

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Onderzoek naar de haalbaarheid van de toepassing van
mesoschaalmodellen voor de analyse van metselwerkschade

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

BEGELEIDER :

ing. Glenn VAN VUGT

Axel Reyskens

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



KU LEUVEN



KU LEUVEN

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Onderzoek naar de haalbaarheid van de toepassing van mesoschaalmodellen voor de analyse van metselwerkschade

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

BEGELEIDER :

ing. Glenn VAN VUGT

Axel Reyskens

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



KU LEUVEN

WOORD VOORAF

Ik voer het gekozen masterproefonderwerp uit door middel van een literatuurstudie en nadien door een simulatieonderzoek. Hierdoor verwacht ik een antwoord te bieden op de onderzoeksvraag en meer inzicht te verkrijgen in het onderwerp.

Het onderzoek werd uitgevoerd in samenwerking met mijn promotor en begeleider. De literatuurstudie vond plaats in het eerste semester van academiejaar 2020-2021, daar waar het simulatieonderzoek in het tweede semester van hetzelfde academiejaar werd uitgevoerd. De keuze voor dit onderwerp komt voort uit mijn interesse naar metselwerk wanden. Hierdoor werd het simulatieonderzoek met volle overgave uitgevoerd.

Verder ben ik ook sterk geïnteresseerd in Eurocodes, meer bepaald Eurocode 6. Ik heb geprobeerd om via deze Eurocode een bijdrage te leveren aan het pionierswerk richting dilatatievoegen en hun optimale locatie. Dit was voor mij een grote stimulans. Hopelijk voldoet dit onderzoek en bijgevolg de conclusie aan uw verwachtingen.

Ondanks de COVID-19-maatregelen, dewelke gedurende de volledige masterproefperiode van kracht waren, was er een vlotte communicatie tussen de promotoren en mijzelf. Dit onderzoek was daarenboven ook niet mogelijk zonder de veelzijdige hulp, motivatie en ervaring van deze personen. Vandaar dat ik graag mijn dank wil betuigen aan zowel mijn promotor als mijn begeleider. Dankzij de ervaring, het advies, de vindingrijke ideeën en denkpatronen van Prof. dr. ing. Bram Vandoren inzake de topics heb ik deze masterproef tot een goed einde kunnen brengen. Zijn kennis binnen het vakgebied is enorm en hij stelde bovendien de gebruikte analysesoftware ter beschikking.

Ook mijn begeleider ing. Glenn van Vugt, een krak in het coderen binnen de MATLAB-omgeving, stond mij steeds bij tijdens dit proces. Bovendien maakte hij de preprocessor die veelvuldig werd gebruikt gedurende deze masterproef. Voor technische vragen over deze tool kon ik altijd bij hem terecht. Samen hebben we ook enkele problemen opgelost en vernieuwingen aangebracht aan deze applicatie, dewelke in de toekomst bruikbaar zijn voor andere personen.

Dankzij tal van online meetings brachten mijn promotor en mijn begeleider mij steeds meer bij over het onderwerp, waaruit onderstaand eindresultaat wordt gedestilleerd. Door middel van onze discussies en uitwisselingen van ideeën verliep de samenwerking zeer vlot en open. Hun adviezen werden steeds ter harte genomen. Ik kijk met trots terug naar deze zeer uitdagende en leerrijke ervaring.

Ook de Construction Engineering Research Group (CERG) wil ik nadrukkelijk bedanken voor hun bijdrage in de onderwerpkeuze en steun gedurende het onderzoeksproces.

Tot slot wil ik graag nog mijn familie, vrienden en vriendin bedanken. Zij steunden mij enorm tijdens deze masterproef door interesse te tonen in het onderwerp. Dit was, gelet op de omstandigheden door COVID-19, zeker geen makkelijke taak. Zonder hun advies was de kwaliteit van deze scriptie niet dezelfde.

INHOUDSOPGAVE

WOORD VOORAF	1
LIJST VAN TABELLEN	5
LIJST VAN FIGUREN	7
ABSTRACT.....	9
ABSTRACT IN ENGLISH	11
1 INLEIDING	13
1.1 PROBLEEMSTELLING	14
1.2 ONDERZOEKSOPZET EN INHOUD	15
2 SCHEURVORMING IN METSELWERK	17
2.1 ALGEMEEN: DILATATIEVOEGEN	17
2.2 PLAATSING DILATATIEVOEGEN	18
2.2.1 <i>Verticale bewegingsvoegen</i>	18
2.2.2 <i>Horizontale bewegingsvoegen</i>	19
2.3 REGELGEVING TUSSENAFSTAND BEWEGINGSVOEGEN	20
2.4 BEÏNVLOEDINGSFACTOREN.....	22
2.4.1 <i>Type metselstenen</i>	22
2.4.2 <i>Type mortel</i>	22
2.4.3 <i>Aanwezigheid verzwakkingen in metselwerk</i>	22
2.4.4 <i>Temperatuur en vochtigheid</i>	23
2.5 SCHEURVORMING.....	24
2.5.1 <i>Karakteristieken</i>	24
2.5.2 <i>Categorisatie</i>	24
2.5.3 <i>Scheurpatronen</i>	25
2.5.4 <i>Oorzaken</i>	26
3 MODELLERING VAN METSELWERK	35
3.1 SCHALEN	35
3.1.1 <i>Microschaal</i>	36
3.1.2 <i>Mesoschaal</i>	36
3.1.3 <i>Macroschaal</i>	37
3.2 BREUKGEDRAG.....	38
3.3 HET MODEL VAN LOURENÇO.....	40
3.4 EINDIGE-ELEMENTENMETHODE EN PLASTICITEIT	41
3.4.1 <i>Eindige elementen</i>	42
3.4.2 <i>Schademodel</i>	45
4 PREPROCESSING TOOL.....	49
4.1 GEBRUIK.....	49
4.2 WERKING	55
4.2.1 <i>Algemene informatie</i>	56
4.2.2 <i>Geometrische informatie</i>	56
4.2.3 <i>Mesh informatie</i>	57

5	NUMERIEKE ANALYSES: BENCHMARKSIMULATIES EN PARAMETERSTUDIES	59
5.1	WERKING NUMERIEKE ANALYSE	59
5.2	BENCHMARKSIMULATIES.....	61
5.2.1	<i>Gebruikte testcase</i>	<i>61</i>
5.2.2	<i>Uitgevoerde testen.....</i>	<i>63</i>
5.2.3	<i>Probleempunten.....</i>	<i>70</i>
5.3	PARAMETERSTUDIES.....	72
5.3.1	<i>Case 1: eenvoudige wand.....</i>	<i>72</i>
5.3.2	<i>Case 2: wand met kleine opening</i>	<i>74</i>
5.3.3	<i>Case 3: gevel met schuin verloop.....</i>	<i>80</i>
6	TOEPASSING: MODELLERING VAN DILATATIEVOEGEN	85
6.1	CASE 4: GEVEL MET MEERDERE RAAMOPENINGEN	85
6.2	CASE 5: RIJHUIS MET MEERDERE RAAMOPENINGEN	88
7	BESLUIT	91
	REFERENTIELIJST	93

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 2.1: Maximale horizontale afstand – Verticale dilatatievoegen (ongewapende, dragende metselwerkwallen).....	21
Tabel 2.2: aanbevolen horizontale afstand – Verticale dilatatievoegen (ongewapende, niet-dragende metselwerkwallen)	21

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1.1: Onderzoeksonderwerpen CERG – Tak een: mechanisch gedrag van structuren en materialen.....	13
Figuur 1.2: Verticale dilatatievoeg in gevel.....	14
Figuur 2.1: Verticale dilatatievoeg.....	17
Figuur 2.2: Niet-dragende buitengevel - Verticale bewegingsvoeg	18
Figuur 2.3: Bewegingsvoeg die bewegingen in de dwarsrichting belet.....	19
Figuur 2.4: Horizontale bewegingsvoeg voor een bijgebouw	20
Figuur 2.5: Ontoelaatbare verzwakking – Sleuf	23
Figuur 2.6: Scheurpatronen.....	26
Figuur 2.7: Zettingen, overbelastingen en belemmerde dimensionale veranderingen.....	27
Figuur 2.8: Zettingen door drie types van verandering: verandering in belastingen, verandering in funderingsgedrag of verandering in grondgedrag.....	28
Figuur 2.9: Zettingen ten gevolge van grondwatertafelverlaging	29
Figuur 2.10: Typische scheuren onder een hoek van 45° bij verandering in grondgedrag.....	30
Figuur 2.11: Scheuren bij doorbuiging van de vloerplaat.....	31
Figuur 2.12: Preventie door middel van doorlopende vloerplaten	31
Figuur 2.13: Afschilferen van de oplegzone bij geconcentreerde belastingen.....	32
Figuur 2.14: Vervormingen door verschillende temperatuurgradiënten	33
Figuur 3.1: Naamgeving metselwerkmodel	35
Figuur 3.2: Micro-modellering	36
Figuur 3.3: Meso-modellering.....	37
Figuur 3.4: Macro-modellering	37
Figuur 3.5: Typisch gedrag van semi-brosse materialen onder uniaxiale belasting en definitie van breukenergie.....	39
Figuur 3.6: Metselwerkgedrag onder afschuiving en definitie van mode II breukenergie	40
Figuur 3.7: Faalmechanismen.....	41
Figuur 3.8: Gesimplificeerd model.....	42
Figuur 3.9: Componenten tracties en jumps.....	44
Figuur 3.10: Bézier-kromme als schadegrens	45
Figuur 3.11: Voorstelling schade-evolutiewet.....	46
Figuur 3.12: Samengesteld interfacemodel.....	47
Figuur 4.1: Indeling startscherm	49
Figuur 4.2: Openen en overtrekken afbeelding.....	50
Figuur 4.3: Overtrokken gevel (zwarte doorzichtige overtrekking)	50
Figuur 4.4: Fictieve waarden voor verschaling	51
Figuur 4.5: Overtrokken openingen en bijbehorende tabel	51
Figuur 4.6: Overtrokken dilatatievoeg en bijbehorende absolute coördinatentabel	52
Figuur 4.7: Specificatie zetting, doorbuiging en balk.....	53
Figuur 4.8: Gebruikte waarden 2D-model.....	53
Figuur 4.9: Uitkomst generatie gevelmodel.....	54
Figuur 4.10: Uitkomst gegenereerde mesh.....	55
Figuur 4.11: Opbouw hoofdvariabele.....	56

Figuur 5.1: Lussen incrementele-iteratieve oplossingsmethode.....	60
Figuur 5.2: Model testcase.....	61
Figuur 5.3: Mesh testcase	62
Figuur 5.4: Invoervenster met parameters	62
Figuur 5.5: Schadepatroon testcase dalzetting.....	63
Figuur 5.6: Zettingspatroon testcase dalzetting.....	64
Figuur 5.7: Schadepatroon testcase putzetting	65
Figuur 5.8: Zettingspatroon testcase putzetting	65
Figuur 5.9: Lokalisering schade testcase.....	66
Figuur 5.10: Vervormingspatroon doorbuiging testcase	67
Figuur 5.11: Schadepatroon doorbuiging testcase	67
Figuur 5.12: Nieuwe mesh testcase - Toevoeging dilatatievoeg	68
Figuur 5.13: Schadepatroon met dilatatievoeg	69
Figuur 5.14: Zettingspatroon met dilatatievoeg	70
Figuur 5.15: Spatkrachten rond openingen	71
Figuur 5.16: Schadepatroon case 1.....	73
Figuur 5.17: Zettingspatroon case 1	73
Figuur 5.18: Schadepatroon vergelijkbare wand	74
Figuur 5.19: Schadepatroon case 2.....	75
Figuur 5.20: Zettingspatroon case 2	76
Figuur 5.21: Schadepatroon case 2 - Lagere treksterkte & cohesie van voegen	77
Figuur 5.22: Schadepatroon case 2 - Zetting 10 mm.....	78
Figuur 5.23: Schadepatroon case 2 - Trapse scheur.....	79
Figuur 5.24: Zettingspatroon case 2 - Trapse scheur	80
Figuur 5.25: Schadepatroon case 3.....	81
Figuur 5.26: Schadepatroon case 3 - Zettingstrog rechts.....	83
Figuur 5.27: Zettingspatroon case 3 - Zettingstrog rechts.....	84
Figuur 6.1: Case 4 - Schadepatroon na 25 tijdstappen	85
Figuur 6.2: Case 4 - Schadepatroon na 50 tijdstappen	86
Figuur 6.3: Case 4 - Schadepatroon dilatatievoeg tijdstap 25	86
Figuur 6.4: Case 4 - Schadepatroon dilatatievoeg tijdstap 50	87
Figuur 6.5: Case 4 - Schadepatroon dilatatievoeg tijdstap 40	87
Figuur 6.6: Case 4 - Schadepatroon na toevoeging extra dilatatievoegen tijdstap 40.....	88
Figuur 6.7: Case 5 - Schadepatroon tijdstap 50.....	89
Figuur 6.8: Case 5 - Schadepatroon tijdstap 50 met dilatatievoeg	90

ABSTRACT

Scheurvorming is een courant probleem in metselwerk wanden. Deze masterproef onderzoekt de haalbaarheid van de toepassing van mesoschaal eindige-elementenmodellen voor de analyse van dergelijke metselwerkschade. In zulke modellen worden mortelvoegen en bakstenen expliciet gemodelleerd. Het gebruik van dilatatievoegen – die dankzij zulke mesomodellen ook expliciet gemodelleerd kunnen worden – is een van de mogelijke oplossingen om scheurvorming te beperken.

De eindige-elementenmodellen zijn geïmplementeerd in een MATLAB-omgeving. Hiervoor maakt men gebruik van een preprocessing tool en een analysesoftware die binnen de onderzoeksgroep CERG zijn ontwikkeld. Enerzijds worden hiermee de grenzen van het mesoschaalmodel opgezocht en anderzijds bekijkt men de toepassing van dilatatievoegen op vlak van de optimale locatie.

Simulaties toonden aan dat mesoschaalmodellen gelimiteerd zijn omwille van de grootte van de mesh. Voor grote metselwerk wanden bekomt men een grotere mesh, waardoor de rekentijd significant toeneemt. Omwille van de toename van het aantal (niet-lineaire) elementen in de mesh, kampt de stijfheidsmatrix binnen MATLAB regelmatig met een slecht conditiegetal. Hierdoor treedt divergentie op, waardoor de solver geen oplossing vindt. Verder concludeert men ook dat de toepassing van dilatatievoegen optimaal is nabij hoekpunten van openingen om scheurvorming te beperken.

ABSTRACT IN ENGLISH

Cracking is a common problem within masonry walls, hence the investigation within this master's thesis into the feasibility of applying mesoscale finite element models for the analysis of this masonry damage. In such models, mortar joints and bricks are modelled explicitly. Implementation of dilatation joints – which can also be explicitly modelled using the mesoscale approach - is one of the possible solutions to reduce cracking.

The finite element models are implemented in a MATLAB environment. This is realized using a preprocessing tool and analysis software developed by the CERG research group. The boundaries of this mesoscale model are explored. The application of dilatation joints in terms of optimal location is also examined.

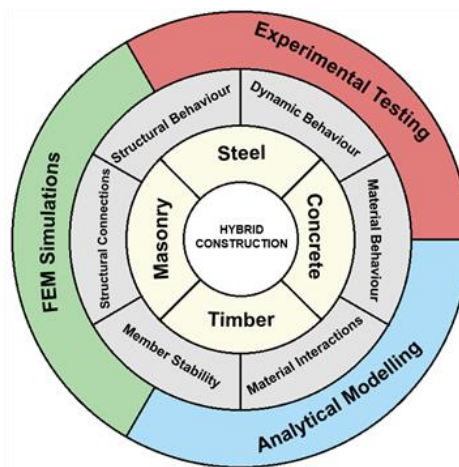
Through these simulations, one can see that mesoscale models are limited because of the size of the mesh. For large masonry walls, a larger mesh will be obtained, which greatly increases the computation time. Because of the increase of the number of (materially nonlinear) elements in the mesh, the stiffness matrix within MATLAB often suffers from a bad condition number. As a result, divergence occurs, which prevents the solver from finding a solution. Furthermore, it is also concluded that the application of dilatation joints is optimal near corners of openings to reduce cracking.

1 INLEIDING

Deze masterproef wordt gerealiseerd in het kader van de opleiding 'Industriële Ingenieurswetenschappen – bouwkunde', een gezamenlijke opleiding georganiseerd door de Universiteit Hasselt en de KU Leuven. Ze wordt uitgevoerd in samenwerking met de Construction Engineering Research Group (CERG), de bouwkundige onderzoeksgroep binnen de faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen van UHasselt.

CERG heeft haar hoofdzetel op de universitaire campus van UHasselt in Diepenbeek en zet zich hoofdzakelijk in op twee niveaus: enerzijds op internationaal niveau met focus op fundamenteel onderzoek naar analytische en numerieke modellering van structurele systemen en infrastructuur – waarin deze masterproef zich situeert – en anderzijds op regionaal niveau waarbij de focus ligt op onderzoek naar toepassingen die inspelen op de huidige noden van sectoren [1].

De onderzoeksonderwerpen binnen de CERG kunnen daarenboven opgedeeld worden in twee takken: de eerste tak behelst het mechanisch gedrag van structuren en materialen, de tweede tak omvat de infrastructuur. Deze masterproef situeert zich binnen de eerste tak, zoals weergegeven op **Figuur 1.1**, binnen het onderwerp 'masonry'.



FIGUUR 1.1: ONDERZOEKSONDERWERPEN CERG – TAK EEN: MECHANISCH GEDRAG VAN STRUCTUREN EN MATERIALEN [2]

Dit onderzoek legt zich toe op het analyseren van scheurvorming binnen metselwerk met behulp van mesoschaal eindige-elementenmodellen. Dit verloopt aan de hand van simulatieonderzoek via geprogrammeerde MATLAB-code toegepast op verschillende geveltypologieën. Op deze manier identificeert men waar dilatatievoegen noodzakelijk zijn.

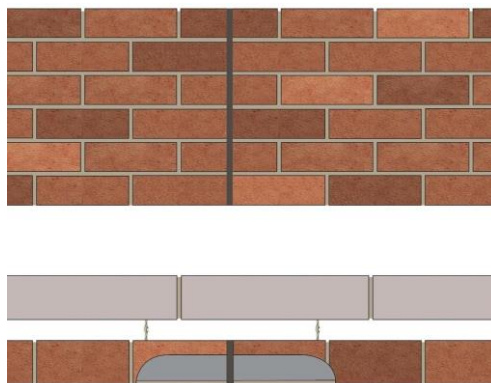
1.1 PROBLEEMSTELLING

Scheurvorming binnen metselwerk is een bekend fenomeen dat haast niet te vermijden is. Dit probleem kan optreden bij zowel dragend als niet-dragend metselwerk. Bij niet-dragend metselwerk kan men deze scheuren vaak oplossen door gebruik te maken van een kit of met pleistercement. Bij dragend metselwerk is deze scheurvorming echter te beschouwen als een ongewenst effect op het metselwerk, waarvoor een oplossing moet gezocht worden. Dit omdat er mogelijks verschillende complicaties zijn op het vlak van eigenschappen van de metselwerkstenen. Ook kunnen er problemen optreden op vlak van integriteit van de structuur. Dit zijn nefaste problemen voor metselwerkconstructies zoals woningen.

Scheurvorming treedt op wanneer de optredende trekspanning groter is dan de treksterkte van de metselwerkwand. Metselwerkstenen hebben een relatief lage treksterkte, terwijl mortel doorgaans een hogere treksterkte heeft. Er zijn tal van oorzaken voor deze te hoge trekspanning. Merk op dat volgende lijst niet-limitatief is [3]: temperatuurschommelingen, vocht en chemische reacties, zettingen, impactbelastingen, aardbevingen, overbelastingen, verandering van grondeigenschappen, spatkrachten... Deze oorzaken worden verder behandeld binnen de masterproef.

De gevolgen van scheuren zijn niet te verwaarlozen. Indien de scheurwijdte groter dan vijf millimeter is, is men genoodzaakt deze op te vullen. Vanaf een scheurwijdte van vijftien millimeter zijn daarenboven invasieve herstellingswerken nodig teneinde de integriteit van de structuur te waarborgen. Een te grote scheurwijdte kan immers zorgen voor complicaties inzake de draagkracht van het parament. Bovendien kunnen er zich buiten een verlies aan draagvermogen, ook hellen en bollen van de wand voordoen. Bij zeer extreme gevallen kan de volledige muur instorten en is een volledige heropbouw noodzakelijk [4].

Deze scheurvorming kan gelimiteerd worden door het plaatsen van dilatatievoegen, zoals weergegeven op **Figuur 1.2**. Dilatatievoegen vangen de uitzetting en krimp van metselwerkmuren op [5], omdat deze voegen zijn gevuld met een elastisch materiaal. Bovendien laten deze dilatatievoegen ook beweging toe binnen het metselwerk, waardoor de trekspanningen lager liggen. De positionering van deze dilatatievoegen is daarbij van zeer groot belang.



FIGUUR 1.2: VERTICALE DILATATIEVOEG IN GEVEL [6]

1.2 ONDERZOEKSOPZET EN INHOUD

Het onderzoek binnen deze thesis concretiseert zich in de vorm van numeriek simulatieonderzoek waarmee men de performantie en het toepassingsgebied van mesoschaalmodellen onderzoekt. Verder gaat men op zoek naar de toepassing van dilatatievoegen binnen metselwerk, een mogelijke oplossing voor scheurvorming. Dit door middel van het bestuderen van de scheurvorming aan de hand van mesoschaalmodellen.

Om dit te realiseren, wordt in **hoofdstuk 2** eerst de scheurvorming binnen het metselwerk besproken. Eerst bespreekt men het nut en de regelgeving inzake dilatatievoegen, waarna de beïnvloedingsfactoren aan bod komen. Hiermee kunnen nadien de categorisatie, oorzaken en gevolgen van scheurvorming uitgelegd worden.

Hoofdstuk 3 behandelt de modellering van het metselwerk. Aangezien er meerdere schaalmodellen beschikbaar zijn, wordt eerst de schaalmodellering besproken. Daarna komt het breukgedrag aan bod. Om het hoofdstuk af te sluiten, bespreekt men de eindige-elementen methode op vlak van het gebruikte mesoschaalmodel.

Hoofdstuk 4 bespreekt de speciaal voor deze masterproef ontworpen preprocessing tool. Deze tool werd gemaakt door Glenn van Vugt van de onderzoeksgroep CERG. Het principe en de werking ervan zullen uiteengezet worden.

Nadien volgen enkele benchmarksimulaties in **hoofdstuk 5** om vertrouwd te geraken met de MATLAB-omgeving en bijbehorende tools. Dit bestaat uit enkele eenvoudige metselwerkwanden waarop men kleine testsimulaties uitvoert. Binnen dit hoofdstuk volgen ook nog enkele parameterstudies, waarbij enkele parameters binnen een case wijzigen, terwijl andere constant blijven. Op die manier wordt de invloed van deze parameters tijdens de schadeanalyse bekeken.

Als voorlaatste stap wordt de toepassing van dilatatievoegen uiteengezet in **hoofdstuk 6**, waarbij de opgedane kennis over dilatatievoegen toegepast wordt op verschillende cases. Deze simulaties analyseert men om een antwoord te bieden op de onderzoeksvragen.

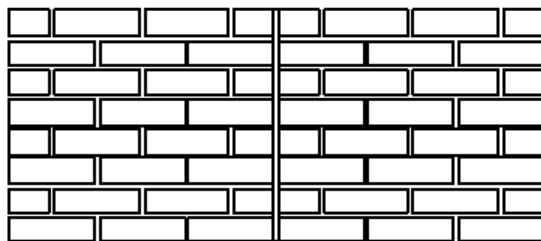
Tot slot volgen in **hoofdstuk** Fout! Verwijzingsbron niet gevonden. de conclusies inzake de u itgevoerde masterproef. Er worden bovendien enkele aanbevelingen voor mogelijk verder onderzoek gegeven, hetgeen een toekomstperspectief biedt.

2 SCHEURVORMING IN METSELWERK

Zoals eerder aangehaald, is scheurvorming een probleem binnen verschillende types van constructies omdat het zowel structureel als esthetisch gevolgen heeft voor de structuur. De focus ligt binnen deze masterproef op metselwerkconstructies. Omwille van die reden bespreekt men binnen dit hoofdstuk een mogelijke oplossing voor scheurvorming, met name bewegingsvoegen. Ook de regelgeving hiervan komt kort aan bod. Verder worden ook de oorzaak, classificatie en gevolgen van scheurvorming binnen metselwerk uiteengezet. Ook de verschillende parameters die een belangrijke rol spelen, komen aan bod.

2.1 ALGEMEEN: DILATATIEVOEGEN

Dilatatie- of bewegingsvoegen worden vaak uitgevoerd als elastische voeg om metselwerk in onafhankelijke vakken te verdelen [7]. Zowel horizontale als verticale dilatatievoegen zijn bruikbaar in functie van het gewenste resultaat en effectiviteit van de voeg. Voor een halfsteensverband gebruikt men voor de verticale voeg halve stenen, beurt om beurt met volledige stenen, zoals op **Figuur 2.1** weergegeven. Belangrijk hierbij is de keuze van de locatie van de voeg, dewelke afhankelijk is van de grootte van de spanningsconcentraties. Bij voorkeur plaatst men dit soort voegen op de hoeken van openingen. Hierop wordt dieper ingegaan in het subhoofdstuk **§2.2 Plaatsing dilatatievoegen**.



FIGUUR 2.1: VERTICALE DILATATIEVOEG [7, P. 4]

Dilatatievoegen dienen hoofdzakelijk om het risico op scheurvorming van het metselwerk te beperken. Immers, metselwerk heeft een slechte weerstand tegen trekspanningen. Bovendien is het thermisch effect op het metselwerk, zoals uitgebreid wordt besproken in **§2.4.4 Temperatuur en vochtigheid**, niet te verwaarlozen. Volgens de huidige regelgeving van Eurocode 6 (EC6) [8] moeten de dilatatievoegen volgende effecten toestaan, in die mate dat het metselwerk geen schade oploopt: vochtbewegingen en thermische uitzetting, kruip en afbuiging, en de mogelijke effecten van de interne spanningen veroorzaakt door verticale of laterale lasten. Er moet zetting kunnen plaatsvinden in het metselwerk, zodat de trekspanningen beperkt blijven. Dit wil zeggen dat er beweging mogelijk moet zijn binnen het metselwerk, echter beperkt door deze

bewegingsvoegen. Op deze manier kan het metselwerk dus reageren op verschillende interne en externe factoren die kunnen zorgen voor zettingen binnen het metselwerk.

De specificaties en regels omtrent deze dilatatievoegen kan men terugvinden in EC6 [8]. Hierin staan aanbevolen afstanden voor de verschillende voegen. Merk op dat de bijkomende richtlijnen kunnen verschillen van land tot land, cfr. de Nationale Bijlagen van EC6 [9]. Dit komt omdat er tot op heden nog geen uniforme ontwerpregels bestaan voor deze dilatatievoegen [5]. Een vernieuwde versie van EC6 is momenteel (2021) in ontwikkeling.

2.2 PLAATSING DILATATIEVOEGEN

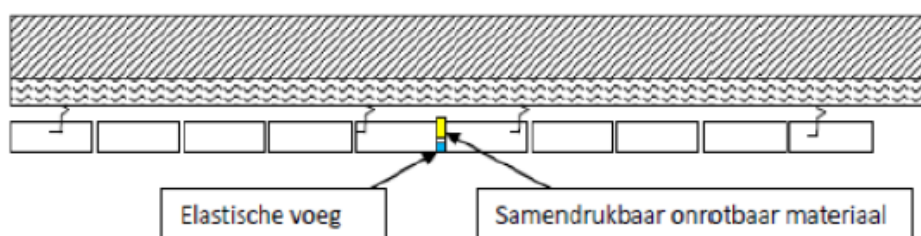
Dilatatievoegen beperken het risico op scheurvorming in het metselwerk. Deze voegen moeten in staat zijn om de gevolgen van dimensionele schommelingen te compenseren. De bewegingsvoegen moeten zodanig geplaatst worden dat bewegingen mogelijk zijn, zonder dat het metselwerk schade oploopt of de stabiliteit van de structuur in het gedrang komt [10].

De plaatsing van dilatatievoegen wordt beïnvloed door de geometrie van het gebouw en is afhankelijk van het muurtype en de specifieke bouwdetails [7]. Bij voorkeur worden ze geplaatst indien er zich discontinuïteiten voordoen in de geometrie van het metselwerk of in de belasting van het metselwerk. We maken een onderscheid tussen verticale en horizontale bewegingsvoegen.

2.2.1 VERTICALE BEWEGINGSVOEGEN

2.2.1.1 Niet-dragende buitengevels

Het gevelmetselwerk ondervindt dimensionele schommelingen zoals uitzetting, zwelling en krimp, dit ten gevolge van temperatuurschommelingen, bevochtiging en droging. Deze vervormingen zorgen voor spanningen in het metselwerk. Wanneer deze te groot worden, ontstaat scheurvorming. Hoofdzakelijk beginnen deze scheuren zich te vormen in hoeken van raam- of deuropeningen. Vaak zijn deze terug te vinden in de bovenste lagen en bij metselwerk met een donkere kleur. Donker metselwerk heeft een hogere lineaire uitzettingscoëfficiënt, waardoor de temperatuurswijzigingen sterker tot uiting komen en dus scheurvorming optreedt.

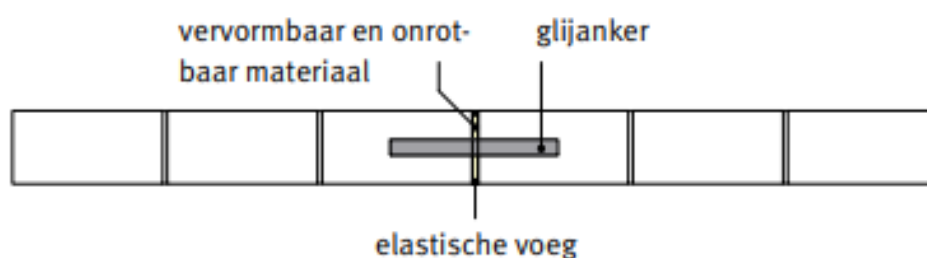


FIGUUR 2.2: NIET-DRAGENDE BUITENGEVEL - VERTICALE BEWEGINGSVOEG [7, p. 13]

Tijdens het metselen wordt de voeg opgehouden, zodat deze over de volledige dikte kan aangebracht worden. Men vult dit nadien op met samendrukbaar, onrotbaar materiaal. Dit is vaak een flexibele rugvulling gemaakt van polyurethaan (PUR) of een ander type kunststof. De zichtzijde wordt opgespoten met een elastisch materiaal, zoals bijvoorbeeld een zwelband of kit. Dit wordt ook weergegeven op **Figuur 2.2**. Wanneer een luchtdichtheidsfolie aanwezig is binnen spouwmuren kan men ook opteren om deze voegen open te laten. Het is echter aangeraden om deze voeg alsnog op te vullen. De breedte van deze voegen bedraagt 10 mm tot 15 mm.

2.2.1.2 Dragende muren

Tijdens het metselen wordt de voeg opgehouden, zodat deze over de volledige dikte kan aangebracht worden. Men vult dit nadien op met een flexibele rugvulling gemaakt van PUR of een ander type kunststof. Om beweging in de langsrichting toe te laten en in de dwarsrichting te verhinderen, brengt elke maximaal 60 cm een glijanker aan volgens NBN EN 845-1. De breedte van deze voegen bedraagt 10 mm tot 15 mm. **Figuur 2.3** toont een typische opstelling hiervan.

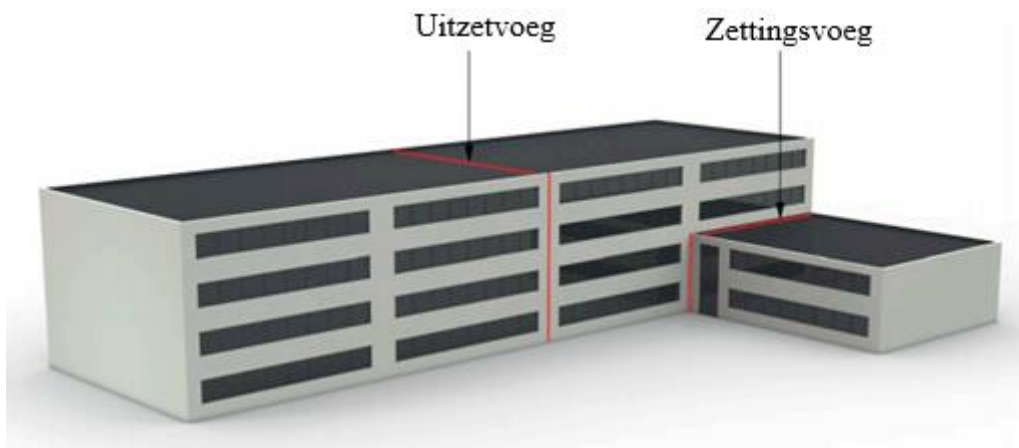


FIGUUR 2.3: BEWEGINGSVOEG DIE BEWEGINGEN IN DE DWARSRICHTING BELET [10, p. 105]

Om scheuren te vermijden t.g.v. krimp in de muren – een fenomeen inherent aan het materiaal – worden bij muren uit kalkzandsteen voegen uitgevoerd volgens de voorschriften van de fabrikant. Deze krimpvoegen hebben een breedte van 0 tot 1 mm. Deze worden uitgevoerd door blokken koud tegen elkaar te plaatsen over de volledige hoogte van de muur.

