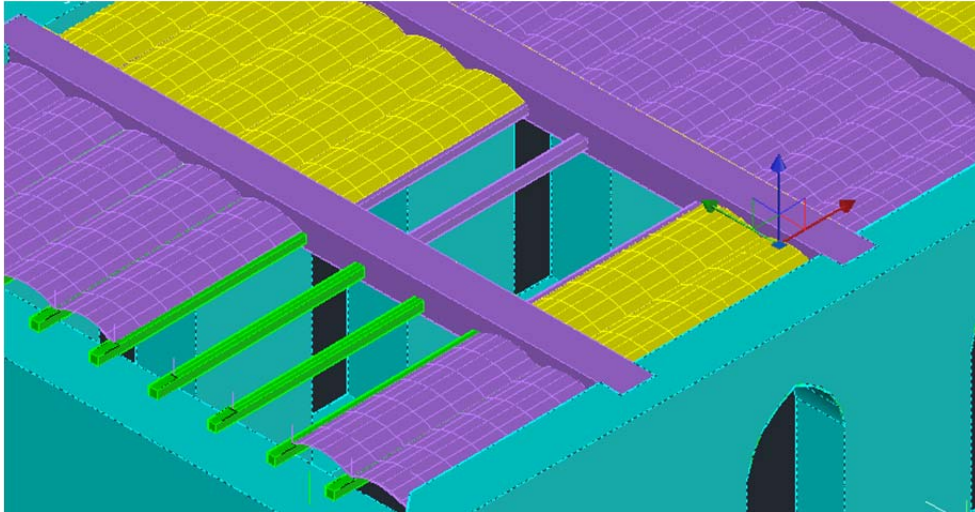
Figuur 90: tussenvloer gelijkvloers – Gotische Zaal - werkelijkheid



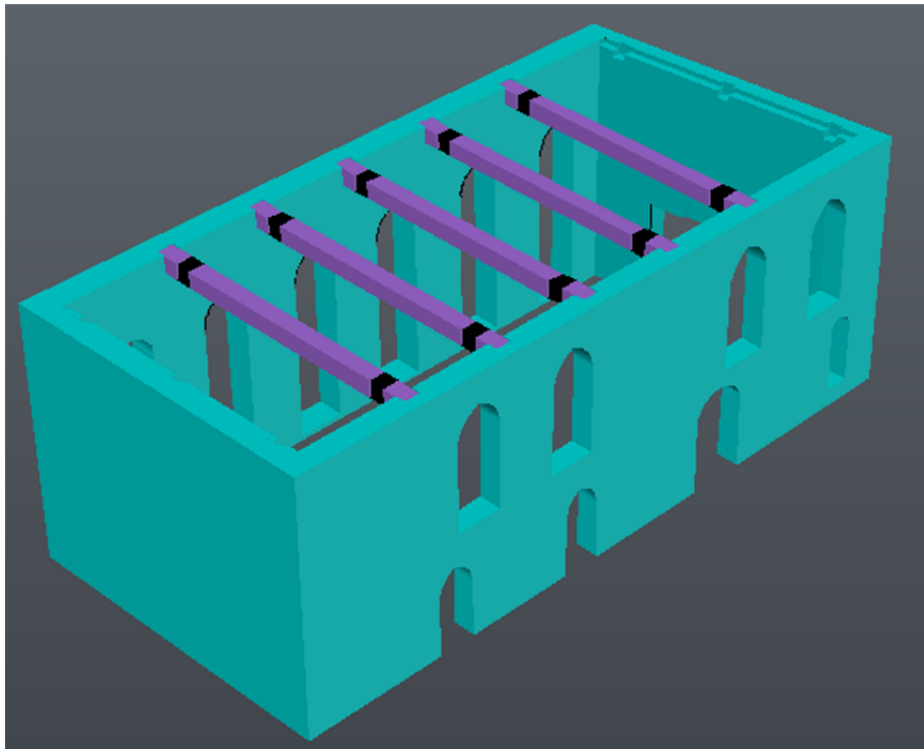
Figuur 91: tussenvloer gelijkvloers - Gotische Zaal – schematisch

7.3.2. Tussenvloer Gotische Zaal - zolder

Dezelfde situatie geldt voor de boven de Gotische Zaal. In eerste instantie werd de tussenvloer gedefinieerd door gemetselde booggewelven, die dragen naar kinderbalken. Deze kinderbalken zouden vervolgens naar de moerbalken dragen die alle belastingen op het gevelmetselwerk overdragen (zie Figuur 92). Daar in dit onderzoek de spanningen in het metselwerk van belang zijn en niet de spanningen in de tussenvloeren, kan ook deze vloer vereenvoudigd worden door enkel de moerbalken te tekenen (zie Figuur 93). In ANSYS wordt de belasting van de volledige tussenvloer verspreid over de verschillende moerbalken.



Figuur 92: tussenvloer Gotische Zaal – zolder - werkelijkheid



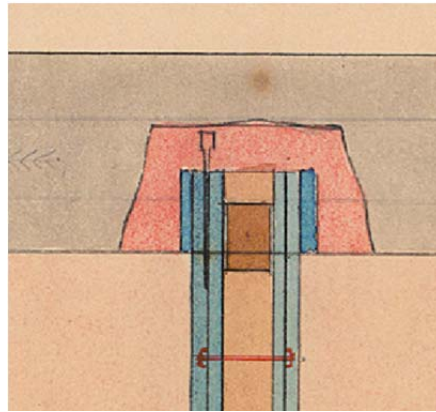
Figuur 93: tussenvloer Gotische Zaal - zolder – schematisch

Wat heel belangrijk is tijdens het tekenen van het 3D-model, is dat er geen elementen elkaar snijden. Indien het ene element het andere snijdt, wat in werkelijkheid niet kan, zal ANSYS een foutmelding geven, ook al gaat het om een heel miniem oppervlakte. Het is beter dit te voorkomen en voldoende aandacht en nauwkeurigheid te geven bij het ontwerpen van de het 3D –model.

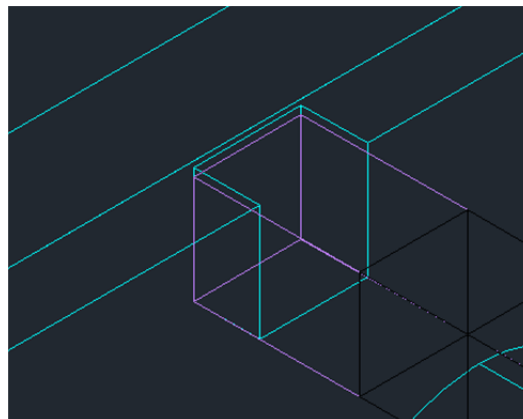
Dat is vooral belangrijk bij het tekenen van de opleggingen van de moerbalken. Wat betreft de opleggingen is uit de werkelijkheid weinig geweten. Zoals gezegd wordt vanuit de meest nadelige situatie afgegaan, deze situatie is wanneer de balk volledig op het metselwerk draagt. Voor zowel het

gelijkvloers als voor de eerste verdieping wordt met een opleg van 40cm getekend in het 3D –model (zie Figuur 94 en Figuur 95).

Beide tussenvloeren werden geplaatst tijdens de verbouwingen van Delacenserie. De moerbalken werden ingekapt, en afgaand van de schetsen uit die tijd, werd het overige volume rond de houten balken terug volgestort.



Figuur 94: geschetste situatie Delacenserie



Figuur 95: 3D -model (opleg 40x65cm)

7.4. Opmerkingen

Het 3D –model kan niet worden opgesteld zonder vooraf te weten wat er zal berekend worden. Indien dit nog niet zou gekend zijn, zullen er later nog vele aanpassingen dienen te gebeuren. Deze aanpassingen kunnen best vanaf het begin vermeden worden, daar deze aanpassingen voor meer onnauwkeurigheden of fouten kunnen zorgen. Soms kan het uiteraard ook niet anders, daar er in het latere stadium van het onderzoek andere facetten kunnen optreden.

In dit onderzoek was vooraf geweten dat het over een structureel onderzoek zou gaan. ANSYS heeft de beperking dat het geen puntlast kan laten aangrijpen op een willekeurig punt op een vlak of lijnstuk. De last dient te worden geplaatst als een normaal verdeelde last, verdeeld over de beschikbare

oppervlakte (F/A). Er moeten dus overall deelvlakken gedefinieerd worden. Deze deelvlakken zijn nodig op volgende aangrijpingspunten:

- waar het dak aangrijpt op de gevels;
- waar de tussenvloeren deels steunen op topgevels (evenwijdig met de moerbalken);
- waar de overbrugging van de Burgerlijke Griffie aangrijpt op de oostgevel;
- waar de dakspanten aangrijpen op de moerbalken van de tweede verdieping.

De plaatsen van de oplegpunten van de overbrugging van de Burgerlijke Griffie zijn bepaald door de opmeting met het totaalstation. Deze punten worden aangebracht op het 3D –model. Op deze punten grijpen zowel normaal –als dwarskrachten aan. Op ieder punt wordt een uitsparing van 40 x 40 x 40 cm voorzien in de oostgevel, waar op het gepaste vlak de puntlasten kunnen aangrijpen.



Figuur 96: oplegpunten overbrugging Burgerlijke Griffie

Naast een structurele analyse wordt ook rekening gehouden met de thermische analyse. Deze wordt later besproken in het ANSYS –model. In het 3D –model moet wel al rekening worden gehouden met deze thermische belasting. De omgevingstemperaturen kunnen maar per vlak worden gedefinieerd. Er dient dus rekening gehouden te worden welke vlakken andere temperaturen zullen hebben. Zo zal aan de oostgevel, waar de keuken zich bevindt, de temperatuur hoger zijn dan naast de keuken, daar de keuken onderheven is aan een binnentemperatuur, en de rest van de gevel aan de buitenomgeving.

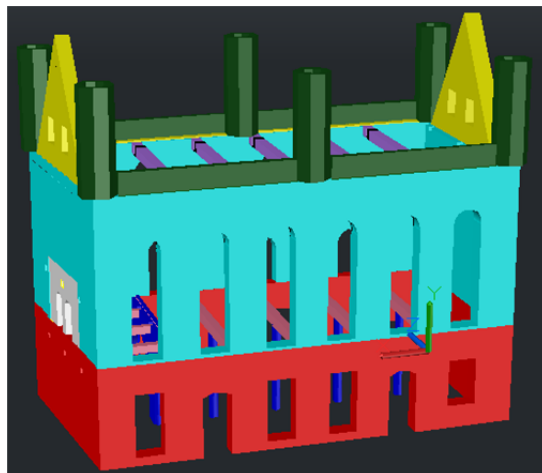
Daarvoor dient in het 3D –model deze vlakken apart te worden getekend, zoals aangegeven in Figuur 96 (vlak in het wit is de keuken).

8. Handberekingen

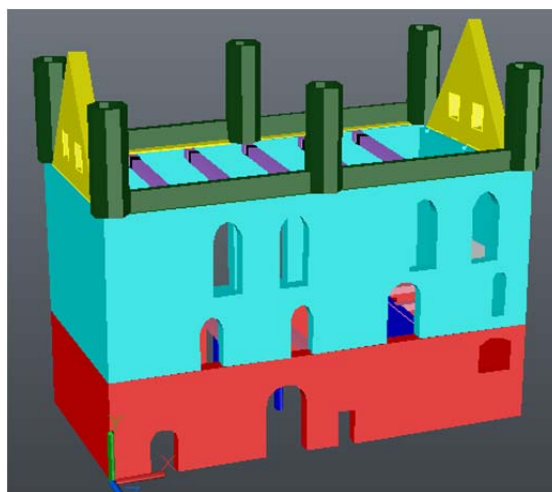
Voordat het model wordt gegenereerd in ANSYS worden de normaalspanningen met de hand berekend. Deze worden berekend op bepaalde plaatsen in de gevels. Dit is nodig voor het maken van een eerste inschatting, zodat later de spanningen in het ANSYS-model kunnen vergeleken worden met deze berekende waarden. Deze spanningen dienen representatief te zijn met de werkelijkheid. Er worden drie spanningen bekeken, een spanning in de noord-, zuid- en westgevel. Als de drie normaalspanningen in de juiste grootorde liggen als degene in ANSYS, kan er gesteld worden dat het model aanvaardbaar is en dat de parameters correct werden ingesteld.

8.1. Eigengewicht gevels

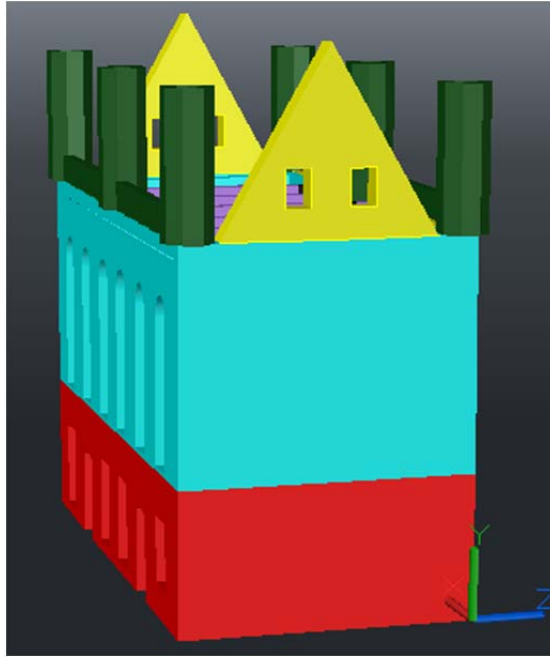
Voor het berekenen van de spanningen in de noord-, zuid –en westgevel (zie Figuur 97, Figuur 98 en Figuur 99) worden het eigengewicht van het metselwerk, het eigengewicht van de tussenvloeren en het eigengewicht dak bekeken. Door de grote oppervlakte en de symmetrie van de gevels, worden de spanningen onderaan het metselwerk gelijkmatig verdeeld beschouwd.



Figuur 97: noordgevel



Figuur 98: zuidgevel



Figuur 99: westgevel

Tabel 12 toont de berekening van het totaal eigen gewicht van de noord-, zuid- en westgevel.

Tabel 12: rekentabel eigengewicht gevels

	Noordgevel	Zuidgevel	Westgevel
Metselwerk (zonder aftrok ramen)	$16,95 \times 26,70 \times 1,13 =$ 511,40 m ³	$16,95 \times 26,7 \times 0,9 =$ 407,30 m ³	$16,95 \times 13,25 \times 1,13 =$ 253,80 m ³
Topgevel	/	/	$40 \text{ m}^2 \times 1,13 \text{ m} =$ 45,2 m ³
Aftrok ramen	- $(7,2 \text{ m}^2 \times 1,13 \text{ m} \times 4) +$ $(7,75 \text{ m}^2 \times 1,13 \text{ m} \times 2) =$ 50,05 m ³ (aftrok openingen gelijkvloers) - $13,41 \text{ m}^2 \times 1,13 \text{ m} \times 6$ =80,45 m ³ (aftrok openingen verdiep)	- $24,75 \text{ m}^2 \times 0,90 \text{ m} =$ 22,275 m ³ (aftrok openingen gelijkvloers) - $(20,05 \text{ m}^2 \times 0,9 \text{ m}) +$ $(8,07 \text{ m}^2 \times 0,90 \text{ m} \times 4)$ = 29,75 m ³ (aftrok openingen verdiep)	- $2 \times 1,90 \text{ m}^2 \times 1,13 \text{ m}$ = 4,30 m ³ (aftrok ramen topgevel)
Torentjes (*)	$2 \times (2,24 \text{ m}^2 \times 6,50 \text{ m}) =$ 29,12 m ³	$2 \times (2,24 \text{ m}^2 \times 6,50 \text{ m})$ = 29,12 m ³	$(2 \times 0,5) (2,24 \text{ m}^2 \times$ $6,50 \text{ m}) = 14,55 \text{ m}^3$
Kantelen (gemiddeld)	14,45 m ³	14,45 m ³	/
Totaal volume metselwerk	514,75 m ³	470,95 m ³	309,25 m ³
Totaal gewicht: (Metselwerk 1800kg/m ³)	9265 kN	8477,1 kN	5566,5 kN

(*) Het volume van de torentjes wordt berekend door het grondvlak te vermenigvuldigen met de hoogte van de torentjes. De hoogte van de torentjes bedraagt 6,50 meter. Het grondvlak van de torentjes is een gelijkvormige achthoek. De zijde a van de buitenachthoek bedraagt 87 cm, de binnenzijde bedraagt 54 cm.

Oppervlakte regelmatige achthoek :

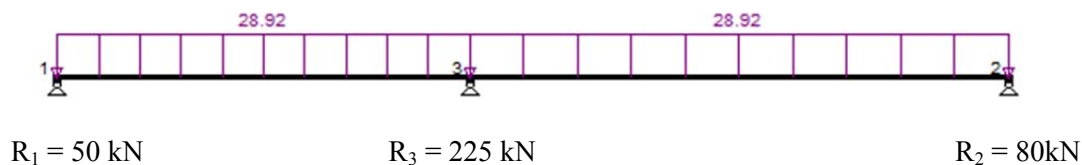
$$A = 2a^2 \cot \frac{\pi}{8} = 2(1 + \sqrt{2})a^2 \simeq 4.82843a^2.$$

- voor de buitenzijden: $a_1 = 0,87 \text{ m}$ $\rightarrow A_1 = 3,65 \text{ m}^2$
- voor de binnenzijden: $a_2 = 0,54 \text{ m}$ $\rightarrow A_2 = 1,41 \text{ m}^2$
- totale oppervlakte $A_1 - A_2 = A_{\text{tot}} = 2,24 \text{ m}^2$ metselwerk per toren

De middelste toren staat volledig op voor –en achtergevel. Voor de handmatige berekeningen wordt verondersteld dat de 2 buitenste torentjes elk voor de helft op een gevel staan. De helft van het gewicht komt op de voorgevel, de andere helft komt op de zijgevel.

8.2. Eigengewicht tussenvloeren

Het eigengewicht van de tussenvloer tussen gelijkvloers en Gotische Zaal wordt herleid naar de moerbalken. Die moerbalken worden voorgesteld als een ligger op drie steunpunten. Deze ligger wordt ingevoerd in Powerframe om de reactiekrachten te berekenen. Steunpunt 1 ligt op de noordgevel, steunpunt 2 op de zuidgevel en steunpunt 3 wordt ondersteund door de kolommen (zie Figuur 100).



Figuur 100: voorstelling tussenvloer boven gelijkvloers

Deze situatie komt vijf keer voor. Vier keer door van de houten balken, één keer door de gemetselde bogen aan de tussenmuur. Dit levert op de noordgevel een totale last van 250kN, op de zuidgevel 400kN. Op de westgevel komt 2,4 m tussenvloer, goed voor 216kN.

Voor de tussenvloer tussen Gotische Zaal en zolder, wordt het eigengewicht van de gemetselde booggewelven in rekening gebracht alsook de zware lijnlasten van het dak op deze liggers. De resultaten worden weergegeven in Tabel 13. In de tabel wordt aan de hand van de oppervlakte van het gevelgrondvlak te totale spanning onderaan de gevels berekend.

Tabel 13: rekentabel spanningen gevels

	Noordgevel	Zuidgevel	Westgevel
Gewicht metselwerk	9265 kN	8477 kN	5566,5 kN
Tussenvloer gelijkvloers	250 kN	216 kN	400 kN
Tussenvloer Gotische Zaal	1230 kN	1230 kN	245 kN
Dak	950 kN	445 kN	50 kN
Totaal gewicht	11695 kN	10368 kN	6261,5 kN
Totaal oppervlakte gevelgrondvlak	26,70 m x 1,13 m = 30,17 m ²	25,80 m x 0,90 m = 23,23 m ²	13,25 m x 1,13 m = 14,97 m ²
Totale spanning	387 kN/m ² = 0,387 N/mm ²	446 kN/m ² = 0,446 N/mm ²	417,45 kN/m ² = 0,417 N/mm ²

8.3. Conclusie handberekening

Uit de handberekeningen worden voor de drie gevels, de noord-, zuid- en westgevel, respectievelijk drie normaalspanningen bekomen. Deze spanningen bedragen 0,387N/mm² voor de noordgevel, 0,446N/mm² voor de zuidgevel en 0,417N/mm² voor de westgevel. Deze spanning bevindt zich telkens in een willekeurig punt, gelegen onderaan het gelijkvloers, ter hoogte van het maaiveld. Deze bekomen resultaten worden meegenomen naar de ANSYS –berekeningen. Daar zullen de handberekende waarden getoetst worden aan de resultaten van ANSYS. Deze waarden zouden bij een correcte berekeningen in dezelfde grootorde moeten liggen.

Alle materiaaleigenschappen die in het project worden gebruikt, zijn gedefinieerd in de ‘Engineering Data’. Deze data is voor alle analyses gelijk. De Geometry (inladen van het model en materialen toekennen) en het Model zelf (contactpunten definiëren, mesh genereren) zijn ook voor alle analyses gelijk.

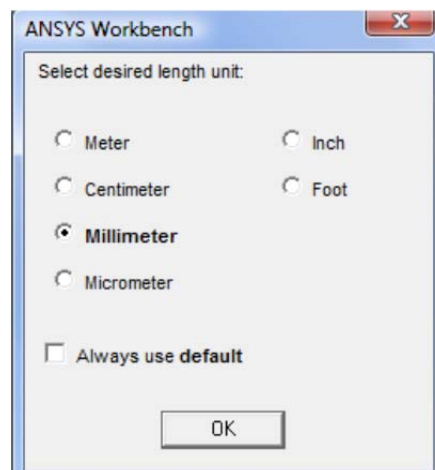
In de Setup worden de belastingen op het model bepaald, welke verschillend zijn voor de 3 analyses. Als eerste wordt een statische thermische analyse uitgevoerd, deze resultaten hiervan worden meegenomen naar de structurele analyse van het model bestaande toestand, alsook naar het model van de nieuwe toestand. De resultaten van de bestaande en deze van de nieuwe toestand worden achteraf apart geanalyseerd.

In onderstaande paragrafen wordt eerst alles van de ‘Engineering Data’, ‘Geometry’ en ‘Model’ besproken.

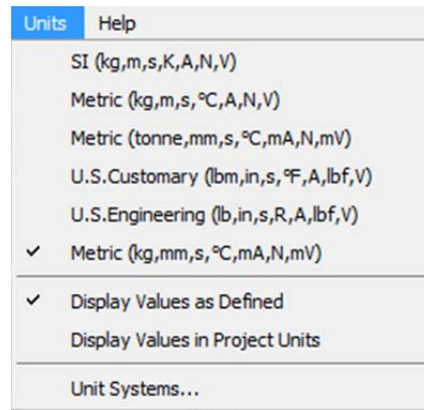
9.2. Preprocessing: model gebruiksklaar maken

9.2.1. Voorafgaande instellingen

Alvorens het eigenlijke model te kunnen opstarten in ANSYS dient een belangrijke keuze gemaakt te worden met betrekking tot het instellen van de lengte-eenheid (zie Figuur 102). Bij de keuze van het eenheidstelsel liggen meteen alle andere eenheden automatisch vast (zie Figuur 103). Deze gegevens zijn belangrijk voor het verdere verloop van de analyse, daar deze gegevens worden meegenomen in het hele rekenproces.



Figuur 102: lengteeenheid instellen



Figuur 103: eenheidsstelsel vastleggen

Er wordt gekozen om de lengte-eenheden voor te stellen in millimeter (mm). De puntlasten worden voorgesteld in Newton (N). Daaruit kan afgeleid worden dat de eenparig verdeelde lasten worden voorgesteld in N/mm² (MPa). De valversnelling wordt uitgedrukt m/s². Dit is omdat de kracht in Newton wordt uitgedrukt en de massa in kg, daarbij is $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times \text{m} / \text{s}^2$.

9.2.2. Geometrisch model

Als eerste stap dient het geometrisch model te worden opgesteld in ANSYS. De vereenvoudigingen werden al toegepast bij het uittekenen van de 3D-model in Autocad. Volgende vereenvoudigingen zijn uitgevoerd:

- vereenvoudigen van het gevelmetselwerk tot enkel de dragende structuur;
- dakconstructie wordt achterwege gelaten; deze wordt als een externe belasting erop geplaatst;
- gewicht van de tussenvloeren voorstellen door enkel de moerbalken. De rest van de vloeren worden later als externe belasting op deze moerbalken plaatsen.

Deze vereenvoudigingen zorgen voor een model dat gemakkelijk te berekenen is met de EE –software. Daar de weggelaten delen niet veel bijdragen tot spanningen in het dragend metselwerk, dus ook niet voor de accuraatheid van de berekeningen.

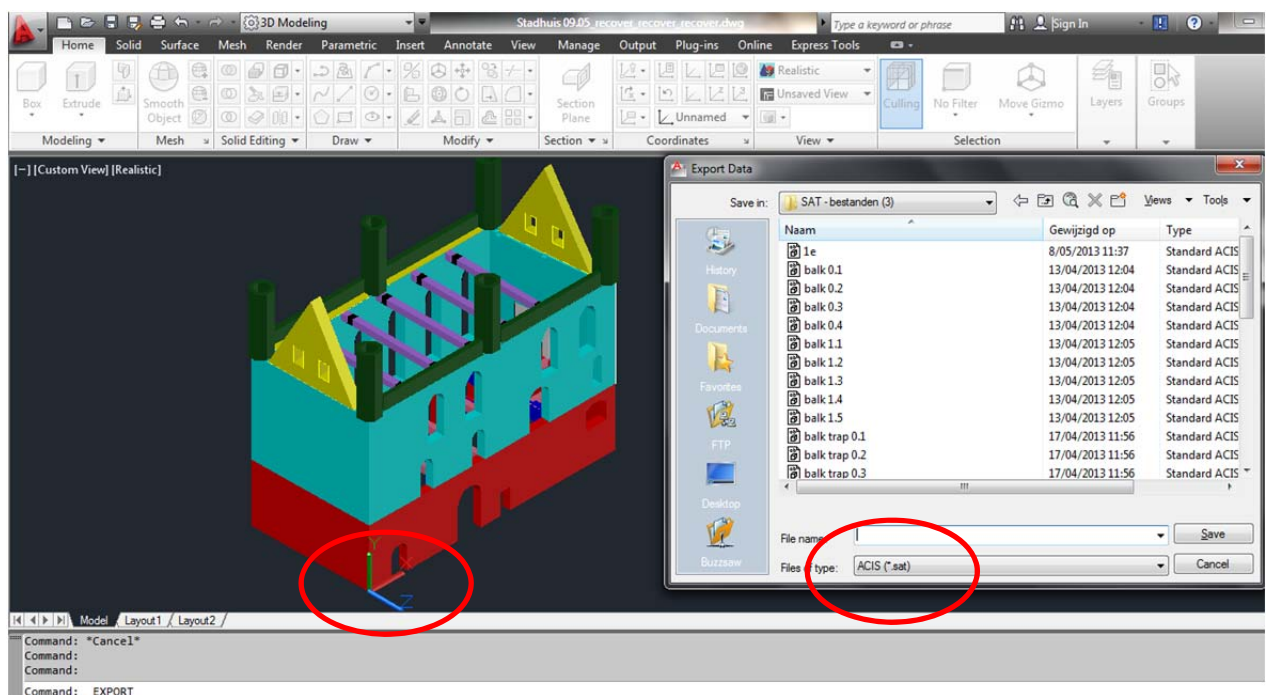
In de situatie van het stadhuis zijn er vooral grote volumes massief metselwerk aanwezig die ervoor zorgen dat er later een mooiere mesh kan gecreëerd worden. Bij onregelmatige volumes, of volumes waarbij veel hoekjes en kantjes aanwezig zijn, is het aan te raden om deze geometrie ook te vereenvoudigen, om zo het programma niet onnodig te belasten met berekeningen die niet bijdragen tot de stabiliteit van het stadhuis.

Eerst en vooral dient het Autocad bestand geëxporteerd te worden naar een ACIS (*.sat) bestand (zie Figuur 104).

ACIS-bestanden bevatten enkel volumelichamen of vlakken. Afzonderlijke punten of lijnstukken worden niet mee geëxporteerd, daar deze elementen niet bijdragen bij de berekeningen in ANSYS.

Bij het exporteren van de elementen wordt er gelet dat het referentie assenkruis altijd op dezelfde plaatst staat. Daar deze referentie wordt gehanteerd voor de plaatsbepaling bij het inladen in ANSYS.

Voor het gemak bij latere aanpassingen en het redelijk beperkt aantal elementen worden alle elementen afzonderlijk geëxporteerd.

