

2017 • 2018
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Onderzoek naar het combineren van bouwtoleranties en hun
integratie in BIM

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

Dhr. Rudy VAN LAEKEN

COPROMOTOR :

ir. Robin COLLARD

Wout Deflem, Anthony Parisi

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



KU LEUVEN

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE-3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE-3500 Hasselt



KU LEUVEN

2017 • 2018

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Onderzoek naar het combineren van bouwtoleranties en hun
integratie in BIM

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

Dhr. Rudy VAN LAEKEN

COPROMOTOR :

ir. Robin COLLARD

Wout Deflem, Anthony Parisi

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



KU LEUVEN

Woord vooraf

In onze masteropleiding Industriële wetenschappen, afstudeerrichting bouwkunde, aan de UHasselt en KU Leuven kregen we de kans om deze masterproef uit te voeren.

Naar aanleiding van het ontbreken van bouwtoleranties in softwareprogramma's is deze masterproef tot stand gekomen. Er werd een oplossing gezocht die betrekking heeft op het integreren van de bouwtoleranties in virtuele modellen. Zo kan er aan de hand van een gewenst zekerheidspercentage worden bepaald waar mogelijke conflicten optreden en in welke mate deze zich voordoen. Hierop kan worden geanticipeerd door bijvoorbeeld een wand enkele millimeters korter te bestellen, zodat deze nog met zekerheid tussen de omliggende kolommen past.

Graag willen wij onze externe promotor Rudy Van Laeken en ir. Robin Collard van BAM Contractors, onze interne promotor Prof. dr. ir. Bram Vandoren en onze begeleiders van het WTCB ing. Steven Vercauteren, ing. Tim Lemoine en ing. Charlotte Euben bedanken voor hun deskundig advies en goede begeleiding van onze masterproef, wiens bijdrage voor een hogere kwaliteit heeft gezorgd.

Tot slot willen wij onze ouders bedanken, die steeds alle middelen voor ons ter beschikking hebben gesteld, zodat wij de kans hadden om deze opleiding te vervolledigen.

Inhoudsopgave

Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren.....	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English.....	13
1 Inleiding.....	15
1.1 Situering.....	15
1.2 Probleemstelling.....	15
1.3 Doelstelling	16
2 Literatuurstudie	18
2.1 Toleranties	18
2.1.1 Toleranties in de praktijk	18
2.1.2 Toleranties combineren	18
2.1.3 Tolerantietypes	21
2.1.4 Soorten toleranties	21
2.2 BIM.....	22
2.2.1 Wat is BIM?	22
2.2.2 Hoe werkt het?.....	23
2.2.3 Clashdetectie.....	23
2.3 Monte-Carlosimulatie	24
3 Toleranties.....	27
3.1 Kolom	28
3.1.1 Dwarsafmetingen.....	30
3.1.2 Hoogte.....	32
3.1.3 Hoekverdraaiing van eind- en dwarsdoorsneden.....	32
3.1.4 Horizontale afstand tot een secundaire as	33
3.1.5 Verticaliteit 1 verdieping.....	33
3.1.6 Verticaliteit n verdiepingen	34
3.1.7 Kromming.....	34
3.1.8 Afstand tussen kolommen	34
3.2 Balk.....	35
3.2.1 Dwarafmetingen	36
3.2.2 Zeeg in het verticaal vlak	36
3.2.3 Positie balk/kolomverbinding relatief aan de kolom.....	37
3.2.4 Kromming in het horizontaal vlak.....	37
3.2.5 Hart-op-hartafstand tussen balken.....	38
3.3 Wand	38
3.3.1 Dwarsafmetingen.....	40
3.4 Vloerplaat	41
3.4.1 Lengte.....	42
4 Toleranties combineren volgens de kwadratische methode.....	43
4.1 Eén kolom	44
4.1.1 Onderaan de kolom	45
4.1.2 Bovenaan de kolom	49
4.1.3 In het midden van de kolom	51
4.2 Twee kolommen.....	53
4.2.1 Rekenvoorbeeld	54
4.2.2 Bespreking.....	55

4.3	Twee kolommen en een wand	55
4.3.1	Rekenvoorbeeld	56
4.3.2	Bespreking.....	57
4.4	Twee kolommen en een balk	57
4.4.1	Rekenvoorbeeld	60
4.4.2	Bespreking.....	62
4.5	Twee balken	63
4.5.1	Rekenvoorbeeld	64
4.5.2	Bespreking.....	64
4.6	Twee balken en een vloerplaat	64
4.6.1	Rekenvoorbeeld	65
4.6.2	Bespreking.....	66
4.7	Besluit	66
5	Monte-Carlosimulaties	69
5.1	Eén kolom	70
5.1.1	Gelijkaardige verdeling	72
5.1.2	Verdelingen volgens Technische Voorlichting 127	77
5.1.3	Invloed van de afwijkingen	79
5.2	Twee kolommen en een wand	83
5.2.1	Verdelingen volgens Technische Voorlichting 127	84
5.2.2	Invloed van de afwijkingen	86
5.3	Vier kolommen, twee balken en een vloerplaat	86
5.3.1	Verdelingen volgens Technische Voorlichting 127	89
5.3.2	Invloed van de afwijkingen	90
5.4	Conclusie	90
6	Besluit	93
	Bibliografie	95
	Bijlage A	97
	Bijlage B	99
	Bijlage C	101

Lijst van tabellen

Tabel 3.1: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een kolom.....	29
Tabel 3.2: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een kolom.....	30
Tabel 3.3: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een kolom	30
Tabel 3.4: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton.....	31
Tabel 3.5: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor ter plaatse gestort beton.....	31
Tabel 3.6: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton.....	31
Tabel 3.7: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor ter plaatse gestort beton.....	32
Tabel 3.8: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd architectonisch beton.....	32
Tabel 3.9: Tolerantie op de hoogte van een kolom voor geprefabriceerd beton.....	32
Tabel 3.10: Tolerantie op de hoekverdraaiing van eind- en dwarsdoorsneden van een kolom voor geprefabriceerd beton.....	32
Tabel 3.11: Tolerantie op de hoekverdraaiing van eind- en dwarsdoorsneden van een kolom voor ter plaatse gestort beton.....	33
Tabel 3.12: Tolerantie op de horizontale afstand van een kolom tot een secundaire as	33
Tabel 3.13: Tolerantie op de verticaliteit van één verdieping voor een kolom.....	33
Tabel 3.14: Tolerantie op de verticaliteit van n verdiepingen voor een kolom	34
Tabel 3.15: Tolerantie op de kromming van een kolom	34
Tabel 3.16: Tolerantie op de afstand tussen kolommen.....	34
Tabel 3.17: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een balk	35
Tabel 3.18: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een balk	36
Tabel 3.19: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een balk.....	36
Tabel 3.20: Tolerantie op de zeeg van een balk voor geprefabriceerd beton	37
Tabel 3.21: Tolerantie op de positie van een balk/kolomverbinding relatief aan de kolom.....	37
Tabel 3.22: Tolerantie op de kromming van een balk in het horizontaal vlak.....	37
Tabel 3.23: Tolerantie op de hart-op-hartafstand tussen balken	38
Tabel 3.24: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een wand	39
Tabel 3.25: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een wand	39
Tabel 3.26: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een wand	39
Tabel 3.27: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een wand voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton volgens de norm NBN EN 14992	40
Tabel 3.28: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een vloerplaat.....	41
Tabel 3.29: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een vloerplaat	42
Tabel 3.30: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een vloerplaat.....	42
Tabel 3.31: Tolerantie op de lengte van een vloerplaat voor geprefabriceerd beton volgens de norm NBN EN 13747 + A2.....	42
Tabel 3.32: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een holle vloerplaat voor geprefabriceerd beton volgens de norm NBN EN 1168 + A3	42
Tabel 4.1: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton.....	48
Tabel 4.2: Tolerantie op de kromming van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton	52
Tabel 4.3: Tolerantie op de tussenafstand tussen kolommen voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton.....	54