2.2.2 HORIZONTALE BEWEGINGSVOEGEN

Horizontale bewegingsvoegen worden enkel geplaatst bij uitdrukkelijke vraag van de ontwerper. Deze zijn gewenst indien men bijvoorbeeld een overgang heeft van een hoofdgebouw naar een (lager gelegen) bijbouw, zoals weergegeven op **Figuur 2.4**. Op die manier kan men eventuele zettingen verminderen. De onderlinge afstand tussen deze horizontale bewegingsvoegen bedraagt 6 tot 9 m indien men beschikt over een betonnen fundering. Wanneer het metselwerk rust op een geveldrager, bedraagt deze afstand 6 m [10].



FIGUUR 2.4: HORIZONTALE BEWEGINGSVOEG VOOR EEN BIJGEBOUW [11, P. 1]

Op bovenstaande afbeelding ziet men duidelijk twee horizontale bewegingsvoegen. De meest linkse bewegingsvoeg functioneert als uitzetvoeg, terwijl de bewegingsvoeg aan het bijgebouw functioneert als een zettingsvoeg. Deze zettingsvoeg zorgt ervoor dat de draagstructuur van het gebouw onderbroken wordt op plaatsen waar de fundering onderhevig is aan differentiële zettingen [11].

2.3 REGELGEVING TUSSENAFSTAND BEWEGINGSVOEGEN

De afstand tussen bewegingsvoegen is van groot belang. Belangrijke factoren voor het bepalen van de onderlinge afstand zijn: geometrie en concept van het gebouw, hygrothermische krimp en zwel van metselstenen (vocht) en thermische krimp en zwellings van de metselstenen [7]. Bijkomende factoren zijn: de reactie op lange en korte duur ten gevolge van belastingen, vuurbestendigheid, geluidsisolatie en thermische isolatie en het al dan niet aanwezig zijn van wapening in het metselwerk [8].

De maximale horizontale en verticale afstand kan men terugvinden in NBN EN 1996-2. Indien men kijkt naar de Nationale Bijlagen van EC6, kan men vaststellen dat de richtlijnen verschillend zijn per land. Zo verschillen de richtlijnen voor België, Nederland en Duitsland. Dit is echter atypisch, aangezien deze verschillen wetenschappelijk niet te verklaren zijn, zeker omdat het klimaat in deze drie landen zeer soortgelijk is [5]. Enkel het verschil in type gebouwen, ondergronden en belastingen zou dit kunnen verklaren, maar hiervoor zijn de verschillen te groot.

Omdat de beweging binnen de metselwerkwanden moet opgevangen worden door deze dilatatievoegen, wordt de tussenafstand gelimiteerd door de toelaatbare variatie van de dikte van de voeg te delen door de uitzettingsrek van het metselwerk. Dit met formulering volgens (1):

$$L_1 = \frac{\Delta v}{\varepsilon} \quad (1)$$

Met:

Δv toelaatbare variatie voegdikte [mm]

ε maximale uitzettingsrek [mm/m]

De horizontale afstand tussen verticale dilatatievoegen moet rekening houden met het type muur, het aantal metselwerkeenheden, het type mortel en de specifieke constructiedetails. Hoofdzakelijk moeten dilatatievoegen geplaatst worden op een manier waarbij de structurele integriteit van dragende metselwerkmuren intact blijft.

Tabel 2.1 geeft de maximale horizontale afstand weer tussen verticale dilatatievoegen voor ongewapende, lastdragende muren, zoals voorgesteld in een andere draft van NBN EN 1996-2 in 2019. Opmerkelijk hierbij is dat deze tabel in de meest recente draftversie van NBN EN 1996-2 (uit 2020) weer verwijderd werd [12]. **Tabel 2.2** geeft de maximale horizontale tussenafstand weer voor externe niet-lastdragende ongewapende metselwerk wanden.

TABEL 2.1: MAXIMALE HORIZONTALE AFSTAND (M) – VERTICALE DILATATIEVOEGEN (ONGEWAPENDE, DRAGENDE METSELWERKWANDEN) [12]

Metselwerktype	Spouwmuur	Enkelvoudige wand	
	Intern dragend spouwblad	Gevulde kopvoegen	Niet-gevulde kopvoegen
Baksteen	40	30	25
Andere types	30	25	20

TABEL 2.2: AANBEVOLEN HORIZONTALE AFSTAND (M) – VERTICALE DILATATIEVOEGEN (ONGEWAPENDE, NIET-DRAGENDE METSELWERKWANDEN) [12]

Type metselwerk	l_m
Klei metselwerk	10 - 18
Calciumsilicaat metselwerk	5 - 9
Dichte aggregaatbeton en vervaardigd stenen metselwerk	5 - 9
Lichtgewicht aggregaatbeton	4 - 8
Gesteriliseerd metselwerk van cellenbeton	4 - 8
Metselwerk van natuursteen	10 - 20

De toekomstige regelgeving met betrekking tot bewegingsvoegen kan men terugvinden in de nieuwe versie van Eurocode 6 [12]. Deze is tot op heden nog niet officieel gepubliceerd.

2.4 BEÏNVLOEDINGSFACTOREN

Zoals eerder aangehaald, zijn er verschillende factoren die men in rekening moet brengen indien men gebruik wil maken van dilatatievoegen. Deze factoren spelen een grote rol bij de eventuele vorming van scheuren. Hieronder volgt een opsomming van de belangrijkste factoren.

2.4.1 TYPE METSELSTENEN

De invloed van bewegingsvoegen is sterk afhankelijk van het gebruikte type metselwerkstenen. Dit omdat de (hygro)thermische krimp en zwel van verschillende materialen gekend moet zijn om een accurate voeg te voorzien. Het probleem ligt hier vooral bij betonmetselstenen of kalkzandsteen. Deze metselstenen dienen beperkt te worden tot een maximale hygrothermische krimp en zwel van 0,45 mm/m [7].

Volgens Eurocode 6 [8] kan men gebruik maken van genormaliseerde druksterkten f_b om rekenkundig de sterkte van het type metselsteen te berekenen. Deze druksterkte moet men vermenigvuldigen met een vormfactor α . Deze genormaliseerde waarde verwijst naar een kubusvormig exemplaar met afmetingen 100 mm × 100 mm × 100 mm en kan men niet beschouwen als representatieve waarden voor de ware sterkte [13].

2.4.2 TYPE MORTEL

De mortel moet zorgen voor een goede aanhechting, maar ook voor een soepele beweging indien noodzakelijk. Belangrijk is dat er voldoende buigstijfheid is om horizontale windbelasting van het buitenspouwblad over te brengen op het binnenspouwblad via de spouwankers. Een betere hechting tussen steen – mortel zorgt voor een verminderde kans op scheurvorming.

Omwille van stabiliteitsredenen bouwt men maximaal één meter hoogte per dag [5]. Op deze manier verzekert men ook dat de mortel niet tussen de stenen wordt uitgeperst. Het resultaat is dat de mortel van het eerste gedeelte al gekrompen is wanneer men het volgende gedeelte erop plaatst.

Voor mortel kan men rekenen met de druksterkte f_{m0} , dewelke bekomen is door gestandaardiseerde testen. Er is echter tot op heden een gebrek aan kennis inzake het uniaxiale gedrag van mortel, zowel in druk als in trek [13].

2.4.3 AANWEZIGHEID VERZWAKKINGEN IN METSELWERK

Als deuren of raamomlijstingen een vaste verbinding maken tussen het buiten- en binnenspouwblad, is men genoodzaakt om aan de linker- en rechterkant van deze openingen een bewegingsvoeg te voorzien of muurwapening boven en onder de opening aan te brengen. Ramen en deuren vormen verzwakkingen in het metselwerk, waardoor er aan de hoeken extra spanningen zullen optreden. Deze moet men proberen op te vangen.

Niet enkel hun aanwezigheid is van belang, maar ook hun ligging, afmetingen en tussenafstand tussen de verzwakkingen zijn belangrijk [10]. Op **Figuur 2.5** is een sleuf weergegeven, dewelke een ontoelaatbare verzwakking vormt in het dragende metselwerk. Merk ook op dat de stalen ligger werd opgelegd op bakstenen in plaats van op een gebruikelijke betonnen verdeelbalk.



FIGUUR 2.5: ONTOELAATBARE VERZWAKKING – SLEUF [10, p. 109]

Het is voor de hand liggend dat dergelijke sleuven binnen metselwerk ontoelaatbaar zijn. Dit omdat de volledige metselwerkwand op deze manier wordt beschadigd op structureel vlak. Hierdoor wordt de metselwerkwand onstabiel en kunnen er in een later stadium complicaties optreden in functie van de stabiliteit.

2.4.4 TEMPERATUUR EN VOCHTIGHEID

Eén van de hoofdzaken van het krimpen en uitzetten van metselwerk is de temperatuur. Men bekijkt hier zowel de winter- als zomertemperatuur om de impact te schetsen. Deze variëren uiteraard ook per land. De nood aan dilatatievoegen dringt zich hier dus op. Vocht [4] is alsmede ook één van de oorzaken waardoor scheuren ontstaan. Bouwmaterialen ondergaan een volumeverandering wanneer hun vochtgehalte gewijzigd wordt. Het hygrothermisch transport door de wand is dus van groot belang.

Omdat verschillende materialen ook verschillend reageren op vocht en warmte, is voor beide onderdelen de materiaalkeuze van groot belang. De kans op schade is groter nabij de plaatsen waar de materiaaleigenschappen sterk verschillen.

Het klimaat is ook een belangrijke factor voor zowel vocht als temperatuur. Het gebouw is continu blootgesteld aan de klimatologische omstandigheden. Deze omstandigheden bepalen voor een groot deel de temperatuur en het vochtgehalte van de wand.

Volgens Dirk Martens [4] speelt ook de temperatuur bij de uitvoering van het metselwerk een belangrijke rol, vermits deze uitvoeringstemperatuur een effect heeft op de tussenafstand.

2.5 SCHEURVORMING

Vroeg of laat treedt er scheurvorming op binnen het metselwerk van gebouwen. Dit is een courant probleem dat vraagt naar oplossing of preventie. Belangrijk is het karakteriseren en identificeren van scheuren binnen het metselwerk.

In het metselwerk kan men scheurvorming terugvinden als de optredende trekspanning groter is dan de treksterkte. Indien aan deze voorwaarde niet voldaan is, spreekt men van vervormingen [4]. Noodzakelijk hierbij is om de dimensionering van deze scheurwijdte te analyseren. De aanwezigheid van dilatatievoegen zorgt ervoor dat scheurvorming in een vroeg stadium van het bouwproces ontstaat [5]. Hierna zullen deze scheurtjes opgevuld worden, waardoor ze later niet meer zichtbaar zullen zijn en zo geen verlies aan esthetiek vormen voor de metselwerkwand.

2.5.1 KARAKTERISTIEKEN

Scheuren kan men definiëren als discontinue deformaties. Het zijn gaten die gevormd zijn tussen aangrenzende elementen [4]. Het is aangewezen deze scheuren te identificeren volgens drie verschillende karakteristieke eigenschappen: richting van de scheur, de verplaatsing over de scheur en de variatie in scheurwijdte over de scheurlengte. Een bijkomende karakteristieke eigenschap is de diepte van de scheur, maar dit is een eigenschap die moeilijker te definiëren en te meten is.

Wanneer de scheur is geïdentificeerd, volgt het proces van evaluatie [3]. Dit proces onderzoekt de volgende karakteristieken:

- Geometrie: scheurwijdte, -lengte en vorm van scheuren.
- Plaats: dwars of schuin door een steen, in de stootvoeg/lintvoeg of combinatie ervan.
- Oorzaak: bouwfysisch of bouwtechnisch. Trekscheur vs. schuifscheur.
- Evolutie: gestabiliseerd of instabiel (toename in functie van de tijd).

2.5.2 CATEGORISATIE

De scheurvorming binnen het metselwerk is niet noodzakelijk altijd een groot probleem. Soms is een bepaalde scheurwijdte aanvaardbaar [3], maar is er nood aan een afbakening waarbinnen

deze waarden gecategoriseerd worden. Het is dus belangrijk om de scheuren in te delen in categorieën, zodat men de ernst van de scheuren en de bijbehorende gevolgen kan bepalen. Deze categorisatie gebeurt via het zes-punten systeem, zoals voorgesteld in het werk van De Vent [4]. Dit systeem baseert zich op het schadeniveau, uitgedrukt in moeilijkheidsgraad van de reparatie van het probleem en typische scheurwijdte. De recentste versie van dit systeem bestaat uit volgende categorieën [4]:

- Graad 0: Verwaarloosbaar. Haarscheurtjes, kleiner dan 0,1 mm.
- Graad 1: Zeer gering. Fijne scheurtjes die makkelijk op te lossen zijn. Schade hoofdzakelijk beperkt tot de interne muurafwerking. Typische scheurwijdte tot 1 mm.
- Graad 2: Gering. Scheuren makkelijk op te vullen. Ramen en deuren klemmen licht. Typische scheurwijdte tot 5 mm.
- Graad 3: Matig. Scheuren moeten geopend worden en heropgevuld. Kleine hoeveelheid metselwerk moet vernieuwd worden. Deuren en ramen klemmen, leidingen breken en waterdichtheid is vaak aangetast. Typische scheurwijdte 5 tot 15 mm.
- Graad 4: Ernstig. Herstelwerken noodzakelijk, zoals herstel van stenen en kleine muurdelen, vaak boven ramen en deuren. Raam- en deurkozijnen zijn vervormd. Wanden hellen en bollen zichtbaar. Verlies van dragende vermogen van balken. Pijpleidingen scheuren af. Typische scheurwijdte 15 tot 25 mm.
- Graad 5: Zeer ernstig. Invasieve herstelwerken zijn noodzakelijk. Gedeeltelijke of volledige heropbouw. Gevaar voor instabiliteit. Typische scheurwijdte groter dan 25 mm.

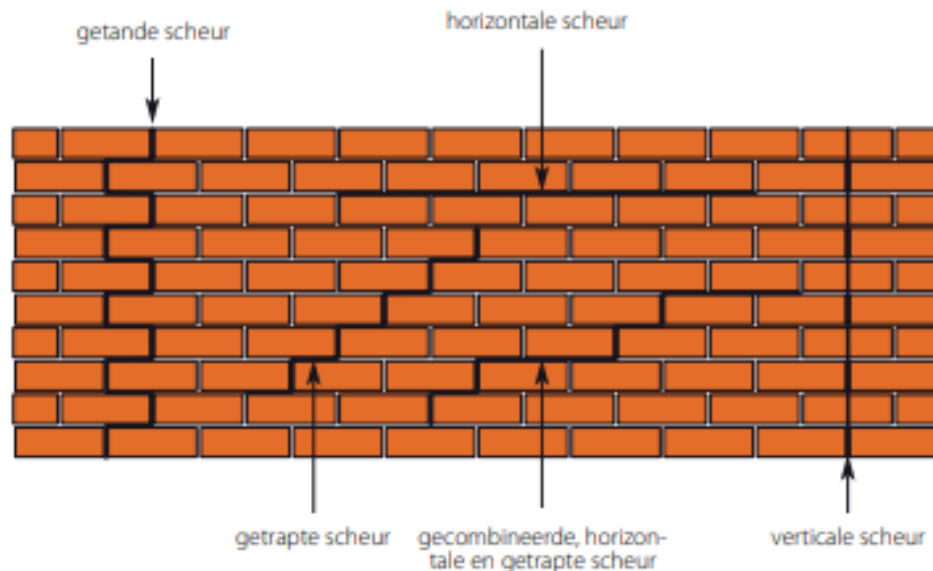
Dit systeem is uiteraard niet waterdicht. Het is echter verstaanbaar voor leken en universeel toe te passen. Niet enkel de scheurwijdte is van belang, maar ook de som van de scheurwijdtes en locatie van de scheuren spelen een rol. Dit kan men echter niet terugvinden in bovenstaand systeem. Merk op dat categorieën 0 en 1 nagenoeg geen herstelling vragen. Bovendien wordt er geen rekening gehouden met het type metselwerk [3]. Duidelijk is ook dat dit allemaal oppervlaktebeoordelingen zijn, en er dus niet gekeken wordt naar het interne gedeelte van het metselwerk.

De Vent [4] heeft voor haar doctoraatsonderzoek een beslissingsboom ontwikkeld, waarmee men scheuren makkelijk kan categoriseren. Deze is echter niet opgenomen in deze masterproef. Geïnteresseerden worden doorverwezen naar de bovenstaande, overeenkomstige literatuur.

2.5.3 SCHEURPATRONEN

Zoals eerder aangehaald kunnen scheuren ontstaan in de steen, de mortel, de interface tussen steen en mortel of in een combinatie van deze opties. Dit zorgt voor een variatie in het

scheurpatroon. Dit scheurpatroon is afhankelijk van de verhouding tussen de optredende spanningen en de (buig)treksterkte van de stenen, de mortel of de interface in de horizontale en verticale richting [3]. De verschillende types scheurpatronen worden weergegeven op **Figuur 2.6**.



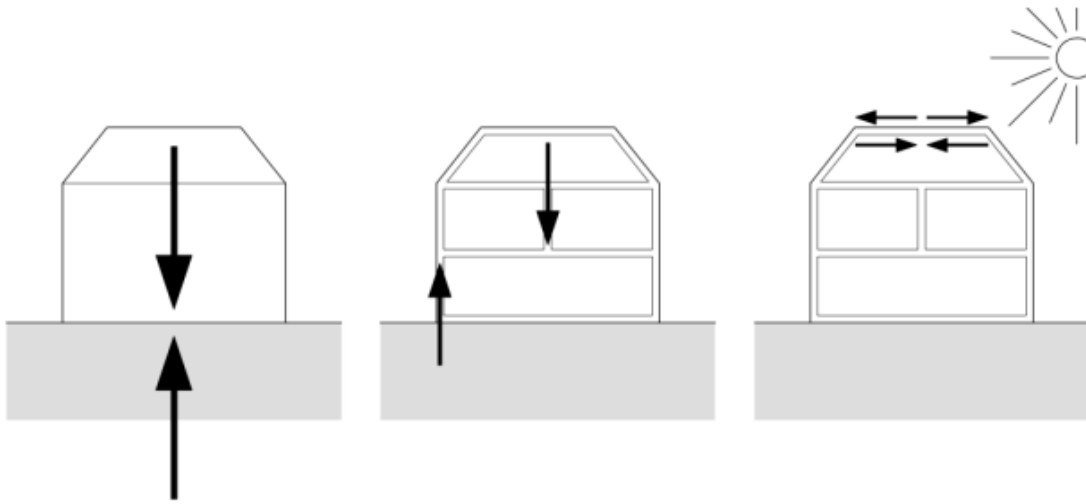
FIGUUR 2.6: SCHEURPATRONEN [13, P. 17]

Deze scheurpatronen zijn steeds te linken aan een bepaalde oorzaak. Zo zijn bijvoorbeeld de diagonale scheurpatronen op bovenstaande **Figuur 2.6** te wijten aan een typische afschuifbelasting. Deze verschillende patronen worden uitgebreid besproken in **§2.5.4 Oorzaken**.

2.5.4 OORZAKEN

Scheurvorming kan te wijten zijn aan verschillende mechanische oorzaken, zoals: zettingen, impactbelastingen, aardbevingen, overbelasting... Deze lijst is echter niet-limitatief. De niet-mechanische oorzaken werden eerder besproken in **§2.4.4 Temperatuur en vochtigheid**.

Het bepalen van de exacte oorzaak is omwille van bovenstaande redenen niet al te eenvoudig. Het is essentieel om de evolutie van scheuren te achterhalen om de juiste oorzaak te kunnen identificeren [3]. Onderstaande **Figuur 2.7** geeft de drie belangrijkste oorzaken van structurele schade weer. In wat volgt, gaat men verder in op enkele belangrijke oorzaken van scheurvorming en een aantal mogelijke gevolgen.



FIGUUR 2.7: ZETTINGEN, OVERBELASTINGEN EN BELEMMERDE DIMENSIONALE VERANDERINGEN [4, P. 74]

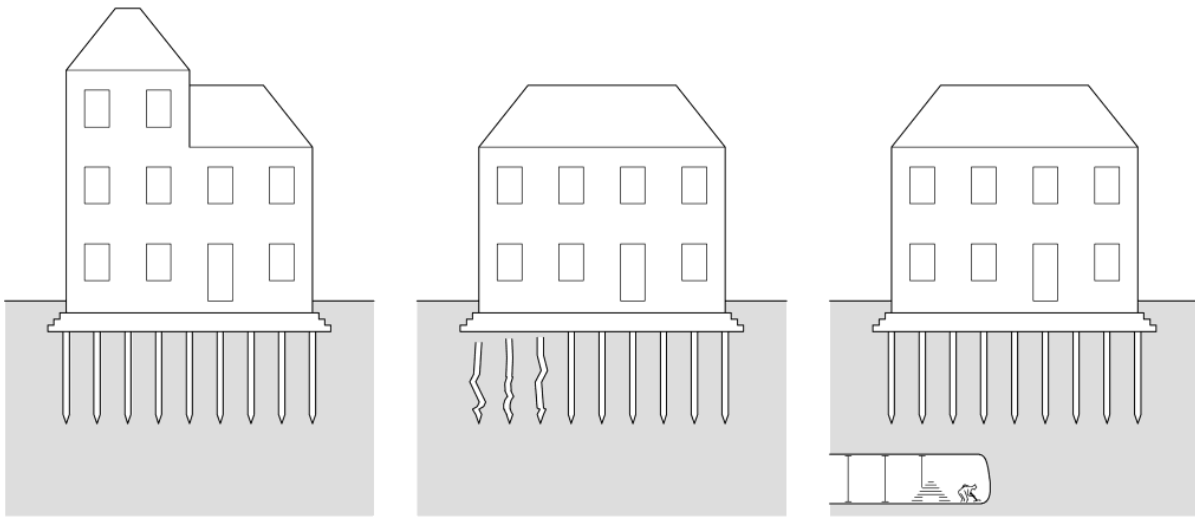
De diagnose stellen is echter één van de moeilijkste en belangrijkste fases in het beoordelen van de schade omdat men de verschillende oorzaken van de schade moet kunnen inschatten. Dit is vaak een moeilijke taak, aangezien men dit enkel kan bepalen door middel van het onderscheid in symptomen en de context van het schadegeval [4].

2.5.4.1 Zettingen

Een wanverhouding tussen de aangebrachte belastingen en het draagvermogen van de grond veroorzaakt scheurvorming door zetting. Hoofdzakelijk wil dit zeggen dat er een onevenwichtige situatie is in de krachtsverhouding tussen de constructie en de grond. Grondsonderingen [15] kunnen helpen met het in kaart brengen van de grondsoorten. Op deze manier kan men de grond beoordelen in functie van de belastingen en karakteristieken van de gewenste aan te brengen gebouwen. Wanneer het draagvermogen van de grond sterk uiteenloopt, is de zetting van een nieuw gebouw niet gelijkmatig, waardoor scheurvorming ontstaat.

De oorzaken van de schadepatronen zijn hoofdzakelijk: verschillend draagvermogen, verschillende belastingen, verschillende soorten funderingen en plaatselijke onvolmaaktheid binnen de fundering. De zettingsverschijnselen treden, afhankelijk van de grond, zeer langzaam op. Dit kan plaatsvinden gedurende meerdere maanden of zelfs jaren. Een deel van deze zettingen treedt op bij de opbouw van het gebouw, waardoor ook scheuren kunnen optreden.

Hoofdzakelijk zijn er drie types van verandering die ervoor zorgen dat zettingen plaatsvinden. Met name verandering in belastingen, verandering in funderingsgedrag en verandering in grondgedrag. Op **Figuur 2.8** kan men deze drie types visueel terugvinden.



FIGUUR 2.8: ZETTINGEN DOOR DRIE TYPES VAN VERANDERING: VERANDERING IN BELASTINGEN, VERANDERING IN FUNDERINGSGEDRAG OF VERANDERING IN GRONDGEDRAG [4, P. 76]

Op bovenstaande figuur ziet men duidelijk de verschillende veranderingen in het funderingsgedrag. Vooral het ondergraven van een bestaande fundering is zeer risicovol. Dit omdat de gevolgen drastisch kunnen zijn. Zo kunnen er bijvoorbeeld niet enkel zettingen optreden, maar kunnen zelfs verzakkingen optreden waardoor de veiligheid van de structuur van het gebouw in gedrang komt.

➤ **Verandering in belastingen**

Deze verandering in belastingen is hoofdzakelijk te wijten aan het gebouw [4]. Dit omwille van het consolidering- en relaxatieprincipe, hetgeen veroorzaakt is door het belasten van de grond. Deze relaxatie en consolidatie worden verder uitgelegd in het puntje over **Verandering in grondgedrag**.

In deze sectie beschouwt men hoofdzakelijk de verandering in directe belasting. Het topic **Verandering in grondgedrag** bespreekt de indirecte belasting. Het gewicht van het gebouw speelt een belangrijke rol bij directe belasting, dit omdat het eigengewicht van het gebouw kan wijzigen gedurende de levensduur van het gebouw. Bijvoorbeeld door een extra verdieping toe te voegen, of een bijgebouw te realiseren aan de zijkanen. Ook het veranderen van de dakbedekking kan invloed hebben op het eigengewicht.

Belangrijk bij deze toevoegingen en wijzigingen aan het gebouw is de verdeling van de belasting. In geval van een niet-uniform verdeelde belasting stijgt de kans op structurele schade aan het gebouw. Dit omdat de fundering niet gedimensioneerd is voor deze aanpassingen aan het gebouw.

➤ **Verandering in funderingsgedrag**

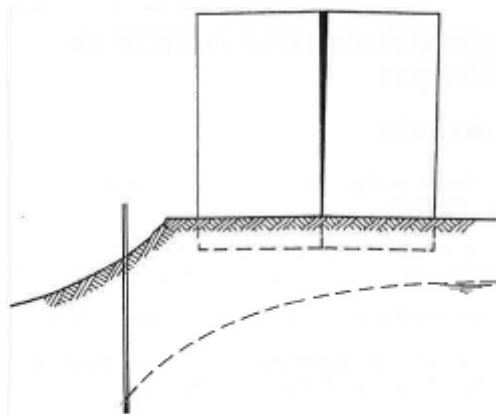
De fundering is een belangrijk onderdeel van een gebouw, gezien deze de belasting van het gebouw overbrengt op de grond. Hierdoor veroorzaakt een verandering in funderingsgedrag automatisch een verandering in belastingoverdracht tussen gebouw en ondergrond [4]. Een verandering in funderingsgedrag kan men hoofdzakelijk beschouwen als een wijziging van de funderingseigenschappen. Voor houten funderingen kan dit bijvoorbeeld voorkomen omwille van houtrot.

Een andere vorm van verandering in funderingsgedrag, is de aantasting van de fundering omwille van zoutaanvallen. Beton- en metselwerkfunderingen kunnen hierdoor aangetast worden, omdat de sulfaten in het zout reageren met de componenten in het portlandcement of hydraulische lijmen. Deze reactie leidt tot zwellen, waardoor een opwaartse druk op het gebouw wordt uitgeoefend door de fundering. Zoutaanvallen zijn bovendien ook een onderdeel van het topic rond chemische reacties, hetgeen in §2.5.4.6 *Vocht en chemische reacties* besproken wordt.

➤ **Verandering in grondgedrag**

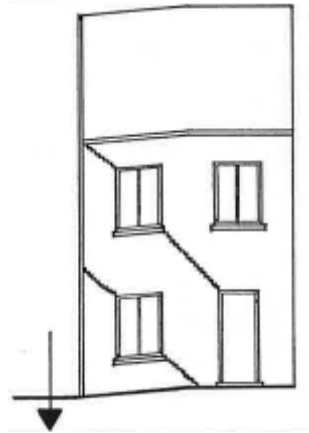
Zoals eerder vermeld zullen temperatuurschommelingen en wijzigingen in de vochtigheidsgraad de eigenschappen van het metselwerk en de ondergrond wijzigen. Bij vorst neemt het grondvolume toe, waarna bij dooi de bovenste grondlagen oververzadigd zullen zijn met water terwijl de onderste grondlagen nog bevroren zijn [15].

Bij zeer droge perioden droogt de grond uit, hetgeen nadelig is voor turf- en veenlagen en ook voor kleigronden. Deze grondsoorten ondergaan een aanzienlijke volumevermindering. Ook de verlaging van de grondwatertafel kan zorgen voor schade bij omliggende gebouwen, hetgeen weergegeven is op **Figuur 2.9**. Dit omdat deze op onregelmatige manier worden beïnvloed door de verlaging van het grondwaterniveau. Deze fenomenen kunnen leiden tot onregelmatige barsten die vanuit de fundering vertrekken. Vooral lichte constructies zullen hier last van hebben. De schadefenomenen treden relatief langzaam op.



FIGUUR 2.9: ZETTINGEN TEN GEVOLGE VAN GRONDWATERTAFELVERLAGING [14, P. 16]

De verandering in het grondgedrag leidt vaak tot de typische scheuren onder een hoek van 45°, die men kan terugvinden op **Figuur 2.10**. Deze vertrekken meestal uit de onder- en bovenhoeken van de ramen of deuren.



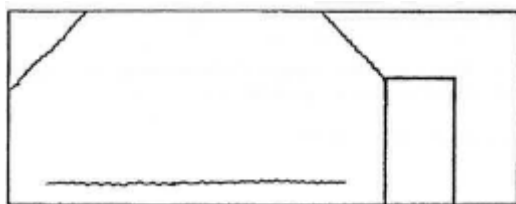
FIGUUR 2.10: TYPISCHE SCHEUREN ONDER EEN HOEK VAN 45° BIJ VERANDERING IN GRONDGEDRAG
[14, P. 12]

Hier ziet men duidelijk dat de zettingstrog zorgt voor een ongelijke zetting van de structuur, waardoor één kant naar beneden schuift. Hierdoor ontstaat dus deze typische scheurhoek van 45°.

2.5.4.2 Overdreven doorbuiging

De aanwezige vloerplaten en balken binnen gebouwen buigen door omwille van hun eigengewichten en opgelegde belastingen. Deze doorbuigingen zijn echter problematisch wanneer er muren zijn aangebracht die deze niet kunnen volgen. Muren buigen, omwille van hun relatieve stijfheid, veel minder door dan vloerplaten of balken. De stabiliteit van het gebouw komt hierdoor niet onmiddellijk in het gedrang, ook al zijn de scheuropeningen zeer groot. Het is dus vooral een esthetisch probleem [14].

Bij een volle scheidingswand treedt de scheur op aan de onderzijde van de muur, meestal in de voeg tussen het metselwerk en de vloer, of in een voeg tussen de onderste baksteenlagen. Deze scheur buigt bovendien ook af richting de vloer. In de praktijk komt men echter ook vaak schuine scheuren tegen, in de bovenhoeken van wanden, zoals op **Figuur 2.11**.



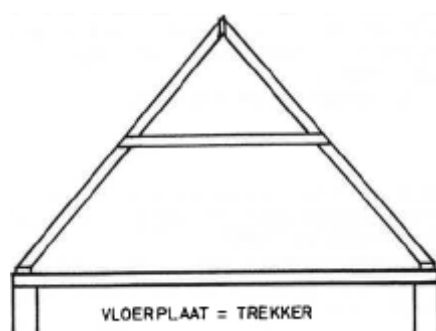
FIGUUR 2.11: SCHEUREN BIJ DOORBUIGING VAN DE VLOERPLAAT [14, P. 19]

De doorbuigingsschade kan gedurende een lange tijd optreden. De meeste schade is echter op te merken gedurende en kort na de opbouw van het gebouw. Na enkele jaren stabiliseert de toestand.

2.5.4.3 Spatkrachten

Als men gebruik maakt van schuine of gebogen onderdelen binnen de constructie, kunnen horizontale spatkrachten optreden. Dit fenomeen komt vaak voor bij daken. De ontwerpfase van daken is hierdoor cruciaal in het voorkomen of opvangen van deze spatkrachten [14].

Deze schade kan men voorkomen door de onderzijde van de spanten te verbinden met een horizontale trekker. Dit kan bijvoorbeeld met doorlopende vloerplaten, zoals op **Figuur 2.12**. Er kunnen echter problemen ontstaan als de vloerplaten zelf niet in staat zijn om de horizontale krachten op te vangen. Dit is gevaarlijk wanneer de spanten steunen op borstweringmuren vervaardigd uit metselwerk. Dit metselwerk kan de spatkrachten moeilijk opnemen, waardoor scheuren ontstaan. In zeer extreme gevallen kunnen grote scheuren leiden tot het omverduwen van de muur en het instorten van het dak. Een oplossing voor dit probleem is het voorzien van dwarse binnenmuren die verankerd zijn aan de borstweringmuren. Deze invloed is echter gering.