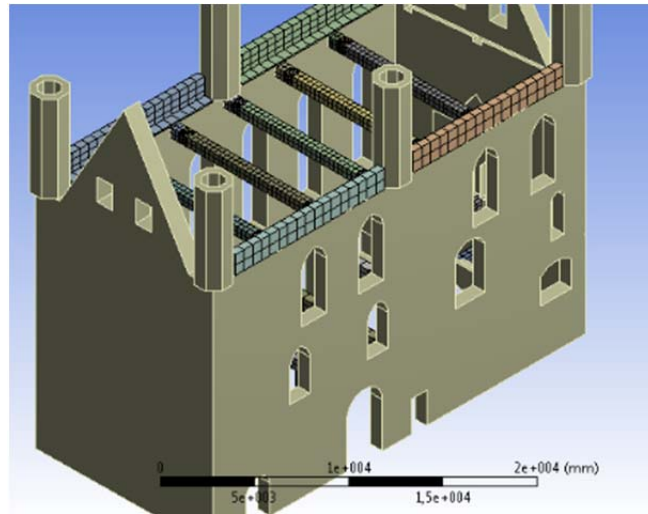


Figuur 104: bepaling assenkruis bij exporteren naar ACIS-bestand

De geëxporteerde bestanden kunnen vervolgens één voor één worden ingelezen in het ANSYS-model. Hierbij dienen de eenheden correct te zijn. In het ANSYS –model wordt gerekend in millimeters. Het 3D-model is getekend in centimeters. Het is belangrijk dat de aandacht hier scherp is zodat geen fouten worden gemaakt.

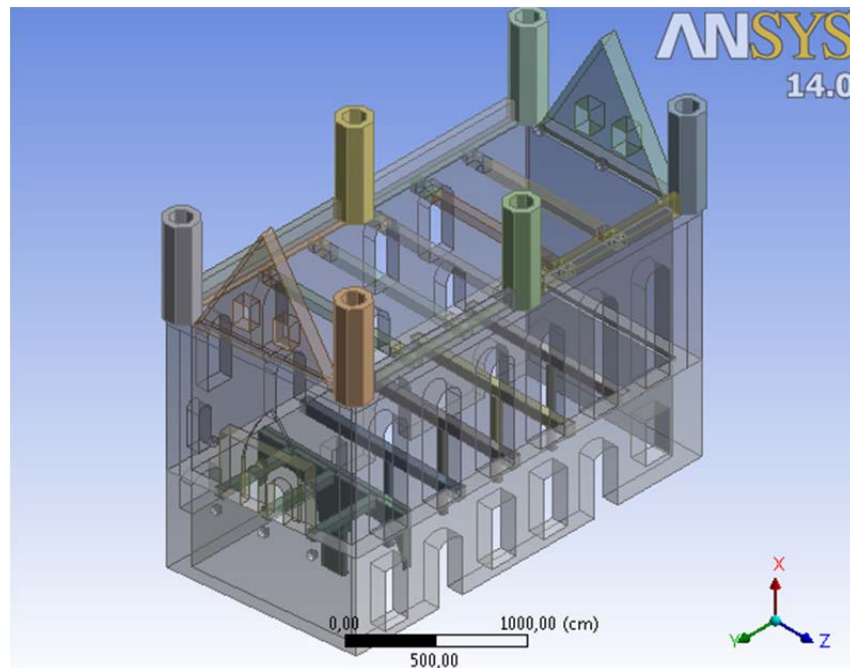
Bij het inlezen van de elementen worden de vier gevelvlakken aanschouwd als vlakken die samen werken als één geheel, zoals te zien is op Figuur 105. Omdat er naast een structurele ook een thermische analyse wordt uitgevoerd, dienen de gevelvlakken van het gelijkvloers en de gevelvlakken van de eerste verdieping als afzonderlijke vlakken beschouwd te worden. Want elk van deze vlakken

moet afzonderlijk kunnen aangeklikt worden voor het aangeven van verschillende omgevingstemperaturen (zie later, bij het opstellen van de thermische analyse).



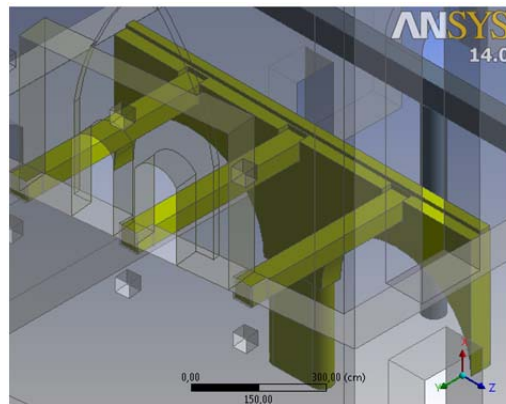
Figuur 105: voorstelling gemene vlakken welke afzonderlijk dienen te zijn

Dit euvel wordt opgelost door bij het inladen van het model deze delen als frozen voor te stellen. Dit zorgt ervoor dat elk van de ingestelde frozen-delen afzonderlijk zullen fungeren. Zo worden alle metselwerkelementen ingesteld, met uitzondering van de torentjes, daar deze elk op hun beurt op frozen-elementen staan. Zodat deze elementen ook elk apart zullen gezien worden. De frozen -delen worden transparant voorgesteld (zie Figuur 106).



Figuur 106: ingeladen ANSYS-model stadhuis Brugge

In Figuur 107 is te zien dat de tussenvloer samen met de boog niet als frozen wordt ingegeven. Deze boog dient niet afzonderlijk te worden geanalyseerd, dus kan de tussenvloer als 1 element beschouwd worden tijdens de analyse.



Figuur 107: Afzonderlijke elementen die samen 1 'part' vormen

9.2.3. Materiaaleigenschappen instellen

Het bepalen van de materiaaleigenschappen gebeurt op basis van de waarde bekomen uit de studie van historisch metselwerk. Deze studie werd in 2011 op de Hogeschool zelf uitgevoerd. Daarbij werden de spanningen al uitgelegd in de literatuurstudie. De bekomen waarden zijn daarbij:

$$\sigma_{\text{druk}, x} = 2,5 \text{ N/mm}^2;$$

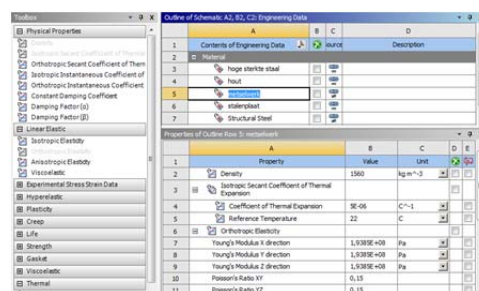
$$\sigma_{\text{trek}, x} = 0,0045 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{\text{druk}, y} = 0,18375 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{\text{druk}, z} = 0,55 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{\text{trek}, z} = 0,045 \text{ N/mm}^2;$$

Voor de eigenschappen van het metselwerk te kunnen ingeven moet er een nieuw materiaal aangemaakt worden. In de linker kolom van het venster, worden alle categorieën van eigenschappen weergegeven (zie Figuur 108). Door de gewenste categorie naar rechts te slepen, kunnen eigenschappen aan het materiaal toegevoegd worden.



Figuur 108: ingeven materiaaleigenschappen

In Tabel 14 wordt een overzicht gegeven van geselecteerde eigenschappen, de waarden en hun oorsprong. De structuur van het metselwerk wordt hier vereenvoudigd tot een isotrope structuur. Dit geeft nogmaals aan dat het hier om een benaderende methode gaat. De gebruikte Elasticiteitsmodulus (of Young's Modulus) is deze die bepaald werd bij de lineaire benadering van de drukproef loodrecht op de langse voegen.

Tabel 14: materiaaleigenschappen metselwerk

Categorie	Eigenschap	Waarde
Density	Density	1578 kg/m ³
Coëfficiënt of Thermal Expansion	Coëfficiënt of Thermal Expansion	5 . 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
	Reference Temperature	22 °C
Isotropic Elasticity	Young's Modulus	8,2859 . 10 ⁸ Pa
	Poisson's Ratio	0,25

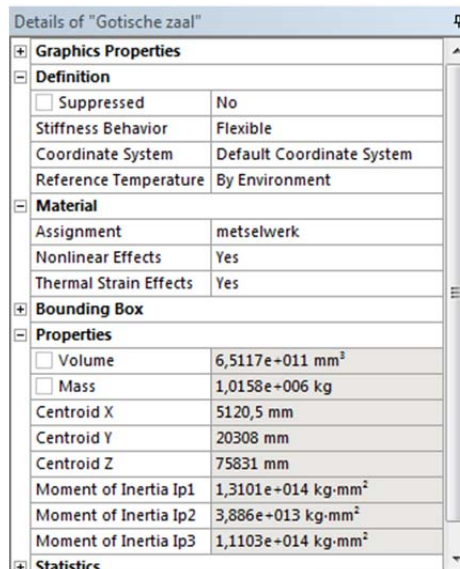
Voor het eikenhout werden uit literatuur dezelfde eigenschappen opgezocht en ingegeven als een aparte materiaal soort (Green & Winandy, zie Tabel 15).

Tabel 15: materiaaleigenschappen eikenhout

Categorie	Eigenschap	Waarde
Density	Density	700 kg/m ³
Coëfficiënt of Thermal Expansion	Coëfficiënt of Thermal Expansion	8 . 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
	Reference Temperature	22 °C
Isotropic Elasticity	Young's Modulus	12,5 . 10 ⁶ Pa
	Poisson's Ratio	0,40

9.2.4. Elementen definiëren

Na het inladen van het model kunnen alle elementen worden gedefinieerd (zie Figuur 109). Als eerste worden de materiaaleigenschappen toegekend. De keuze van de materialen wordt beperkt tot metselwerk en hout. Daar het gedrag van bijvoorbeeld de kolommen op het gelijkvloers van ondergeschikt belang zijn voor de gedragingen in het metselwerk. Daardoor worden deze eigenschappen niet van naderbij bekeken.



The screenshot shows the 'Details of "Gotische zaal"' window in ANSYS Workbench. It displays the following properties:

Graphics Properties	
Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	metselwerk
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
<input type="checkbox"/> Volume	6,5117e+011 mm ³
<input type="checkbox"/> Mass	1,0158e+006 kg
Centroid X	5120,5 mm
Centroid Y	20308 mm
Centroid Z	75831 mm
Moment of Inertia Ip1	1,3101e+014 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	3,886e+013 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	1,1103e+014 kg·mm ²
Statistics	

Figuur 109: voorbeeld gegevens Gotische Zaal

Naast het toekennen van de materiaaleigenschappen, dienen ook de contactzones van dichterbij bekeken te worden. ANSYS bepaalt zelf al een deel van de contactzones, toch is een grondige controle noodzakelijk om na te gaan of alle contactzones gedefinieerd zijn. Vermits bij het modeleren elk lichaam als afzonderlijk (frozen) beschouwd wordt, dienen tussen al deze elementen contacten worden gedefinieerd.

De verbindingen zorgen ervoor dat in de structurele analyse de krachten via de contactzones kunnen worden overgedragen. Bij de thermische analyse zorgen deze zones ervoor dat warmtetransport mogelijk is.

In ANSYS Workbench is het mogelijk om volgende contactzones te definiëren:

- vast gebonden (bonded);
- geen scheiding (no separation);
- wrijvingsvrij (frictionless);
- ruw (rough);
- wrijving (frictional).

De typen contact van ‘bonded’ en ‘no separation’ zijn lineair. Bij het berekenen is enkel 1 iteratie nodig. De andere typen zijn niet lineair, waardoor er meerdere iteraties nodig zijn (zie Tabel 16). Hoe meer iteraties er nodig zijn, hoe zwaarder de berekeningen zijn voor de computer.

Tabel 16: gedrag van de mogelijke contacten

Type	Opening toegestaan?	Glijdende elementen	Iteratie's
Vast gebonden	Neen	Neen	1
Geen scheiding	Ja	Neen, $\mu = \infty$	1
Wrijvingsvrij	Neen	Ja, $\mu = 0$	Meerdere
Ruw	Ja	Ja, $\mu = 0$	Meerdere
Wrijving	ja	Ja, Als $\mu_{\text{glijden}} > \mu_{\text{wrijving}}$	Meerdere

Een eerste verschil tussen de contacten is de mogelijkheid tot overdragen van de inwerkende krachten. Ofwel dient er fysiek contact te zijn tussen de verschillende vlakken, ofwel zijn er toch openingen toegestaan bij het overdragen op de contactvlakken.

Een ander criteria voor het bepalen van het de contacten tussen de elementen onderling is de graad van het glijden ten opzichte van elkaar. Deze is afhankelijk van de frictiecoëfficiënt μ . Daarbij is $\mu=0$ indien de elementen kunnen wrijven zonder weerstand. Hoe groter μ , hoe meer weerstand de lichamen onderling ondervinden.

Bij het definiëren van de onderlinge contactzones is het goed te weten dat men de contacten definieert naar het gewenste gedrag, en niet dat het gedrag bepaald wordt door de gedefinieerde contacten. Voor het stadhuis kan er gesteld worden dat er tussen de verschillende elementen geen openingen zijn toegestaan, alle elementen zitten vast aan elkaar. Het metselwerk kan niet bewegen en de houten moerbalken zitten vast in het metselwerk gecementeerd. Er kan dus gesteld worden dat alle contacttypes vast gebonden zijn (Bonded). Hierdoor is er maar één iteratie nodig voor het berekenen van het model, wat voordelig is voor de benodigde rekentijd van het model.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de ‘contact bodies’ en de ‘target bodies’ (zie Figuur 110). Er mag gesteld worden dat het grootste element, met de grootste mesh als ‘target body’ dient gekozen te worden. Het andere element is dan het contactelement. Bijvoorbeeld bij het opleggen van contacten tussen de Gotische Zaal en de torentjes, is de Gotische Zaal de ‘target body’ en zijn de torentjes de ‘contact body’.

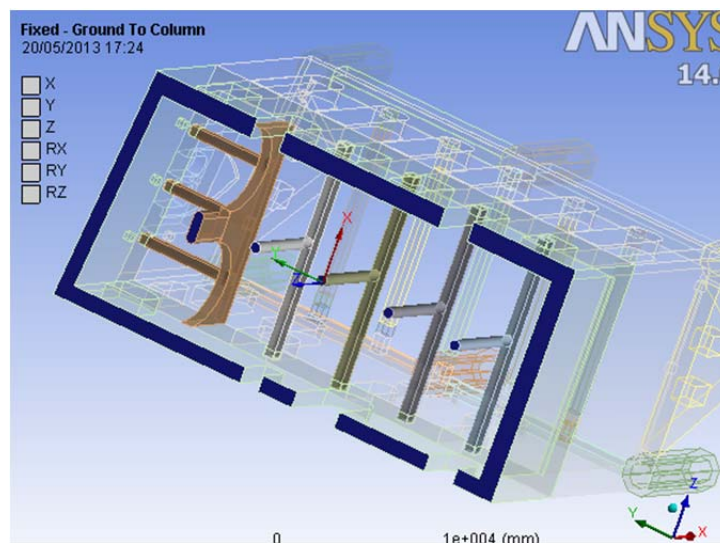
Details of "Contact Region 125"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	4 Faces
Target	1 Face
Contact Bodies	Gotische zaal
Target Bodies	gelijkvloers
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Suppressed	No

Figuur 110: contactgegevens

Eenzijds dienen de elementen onderling met elkaar verbonden worden. Anderzijds moet het gebouw ook samen met zijn omgeving gedefinieerd worden.

Uit grondig plaatselijk visueel onderzoek bleek dat alle scheurvormingen op de oostgevel zich bovengronds bevinden. Met die verstande richt het onderzoek zich enkel op de bovenbouw van het stadhuis. De kelder en fundering wordt daarbij achterwege gelaten, omdat deze geen invloed zullen hebben op de scheurvorming zoals ze zich in deze situatie voordoet. Hierbij kan gesteld worden dat het contact met de grond vast is.

Zowel het contact van het metselwerk met maaiveld, als de kolommen met het maaiveld zijn vast te noemen (fixed). Daarbij zijn alle rotaties en translaties in alle richtingen belemmerd (zie Figuur 111).

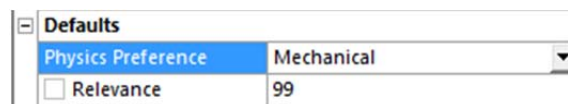


Figuur 111: belemmerde vrijheidsgraden met contact aan de grond

9.2.5. Mesh

Mesh nauwkeurigheid:

Voor het creëren van een mesh is het belangrijk om weloverwogen beslissingen te nemen. Bij het maken van een mesh wordt het 3D –model verdeelt in knopen en elementen. Er dient een goed evenwicht gevonden te worden tussen de graad van nauwkeurigheid en de efficiëntie van de berekeningen. Hoe fijner de mesh, hoe meer elementen en knopen er aanwezig zullen zijn. Daarbij hoort ook een nauwkeuriger resultaat. Daartegenover staat dat bij een fijnere mesh, de rekentijd voor het programma veel groter zal zijn. Tijdens de analyse dient een keuze gemaakt te worden (zie Figuur 112). Het instellen van de mesh wordt voorgesteld aan de hand van de ingevoerde parameters in ANSYS .

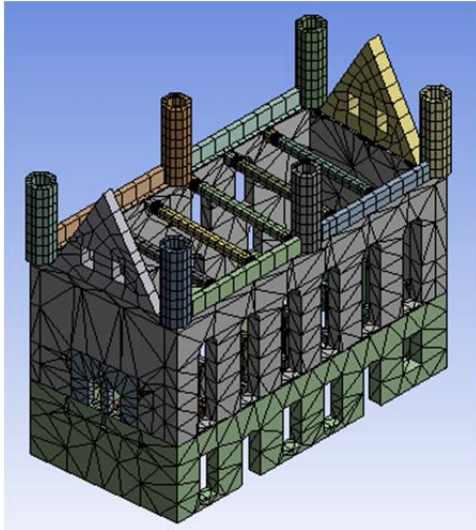


Figuur 112: instellen meshgrootte

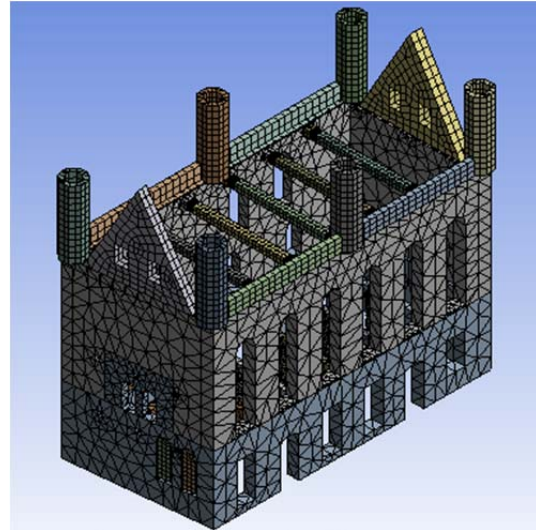
Onder ‘Physics Preference’ dienen we in te stellen welk soort onderzoek er dient gebeuren. Het onderzoek naar de scheurvorming is een structureel onderzoek, dus dient de mesh voor ‘Mechanical’ gegenereerd te worden.

Daarbij horend dient ook de nauwkeurigheid van de mesh bepaald te worden. Dit gebeurt bij ‘Relevance’. De nauwkeurigheid kan variëren tussen -100 en +100, Daarbij is -100 een heel grove mesh en +100 een heel fijne mesh. Bij het testen van de mesh wordt eerst gebruik gemaakt van een heel grove mesh, zodat de computer vlug kan rekenen en eventuele fouten kan opsporen. Indien geen fouten meer aanwezig zijn, kan de mesh verfijnd worden voor verdere analyse. Het verfijnen van de mesh vergt een langere rekentijd. Daar in dit onderzoek vooral grote oppervlakten aanwezig zijn, met weinig hoeken en kantjes, kan de mesh op hoge nauwkeurig worden ingesteld. De ‘Relevance’ wordt op 99 gezet. De stap van 99 naar 100 is te groot, en vraagt te veel capaciteit voor de computer om het gehele model te berekenen.

Op Figuur 113 en Figuur 114 is het verschil te zien bij het creëren van een mesh met ‘Relavance’ -100 en een mesh met ‘Relavance’ van 99. Daarbij heeft een ‘Relevance’ van -100, 31777 knopen, met daarbij horend 8594 elementen. Dit terwijl een ‘Relevance’ van 99 58281 knopen heeft, met daarbij 18667 knopen. Dit is dus meer dan het dubbel.



Figuur 113: Relevance -100

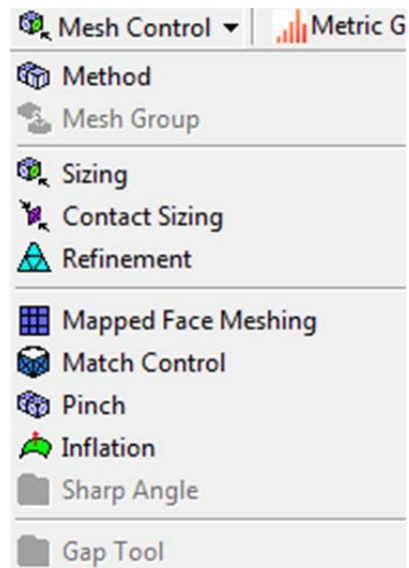


Figuur 114: Relevance 99

<->

Methodes:

Er zijn verschillende methodes beschikbaar voor het goed meshen van een 3D-model. Het instellen van de eigenschappen van de mesh gebeurt via de 'Mesh Control' (zie Figuur 115).



Figuur 115: Mesh Controle paneel

i. Method Control

Via de 'Method control' worden de verschillende mesh methodes bepaald voor het meshen van een onderdeel van het model. Volgende methodes zijn mogelijk bij het uitvoeren van de mesh van een onderdeel:

- Automatic: Een lichaam wordt eerst zoveel mogelijk gemesht met de sweep methode. Anders worden tetraëders gevormd.
- Tetraëders: hieronder staat er PatchConforming en Patch Independent Meshing. Deze worden gebruikt als de grenzen van de elementen onafhankelijk zijn van elkaar.
- Hex Dominant: Dit wordt vooral gebruikt indien de Sweep mesh niet werkt
- Sweep: Deze methode zorgt voor de efficiëntste mesh. Via het model toont ANSYS welke elementen er mogelijk zijn om te 'sweepen'. Dit is de eenvoudigste, maar meest efficiënte mesh.

Voor het onderzoek wordt een gewone automatische mesh ingesteld. Deze mesh zal dus een combinatie zijn tussen elementen die gesweept worden en elementen die een 'Hex Dominant' –mesh zullen krijgen.

ii. Sizing control

Naast Method Control kan er ook extra aandacht besteed worden aan specifieke plaatsen in het model. dat gebeurt met Sizing Control. Deze plaatsen kunnen een fijnere mesh hebben, zodat daar ter plaatse preciezer berekeningen kunnen gebeuren. Sizing control kan volgende functies vervullen:

- Met 'element size' kan de grootte van de gehele mesh vrij gekozen worden per element.
- Met de 'sphere of influence methode' kan in een bolvolume rond een bepaald punt de mesh verkleind worden. De diameter van de bol kan gekozen worden, afhankelijk van het gewenste volume van de verfijnde mesh.

iii. Contact sizing

Het bepalen van de mesh enkel rond het contact oppervlakte, indien met de specifieke gedragingen rond deze punten wensen te weten.

iv. Refinement

Het splitsen van een gemaakte mesh in meerdere onderdelen. Daarbij kan de waarde van de 'Refinement' ingesteld worden tussen 1 en 3. De meshen worden daarbij opgesplitst in bijvoorbeeld 1, 2 of 3 delen.

v. Mapped Face Meshing

Deze meshing wordt gebruikt om een regelmatigere mesh te verkrijgen.

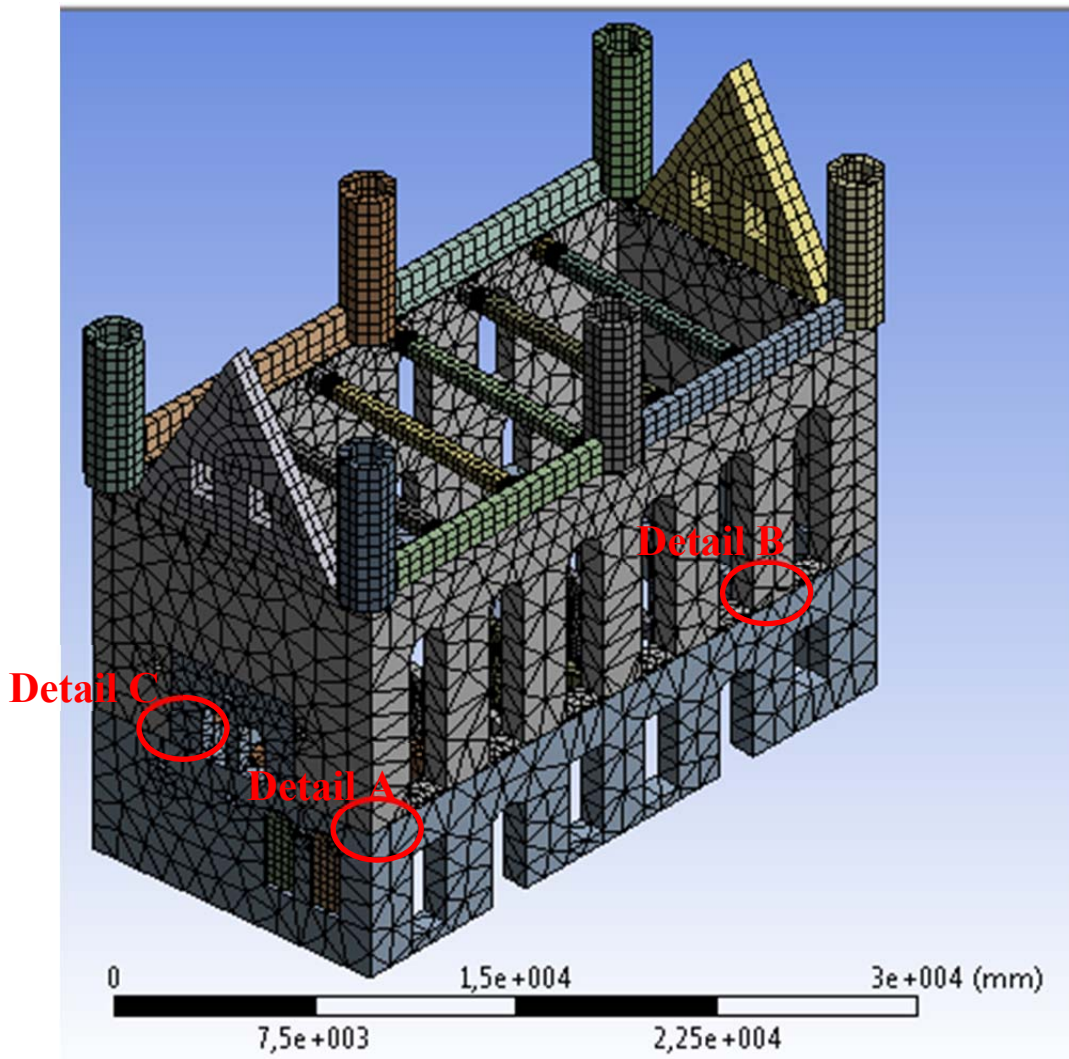
Sizing	
Use Advanced Size Fun...	Off
Relevance Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1,8672e-003 mm

Figuur 116: ANSYS instelling na de 'Sizing Control'

Genereren:

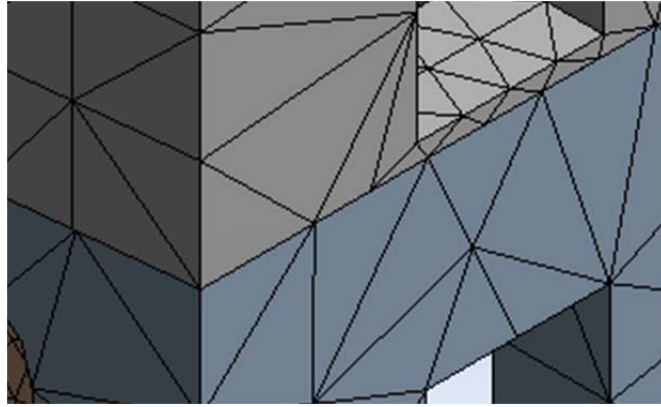
Na het instellen van de gewenste gegevens voor de mesh kan de mesh uiteindelijk gegenereerd worden. Indien alles correct is ingesteld, wordt de mesh gevormd.

Op Figuur 117 is het 3D –model te zien na het uitvoeren van de mesh. Er is duidelijk te zien dat verscheidene delen gesweept zijn. Zo zijn de balken van de tussenvloeren, de torentjes, de vensternissen, ... allemaal gesweept.

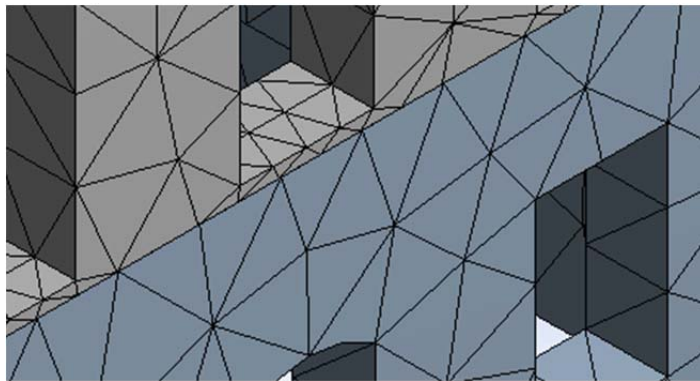


Figuur 117: 3D-model met mesh

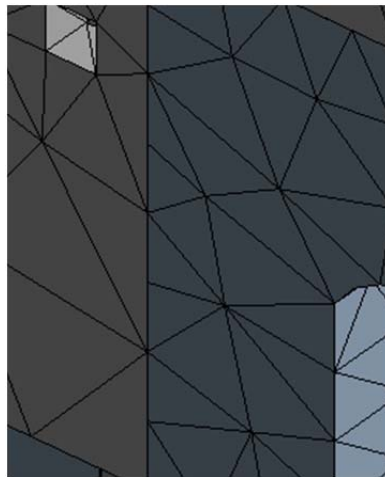
Daarnaast is ook te zien dat het metselwerk (met name gelijkvloers, eerste verdieping en topgevels) gemesht zijn met een 'Hex Dominant' –mesh. Indien de mesh van naderbij bekeken wordt op Figuur 119 en Figuur 120, is te zien dat de mesh van gelijkvloers en de mesh van Gotische Zaal mooi op elkaar aansluiten.