Tabel 4.4: Tolerantie op de lengte van een wand voor geprefabriceerde niet-architectonisch beton	56
Tabel 4.5: Tolerantie op de positie van een balk-kolom verbinding.....	60
Tabel 4.6: Tolerantie op de kromming van een balk voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton.	61
Tabel 4.7: Tolerantie op de zeeg van een balk voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton	61
Tabel 5.1: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie	73
Tabel 5.2: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage.....	76
Tabel 5.3: Afwijkingen volgens TV 127.....	77
Tabel 5.4: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie	78
Tabel 5.5: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage.....	78
Tabel 5.6: Invloed van de verschillende afwijkingen	79
Tabel 5.7: Afwijkingen op kolommen van verschillende hoogtes.....	80
Tabel 5.8: Afwijking op een kolom van 8 m bij een opgegeven zekerheidspercentage	82
Tabel 5.9: Invloed van de verschillende afwijkingen	82
Tabel 5.10: Afwijking op een kolom van 12 m bij een opgegeven zekerheidspercentage	83
Tabel 5.11: Invloed van de verschillende parameters	83
Tabel 5.12: Afwijkingen volgens TV 127.....	85
Tabel 5.13: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie	85
Tabel 5.14: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage.....	85
Tabel 5.15: Invloed van de verschillende afwijkingen	86
Tabel 5.16: Afwijkingen volgens TV 127.....	89
Tabel 5.17: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie	89
Tabel 5.18: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage.....	89
Tabel 5.19: Invloed van de verschillende afwijkingen	90

Lijst van figuren

Figuur 1.1: Verschillende stappen in het integratieproces	16
Figuur 2.1: Welfsel op twee wanden.....	19
Figuur 2.2: Invloed van de haaksheid op de dwarsafmetingen.....	19
Figuur 2.3: Gausscurve van een normaalverdeling.....	20
Figuur 2.4: Visuele voorstelling van de werking van een Monte-Carlosimulatie	25
Figuur 3.1: Overzicht van de toleranties	28
Figuur 3.2: Naamgeving lengtematen van de kolom	28
Figuur 3.3: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom.....	31
Figuur 3.4: Tolerantie op de hoogte van een kolom	32
Figuur 3.5: Tolerantie op de hoekverdraaiing van een dwars- en einddoorsnede en een oplegvlak van een kolom.....	33
Figuur 3.6: Tolerantie op de horizontale afstand van een kolom tot een secundaire as	33
Figuur 3.7: Tolerantie op de verticaliteit van één verdieping voor een kolom	33
Figuur 3.8: Tolerantie op de verticaliteit van n verdiepingen voor een kolom.....	34
Figuur 3.9: Tolerantie op de kromming van een kolom.....	34
Figuur 3.10: Tolerantie op de afstand tussen kolommen	34
Figuur 3.11: Naamgeving lengtematen van de balk.....	35
Figuur 3.12: Tolerantie op de zeeg van een balk	37
Figuur 3.13: Tolerantie op de positie van een balk/kolomverbinding relatief aan de kolom	37
Figuur 3.14: Tolerantie op de kromming van een balk in een horizontaal vlak	37
Figuur 3.15: Tolerantie op de hart-op-hartafstand tussen balken	38
Figuur 3.16: Naamgeving lengtematen van de wand.....	38
Figuur 3.17: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een wand	40
Figuur 3.18: Naamgeving lengtematen van de vloerplaat	41
Figuur 3.19: Tolerantie op de lengte van een vloerplaat.....	42
Figuur 4.1: Uiteindelijk model.....	43
Figuur 4.2: Boven- en linkerzijaanzicht van het uiteindelijk model.....	44
Figuur 4.3: Totale afwijking op het dwarsprofiel van een kolom.....	44
Figuur 4.4: 3D-weergave van een kolom onderzocht aan de onderkant	45
Figuur 4.5: Afwijking op de breedte en hoekverdraaiing onderaan de kolom.....	45
Figuur 4.6: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen onderaan de kolom.....	46
Figuur 4.7: Afwijking op de verticaliteit van meerdere verdiepingen	46
Figuur 4.8: Totale afwijking op het dwarsprofiel onderaan de kolom.....	47
Figuur 4.9: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting onderaan de kolom.....	49
Figuur 4.10: 3D-weergave van een kolom onderzocht aan de bovenkant	49
Figuur 4.11: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen bovenaan de kolom.....	50
Figuur 4.12: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting bovenaan de kolom	51
Figuur 4.13: 3D-weergave van een kolom onderzocht in het midden	51
Figuur 4.14: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen in het midden van de kolom	52
Figuur 4.15: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting in het midden van de kolom.....	53
Figuur 4.16: Twee uiterste waarden voor de tussenafstand tussen twee kolommen	54
Figuur 4.17: Uiteindelijk model.....	55
Figuur 4.18: Wand tussen twee kolommen.....	56
Figuur 4.19: Uiteindelijk model.....	58
Figuur 4.20: Totale afwijking in de hoogte- en breedterichting van de balk.....	58
Figuur 4.21: 3D-weergave van een balk onderzocht in het midden	58
Figuur 4.22: De afwijking op de zeeg van een balk.....	59
Figuur 4.23: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen voor de te beschouwen balk.....	59

Figuur 4.24: Totale afwijking in de hoogte- en breedterichting van de balk	60
Figuur 4.25: Totale afwijking in de breedte- en hoogterichting van de kolom.....	62
Figuur 4.26: Mogelijke afwijkingen van een balk op twee kolommen.....	63
Figuur 4.27: Hart-op-hart afstand tussen twee balken	63
Figuur 4.28: Meest nadelige situatie voor de hart-op-hart afstand tussen twee balken	64
Figuur 4.29: Uiteindelijk model.....	65
Figuur 4.30: Meest nadelige situatie van een breedvloerplaat op twee balken.....	65
Figuur 5.1: Uiteindelijk model met bijhorende afmetingen.....	70
Figuur 5.2: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting in het midden van de kolom.....	70
Figuur 5.3: Symmetrische normaalverdeling	72
Figuur 5.4: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de breedte van een kolom	74
Figuur 5.5: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de positie van een kolom	74
Figuur 5.6: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de verticaliteit van een kolom.....	74
Figuur 5.7: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de kromming van een kolom	74
Figuur 5.8: Kansdichtheidsfunctie van de gecombineerde afwijking op een kolom	75
Figuur 5.9: Cumulatieve distributiefunctie van de gecombineerde afwijking op een kolom	75
Figuur 5.10: Cumulatieve distributiefunctie met aanduiding van de beschouwde waarden.....	76
Figuur 5.11: Kansdichtheidsfunctie van de gecombineerde afwijking op een kolom	79
Figuur 5.12: Het effect van het verkleinen van de afwijking i.f.v. de hoogte bovenaan de kolom	81
Figuur 5.13: Het effect van het verkleinen van de afwijking i.f.v. de hoogte in het midden van de kolom.....	81
Figuur 5.14: Twee kolommen met een wand tussen.....	84
Figuur 5.15: Vloerplaat op twee balken.....	87
Figuur 5.16: Mogelijke afwijking vloerplaat op twee balken	87
Figuur 5.17: Rooster van een vloerplaat op twee balken	88

Verklarende woordenlijst

Afkorting	Verklaring
BIM	Building information model
G-beton	Geprefabriceerd beton
GA-beton	Geprefabriceerd architectonisch beton
GB	Gewapend beton
GNA-beton	Geprefabriceerd niet-architectonisch beton
OB	Ongewapend beton
TPG-beton	Ter plaatse gestort beton
VB	Voorgespannen beton

Abstract

Er bestaat nog geen manier om in een virtueel model rekening te houden met bouwtoleranties waardoor tijdens de uitvoering elementen mogelijks niet op elkaar aansluiten ten gevolge van afwijkingen. Deze masterproef werkt een verwerkingsmethode uit om uitvoeringstoleranties te integreren in de software die wordt gebruikt in het BIM-proces.