FIGUUR 2.12: PREVENTIE DOOR MIDDEL VAN DOORLOPENDE VLOERPLATEN [14, P. 22]

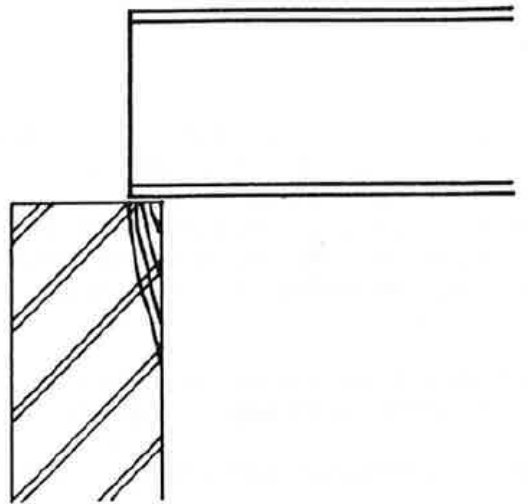
De spatkrachten treden zeer vlug op in de ruwbouwfase, omwille van het feit dat ze hoofdzakelijk veroorzaakt worden door het eigengewicht van de dakconstructie. Overigens kunnen de jonge constructiedelen van metselwerk op dat ogenblik moeilijker de trekkrachten opnemen. Hierdoor ontstaat er vlugger schade.

2.5.4.4 Geconcentreerde belastingen

Indien men belastingen geconcentreerd overbrengt naar het metselwerk, kunnen zeer grote spanningsconcentraties ontstaan. Hierdoor kan het metselwerk scheuren of verbrijzeld worden. Dit probleem komt vaker voor bij verbouwingswerken en niet zo zeer bij nieuwbouwprojecten [14].

Als de geconcentreerde belastingen zorgen voor abnormale zettingen, ontstaan schuine scheuren onder een hoek van $\pm 45^\circ$, vertrekkend uit de onderste hoeken. De omvang van de scheurtjes blijft beperkt, maar de gevolgen kunnen desastreus zijn. Deze toestand ontstaat vlug na de uitvoering, zodra de belastingen worden aangebracht. De zettingen en scheuren komen langzaam tot uiting. De verbrijzelingen en instortingen kunnen echter zeer plots plaatsvinden.

Op **Figuur 2.13** is het schadepatroon van een geconcentreerde belasting weergegeven. Duidelijk hierbij is dat de opleglengte van de horizontale balk veel te kort is. Hierdoor komt de belasting op de rand van de verticale wand te liggen, waardoor scheurtjes onder de vorm van afschilfering ontstaan.



FIGUUR 2.13: AFSCHILFEREN VAN DE OPLEGZONE BIJ GECONCENTREERDE BELASTINGEN [14, P. 25]

Er is dus een nood aan voldoende opleg bij het dimensioneren van een horizontale balk- of plaatconstructie die ondersteund wordt door een dragende (metselwerk)wand.

2.5.4.5 Temperatuurschommelingen

Omdat het metselwerk vervormingen ondergaat, zijn temperatuurschommelingen binnen metselwerk [14] zeer belangrijk. Vooral in de lengterichting zijn deze vervormingen cruciaal. De vervorming wordt gegeven door (2):

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \quad (2)$$

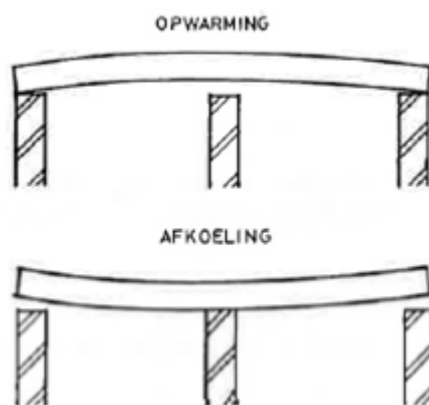
Met:

- Δl de totale lengteverandering
- α de lineaire warmte-uitzettingscoëfficiënt van het materiaal
- l de lengte van het constructieonderdeel
- ΔT de temperatuurwijziging

Omwille van het feit dat de constructieonderdelen niet vrij kunnen vervormen, ontstaan er spanningen die leiden tot scheuren. Hoofdzakelijk doet dit zich voor op locaties waarbij twee verschillende constructiematerialen gebruikt zijn, omdat deze op een verschillende manier zullen vervormen indien de uitzettingscoëfficiënten α verschillen.

Dit schadefenomeen kan men niet voorkomen. Men kan het alleen zo veel mogelijk proberen te beperken door gebruik van uitzettingsvoegen, waardoor de vervormingen kleiner worden door het beperken van de lengte van het constructieonderdeel. Dit werd eerder aangehaald in **§2.1 Algemeen: dilatatievoegen**.

De temperatuurwijzigingen kunnen te wijten zijn aan verschillende factoren, zoals: oriëntatie van de wand, kleur van het oppervlak, aard van het materiaal en aanwezigheid van isolatiemateriaal. Deze schommelingen zijn bovendien niet gelijkmatig over het volledige constructieonderdeel, waardoor temperatuurgradiënten kunnen ontstaan. Dit kan leiden tot ernstige vervormingen, zoals te zien is op **Figuur 2.14**.



FIGUUR 2.14: VERVORMINGEN DOOR VERSCHILLENDE TEMPERATUURGRADIËNTEN [14, p. 27]

Langzaam optredende temperatuurschommelingen kunnen vaak opgevangen worden. Een temperatuurschok zorgt voor grote spanningspieken, waardoor uitknikken of verbrijzeling veroorzaakt kan worden. De tijdsfactor speelt hier dus een grote rol in. Hoofdzakelijk treden deze

scheuren langzaam op. Het is niet voldoende om deze scheuren gewoon te dichten, men moet de bron aanpakken om verdere ontwikkeling van het scheurpatroon te vermijden.

2.5.4.6 Vocht en chemische reacties

Indien het vochtgehalte van een constructiemateriaal wijzigt, doet er zich ook een volumeverandering voor [14]. Door bevochtiging kan zwellen ontstaan, terwijl er door uitdroging krimp kan ontstaan. De scheuren door krimp zullen hoofdzakelijk optreden tijdens de eerste dagen van de uitvoering. Ze stabiliseren na een bepaalde tijd. Men kan dit proces echter zoveel mogelijk beperken door de juiste materiaalkeuzes te maken. Een voorbeeld hiervan is de combinatie van beton en metselwerk. Voor eenzelfde temperatuurtoename, zet beton meer uit dan baksteenmetselwerk. Dit wil zeggen dat men materialen moet kiezen met soortgelijke materiaaleigenschappen op hygroscopisch vlak.

Scheikundige reacties op de constructiematerialen kunnen zorgen voor volumeveranderingen. Vooral mortel, beton en pleisterwerk zijn hier gevoelig aan. Indien deze volumeveranderingen verhinderd worden, kunnen spanningen ontstaan die op hun beurt scheuren veroorzaken. Deze schadefenomenen zijn meestal éénmalig en doen zich later niet meer voor, waardoor geen verdere schade veroorzaakt wordt.

3 MODELLERING VAN METSELWERK

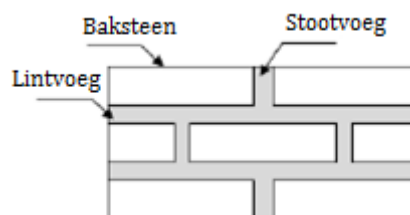
Tot op heden zijn de meeste wetenschappelijke onderzoeken omtrent de tussenafstand van dilatatievoegen uitgevoerd zonder rekening te houden met tijdsafhankelijke effecten, hetgeen dus een conservatieve werkwijze is [5]. Bovendien biedt commerciële ingenieurssoftware weinig mogelijkheden op vlak van modellering van scheuren in metselwerk omdat er vaak gebruik wordt gemaakt van een lineair elastisch gehomogeniseerd macromodel, hetgeen onnauwkeurig is. Dit macromodel wordt besproken in §3.1.3 *Macroschaal*.

Academische eindige-elementensoftware is daarentegen wel polyvalent. Binnen deze software kan men een expliciete modellering van de voegen uitvoeren, door middel van een zogenaamd mesomodel. Bovendien kan men gebruik maken van gedetailleerde materiaaleigenschappen. Het nadeel hiervan is echter dat deze software duur en minder rechttoe-rechtaan is.

Verder zijn er reeds tal van simulaties uitgevoerd op metselwerk inzake scheurpatronen door krimp en uitzetting. Deze zijn echter nooit gebaseerd op data van dilatatievoegen. Alsook is deze data vaak gebaseerd op impactladingen of seismische activiteit, dewelke buiten het bereik van deze thesis vallen, waardoor men hier dus ook niet verder op ingaat.

3.1 SCHALEN

Om metselwerk numeriek te kunnen modelleren, moet men gebruik maken van een bepaald schaalmodel. Uit onderstaande informatie maakt men nadien een keuze, om te identificeren welk schaalmodel het beste model is om dit metselwerk te modelleren. Belangrijk hierbij is dat men ook de haalbaarheid op vlak van rekentijd bekijkt. Een algemeen model is weergegeven op **Figuur 3.1**. Binnen dit algemeen model is er een duidelijk onderscheid tussen metselwerksteen, lintvoeg en stootvoeg.

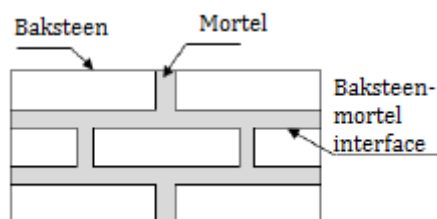


FIGUUR 3.1: NAAMGEVING METSELWERKMODEL [15, p. 41]

Hoofdzakelijk kan men drie schalen identificeren waarvan men gebruik kan maken. Belangrijk hierbij is dat men gaat kijken op welk niveau men dit schaalmodel wil toepassen. Zo is een microschaalmodel zeer gedetailleerd op vlak van de componenten, terwijl een macromodel het metselwerk eerder beschouwt als een soort composiet [13].

3.1.1 MICROSCHAAL

Bij een gedetailleerd microschaalmodel [13] beschouwt men de baksteen en de mortel als continue elementen, terwijl men de interface baksteen-mortel beschouwt als een discontinu element. Dit model is zeer accuraat, maar ook zeer tijdrovend omdat voor elke entiteit (baksteen, mortel of interface) aparte eindige-elementen nodig zijn. Omwille van deze reden is dit model enkel van toepassing voor zeer beperkte, kleine wanden. **Figuur 3.2** geeft een visuele representatie van dit model.

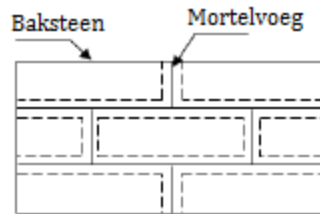


FIGUUR 3.2: MICRO-MODELLERING [15, P. 41]

Dit model maakt ook gebruik van materiaaleigenschappen zoals stijfheidsmodulus, Poisson-factor en inelastische eigenschappen van zowel de steen als de mortel. Hierdoor bekomt men een zeer accuraat model [15]. In de literatuur komt men dit model echter relatief weinig tegen, aangezien efficiëntere alternatieven vaak de voorkeur krijgen op dit model. Dit omwille van de rekentijd voor grote metselwerkconstructies, dewelke hoog is.

3.1.2 MESOSCHAAL

In dit model beschouwt men de bestanddelen van het heterogene materiaal en hun interfaces afzonderlijk. Het staat ook bekend als het vereenvoudigd micromodel. Volgens het model van Lourenço [13], kan men de stenen modelleren door gebruik te maken van elastische elementen. Deze elastische elementen omvatten het niet-lineaire gedrag van de interface-elementen zoals de trek-, afschuiving- en compressiefaalmodes. Hoofdzakelijk wil dit zeggen dat men alle niet-lineaire onderdelen van het model concentreert in de interface-elementen, terwijl alle andere elementen beschouwd worden als zijnde elastisch. Dit schaalmodel vergt hoofdzakelijk minder rekenkracht van computers dan het micromodel. Op **Figuur 3.3** kan men een schematische weergave terugvinden.



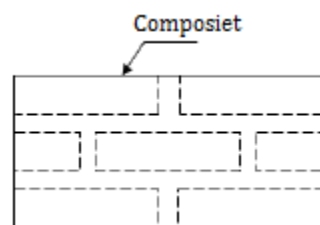
FIGUUR 3.3: MESO-MODELLERING [15, P. 41]

Iedere voeg bestaat binnen deze schaal uit mortel en twee baksteen-mortel interfaces. Merk op dat de rand van de steen hierbij is uitgebreid tot over de mortel, voorgesteld als continue elementen. De mortelvoegen en baksteen-mortel interfaces zijn gemodelleerd als discontinue elementen, zoals weergegeven op **Figuur 3.3**. Hierbij is het Poissoneffect op de mortel niet in rekening gebracht, waardoor dit model minder accuraat is dan het gedetailleerd micromodel [13].

Binnen deze thesis legt men de klemtoon op dit mesoschaalmodel, aangezien het relatief nauwkeurig is voor grote metselwerkwallen. Hierbij zullen echter, zoals al eerder besproken, enkele parameters verwaarloosd worden. Deze verwaarlozing wordt gecompenseerd door de verminderde rekentijd. Drougkas et al. [17] toont aan dat simulaties van micromodellen met en zonder steen-mortel interface bijna dezelfde druksterkte van metselwerk voorspellen.

3.1.3 MACROSCHAAL

Voor dit schaalmodel beschouwt men het metselwerk, de mortel en de interface als een fictief homogeen en continu materiaal, een zogenaamde homogenisatie. Het materiaal is hierdoor een zogenaamde anisotropische composiet, zoals weergegeven op **Figuur 3.4**, waar men gemiddelde waarden voor rek en spanningen binnen het metselwerk aan koppelt. Hierdoor verkrijgt men een eenvoudiger model aangezien men de materiaalcompositie verwaarloost [13]. Het aantal benodigde eindige elementen kan dan ook lager zijn. Deze homogenisatie leidt tot een vereenvoudiging. Hierbij smeert men de effecten van de heterogeniteit van de materialen uit door middel van toepasselijke mechanische aannames [18].

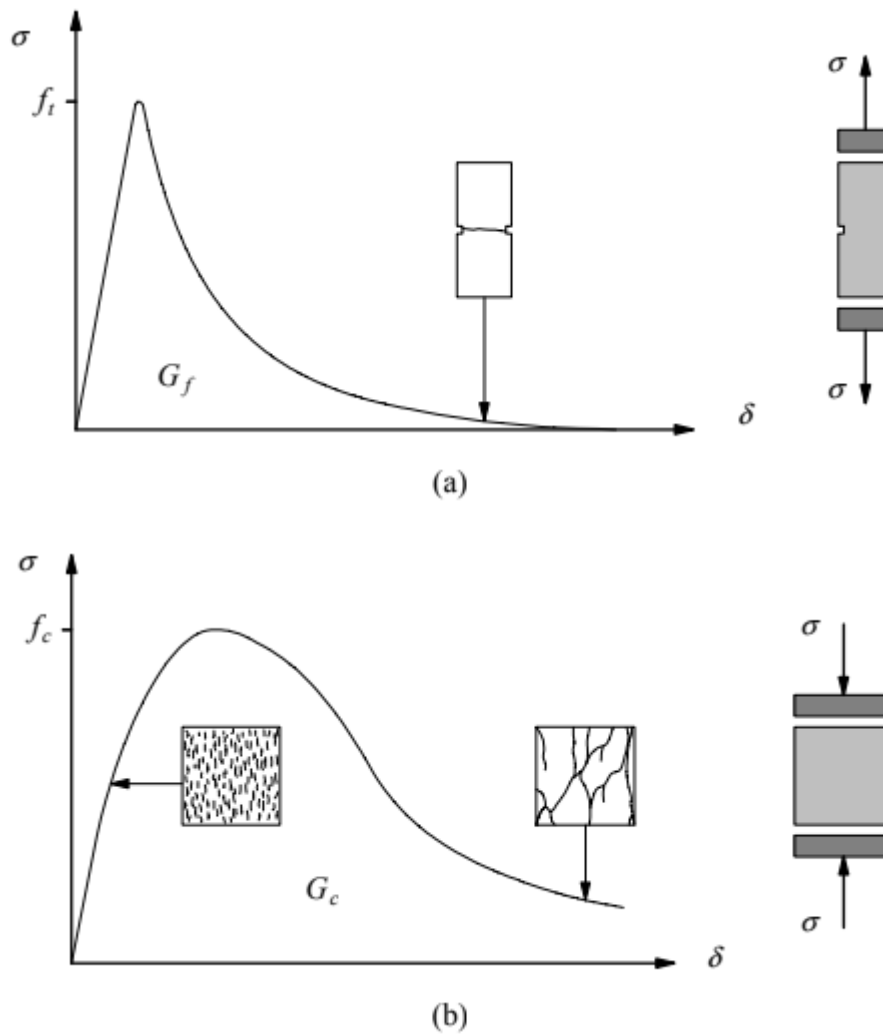


FIGUUR 3.4: MACRO-MODELLERING [15, P. 41]

3.2 BREUKGEDRAG

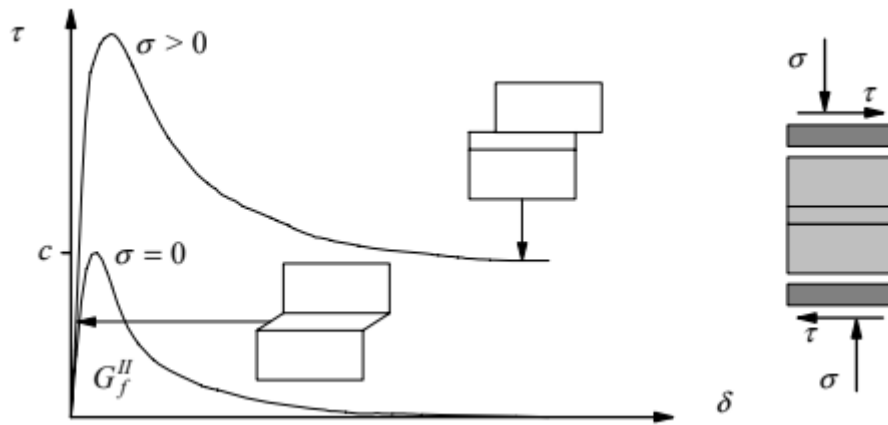
Een belangrijk fenomeen bij het modelleren van een semi-bros materiaal zoals metselwerk is het zogenaamde *softening* gedrag (in het Nederlands: verweking). Dit gedrag zorgt voor een geleidelijke afname van mechanische weerstand bij een continue toename van vervorming opgedrongen op een materiaalmonster of structuur. Dit is een kenmerk van semi-brosse materialen zoals baksteen, mortel, keramiek en beton, dewelke falen als gevolg van een proces van progressieve interne scheurgroei [13]. Deze eigenschap is te wijten aan de heterogeniteit van het materiaal, omwille van de aanwezigheid van verschillende fases en defecten zoals leegtes en gebreken.

Mortel vertoont bijvoorbeeld, zelfs al vóór het belasten, microscheurtjes omwille van de krimp die tijdens het uitharden ontstaat. Ook de baksteen bevat reeds microscheurtjes voor belasting, omwille van het bakproces. Deze microscheurtjes zijn initieel relatief stabiel en groeien enkel indien de belasting wordt verhoogd. Wanneer men de piekbelasting bereikt, versnelt de scheurvorming en zullen er op die manier macroscheuren ontstaan. Deze laatste zijn onstabiel.



FIGUUR 3.5: TYPISCH GEDRAG VAN SEMI-BROSSE MATERIELEN ONDER UNIAXIALE BELASTING EN DEFINITIE VAN BREUKENERGIE: (A) TREKBELASTING; (B) DRUKBELASTING [12, P. 14]

Figuur 3.5 geeft karakteristieke spanning-verplaatsingsdiagrammen voor een semi-bros materiaal in uniaxiale trek en druk weer (het zogenaamd mode I-faalgedrag). Aangenomen wordt dat het inelastisch gedrag zowel in trek als in druk kan beschreven worden als de integraal van het $\sigma - \delta$ diagram. Respectief worden deze grootheden genoteerd als breukenergie G_f en compressie breukenergie G_c , dewelke men beschouwt als zijnde materiaaleigenschappen. Metselwerk kan ook falen in de zogenaamde faalmode II. Deze mode bestaat o.a. uit het slippen van de baksteen-mortel-interface onder afschuifbelasting, zoals weergegeven op **Figuur 3.6**. Verder kan bij een lage voordruk een afschuivingscheur ontstaan in de voeg zelf of het afschuijfalen kan doorheen de baksteen zelf gebeuren, cfr. **Figuur 3.7 (d)**.

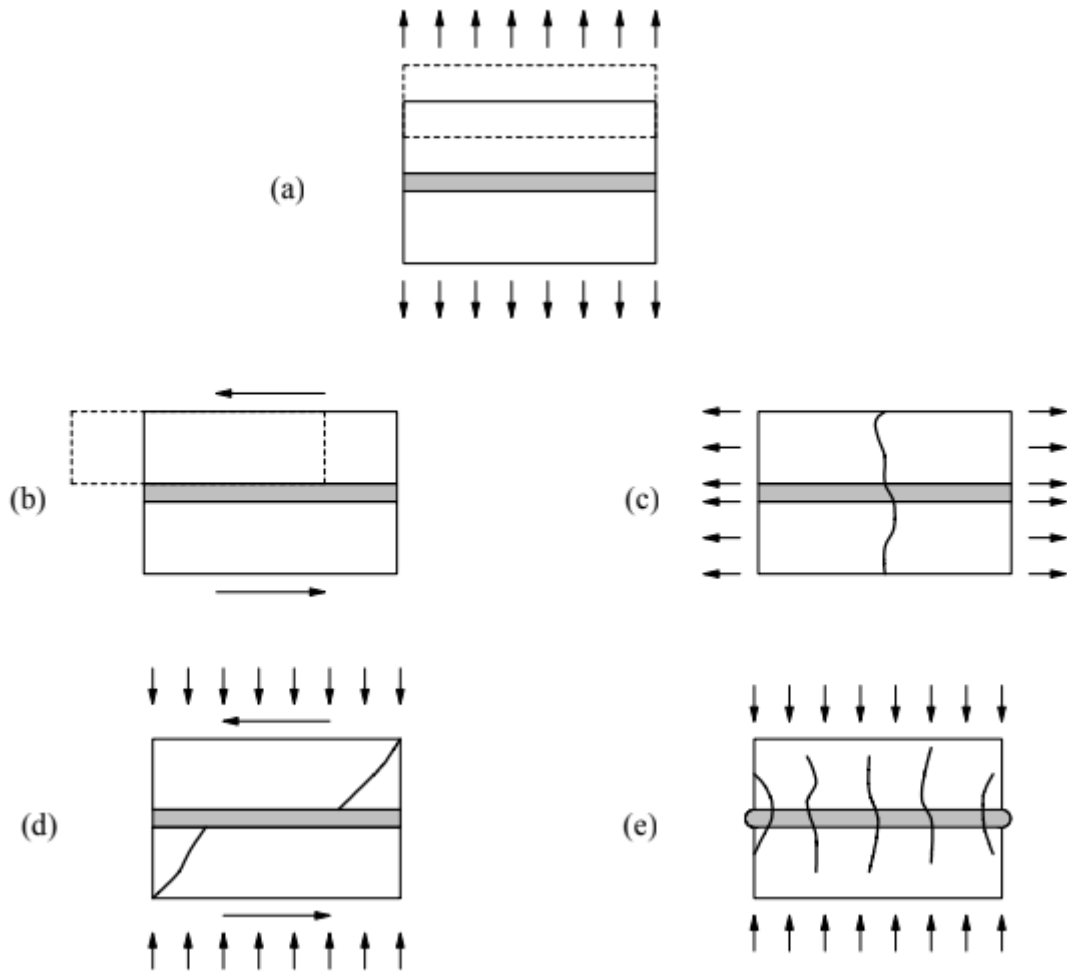


FIGUUR 3.6: METSELWERKGEDRAG ONDER AFSCHEUING EN DEFINITIE VAN MODE II BREUKENERGIE [12, P. 14]

Ook hier kan men de breukenergie G_f^H identificeren als zijnde een integraal van het $\tau - \delta$ diagram. Afschuifbreuk is een kenmerk van metselwerkgedrag dat moet worden opgenomen bij micromodellering. Op bovenstaande **Figuur 3.6** is het ook duidelijk dat metselwerk een typisch Mohr-Coulomb faalgedrag vertoont: bij een hogere voordruk σ vergroot de afschuifsterkte (zonder voordruk wordt de afschuifsterkte de cohesie c genoemd). Voor continuümmodellen, zoals een gehomogeniseerd macromodel, kan deze faalmode echter niet direct inbegrepen zijn omdat de geometrie van de baksteen en die van de mortel niet expliciet gediscretiseerd zijn. Falen is dan geassocieerd met trek- en compressiemodi in een hoofdspanningsruimte.

3.3 HET MODEL VAN LOURENÇO

Een accuraat mesoschaalmodel maakt gebruik van alle basistypes van faalmechanismen binnen het metselwerk. Het model van Lourenço [13] beschrijft de volgende faalmechanismen zoals weergegeven op **Figuur 3.7**: (a) trekscheuren in de voegen, (b) glijden over de lint- en stootvoeg voor lage normaalspanningen, (c) barsten van de bakstenen onder directe spanning, (d) diagonale spanningsbarsten van de bakstenen door normaalspanningen die wrijving veroorzaken in de voegen en (e) stuiken van het metselwerk door hoge normaalspanningen.



FIGUUR 3.7: FAALMECHANISMEN: (A) TREKSCHIEUREN IN DE VOEGEN; (B) VOEGGLIJDEN; (C) BARSTEN ONDER DIRECTE SPANNING; (D) BARSTEN ONDER DIAGONALE SPANNING; (E) STUIKEN VAN METSELWERK [12, P. 44]

Hierbij zijn (a) en (b) voegmechanismen, (c) is een metselwerksteenmechanisme en (d, e) zijn gecombineerde mechanismen. Dit model werd later bijgesteld door Lourenço, in samenwerking met Oliveira, om het cyclische gedrag van metselwerkmuren met belastingen in het vlak te beoordelen [19]. Dit valt echter buiten het bereik van deze thesis, geïnteresseerde lezers worden doorverwezen naar de literatuur.

3.4 EINDIGE-ELEMENTENMETHODE EN PLASTICITEIT

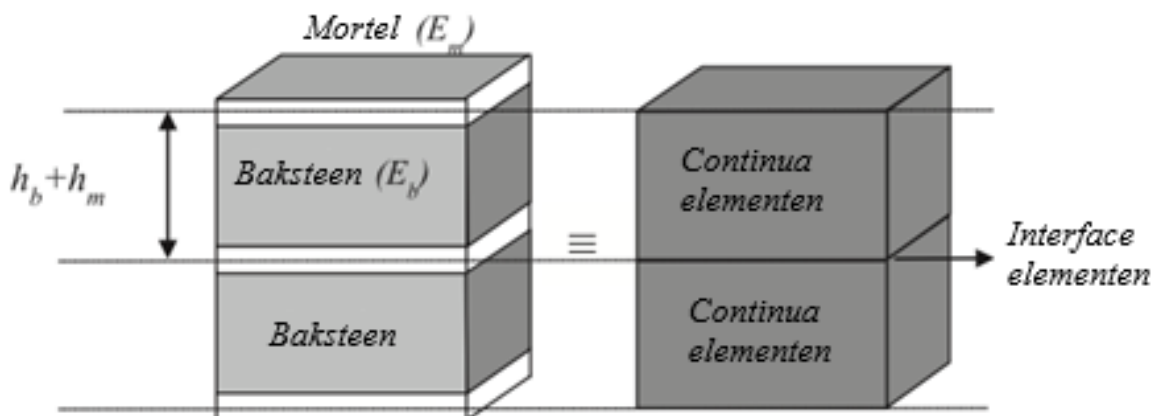
Om metselwerk te analyseren zijn numerieke modellen nodig om het mechanisch gedrag van dit metselwerk beter te verstaan. Bovendien kunnen op deze manier ook de faalmodes gekarakteriseerd worden. Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van de eindige-elementenmethode en dus een ruimtelijke discretisatie. Omwille van die reden introduceert men kort dit topic. Voor meer informatie inzake dit topic, wordt de lezer doorverwezen naar de literatuur die doorheen de tekst te vinden is.

Verder moet men ook rekening houden met het gebruikte schaalmodel, zoals eerder beschreven in §3.1 *Schalen*. Dit omdat het type eindig element afhangt van de gebruikte schaal. Voor dit eindig element definieert men nadien materiaalwetten, zoals de spanning-rekrelatie of de tractie-separatie-relatie zoals beschreven in §3.2 *Breukgedrag*. Men baseert zich hierbij op het schademodel.

3.4.1 EINDIGE ELEMENTEN

Bij deze eindige-elementen methode (EEM) doet men aan ruimtelijke discretisatie. De focus hierbij ligt op het mesoschaalmodel. De structuur van het metselwerk wordt dus in een eindige-elementen *mesh* gediscretiseerd. Per element dient men een stijfheidsmatrix op te stellen. Deze wordt benaderd via numerieke integratie.

Zoals reeds aangehaald, maakt men gebruik van twee types elementen: continua elementen en interface elementen. Onderstaande **Figuur 3.8** geeft beide elementtypes duidelijk weer.



FIGUUR 3.8: GESIMPLIFICEERD MODEL [19, P. 11]

In secties §3.4.1.1 *Continua element* en §3.4.1.2 *Interface element* worden beide elementen en bijbehorende elementtechnologie besproken.

3.4.1.1 Continua elementen

Voor een 2D-model is, voor een vlakke rektoestand, de dikte t gelijk aan de eenheid en is de rek loodrecht op het vlak van het element ϵ_{zz} nul. Voor het model van deze studie maakt men echter gebruik van een vlakspanningstoestand, waarbij de spanning uit het vlak gelijk is aan nul [21]. De dikte van de wand is daarbij klein ten opzichte van de afmetingen in het vlak. Hierbij maakt men gebruik van *plane stress elements*, waarbij ϵ_{zz} dus verschillend is van nul. Deze elementen bevatten vier knooppunten in de modellen in deze thesis.

De vervorming in de knooppunten van de elementen is afgeleid van de Green-Lagrange rektensor in de Cartesiaanse componenten als zijnde:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial U_y} + \frac{\partial U_y}{\partial U_x} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{zz} = 0 \quad (6)$$

In het 2D model zijn er drie spannings- en rekcomponenten voor de continua-elementen (de metselwerkstenen):

- De normaalspanning σ_x en -rek in x-richting ε_x ;
- De normaalspanning σ_y en -rek in de y-richting ε_y ;
- En de schuifspanning σ_{xy} en corresponderende schuifrek ε_{xy} .

Hierbij worden de drie spannings- en rekcomponenten verzameld in de zogenoemde spannings- en rektensor, respectievelijk voorgesteld door (7) en (8):

$$\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_{xy}\}^T \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_{xy}\}^T \quad (8)$$

Deze elementen blijven dus lineair elastisch, zoals eerder aangehaald. Dit kan men implementeren via (9):

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_{el} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (9)$$

Hierbij is \mathbf{C}_{el} een 3×3 elastische constitutieve matrix, met een gegeneraliseerde *E-modulus* in twee dimensies, en dit onder een vlakke spanningstoestand.

3.4.1.2 Interface elementen

In de interfaces heersen gedegenereerde spanningen en rekken, dewelke respectievelijk tracties en sprongen (*jumps*) worden genoemd. Omwille van het feit dat dit interface-element 2D is,

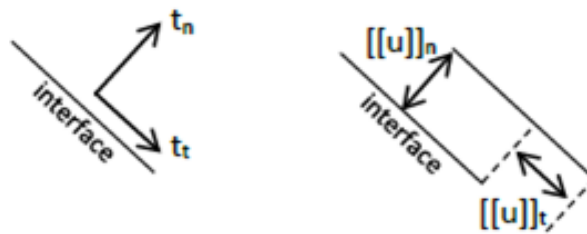
beschouwt men slechts twee tractiecomponenten en twee corresponderende jumpcomponenten [21]:

- De normaaltractie t_n en corresponderende normaalsprong $[[u]]_n$;
- En de schuiftractie t_t en corresponderende tangentiële sprong $[[u]]_t$.

Deze componenten worden weergegeven op **Figuur 3.9**. Ook deze tracties en jumps worden op hun beurt verzameld in een tractie- en jumpvector, respectievelijk (10) en (11):

$$\mathbf{t} = \{t_n \ t_t\}^T \quad (10)$$

$$[[\mathbf{u}]] = \{[[u]]_n \ [[u]]_t\}^T \quad (11)$$



FIGUUR 3.9: COMPONENTEN TRACTIES EN JUMPS [21]

Merk op dat deze tracties en jumps gedefinieerd zijn in een lokaal assenstelsel. Bij lineair elastisch gedrag is de relatie tussen de tracties en de sprongen gegeven door (12):

$$\mathbf{t} = \mathbf{T}_{el}[[\mathbf{u}]] \quad (12)$$

Hierbij is \mathbf{T}_{el} een 2×2 elastische constitutieve matrix, $\text{diag}(k_n \ k_t)$, met k_n en k_t respectievelijk de normaalstijfheid en tangentiële stijfheid.