Figuur 118: aansluiting detail A



Figuur 119: aansluiting detail B



Figuur 120: aansluiting detail C

Het aansluiten van de meshen is een goed teken. Dit betekent dat ANSYS de muur als één werkend geheel beschouwd. Zodat bij de analyse van het metselwerk alle metselwerk als één object beschouwd.

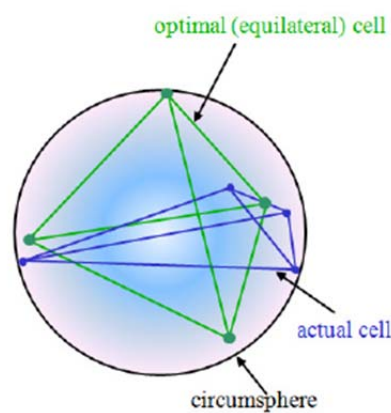
Dit kan eventueel niet het geval zijn indien de het 3D –model slecht werd ontworpen in Autocad. Indien er bij het ontwerpen een minieme spatie gelaten werd, ook al is dat bij het inzoomen niet met

het blote oog te zien, dan zal ANSYS dit zien als twee afzonderlijke elementen. Daarnaast kan ook de oorzaak liggen bij het verkeerd instellen van de meshmethoden.

Skewness principe:

Daar de mesh visueel goed gevormd is, kunnen de statistische gegevens van de worden bekeken. Het statistisch bekijken van de mesh kan op verschillende manieren bekeken worden. Daarbij is de Skewness de meest gebruikte (zie Figuur 121).

Het skewness principe is gebaseerd op de equilaterale volume deviatie, daarbij wordt bekeken hoe de elementen zich verhouden tot de meest optimale equilaterale cel.



Figuur 121: Skewness principe

Daarbij wordt volgende formule gehanteerd:

$$\text{Skewness} = \frac{\text{Optimale celgrootte} - \text{celgrootte}}{\text{optimale celgrootte}}$$

Daarbij wordt voor ieder element een Skewness – waarde verkregen gelegen tussen 0 en 1. Daarbij is 0 een goede factor en 1 een hele slechte factor. Op onderstaande lijn is te zien hoe de verhoudingen zijn van de Skewness –factor (zie Figuur 122).

0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00*
Excellent	very good	good	acceptable	bad	Inacceptable*

Figuur 122: weergave Skewness -factoren

Indien de Skewness –theorie wordt getoetst aan de mesh die werd bekomen uit de analyse, is te zien op Figuur 123 dat voor dit model een gemiddelde skewness factor wordt bekomen van 0,423. Afgaande op bovenstaande assenlijn kan worden gesteld dat dit model een zeer goede mesh is.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	58281
<input type="checkbox"/> Elements	18667
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,3057293693791E-10
<input type="checkbox"/> Max	0,999816763691026
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0,423014535481103
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,256002050314195

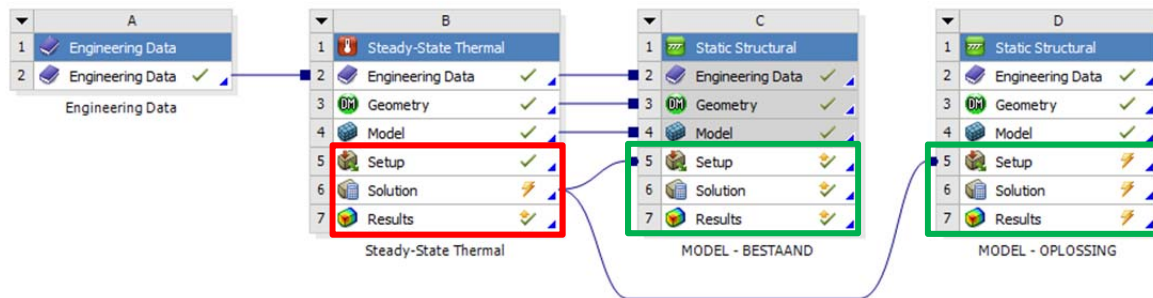
Figuur 123: statistische gegevens van de mesh

De mesh is zowel statistisch, alsook visueel in orde. Hierbij is het besluit dat de gemaakte mesh een goede mesh is voor de verdere berekeningen!

9.3. Solution

9.3.1. Thermische analyse

Nadat het model volledig op punt staat, kan een eerste analyse worden uitgevoerd. Tot nu toe is alles ingesteld tot en met het model. Dit is voor alle drie de analyses gelijk (zie Figuur 124).



Figuur 124: voorstelling analyses : Thermische analyse

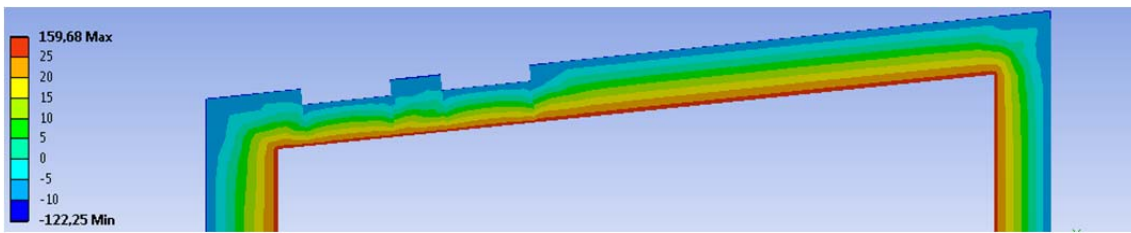
Vanaf de setup is iedere analyse verschillend. Er dient eerst een thermische analyse te gebeuren alvorens er wordt overgegaan naar een structurele analyses.

De thermische analyse komt er door de verschillende omgevingstemperaturen in en rond het gebouw. Daar er met verschillende materialen wordt gewerkt, namelijk hout en metselwerk, zijn er verschillende uitzettingscoëfficiënten aanwezig. Dit werd besproken in de materiaaleigenschappen. In de Gotische Zaal zal de verwarming, samen met de stralingswarmte van de vele spots in de zaal, de temperatuur langs de binnenzijde van de muren flink doen opgedreven. Bijvoorbeeld bij een koude winterdag zal er al gauw een temperatuursverschil van ± 40 graden optreden.

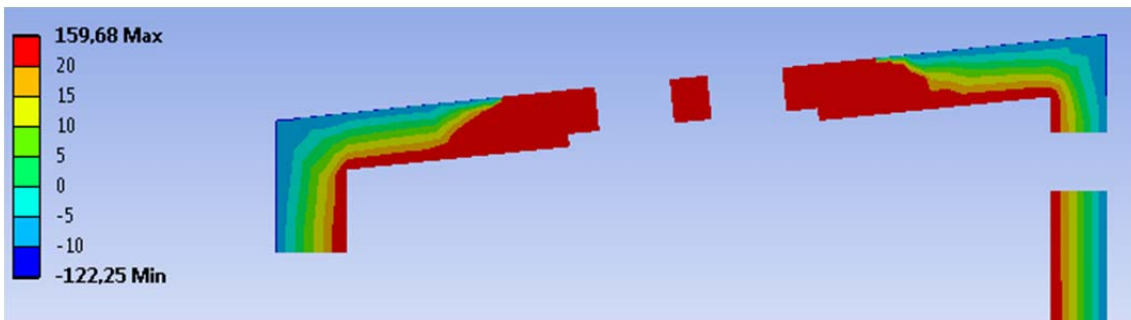
De analyse wordt gemaakt voor een koude winterdag, waar de temperatuur buiten -10 °C bedraagt. Daarbij wordt de temperatuur aan de binnenzijde van de muren bepaald op 28 °C, bij deze bedraagt het temperatuursverschil dus 38 °C. Alle plaatsen onderheven aan de buitentemperatuur worden op -10 °C ingesteld. De zolder is niet geïsoleerd alsook niet verwarmd. De omgevingstemperatuur van de zolder wordt dan ook aan -10 °C beschouwd. De tussenvloer van de Gotische Zaal is hierbij aan de onderkant $+28$ °C, waarbij de bovenkant onderheven is aan een buitentemperatuur van -10 °C.

De overbrugging van de Burgerlijke Griffie is ook onderheven aan de binnentemperatuur.

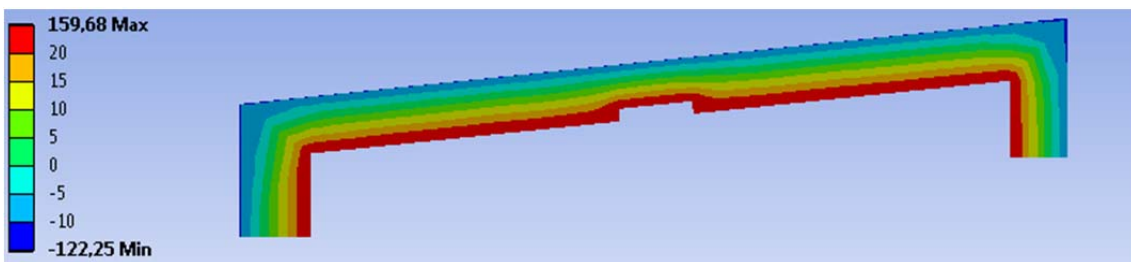
Na het maken van de thermische analyse worden volgende typesneden (zie Figuur 125, Figuur 126 en Figuur 127) doorheen de oostgevel bekomen. De resultaten van deze analyse worden gebruikt bij de verdere structurele analyses.



Figuur 125: temperatuurverloop oostgevel - halfweg gelijkvloers



Figuur 126: temperatuurverloop oostgevel – onderkant Gotische Zaal



Figuur 127: temperatuurverloop oostgevel - bovenkant Gotische Zaal

9.3.2. Structurele analyse bestaand model

Bij de structurele analyse van het bestaand model, worden volgende belastingen in rekening gebracht:

- i. de resultaten van de thermische analyse;
- ii. het eigen gewicht van het metselwerk;
- iii. de krachten werkend op het model (gewicht van de tussenvloeren, dak, overbrugging).

De resultaten van de thermische analyse werden hierboven bekomen.

Het eigen gewicht van het gebouw wordt door ANSYS zelf bepaald. Indien het gewenst is om in berekeningen rekening te houden met het eigen gewicht, moet dat in de structurele analyse wel nog worden bepaald. Dit kan gebeuren door de componenten van de gravitatiekracht aan te brengen. Deze kracht wordt door ANSYS automatisch geplaatst in het massamiddelpunt van het lichaam en heeft een grootte van 9808 mm/s^2 (zie Figuur 128). Het totale volume van het model is gekend en het gewicht is afhankelijk van de desbetreffende materialen (metselwerk of hout).



Figuur 128: invoegen gravitatiekracht

Naast het ingeven van de gravitatiekracht worden de uitwendige belastingen handmatig aan het model toegevoegd. De belastingen werden berekend tijdens de lastendaling (zie Tabel 17).

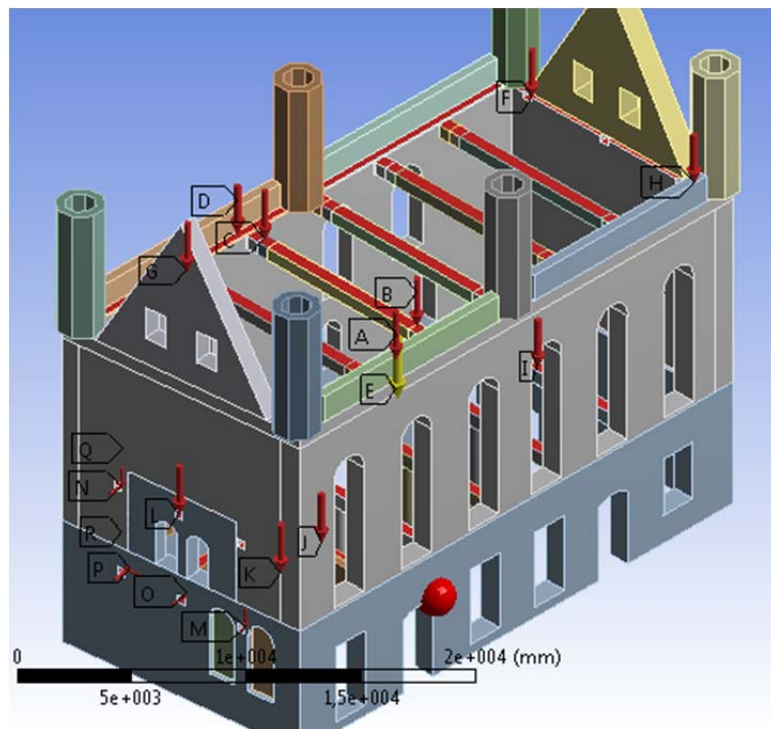
Puntlasten kunnen niet worden ingevoerd, deze krachten dienen geplaatst te worden als gelijkmatig verdeelde belasting. Zo worden puntlasten dus verspreid over de oppervlakte van hun opleg. In onderstaande tabel zijn de waarden van de belastingen aangegeven.

Tabel 17 belastingswaarden ANSYS-model

	Omschrijving	Last	Oppervlakte opleg (m)	Ingegeven last (kN/m ²)	aantal
A	Zwaartekracht			Automatisch bepaald	
B	Puntlasten dak noordgevel	28,50 kN	0,65 x 0,65	67,5	5
C	Puntlasten dak zuidgevel	18,85 kN	0,65 x 0,65	44,6	5
D	Lijnlast dak noordgevel	30,50 kN/m	0,40	76,25	2
E	Lijnlast dak zuidgevel	13 kN/m	0,40	32,50	2
F	Tussenvloer afd. 1e	37,15 kN/m	0,60	61,95	5
G	Topgevel Tussevloer afd. 1e	18,575 kN/m	0,30	61,95	2
H	Tussevloer afd. glv ; 0,1	28,95 kN/m	0,55	52,65	4
I	Tussenvloer afd. glv ; zijkant	14,50 kN/m	0,27	52,65	2
J	Tussenvloer afd glv; 0,2	22,15 kN/m	0,55	40,25	3
	Puntlasten overbrugging				
K	Midden overbrugging; Puntlast verticaal	124 kN	0,40 x 0,40	775	2
L	Uiteinden overbrugging; Puntlast verticaal (afdekking blinde ezelstraat) ¹	352,60 kN	0,40 x 0,40	2203,75	2
M	Uiteinden overbrugging; Puntlast verticaal (afdekking keuken)	62 kN	0,40 x 0,40	387,5	2
N	Midden overbrugging; Puntlast transversaal	42,4 kN	0,40 x 0,40	265	2
O	Uiteinden overbrugging; Puntlast transversaal (afdekking blinde ezelstraat) ²	279,30 kN	0,40 x 0,40	1745	2
P	Uiteinden overbrugging; Puntlast transversaal (afdekking keuken)	21,2	0,40 x 0,40	132,5	2
Q	Uiteinden overbrugging; puntlast in het vlak	21,85	0,40 x 0,40	136,55	4

- (1) Dit zijn de drukkrachten (volgens de X –as) afkomstig van de gewelfwerking van de overkappig, alsook van de boogwerking van de muur van de doorgang van de Burgerlijke Griffie.
- (2) Dit zijn de krachten volgens de Y –as, loodrecht op de muur, afkomstig de gewelfwerking van de overkappig, alsook van de boogwerking van de muur van de doorgang van de Burgerlijke Griffie.

Van het ogenblik dat alle krachten op het model geplaatst zijn, kan de gehele analyse uitgevoerd worden (zie Figuur 129).



Figuur 129: ingevoerde lasten 3D -model

9.4. Postprocessing

Op basis van de ingevoerde geometrie en lasten, maakt ANSYS de nodige matrices aan en lost deze ook op. Als ANSYS alles berekend heeft, is het mogelijk om de verschillende resultaten op te vragen. Dit onderzoek is hoofdzakelijk gericht op het bekomen van normaalspanningen, schuifspanningen en vervormingen.

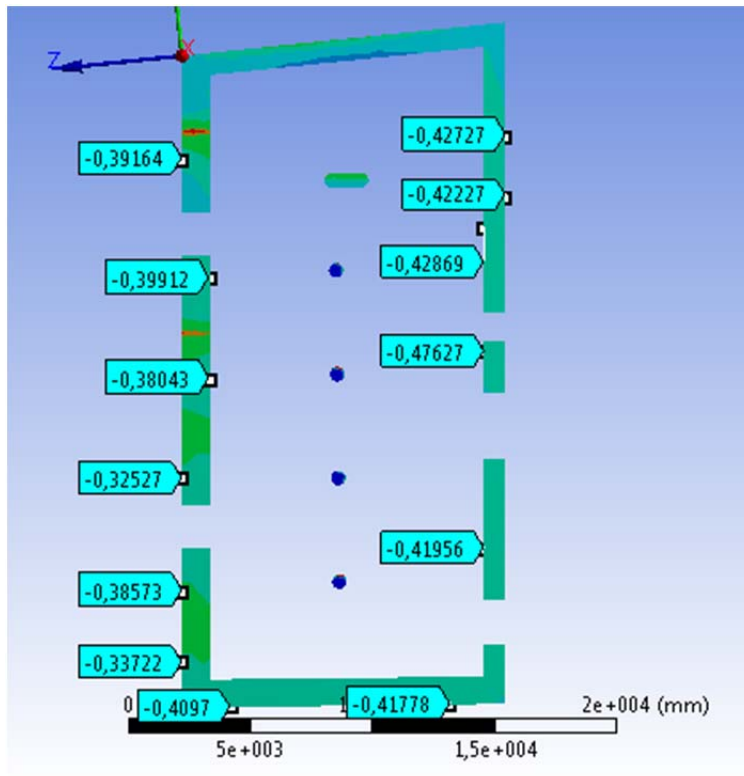
De resultaten van het onderzoek zijn te vinden in volgend hoofdstuk. Alvorens deze resultaten te analyseren worden de handberekeningen getoetst aan de berekeningen in ANSYS. De bekomen waarden voor de normaalspanningen van de handberekeningen zijn :

- noordgevel: 0,387 N/mm²;
- zuidgevel: 0,446 N/mm²;
- westgevel: 0,417 N/mm².

Deze waarden worden vergeleken met de waarden uit ANSYS. In ANSYS wordt net boven het maaiveld een snede genomen, waarbij op verschillende plaatsen de spanning wordt aangeduid. Deze waarden variëren over de volledige doorsnede. De waarden zijn gelegen tussen:

- noordgevel: $-0,33722 \text{ N/mm}^2 < x < -0,39164 \text{ N/mm}^2$;
- zuidgevel: $-0,41956 \text{ N/mm}^2 < x < -0,47627 \text{ N/mm}^2$;
- westgevel: $-0,4097 \text{ N/mm}^2 < x < -0,41778 \text{ N/mm}^2$;

Getoetst aan bovenstaande berekende waarden, kan er gesteld worden dat deze waarden dicht in elkaars buurt liggen, waarbij kan geconcludeerd worden het model correct werd ingesteld. Er mag worden aangenomen dat de waarden bekomen uit de analyses in de correcte grootorde zullen liggen (zie Figuur 130).



Figuur 130: berekende normaalspanningen ANSYS

10. Resultaten van de analyses

10.1. Algemeen

Dit hoofdstuk behandelt de resultaten bekomen met ANSYS Workbench. Na het maken van verscheidene doorsneden door de oostgevel worden verschillende aspecten van naderbij bekeken. Als eerste worden de normaalspanningen bekeken volgens X, Y en Z. Daarbij wordt als referentie de breukspanningen uit de materiaaleigenschappen gebruikt. Deze zijn:

$$\sigma_{\text{druk}, x} = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{trek}, x} = 0,0045 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{druk}, y} = 0,18375 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{druk}, z} = 0,55 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{trek}, z} = 0,045 \text{ N/mm}^2$$

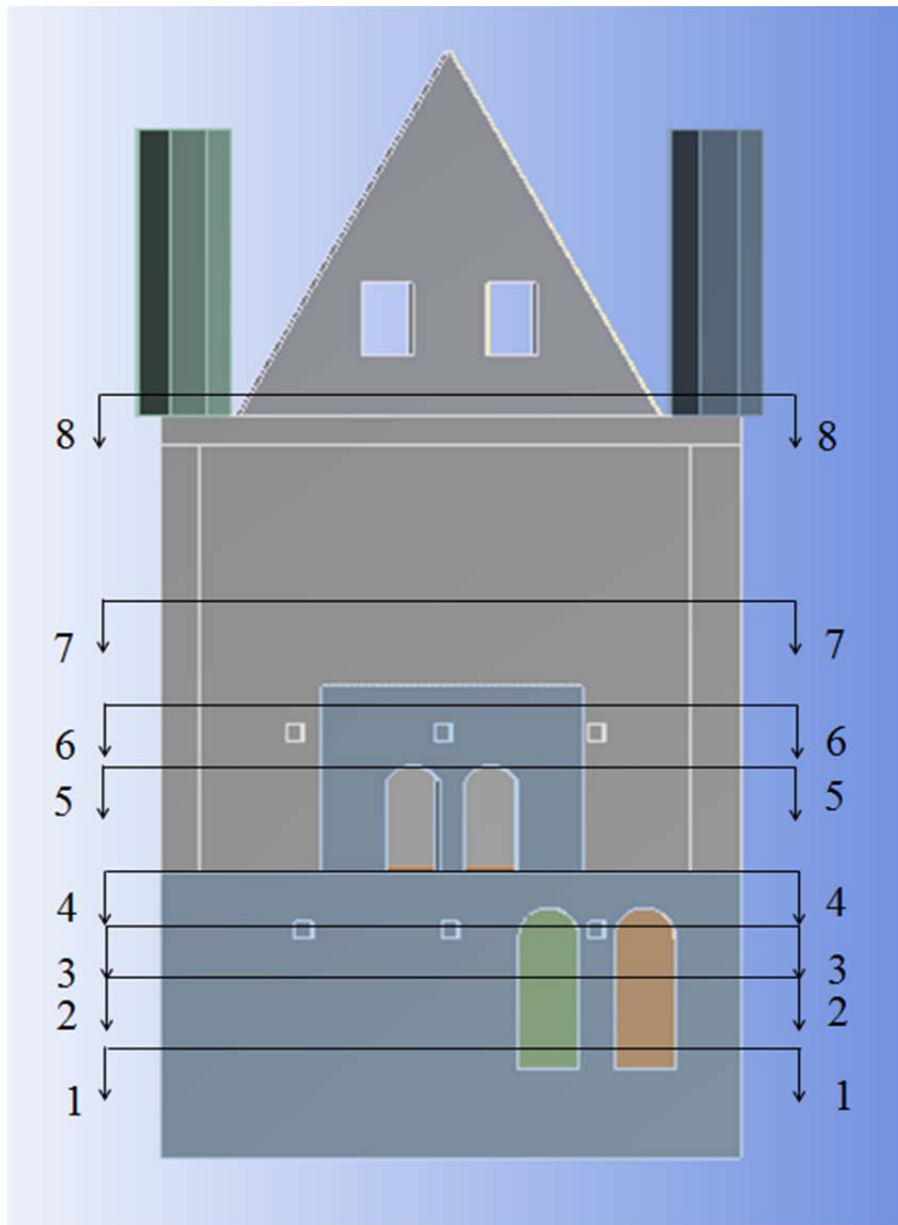
Deze waarden worden volgens de legende van Ansys ingesteld. De spanningen worden doorsnede per doorsnede bekeken, waarbij op verschillende plaatsen spanningsdiagrammen worden opgesteld. Deze diagrammen geven een goede visuele voorstelling waar de spanningen overschreden worden.

Naast de normaalspanningen in de gevel wordt ook de totale vervorming van naderbij bekeken. Aan de hand van deze analyses dient vervolgens een conclusie gemaakt te worden of de scheurvorming al dan niet te wijten is aan de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie. Indien bewezen is dat dit inderdaad het probleem kan zijn, wordt een gepaste oplossing voorgesteld.

Doorsneden oostgevel:

Er worden acht doorsneden genomen doorheen de oostgevel op volgende plaatsen (zie Figuur 131).

- Doorsnede 1: ontstaan van scheur, vanop 2,50 meter vanaf de grond;
- Doorsnede 2: halverwege de vensternissen, onder de opleg van de booggewelven;
- Doorsnede 3: snede door de oplegpunten van de booggewelven;
- Doorsnede 4: snijlijn tussen gelijkvloers en Gotische Zaal;
- Doorsnede 5: snede net boven de deuren aan de oostgevel;
- Doorsnede 6: snede net boven de oplegpunten van de booggewelven afdekking keuken;
- Doorsnede 7: snede bovenaan de vensternis in de Gotische Zaal;
- Doorsnede 8: snede net bij het begin van de topgevel.



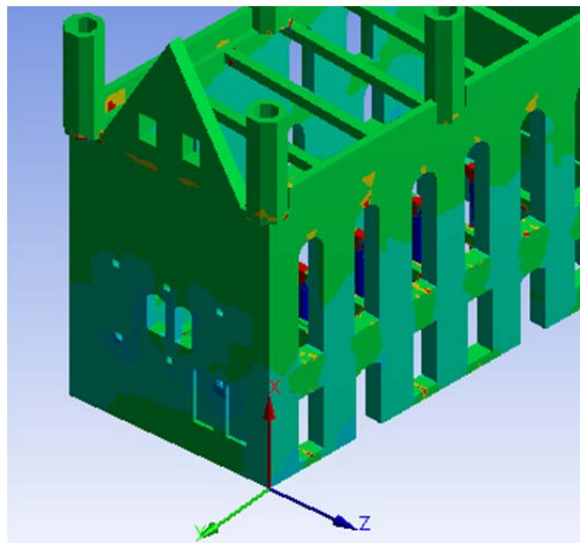
Figuur 131: doorsneden oostgevel

10.2. Resultaten bestaand model

10.2.1. Afspraken

De normaalspanningen worden bekeken volgens hun plaatselijk assenstelsel (zie Figuur 132). Daarbij geldt volgende convergentie:

- de X –as bevindt zich verticaal volgens de oostgevel, naar boven positief gericht;
- de Y –as staat transversaal op de oostgevel, de positieve richting is van de gevel weg;
- de Z –as ligt in het vlak van de gevel, zoals onderstaande afbeelding ook weergeeft.



Figuur 132: convergentie assenstelsel

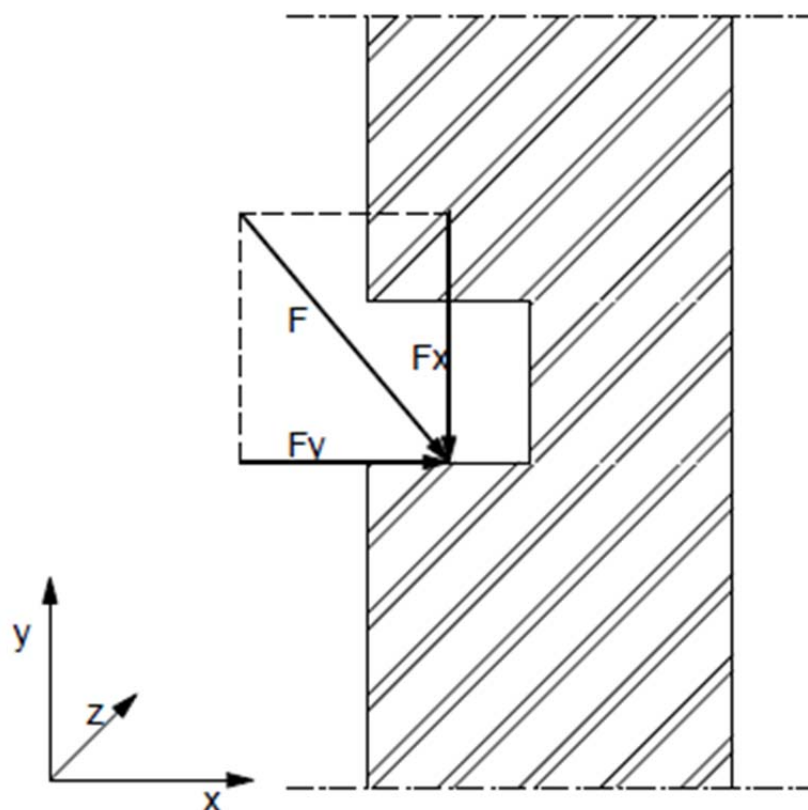
10.2.2. Verklaring krachtenwerking

De overbrugging van de Blinde Ezelstraat zorgt voor een 3–dimensionale krachtenwerking in de gevel. Er treden zowel in de X-, Y– als Z–richting normaalkrachten op. Daarbij zijn de krachten in de Z–richting relatief beperkt.