In de verwerkingsmethode wordt de totale afwijking op de bouwelementen bepaald, alsook de afwijking op de onderlinge positie tussen verschillende elementen. Dit wordt gedaan door gelijktijdig voorkomende afwijkingen te combineren volgens de kwadratische methode en door Monte-Carlosimulaties uit te voeren.

Door Monte-Carlosimulaties uit te voeren waarvan de input gebaseerd is op empirisch onderzoek, wordt besloten dat het gebruik van toleranties in de kwadratische combinatie in een groot deel van de gevallen zorgt voor een overschatting van de werkelijkheid.

De plaats waar de totale afwijking van één kolom het grootst is, hangt af van de hoogte van de kolom. Het effect van een verbeterde afwijking is afhankelijk van de verhouding tussen de afwijkingen. Naarmate een kolom groter wordt, daalt de invloed van de positie. In het midden neemt de invloed van de kromming toe en bovenaan de verticaliteit.

Verder levert onderzoek van de relatie tussen bouwelementen praktisch nuttige informatie, waardoor conflicten tussen deze elementen kunnen worden voorkomen. Deze masterproef geeft de aanzet naar verder onderzoek en het automatiseren van bouwtoleranties in BIM.

Abstract in English

Construction tolerances are not incorporated in virtual models yet, which result in the possibility of construction elements not matching up during the execution due to deviations. This Master's thesis develops a processing method to integrate execution tolerances into software used in BIM.

In this processing method, the total deviation of building elements is determined, as well as the deviation on the position between different elements. This is done by combining concomitant occurring deviations by using the quadratic method and by performing Monte Carlo simulations.

By performing Monte Carlo simulations, whose input is based on empirical research, one can conclude that the use of tolerances in the quadratic combination results in an overestimation of the reality in most cases.

The location in which the total deviation of one column is largest depends on the height of the column. The effect of an improved deviation depends on the ratio between the deviations. As a column increases in height, the influence of the position decreases. The influence of curvature increases in the middle and verticality increases at the top.

Furthermore, by researching the relationship between building elements, conflicts between these elements can be prevented. This Master's thesis is the first step towards further research and the automation of building tolerances in BIM.

1 Inleiding

1.1 Situering

Als masterstudenten van de opleiding Industrieel Ingenieur Bouwkunde aan de UHasselt doen wij onze masterproef in samenwerking met BAM Contractors en het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB).

Met haar 540 medewerkers is BAM Contractors een van de grootste bouwbedrijven in België. Het bedrijf realiseert infrastructuurprojecten, wegenwerken, industriële en waterbouwkundige constructies en gebouwen. Hierbij staat kwaliteit en veiligheid centraal. Door haar innovatief denken, is BAM Contractors een gewaardeerde en succesvolle bouwpartner [1].

Een voorbeeld van dit innovatieve denken is de wijze waarop men zoek is om rekening te houden met de optredende bouwtoleranties in iedere bouwfase, en dit vanaf het ontwerp. Elke constructie opgebouwd in de virtuele wereld houdt geen rekening met toleranties waardoor alle onderdelen perfect in elkaar passen. Elk model is bijgevolg een voorstelling van een ideale wereld.

De realiteit is natuurlijk anders omdat elke constructie tijdens het bouwen onderhevig is aan afwijkingen die kunnen voorkomen in de uitvoering. Door deze afwijkingen kunnen er conflicten optreden bij de aansluiting van de elementen. Daarom bestaan er bouwtoleranties die deze afwijkingen beperken. Afwijkende elementen kunnen ervoor zorgen dat er bijvoorbeeld meer tijd of middelen nodig zijn om het geheel te vervolledigen en zorgen mogelijks voor een faalkost. Uit voorzichtige schattingen bedragen de faalkosten 5 à 10% van de omzet van de bouwbedrijven.

Het doel van de masterproef is om een aanzet te geven over hoe de toleranties in de bouw moeten worden geïntegreerd in BIM en een visie te formuleren over hoe hier in de praktijk kan worden mee omgegaan.

1.2 Probleemstelling

Op dit moment bestaat er nog geen manier om in een virtueel model rekening te houden met toleranties en afwijkingen tijdens de uitvoering. De bouwelementen hebben vaste dimensies en passen perfect in elkaar. In realiteit zullen de bouwelementen nooit perfecte dimensies hebben en is er volgens normen en productspecificaties een toegestane afwijking op de dimensies gedefinieerd. In dit geval wordt er over fabricagetoleranties gesproken.

Naast de fabricagetoleranties zijn er ook uitvoeringstoleranties. Deze hebben betrekking tot de plaatsing van bouwelementen. Tijdens de bouw worden de verschillende bouwelementen ter plaatse vervaardigd of worden geprefabriceerde onderdelen geplaatst op de voorziene locatie zoals in het virtuele model. De locatie van deze onderdelen wordt vanuit uitgezette punten of assenstelsels gemeten. Het gaat hier zowel over de horizontale als verticale afstand van het bouwelement tot dit punt of assenstelsel. Er zal nagenoeg altijd een afwijking zijn op de werkelijke locatie van een bouwelement op de werf ten opzichte van de locatie in het virtuele model. Ook hier zijn de toegestane afwijkingen gedefinieerd in normen. Naast een afwijking op de locatie van een bouwelement kunnen er ook andere afwijkingen voorkomen ten gevolge van de uitvoering, zoals bijvoorbeeld de verticaliteit van een kolom of de excentriciteit van boven elkaar liggende wanden. Elkeen van deze afwijkingen, samen met de afwijkingen op de dimensies, kan de positie van andere bouwelementen beïnvloeden. In het virtuele model wordt hier geen rekening mee gehouden en zijn alle elementen perfect geplaatst. Naarmate er meer bouwelementen zijn, zullen de afwijkingen steeds groter worden tot ze mogelijk buiten het toelaatbare interval vallen.

1.3 Doelstelling

De implementatie van uitvoeringstoleranties in een virtueel model is een lang proces. Deze masterproef behandelt daarom slechts een deel van dit proces. De verschillende stappen waaruit het proces bestaat kort uitgelegd en getoond in Figuur 1.1.



Figuur 1.1: Verschillende stappen in het integratieproces

In de eerste stap wordt er van tweedimensionale plannen overgegaan naar een driedimensionaal model waarin informatie wordt meegegeven aan de bouwelementen. Dit is reeds volop in ontwikkeling aangezien alsmaar meer bouwbedrijven starten met het gebruik van BIM. Ondanks dat er bouwtoleranties zijn, zoals beschreven in verschillende normen, wordt er in de praktijk niet altijd rekening mee gehouden. Een van de redenen hiervan is dat deze toleranties in meerdere normen beschreven staan er hier niet één eenduidig document over bestaat.