Om de normale en afschuifstijfheid te bepalen van de interface-elementen, beschouwt men de baksteen en de mortel als elastische veren die in serie met elkaar verbonden zijn. Dit is de transitie tussen een micro- en een mesomodel. De verplaatsing voor de combinatie van het baksteen-mortel systeem moet dan gelijk zijn aan de verplaatsing van het vlakke interface systeem van het baksteenelement onder dezelfde druk- en afschuifbelasting. Overeenkomstig wordt de stijfheid van het systeem [13] berekend met behulp van (17) en (18):

$$k_n = \frac{1}{h_m} \frac{E_m E_b}{E_b - E_m} \quad (17)$$

$$k_{sx,y} = \frac{1}{h_m} \frac{G_m G_b}{G_b - G_m} \quad (18)$$

In sectie §3.4.2 *Schademodel* gaan we verder met het schademodel, hetgeen op het bovenstaande gebaseerd is.

3.4.2 SCHADEMODEL

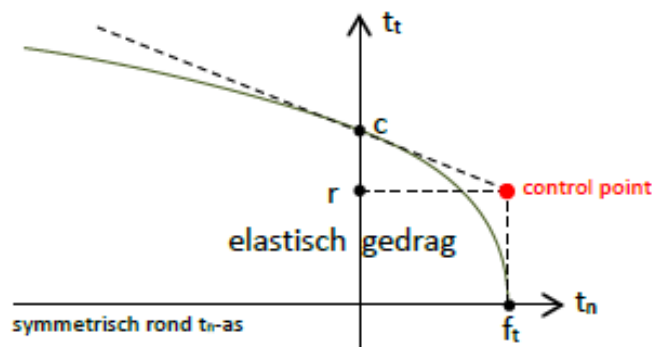
Ondanks dat Lourenço gebruik maakt van een nauwkeurig plastisch model, gaat men in deze studie over naar een schademodel. Hiervoor beschouwt men drie verschillende modelingrediënten. Het eerste ingrediënt is de definitie van een schadenorm, ook wel bekend als de equivalente rek (hier: jump). Dit is de combinatie van afschuiving, trek en druk. Hierna definieert men een startpunt van de schade, de *threshold*. Tot slot moet men definiëren hoe snel de schade toeneemt, door middel van een schade-evolutiewet.

3.4.2.1 Materiaalwet

Binnen deze wet bekijkt men de invloed van elke jumpcomponent. Deze materiaalwet wordt uitgedrukt via een equivalente jump. Voor interfaces geeft dit (19):

$$[[u]]_{eq} = f\left([[u]]_n, [[u]]_t\right) \quad (19)$$

Deze equivalente grootheid is analoog met het concept van een vloeigrens, zoals bijvoorbeeld de von Mises vloeigrens. In de modellen in deze thesis definieert men de equivalente jump volgens een Bézier-kromme [21], waarbij deze functioneert als schadegrens. Deze Bézier-curve staat ook weergegeven op **Figuur 3.10**.



FIGUUR 3.10: BÉZIER-KROMME ALS SCHADEGRENS [21]

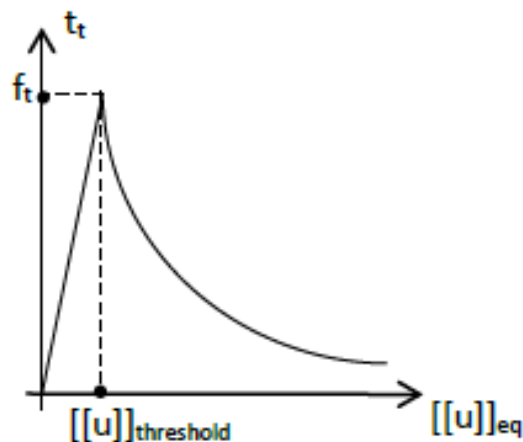
Hierbij is c de cohesie (schuifsterkte) en f_t de treksterkte van de mortelvoeg. De *control point* is typisch aan de Bézier-curve en hiervan is r de coördinaat. Indien een tractiepunt binnen de curve ligt, reageert het materiaal lineair elastisch. Als een combinatie van tracties leidt tot een punt boven de curve, vertoont het materiaal inelastisch schadegedrag. In tegenstelling tot het model van Lourenço [13], is hier geen zogenaamde *compressive cap*: de druktracties mogen dus oneindig groot worden zonder dat schade optreedt.

3.4.2.2 Schade-evolutiewet

Men dient ook een schade-evolutiewet [21] te definiëren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van isotropische schade, waarbij de schade onomkeerbaar is (i.e. de zogenaamde Karush-Kuhn-Tucker-voorwaarden). Deze wordt toegepast op interfaces volgens (20):

$$t = (1 - \omega)T_{el}[\mathbf{u}] \quad (20)$$

Hierbij varieert ω van 0 (geen schade) tot 1 (volledige schade). Deze schade-evolutiewet staat ook weergegeven op **Figuur 3.11**.



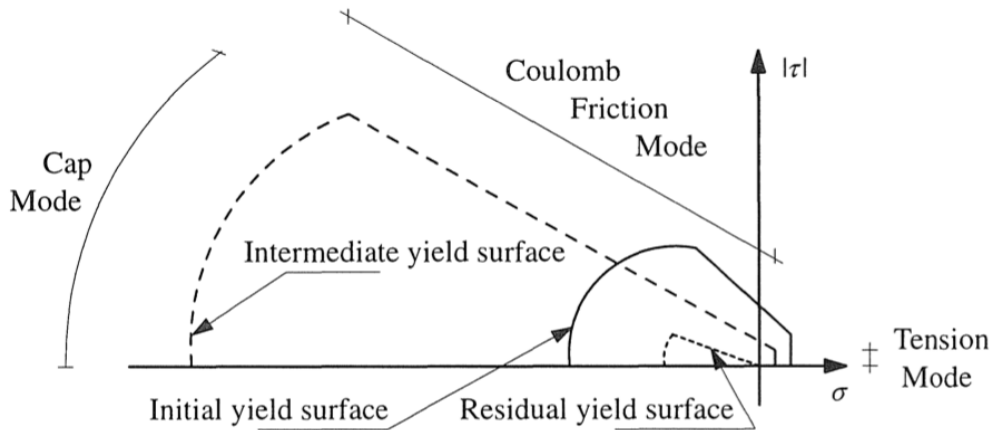
FIGUUR 3.11: VOORSTELLING SCHADE-EVOLUTIEWET [21]

De oppervlakte onder deze curve is de breukenergie G_f wat overeenkomt met de hoeveelheid energie die nodig is om het materiaal volledige schade toe te brengen. Het gedrag van deze breukenergie werd eerder beschreven voor het model van Lourenço in §3.2 *Breukgedrag*. Dit gedrag is analoog voor het schademodel, maar in dit werk, is dit exponentieel.

Om dit model te kunnen voorstellen, beschouwt men een maximum, aangezien metselwerkvoegen een extreem lage dilatantie hebben. Dit is de zogenaamde *mode cap*. Ook met het eerder vermelde *softening* gedrag houdt men rekening en dit voor alle modi van de vloeigrens van de composiet.

Dit leidt tot een relatief complex model, geformuleerd in de context van niet-geassocieerde plasticiteit.

Het onafhankelijke interfacemodel [13] wordt gedefinieerd door een convex samengesteld vloeicriterium dat bestaat uit een spanningsgrens $f_1(\sigma, \kappa_1)$, het Coulomb-wrijvingsmodel $f_2(\sigma, \kappa_2)$ en een elliptisch maximum $f_3(\sigma, \kappa_3)$, zoals weergegeven op **Figuur 3.12**.



FIGUUR 3.12: SAMENGESTELD INTERFACEMODEL [12, P. 49]

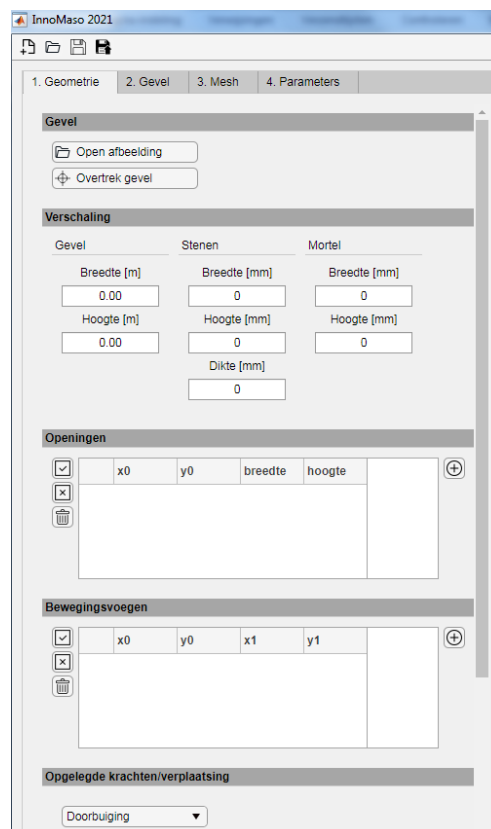
Binnen deze studie wordt echter gebruik gemaakt van een schademodel, waardoor bovenstaande regimes niet van toepassing zijn. Het schademodel is analoog aan dit model mits enkele aanpassingen, maar hier wordt binnen deze studie niet verder op ingegaan.

4 PREPROCESSING TOOL

In het kader van deze masterproef werd door Glenn van Vugt van de onderzoeksgroep CERG een preprocessing tool ontwikkeld om een mesh te genereren voor de uitgevoerde doorbuigings- en zettingsproeven. De tool is bruikbaar in MATLAB indien men de *Image Processing Toolbox* heeft geïnstalleerd. Binnen dit hoofdstuk beschrijft men de werking van deze tool.

4.1 GEBRUIK

Om de tool te gebruiken kan men deze simpelweg opstarten door het programma te dubbelklikken. Door gebruik te maken van onderstaande stappenplannen, kan men eenvoudig gevels inladen en nadien analyseren met behulp van analysesoftware in MATLAB. Na het inladen van de tool komt men op het startscherm, hetgeen is ingedeeld zoals weergegeven op **Figuur 4.1**.



FIGUUR 4.1: INDELING STARTSCHEM

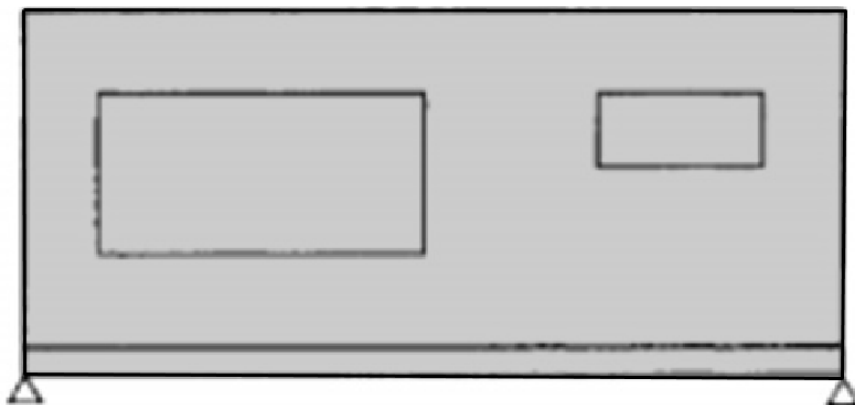
Merk op dat de tool is opgedeeld in vier tabbladen, dewelke hieronder verder besproken worden. De uitleg gebeurt met behulp van een eenvoudige afbeelding van een testgevel.

Voor tabblad '1. Geometrie' is het aangeraden om volgend stappenplan uit te voeren:

- Stap 1: druk op 'open afbeelding', zoals weergegeven op **Figuur 4.2**. Selecteer de gewenste afbeelding (JPEG of PNG) van de gevel om deze als achtergrond in te laden. Bij correct inladen verschijnt een groen vinkje aan de linkerkant van de knop.
- Stap 2: druk op 'overtrek gevel', zoals weergegeven op **Figuur 4.2**. Overtrek de contouren van de gevel door middel van rechte lijnen. De gevel kleurt zwart, zoals te zien op **Figuur 4.3**. Bij correcte uitvoering van deze stappen verschijnt een groen vinkje aan de linkerkant van de knop.



FIGUUR 4.2: OPENEN EN OVERTREKKEN AFBEELDING



FIGUUR 4.3: OVERTROKKEN GEVEL (ZWARTE DOORZICHTIGE OVERTREKKING)

- Stap 3: vul de geometrische eigenschappen van de gevel, stenen en mortel aan onder het puntje 'Verschaling'. Ter vereenvoudiging worden op **Figuur 4.4** enkele fictieve waarden ingegeven.

Verschaling		
Gevel	Stenen	Mortel
Breedte [m]	Breedte [mm]	Breedte [mm]
<input type="text" value="4.00"/>	<input type="text" value="180"/>	<input type="text" value="12"/>
Hoogte [m]	Hoogte [mm]	Hoogte [mm]
<input type="text" value="2.00"/>	<input type="text" value="65"/>	<input type="text" value="12"/>
	Dikte [mm]	
	<input type="text" value="85"/>	

FIGUUR 4.4: FICTIEVE WAARDEN VOOR VERSCHALING

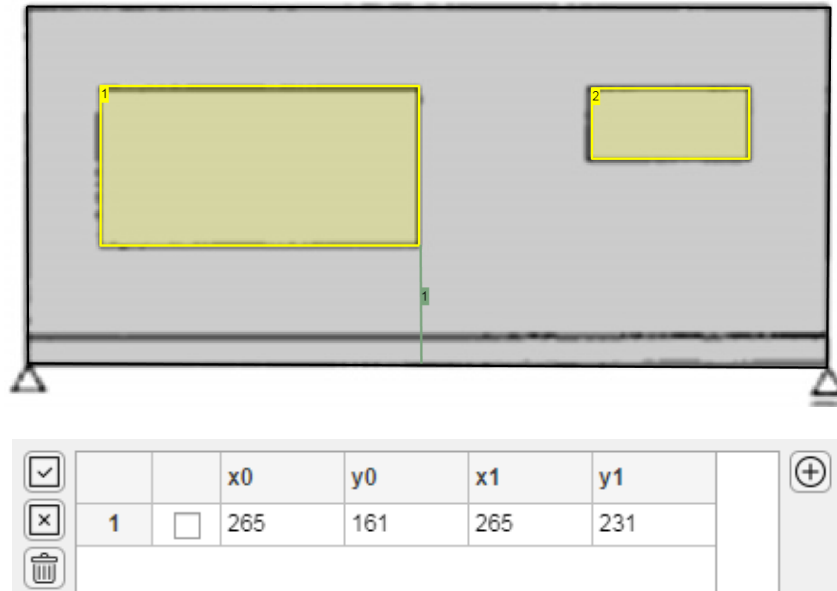
- Stap 4: selecteer het plusje onder 'Openingen' als er openingen aanwezig zijn in het metselwerk. Met behulp van de muis overtrekt men de openingen één voor één. Let op: hierbij moet men éénmaal klikken en vasthouden met de muis om een rechthoekig gebied te selecteren voor de opening.

De overtrokken openingen verschijnen in het geel zoals op **Figuur 4.5**, met toegewezen volgnummer. Bovendien verschijnen deze openingen volgens volgnummer in de tabel met bijbehorende afmetingen en absolute coördinaten. De verschaling van deze absolute coördinaten gebeurt in een latere stap.

		x0	y0	breedte	hoogte
1	<input type="checkbox"/>	77	68	186	93
2	<input type="checkbox"/>	365	70	92	41

FIGUUR 4.5: OVERTROKKEN OPENINGEN EN BIJBEHORENDE TABEL

- Stap 5: analoog aan stap 4 moet men de 'Bewegingsvoegen' overtrekken, hierbij dient een rechte lijn gemaakt te worden in plaats van een rechthoek. De dilatatievoegen verschijnen in het groen, zoals zichtbaar op **Figuur 4.6**. Ook deze verschijnen volgens volgnummer in de tabel, inclusief afmetingen en absolute coördinaten.



FIGUUR 4.6: OVERTROKKEN DILATATIEVOEG EN BIJBEHORENDE ABSOLUTE COÖRDINATENTABEL

- Stap 6: selecteer een zetting of leg een doorbuiging op aan de gevel. Bij de zetting kan men kiezen of men gebruik maakt van een put- of dalzetting. In dit geval maakt men gebruik van een doorbuiging volgens aangegeven formule.
- Stap 7: indien van toepassing, kan men onderaan een balk specificeren (beton of staal), met bijbehorende hoogte. Op **Figuur 4.7** is er gekozen voor een betonnen balk met doorsnedeafmetingen 200 mm × 200 mm.

Opgelegde krachten/verplaatsing

Doorbuiging

Doorbuiging

$$f(x) = \frac{384}{5 L^4} \cdot \frac{x}{24} ((L^3 - 2 L x)^2 + x^3)$$

Zetting

Zetting

Startpunt zetting (verhouding tot totale lengte, van links te bekijken)

Dalpunt zetting (verhouding tot totale lengte, van links te bekijken)

Dal

0.40

0.60

Balk aan onderzijde

Balk aan onderzijde

Beton

Hoogte balk [mm]

200

Dikte balk [mm]

200

FIGUUR 4.7: SPECIFICATIE ZETTING, DOORBUIGING EN BALK

Nadat men de stappen van '1. Geometrie' heeft uitgevoerd, kan men overschakelen naar tabblad '2. Gevel' en onderstaande stappen uitvoeren:

- Stap 1: specificeer een kleur voor de gevel, stenen, balk en zetting. Wanneer gewenst kan men de contouren van de randen aanpassen. Voor dit model werden de standaardwaarden gebruikt, zoals weergegeven op **Figuur 4.8**.

Weergave

Buitenranden gevel

Kleur buitenrand

Dikte buitenrand

1.50

Stenen

Kleur omtrek stenen

Dikte omtrek stenen

0.15

Balk

Kleur balk

Dikte rand balk

0.50

Zetting

Kleur zettingscurve

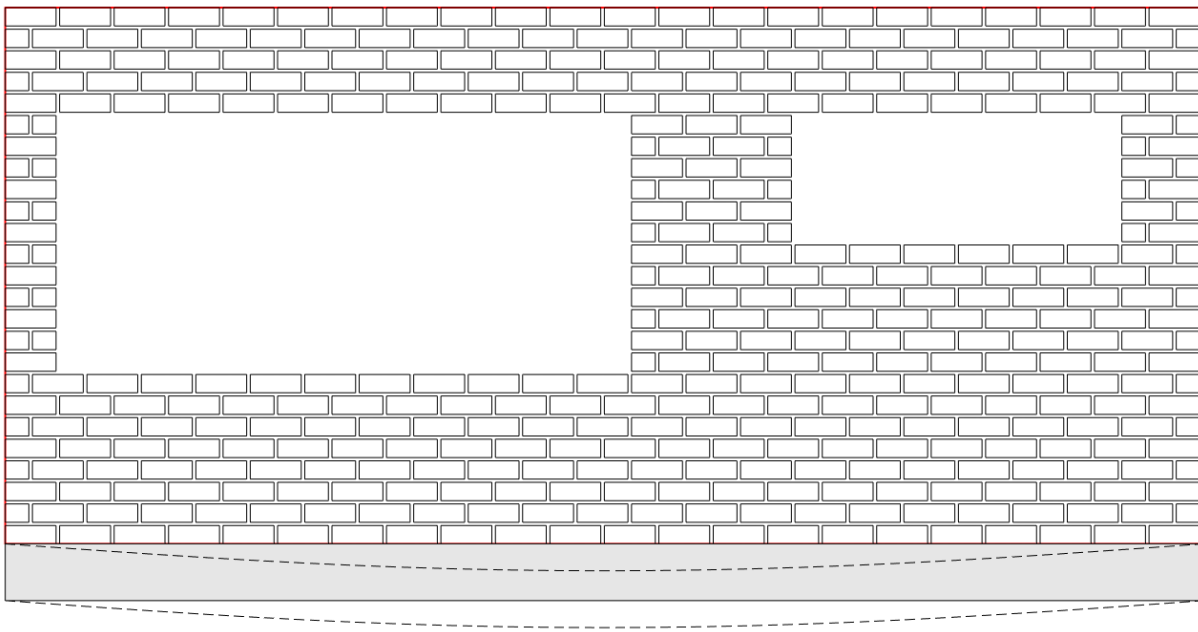
Dikte zettingscurve

2.50

Genereer gevel

FIGUUR 4.8: GEBRUIKTE WAARDEN 2D-MODEL

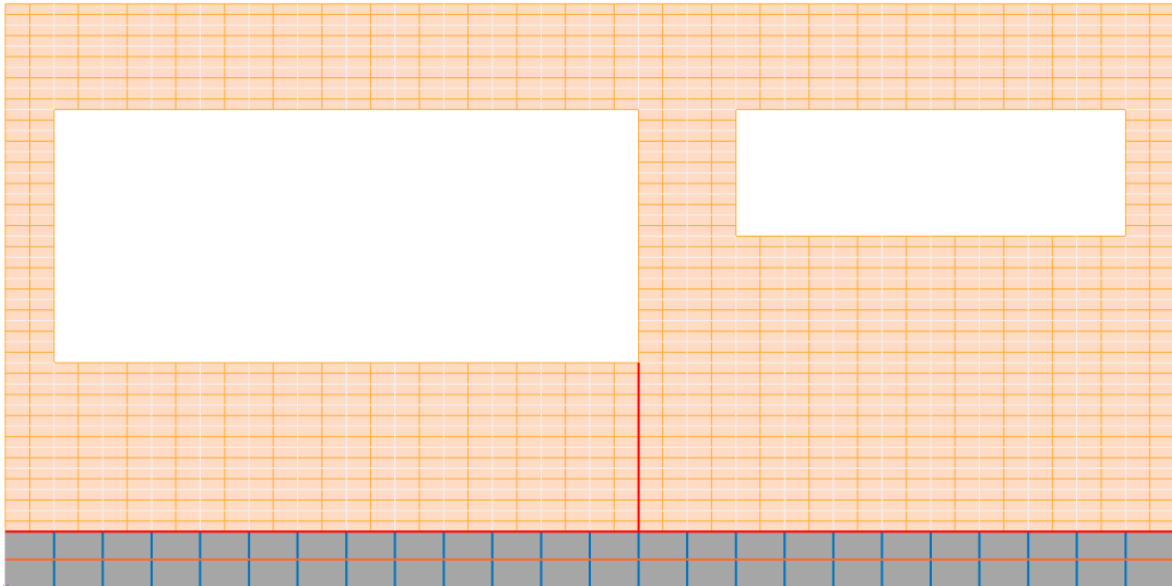
- Stap 2: klik op 'Genereer gevel'. De tool maakt nu een 2D-model van de ingeladen gevel, de uitkomst hiervan is zichtbaar op **Figuur 4.9**.



FIGUUR 4.9: UITKOMST GENERATIE GEVELMODEL

Na het genereren van het 2D-model in tabblad 2, kan men overschakelen naar tabblad '3. Mesh' om de mesh te genereren volgens volgend stappenplan:

- Stap 1: specificeer ongeveer het aantal elementen horizontaal per halve steen en verticaal per volledige steen. Dit omdat er in het midden van een (volledige) steen een mogelijk breukvlak voorzien is. Voor de balk specificeert men het aantal elementen verticaal. De standaardwaarden worden bij dit voorbeeld behouden.
- Stap 2: klik op 'Genereer mesh'. De tool genereert nu een mesh met de gegeven input. Dit kan enige tijd in beslag nemen als men werkt met grote gevels. De tool geeft automatisch aan wanneer deze stap voltooid is en geeft ook de rekentijd weer. Onder 'Weergave' kan men naar wens de kleuren en diktes aanpassen van verschillende grootheden. Voor dit voorbeeld werden de standaardinstellingen gebruikt. De uitkomst van de meshgenerator kan men terugvinden op **Figuur 4.10**. Op deze afbeelding is het karakter van het mesoschaalmodel duidelijk zichtbaar. De verticale blauwe lijnen stellen interface-elementen in de betonbalk voor, analoog aan de interface-elementen in het metselwerk. Voor de analyse heeft dit geen functie, maar deze worden louter voorzien om een doorlopende balk te weergeven bij de vervormde weergave. Indien deze elementen niet aanwezig zouden zijn, krijgt men allemaal openingen.



FIGUUR 4.10: UITKOMST GEGENEREERDE MESH

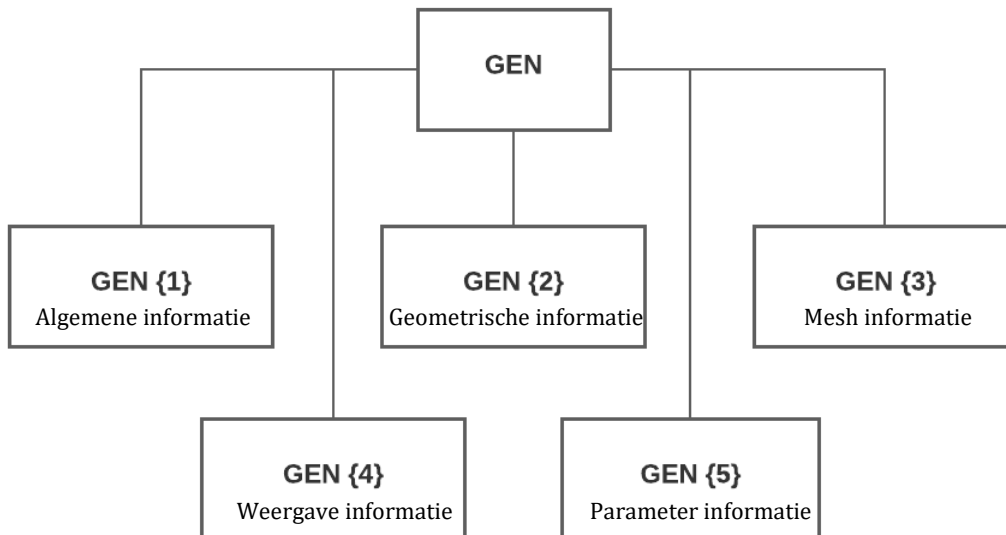
Bovenstaande mesh kan men bovendien ook opslaan. Hiermee kan men deze eenvoudig opnieuw inladen om aanpassingen te maken, of inladen in een ander programma dat compatibel is.

In tabblad '4. Parameters' staan verschillende parameters die men naar wens kan aanpassen. Er zijn echter standaardwaarden reeds ingegeven. Voor bovenstaand voorbeeld worden de standaardinstellingen van de tool gebruikt.

4.2 WERKING

De werking van de tool is gebaseerd op één centrale variabele waar alle belangrijke informatie wordt opgeslagen. Bij elke actie wordt eerst de variabele aangepast, waarna de interface volgt op basis van de informatie die gegeven is aan de variabele. Deze centrale variabele heeft de naam 'GEN' en bestaat uit een *cell array* met grootte 1×5 .

Op **Figuur 4.11** is de opbouw van de hoofdvariabele weergegeven.



FIGUUR 4.11: OPBOUW HOOFDVARIABLE

De hoofdvariabele krijgt dus informatie uit vijf bijkomende variabelen. Deze overige variabelen bevatten informatie over verschillende noodzakelijke onderdelen van de meshgenerator. Met behulp van de tool worden deze variabelen in een MAT-bestand opgeslagen.

Hieronder bespreekt men de verschillende GEN-variabelen. Daarbij worden GEN 4 en GEN 5 niet besproken, aangezien deze enkel betrekking hebben op het uiterlijk van de tool. De achterliggende werking is bovendien te complex en te vergaand.

4.2.1 ALGEMENE INFORMATIE

In $GEN \{1,1\}\{i\}$ wordt de algemene informatie van de tool opgeslagen. De parameter i kan hier slechts één waarde aannemen (1), dit is de bestandsnaam, die in een 1×1 cell array wordt opgeslagen.

4.2.2 GEOMETRISCHE INFORMATIE

In $GEN \{j,2\}\{i\}$ wordt de geometrische informatie van de tool opgeslagen. Hierbij is de parameter j gekoppeld aan het type coördinaten, met name absolute coördinaten (1) en verschaalde coördinaten (2). De parameter i kan variëren van 1 tot 12. Deze parameter houdt rekening met het type element waarvan men de geometrische informatie opvraagt. Bijkomend bezit deze variabele ook informatie over de achtergrond, met name de ingeladen afbeelding. Deze achtergrondfoto wordt opgeslagen in een *image array*.

De overige onderdelen van parameter i zijn hoofdzakelijk *numeric arrays* en bevatten informatie over volgende elementen: buitenranden, openingen, bewegingsvoegen, oplettingen, opgelegde

krachten, betonbalken, zettingen, verschalingsfactoren, eerste steen en geometrisch centrum. Elk onderdeel heeft daarbij zijn eigen matrix met rijgrootte n en een vast aantal kolommen. Deze matrix bevat op zijn beurt informatie over bijvoorbeeld de coördinaten van het onderdeel, de grootte, de richting... Omdat deze matrices zeer diepgaand zijn, bespreekt men deze niet in detail binnen deze thesis.

4.2.3 MESH INFORMATIE

De variabele $GEN \{j,3\}\{i\}$ bevat de mesh informatie van de tool. Hierbij is de parameter j gekoppeld aan een vast type coördinaten, de verschaalde coördinaten. De parameter i kan variëren van 1 tot 8. Volgende informatie kan hierin opgeslagen zitten: de coördinatenvector van de stenen en knopen, meshparameters, de connectiviteitsvector van de elementen, de randvoorwaardenvector en het verloop.

Deze matrices zijn analoog aan de matrices uit §4.2.2 *Geometrische informatie*. Deze matrices bevatten bijkomend echter ook informatie over de horizontale en verticale interface van bijvoorbeeld de voegen.

Aan deze matrices zijn enkele variabelen gekoppeld, met name:

- COORD: de coördinaten van de knopen;
- CON: de connectiviteitsvector die per element kijkt welke knoop deel uitmaakt van welk element;
- CONINT: analoog aan CON, maar deze connectiviteitsvector heeft betrekking op de interface-elementen;
- SUPPORTS: de randvoorwaardenvector voor de ondersteuning;
- FU: de krachtverplaatsing;
- DISP: het verloop van de weergave.

Verder bevatten GEN 4 en GEN 5 informatie over respectievelijk de weergave en de parameters die gebruikt worden binnen de tool. Deze weergave kan men via de gebruikersinterface aanpassen naar wens. Ook de parameters kan men wijzigen indien noodzakelijk.

5 NUMERIEKE ANALYSES: BENCHMARKSIMULATIES EN PARAMETERSTUDIES

Dit hoofdstuk bestaat uit kleine benchmarksimulaties om de numerieke analysesoftware te testen. Op die manier krijgt men een beter begrip van de werking van de software en kunnen eventuele vroegtijdige problemen weggewerkt worden. Hiervoor legt men kort de numerieke analysemethode uit. Daarna wordt er voor de benchmarksimulaties één bepaalde testcase gebruikt. Voor deze case doet men dus verschillende aanpassingen in functie van geometrie, parameters, randvoorwaarden...

Verder worden binnen dit hoofdstuk enkele parameterstudies uitgevoerd waarbij men een groot deel van de parameters constant houdt, terwijl men andere wijzigt. Zo kan men de invloed van deze parameters bekijken in functie van de specifieke case.

Ter vergelijking van eventuele verdere studies worden hieronder de specificaties weergegeven van de computer waarop alle tests zijn uitgevoerd:

- Besturingssysteem: Microsoft Windows 10 Home
- CPU: Intel Core i7-10700KF CPU @ 3.80GHz, 3792 Mhz, 8 Cores
- GPU: NVIDIA GeForce RTX 3070
- Werkgeheugen: 32 GB RAM
- Moederbord: Micro-Star International Z490-S01 (MS-7C98)

5.1 WERKING NUMERIEKE ANALYSE

Voor de uitvoering van de numerieke analyses maakt men gebruik van een incrementeel-iteratieve methode, met name het Newton-Raphson algoritme. De focus van deze numerieke analyses ligt op een niet-lineair model, zoals beschreven in §3.4.2 *Schademodel*. Hiervoor gebruikt men drie ingrediënten: de definitie van een schadenorm (jumps); het startpunt van de schade (threshold); en een schade-evolutiewet.