De krachten in de Z–richting zijn maar klein in vergelijking met de krachten in de X– en Y–richting, ze zijn enkel afkomstig van de kruisribgewelven. De zware belasting in de X–en Y–richting is afkomstig van de voor– en achtergevel. Daarnaast werken de krachten in de Z–richting volgens de as van de muur. Deze kleine krachten zullen daardoor geen grote invloed hebben op de totale werking van de muur.

Wordt daarnaast de belasting volgens het X–Y vlak bekeken, dan wordt de theoretische situatie op Figuur 133 verondersteld.

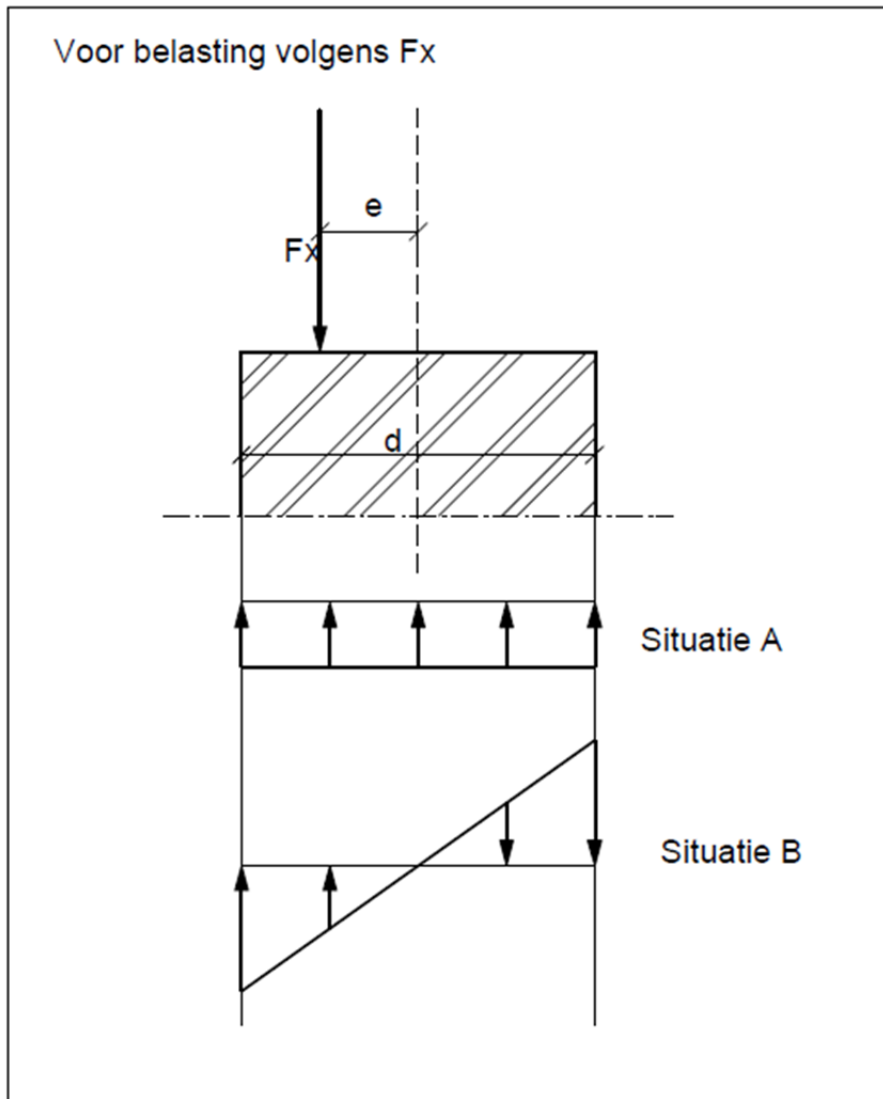
Theoretisch voorgesteld



Figuur 133: theoretische krachtenwerking gevel

Daarbij grijpt de reactiekracht F aan op de opleg in de muur. Deze kracht F kan worden ontbonden in 2 componenten, F_x en F_y , zoals afgebeeld op bovenstaande figuur (Figuur 133: **theoretische krachtenwerking gevel**).

De krachten F_x en F_y worden beiden afzonderlijk bekeken in onderstaande figuren. In Figuur 134: **krachtenwerking volgens belasting F_x** wordt de verticale reactiekracht geanalyseerd. Deze kracht grijpt excentrisch aan in de doorsnede (d) van de muur op een afstand e van het zwaartepunt. Mocht deze kracht in het midden van doorsnede aangrijpen, krijgt men een verloop weergegeven volgens situatie (a). De kracht F_x grijpt echter aan op een afstand e , zoals wordt voorgesteld, waardoor er naast de reactiekracht ook een moment (M) wordt gecreëerd. Dit levert naast de nodige spanningen ook een verdraaiing op in de gevel. Een voorbeeld van het spanningsverloop is geschetst in situatie (b). In Figuur 134: **krachtenwerking volgens belasting F_x** wordt enkel theoretisch voorgesteld. De spanningsverschillen wijken af met de werkelijkheid.

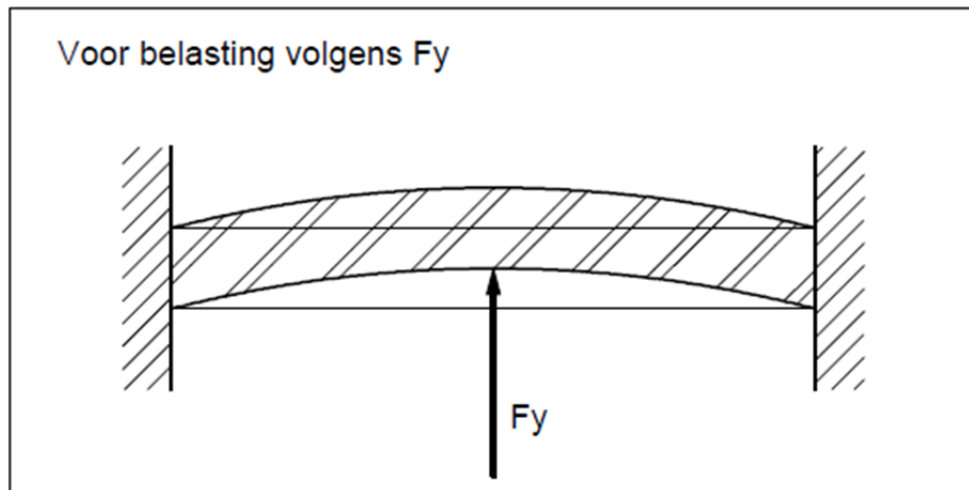


Figuur 134: krachtenwerking volgens belasting F_x

Bij centrische belasting, zoals in situatie a, heeft men te maken met een gelijkmatig verdeelde spanning over de gehele oppervlakte. In situatie b, zoals zich voordoet in de oostgevel, wordt aan de buitenzijde van de gevel de grootste drukkracht verkregen. Door de grootte van deze excentriciteit krijgt men aan de binnenzijde trek. Indien deze trekspanningen groter worden dan de breukspanningen, zouden deze spanningen kunnen resulteren in horizontale scheuren aan de zijde waar de trek optreedt, in dit geval aan de binnenzijde (zie Figuur 134).

Naast de reactiekracht F_x heeft de kracht F_y een grote invloed op de totale werking van de gevel. Theoretisch kan de oostgevel voorgesteld worden als een ingeklende muur, die aan de beide uiteinden is ingeklemd aan de noord- en zuidgevel. De reactiekracht F_y werkt daarbij loodrecht op in de gevel. De kracht zorgt voor een verbuiging van de gevel. In deze situatie wordt een verbuiging naar binnen toe verkregen. Door deze verbuiging krijgt men aan de binnenzijde het gebouw (andere kant van de

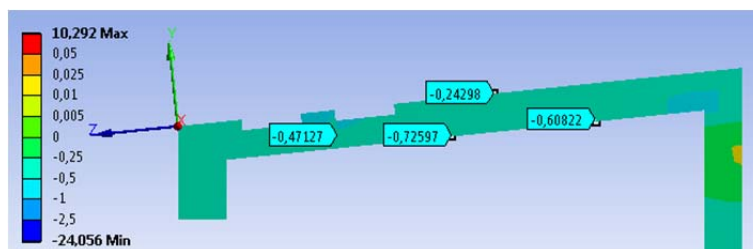
aangrijpende kracht) trekspanningen. Deze spanningen worden geïllustreerd op onderstaande figuur. Indien de trekspanningen, afkomstig van de horizontale krachten F_y , groter zijn dan de breukspanningen, kunnen deze spanningen aanleiding geven tot verticale scheuren (zie Figuur 135).



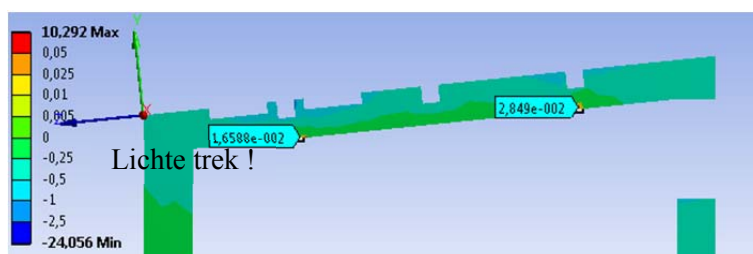
Figuur 135: krachtenwerking volgens belasting F_y

10.2.3. Normaalspanningen volgens de X –richting

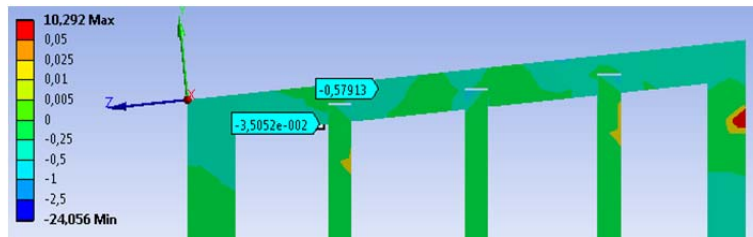
Als eerste kan er gekeken worden naar de spanningen volgens de X-richting. Daarbij worden doorsnede 1, 3, 4 en 5 geanalyseerd(zie Figuur 136, Figuur 137, Figuur 138 en Figuur 139).



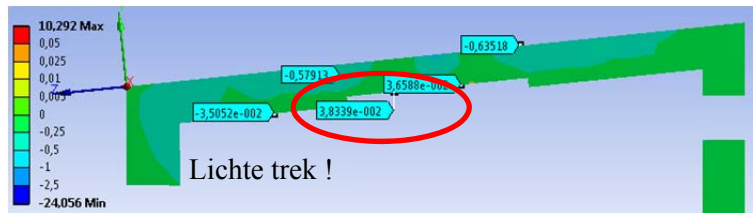
Figuur 136: doorsnede 1



Figuur 137: doorsnede 3



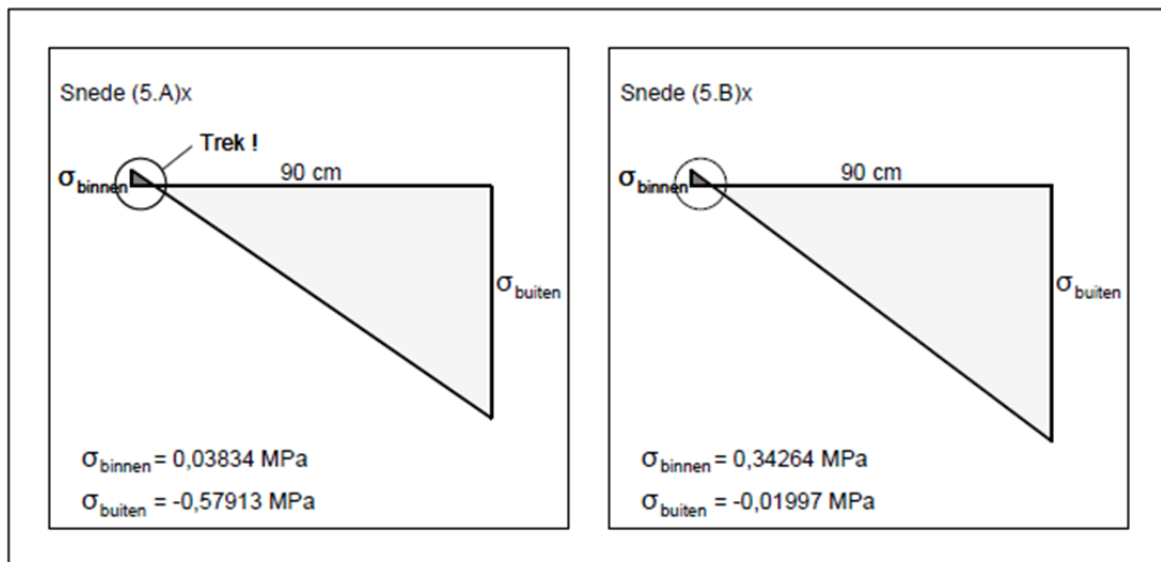
Figuur 138: doorsnede 4



Figuur 139: doorsnede 5

Uit deze doorsneden blijkt dat er over bijna de volledige oppervlakte drukspanningen optreden. Deze zijn over het algemeen het grootst in doorsnede 1. Daar op deze plaats het totale gewicht van de gevel dient opgevangen te worden. Plaatselijk worden aan de opleggen van tussenvloer of overbrugging deze spanningen vergroot. Deze zijn echter nooit groter dan de breukspanningen (σ_{druk} , $x = 2,5$ N/mm²).

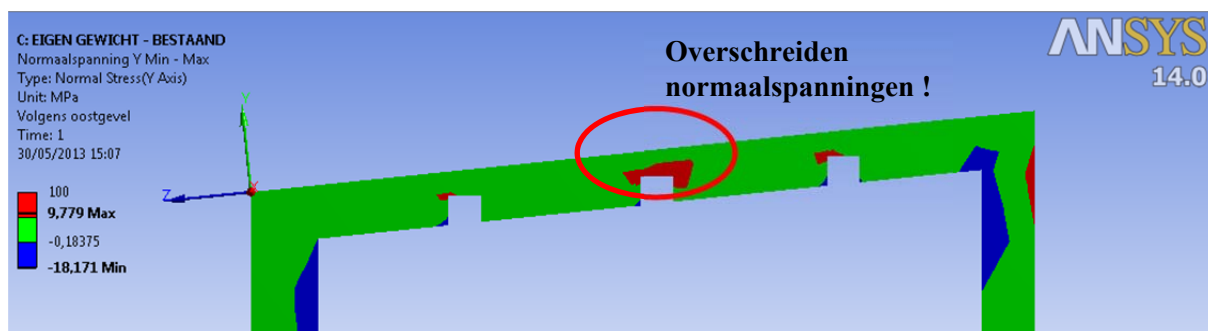
Plaatselijk treden er in de X-richting echter ook trekspanningen op in het metselwerk. Dit is een ongunstige situatie daar metselwerk slechte eigenschappen heeft met betrekking tot het opnemen van trekspanningen. De σ_{trek} in de X-richting bedraagt slechts 0,0045 N/mm². Daarbij loopt de bekomen trek in doorsnede 3 en 5 op tot rond de 0,035 N/mm² (zie Figuur 140). Dit is dus groter dan aanvaardbaar, echter zijn deze spanningsoverschreidingen maar plaatselijk. Dit komt door de eerder gezegde excentrische belasting (zie Figuur 134: **krachtenwerking volgens belasting Fx**). Volgens het theoretisch model zouden er op deze plaatsen horizontale scheurtjes waar te nemen zijn. Door het pleisterwerk, en de beperkte grootte van de trekspanningen, zijn er ter plaatse echter geen horizontale scheurtjes waar te nemen.



Figuur 140: spanningsdiagrammen in doorsnede 5 voor normaalspanningen volgens de X-richting

10.2.4. Normaalspanningen volgens de Y-richting

Worden de spanningen volgens de Y-as geanalyseerd, dan blijkt dat de spanningen enkel in doorsnede 4 worden overschreden (zie Figuur 141 en Figuur 142). Dit is ter plaatse van de opleg van de tussenvloeren. Op onderstaande figuur is het overschrijden van de spanningen duidelijk te zien. Daarbij is groen de aanvaardbare spanningen, de rode vlakken zijn plaatsen waar de spanningen groter zijn dan de breukspanningen (σ_{druk} , $y = 0,18375 \text{ N/mm}^2$).

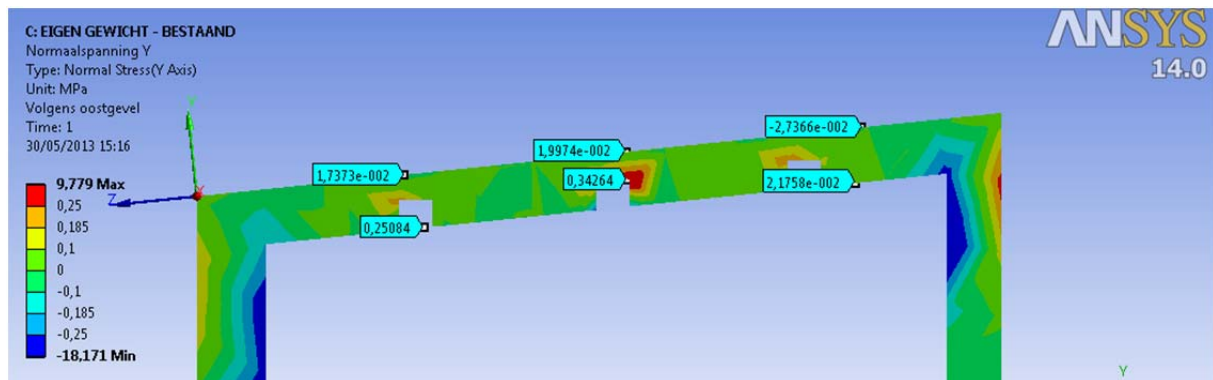


Figuur 141: Normaalspanning volgens de Y-as doorsnede 4, ter hoogte van opleg tussenvloer

Er is duidelijk te zien dat in doorsnede 4 de spanningen het grootst zijn ter hoogte van de middelste moerbalk. Dit is de plaats in de Gotische Zaal waar deuren naar de overbrugging zich bevinden. In het theoretisch model is op de plaats van de doorsnede geen tegengewicht ter hoogte van deze deuren. In werkelijkheid zal er wel nog tegengewicht aanwezig zijn, dit van een deel van de opleg van de

tussenvloeren. Dit tegengewicht zal een positieve invloed hebben voor het reduceren van deze spanningen.

Daarnaast is het overschrijden van de spanningen echter maar plaatselijk en redelijk beperkt. Door de materiaaleigenschappen en de homogeniteit van het metselwerk zullen deze spanningen plaatselijk verspreid worden over de gehele gevel en aldus geen noemenswaardige schadeverschijnselen teweeg brengen.

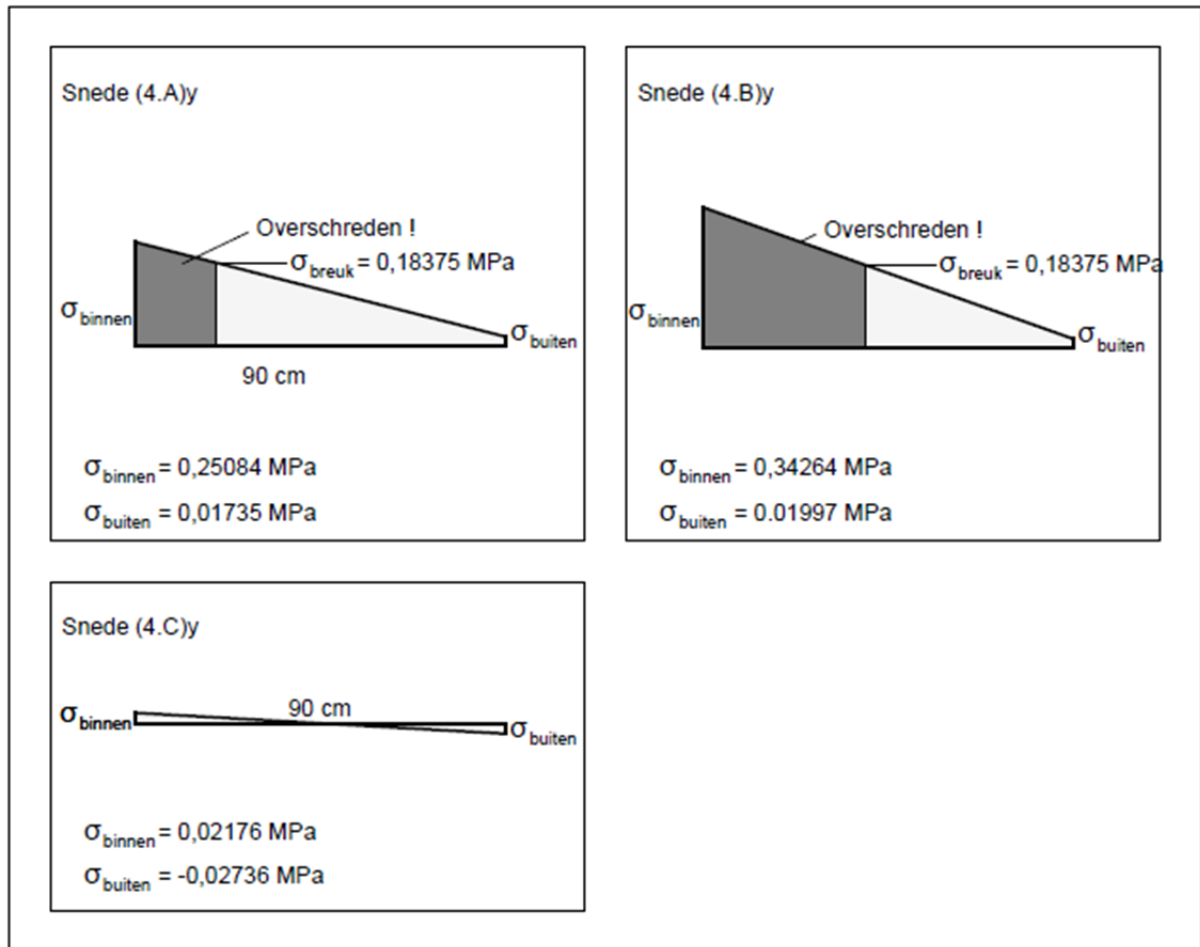


Figuur 142: detail normaalspanningen volgens Y –as; doorsnede 4

Op de plaatsen waar de grootste spanningen te zien zijn worden sneden gemaakt (snede A, B en C) de uiterste spanningen binnen die sneden zijn ingevuld in Tabel 18. Van iedere snede wordt een spanningsdiagram gemaakt. (zie Figuur 143).

Tabel 18: normaalspanningen volgens Y -as; doorsnede 4

Doorsnede 4	$\sigma_{Y, \text{buiten}}$ (MPa)	$\sigma_{Y, \text{binnen}}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{Y, \text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,017375	0,25084	0,26822	(4.A) _Y
Snede B	0,01997	0,34264	0,36261	(4.B) _Y
Snede C	-0,02736	0,02176	0,04912	(4.C) _Y



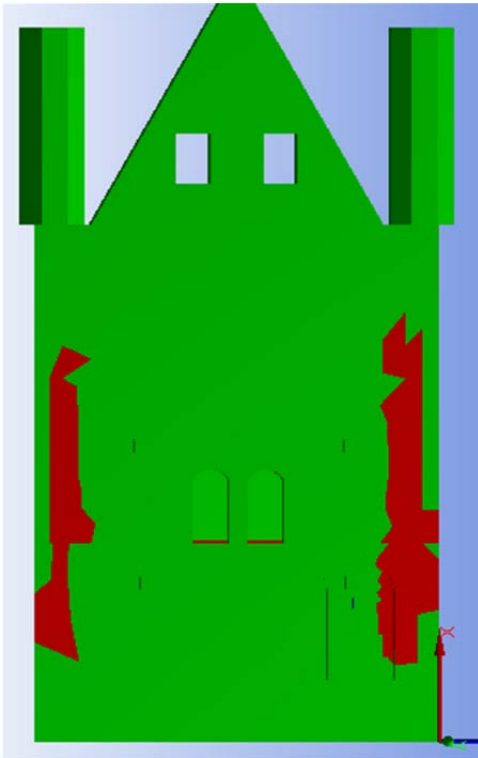
Figuur 143: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Y-richting

Opmerking: Op deze spanningsdiagrammen duidelijk te zien vanwaar de breukspanningen overschreden worden. Het donker gearceerde oppervlakte is de plaats waar de breukspanningen volgens de vastgestelde richting overschreden worden.

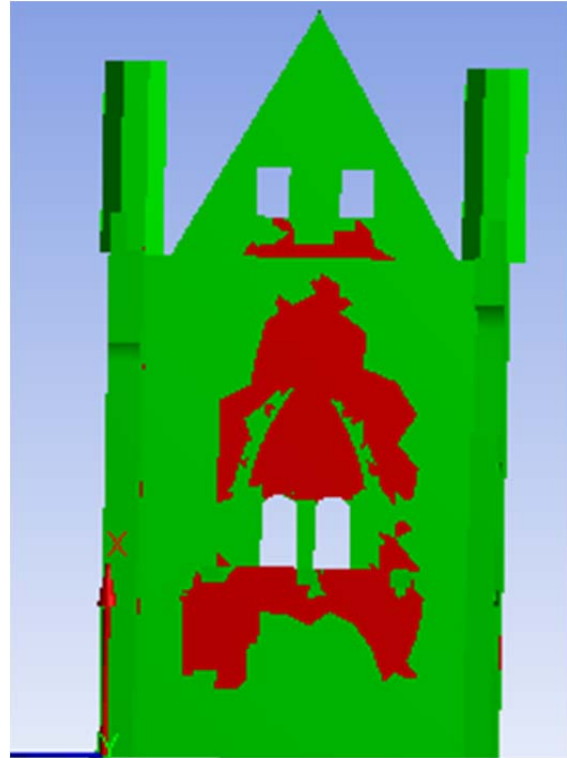
10.2.5. Normaalspanningen volgens Z –richting

Het is duidelijk dat de scheurvorming niet te wijten kan zijn aan de spanningen volgens de X- en/of de Y-as. Uit analyse van de normaalspanningen volgens de Z-as moet blijken of de analyse van de overbrugging de oorzaak is van het probleem. Deze spanningen zijn te wijten door de horizontale spanningen F_y welke uitgelegd zijn aan de hand van Figuur 135: **krachtenwerking volgens belasting F_y** . Als eerste wordt de totale spanningen aan de binnenzijde globaal bekeken, daarna wordt doorsnede per doorsnede de analyse gemaakt volgens de Z-as.

Globale gevelzichten:



Figuur 144: normaalspanningen volgens Z-as, globale buitenzijde oostgevel



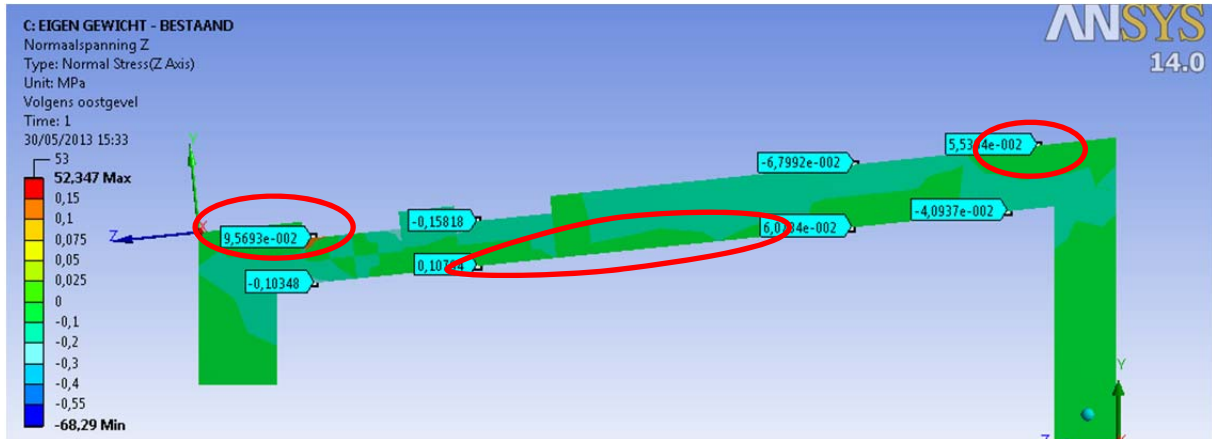
Figuur 145: normaalspanningen volgens Z-as, globale binnenzijde oostgevel

Op Figuur 144 en Figuur 145 zijn de normaalspanningen volgens de Z-as voorgesteld. Daarbij zijn de groene vlakken aanvaarbare spanningen in de gevel. De roodgekleurde vlakken zijn alle plaatsen waar de trekspanningen overschreden worden.

Uit Figuur 144 blijkt dat aan de buitenzijde ter plaatse van de hoekpunten de trekspanningen worden overschreden. Er is duidelijk te zien dat de qua oppervlakte de spanningen aan de noordzijde (op Figuur 144 aan de rechterkant) groter zijn dan aan de zuidzijde. Dit wordt veroorzaakt door de vensternissen. Qua kwantitatieve hoeveelheden is het niet mogelijk te zeggen welke spanningen er hier het grootst zijn. Dit wordt voorgesteld bij de plaatselijke doorsneden.