In een tweede stap is het van belang om alle bestaande toleranties te bundelen in één document. Het WTCB is reeds bezig met het samenvatten van alle bestaande toleranties, samen met de meetmethodes.

In de derde stap wordt met de informatie uit het virtueel model een methode gezocht om alle toleranties en afwijkingen in rekening te brengen. De relatie tussen de bouwelementen in het virtuele model wordt geanalyseerd en bijgevolg wordt een methode uitgewerkt om de elementen beter op elkaar af te stemmen. Hierdoor worden de uiteindelijke afwijkingen geminimaliseerd, hetgeen leidt tot een vlotter bouwproces. De analyse is theoretisch en in de verwerkingsmethode worden afwijkingen uit een empirisch onderzoek gebruikt als richtlijn.

In de vierde stap wordt een databank opgebouwd door de afwijkingen die zich voordoen op de bouwelementen tijdens de bouwfase op te meten. De aannames over het voorkomen van afwijkingen in de methode uit de derde stap kunnen nu worden vervangen door werkelijke waarden. De methode uit de derde stap levert vervolgens een nauwkeuriger resultaat.

De vijfde stap in het proces is de implementatie van de methode in de software die gebruikt wordt in het BIM-proces. Wanneer een virtueel model wordt opgebouwd, dan is het de bedoeling dat er automatisch rekening wordt gehouden met de toleranties en afwijkingen op de verschillende bouwelementen. Het model geeft dan rechtstreeks aan waar mogelijke problemen zich situeren en geeft mogelijke oplossingen om deze problemen te voorkomen.

In een laatste stap wordt de opbouw van de constructie opgevolgd en opgemeten, zodat deze informatie kan worden gekoppeld aan het virtueel model. Het virtueel model kan daardoor meer nauwkeurige voorspellingen maken over de bouwelementen die nog geplaatst moeten worden. Een voorbeeld hiervan is het dagelijks opmeten van de werf met een drone of met behulp van laserscanning. De informatie die uit deze meting volgt kan worden gekoppeld aan het virtuele model. Wanneer er verschillende afwijkingen zijn op de reeds geplaatste bouwelementen die invloed hebben op de nog te plaatsen elementen, dan moet het model geen voorspellingen maken maar kunnen de werkelijke afwijkingen worden gebruikt.

Deze masterproef focust zich op de tweede en derde stap in het proces en beperkt zich tot betonnen ruwbouwelementen, met uitzondering van trappen en funderingen. De hoofddoelstelling van deze masterproef is dus om een methode uit te werken om toleranties te integreren in de software, om een zo vlot mogelijke uitvoering te garanderen. Om aan deze doelstelling te voldoen, wordt de masterproef opgedeeld in kleinere deeldoelstellingen.

De eerste doelstelling wordt uitgewerkt in Hoofdstuk 2 en is het uitvoeren van een literatuurstudie. In deze literatuurstudie wordt er onderzoek gedaan naar welke toleranties er zijn en hoe deze met elkaar gecombineerd moeten worden. Verder worden de principes en werking van BIM onderzocht. Tot slot wordt onderzoek gedaan naar de werking van een Monte-Carlosimulatie omdat dit principe wordt gebruikt in de uitgewerkte methode.

Vervolgens worden alle genormeerde toleranties van betonnen bouwelementen opgelijst. Dit moet een sluitende lijst zijn die als basis dient voor de integratie van toleranties in de software. Dit aspect wordt uitgewerkt in Hoofdstuk 3.

Hoofdstuk 4 omvat het uitwerken van een deel van de derde stap in het proces. De doelstelling is enerzijds om voor elk bouwelement de verschillende toleranties die hierop van toepassing zijn te combineren. Zo kan er een volume rond het bouwelement worden gevormd waarbinnen het element zich in de meest nadelige situatie nog steeds bevindt. Anderzijds is het van belang om de toleranties van verschillende bouwelementen te combineren. De manier van combineren in dit hoofdstuk beschouwt een meest nadelige situatie.

In Hoofdstuk 5 wordt de laatste doelstelling uitgewerkt. Hier wordt getracht de verschillende combinaties te linken aan een zekerheidspercentage. Zo zal een grotere zekerheid strengere tolerantiewaarden met zich meebrengen.

2 Literatuurstudie

2.1 Toleranties

Toleranties kunnen op meerdere manieren worden omschreven. Enerzijds kan een tolerantie omschreven worden als een getal, waarvan de absolute waarde een boven- en/of ondergrens van een afmeting weergeeft. Anderzijds is het in de bouw gebruikelijk om toleranties te omschrijven als de maximale toegelaten afwijking naar buiten of naar binnen. Toleranties worden ten onrechte vaak verward met meetfouten of –onzekerheden [2].

Het is nagenoeg onmogelijk om een bouwproduct of bouwwerk met absolute perfectie te vervaardigen. In elke fase van het bouwproces (fabricage, inplanting, stellen en plaatsing) kunnen er imperfecties optreden die kunnen leiden tot afwijkingen op de gewenste dimensie of positie. Om deze reden is het noodzakelijk om toleranties te integreren. Een tolerantie geeft objectief aan welke afwijking het product of bouwwerk mag vertonen opdat het de nog steeds de gewenste prestaties levert. Deze toleranties dient men vanaf het ontwerp te definiëren [3].

De keuze van de waarde van de toleranties dienen realistisch te zijn. In het bouwproces zijn er verschillende uitdagingen bij de uitvoering. Om nu een nauwkeurige waarde van de tolerantie te bepalen is er onderzoek vereist naar de bouwmethode, de kostprijs, de bestemming van het gebouw en de functionele en esthetische eisen [2], [3].

Bij het opmeten van afwijkingen zal er ook een afwijking zijn op deze meting. Deze afwijking is afhankelijk van de meetapparatuur. Bij de keuze van de te gebruiken meetapparatuur dient er steeds rekening te worden gehouden met de bepalingen, zoals voorgeschreven in de contractuele documenten (bv. het bijzondere bestek) [3].

2.1.1 Toleranties in de praktijk

Theoretisch kunnen toleranties dus perfect worden geïntegreerd in de bouw. Praktisch is dit zeer complex. Voor sommige aspecten is er een overvloed aan regelgeving en/of normen terwijl andere aspecten subjectief beoordeeld moeten worden door gebrek aan concrete criteria. Daarnaast brengen de contractuele documenten niet altijd de gewenste duidelijkheid met zich mee [2].

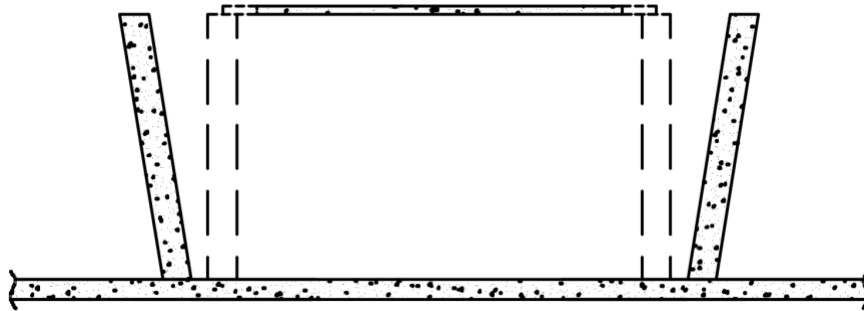
Het subjectief beoordelen of er al dan niet zorgvuldig werk wordt geleverd kan leiden tot mogelijke problemen op de bouwplaats. Dergelijke controles dienen dus te worden uitgevoerd met de nodige hoeveelheid gezond verstand. Bij het neerzetten van een bouwwerk zullen er immers altijd afwijkingen optreden. Hierbij is het van belang om in de ontwerpfase ervoor te zorgen dat het eisenpakket niet te streng zal zijn, maar realistische waarden met zich meebrengt [2].