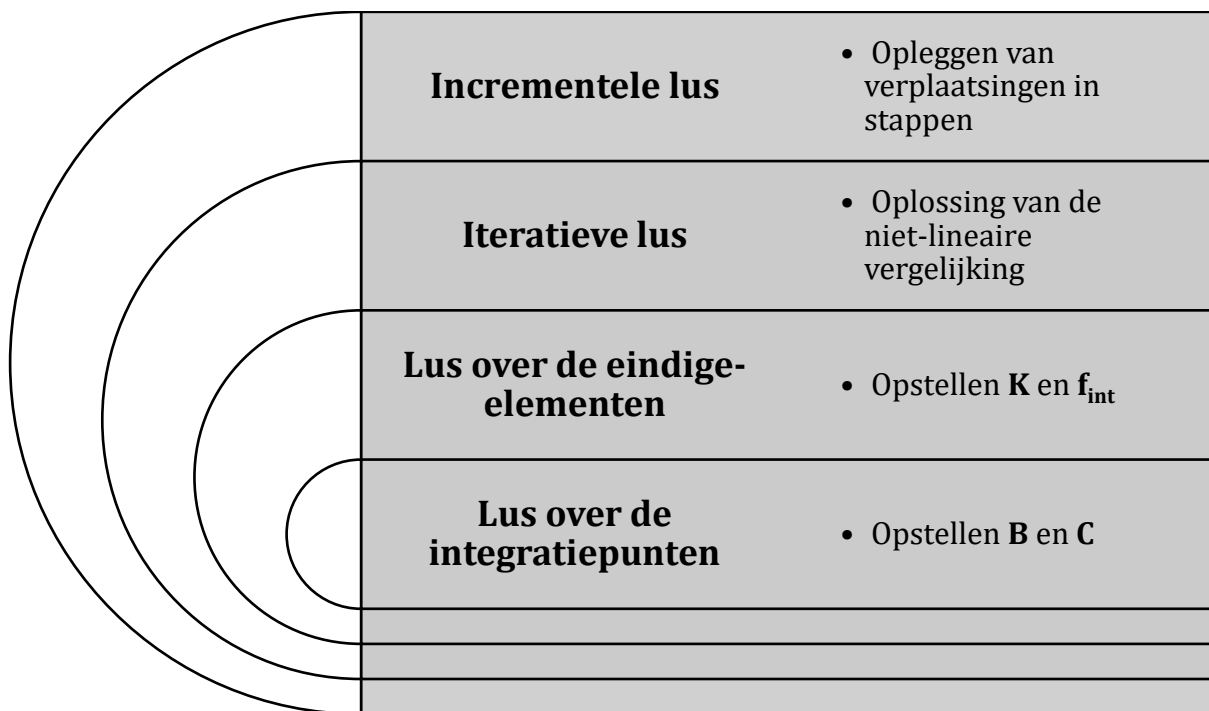
Omwille van het niet-lineaire constitutieve (spanning-rek of tractie-jump) gedrag per integratiepunt, zal ook het globale, structurele (kracht-verplaatsings) gedrag niet-lineair zijn [21]. Hiervoor is er een nood aan evenwicht tussen de externe en interne krachten ten gevolge van de inwendige spanningen, dewelke op hun beurt afhankelijk zijn van de rekken/jumps en constitutieve wet. Dit wil zeggen dat men volgende niet-lineaire vergelijking (21) moet oplossen:

$$\mathbf{Ku} = \mathbf{f}_{\text{ext}} - \mathbf{f}_{\text{int}} = \mathbf{R} \quad (21)$$

De stijfheidsmatrix K legt de relatie tussen krachten en verplaatsingen. De matrix u bevat de verplaatsingen in de knopen. Verder zijn f_{ext} en f_{int} respectievelijk de externe en interne krachten zoals hierboven vermeld. De oplossing van deze vergelijking wordt opgeslagen in matrix R .

Deze niet-lineaire vergelijking wordt opgelost middel van de Newton-Raphsonmethode. Deze iteratieve analysemethode maakt gebruik van een tangentiële stijfheidsmatrix, gelijkaardig aan de afgeleide van de stijfheidsmatrix. Omdat men geïnteresseerd is in het volledige structurele gedrag – het volledige kracht-verplaatsingsgedrag – zal men werken in stapjes (incrementen).

Deze incrementele-iteratieve oplossingsmethode voor eindige-elementenanalyses bevat vier genestelde lussen [21], zoals weergegeven op **Figuur 5.1**. Hierbij is B de matrix die de relatie legt tussen de rek ε in de integratiepunten en de verplaatsingen in de knopen u . De matrix C is de constitutieve matrix, dewelke in elk integratiepunt de relatie legt tussen spanningen en rekken. Dit is analoog aan de elastische constitutieve matrix zoals besproken in §3.4.1.1 *Continua elementen*.



FIGUUR 5.1: LUSSEN INCREMENTELE-ITERATIEVE OPLOSSINGSMETHODE

Omdat er zeer veel niet-lineariteiten aanwezig kunnen zijn in het model (vele beschadigde voegen), ontstaan er zogenaamde bifurcaties [22], waarbij meerdere evenwichtstoestanden bestaan voorbij de grensbelasting. Hierdoor ontstaat er een splitsing in het kracht-ervormingsdiagram van het systeem. In conventionele incrementele-iteratieve methodes wordt er een eigenwaarde (of spil) analyse van de tangentiële stijfheidsmatrix uitgevoerd om het bifurcatiepunt op te sporen. De eigenwaardeanalyse wordt gevolgd door een verstoring van het

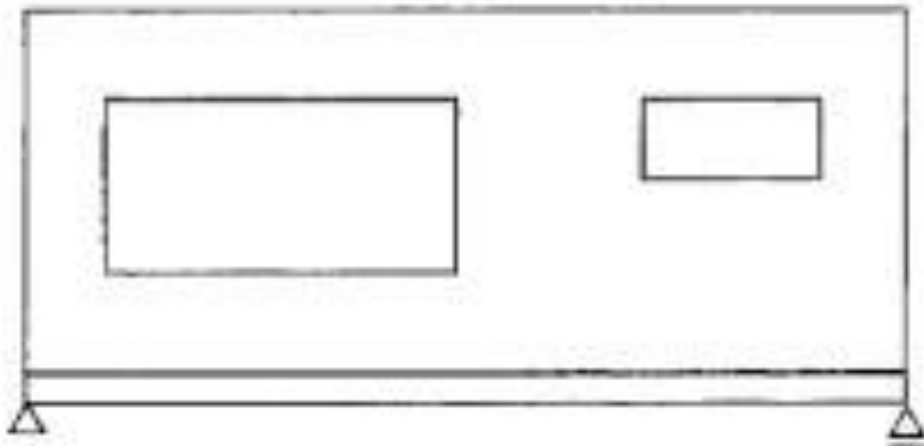
incrementele verplaatsingsveld. Deze procedure is echter niet geïmplementeerd in de gebruikte code in deze thesis.

5.2 BENCHMARKSIMULATIES

Zoals eerder vermeld, test men binnen topic de software en lost men problemen op waar nodig door middel van het gebruik van slechts één simpele testcase. Op deze testcase kan men dan verschillende analyses toepassen via de mesh die uit de preprocessing tool wordt verkregen. Tijdens de werkelijke testfase heeft men meerdere tests uitgevoerd, waaruit men de meest relevante hieronder voorstelt.

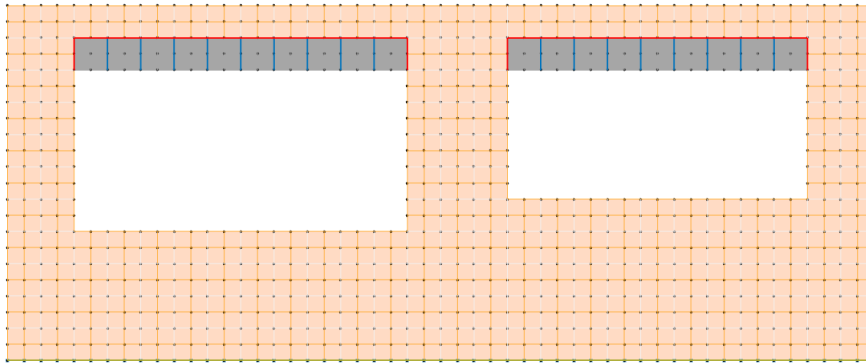
5.2.1 GEBRUIKTE TESTCASE

De gebruikte testcase is een eenvoudige metselwerkwand met twee openingen, zoals weergegeven op **Figuur 5.2**. Er is speciaal voor dit ontwerp gekozen omwille van de eenvoud, op die manier kan men makkelijk verschillende parameters wijzigen zonder veel verlies aan rekentijd. De bedoeling is dus dat men deze case gaat gebruiken om enkele simulaties uit te voeren. Zo kan men eventuele bugs uit het programma halen. Bovendien verduidelijkt dit de werking van het programma.



FIGUUR 5.2: MODEL TESTCASE

De gevel heeft een breedte van 3,40 m en een hoogte van 1,80 m. De openingen zijn respectievelijk 50 cm × 25 cm (links) en 40 cm × 18 cm (rechts). De gebruikte metselwerkstenen hebben volgende afmetingen: 290 mm × 140 mm × 100 mm. Dit geeft ons onderstaande mesh op **Figuur 5.3** na het gebruik van de preprocessor:



FIGUUR 5.3: MESH TESTCASE

Boven de raamopeningen zijn betonbalken aangebracht, hetgeen in de praktijk normaal wordt uitgevoerd door bijvoorbeeld lateien. Omwille van de eenvoud heeft men echter gekozen voor betonbalken. Deze zullen ervoor zorgen dat de stenen boven de openingen ondersteund worden. Indien men dit niet zou doen, zouden deze stenen makkelijker afbreken tijdens de analyse. Verder zorgt deze betonbalk ervoor dat er geen trekband (en dus scheuren) ontstaat in de metselwerkstenen net boven de opening. Deze aanpassing zorgt voor een realistischer patroon binnen de analysesoftware.

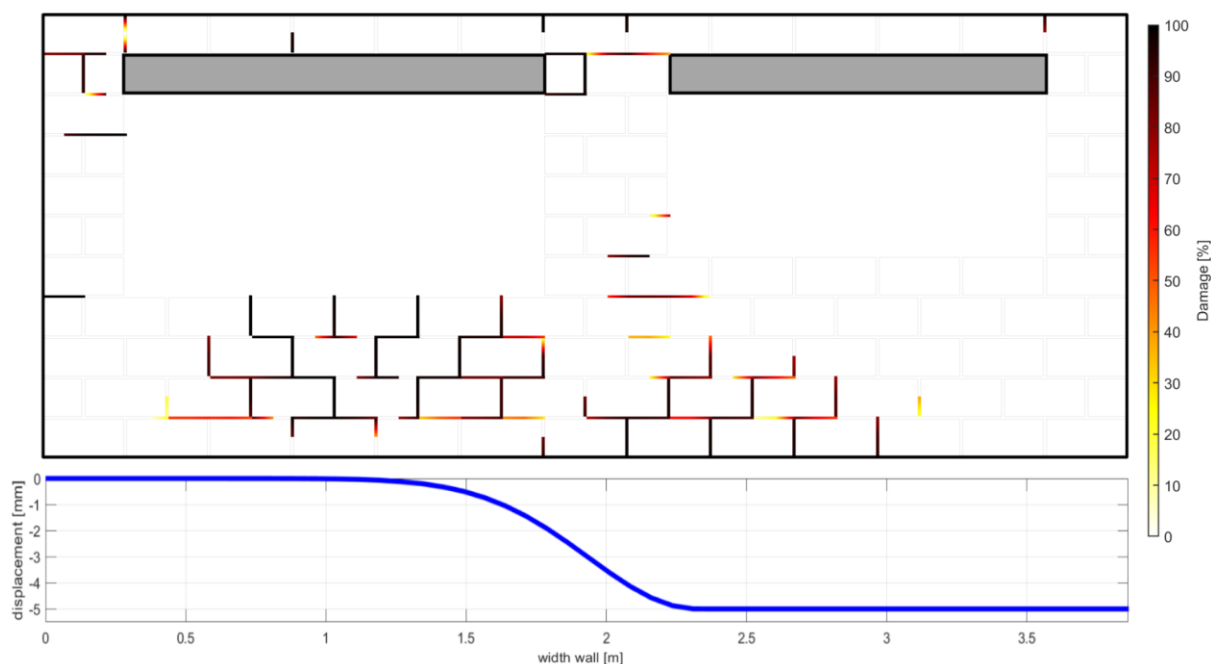
De belangrijkste parameters met betrekking tot de voegen, stenen, opgelegde krachten en bewegingsvoegen zijn terug te vinden op **Figuur 5.4**.

Stenen		Voegen	
E-modulus steen [MPa]	16700	E-modulus voeg [MPa]	2000
Poisson steen [-]	0.15	Poisson voeg [-]	0.14
Normaalstijfheid steeninterfaces [N/mm]	1.00e+06	Treksterkte voeg [MPa]	0.015
Tangentiële stijfheid steeninterfaces [N/mm]	1.00e+06	Breukenergie mode I [Nmm/mm ²]	0.005
Treksterkte steeninterfaces [MPa]	1.00e+06	Breukenergie mode II [Nmm/mm ²]	0.125
Cohesie steeninterfaces [MPa]	1.00e+06	Dilatantehoek voeg [°]	0
Druksterkte steeninterfaces [MPa]	1.00e+06	Druksterkte voeg [MPa]	10.50
Mode I-breukenergie steeninterfaces [Nmm/mm ²]	1.00e+06	Breukenergie druk [Nmm/mm ²]	25.000
		Cohesie mortelvoeg [MPa]	0.01
Opgelegde krachten en verplaatsingen		Bewegingsvoegen	
Lijnlast bovenop muur [kN/m]	0.00	Normaalstijfheid in trek [N/mm]	0.00
Eigengewicht metselwerk [kN/m ³]	19.00	Normaalstijfheid in druk [N/mm]	1.00e+06
		Tangentiële stijfheid [N/mm]	0.00

FIGUUR 5.4: INVOERVENSTER MET PARAMETERS

5.2.2 UITGEVOERDE TESTEN

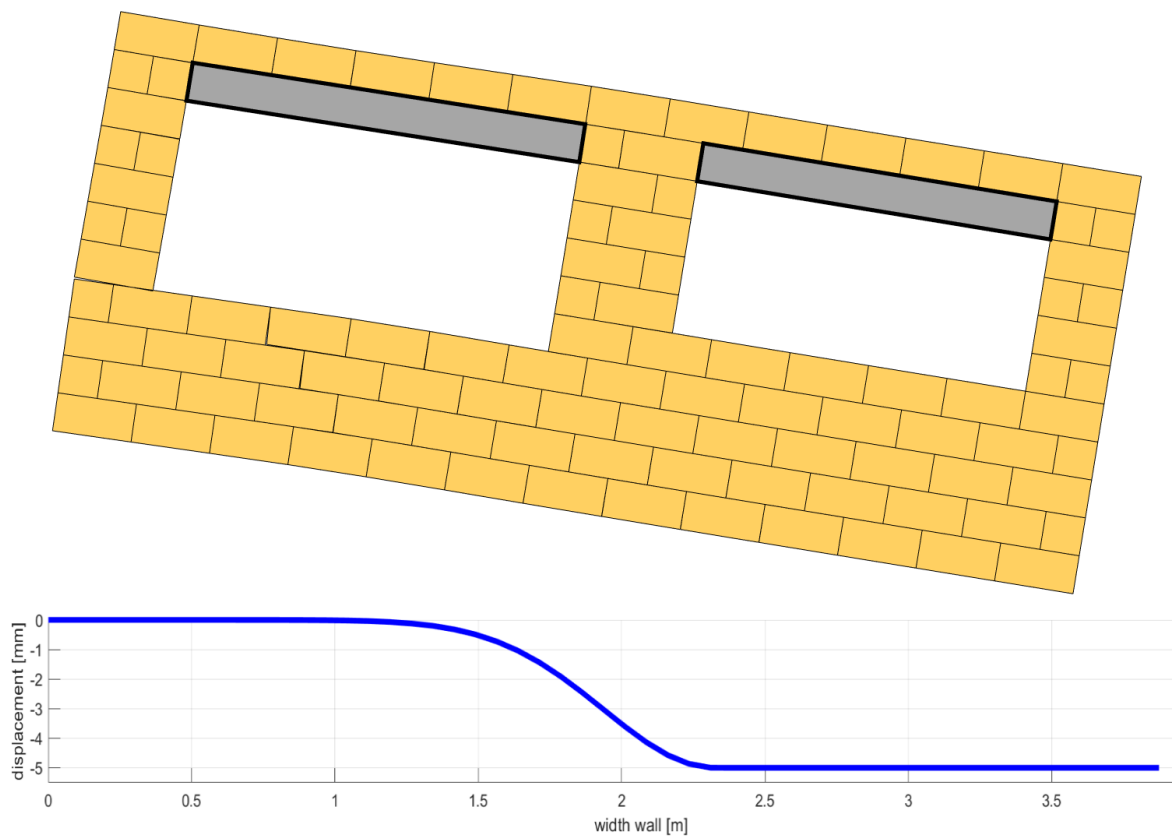
De uitgevoerde testen hebben een beperkte complexiteit. De eerste test bestaat uit een inelastische test zonder enige aanpassing van bovenstaande parameters of geometrie. Een opgelegde putzetting van vijf millimeter wordt incrementeel aangebracht per stappen van 0,1 millimeter, wat neerkomt op 50 tijdstappen. Dit geeft ons een schade- en zettingspatroon zoals weergegeven op respectievelijk **Figuur 5.5** en **Figuur 5.6**.



FIGUUR 5.5: SCHADEPATTERN TESTCASE DALZETTING

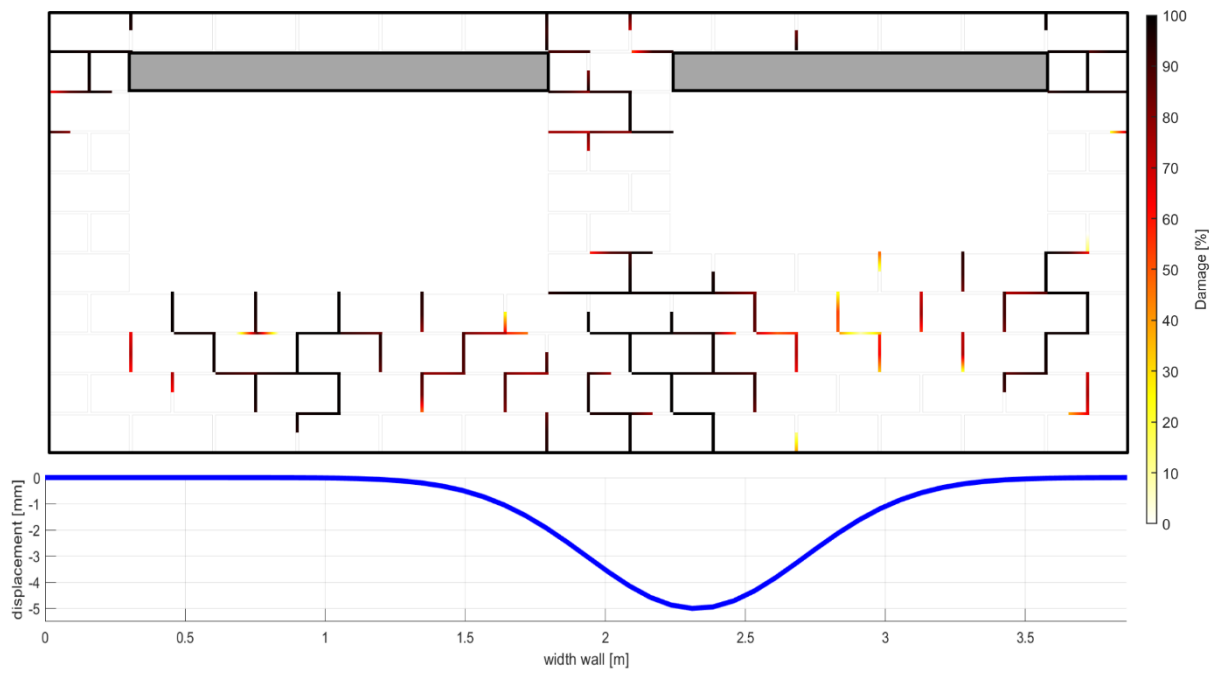
Het schadepatroon is geconcentreerd in het onderste gedeelte van de wand, met name vooral in het linker en centrale deel. Het rechterdeel vertoont opvallend weinig schade, maar dit is logisch gezien de opgelegde zettingstrog. Zoals men op bovenstaande afbeelding kan zien, zullen er meerdere voegen een volledig schadepatroon van 100% vertonen omwille van de scheurvorming. Deze voegen zijn bovendien ook zwart ingekleurd.

De vervormde structuur op **Figuur 5.6** geeft bovenstaand schadepatroon ook weer. Vooral in het linkerdeel komt hier een loslating voor van de cohesie tussen het metselwerk en de voeg. Men krijgt een duidelijke opstuiking van het metselwerk onder het linker raam. Door de kanteling van de wand verkrijgt men voor het middelste deel de bovenstaande schade niet als zetting. Dit omdat de kanteling ervoor zorgt dat de metselwerkstenen tegen elkaar worden gedrukt, waardoor weliswaar de druksterkte van de voeg overschreden wordt.



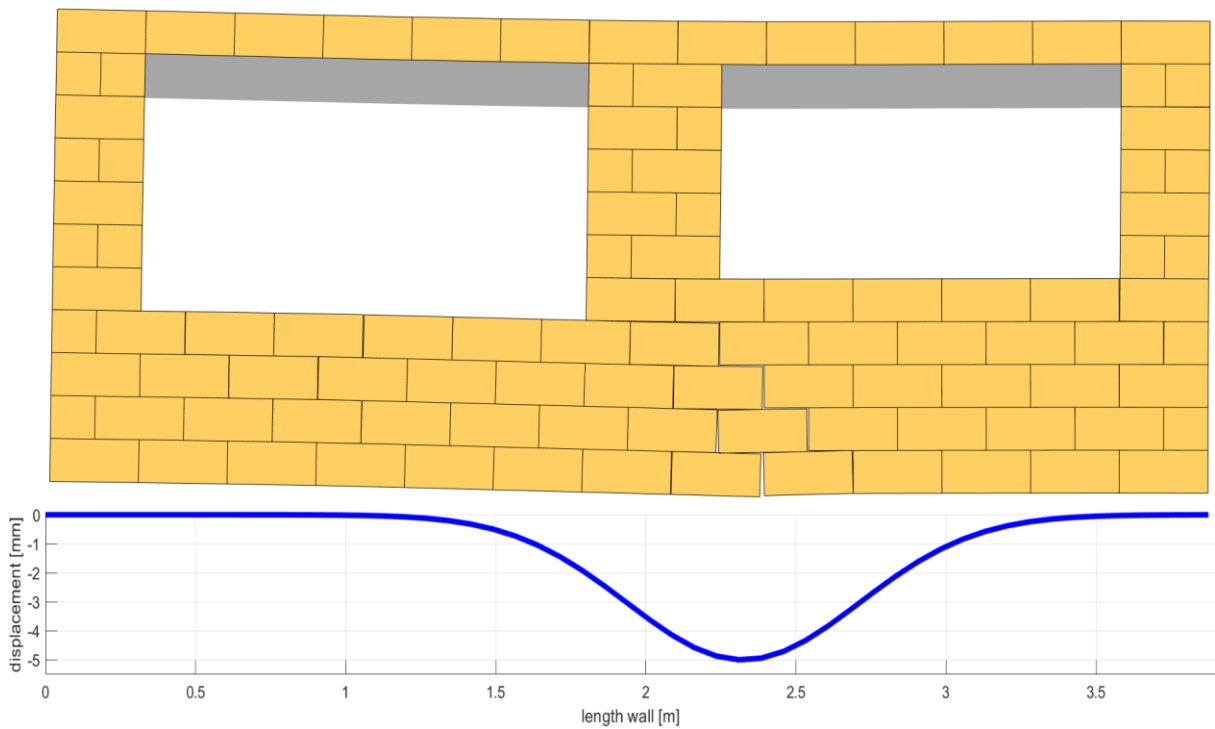
FIGUUR 5.6: ZETTINGSPATROON TESTCASE DALZETTING

Om een beter beeld te krijgen op het zettingspatroon van de wand, voert men een soortgelijke test uit. Deze keer maakt men echter gebruik van een putzetting in plaats van een dalzetting. Dit geeft het schadepatroon zoals weergegeven op **Figuur 5.7**. Men kan op deze figuur vaststellen dat de schade zich voordoet over de gehele wand. Hoofdzakelijk wordt het middelste deel hier zeer ernstig belast.



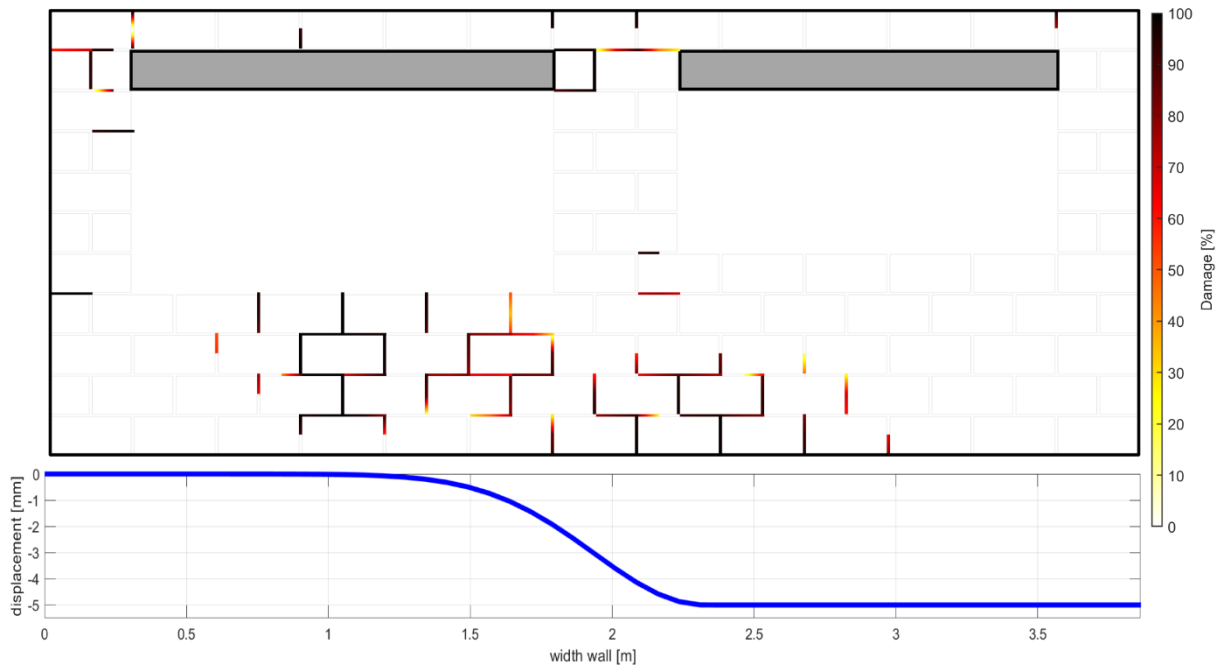
FIGUUR 5.7: SCHADEPAASTRON TESTCASE PUTZETTING

Met dit schadepatroon correspondeert de vervormde structuur zoals weergegeven op **Figuur 5.8**. Ook hier kan men een lichte opstuiking terugvinden onder het linker raam. Verder ziet men ook het typische gevolg van een putzetting: nabij de put komt het metselwerk los van de voeg.



FIGUUR 5.8: ZETTINGSPAASTRON TESTCASE PUTZETTING

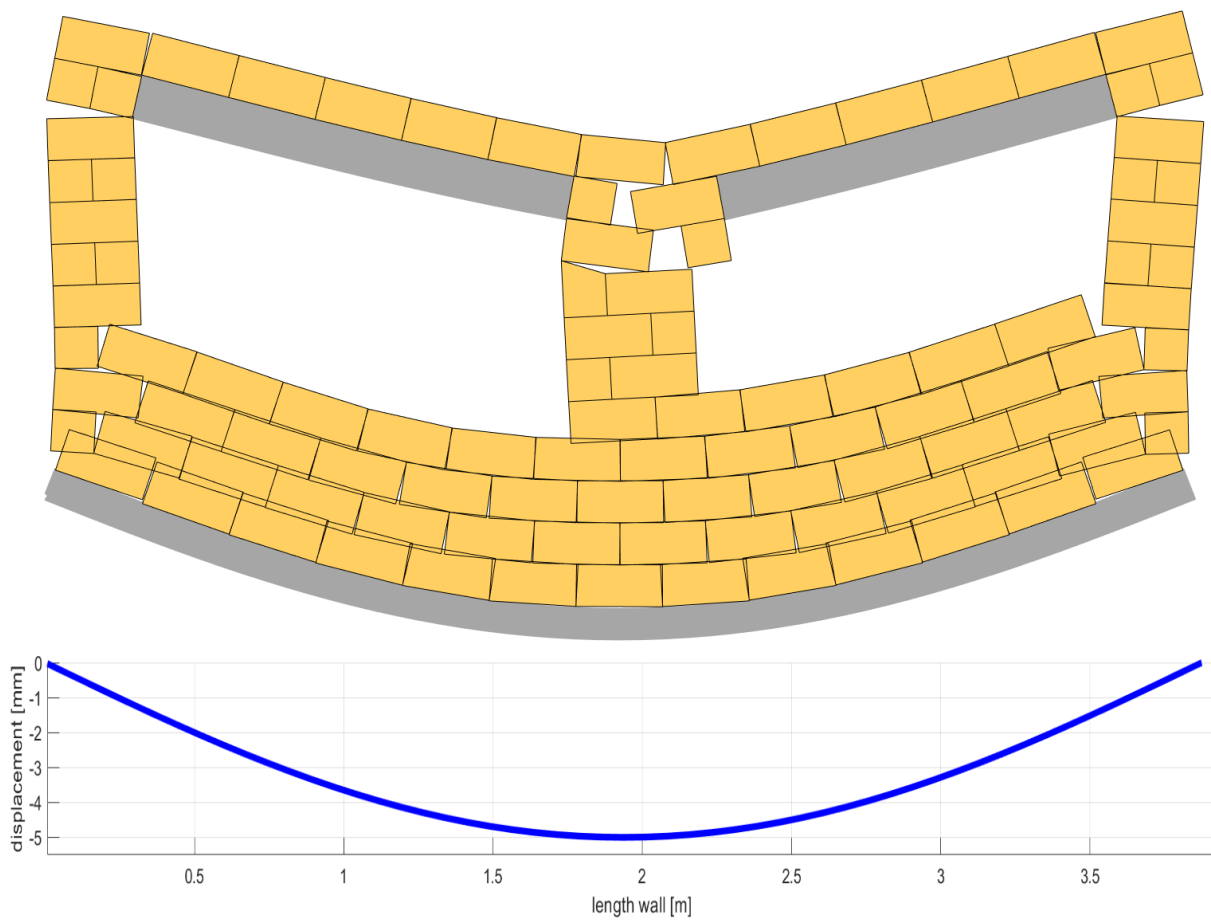
Na het uitvoeren van deze eenvoudige tests wordt de waarde van de faalmode I breukenergie voor een dalzetting aangepast naar $0,001 \text{ Nmm/mm}^2$. De invloed van deze breukenergie werd al besproken in §3.2 *Breukgedrag*. Hoofdzakelijk wil men hiermee een verschillend scheurpatroon bekomen. Dit omdat de scheurvorming meer wordt gelokaliseerd.



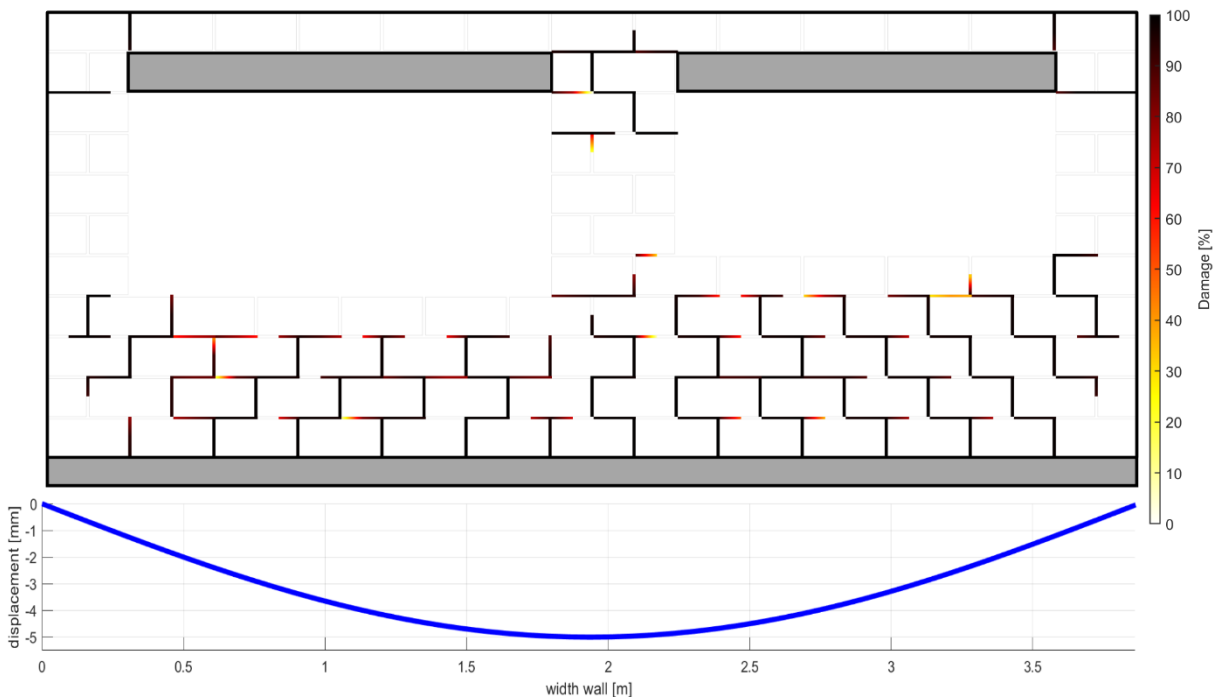
FIGUUR 5.9: LOKALISERING SCHADE TESTCASE

Bij deze test komt dit verschillend schadepatroon ook zeer duidelijk voor. Op **Figuur 5.9** is zichtbaar dat het schadepatroon meer gelokaliseerd is dan bij de vorige test. Zo ziet men ook weer duidelijk dat de schade zich hoofdzakelijk onderaan de wand voordoet. Echter zijn er slechts enkele voegen volledig zwart, terwijl de rest eerder naar een rood schadepatroon neigt.