Bij Figuur 145 is duidelijk te zien dat het overschrijden van de trekspanningen zich voordoet in het midden van de muur.

Doorsnede 1:

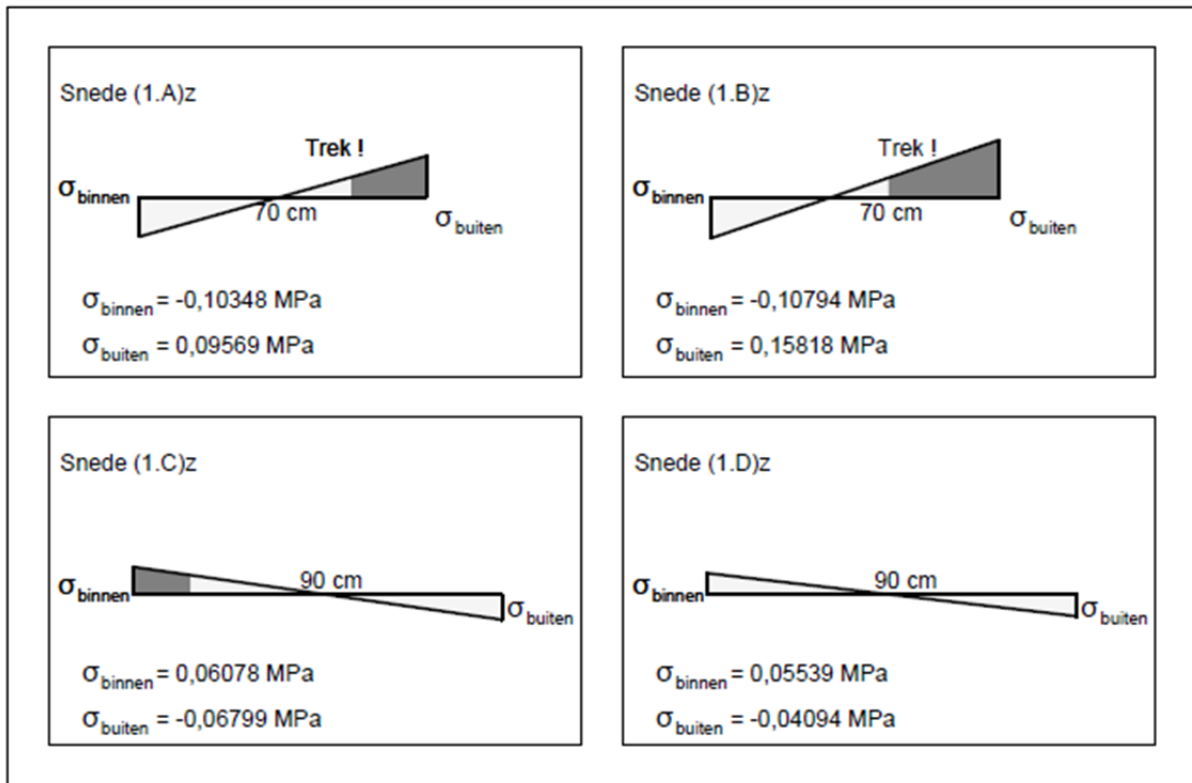


Figuur 146: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 1

Er worden sneden gemaakt op de plaatsen waar de grootste spanningen te zien zijn binnen doorsnede 1 (snede A, B, C en D). De uiterste spanningen binnen die sneden zijn ingevuld in Tabel 19. Van iedere snede wordt een spanningsdiagram gemaakt. (zie Figuur 147).

Tabel 19: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 1

Doorsnede 1	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,09569	-0,10348	0,19917	(1.A) _Z
Snede B	-0,15818	0,10794	0,26612	(1.B) _Z
Snede C	-0,06799	0,06078	0,12877	(1.C) _Z
Snede D	0,05539	-0,04094	0,09633	(1.D) _Z

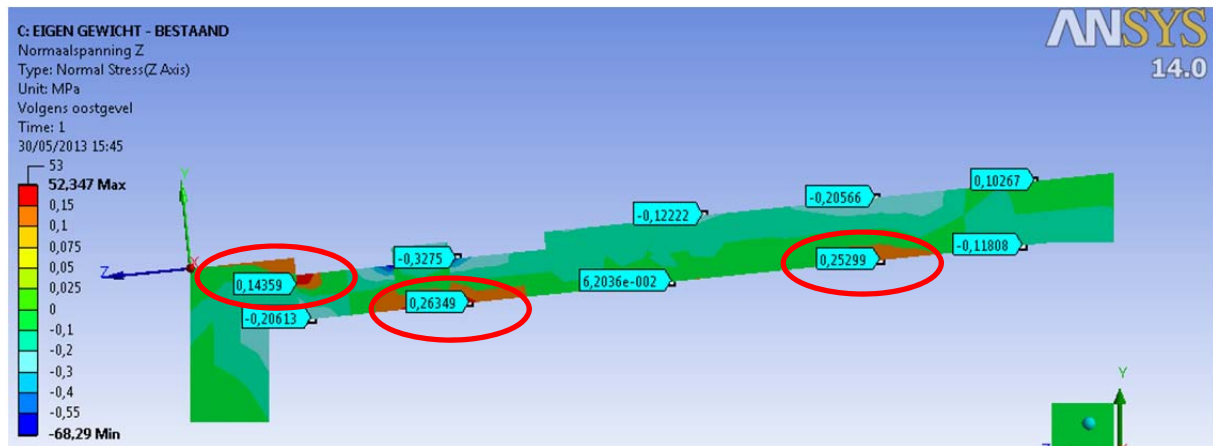


Figuur 147: spanningsdiagrammen in doorsnede 1 voor normaalspanningen volgens de Z-richting

Uit de vier snedes gemaakt bij doorsnede 1, de plaats waar de scheur ontstaat, is een duidelijk spanningsverloop te zien (zie Figuur 147). Daarbij is er aan de twee uiteinden van de muur een (lichte) trekspanning aan de buitenzijde. In het midden van de muur is er een trekspanning volgens de Z-as langs de binnenkant van de muur. Deze spanningen zijn echter nog redelijk beperkt ($\leq 0,10 \text{ N/mm}^2$) daar waar de breukspanning $0,05 \text{ N/mm}^2$ bedraagt.

De plaats van de gemaakte snede is daarbij het begin van de het overschrijden van de maximale trekspanningen. Indien er lager gesneden wordt, verdwijnen de trekspanningen en treden er enkel drukspanningen op.

Doorsnede 2:



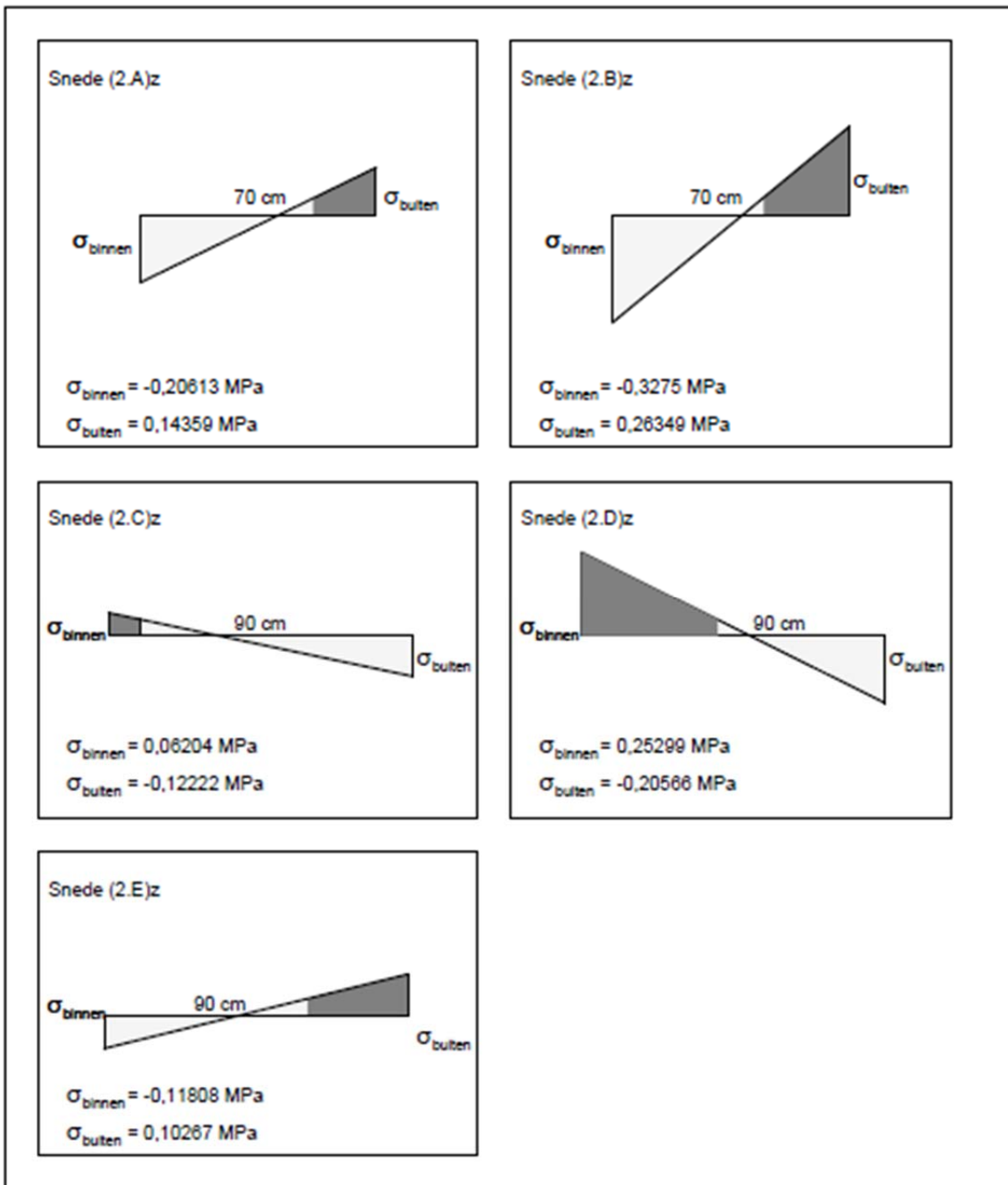
Figuur 148: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 2

Er worden terug sneden gemaakt op de plaatsen waar de grootste spanningen te zien zijn (snede A, B, C, D en E). De uiterste spanningen binnen die sneden zijn ingevuld in Tabel 20. Van iedere snede wordt een spanningsdiagram gemaakt. (zie Figuur 149).

Tabel 20: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 2

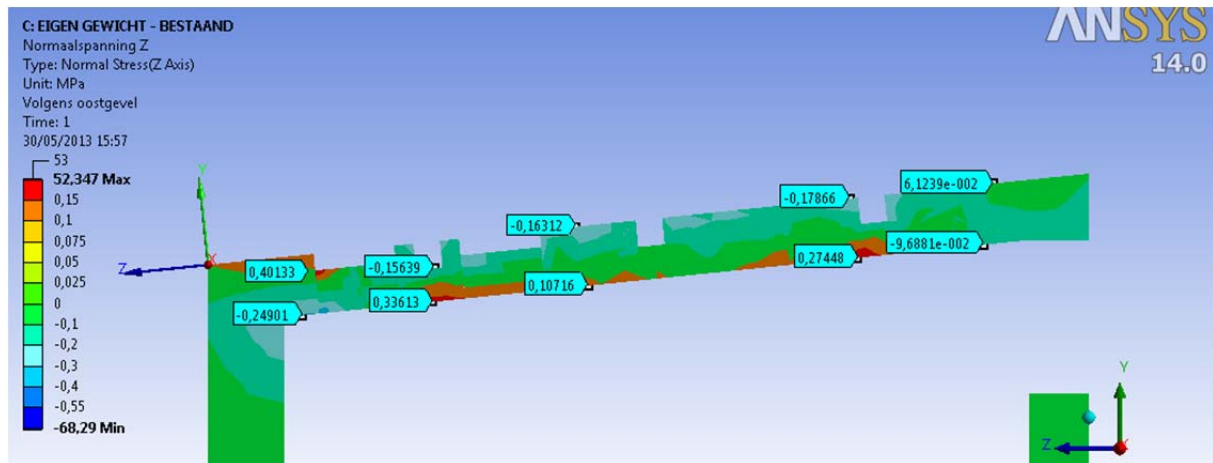
Doorsnede 2	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,14359	-0,20613	0,34972	(2.A) _Z
Snede B	-0,3275	0,26349	0,59099	(2.B) _Z
Snede C	-0,12222	0,06204	0,18426	(2.C) _Z
Snede D	-0,20566	0,25299	0,45865	(2.D) _Z
Snede E	0,10267	-0,11808	0,22075	(2.E) _Z

Vanaf doorsnede 2 is een constant verloop in de gevel zichtbaar. Op dezelfde plaatsen als in doorsnede 1 treedt er trek op. Deze trek is groter in doorsnede 2 dan diegene in doorsnede 1. Er kan voorlopig dus gesproken worden van een duidelijke spanningstoename naar mate er hoger in de gevel wordt gesneden.



Figuur 149: spanningsdiagrammen in doorsnede 2 voor normaalspanningen volgens de Z-richting

Doorsnede 3:



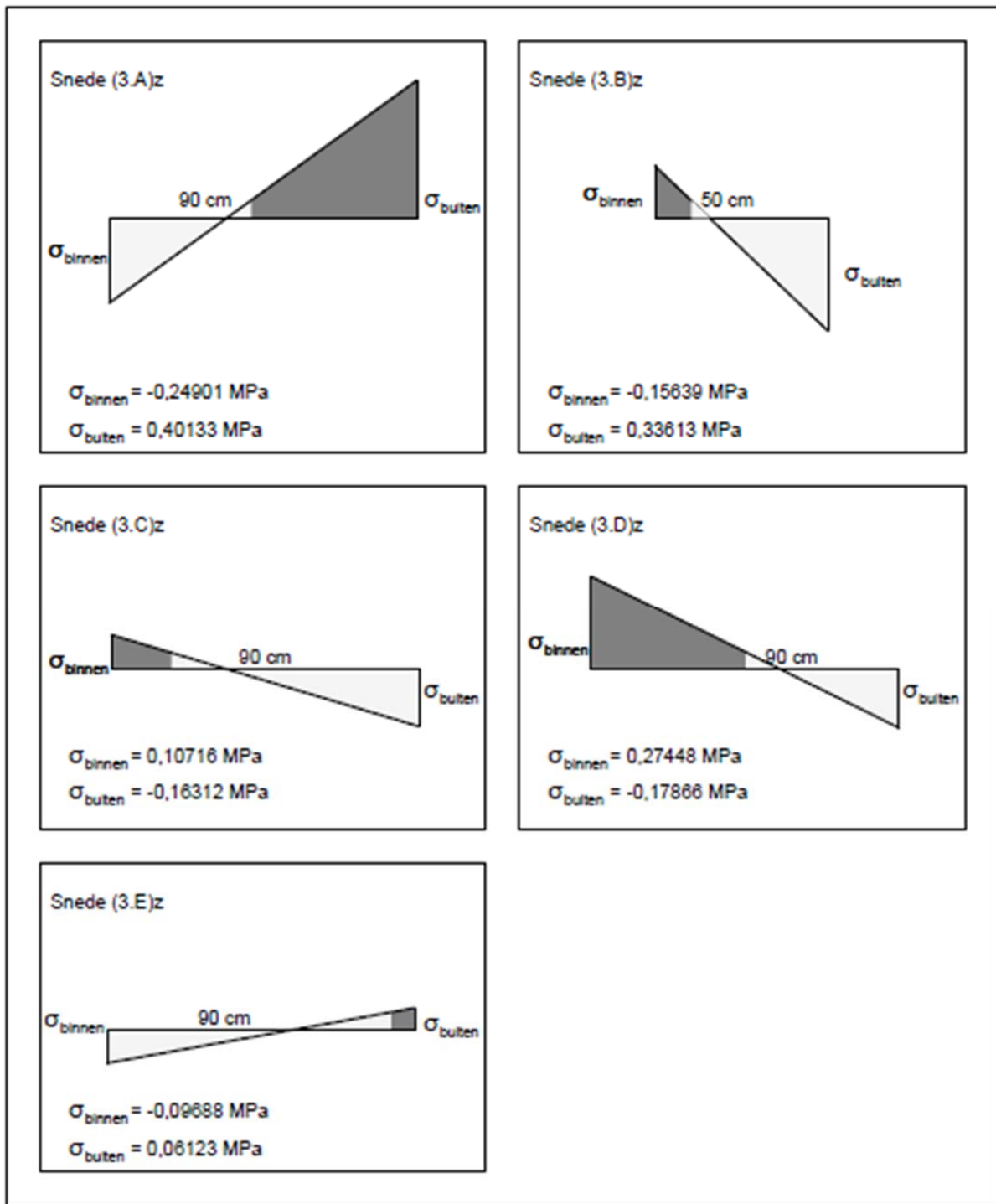
Figuur 150: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 3

Tabel 21: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 3

Doorsnede 3	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,40133	-0,24901	0,65034	(3.A) _Z
Snede B	-0,15639	0,33613	0,49252	(3.B) _Z
Snede C	-0,16312	0,10716	0,27028	(3.C) _Z
Snede D	-0,17866	0,27448	0,45314	(3.D) _Z
Snede E	0,06123	-0,09688	0,15811	(3.E) _Z

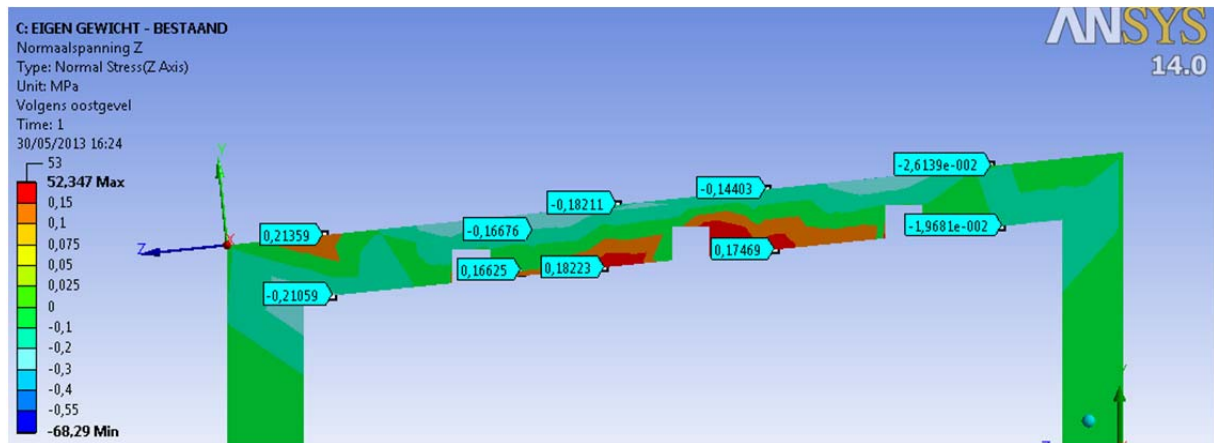
Op doorsnede 3 worden de grootste trekkrachten in de gehele gevel bekomen, dit is de plaats waar de drukkrachten van de overbrugging van de Blinde Ezelstraat aangrijpen op de gevel. Deze worden bekomen recht tegenover de oplegging van de overbrugging. Daarbij bedraagt de maximale trekkracht 0,336 MPa, daar waar de maximale breukspanning vastgesteld werd op 0,045 MPa.

Aan de linkerkanthoek van de oostgevel (in de noord-oost hoek) treden er ook grote spanningen op. Terwijl aan de rechterhoek de trekspanningen afnemen. De grote trekspanningen aan de linkerhoek komt er door de aanwezigheid van 2 vensternissen, welke de gevelwerking doet verzwakken. Op te merken is dat langs deze kant zich de scheurvorming voordoet!



Figuur 151: spanningsdiagrammen in doorsnede 3 voor normaalspanningen volgens de Z-richting

Doorsnede 4:

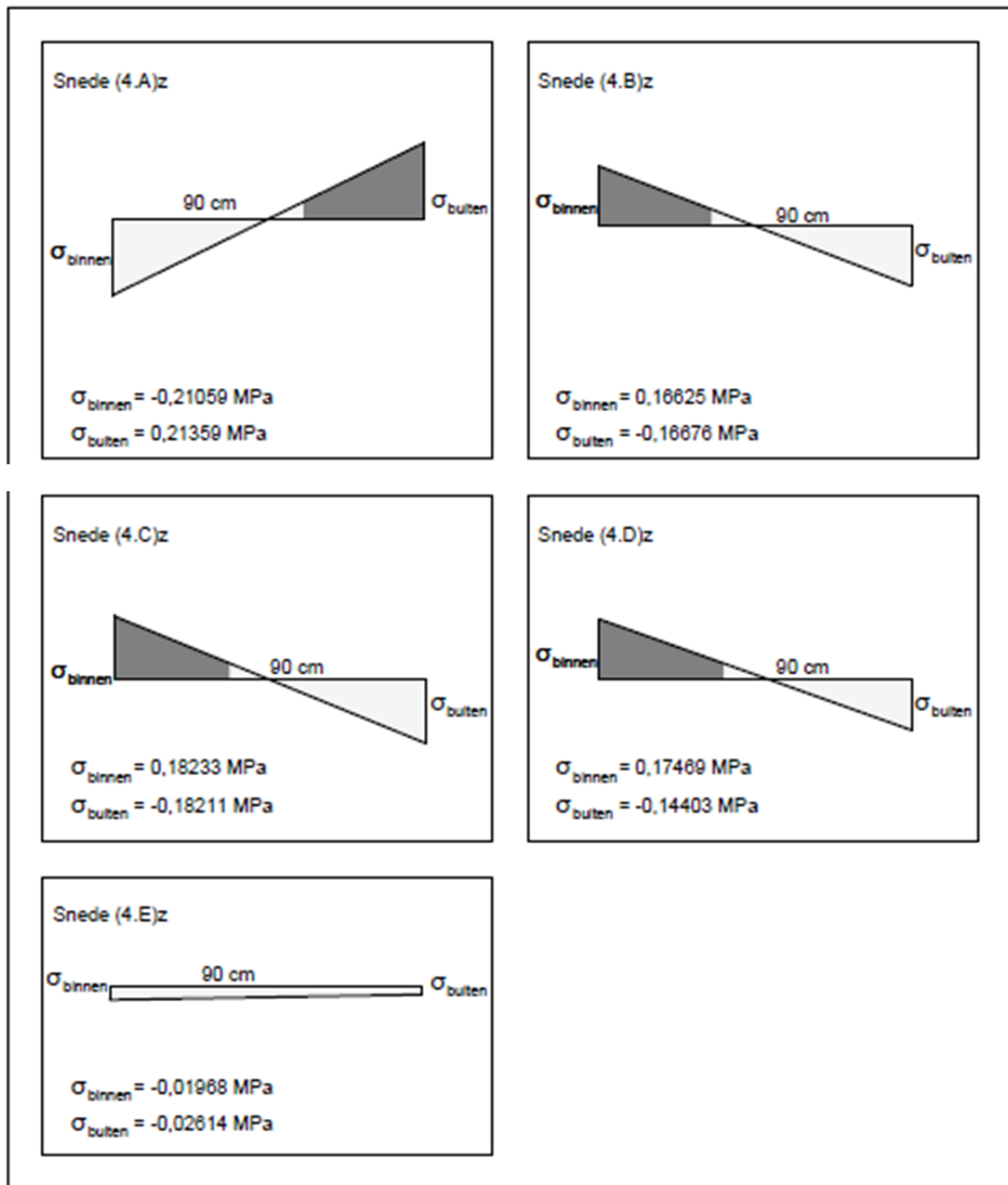


Figuur 152: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 4

Doorsnede 4 bevindt zich op hoogte van de tussenvloer tussen gelijkvloers en Gotische Zaal. De uitsparingen die in de muur te zijn zijn de kubusvormige uitsparingen voor oplegging van de tussenvloer. De vensternissen bevinden zich niet meer op deze hoogte. Er vormen zich terug trekspanningen in het midden van de binnenzijde van de muur, deze zijn iets lager dan de trekspanningen in doorsnede 3.

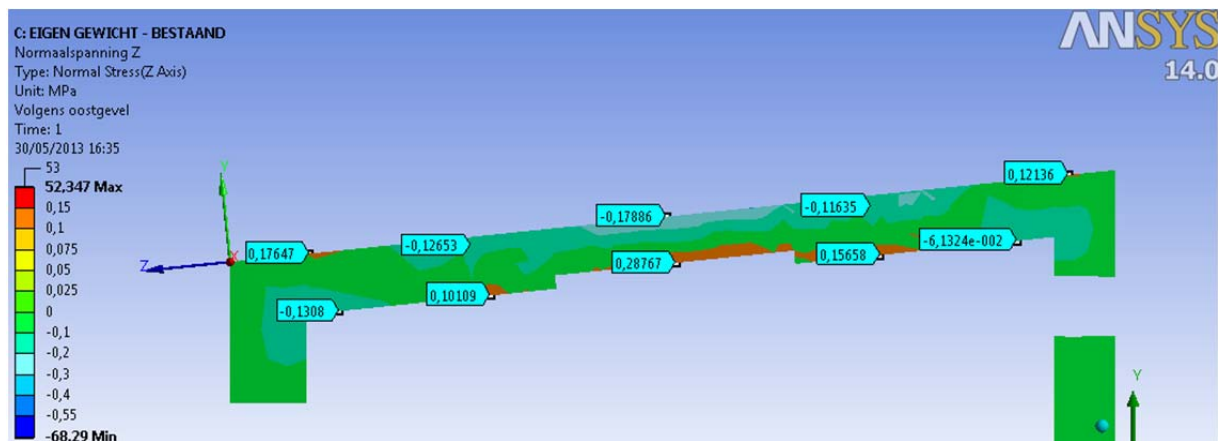
Tabel 22: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 4

Doorsnede 4	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,21359	-0,21059	0,42418	(4.A) _Z
Snede B	-0,16676	0,16625	0,33301	(4.B) _Z
Snede C	-0,18211	0,18223	0,36434	(4.C) _Z
Snede D	-0,14403	0,17469	0,31872	(4.D) _Z
Snede E	-0,02614	-0,01968	0,00646	(4.E) _Z



Figuur 153: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Z-richting

Doorsnede 5:

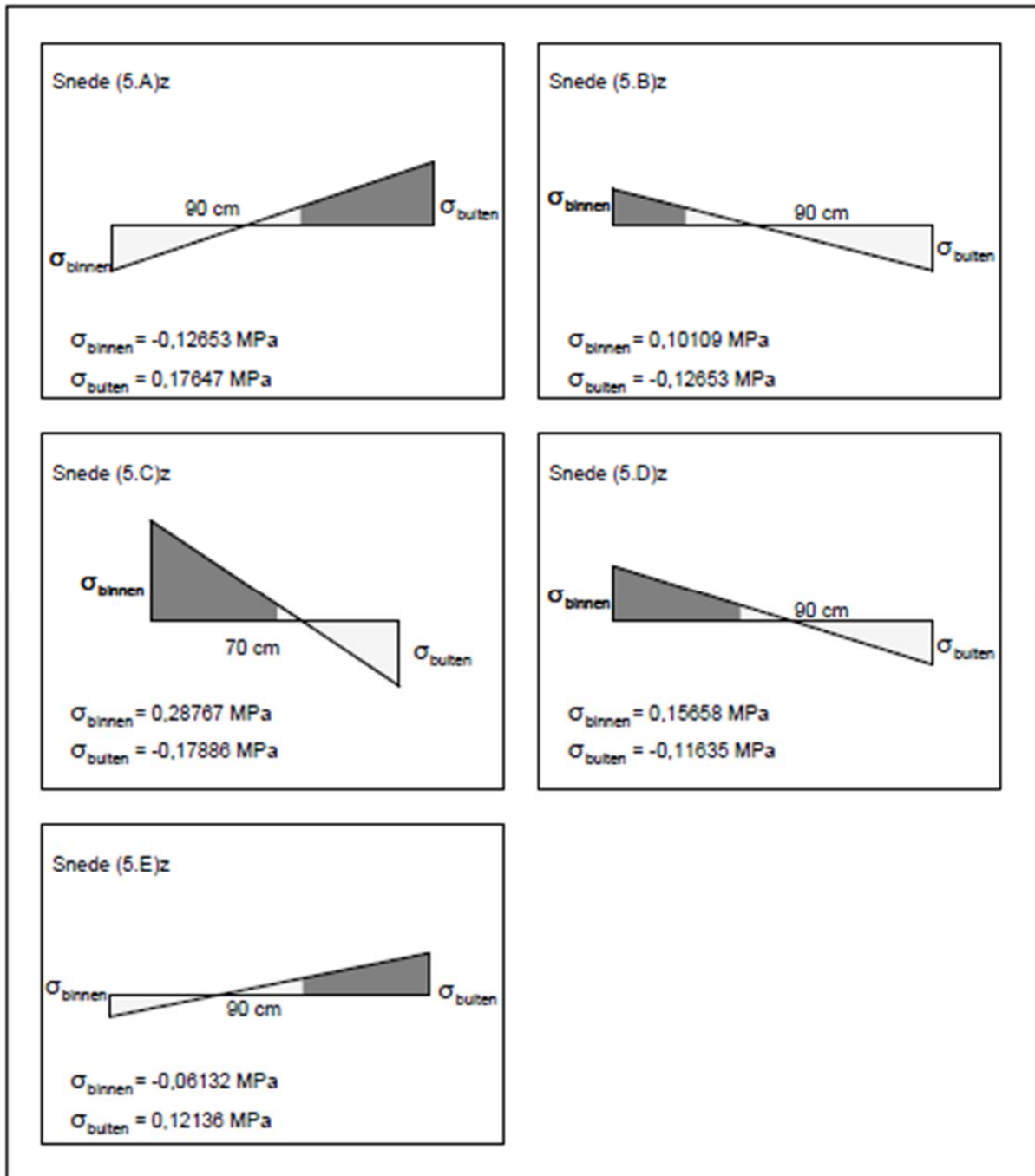


Figuur 154: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 5

Doorsnede 5 bevindt zich net boven de deuropeningen op de 1^{ste} verdieping. De spanningen zijn hier beduidend lager dan in doorsnede 3, waar ze het hoogst opliepen. Er is één piekspanning te noteren, die bevindt zich net boven de tussensteun tussen de twee deuropeningen. De spanningen die door de deuropeningen niet kunnen worden opgenomen en worden naar boven en onder herleid, dit verklaart de piekspanning van 0,28767MPa net boven de twee openingen.