Er zijn twee belangrijke aspecten om ervoor te zorgen dat de problemen, die resulteren uit afwijkingen, beperkt blijven. Ten eerste dienen er deelcontroles te worden uitgevoerd na elke fase van het bouwproces. Hierdoor is er nog tijd om de nodige aanpassingen uit te voeren. Dit is niet mogelijk wanneer men louter het eindresultaat zou controleren. Een tweede aspect om mogelijke problemen te vermijden is door het aandeel van de subjectieve beoordelingsmethoden (vooral op esthetisch vlak) zo veel mogelijk te beperken [2].

2.1.2 Toleranties combineren

In de praktijk komt het vaak voor dat men met meerdere toleranties rekening moet houden. Een voorbeeld hiervan is wanneer een welfsel op een wand wordt geplaatst. Hierbij zal dus niet enkel rekening moeten worden gehouden met fabricage- en uitvoeringstoleranties van het welfsel, maar dient men

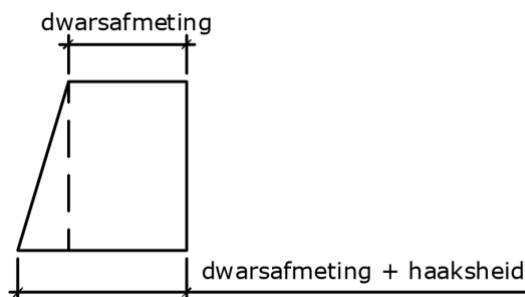
ook deze van de wand te respecteren. Zo zal de opleglengte van de vloerplaat niet enkel afhangen van de afwijking op de lengte van de vloerplaat zelf, maar ook van de afwijkingen op de wanden. Dit wordt weergegeven in Figuur 2.1. De stippenlijn stelt de positie voor, zoals op plan getekend.



Figuur 2.1: Welfsel op twee wanden

Ook kan er binnen de toleranties van één element nog een onderscheid gemaakt worden. Zo is het bij de fabricagetolerantie van belang dat men de haaksheid van het eindvlak, maar ook de lengtematen van het element controleert [3].

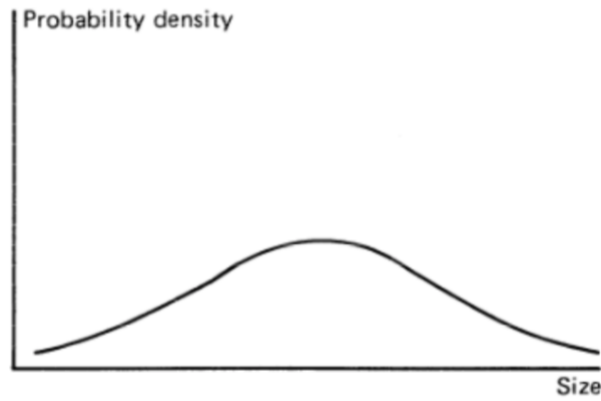
Deze verschillende toleranties dienen dan met elkaar te worden gecombineerd. Hierbij is het belangrijk om na te gaan als de betrokken toleranties al dan niet aan elkaar gerelateerd zijn. Zo zullen de lengtematen en de haaksheid van het eindvlak van een welfsel elkaar wederzijds beïnvloeden. In zulke gevallen moet men louter met de meest bepalende factor rekening houden. Indien men dit niet zou doen, zou men een overschatting maken voor de te beschouwen tolerantie [3]. Figuur 2.2 toont aan hoe de haaksheid van een dwarsdoorsnede een invloed zal hebben op de dwarsafmetingen.



Figuur 2.2: Invloed van de haaksheid op de dwarsafmetingen

Bij de montage van verschillende bouwelementen zijn er dus meerdere afwijkingen die kunnen voorkomen (bijvoorbeeld afwijkingen op de positie en dwarsafmetingen). In de meeste gevallen zijn deze afwijkingen het resultaat van verschillende handelingen. Deze afwijkingen gebeuren dus onafhankelijk van elkaar en dienen te worden gecombineerd [4]. Om toleranties nu met elkaar te combineren volstaat het niet om de algebraïsche som te nemen van alle werkende (van elkaar onafhankelijke) toleranties. Deze benadering beschouwt de meest nadelige situatie, maar de kans dat dit in de praktijk voorkomt is nagenoeg onbestaand. Om een meer realistisch resultaat te verkrijgen worden de combinaties van deze toleranties op een statistische wijze met elkaar gecombineerd. Dit geeft een resultaat dat te vergelijken is met de werkelijkheid [3].

In veel productieprocessen volgen de uiteindelijke afmetingen een normaalverdeling, waarvan de dichtheidsfunctie wordt weergegeven door een Gausscurve [4].



Figuur 2.3: Gausscurve van een normaalverdeling [4, p. 1]

Er zijn twee parameters die eigen zijn aan een normaalverdeling, namelijk het gemiddelde en de standaardafwijking. De verdelingsfunctie is hierbij symmetrisch rond het gemiddelde, waar de curve ook zijn piek bereikt. De standaardafwijking is een maat voor de spreiding van de curve. Indien deze parameters gekend zijn, kan de waarschijnlijkheid op het behalen van de tolerantie worden bepaald. Deze parameters kunnen niet exact worden bepaald en moeten worden geschat uit steekproeven. Om deze waarden exact te bepalen zou er data nodig zijn van elke afwijking op elk vervaardigd bouwelement [4].

Bij de statistische analyse wordt rekening gehouden met het fenomeen van waarschijnlijkheden en het feit dat de afwijkingen elkaar kunnen opheffen. De invloed van de gecombineerde afwijking wordt zo bepaald dat de waarschijnlijkheid op overschrijden gelijk is aan het overschrijden van één specifieke afwijking [4].

Eén van de methoden voor het bepalen van de combinaties van toleranties is gebaseerd op combinaties van spreidingen die de eerder besproken Gaussverdeling volgen. Uiteindelijk vindt men door extrapolatie en gelijkstelling aan de vierkantswortel van de som van de kwadraten volgend formule:

$$s_t = \sqrt{\sum s_i^2} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_n^2}$$

waarbij:

- s_t = de gecombineerde tolerantie;
- s_i = de onderling afhankelijk toleranties [3].

Deze methode van het kwadratisch optellen gaat er van uit dat de afwijkingen een normaalverdeling volgen, zonder te worden blootgesteld aan fysieke grenzen. Als er bij de fabricage bepaalde grenswaarden worden opgelegd en de bouwelementen die hun tolerantie overschrijden worden verworpen, dan zal het risico op een te grote gecombineerde afwijking ook dalen [4].

In het algemeen kan er worden uitgegaan van deze waarschijnlijkheidswet. Zelfs indien dit niet het geval is, is de algebraïsche som van de toleranties nog steeds een overschatting van de werkelijke situatie [3]. Met andere woorden, de meest nadelige situatie in theorie is een overschatting voor de meest nadelige situatie in praktijk.

Het combineren van afwijkingen op deze manier wordt beschreven in NBN ISO 3443-2: Statische grondslag voor het voorspellen van passen tussen onderdelen met een normale maatverdeling. De sterkte van het combineren op deze manier is, zoals de titel zegt, dat er op voorhand een voorspelling gemaakt kan worden voor het passen van onderdelen.