Een volgende test die kan worden uitgevoerd, is het opleggen van een doorbuiging van 5 mm en kijken hoe het schade- en vervormingspatroon daardoor wijzigt. Voor het uitvoeren van deze test voegt men aan de onderkant een betonnen balk toe omwille van de stijfheid van de interface aan de onderzijde. Hierdoor bekomt men een zettings- en vervormingspatroon zoals weergegeven op respectievelijk **Figuur 5.10** en **Figuur 5.11**.



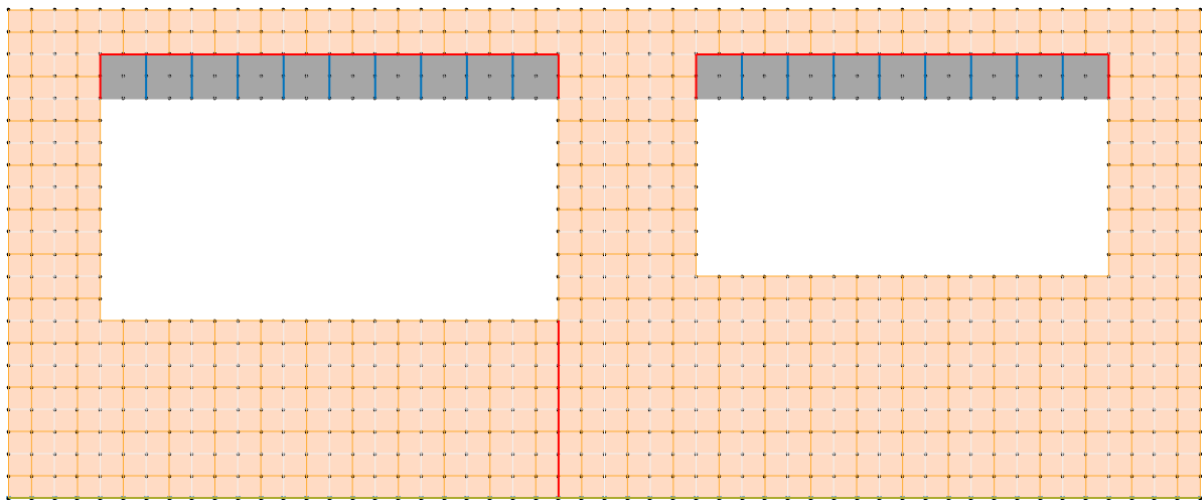
FIGUUR 5.10: VERVORMINGSPATROON DOORBUIGING TESTCASE



FIGUUR 5.11: SCHADEPATROON DOORBUIGING TESTCASE

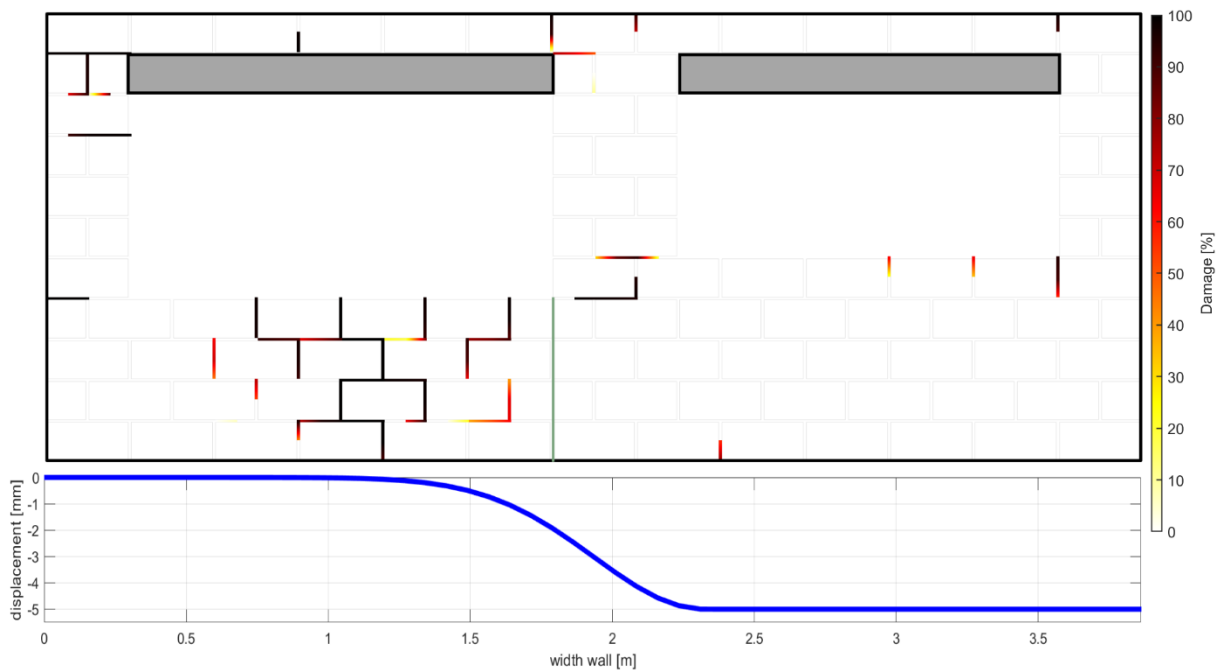
Op bovenstaand vervormingspatroon is zichtbaar dat deze doorbuiging het metselwerk verbrijzelt. Zo ziet men dat de vervormingen van bepaalde metselwerkstenen dusdanig zijn dat hun geometrie volledig wijzigt. Aan de onderzijde ziet men ook duidelijk het effect van de gelijkmatige doorbuiging: deze metselwerkstenen volgen het patroon van de doorbuiging, mede dankzij de aangebrachte betonnen balk. Dit komt ook tot uiting binnen het schadepatroon. De volledige onderkant van mortelvoegen is zwart ingekleurd, hetgeen wil zeggen dat al deze voegen volledig verbrijzeld zijn. De bovenkant vertoont ook schade, echter minder.

De laatste test bestaat uit de toepassing van een dilatatievoeg. Deze wordt aangebracht onder het grootste raam, in de rechter onderhoek. Deze voeg loopt volledig door tot de onderzijde van de wand. Hierdoor wordt dus ook de mesh aangepast want er worden nieuwe interface-elementen ingevoegd. Deze nieuwe mesh staat weergegeven op **Figuur 5.12**.



FIGUUR 5.12: NIEUWE MESH TESTCASE - TOEVOEGING DILATATIEVOEG

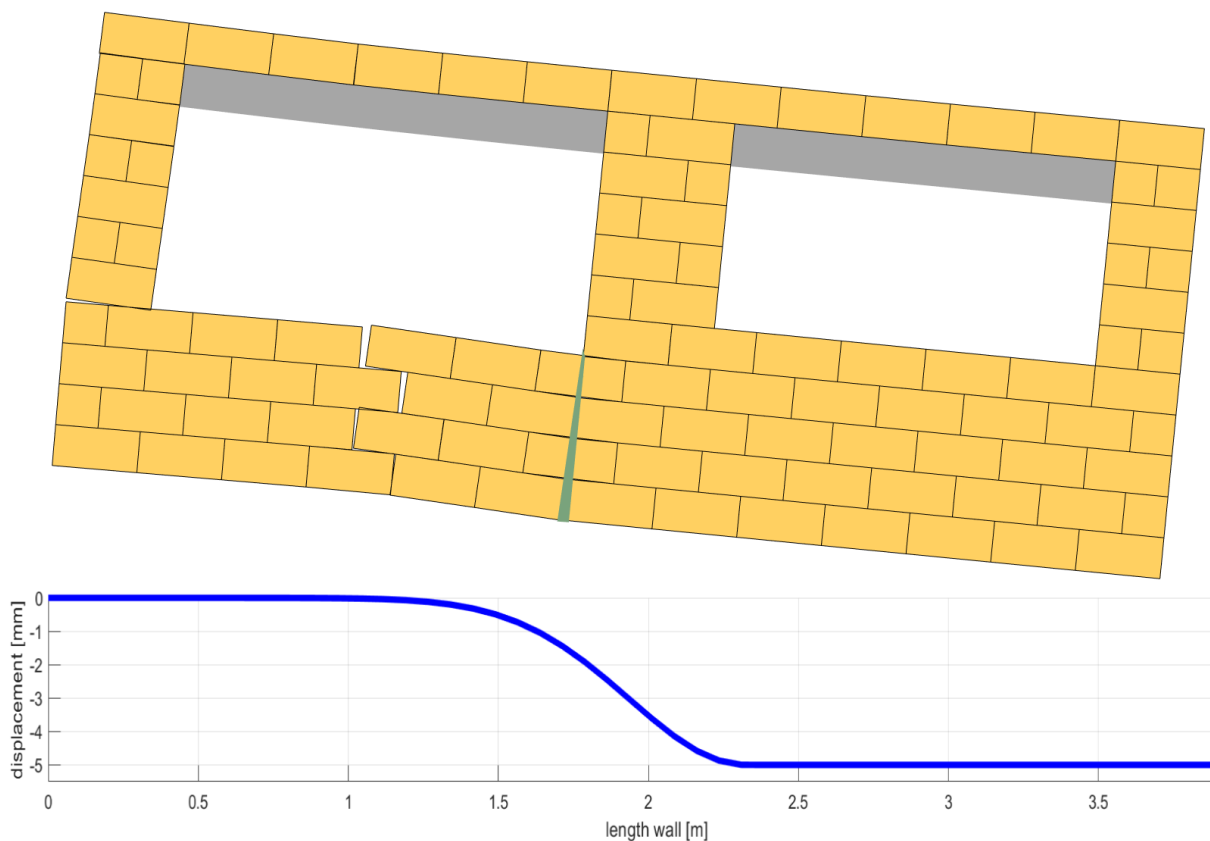
Op deze nieuwe mesh wordt dezelfde analyse uitgevoerd als op de eerste test. Hiervoor worden dus dezelfde parameters gebruikt. Na toepassing van de analysesoftware bekomt men een schadepatroon zoals weergegeven op **Figuur 5.13**. De dilatatievoeg wordt hierop weergegeven als een verticale, groene lijn.



FIGUUR 5.13: SCHADEPATTERN MET DILATATIEVOEG

Dit schadepatroon is zeer duidelijk verschillend van de vorige schadepatronen. Door toevoeging van de dilatatievoeg wordt het rechter gedeelte van de wand nagenoeg bespaard van enige schade. Enkel in de hoekpunten komt er schade voor in de voegen. Het linker gedeelte van de wand vertoont een soortgelijk schadepatroon zoals eerder besproken.

Het zettingspatroon op **Figuur 5.14** laat duidelijk de werking van de dilatatievoeg zien: deze is merkwaardig groter geworden omwille van de trek in het metselwerk. Het linkerdeel volgt het bovenstaande schadepatroon. Het rechterdeel van de muur wordt nagenoeg volledig gevrijwaard van enige zetting. Enkel kanteling treedt hier op, hetgeen een logisch gevolg is van de opgelegde zettingstrog.



FIGUUR 5.14: ZETTINGSPATROON MET DILATATIEVOEG

In §6 Toepassing: modellering van dilatatievoegen bestudeert men deze dilatatievoegen verder. Hiervoor bestudeert men het type zetting en alsook de locatie van de dilatatievoeg.

5.2.3 PROBLEEMPUNTEN

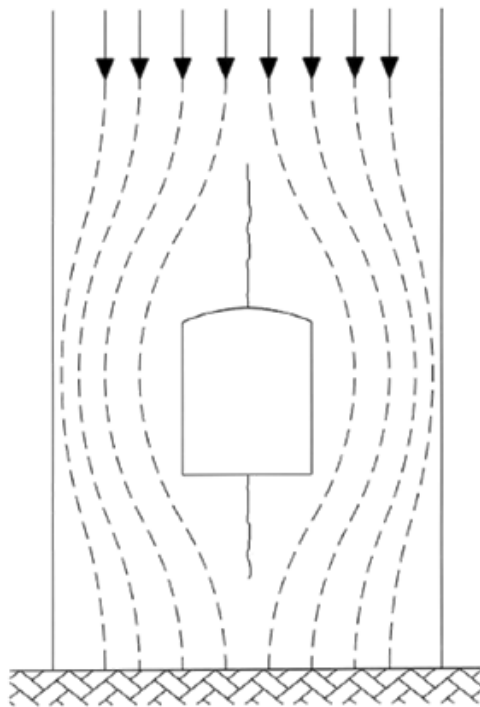
Gedurende deze testen zijn er meerdere problemen opgedoken. Dit zowel binnen de analysesoftware als binnen de pre- en postprocessor. Zo tekende het programma bijvoorbeeld een doorlopende balk bij het toepassen van een balk boven een opening, waardoor het schadepatroon moeilijk zichtbaar was.

Ook probeerde het programma eerst een balk te tekenen boven een opening, ondanks dat deze er niet was. Men had aangegeven dat er geen balk aanwezig zou zijn, maar het programma probeerde toch een balk te tekenen weliswaar met een breedte en hoogte van 0 mm, waardoor men dus een error kreeg bij het uitvoeren van analyses.

Een blijvend probleem is de error over een singuliere matrix binnen de analyse in MATLAB d.w.z. dat de stijfheidsmatrix een slecht conditiegetal heeft. Hierdoor heeft MATLAB moeite om het probleem op te lossen. Dit is vaak te wijten aan de parameters omdat bij de berekeningen na enkele stappen de matrix nagenoeg singulier wordt. Hierdoor treedt er divergentie op, hetgeen wil zeggen dat er geen oplossing kan worden gevonden binnen het Newton-Raphson algoritme.

Om dit te voorkomen moet men spelen met volgende parameters van de voegen: treksterkte, faalmode I breukenergie en cohesie van de voeg.

Het eigengewicht van het metselwerk werd normaal genomen op 19 kN/m^3 . Bij grote raamoverspanningen speelt dit eigengewicht een grote rol omdat deze kracht volledig wordt opgelegd in elke tijdstap, waardoor de schade dermate groot kan zijn en er geen convergentie bereikt kan worden door het Newton-Raphson-oplossingsalgoritme. De toevoeging van de betonbalk zou dit probleem enkel verplaatsen. Een oplossing voor dit probleem is het verlagen van het eigengewicht naar bijvoorbeeld 10 kN/m^3 . Dit schadepatroon is bovendien te wijten aan de spatkrachten die optreden rond de raamopeningen, waardoor horizontale trekspanningen ontstaan en er dus verticale schade optreedt. **Figuur 5.15** geeft dit concept eenvoudig weer.



FIGUUR 5.15: SPATKRACHTEN ROND OPENINGEN [23]

Tot slot komt men bij cases met grote wanden soms niet tot een oplossing binnen het algoritme. Omdat de wanden zodanig groot zijn, zijn de voegen binnen de mesh zeer klein geworden, waardoor het een zeer complexe mesh wordt. Hierdoor bestaat de mesh uit zeer veel onderdelen, waardoor de rekentijd toeneemt. Men kan hierbij concluderen dat men dusdanig tegen het limiet aanzit van een mesomodellering van metselwerk bij deze grootteorde van metselwerkwallen. Een oplossing hiervoor is het vergroten van de afmetingen van de metselwerkstenen.

5.3 PARAMETERSTUDIES

De parameterstudies bestaan uit enkele cases waarvoor men een soortgelijk concept toepast als bij de testcase. De parameters vertrekken vanuit de testcase, waarbij per case een aanpassing van deze parameters mogelijk is. Elke case vermeldt de gewijzigde parameters. Voor deze parameterstudies gebruikt men verschillende cases, elk met een uniek karakter. Ter volledigheid wordt hier een indicatie gegeven van de totale duur voor de analyse van onderstaande testen:

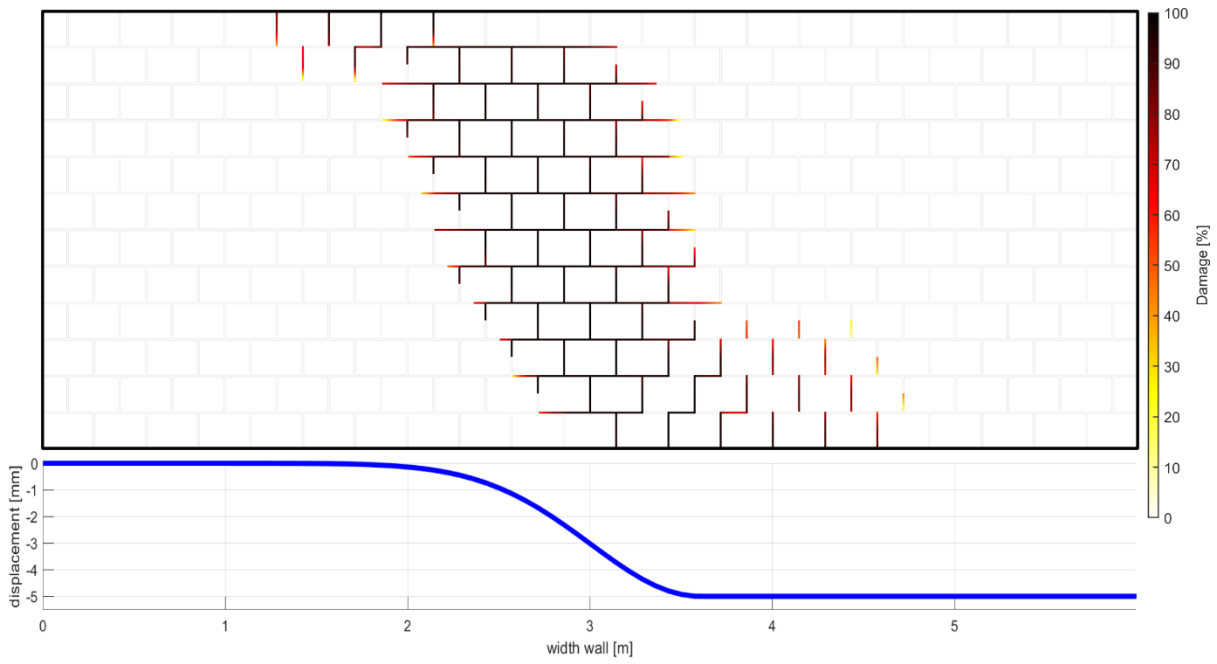
- Case 1: 17 minuten + 15 minuten = 32 minuten;
- Case 2: 21 minuten + 18 minuten + 26 minuten + 28 minuten + 29 minuten + 34 minuten = 156 minuten;
- Case 3: 34 minuten + 49 minuten + 44 minuten = 127 minuten.

5.3.1 CASE 1: EENVOUDIGE WAND

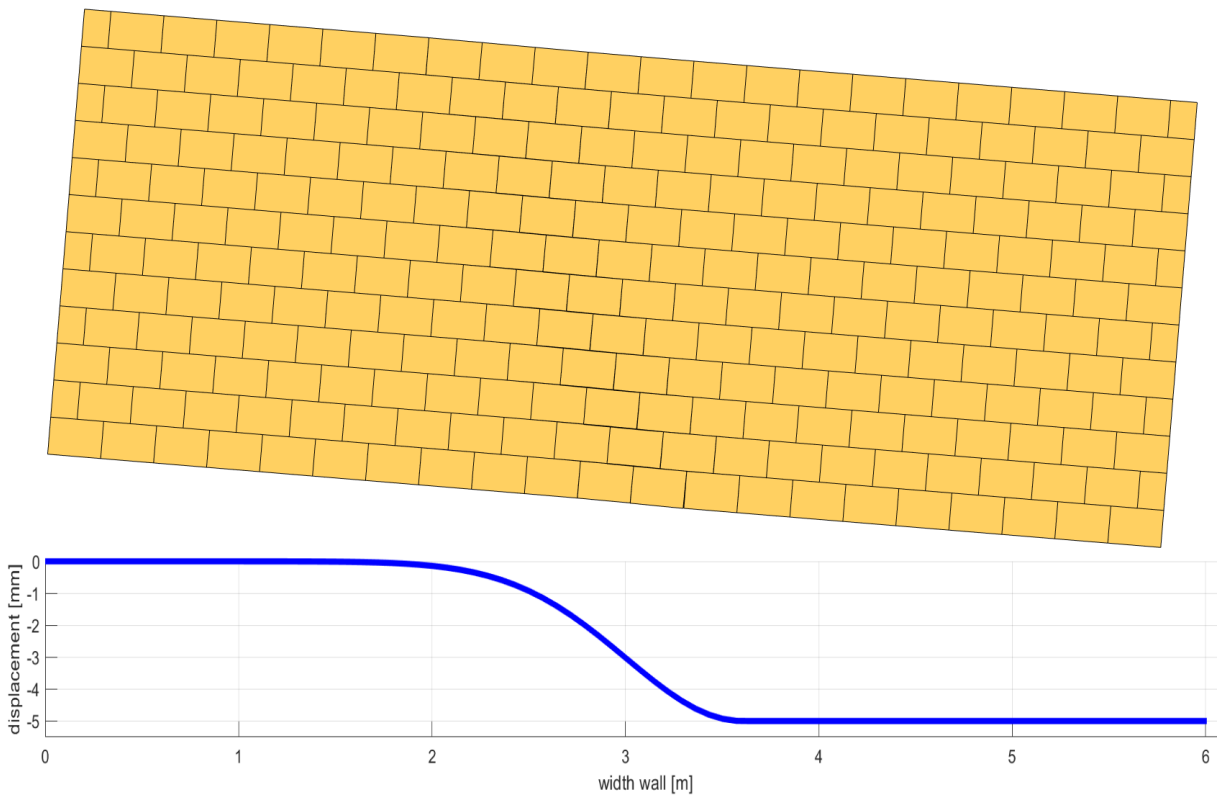
Deze case bestaat uit een zeer eenvoudige metselwerkwand zonder enige opening. Hier speelt men zowel met het type zetting als met verschillende parameters met betrekking tot de voegen. Deze wand heeft een breedte van 6 meter en een hoogte van 2,40 meter. De overige parameters zijn in overeenstemming met de eerder vermelde waarden.

Deze dalzetting zorgt voor een schadepatroon en zettingspatroon zoals weergegeven op respectievelijk **Figuur 5.16** en **Figuur 5.17**. Dit is het verwachte schadepatroon gezien de opgelegde zettingstrog. Dit patroon komt ook overeen met de testresultaten van Vandoren [22], zoals weergegeven op **Figuur 5.18**. De schade is echter in de tegengestelde richting. Dit is wellicht te wijten aan een verschillend materiaalmodel. Binnen deze masterproef werkt men bijvoorbeeld met de eerder vermelde Bézier-kromme. Binnen de doctoraatsthesis van Vandoren worden bovendien enkel de beschadigde voegen expliciet gemodelleerd, terwijl men hier steeds alle voegen beschouwt.

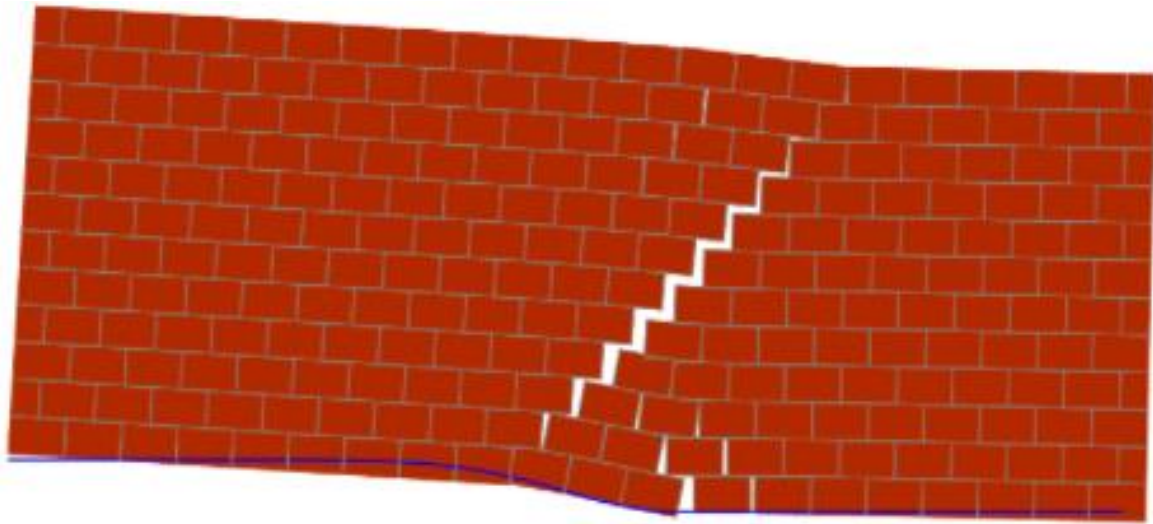
Toekomstig kan men mogelijk meer beroep doen op deze discrete methode, waarbij men een meerschalgige domeinactivatie gaat toepassen. Aan dit onderwerp werd zeer recent een doctoraatsthesis [24] gewijd. Door middel van deze techniek kan men complexere metselwerkstructuren analyseren en bovendien grotere wanden gaan analyseren.



FIGUUR 5.16: SCHADEPATROON CASE 1



FIGUUR 5.17: ZETTINGSPATROON CASE 1

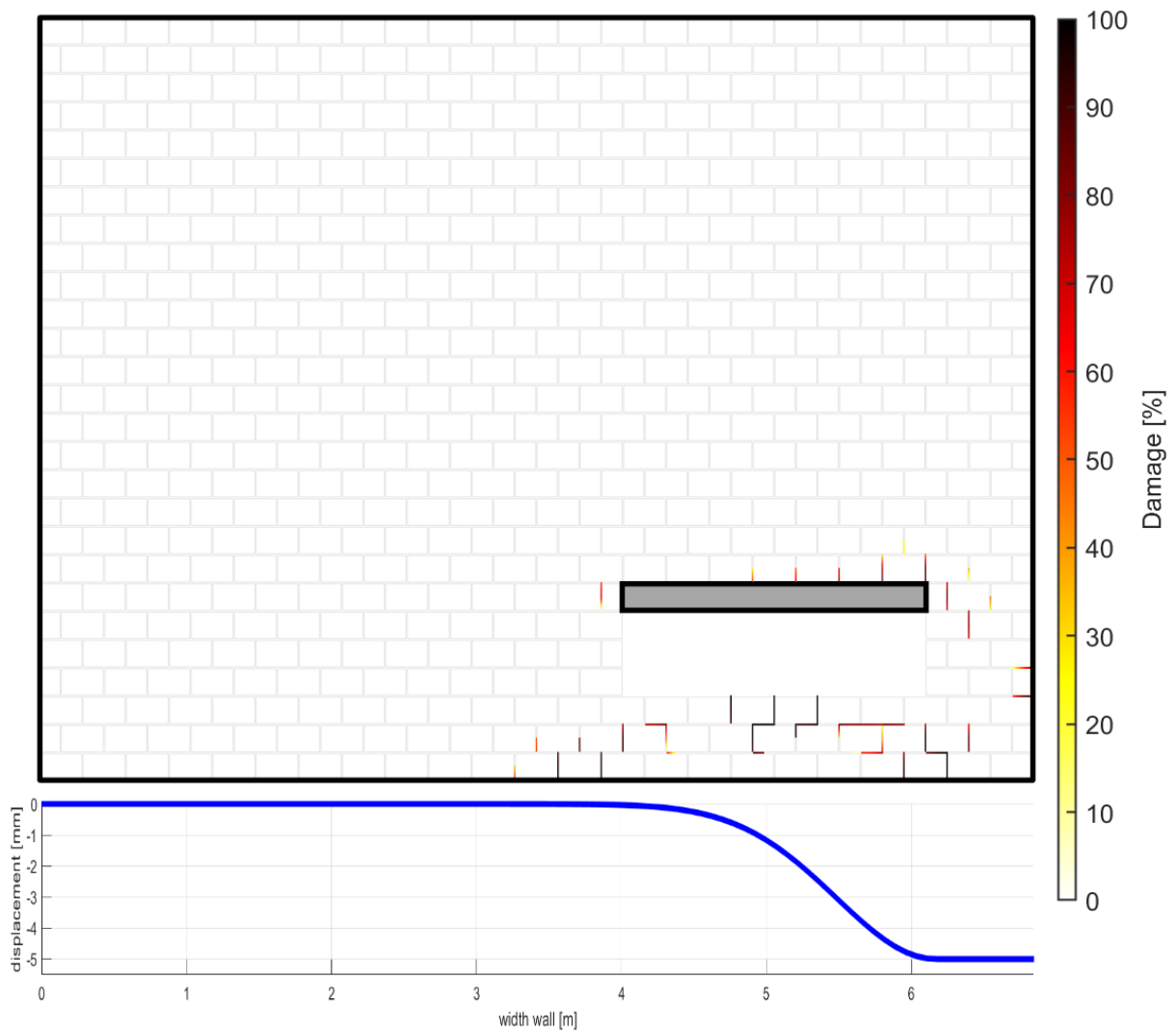


FIGUUR 5.18: SCHADEPATROON VERGELIJKBARE WAND [22, p. 102]

5.3.2 CASE 2: WAND MET KLEINE OPENING

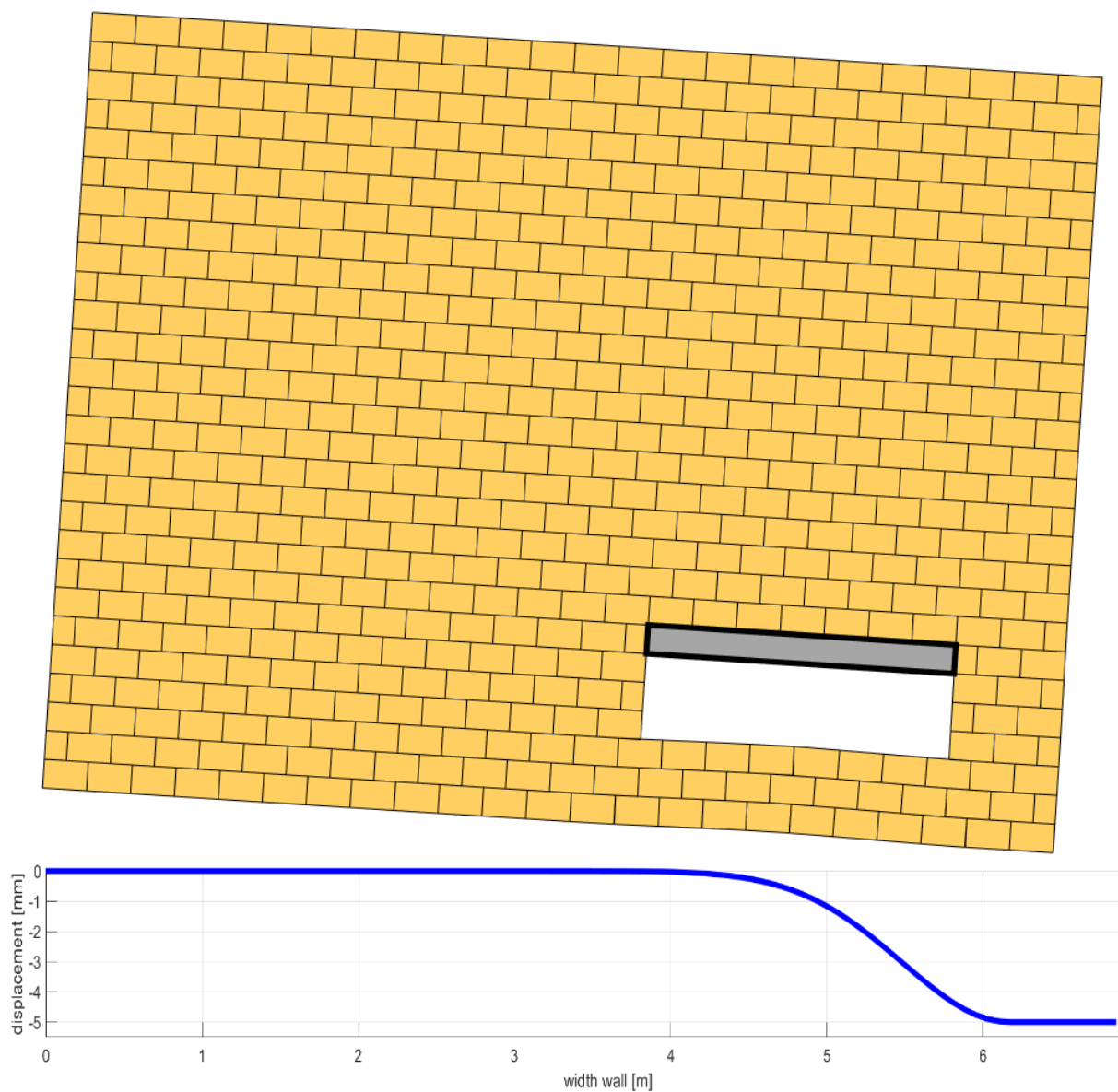
Deze wand is soortgelijk aan de voorgaande wand. Hij heeft een breedte van 8 meter en een hoogte van 4,50 meter. Verder bevat deze wand ook een kleine opening rechts onderaan van 0,70 m op 0,15 m. Normaal gezien zou men aan de linkerkzijde ook een dwarswand toevoegen, hetgeen hier niet het geval is omdat de software dit niet toelaat. Dit effect wordt gesimuleerd door middel van een verlenging van het linkerdeel van de wand.

Als men een shade- en zettingsanalyse uitvoert met standaardwaarden, bekomt men een shade- en zettingspatroon zoals weergegeven op **Figuur 5.19** en **Figuur 5.20**.