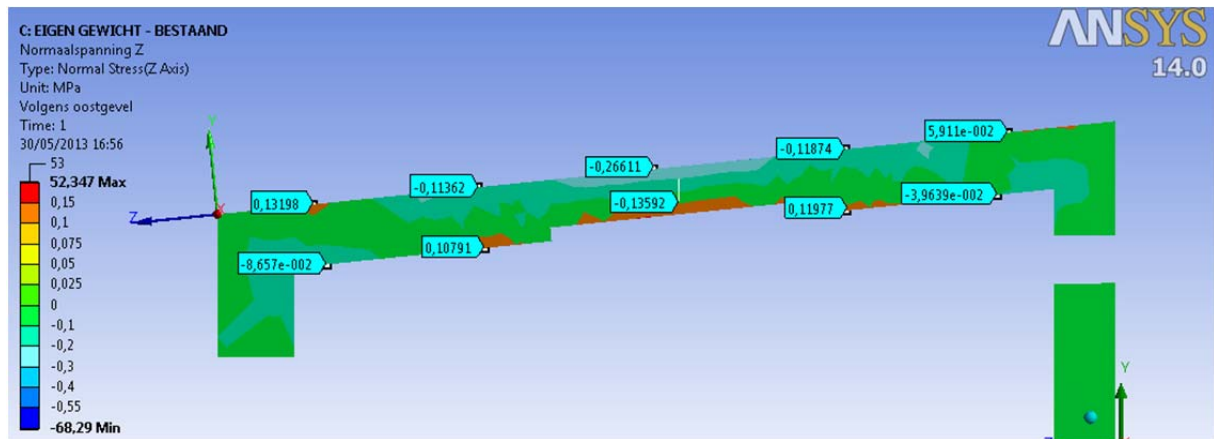
Tabel 23: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 5

Doorsnede 5	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,17647	-0,12653	0,30300	(5.A) _Z
Snede B	-0,12653	0,10109	0,22762	(5.B) _Z
Snede C	-0,17886	0,28767	0,46653	(5.C) _Z
Snede D	-0,11635	0,15658	0,27293	(5.D) _Z
Snede E	0,12136	-0,06132	0,18268	(5.E) _Z



Figuur 155: spanningsdiagrammen in doorsnede 5 voor normaalspanningen volgens de Z-richting

Doorsnede 6:

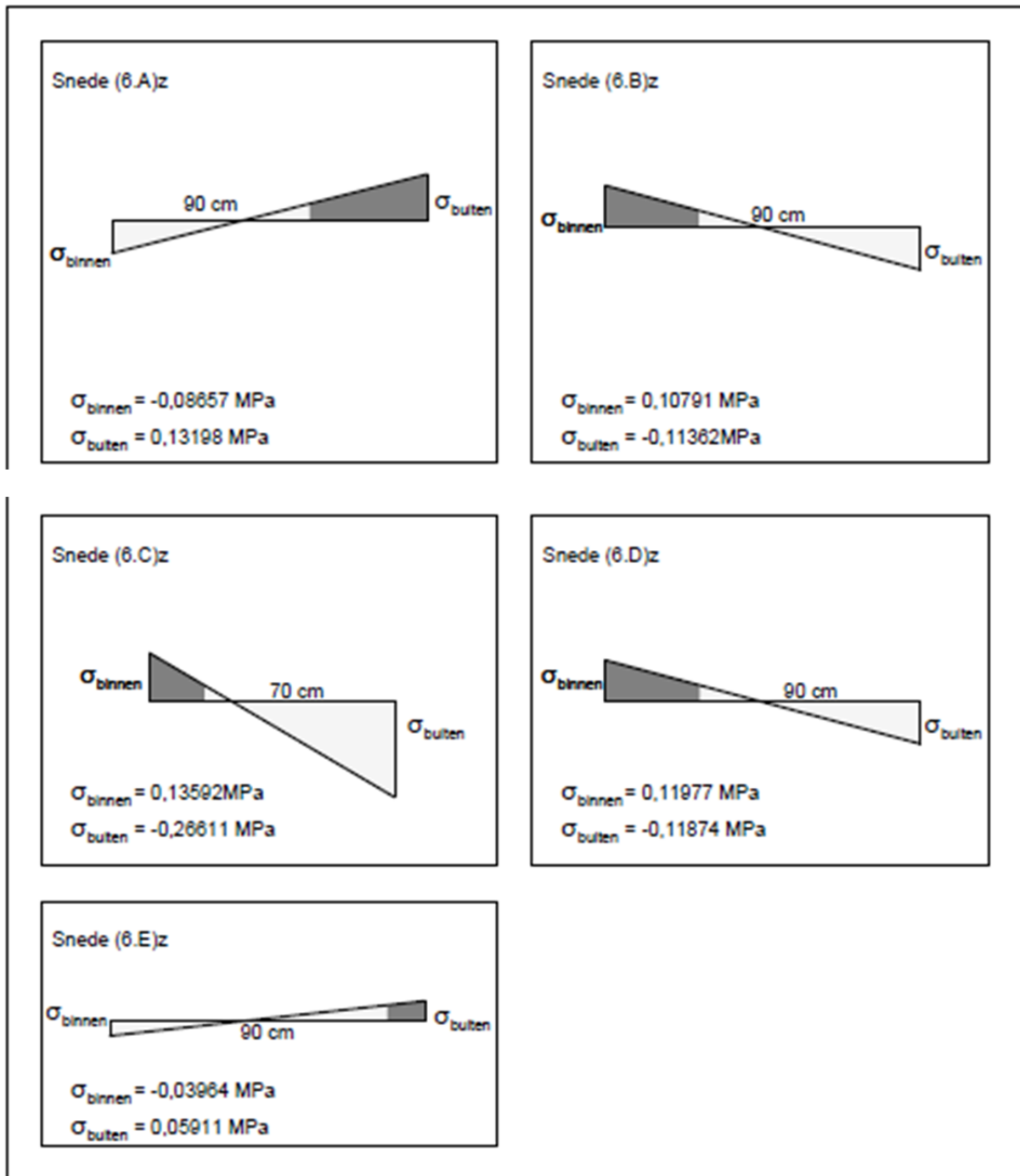


Figuur 156: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 6

Doorsnede 6 bevindt zich net boven de oplegpunten van de booggewelven van de afdekking van het keukentje. De trekspanningen zijn nog iets afgenomen ten opzichte van vorige doorsnede, maar de overschrijden nog steeds de breukspanning.

Tabel 24: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 6

Doorsnede 6	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,13198	-0,08657	0,21855	(6.A) _Z
Snede B	-0,11362	0,10791	0,22153	(6.B) _Z
Snede C	-0,26611	0,13592	0,40203	(6.C) _Z
Snede D	-0,11874	0,11977	0,23851	(6.D) _Z
Snede E	0,05911	-0,03964	0,09875	(6.E) _Z



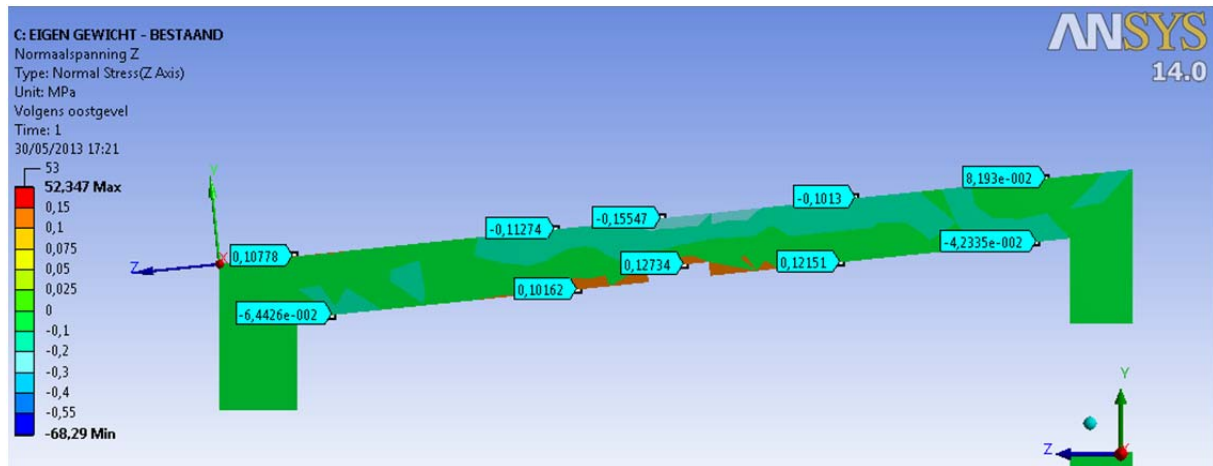
Figuur 157: spanningsdiagrammen in doorsnede 6 voor normaalspanningen volgens de Z-richting

Bij doorsnede 4, 5 en 6 is constant hetzelfde patroon waar te nemen. Aan de binnenzijde van de oostgevel treedt telkens een grote trekspanning op. Deze spanning neemt af naarmate de doorsnede hoger wordt genomen. Dit is te verklaren daar de boog van de muren van de overbrugging (wat de grootste belasting van de aangrijpende lasten is) aangrijpt op de punten in doorsnede 3. Hoe hoger de doorsnede dus wordt genomen, des te kleiner de invloed van deze krachtenwerking wordt.

De trekspanningen aan de linkerhoek blijven daarnaast ook nog aanwezig. Deze zijn aanzienlijk groter dan de spanningen aan de rechterhoek. De aanwezigheid van de vensternissen mogen aldusdanig niet onderschat worden. Waar de trekspanningen in de rechterhoek in doorsnede 6 bijna aanvaardbaar zijn, zijn deze in de linkerhoek nog veel te groot.

Doorsnede 7:

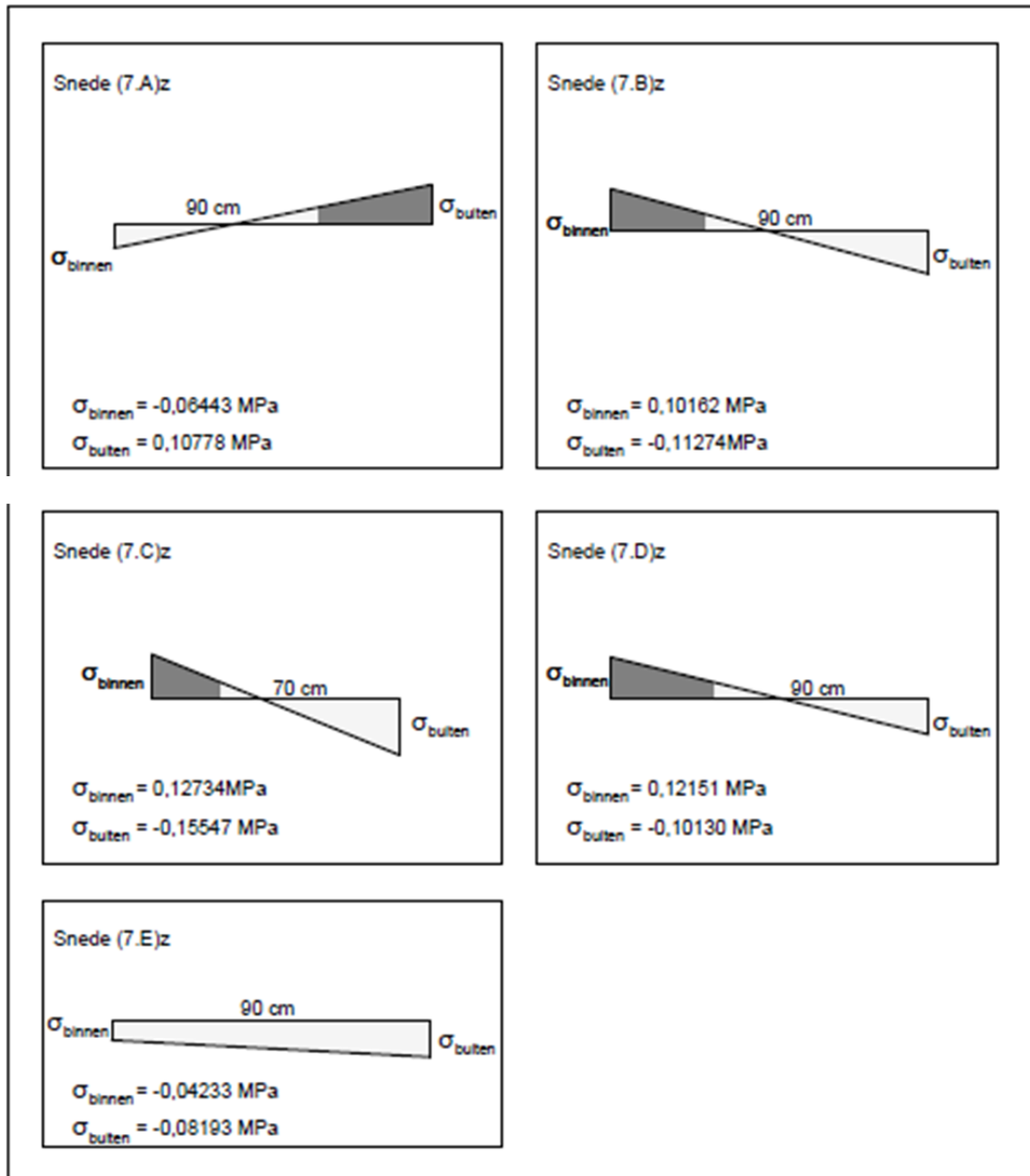
Doorsnede 7 bevindt zich bovenaan de vensternissen in de Gotische Zaal



Figuur 158: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 7

Tabel 25: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 7

Doorsnede 7	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,10778	-0,06443	0,17221	(7.A) _Z
Snede B	-0,11274	0,10162	0,21436	(7.B) _Z
Snede C	-0,15547	0,12734	0,28281	(7.C) _Z
Snede D	-0,1013	0,12151	0,22281	(7.D) _Z
Snede E	-0,08193	-0,04233	0,03960	(7.E) _Z

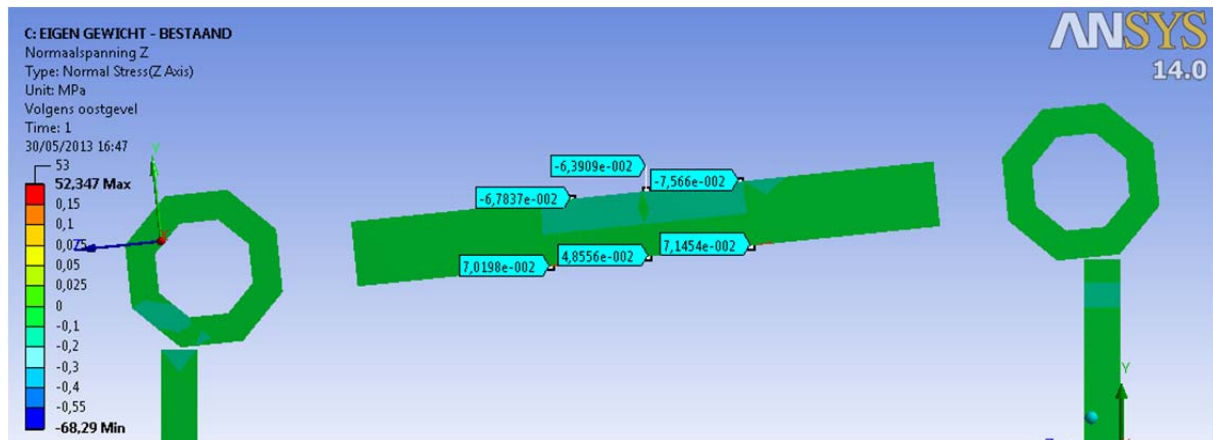


Figuur 159: spanningsdiagrammen in doorsnede 7 voor normaalspanningen volgens de Z-richting

Op doorsnede 7 is te zien de trekspanning verder afnemen. Van snede A tot D zijn deze nog te groot. Gaat men echter nog hoger in de gevel, dan verdwijnen deze trekspanningen verder. Bij snede E zijn op deze plaats geen trekspanningen meer aanwezig. Wordt er hoger gekeken dan doorsnede 7, zal de overbrugging naar de Burgerlijke Griffie geen invloed meer hebben op deze gevel.

Doorsnede 8:

Doorsnede 8 bevindt zich aan het begin van de topgevel.



Figuur 160: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 8

Tabel 26: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 8

Doorsnede 8	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	-0,06783	0,07010	0,13793	(8.A) _Z
Snede B	-0,06391	0,04855	0,11246	(8.B) _Z
Snede C	-0,07556	0,07145	0,14701	(8.C) _Z

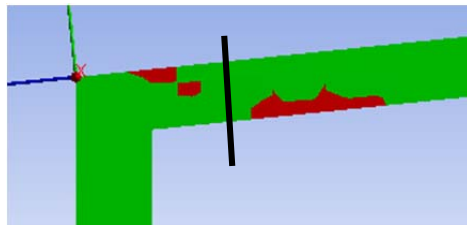
Door de puntlasten van het spantendak op de oostgevel, ontstaan er in doorsnede 8 kleine trekspanningen. In vergelijking met de andere trekspanningen in de gehele gevel zijn deze spanningen echter beperkt. Hoger in de topgevel verdwijnen deze spanningen terug.

10.2.6. Plaats van de scheur

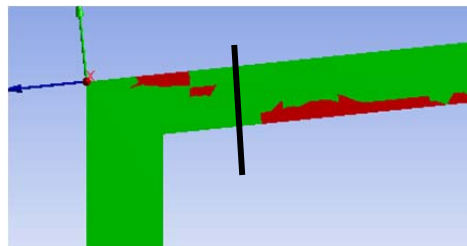
Indien de plaats van de scheur vergeleken wordt met de gemaakte analyses, blijkt dat de scheur in werkelijk niet optreedt op de plaats met de grootste trekspanningen. De plaats van de scheur is aangeduid op Figuur 161 en Figuur 162.

Daarbij kan gesteld worden dat de scheur zich voordoet aan de plaats van de vensternissen. Dit is ook te zien op het grote gevelplan. Deze vensternissen zorgen dus voor een grote verzwakking welke een grote invloed heeft op het totale spanningsverloop in deze gevel.

Daarbij treedt er op deze plaats aan de ene kant trekspanningen op aan de buitenzijde, waarnaast er rechts van de scheur trekspanningen optreden aan de binnenzijde. Op dit punt bevindt zich de plaats van de scheur.



Figuur 161: plaats van de scheur op doorsnede 2



Figuur 162: plaats van de scheur op doorsnede 4

Opmerking

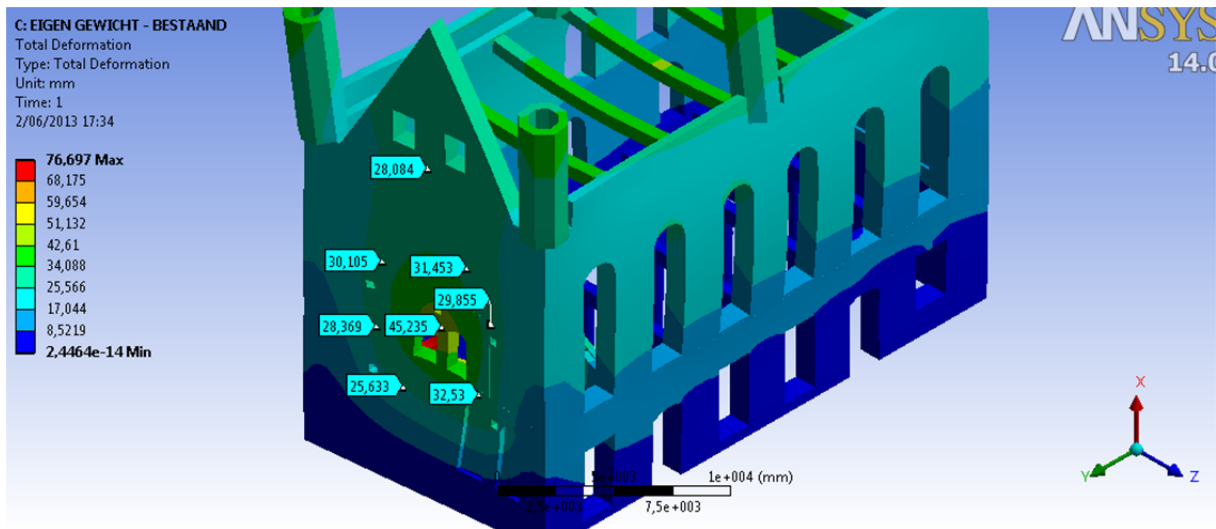
Alle bovenstaande spanningen werden berekend in ongescheurde toestand. De scheur is echter nu aanwezig in de gevel, welke als resultaat geeft dat deze muur niet meer als 1 massief geheel zal reageren. De kwalitatieve spanningsverdeling in de gevel kan dusdanig verschillen met werkelijkheid. Het patroon blijft daarin tegen hetzelfde.

10.2.7. Totale vervorming van de oostgevel

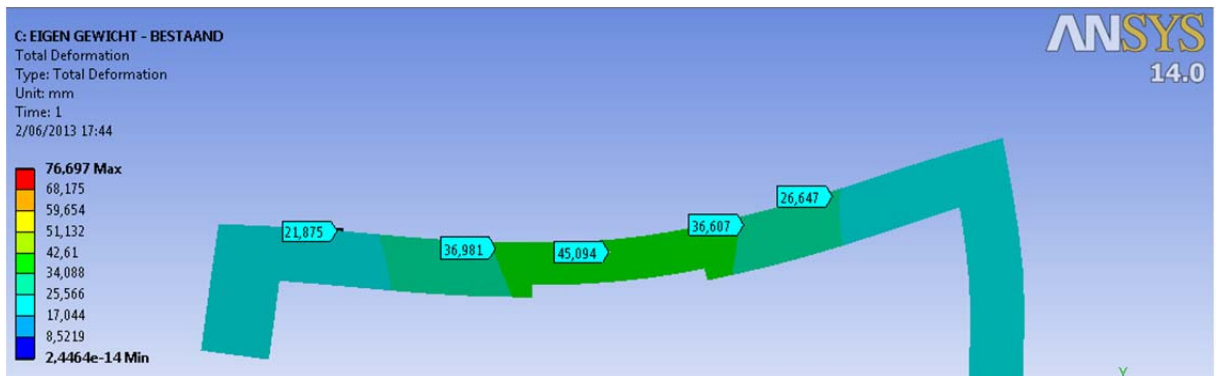
De totale vervorming is een scalaire kwantiteit (zie Figuur 163):

$$U_{totaal} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

U_x , U_y en U_z zijn vervormingen langs x, y en z as. De resultaten van U_x , U_y en U_z kunnen gevraagd worden onder de vervormingsrichting in ANSYS (Directional deformation).



Figuur 163: totale vervorming



Figuur 164: maximale vervorming Oostgevel, doorsnede

Bij de vervorming is duidelijk te zien dat de maximale vervorming zich voordoet op de plaats van de overbrugging (zie Figuur 164). De maximale doorbuiging bedraagt ongeveer 45mm. Deze buigt uit langs de kant van de Gotische Zaal. Indien er hoger gesneden wordt, neemt de doorbuiging ook af.

Er zijn geen verdere gegevens beschikbaar om deze resultaten te toetsen aan de werkelijkheid.

10.3. Aanbrengen van een oplossing

10.3.1. Voorstel oplossing

In bovenstaande analyses is het overduidelijk dat de overbrugging van de Burgerlijke Griffie een grote invloed heeft op de krachtenwerking in de oostgevel. Daarbij zijn de spatkrachten van de bogen volgens de Y –as het grootste probleem. De drukkrachten (krachten volgens de X –as) bedragen 290 kN, welke in mindere mate een probleem geven (zie Figuur 165).

De spatkrachten, welke loodrecht op de gevel staan, bedragen 258 kN. Deze krachten zorgen voor grotere problemen en dienen aldus voorkomen te worden.



Figuur 165: voorstelling bestaande gevelboog van de overbrugging in Powerframe

Een mogelijke oplossing is het plaatsen van trekstaven. Deze trekstaven worden aan de buitenzijde geplaatst. Ze overspannen van de oostgevel van de Gotische Zaal, naar de Burgerlijke Griffie. Dit ter hoogte van de oplegpunten van de boog van de gevel van de Burgerlijke Griffie (zie Figuur 166 en Figuur 167).

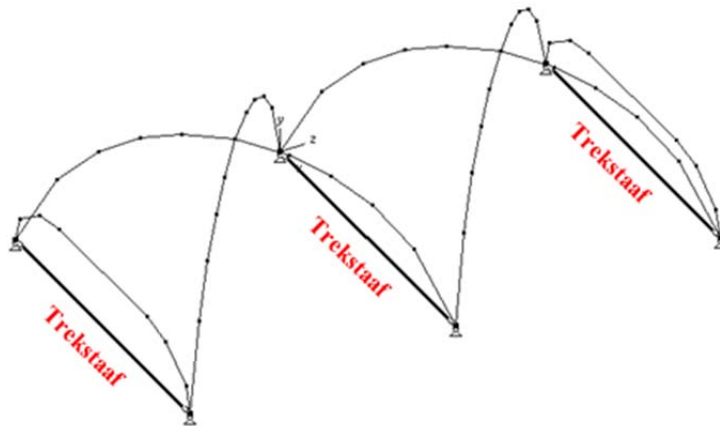
Daar de krachtenwerking in het vlak even groot en tegengesteld is, worden deze krachten (258 kN) via de trekstangen opgeheven.



Figuur 166: voorstelling ontworpen gevelboog van de overbrugging in Poweframe

Naast de boog van de gevel dienen ook de spatkrachten van de gewelven opgevangen te worden. Deze krachten bedragen 21,2 kN per steunpunt. Daaruit volgt de nodige trekkracht in de trekstaaf :

- 258 kN + 21,2 kN = 279,2 kN voor de uiterste aangrijpingspunten;
- 21,2 kN x 2 = 42,4 kN voor het middelste aangrijpingspunt.



Figuur 167: voorstelling oplossing trekstaven

Benodigde sectie:

Voor het aanbrengen van deze staven worden drie keer dezelfde secties gehanteerd. Afgaande van de gemaakte veronderstellingen en keuzes dient per trekstaaf maximaal 279,2 kN overgedragen te worden.

gebruikte staalsoort: S235

$$\sigma_{\text{staal}} = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Nodige sectie} = \frac{279200 \text{ kN}}{235 \text{ N/mm}^2} = 1188 \text{ mm}^2$$

$$\text{Diameter } d. = 2 \times \sqrt{1188 / \pi} = 39 \text{ mm}$$

Uit bovenstaande berekeningen blijkt dat de minimale diameter van de te plaatsen trekstaaf 40 mm dik moet zijn.