2.1.3 Tolerantietypes

Er bestaan verschillende types toleranties: de fabricagetolerantie, de inplantingstolerantie, de tolerantie op het stellen en de tolerantie op de plaatsing [3]. Deze worden in wat volgt besproken.

2.1.3.1 Fabricagetolerantie

Fabricagetoleranties zijn enkel van toepassing op prefabelementen. Fabricagetolerantie hebben betrekking op de maat- en vormafwijking van zowel de wapening als de betondelen, resulterend uit zijn fabricatie. De fabricagetoleranties van de wapening bevat toleranties op:

- Het uitsteken van staven;
- De scheefstand van uitstekende staven.

De fabricagetolerantie van de betondelen bevat toleranties op:

- De lineaire afmetingen,
- De vlakheid,
- De rechtheid,
- De haaksheid,
- De scheefheid,
- De kromming [5].

2.1.3.2 Inplantingstolerantie

De inplantingstolerantie heeft betrekking op de maatafwijking die zich voordoet bij het uitzetten van ingeplante punten en lijnen. Deze afwijkingen vloeien voort uit de gekozen techniek voor het uitzetten (bv. waterpas, theodoliet, laserinstrument) [3].

2.1.3.3 Tolerantie op het stellen

De tolerantie op het stellen heeft betrekking op de positionering van elementen ten opzichte van de uitgezette punten en/of lijnen. Buiten de tolerantie op de positie stellen de normen ook eisen op de tussenafstand tussen balken, wanden, kolommen en vloerplaten [5].

2.1.3.4 Tolerantie op de plaatsing

De tolerantie op de plaatsing heeft betrekking op de plaatsing van zowel de wapening als de betondelen. De toleranties op de plaatsing van de wapening zijn van toepassing op passieve wapening en voorspanwapening. De toleranties op de plaatsing van de betonelementen bevat toleranties op de loodrechte stand, de verticale uitlijning en de regelmatigheid van horizontale lijnen [5].

2.1.4 Soorten toleranties

Naast de verschillende types toleranties, bestaan er ook soorten toleranties. De tolerantietypes hebben betrekking tot alle mogelijke afwijkingen die zich kunnen voordoen terwijl de soorten toleranties betrekking hebben op de functionaliteit van de bouwelementen. De norm NBN EN 13670 definieert twee soorten toleranties: de normatieve en de informatieve tolerantie. De normatieve tolerantie is het interval waarin de geometrische afwijking zich moet bevinden opdat de mechanische sterkte en de

stabiliteit van de constructie gegarandeerd blijft. De informatieve tolerantie is de toelaatbare afwijking in verband met de gebruiksprestatie van de constructie en compatibel met de uitvoering. De invloed op de structurele stabiliteit is voor deze toleranties van minder belang.

In de norm NBN EN 13670 worden normatieve en informatieve toleranties gedefinieerd voor funderingen, palen en muren, balken en platen, doorsneden, oppervlaktevlakheid en rechtheid van de randen, uitsparingen en ingestorte stukken [6].

Wanneer de toleranties van ruwbouwelementen worden bepaald, staat het functionele aspect steeds centraal. De stabiliteit en de gebruiksgeschiktheid van een constructie mogen in geen enkel geval worden beïnvloed door een te grote afwijking op de afmeting of positie van de constructieonderdelen. Als de ruwbouwelementen niet zichtbaar worden door een afwerking, dan dienen er geen toleranties te zijn op basis van het uitzicht. Wanneer dit wel het geval is, dan zijn deze toleranties doorgaans strenger en dienen ze te worden opgenomen in de contractuele documenten [3].

Verder zijn er twee tolerantieklassen. Tolerantieklasse 1 is de normale tolerantieklasse. Deze maakt het mogelijk om de hypothesen voor de dimensionering uit Eurocode 2 toe te passen.

Tolerantieklasse 2 is een strengere tolerantieklasse. Uit deze strengere tolerantieklasse volgt een bijhorende strengere kwaliteitscontrole die het mogelijk maakt om met verlaagde partiële veiligheidsfactoren te rekenen zoals vermeld in de bijlage van Eurocode 2, het gaat hier dan over een nationale aanvulling van de Eurocode. Indien tolerantieklasse 2 gebruikt wordt, dient dit in het bijzondere bestek vermeld te worden.

In het geval van wanden spreekt men voor de maat- en vormtoleranties van geprefabriceerd beton niet over tolerantieklasse 1 en 2, maar over tolerantieklasse A en B. Hier is de regel dat klasse B steeds van toepassing is op alle elementen, tenzij anders aangegeven [3], [7].

2.2 BIM

In de toekomst is het de bedoeling dat de afwijkingen op de verschillende bouwelementen in het virtuele model worden ingepast. Aangezien deze afwijkingen er zijn in drie dimensies is het praktischer om met 3D-modellen te werken. Verder zijn de toleranties afhankelijk van bepaalde eigenschappen zoals de dwarsafmetingen, het materiaal en dergelijke. Er moet dus met een virtueel model worden gewerkt, waarbij er informatie aan verschillende bouwelementen kan worden gekoppeld. Om deze redenen komt BIM in aanmerking. Voor het integreren van toleranties in BIM is het met andere woorden noodzakelijk om onderzoek te doen naar de werking en de principes van BIM.

2.2.1 Wat is BIM?

BIM staat voor 'Building Information Model' en het verwijst naar een ontwerpproces waaraan rechtstreeks informatie wordt gekoppeld [8]. Zo kan naast de geometrie en positie ook nog informatie worden toegevoegd zoals het materiaal, kosten, isolatiewaarde, ventilatiepeil en dergelijke [9]. Hoewel dit de betekenis is van BIM zou er ook kunnen worden geopteerd voor de afkorting 'Building Information Management. Dit komt door het feit dat er via BIM zeer gemakkelijk informatie kan worden beheerd en verwisseld [8].

Met BIM kan men dus het gehele proces plannen, beheren en optimaliseren. Omdat het centrale model in 3D wordt opgebouwd kunnen ook alle (maat)plannen, doorsneden en aanzichten hieruit worden afgeleid. BIM kan dus niet eenduidig worden geïnterpreteerd, maar op verschillende manieren. Zo kan het dienen als technologie, een communicatiemiddel of een werkmethode [9]. Het doel van BIM is dan ook niets anders om een project in goede banen te leiden, met de nadruk op communicatie tussen de betrokken partijen [10].

Aangezien door het invoeren van BIM de faalkosten bij gebouwen aanzienlijk kunnen dalen, hebben alle betrokken partijen baat bij het gebruik ervan. Zo heeft aannemer er baat bij aangezien hij steeds een overzicht heeft van de werken op de werf, het bouwproces beter kan managen en dergelijke. Voor een architect is het een meerwaarde om met BIM te werken want het maakt het voor de architect makkelijker om wijzigingen door te voeren aangezien binnen BIM alles aan elkaar is gelinkt. Een andere voordeel is dat architecten met 3D-modellen meer succes hebben op het aantrekken van klanten [11]. Voor de klant is het visuele aspect uiteraard ook een voordeel. Verder is het voor de klant steeds mogelijk om de extra kost op ieder tijdstip op te vragen, alhoewel dit praktisch nog geen sluitend verhaal is [12]. Een bijkomend voordeel voor alle betrokkenen is dat door het gebruik van BIM, het bouwproces sneller verloopt. Elke betrokken partij zal immers de benodigde informatie over het gebouw gemakkelijker en/of sneller terugvinden [10].

2.2.2 Hoe werkt het?

Binnen het centrale model wordt een bouwwerk rechtstreeks in 3D opgebouwd. Hierbij wordt alle relevante informatie aan het model gekoppeld. Het handige aan BIM is dat indien er nu wijzigingen gebeuren, alle gekoppelde gegevens zich automatisch mee aanpassen [8].