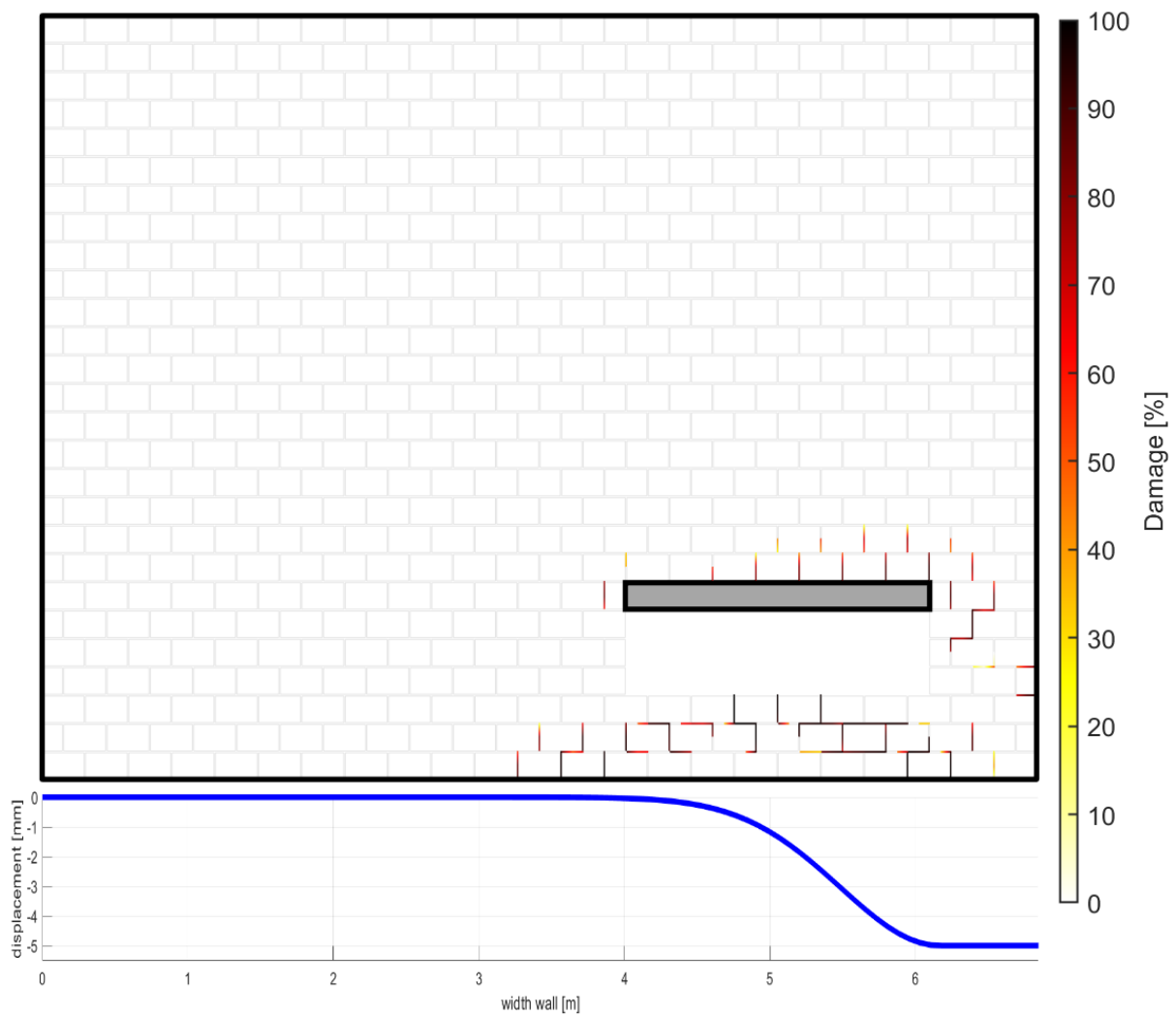
FIGUUR 5.19: SCHADEPATROON CASE 2

Merkwaardig is dat er zeer weinig schade zichtbaar is. Hoofdzakelijk is deze schade dicht bij de hoeken van de opening, hetgeen logisch is. Men verwacht echter een typische trapscheur omwille van de stijfheid aan de linkerkant. Dit is niet het geval, waarschijnlijk omdat de software (nog) niet toelaat om een dwarswand toe te voegen. Het zettingspatroon is bovendien zoals te verwachten: het onderste deel van het metselwerk stuikt op. In het algemeen vertoont de wand kanteling.



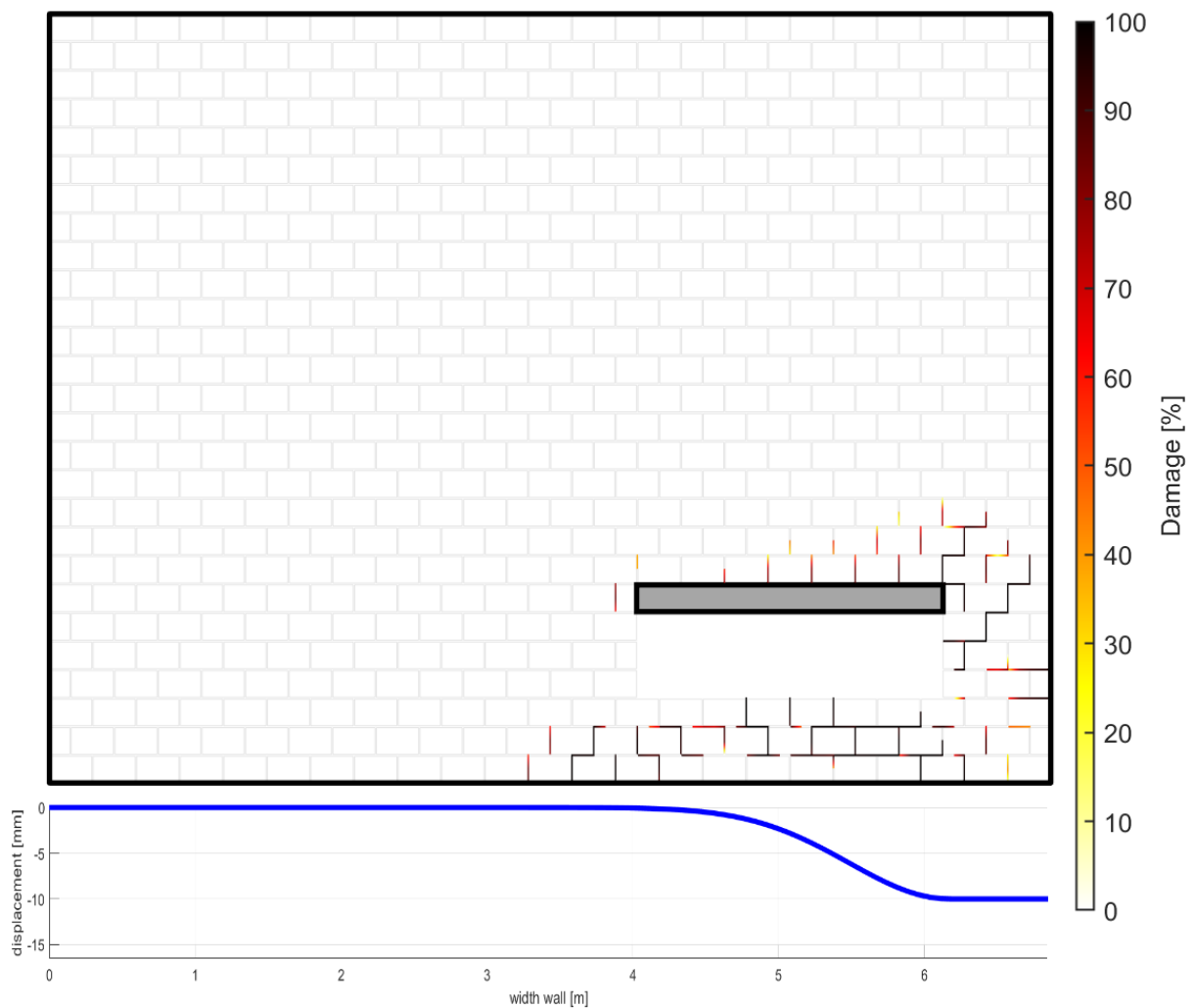
FIGUUR 5.20: ZETTINGSPATROON CASE 2

Voor de volgende test neemt de treksterkte en cohesie van de voegen af tot een waarde van 0.06 MPa, terwijl de breukenergie toeneemt tot 0.015 Nmm/mm^2 . Dit geeft een schadepatroon zoals weergegeven op **Figuur 5.21**. Op dit beeld is meer schade zichtbaar dan voorheen, hetgeen te verwachten is gezien de lagere treksterkte en cohesie van de voegen. Deze schade treedt ook vroeger op dan voorheen. Merkwaardig is dat nu de bovenzijde van de raamopening ook een aanzienlijke hoeveelheid schade vertoont.



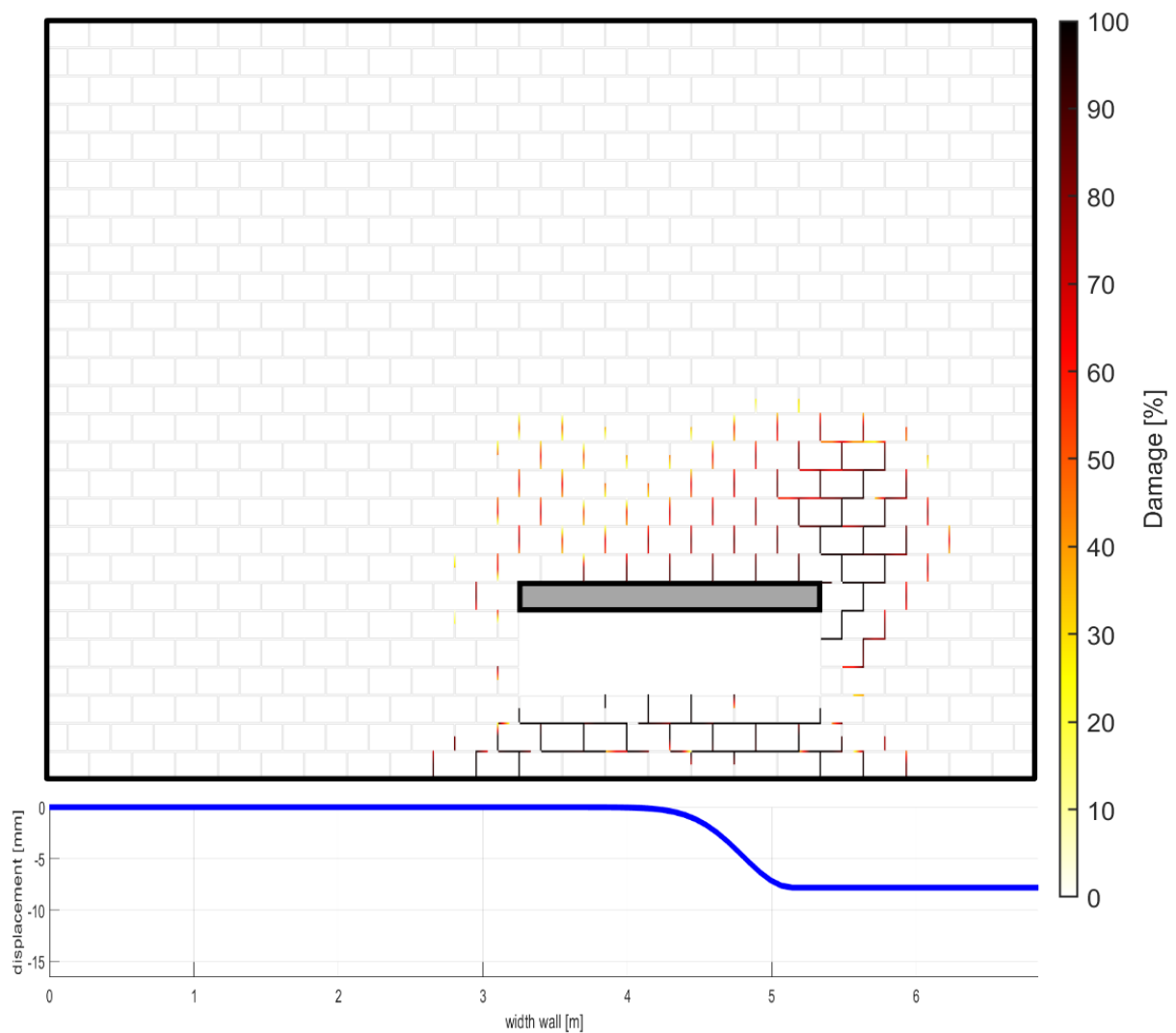
FIGUUR 5.21: SCHADEPATROON CASE 2 - LAGERE TREKSTERKTE & COHESIE VAN VOEGEN

Hierna legt men een zetting op van 10 mm. De overige parameters houdt men constant. Dit geeft een schadepatroon zoals weergegeven op **Figuur 5.22**. Ook hier komt de typische trapscheur niet voor. De verdubbeling van de zetting zorgt wel voor een groter schadepatroon, waarbij men wel duidelijk kan vaststellen dat de gevel rechtsonder volledig bezwijkt. Dit is een logisch gevolg van deze zetting.



FIGUUR 5.22: SCHADEPATROON CASE 2 - ZETTING 10 MM

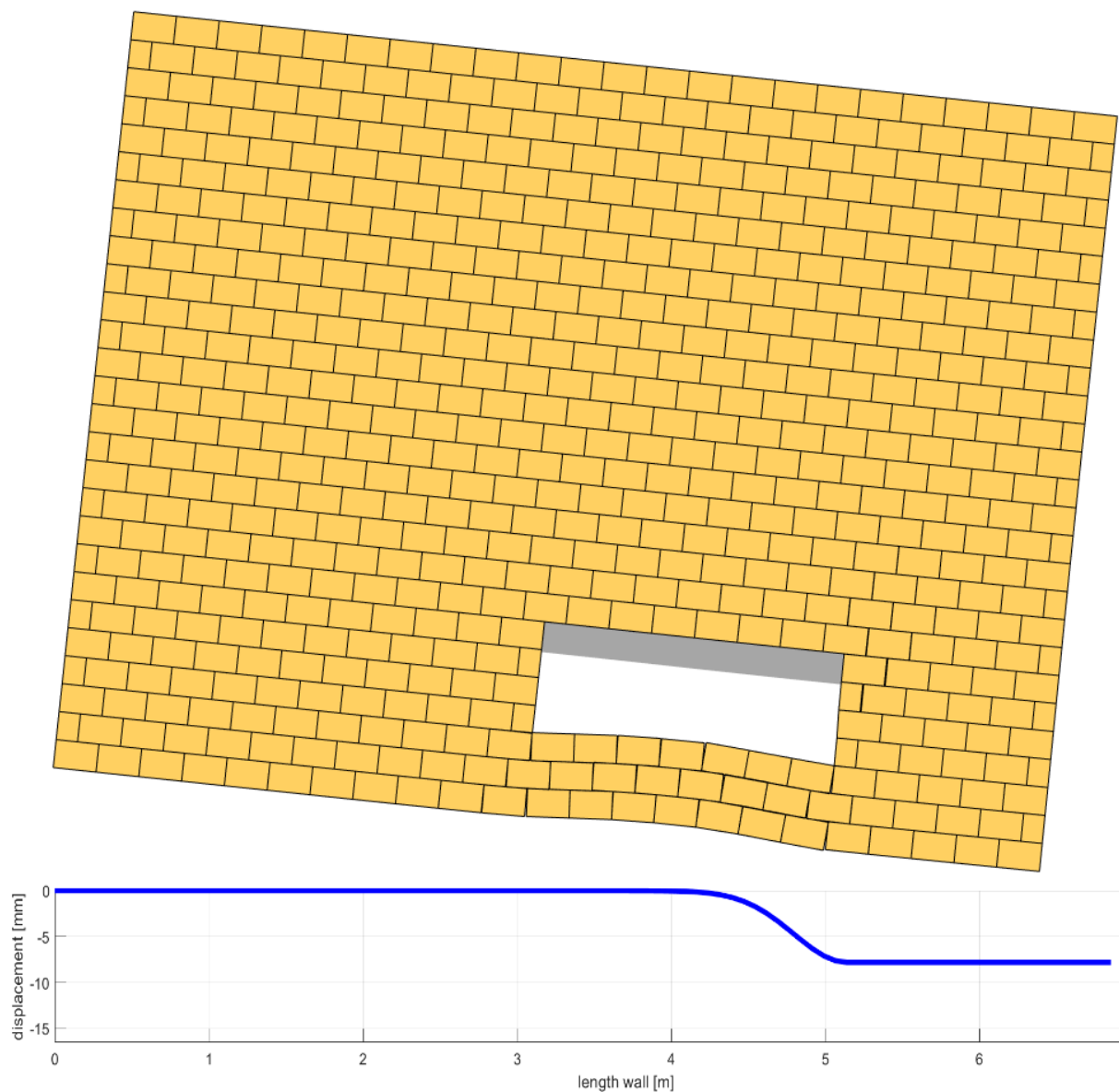
Na uitvoering van bovenstaande verdubbeling van de zetting, komt men nagenoeg op de limiet van het model. Men gaat echter proberen om het effect van de diagonale trapscheur weer te geven. Dit doet men door het raam enkele centimeters te verplaatsen naar links en de zettingstrog steiler te maken. Dit doet men door een zetting op te leggen van 15 millimeter. Hierdoor treedt meer schade op, zoals zichtbaar op **Figuur 5.23**. Ook het trapse karakter kan men terugvinden in de voegen: deze kleuren zwart onder een diagonale hoek van ongeveer 45° . Deze simulatie stopt na een zetting van 7.8 mm. Vanaf dit punt krijgt de stijfheidsmatrix een slecht conditiegetal.



FIGUUR 5.23: SCHADEPATTERN CASE 2 – TRAPSE SCHEUR

Zowel aan de onder- als bovenkant van de opening vindt men deze schade terug. Deze start initieel vanuit de hoekpunten van deze opening en verplaatst zich zo verder. Omwille van de omvang van deze testcase zitten we hier op de limiet van het mesomodel. De mesh heeft een groot aantal elementen, waardoor de rekestijd enorm is toegenomen. Omwille van de steilere helling van de zettingstrog zijn de berekeningen bovendien ook zwaarder om uit te voeren.

Het schadepatroon onder de opening komt ook duidelijk voor bij het zettingspatroon op **Figuur 5.24**. Ook hier ziet men dat het gedeelte onder het raam volledig bezwijkt omwille van het falen van de mortelvoegen. Het trapse karakter rechts boven het raam komt minder voor, mogelijks omwille van de kanteling van de wand.



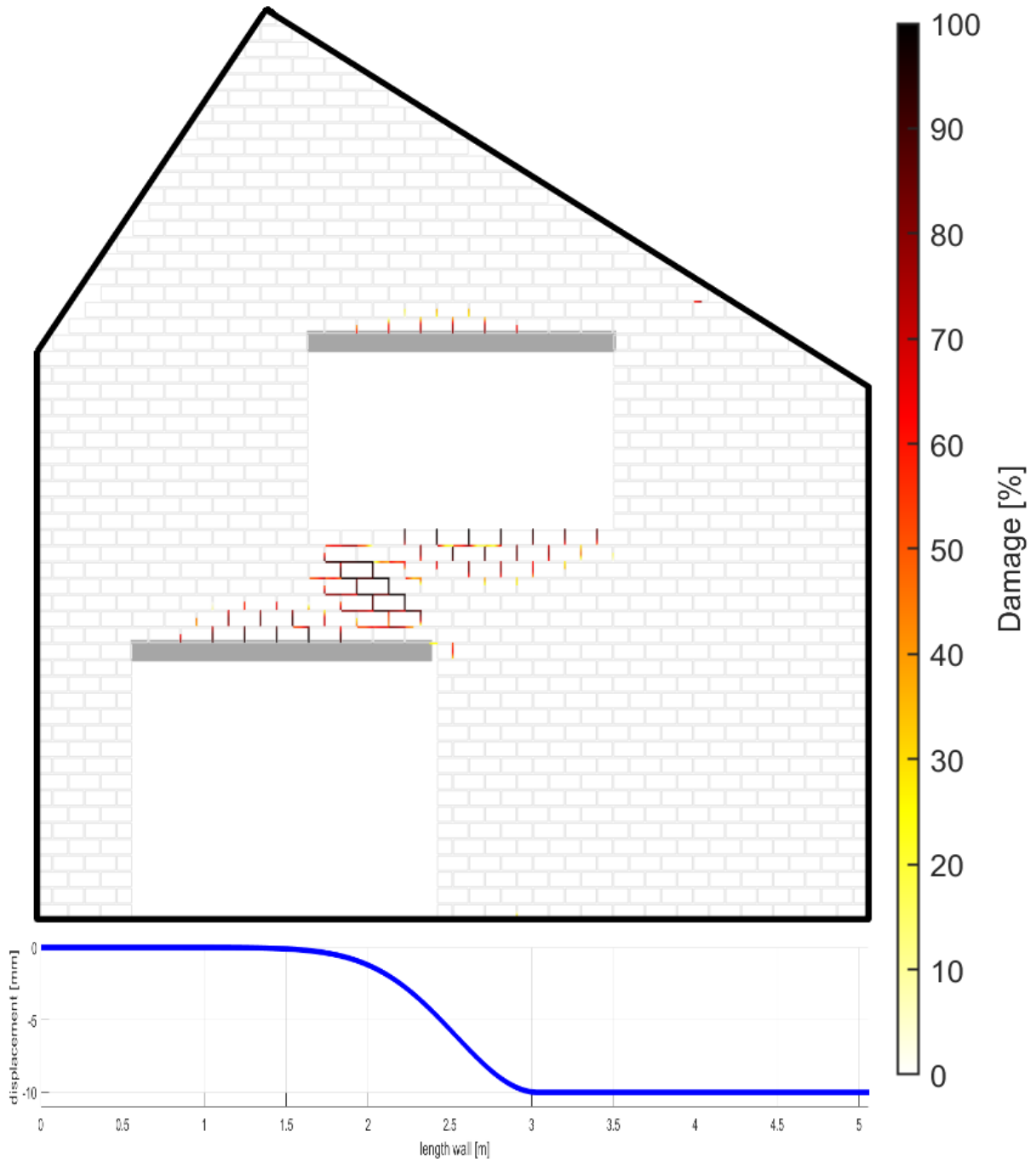
FIGUUR 5.24: ZETTINGSPATROON CASE 2 - TRAPSE SCHEUR

5.3.3 CASE 3: GEVEL MET SCHUIN VERLOOP

Deze speciale testcase is gekozen op basis van een realistische foto van een bestaande gevel. Deze gevel is getypeerd door het schuine verloop nabij de dakrand. Deze schuine gevel loopt bijkomend onder een verschillende hellingshoek. In de gevel zijn 2 raamopeningen aangebracht.

De gevel heeft een breedte van 5,65 meter en een hoogte van 5 meter. Hierdoor bevindt de analysesoftware zich op de limiet: de gevelstenen in de mesh zijn zeer talrijk, waardoor rekentijd enorm toeneemt. Het uitvoeren van onderstaande testen nam daardoor iets meer dan twee uur in beslag. Omwille van deze reden verdubbelt men de breedte en de hoogte van de metselwerkstenen. Men bekommt een breedte van 190 mm en een hoogte van 90 mm.

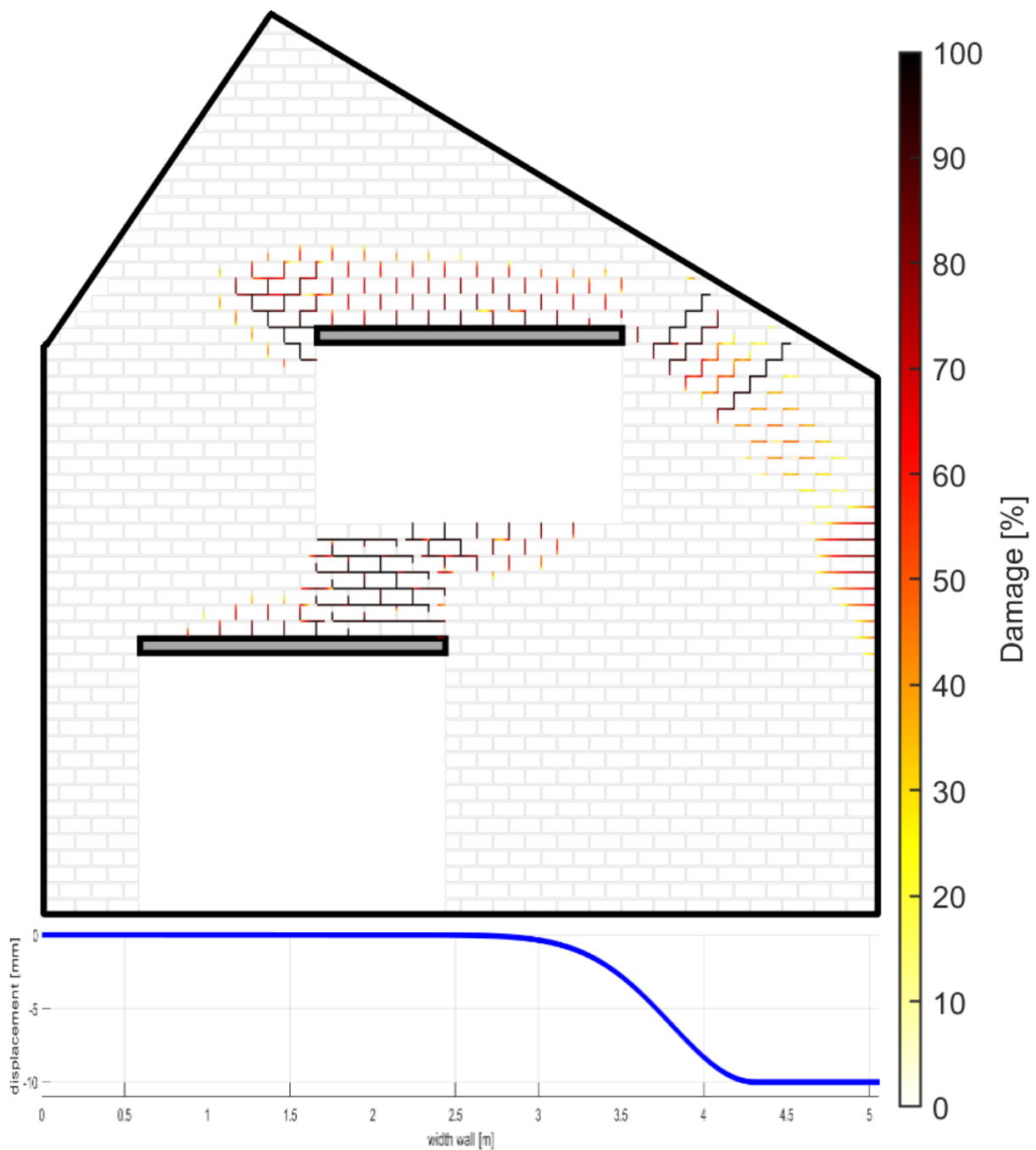
Deze opstelling geeft een schadepatroon zoals weergegeven op **Figuur 5.25**. Omwille van de omvang van de gevel was de rekentijd zeer hoog, het zettingspatroon is echter identiek aan dat van de voorgaande tests. De zettingstrog heeft een vreemde vorm, dit doordat de opening tot onder doorloopt. Hierdoor functioneert het linkerdeel als een geheel. Vandaar dat de schade ook optreedt tussen de twee openingen in: de zetting zorgt voor het falen van de mortelvoegen.



FIGUUR 5.25: SCHADEPATROON CASE 3

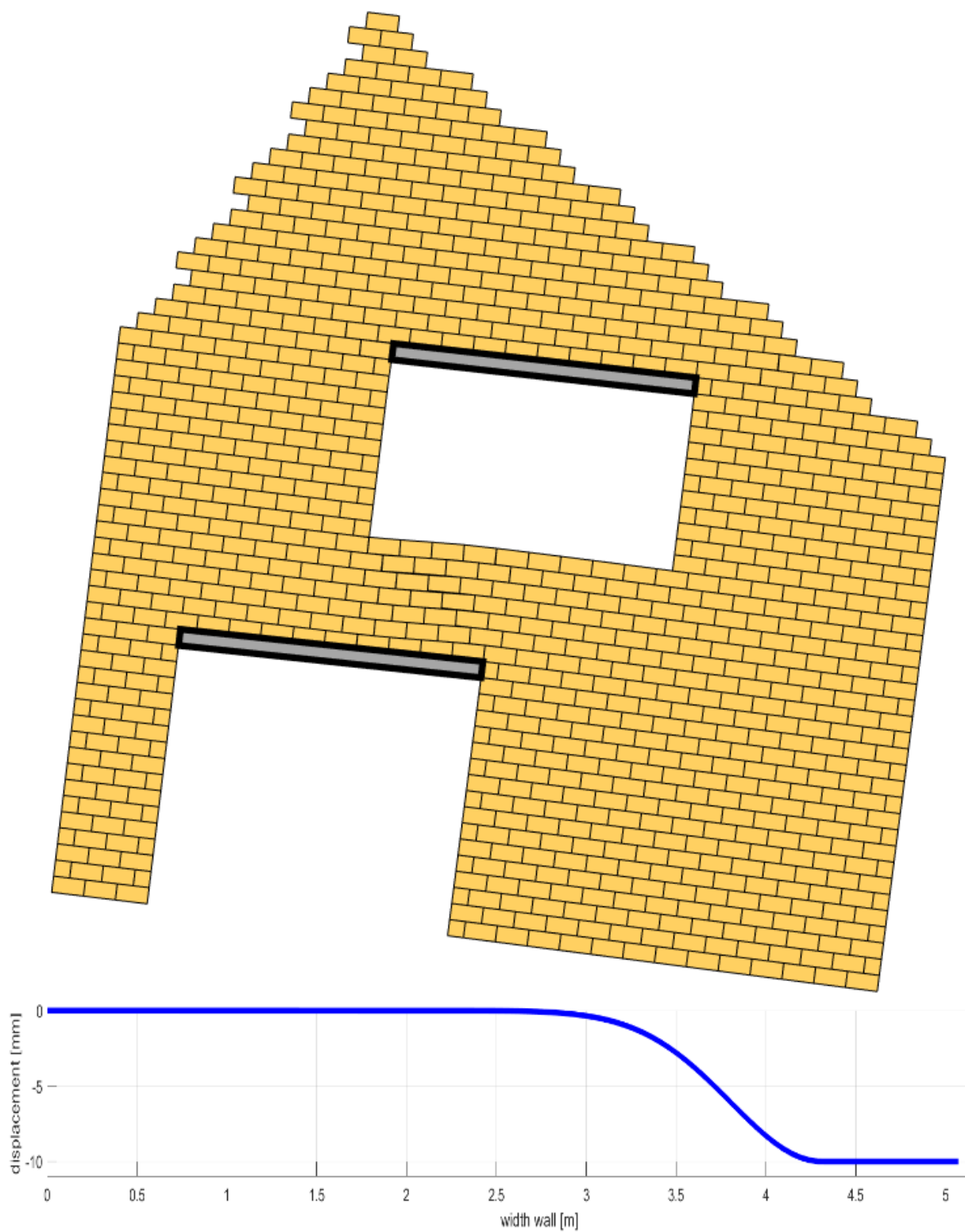
Gezien de complexiteit en omvang van deze case, kan men concluderen dat hier de limiet bereikt wordt van mesomodellering. De rekentijd voor deze test is enorm en bovendien is men genoodzaakt een zeer hoge treksterkte en cohesie van de voegen te voorzien om deze test uit te voeren. Deze realistische case verduidelijkt dat er wel degelijk een limiet is bij het berekenen van metselwerk wanden met behulp van mesomodellering.

Om het effect van de zettingstrog te analyseren, verplaatst men deze naar rechts zodat deze niet meer onder de opening ligt. Hierdoor neemt het schadepatroon enorm toe. Zowel de voegen tussen de openingen als de voegen aan de boven- en rechterkant van de bovenste opening zullen niet meer voldoen. De onderkant vertoont geen enkele vorm van schade. Men krijgt een volledige afschuiving naar rechts van het deel boven het raam. Dit kan men ook zien op **Figuur 5.26**.



FIGUUR 5.26: SCHADEPATTERN CASE 3 - ZETTINGSTROG RECHTS

Voor de volledigheid toont **Figuur 5.27** het zettingspatroon dewelke bij deze trog behoort. Deze figuur toont geen mooie driehoek aan de bovenzijde van de gevel. Dit is te wijten aan de manier waarop de preprocessor de gevel omvormt naar een mesh. Dit heeft echter geen effect op de schade- of zettingsanalyse.