10.3.2. Resultaat oplossing

Globale gevelzichten:

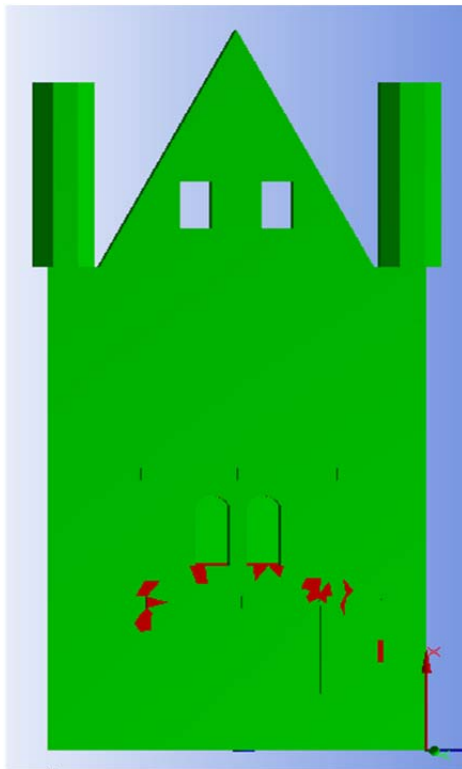


Figure 168: normal stresses along Z-axis, global exterior east facade with tie rods

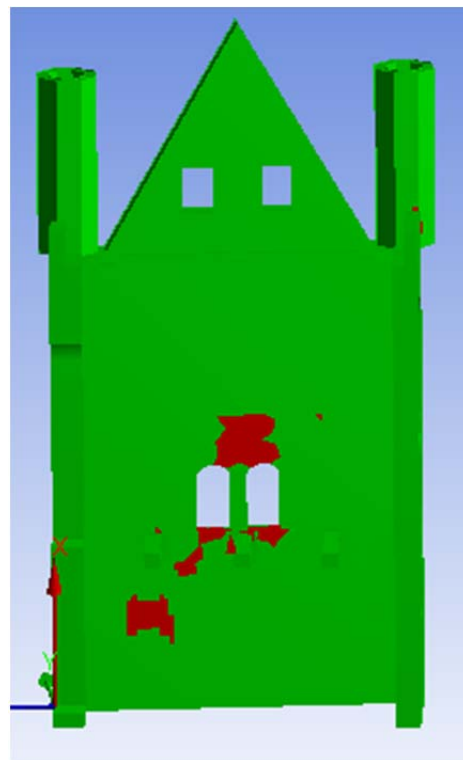
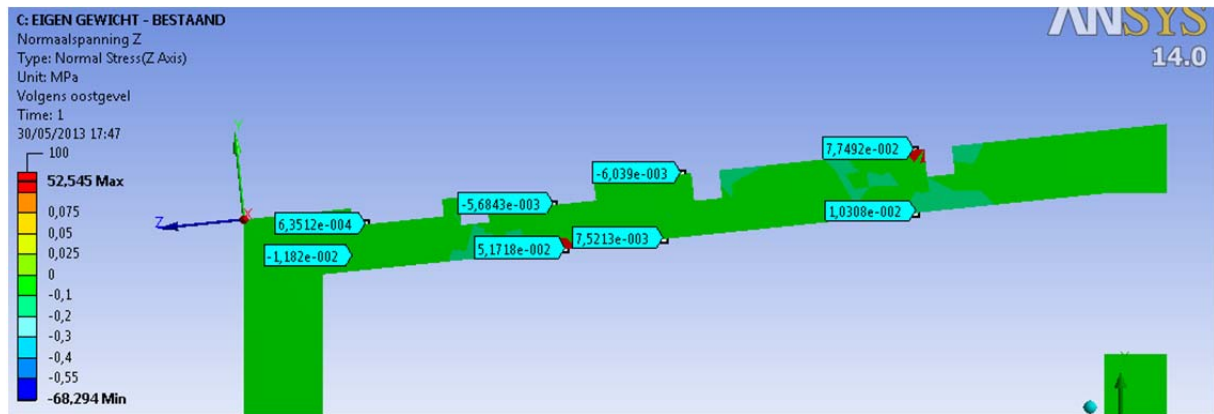


Figure 169: normal stresses along Z-axis, global interior east facade with tie rods

Indien de globale gevelzichten na het aanbrengen van de treksstaven in de overbrugging van de Blinde Ezelstraat worden vergeleken met de huidige situatie die voorgesteld is in Figuur 144 en Figuur 145, dan is een duidelijke spanningsafname te zien. Aan de buitenzijde zijn de trekspanningen zo goed als verdwenen (zie Figuur 168 en Figuur 169). Aan de binnenzijde zijn er nog spanningen aanwezig ter plaatse van de vensternissen en in het middelpunt van de opleg van de booggewelven van de keuken, daar is in deze analyse nog geen trekanker gestoken.

Op onderstaande pagina's worden de resultaten bekeken van deze analyse.

Doorsnede 3:

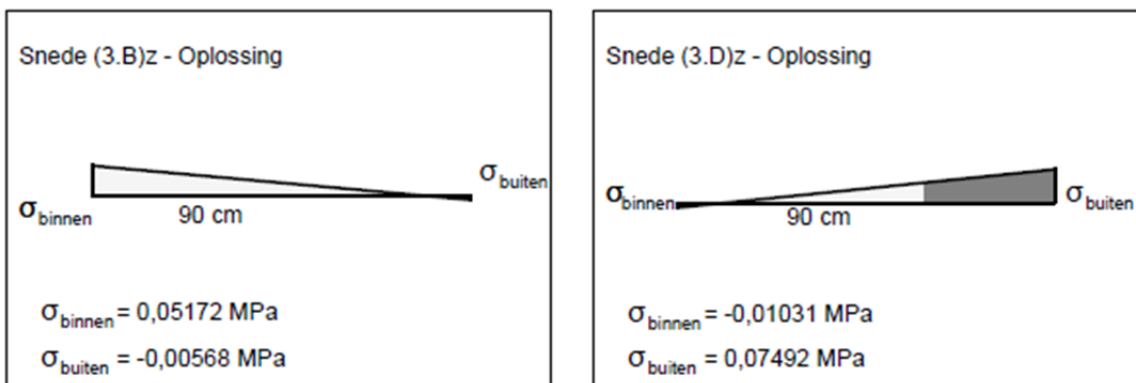


Figuur 170: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 3 ; na plaatsing trekstaven

Tabel 27: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 3 ; na plaatsing trekstaven

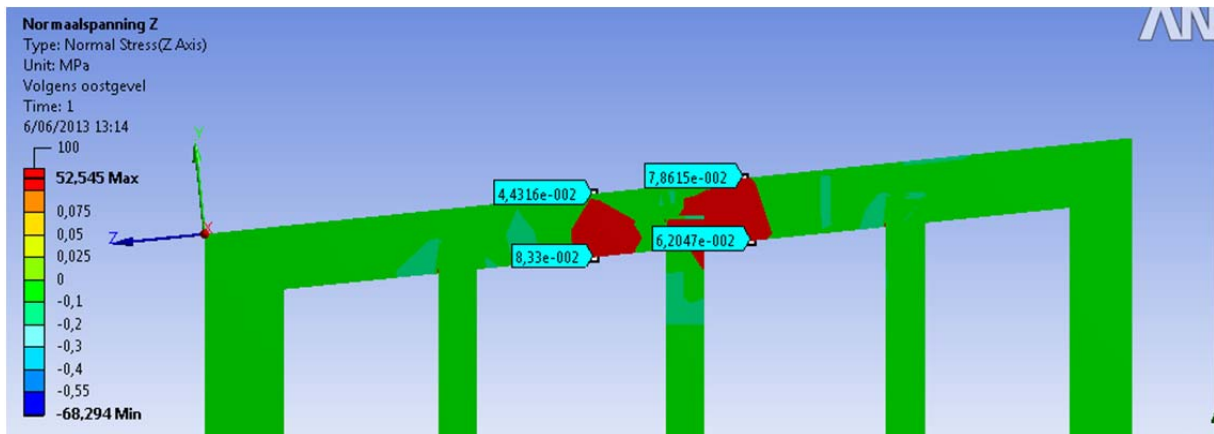
Doorsnede 3	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,00064	-0,01182	0,01246	(3.A) _Z
Snede B	-0,00568	0,05172	0,05740	(3.B) _Z
Snede C	-0,00604	0,00752	0,01356	(3.C) _Z
Snede D	0,07492	0,01031	0,08523	(3.D) _Z

Worden de waarden van Tabel 27 vergeleken met de waarden uit Tabel 21, is overduidelijk dat na het plaatsen van de trekankers de maximale trekspanningen van 0,336 MPa heel erg gereduceerd worden. Ze zijn plaatselijk nog te groot, namelijk 0,05172 MPa, daar waar de breukspanning 0,045 MPa bedraagt. Doch is dit een aanzienlijk resultaat in vergelijking met het bestaand model.



Figuur 171: spanningsdiagrammen in doorsnede 3 voor normaalspanningen volgens de Z-richting, na plaatsing van de trekstaven

Doorsnede 4:

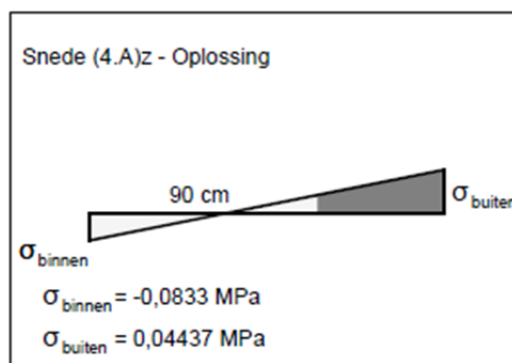


Figuur 172: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 4 ; na plaatsing trekstaven

Tabel 28: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 4 ; na plaatsing trekstaven

Doorsnede 4	σ_{buiten} (MPa)	σ_{binnen} (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{totaal}}$ (MPa)	Schets
Snede A	0,04437	0,08330	0,03893	(4.A) _Z
Snede B	0,07861	0,06205	0,10656	(4.B) _Z

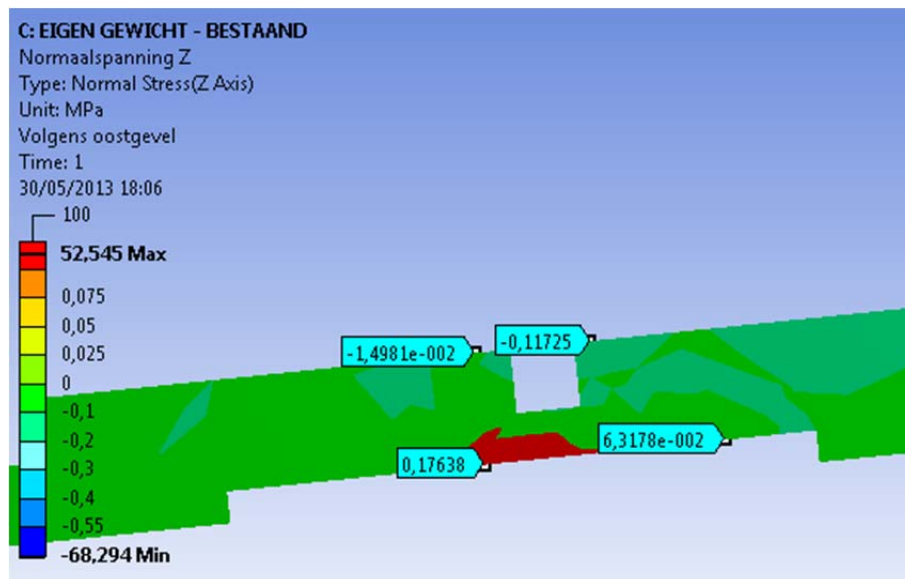
In Doorsnede 4 zijn er na het aanbrengen van de trekankers plaatselijk hele lichte trekspanningen. Deze spanningen situeren zich net bij de opleg van de middelste moerbalk. De spanningen zijn echter terug zo miniem dat ze te verwaarlozen zijn.



Figuur 173: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Z-richting, na plaatsing van de trekstaven.

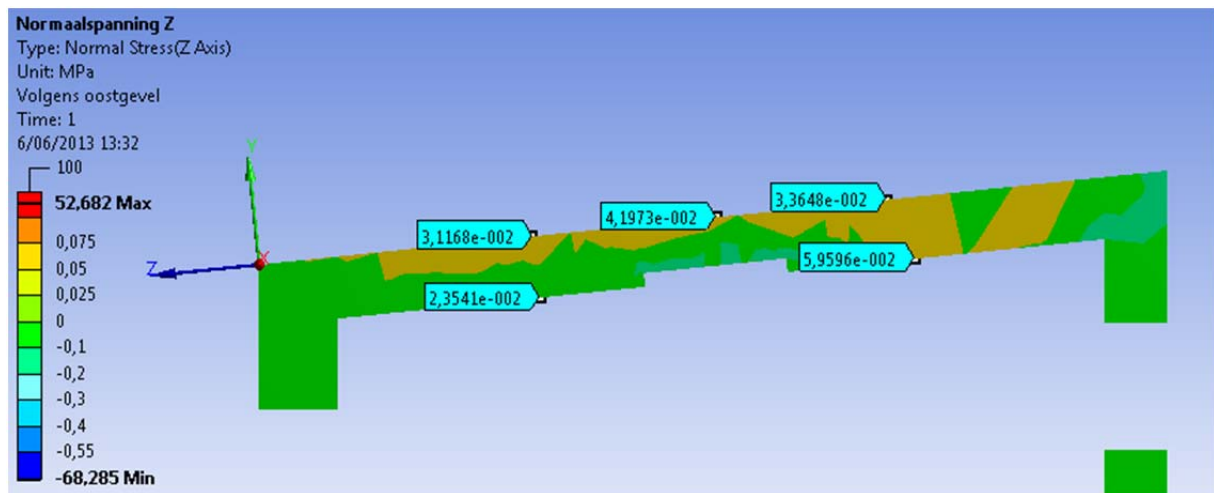
Doorsnede 5:

Als laatste doorsnede wordt doorsnede 5 onderzocht. Dit is de plaats waar de kruisribgewelven van afdekking keuken aangrijpen aan de gevel. In het opgelost model is daar geen trekanker binnen gestoken, daar de spatkracht van deze gewelven veel kleiner is dan de andere overbrugging. Onderstaande figuur (Figuur 174) geeft echter aan dat op deze plaats nog een grote piekspanning is aan de binnenzijde van de gevel. Deze piekspanning is maar plaatselijk, maar toch redelijk groot (0,18 MPa, daar de breukspanning 0,045 bedraagt).

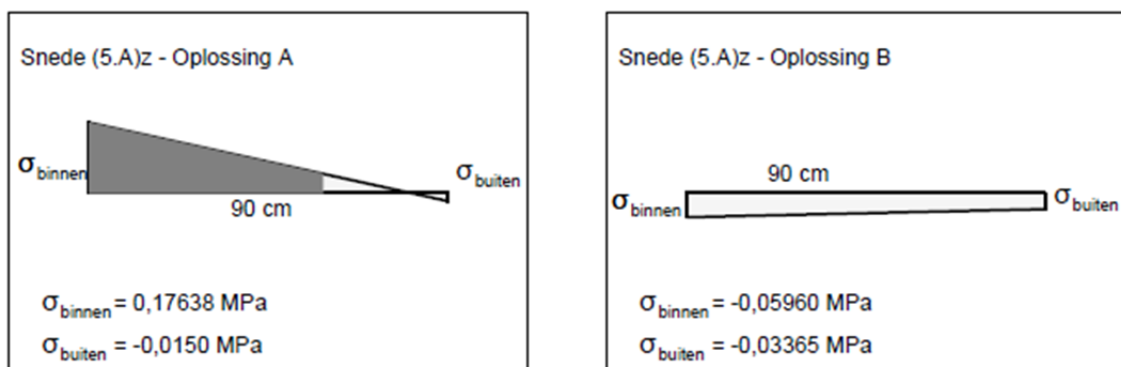


Figuur 174: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 5, situatie A ; na plaatsing trekstaven

Worden dezelfde berekeningen gedaan met een trekstaaf in het keukentje, vervalt deze spanningspiek. Er treden nog lichte trekspanningen op, maar deze spanningen zijn aanvaardbaar en afkomstig van de hoekpunten van de kruisribgewelven van afdekking keuken, waar geen trekstaven geplaatst worden op de plaats van de gevel. Echter zijn de spanningen in de gehele gevel zeker aanvaardbaar, waaruit geconcludeerd kan worden dat met het plaatsen van de trekstaven de oorzaak van de scheurvorming kan worden aangepakt.



Figuur 175: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 5, situatie B ; na plaatsing trekstaaf in keuken



Figuur 176: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Z-richting, na plaatsing van de trekstaven. Situatie A & B.

11. Conclusie

Het stadhuis van Brugge, met in het bijzonder de Gotische Zaal, is een belangrijk historisch erfgoed voor Vlaanderen. De goed bewaarde muurschilderingen in de Gotische Zaal worden echter geteisterd door scheurvorming. Na eerder uitgevoerde herstellingen zijn de scheuren terug aanwezig in de oostgevel. Daardoor is verder stabiliteitsonderzoek noodzakelijk, om zo de oorzaak van het scheuren te achterhalen, alvorens de herstellingen kunnen gebeuren.

Uit historisch onderzoek blijkt dat het Brugse stadhuis in verschillende fasen is gebouwd. Daarbij werd in de eerste fase het hoofdgebouw gebouwd, waarna er werd uitgebreid naar de Reie toe. De overbrugging naar de Burgerlijke Griffie werd later gerealiseerd. Uit het historisch onderzoek blijkt dat er eind de 19^e eeuw grote verbouwingen zijn uitgevoerd, dit onder leiding van dhr. Delacenserie. Daarbij werden alle tussenvloeren en dakconstructie vernieuwd. De schetsen van de verbouwingen zijn aanwezig in het stadsarchief.

Een overzicht van de scheuren was tot op heden niet beschikbaar. Met behulp van een totaalstation werd de gevel opgemeten. Met behulp van deze opmetingen kon een scheurenplan worden opgesteld. In combinatie met de gedetailleerde scheurrapporten per scheur, werd een goed overzicht gecreëerd van de schade aan de oostgevel. Uit deze schade blijkt dat de scheur zich voordoet aan de rand van de scheiding met de overbrugging van de Burgerlijke Griffie. Deze krachtenwerking werd dan ook verder bekeken tijdens de verschillende analyses.

Voor de analyses, uitgevoerd met de eindige elementensoftware ANSYS, dienden alle lasten inwerkend op het metselwerk bepaald te worden. De lasten werden berekend in uiterste grenstoestand, daar wordt vergeleken met de maximale breukspanningen. De lastendaling werd met de hand gemaakt, ondersteund door het programma Powerframe. Over de vloeren –en daksamenstellingen is bitter weinig geweten. Deze samenstellingen werden bepaald door visuele inspectie alsook door gemaakte inschattingen. De krachtenwerking ter hoogte van de vloeropleggen op het metselwerk was moeilijk in te schatten. Daarbij werd uitgegaan van de meest nadelige situatie. Omdat over deze verschillende zaken geen informatie beschikbaar waren, konden de precieze spanningen niet worden bepaald in de gevel. De gemaakte inschattingen werden daarbij wel zorgvuldig gekozen, waardoor de bekomen spanningen dicht in de buurt van de werkelijkheid gelegen zijn.

Naast de lastendaling diende ook een 3D –model te worden opgesteld. Dit model werd met veel nauwkeurigheid en precisie opgesteld, zodat er tijdens het verwerken in ANSYS geen foutmeldingen optraden. Naast de nauwkeurigheid dient er ook gelet te worden op de graad van vereenvoudiging. ANSYS is een programma dat veel rekencapaciteit vergt van de computer. Hoe meer het 3D –model in detail wordt getekend, hoe langer het rekenproces duurt. Er werd dus geopteerd om enkel de structuur te tekenen die bijdraagt tot het stabiliteitsonderzoek.

Na het correct instellen van alle parameters van het model, alsook het instellen van de juiste materiaaleigenschappen die werden bekomen uit een eerder gevoerd onderzoek, werden de lasten op het model geplaatst. Indien dit model correct is ingesteld, wordt het model berekend. De berekende spanningen in de noord-, zuid- en westgevel werden vergeleken met spanningen die met de hand werden bepaald. Deze spanningen liggen in dezelfde grootorde, daarbij kan geconcludeerd worden dat de spanningen in het model representatief zijn met de berekende spanningen.

Tijdens de analyse werden de normaalspanningen in de X, Y en Z richting bekeken. In de X richting treden er plaatselijk trekspanningen op die de breukspanning zal overschrijden. Deze spanningen zijn het gevolg aan de excentrische belasting van de booggewelven. De mate waarin de breukspanningen overschreden worden is echter beperkt. De oorzaak van de scheurvorming is niet aan deze spanningen te wijten.

Ook in de Y-richting treden plaatselijke trekspanningen op die de breukspanning overschrijden. De correctheid van de analyse in de Y-richting valt echter te betwijfelen aangezien geen rekening wordt gehouden met de tussenvloer die deze spanningen deels zal reduceren. De werkelijke spanningen in Y-richting zullen dus lager liggen dan de berekende, rekening houdend met de mindere mate waarin de breukspanningen overschreden worden, zijn de Y-spanningen geen probleem met betrekking tot de scheurvorming.

Bij onderzoek in de Z-richting blijkt dat de waarden van de normaalspanningen volgens de Z-as veel te groot zijn. Deze grote spanningen zijn te wijten aan de spatkrachten van de booggewelven van het brugje over de Blinde Ezelsstraat. De spatkrachten zorgen ervoor dat de oostgevel van het stadhuis naar binnen wordt gedrukt. De oostgevel dient hierdoor een moment op te nemen waardoor druk- en trekspanningen ontstaan binnen de gevel. De drukspanningen zijn aanvaardbaar, de breukspanningen voor trek worden zwaar overschreden. Dit kan aan de oorzaak van de scheurvormingen liggen.

Een voorgestelde oplossing is het plaatsen van trekankers. Deze ankers worden loodrecht op de gevel geplaatst tot aan de Burgerlijke Griffie. De diameter, bepaald door de reactiekrachten van de gemaakte inschattingen, bedraagt daarbij minimaal 40mm. Er dienen 4 ankers geplaatst te worden. In de afdekking van de Blinde Ezelstraat dient er in iedere boogoorsprong een staaf geplaatst te worden. In het keukentje wordt enkel een trekstaaf geplaatst in de middelste boogoorsprong. Na het aanbrengen van deze ankers worden de maximale breukspanningen niet meer overschreden.

Lijst met Figuren

Figuur 1: ligging stadhuis (Gilté & Vanwalleghem, 1999).....	10
Figuur 2: stadhuis Brugge	11
Figuur 3: hoofdgebouw stadhuis (gebouwendienst stad Brugge, 1992)	14
Figuur 4: oostgevel.....	15
Figuur 5: Brugs travee.....	16
Figuur 6: beelden en wapenschilden aan noordgevel.....	17
Figuur 7: kruisribgewelf.....	18
Figuur 8: grondplan gelijkvloers met aanduiding van travee en beuk(gebouwendienst stad Brugge, 1992).....	19
Figuur 9: inkomhal met aanduiding van linker spitsboogportaal	20
Figuur 10: draagconstructie van tussenmuur tot westelijke muur (Joost Devree, 2013).....	21
Figuur 11: Dorische zuilen	22
Figuur 12: draagsconstructie van tussenmuur tot oostelijke muur	22
Figuur 13: gepolychromeerde houten kruisribgewelven	23
Figuur 14: westelijk muur Gotische Zaal	24
Figuur 15: oostelijke muur Gotische Zaal	24
Figuur 16: maaswerk van dwarsliggers en langsligger boven Gotische Zaal (stadsarchief Brugge, 2013).....	25
Figuur 17: detail verankering langsligger; detail verankering dwarsligger (stadsarchief Brugge, 2013)	25
Figuur 18: doorsnede dwarsligger (stadsarchief Brugge, 2013).....	26
Figuur 19: zolder	27
Figuur 20: grondplan spantendak (stadsarchief Brugge, 2013).....	28
Figuur 21: vorm spanten.....	28
Figuur 22: krachtenoverdracht van dak naar buitenmuur (stadsarchief Brugge, 2013)	29
Figuur 23: grondplan overbrugging Blinde Ezelstraat	30
Figuur 24: gevels overbrugging	31
Figuur 25: draagconstructie overbrugging	32
Figuur 26: dak overbrugging.....	32
Figuur 27: Ronse (Google maps, 2013)	33
Figuur 28: verschillende soorten metselwerk uit steen: (a) steenslagmetselwerk; (b) arduinmetselwerk; (c) metselwerk uit gevormde hardsteen.....	34
Figuur 29: verschillende soorten verbanden: (a) Amerikaans verband; (b) Engels verband; (c) Vlaams verband; (d) hoopverband; (e) draagverband	34

Figuur 30: algemeen spanning-rekdiagram	36
Figuur 31: opstelling drukproef loodrecht op langse voegen	37
Figuur 32: spanning-rekdiagram drukproef loodrecht op langse voegen	38
Figuur 33 opstelling drukproef evenwijdig op langse voegen	39
Figuur 34: spanning-rekdiagram drukproef evenwijdig met de langse voegen	40
Figuur 35: opstelling trekproef loodrecht op de langse voegen	41
Figuur 36: spanning-rekdiagram trekproef loodrecht op de langse voegen	42
Figuur 37: opstelling trekproef evenwijdig met de langse voegen.....	43
Figuur 38: spanning-rekdiagram trekproef evenwijdig met de langse voegen.....	44
Figuur 39: opstelling horizontale doorbuigproef loodrecht op het muurvlak.....	45
Figuur 40: scheur boven opening (Van Gemert & Ignoul, 2001)	47
Figuur 41: zettingscheuren (Van Gemert & Ignoul, 2001).	48
Figuur 42: scheurvorming ten gevolge van zonbestraling (Van Gemert & Ignoul, 2001).....	48
Figuur 43: scheurvorming bij kruisribgewelf (Van Gemert & Ignoul, 2001).....	49
Figuur 44: scheurvorming bij vloerplaat dak (Van Gemert & Ignoul, 2001).....	50
Figuur 45: scheurvorming in Sint Quintinuskerk (Van Gemert & Ignoul, 2001)	52
Figuur 46: kalk-puzzolaan-cement specie in combinatie met mechanische verankering (Van Gemert & Ignoul, 2001)	53
Figuur 47: (a) micromodellering; (b) macromodellering	58
Figuur 48: opstelpunt totaalstation in Gotische Zaal.....	63
Figuur 49: opstelpunt totaalstation op gelijkvloers	63
Figuur 50: opstelpunt totaalstation op de zolder	63
Figuur 51: opmeting oostgevel: scheurverloop	66
Figuur 52: grondplan kelder bij scheurinspectie	67
Figuur 53: scheurinspectie kelder.....	67
Figuur 54: detailscheur gelijkvloers	68
Figuur 55: opmeting scheurbreedte met Triconsul –kaartje	70
Figuur 56: linkerscheur in de Gotische Zaal	71
Figuur 57: middelste scheur zolderverdieping	72
Figuur 58: opmeten scheurbreedte zolder m.b.v. scheurkaartje	73
Figuur 59: opmeten scheurbreedte zolder m.b.v. digitale schuifmaat.....	73
Figuur 60: opmeten scheur met behulp van de Huggenberger.....	75
Figuur 61: grondplan spantendak	83
Figuur 62: dakspant	85

Figuur 63: steunpunt dakspant	86
Figuur 64: dakspant powerframevoorstelling.....	87
Figuur 65: karakteristieke waarden voor sneeuwbelasting op de grond.....	89
Figuur 66: grafiek basiswinddruk(q_b).....	91
Figuur 67: C_{pe} waarden.....	92
Figuur 68: permanente lasten dakspant	92
Figuur 69: mobiele lasten dakspant.....	93
Figuur 70: reactie krachten dakspant.....	93
Figuur 71: tussenvloer 0,1	95
Figuur 72: tussenvloer 0,2.....	95
Figuur 73: opleg moerbalken vloer 0,1	97
Figuur 74: opleg moerbalken vloer 0,2	98
Figuur 75: onderkant gemetselde booggewelven tussenvloer 1 ^{ste} verdieping –zolder	98
Figuur 76: dwarsnede tussenvloer 1 ^{ste} verdieping - zolder	99
Figuur 77: langssnede tussenvloer tussenvloer 1 ^{ste} verdieping-zolder	99
Figuur 78: bovenaanzicht tussenvloer 1 ^{ste} verdieping-zolder.....	99
Figuur 79: Burgelijk griffie foto voorkant.....	101
Figuur 80: Burgelijke griffie, foto achterkant	102
Figuur 81: voorstelling gewelf burgelijke griffie	103
Figuur 82: reactiekrachten gewelf burgelijke griffie.....	104
Figuur 83: kruisgewelf (afdekking keuken van de Burgerlijke Griffie).....	105
Figuur 84: opleg middelpunt kruisgewelf (keuken)	106
Figuur 85: opleg middelpunt kruisgewelf (keuken)	106
Figuur 86: Burgelijke griffie, foto achterkant	107
Figuur 87: boogwerking zijgevels burgelijke griffie.....	108
Figuur 88: schets gelijkvloer stadhuis	111
Figuur 89: gevels Noord-oostzicht	113
Figuur 90: tussenvloer gelijkvloers – Gotische Zaal - werkelijkheid.....	114
Figuur 91: tussenvloer gelijkvloers - Gotische Zaal – schematisch	114
Figuur 92: tussenvloer Gotische Zaal – zolder - werkelijkheid.....	115
Figuur 93: tussenvloer Gotische Zaal - zolder – schematisch	115
Figuur 94: geschetste situatie Delacenserie.....	116
Figuur 95: 3D -model (opleg 40x65cm).....	116
Figuur 96: oplegpunten overbrugging Burgerlijke Griffie	117