In BIM werkt men met objecten. Zo worden een muur en een vloer niet gevormd door lijnen, maar door het object 'wand' en het object 'vloer'. Alle bouwelementen worden dus gedefinieerd als objecten, die dan door het programma erkend worden als bouwdeel. Dit uitwisselingsformaat noemt men IFC (Industry Foundation Classes) [9].

2.2.3 Clashdetectie

Binnen het BIM-model bestaat er de mogelijkheid om een clashdetectie uit te voeren. Dit is een hulpmiddel dat toelaat om automatisch conflicten, onvolledigheden en incongruenties op te sporen. Dit kan binnen één model, maar ook tussen verschillende modellen. Zo kunnen plannen van leidingen letterlijk in structurele plannen worden gelegd, waarop dan een clashdetectie kan worden uitgevoerd. Indien nu op één plaats een leiding en een muur voorkomt geeft het programma dit dan ook aan als een conflict [8].

Deze clashdetectie gebeurt gewoonlijk op drie niveaus:

- **Geometrie:** hier wordt het model gecontroleerd op geometrische fouten. Dit kan gaan van foute aansluitingen van de bouwelementen tot het aligneren van verschillende modellen.
- **Informatie:** hier wordt er een controle uitgevoerd met betrekking op informatie. De meest voorkomende fout is de benaming van de elementen.
- **Regelgeving:** hier wordt er een controle gedaan of het ontwerp voldoet aan de normen en regelgeving. Zo kan er worden gecontroleerd of er genoeg nooduitgangen zijn, of het gebouw voldoende brandwerend is en dergelijke.

De meeste BIM-modellen bevatten een basispakket i.v.m. clashdetectie. Voor grondigere controles bestaat er andere software of kan men bij BIM-consultants terecht [8].

Doorheen het project is het van belang om regelmatig een clashdetectie uit te voeren. Hoe verder het project vordert, hoe gedetailleerder de clashdetectie is. Het zou echter weinig zin hebben om verschillende disciplinmodellen met elkaar te vergelijken zonder dat deze gecontroleerd zijn, of om in het begin van het project al een gedetailleerde controle te doen.

Ook is het belangrijk om te weten dat het resultaat van een clashdetectie kan oplopen tot in de duizenden meldingen. Hierbij zullen veel conflicten te maken hebben met incorrecte benamingen of het gebruiken van een verouderd model. Niet alle meldingen leiden dus effectief tot fouten. Tijdens het bouwproces is het belangrijk om goed in te schatten welke conflicten van belang zullen zijn [8].

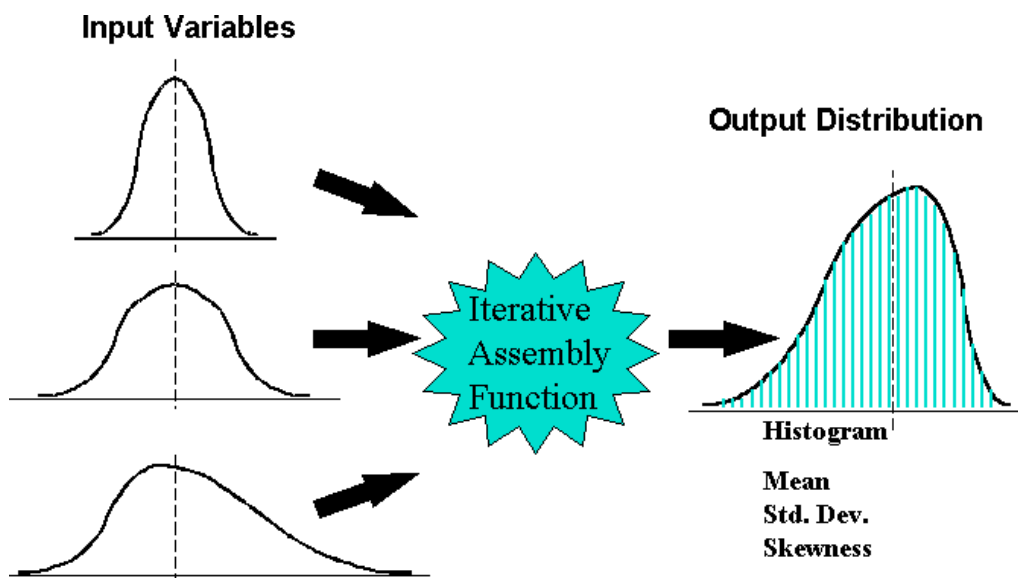
2.3 Monte-Carlosimulatie

In paragraaf 2.1.2 werd beschreven hoe toleranties kunnen worden gecombineerd met de methode van kwadratisch optellen. Bij de Monte-Carlosimulatie worden de verschillende toleranties op een andere manier gecombineerd. De bedoeling van de Monte-Carlosimulatie is om de toleranties te combineren, waarbij er aan de hand van een op voorhand bepaalde zekerheidspercentage de totale afwijking wordt bepaald. Om dit te kunnen verwezenlijken is er voldoende onderzoek hiernaar nodig.

De Monte-Carlosimulatie is een krachtig hulpmiddel voor statistische analyses en kent zeer uiteenlopende toepassingen, waar onzekerheden een belangrijke rol spelen. Deze toepassingen kunnen gaan van fysieke verschijnselen zoals atoombotsingen tot de simulatie van verkeersstromen. Monte-Carlosimulaties kunnen ook zeer geschikt zijn voor het oplossen van complexe ingenieursproblemen aangezien het kan omgaan met een groot aantal willekeurige variabelen [13], [14].

Concreet is de Monte-Carlosimulatie een techniek waarbij een proces vele malen wordt gesimuleerd met telkens met andere begincondities. Hierbij worden er verdelingen van invoervariabelen aan een programma meegegeven. Al deze invoervariabelen worden gekarakteriseerd door een nominale waarde met de bijhorende spreiding en kansverdeling. In het geval van deze masterproef zullen deze invoervariabelen de verschillende afwijkingen zijn die dienen te worden gecombineerd. In een eerste stap genereert de Monte-Carlosimulatie steekproeven van willekeurige variabelen. In elk experiment worden dus de mogelijke waarden van de ingevoerde variabelen $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ gegenereerd volgens hun verdeling. In stap 2 vindt de effectieve simulatie plaats en worden de waarden van de uitgangsvariabele Y berekend aan de hand van de functie $Y = g(x)$. Dit proces wordt op deze manier talrijke keren uitgevoerd totdat er voldoende uitgangsvariabelen Y beschikbaar zijn voor de statische analyse. Deze statische analyse is de laatste stap van het proces en hier worden er conclusies getrokken over de modeloutput. De conclusies die worden gevormd betreffen de vorm van de kansverdelingen, de maxima, de minima en het gemiddelde.