FIGUUR 5.27: ZETTINGSPATROON CASE 3 - ZETTINGSTROG RECHTS

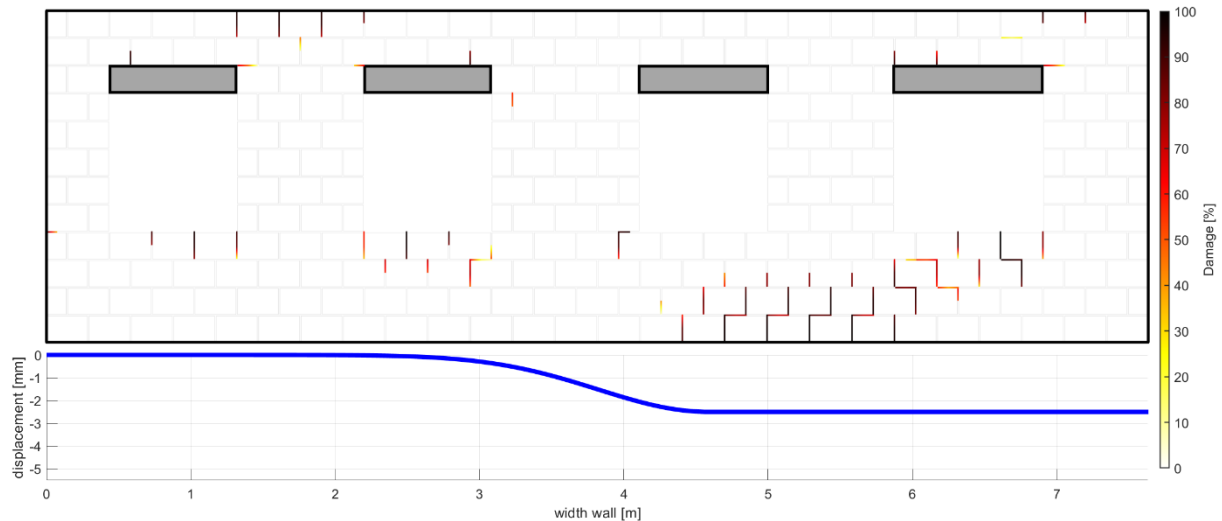
Het schadepatroon is duidelijk waarneembaar. De geconcentreerde shade komt terug onder de bovenste opening. Het metselwerk is daardoor verbrijzeld en omhooggekomen onder het raam. Omwille van de kanteling van de gevel ziet men echter niet dat de afschuiving aan de bovenkant optreedt.

6 TOEPASSING: MODELLERING VAN DILATATIEVOEGEN

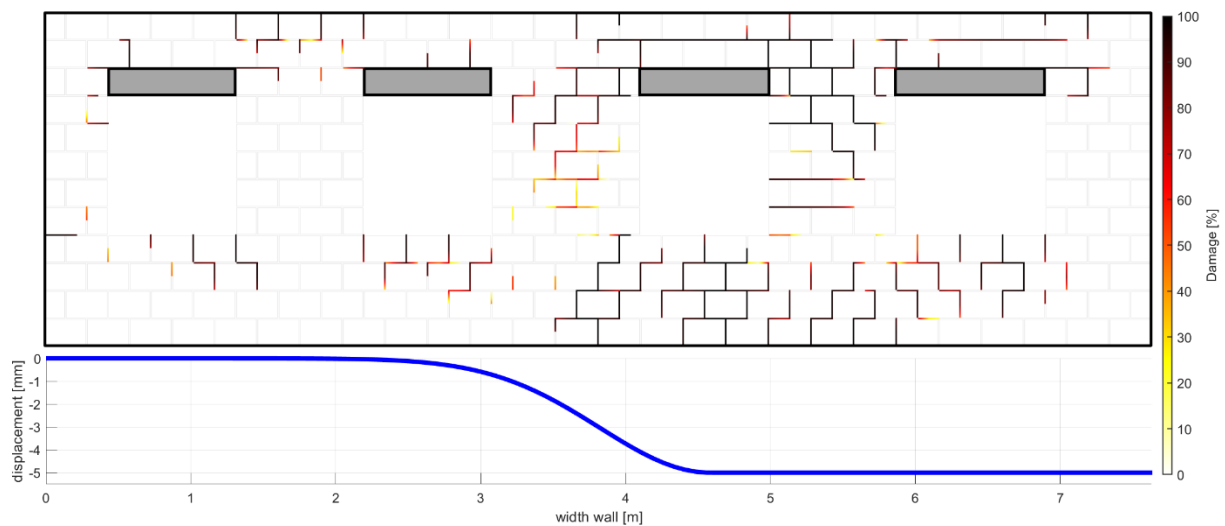
Hoofdstuk 6 bestaat uit een toepassing van de analysesoftware op een topic dat al in §2.5 *Scheurvorming* werd besproken met name dilatatievoegen. Binnen dit hoofdstuk modelleert men deze dilatatievoegen binnen de structuur en gaat men op zoek naar optimale locaties voor de toepassing van dilatatievoegen op metselwerk wanden, zodat de scheurvorming beperkt blijft. Twee cases vormen de basis van het onderzoek. De parameters blijven binnen iedere case ongewijzigd, enkel de locatie en aanwezigheid van de dilatatievoegen wijzigt.

6.1 CASE 4: GEVEL MET MEERDERE RAAMOPENINGEN

Deze case bestaat uit een gevel met lengte 8 meter en hoogte 2,20 meter. In deze gevel zijn vier identieke raamopeningen aangebracht. Op **Figuur 6.1** kan men het schadepatroon terugvinden na 25 tijdstappen, op **Figuur 6.2** na 50 tijdstappen. Opmerkelijk is dat de schade steeds vanuit de hoekpunten van de raamopeningen begint, dit komt vooral voor aan de rechterkant bij raamopening 3 en 4.

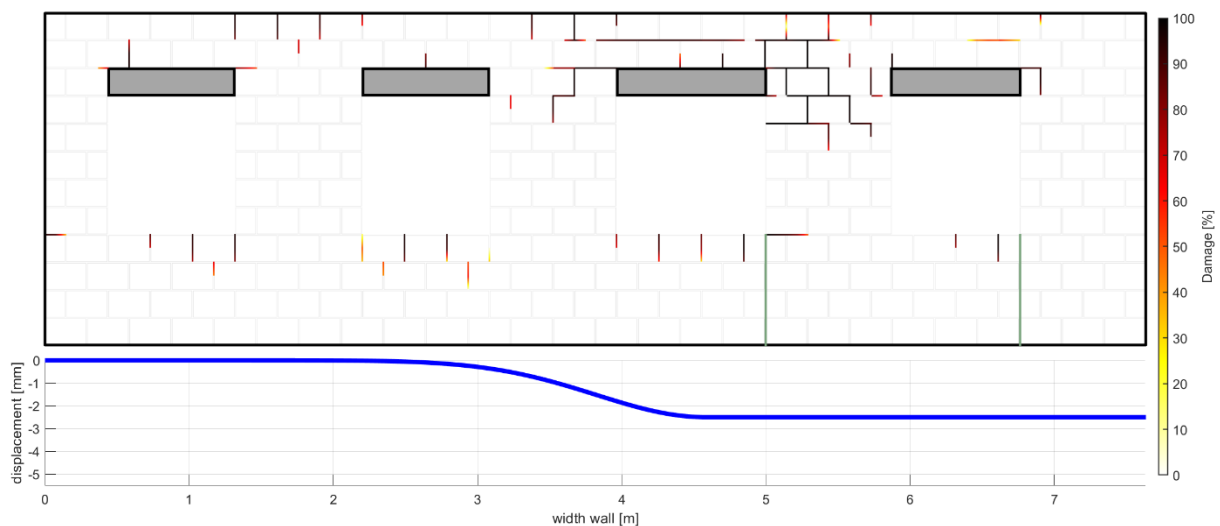


FIGUUR 6.1: CASE 4 - SCHADEPATROON NA 25 TIJDSTAPPEN

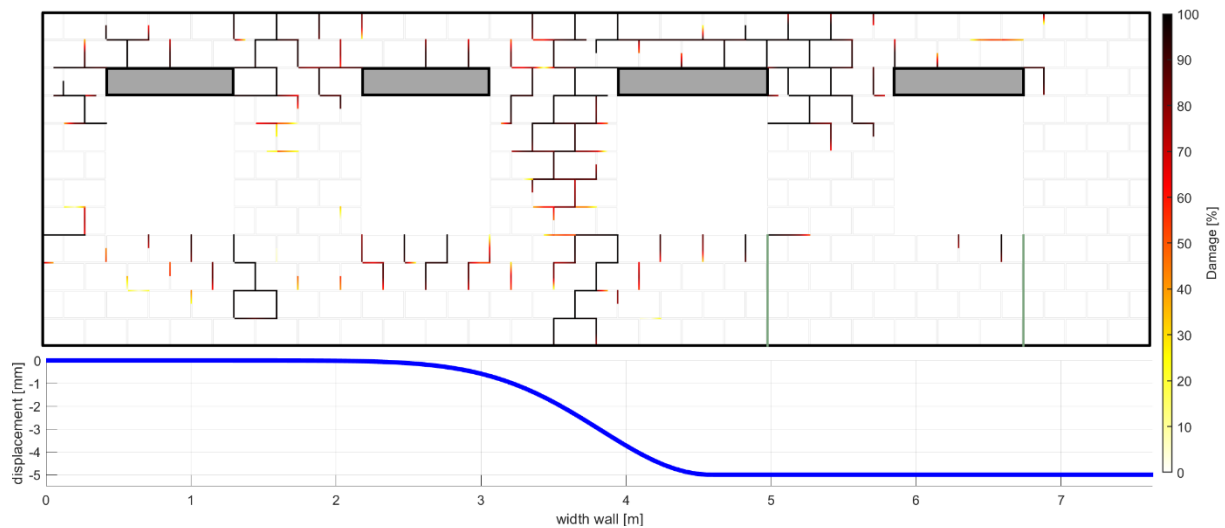


FIGUUR 6.2: CASE 4 - SCHADEPATTERN NA 50 TIJDSTAPPEN

Het rechterdeel van de wand faalt dus volledig omwille van de scheurvorming, terwijl het linkerdeel slechts geringe schade vertoont. Omwille van die reden voegt men dus dilatatievoegen toe in deze hoeken. Dit schadepatroon is zoals verwacht een schuin scheurpatroon onder een hoek van ongeveer 45°. **Figuur 6.3** en **Figuur 6.4** tonen respectievelijk de schadepatronen van de wand met dilatatievoegen voor tijdstappen 25 en 50.

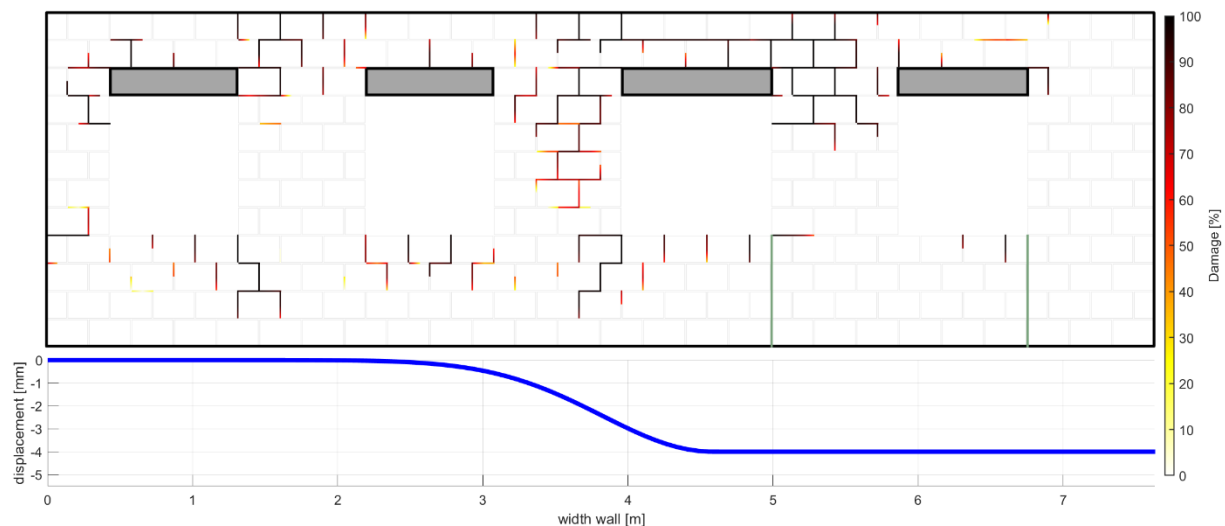


FIGUUR 6.3: CASE 4 - SCHADEPATTERN DILATATIEVOEG TIJDSTAP 25

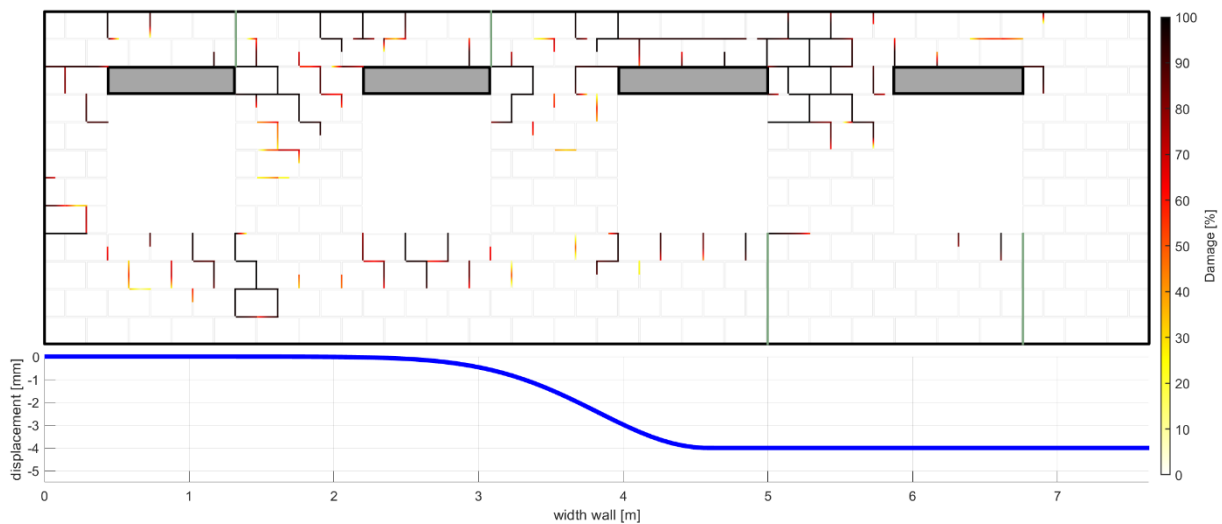


FIGUUR 6.4: CASE 4 - SCHADEPATROON DILATATIEVOEG TIJDSTAP 50

De schade op het rechterdeel van de wand is aanzienlijk verlaagd. Opmerkelijk is dat het linker gedeelte nu wel meer schade vertoont dan voorheen. Om dit op te lossen, tracht men twee extra dilatatievoegen toe te voegen aan de linkerzijde. Deze simulatie beoordeelt men na 40 tijdstappen, omdat de solver na 40 tijdstappen niet meer tot een oplossing kon komen. Dit is mogelijk te wijten aan de keuze van de materiaalparameters. Omwille van de instabiliteiten in het model kan de solver geen numerieke oplossing meer vinden. Daarom vergelijkt men deze figuur met de eerder uitgevoerde test na 40 tijdstappen om een objectiever beeld te bekomen, deze test staat weergegeven op **Figuur 6.5**. De nieuwe test kan men terugvinden op **Figuur 6.6**.



FIGUUR 6.5: CASE 4 - SCHADEPATROON DILATATIEVOEG TIJDSTAP 40



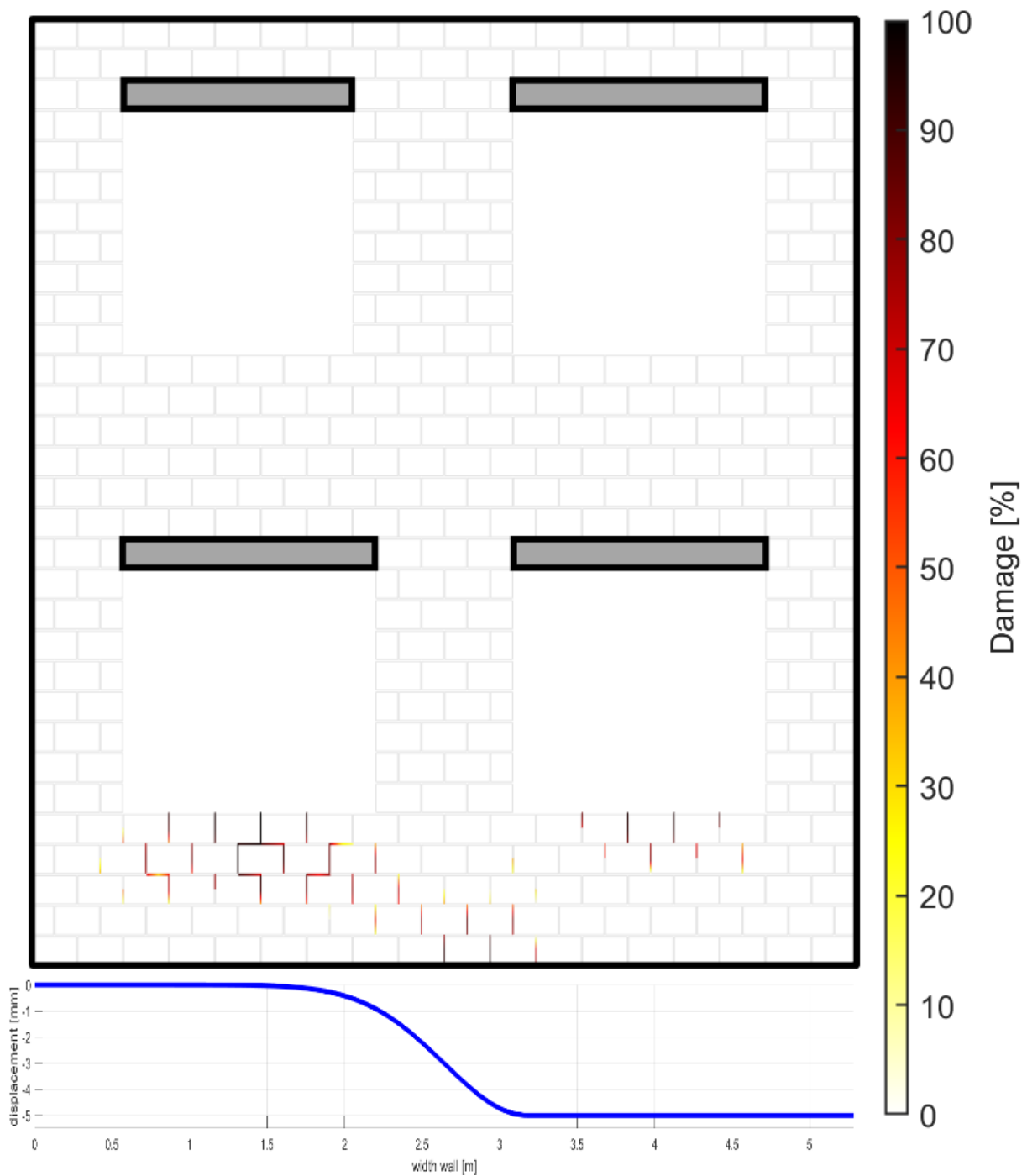
FIGUUR 6.6: CASE 4 - SCHADEPATTERN NA TOEVOEGING EXTRA DILATATIEVOEGEN TIJDSTAP 40

Door toepassing van deze dilatatievoegen aan de bovenkant, wordt het probleem verplaatst. De schade in het midden schuift op naar de linkerkant en vermindert een beetje, er is geen duidelijke verbetering terug te vinden in het schadepatroon. Hieruit kan men concluderen dat deze twee extra dilatatievoegen voor deze test geen vooruitgang bieden op vlak van schade. Dit wil echter niet zeggen dat het in de realiteit ook zo is. De gebruikte modellen zijn niet gekalibreerd met werkelijke materiaalparameters, vandaar dat men de praktische uitvoering dus niet kan analyseren.

6.2 CASE 5: RIJHUIS MET MEERDERE RAAMOPENINGEN

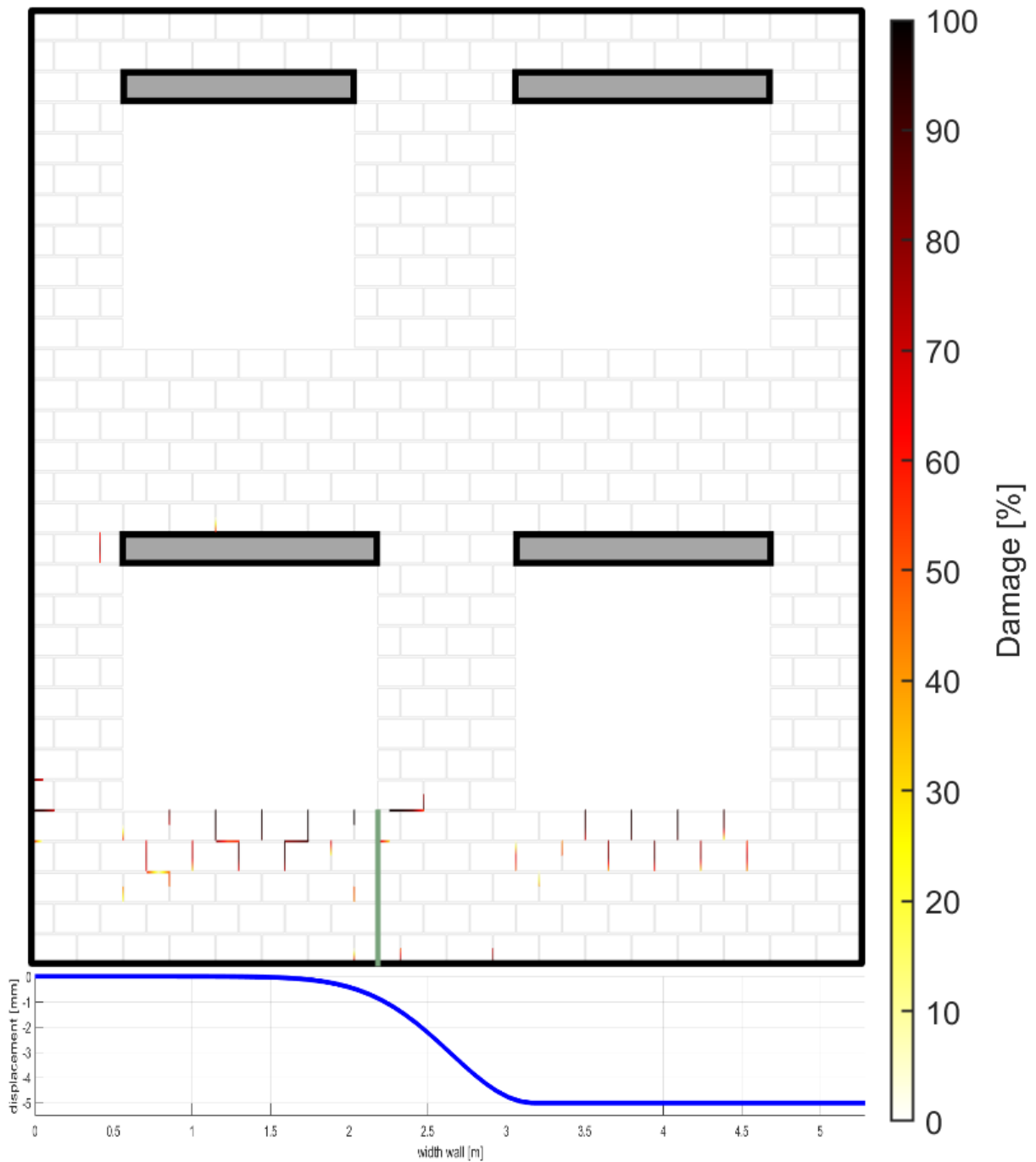
Deze case bestaat uit een typisch rijhuis, waarbij de deuropening vervangen is door een raam. Hierdoor bekomt men vier raamopeningen in een gevel. Deze gevel heeft een breedte van 7,60 meter en een hoogte van 4,20 meter. De vier ramen hebben een identieke afmeting.

Deze gevel vertoont het typische schadepatroon: een scheur die start vanaf het hoekpunt van de raamopening, onder een hoek van 45° . Opmerkelijk is het feit dat bovenstaande raamopeningen geen scheurvorming vertonen. Dit is mogelijk omwille van het geringe gewicht dat op deze openingen steunt. Aangezien de schadepatronen tussen tijdstap 25 en 50 nauwelijks verschillen, toont men op **Figuur 6.7** enkel het schadepatroon bij tijdstap 50.



FIGUUR 6.7: CASE 5 - SCHADEPATTERN TIJDSTAP 50

De schade is duidelijk geconcentreerd onder het raam linksonder. Omwille hiervan brengt men een dilatatievoeg aan onder de rechterraand van dit raam. Dit geeft ons een schadepatroon zoals weergegeven op **Figuur 6.8** na 50 tijdstappen.



FIGUUR 6.8: CASE 5 - SCHADEPATTERN TIJDSTAP 50 MET DILATATIEVOEG

Deze locatie van de dilatatievoeg bewijst duidelijk haar nut: de dilatatievoeg zorgt ervoor dat de schade in het onderste deel van de wand nagenoeg nul is. Enkel net onder de raamopening kan men schade terugvinden. Deze dilatatievoeg zorgt dus voor een verbetering van het structureel gedrag van de wand, in de zin dat er minder schade optreedt.

7 BESLUIT

Scheurvorming binnen metselwerk is een inherent en haast niet weg te werken probleem, dat - mits goede voorzorgen - gelimiteerd kan worden. Dankzij de huidige kennis over dilatatievoegen en toepassingen via MATLAB, kan men deze scheurvorming dimensioneren en analyseren. Het mesoschaalmodel is daarbij een geschikte keuze indien men werkt met relatief kleine metselwerkwanden.

Binnen deze masterproef werd er bijgedragen (via o.a. debugging) aan de ontwikkeling van een gebruiksvriendelijke tool om mesomodellen op te stellen van diverse metselwerkmuren. Verder werden de toepassingsmogelijkheden van mesomodellering onderzocht. Zo zag men tijdens de analyses dat in bepaalde gevallen geen numerieke oplossing meer gevonden kon worden omwille van instabiliteiten in het model. Eens de metselwerkstenen loskomen binnen het zettings- of schadepatroon, heeft de stijfheidsmatrix immers een slecht conditiegetal. Hierdoor kan de solver moeilijk een oplossing vinden. Een oplossing hiervoor is het gebruik van een macromodel, dewelke doorgaans stabiel is. Met dit macromodel verliest men echter details, zo kunnen de typische trapscheuren bijvoorbeeld niet meer gesimuleerd worden. Een alternatief is een hybride vorm tussen meso- en macromodellen, zoals lager beschreven.

De rekentijd was verder ook een belangrijke factor. Dit omdat een iteratieve analysemethode werd toegepast, waardoor de simulaties dus afhankelijk zijn van het gebruikte model. Indien men kijkt naar een metselwerkwand met afmetingen van vijf meter op vijf meter, kan men zien dat hier de schaalgrootte een belangrijke invloed heeft op de analyse en de rekentijd. Hierdoor moest men bijvoorbeeld in case 3 de afmetingen van de metselwerkstenen aanpassen en de werkelijke afmetingen van de wand halveren. Dit zorgde voor een irrealistisch schadepatroon. Omwille van de omvang van de case nam de rekentijd ook toe tot meer dan 45 minuten per analyse. Dit is een significante stijging in rekentijd ten opzichte van de eerder uitgevoerde cases.

Een nadeel van dit type analysesoftware is dat de solver slechts één oplossing gaat zoeken van een stelsel met meerdere mogelijke oplossingen. Het vinden van deze oplossing kan op twee manieren gebeuren. Enerzijds kan dit via de laagste energie-inhoud, hetgeen een relatief veilige methode is en minder robuust, omdat men met lagere krachten werkt. Anderzijds kan dit via een willekeurig oplossingspatroon, of een oplossingspatroon dat springt tussen twee takken, ook bekend als bifurcaties.

Als toekomstig onderzoek wordt uitgevoerd, kan men best gebruik maken van een objectieve parameter om de verschillende schadegevallen kwantitatief te analyseren. Dit is binnen deze masterproef nog niet geïmplementeerd. Men denkt hierbij aan de totale gedissipeerde breukenergie van een volledige muur. Zo bekomt men een objectief schadeniveau, waarmee men ook duidelijker de invloed van dilatatievoegen kan beschouwen. Dit is uiteraard een betere methode dan het vergelijken van schadepatronen met het blote oog.

Verder kan men de gebruikte modellen ook best kalibreren met werkelijke materiaalparameters, om een realistischere analyse te verkrijgen. Dit kan men doen door het uitvoeren van praktische

experimenten. Een andere mogelijkheid, is dat men de gebruikte materiaalparameters statistisch verdeelt over de geometrie. Dit verkleint bovendien de kans op bifurcaties.

Ook de aanpak waarbij men een meerschallig domein gaat activeren om metselwerk wanden te analyseren is reeds in ontwikkeling, ook binnen de onderzoeksgroep CERG. Door middel van deze techniek kan men grotere en complexere metselwerkstructuren analyseren. Verder is deze aanpak ook efficiënter, gezien men niet de volledige metselwerk wand hoeft te analyseren. Vooral bij zeer grote structuren speelt deze aanpak dus een belangrijke rol.

In de toekomst kan men wellicht gebruik maken van experimenten gebaseerd op innovatieve meettechnieken, waarmee men de numerieke modellen kan valideren. Dit kan leiden tot een realistischer beeld van het schade- en zettingspatroon dat optreedt binnen de metselwerk wand.

REFERENTIELIJST

- [1] CERG, "Onderzoeksvisie." <https://www.uhasselt.be/UH/CERG-Bouwkunde/Overons/Onderzoeksvisie> (accessed Sep. 29, 2020).
- [2] CERG, "Onderzoekstopics." <https://www.uhasselt.be/UH/CERG-Bouwkunde/Overons/Onderzoekstopics> (accessed Sep. 29, 2020).
- [3] D. R. W. Martens, "Scheurvorming bij metselwerk: Zijn scheuren zorgwekkend?," *Cement*, vol. 2016, no. 4, pp. 38–41, 2016.
- [4] I. A. E. De Vent, "Structural damage in masonry," 2011.
- [5] D. Martens, "New approach for spacing of movement joints in reinforced and unreinforced masonry veneer walls. Part 1: Unreinforced masonry Neue Bemessungsmethode für die Abstände von Dehnungsfugen in bewehrten und unbewehrten Verblendmauerwerksschalen. Teil 1: Unbew: New approach for spacing of movement joints in reinforced and unreinforced masonry veneer walls. Part 1: Unreinforced masonry Neue Bemessungsmethode," *Mauerwerk*, vol. 20, pp. 284–294, 2016, doi: 10.1002/dama.201600701.
- [6] Helifix, "Movement joints." <https://www.helifix.co.uk/products/remedial-products/movement-joints/> (accessed Oct. 03, 2020).
- [7] Innomaso, "Bewegingen in metselwerk - bewegingsvoegen," 2020.
- [8] Bureau voor normalisatie, "Eurocode 6 - Ontwerp en berekening van constructies van metselwerk - Deel 2: Ontwerp, materiaalkeuze en uitvoering van constructies van metselwerk," 1070 Brussel, 2019.
- [9] "Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design - National annex," 2019.
- [10] WTCB, "Technische voorlichting - Uitvoering van metselwerk," 1000 Brussel, 2020.
- [11] L. Firket, "Een woordje uitleg bij constructie- en verdeelvoegen," pp. 18–19, 2019.
- [12] C. E. N. /TC 250, "Eurocode 6 — Design of Masonry structures — Part 2: Designconsiderations, selection of materials and execution of masonry," CEN, 2020.
- [13] P. J. B. B. Lourenço, "Computational strategies for masonry structures Lourenço, Paulo J. B. B.," 1996.
- [14] Think Brick Australia, "Design of Clay Masonry for Serviceability," 2019. <https://www.thinkbrick.com.au/Technical/Manuals/DownloadManual/5?ManualName=TB-Manual-7-dec19.pdf> (accessed Oct. 12, 2020).
- [15] *Scheurvorming*. Mechelen : Kluwer, 2009.
- [16] N. Shetty, "Fracture Characterization of Masonry in Compression with Acoustic Emission Analysis and Numerical Modeling," 2019.
- [17] A. Drougkas, P. Roca, and C. Molins, "Numerical Micro-Modeling Simulation of Masonry in Compression," *9th Int. Mason. Conf.*, pp. 1–10, 2014.

- [18] G. Giambanco, E. La Malfa Ribolla, and A. Spada, "Meshless meso-modeling of masonry in the computational homogenization framework," *Mecc.*, vol. 53, no. 7, pp. 1673–1697, 2017, doi: 10.1007/s11012-017-0664-7.
- [19] D. V Oliveira, P. B. Lourenço, and P. Roca, "Cyclic behaviour of stone and brick masonry under uniaxial compressive loading," *Mater. Struct.*, vol. 39, no. 2, pp. 247–257, 2006, doi: 10.1617/s11527-005-9050-3.
- [20] A. J. Aref and K. M. Dolatshahi, "A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures," *Comput. Struct.*, vol. 120, pp. 9–23, 2013, doi: 10.1016/j.compstruc.2013.01.012.
- [21] B. Vandoren, "Structuurmechanica 3," 2019.
- [22] B. Vandoren, "Discontinuous modelling of masonry failure," 2013.
- [23] K. Brosens and S. Ignoul, "Renovatie en restauratie."
- [24] C. Driesen, H. Degée, and B. Vandoren, "Efficient modeling of masonry failure using a multiscale domain activation approach," *Comput. Struct.*, vol. 251, p. 106543, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.compstruc.2021.106543.