Figuur 97: noordgevel	118
Figuur 98: zuidgevel.....	118
Figuur 99: westgevel	119
Figuur 100: voorstelling tussenvloer boven gelijkvloers	121
Figuur 101: schematische voorstelling ANSYS.....	123
Figuur 102: lengte-eenheid.....	124
Figuur 103: eenheidsstelsels.....	125
Figuur 104: bepaling assenkruis bij exporteren naar ACIS-bestand	126
Figuur 105: voorstelling gemene vlakken welke afzonderlijk dienen te zijn.....	127
Figuur 106: ingeladen ANSYS-model, stadhuis Brugge.....	127
Figuur 107: afzonderlijke elementen die samen 1 'part' vormen.....	128
Figuur 108: ingeven materiaaleigenschappen	128
Figuur 109: voorbeeld gegeven Gotische Zaal.....	130
Figuur 110: contactgegevens.....	132
Figuur 111: belemmerde vrijheidsgraden met contact aan de grond.....	132
Figuur 112: instellen meshgrootte.....	133
Figuur 113: Relevance -100 <-> Figuur 114: Relavance 99	134
Figuur 115: Mesh Controle paneel.....	134
Figuur 116: ANSYS instelling na de 'Sizing Control'.....	136
Figuur 117: 3D-model met mesh.....	137
Figuur 118: aansluiting detail A	138
Figuur 119: aansluiting detail B	138
Figuur 120: aansluiting detail C	138
Figuur 121: Skewness principe	139
Figuur 122: weergave Skewness -factoren.....	139
Figuur 123: statistische gegevens van de mesh.....	140
Figuur 124: voorstelling analyses : Thermische analyse.....	141
Figuur 125: temperatuurverloop oostgevel - halfweg gelijkvloers	142
Figuur 126: temperatuurverloop oostgevel – onderkant Gotische Zaal	142
Figuur 127: temperatuurverloop oostgevel - bovenkant Gotische Zaal	142
Figuur 128: invoegen gravitatiekracht.....	143
Figuur 129: ingevoerde lasten 3D -model.....	145
Figuur 130: berekende normaalspanningen ANSYS	147
Figuur 131: doorsneden oostgevel	149

Figuur 132: convergentie assenstelsel	150
Figuur 133: theoretische krachtenwerking gevel	151
Figuur 134: krachtenwerking volgens belasting F_x	152
Figuur 135: krachtenwerking volgens belasting F_y	153
Figuur 136: doorsnede 1	153
Figuur 137: doorsnede 3	153
Figuur 138: doorsnede 4.....	154
Figuur 139: doorsnede 5	154
Figuur 140: spanningsdiagrammen in doorsnede 5 voor normaalspanningen volgens de X-richting... 155	155
Figuur 141: normaalspanning volgens de Y-as doorsnede 4, ter hoogte van opleg tussenvloer	155
Figuur 142: detail normaalspanningen volgens Y –as; doorsnede 4	156
Figuur 143: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Y-richting. 157	157
Figuur 144: normaalspanningen volgens Z-as, globale buitenzijde oostgevel.....	158
Figuur 145: normaalspanningen volgens Z-as, globale binnenzijde oostgevel.....	158
Figuur 146: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 1	159
Figuur 147: spanningsdiagrammen in doorsnede 1 voor normaalspanningen volgens de Z-richting ... 160	160
Figuur 148: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 2	161
Figuur 149: spanningsdiagrammen in doorsnede 2 voor normaalspanningen volgens de Z-richting ... 162	162
Figuur 150: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 3	163
Figuur 151: spanningsdiagrammen in doorsnede 3 voor normaalspanningen volgens de Z-richting ... 164	164
Figuur 152: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 4	165
Figuur 153: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Z-richting ... 166	166
Figuur 154: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 5	167
Figuur 155: spanningsdiagrammen in doorsnede 5 voor normaalspanningen volgens de Z-richting ... 168	168
Figuur 156: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 6	169
Figuur 157: spanningsdiagrammen in doorsnede 6 voor normaalspanningen volgens de Z-richting ... 170	170
Figuur 158: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 7	171
Figuur 159: spanningsdiagrammen in doorsnede 7 voor normaalspanningen volgens de Z-richting ... 172	172
Figuur 160: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 8	173
Figuur 161: plaats van de scheur op doorsnede 2.....	174
Figuur 162: plaats van de scheur op doorsnede 4.....	174
Figuur 163: totale vervorming.....	175
Figuur 164: maximale vervorming Oostgevel, doorsnede	175
Figuur 165: voorstelling bestaande gevelboog van de overbrugging in Powerframe	176

Figuur 166: voorstelling ontworpen gevelboog van de overbrugging in Poweframe	176
Figuur 167: voorstelling oplossing trekstaven	177
Figuur 168: normaalspanningen volgens Z-as, globale buitennkant oostgevel met trekstaven	178
Figuur 169: normaalspanningen volgens Z-as, globale binnenkant oostgevel met trekstaven	178
Figuur 170: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 3 ; na plaatsing trekstaven	179
Figuur 171: spanningsdiagrammen in doorsnede 3 voor normaalspanningen volgens de Z-richting, na plaatsing van de trekstaven.....	179
Figuur 172: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 4 ; na plaatsing trekstaven	180
Figuur 173: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Z-richting, na plaatsing van de trekstaven.....	180
Figuur 174: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 5, situatie A ; na plaatsing trekstaven ...	181
Figuur 175: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 5, situatie B ; na plaatsing trekstaaf in keuken	182
Figuur 176: spanningsdiagrammen in doorsnede 4 voor normaalspanningen volgens de Z-richting, na plaatsing van de trekstaven. Situatie A & B.....	182

Lijst met Tabellen

Tabel 1: meetresultaten Huggenberger gelijkvloers.....	69
Tabel 2: meetresultaten Huggenberger Gotische Zaal	71
Tabel 3: meetresultaten Huggenberger zolder.....	73
Tabel 4: scheurbreedtes zolder	73
Tabel 5: beweging scheur gelijkvloers	74
Tabel 6: beweging scheur Gotische Zaal.....	74
Tabel 7: beweging scheuren zolder	75
Tabel 8: gebruikte symbolen powerframe.....	87
Tabel 9: schatting Permanente daklastdakt	88
Tabel 10: vormcoëfficiënt afhankelijk van de dakhelling	89
Tabel 11 hoofdafmetingen stadhuis.....	112
Tabel 12: rekentabel eigengewicht gevels.....	120
Tabel 13: rekentabel spanningen gevels.....	122
Tabel 14: materiaaleigenschappen metselwerk	129
Tabel 15: materiaaleigenschappen eikenhout.....	129
Tabel 16: gedrag van de mogelijke contacten	131
Tabel 17: belastingswaarden ANSYS-model.....	144
Tabel 18: normaalspanningen volgens Y -as; doorsnede 4	156
Tabel 19: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 1.....	159
Tabel 20: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 2.....	161
Tabel 21: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 3.....	163
Tabel 22: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 4.....	165
Tabel 23: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 5.....	167
Tabel 24: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 6.....	169
Tabel 25: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 7.....	171
Tabel 26: normaalspanningen volgens Z-as; doorsnede 8.....	173
Tabel 27: normaalspanningen volgensvolgens Z-as in doorsnede 3 ; na plaatsing trekstaven.....	179
Tabel 28: normaalspanningen volgens Z-as in doorsnede 4 ; na plaatsing trekstaven	180

Lijst met scheurrapporten

Scheurrapport 1: oostelijke muur stadhuis Brugge – gelijkvloers.....	77
Scheurrapport 2: oostelijke muur stadhuis Brugge – 1 ^{ste} verdieping, scheur 1	78
Scheurrapport 3: : oostelijke muur stadhuis Brugge – 1 ^{ste} verdieping, scheur 2	79
Scheurrapport 4: : oostelijke muur stadhuis Brugge – 2e verdieping, scheur 1	80
Scheurrapport 5: : oostelijke muur stadhuis Brugge – 2e verdieping, scheur 2	81
Scheurrapport 6: : oostelijke muur stadhuis Brugge – 2e verdieping, scheur 3	82

Referentielijst

Cursussen/eindwerken

Pollefliet, L. (2009). *Een eindwerk schrijven*. Gent: Academia Press.

Vandedrinck, F. (2012). *Stabiliteit 3: Rekentechnieken*. Cursus, Hogeschool Gent, Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen.

Deruyter, G. (2012). *Topografie II*. Cursus, Hogeschool Gent, Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen.

De Backer, L. & De Wolf, J. (2009). *Restauratiestudie van de Onze-Lieve-Vrouwekerk te Brugge*. Afstudeerwerk, Hogeschool Gent, Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen.

Duyck, J. Vanderlinde, B. & Vandewyngaerde, C. (2011). *Onderzoek naar het gebruik van eindige elementenmethodes ANSYS (Workbench) en 3D modelleringen bij de studie van de stabiliteit van metselwerkconstructies voor de berekening van vervormingen van de constructie onder dynamische lasten*. Vak overschrijdend project, Hogeschool Gent, Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen.

Van Gemert, D. *Structurele herstellingen van scheuren in metselwerk*. Case Study, K.U.Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde.

Stad Brugge (2012). *Standzekerheidsonderzoek scheurvorming gotische zaal*.

Normen

NBN EN 1991-1-1(2003). *Opgelegde belastingen voor gebouwen*.

NBN EN 1991-1-3 (2003). *Eurocode Sneeuw*.

NBN EN 1991-1-4 (2003). *Eurocode wind*.

artikels

Kanit, R. & Döndüren, M. S. (2010). Investigation of using ansys software in the determination of stress behaviours of masonry walls under out of plane cycling load. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(2), pp. 097-108.

Roca, P., Cervera, M., Pelà, L., Clemente, R. & Chiumenti, M. (2012). Continuum FE models for the analysis of Mallorca Cathedral. *Engineering Structures*, 46, pp. 653-670.

Eslami, A., Ronagh, H.R., Mahini, S.S. & Morshed, R. (2012). Experimental investigation and nonlinear FE analysis of historical masonry buildings - A case study. *Construction and Building Materials*, 35, pp. 251-260.

Calderini, C. & Lagomarsino, S. (2008). Continuum Model for In-Plane Anisotropic Inelastic Behaviour of Masonry. *Journal of Structural Engineering*, 2, pp. 209-220.

Gabor, A., Ferrier, E., Jacquelin, E. & Hamelin, P. (2006). Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels. *Construction and Building Materials*, 20, pp. 308-321.

Uva, G. & Salerno, G. (2006). Towards a multiscale analysis of periodic masonry brickwork: A FEM algorithm with damage and friction. *International Journal of Solids and Structures*, 43, pp. 3739-3769.

Hradil, P., Žák, J., Novák, D. & Lavický, M. (2001). Stochastic analysis of historical masonry structures. In Lourenço, P.B. & Roca, P. *Historical Constructions*, pp. 647-654. Guimarães.

Lourenço, P.B. (1998). Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry. In Roca, P., González, J.L., Oñate, E. & Lourenço, P.B. *Structural Analysis of Historical Constructions II*, pp.302-337. Barcelona: CIMNE.

Lourenço, P.B. (2001). Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations. In Lourenço, P.B. & Roca, P. *Historical Constructions*, pp. 91-117. Guimarães.

Van Gemert, D., Ignoul, S. (2001). Structurele herstelling van scheuren in metselwerk.

internet

Haslinghuis, E.J. & Janse, H. (2005) *Bouwkundige termen. Verklarend woordenboek van de westerse architectuur- en bouwhistorie*. Geraadpleegd op 20/04/2013 via <http://www.architectenweb.nl/aweb/archipedia/archipedia.asp?ID=2183>

Gilté, S. & Vanwalleghem, A. (1999). *Inventaris van het cultuurbezit in België, Architectuur, Stad Brugge, Oudste kern, Bouwen door de eeuwen heen in Vlaanderen*. Geraadpleegd op 4/05/2013 via <https://inventaris.onroerendergoed.be/dibe/relict/29238>

Devree, J. *Bouwkundige termen*. Geraadpleegd op 16/04/2013 via <http://www.joostdevree.nl/shtmls/korbeel.shtml>.

Royal Observatory of Belgium. *Aardbeving van 11 juni 1938 – Zulzeke-nukerke*. Geraadpleegd op 16/05/2013 via <http://seismologie.oma.be/index.php?LANG=NL&CNT=BE&LEVEL=221&id=509>

Green, D. & Winandy, J. (1999). *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Geraadpleegd op 6/05/2013 via <http://www.mif.pg.gda.pl/kft/Akron1/ch4-Mechanical-Properties-of-Wood.pdf>.

Ansys Tutorials

Aalborg universiteit esbjerg. (sd). *Notes/slides for Basic and Advanced Finite Element Analysis (FEA)*.

PADT (22 juni, 2007). *The focus, a publication for ANSYS users, Issue 58*, geraadpleegd op 13/05/2013 via www.padtinc.com

ANSYS Inc. *ANSYS release 13.0:Documentation for ANSYS. Handleidingbij software*

ANSYS Inc. (2009). *Modeling and Meshing Guide, Release: 12.0*.

ANSYS, Inc (2010). *Introduction to ANSYS Mechanical: Dl. 4. Meshing in mechanical*.

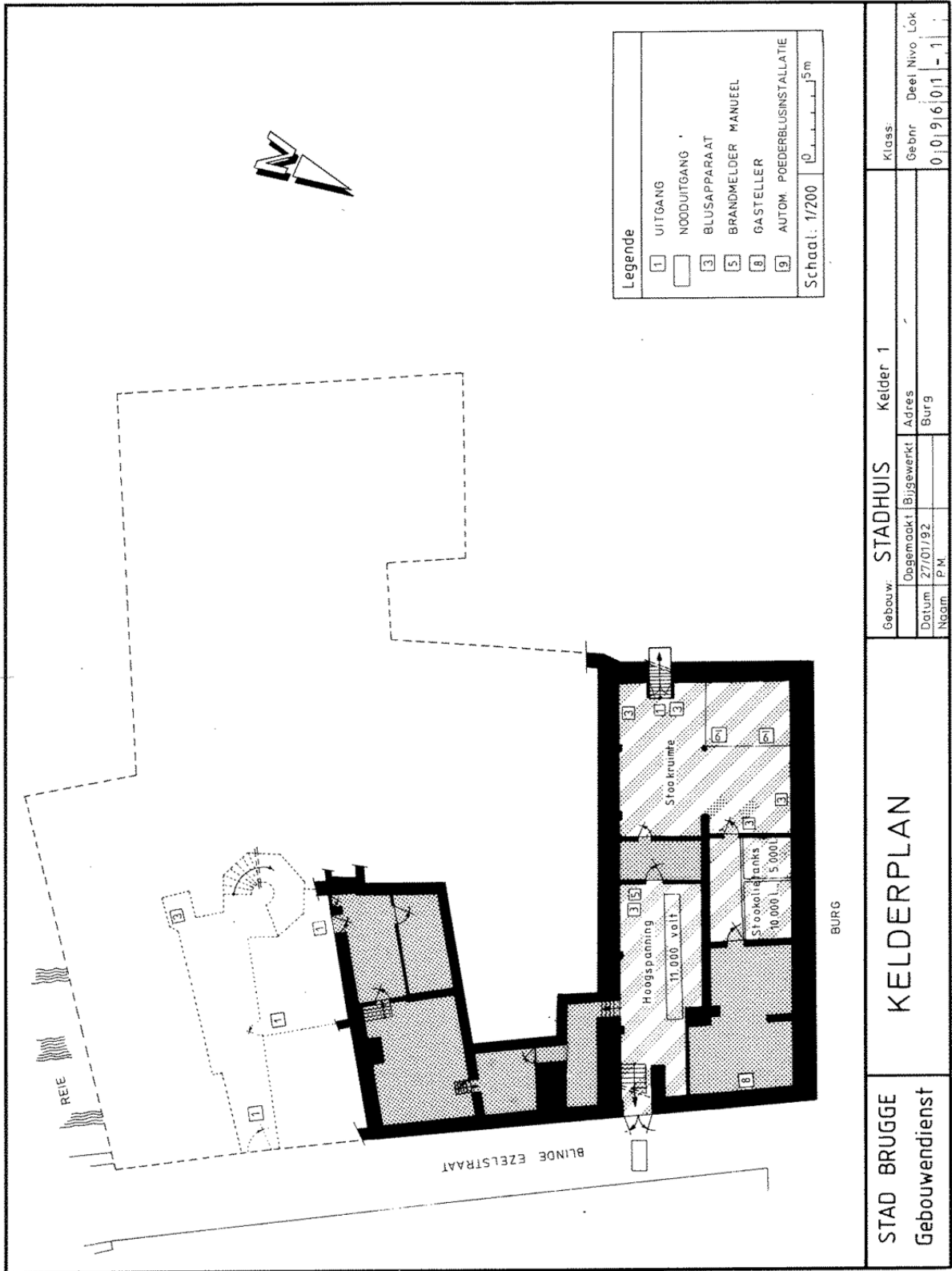
ANSYS, Inc (2010). *ANSYS Workbench 13.0 Platform. ANSYS Meshing*. Geraadpleegd op 05/05/2013 via <http://www.ansys.com/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform/ANSYS+Meshing>

ANSYS, Inc (2010). *ANSYS Release 13.0, Efficient meshing with ANSYS Workbench engineering simulation*. Geraadpleegd op 7/05/2013 via <http://www.youtube.com/watch?v=RELLrEJ9chg>

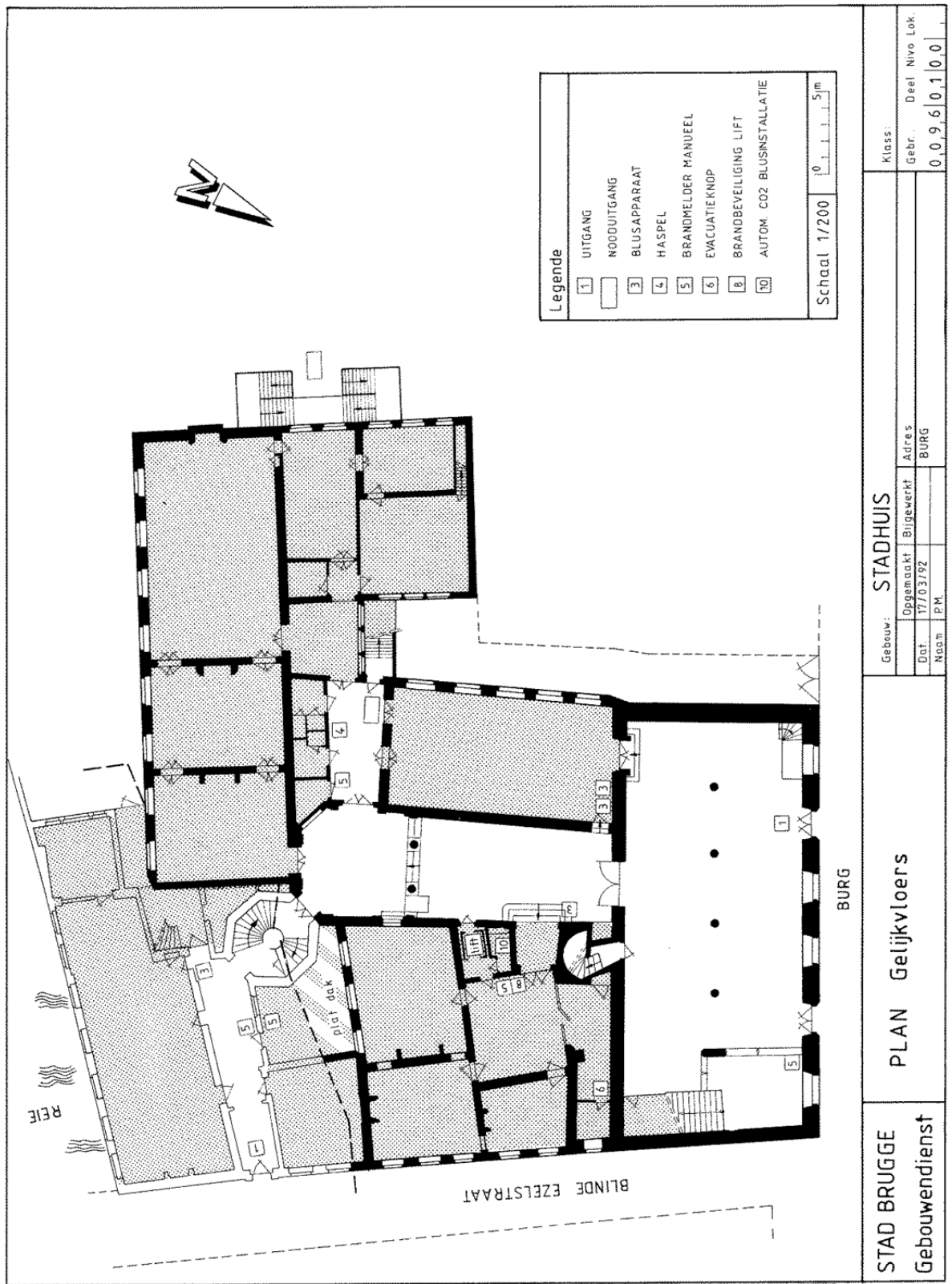
University of Rochester (2004). *Workbench*. Geraadpleegd op 13/05/2013 via <http://www.me.rochester.edu/courses>

Lijst met bijlages

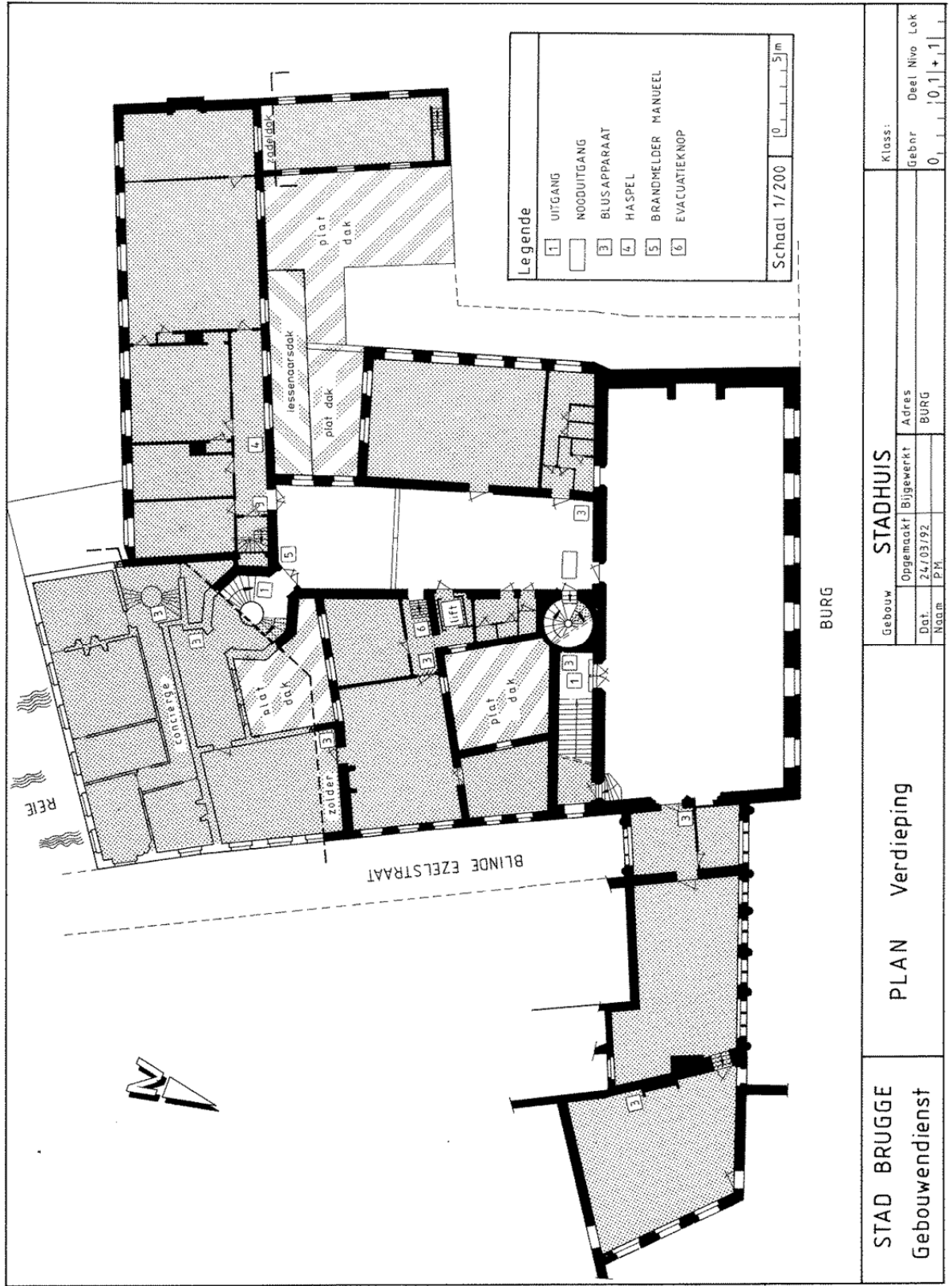
Bijlage I: grondplan kelder



Bijlge II: grondplan gelijkvloers

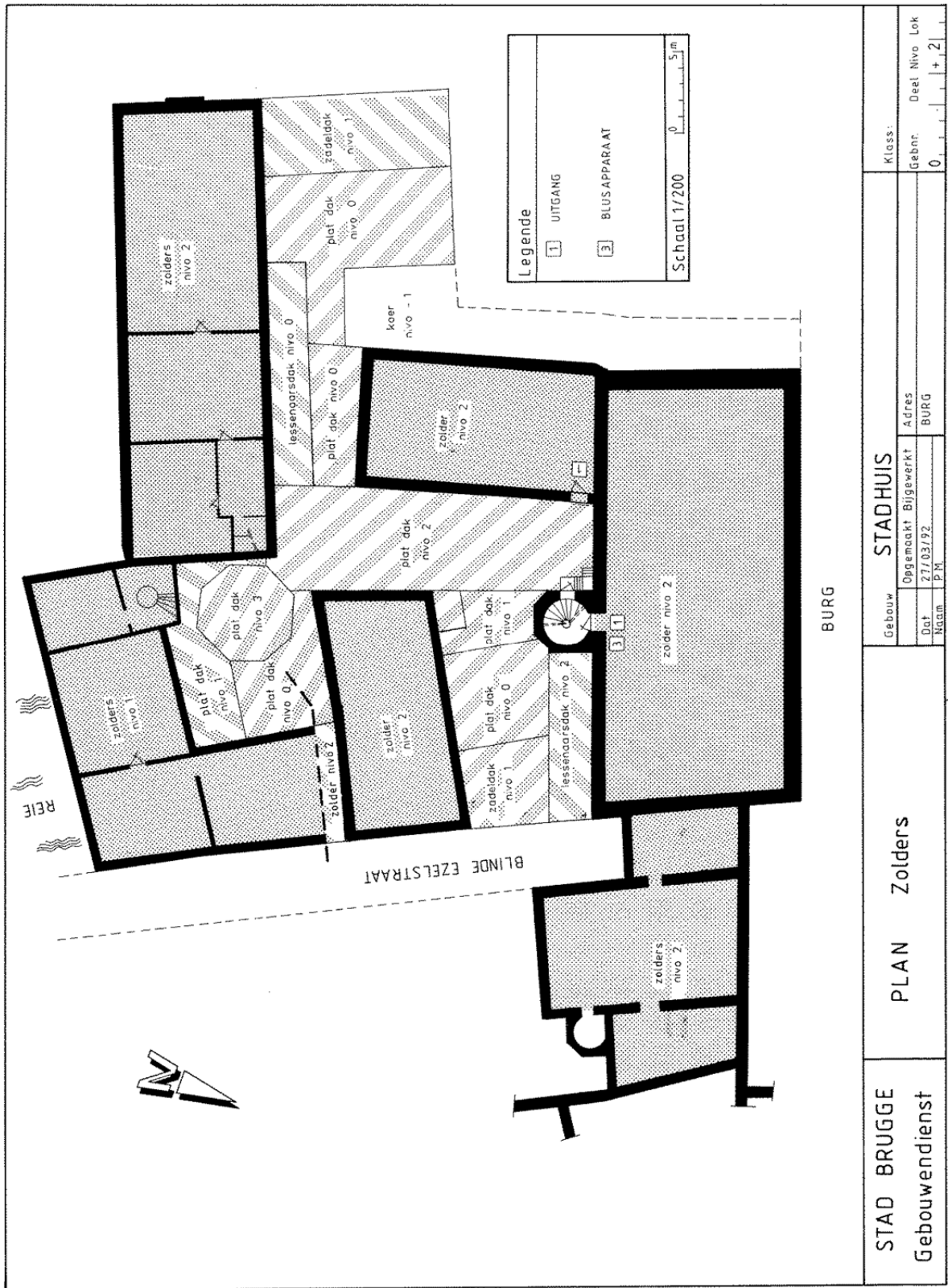


Bijlage III: grondplan eerste verdieping



STAD BRUGGE Gebouwendienst	PLAN Verdieping	Gebouw STADHUIS	Klass:	
			Gebnr	Deel Nivo Lok
		Opgemaakt Bijgewerkt	Adres	
		Dat. 24/03/92	BURG	
		Naam P.M.		
			0	0,1 + 1

Bijlage IV: grondplan zolder



STAD BRUGGE Gebouwendienst	PLAN Zolders	Gebouw STADHUIS	Klass:		
			Gebnr.	Deel Nivo Lok	
		Dat 27/03/92	Afres BURG	0	+ 2
		Naam P.M.			