In deze masterproef zullen verschillende verdelingsfuncties van mogelijke afwijkingen als input worden meegegeven en de Monte-Carlosimulatie geeft dan als resultaat één verdelingsfunctie. Het resultaat omvat dan alle mogelijke afwijkingen na het combineren [13], [14]. Dit wordt visueel weergegeven in Figuur 2.4



Figuur 2.4: Visuele voorstelling van de werking van een Monte-Carlosimulatie [15]

3 Toleranties

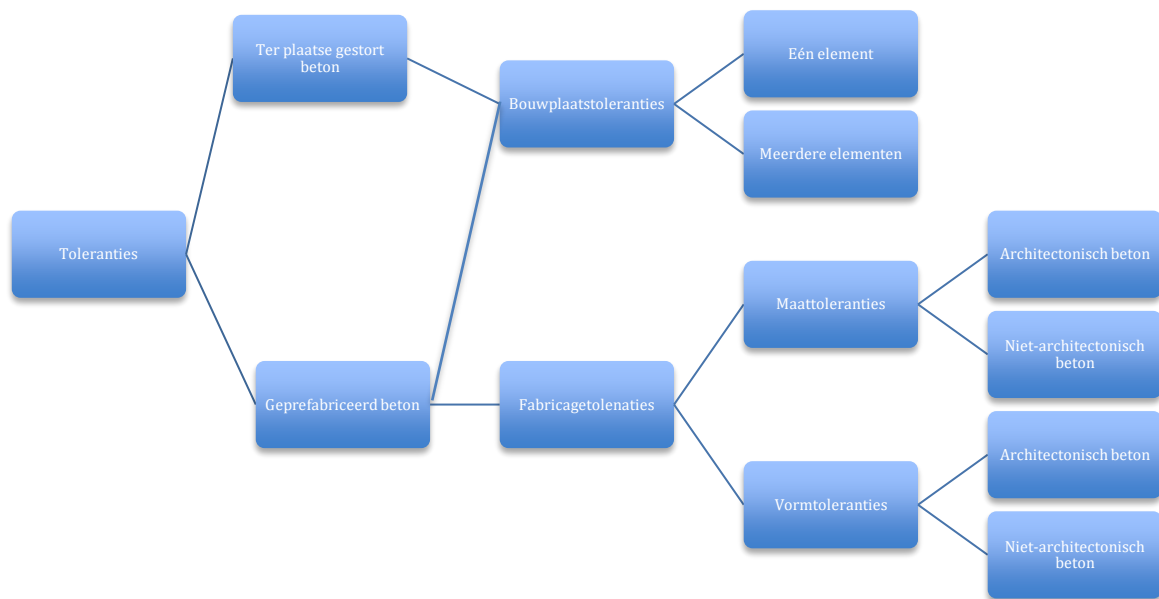
In Hoofdstuk 2 werd reeds uitgelegd wat toleranties zijn, waarom ze bestaan en waarvan ze afhankelijk zijn. In dit hoofdstuk worden alle nodige toleranties beschreven die van toepassing zijn op de bouwelementen, zodat ze in het verdere verloop van de masterproef gebruikt kunnen worden. Deze masterproef beperkt zich tot vier bouwelementen, namelijk een kolom, een wand, een balk en een vloer. De toleranties op deze bouwelementen zijn in grote lijnen gelijkaardig. De twee overige bouwelementen (trappen en funderingen) worden buiten beschouwing gelaten. De toleranties op deze bouwelementen worden in verschillende normen beschreven en zijn afhankelijk van het bouwelement, de manier van vervaardigen en de tolerantieklasse. De toleranties die bijvoorbeeld van toepassing zijn op een geprefabriceerde architectonische kolom worden in een andere norm beschreven dan de toleranties op een ter plaatse gestorte balk.

Eerst worden alle nodige toleranties verzameld uit de verschillende normen. Vervolgens worden de toleranties per bouwelement onderverdeeld in verschillende groepen. Er wordt in de eerste plaats een onderscheid gemaakt tussen geprefabriceerd en ter plaatse gestort beton. In beide gevallen zijn hier de bouwplaatstoleranties geldig. Zo zal de positie van een kolom zowel van belang zijn voor geprefabriceerd als ter plaatse gestort beton. Voor geprefabriceerd beton gelden er ook nog fabricagetoleranties. Fabricagetoleranties zijn, zoals het woord al laat blijken, de toleranties die van toepassing zijn op afwijkingen die voortkomen uit het fabricageproces. Een fabricagetolerantie is bijvoorbeeld de tolerantie op de lengte van een balk.

Verder worden zowel de fabricage- als bouwplaatstoleranties onderverdeeld in deelgroepen. Enerzijds worden de fabricagetoleranties onderverdeeld in maat- en vormtoleranties. Maattoleranties zijn de toelaatbare afwijkingen op de nominale afmetingen van een bouwelement. Ze begrenzen dus de toegestane afwijking van de afmeting. Een maattolerantie is bijvoorbeeld de tolerantie op de hoogte van een kolom. Vormtoleranties daarentegen hebben betrekking op de vorm van het bouwelement. Ze begrenzen de toegestane afwijking van de vorm van het bouwelement. Een vormtolerantie is bijvoorbeeld de toegestane afwijking van de vlakheid van een hoofdvlak van een balk.

Anderzijds worden de bouwplaatstoleranties onderverdeeld in toleranties die van toepassing zijn bij de plaatsing van één element en de toleranties die van toepassing zijn bij de plaatsing van meerdere elementen. In het tweede geval gaat het over de toleranties op de onderlinge positie van de bouwelementen.

De maat- en vormtoleranties gelden enkel voor een geprefabriceerd bouwelement. Geprefabriceerde elementen moeten aan een bepaald aantal toleranties voldoen. Wanneer het gaat om geprefabriceerd architectonisch beton, dan zijn er strengere en bijkomende toleranties. Ter plaatse gestorte bouwelementen delen een aantal toleranties met geprefabriceerde elementen. Bovendien kennen ze extra toleranties die betrekking hebben op ingestorte stukken, openingen en uitstekende elementen. De bouwplaatstoleranties zijn dezelfde voor zowel bouwelementen uit geprefabriceerd beton als ter plaatse gestorte elementen. Figuur 3.1 toont een overzicht over de onderverdeling van de toleranties.

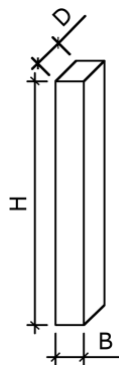


Figuur 3.1: Overzicht van de toleranties

In de werkelijkheid is er ook een afwijking bij het opmeten van verschillende waarden. Deze meetfouten worden buiten beschouwing gelaten.

3.1 Kolom

In dit deel worden enkel de toleranties op een kolom uitgelegd, die van belang zijn in het verdere verloop van de masterproef. Alle overige toleranties op een kolom worden in wat volgt wel opgelijst. Eerst gebeurt dit voor de fabricagetoleranties, daarna voor de bouwplaatstoleranties. Er wordt een kolom behandeld met hoogte H , breedte B en diepte D , zoals weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2: Naamgeving lengtematen van de kolom

In Tabel 3.1, Tabel 3.2 en Tabel 3.4 worden respectievelijk alle maat-, vorm- en bouwplaatstoleranties weergegeven die van toepassing zijn op geprefabriceerde en ter plaatse gestorte kolommen. Tabel 3.1 en Tabel 3.2 spreken over zowel fabricagetoleranties (maat en vorm) als bouwplaatstoleranties. De fabricagetoleranties hebben enkel betrekking op geprefabriceerde betonelementen terwijl de bouwplaatstoleranties betrekking hebben op ter plaatse gestorte betonelementen en in sommige gevallen ook op geprefabriceerde betonelementen. De norm NBN EN 13670, die betrekking heeft op ter plaatse gestort en geprefabriceerd beton, vermeldt expliciet dat bijvoorbeeld de tolerantie op de

dwarsafmeting van een kolom, zoals in die norm beschreven, enkel geldig is voor ter plaatse gestort beton. Voor geprefabriceerd beton wordt deze tolerantie dan in een andere norm beschreven.

De tolerantie op de dwarsafmeting van geprefabriceerde betonelementen wordt een fabricagetolerantie genoemd, terwijl die zelfde tolerantie voor ter plaatse gestorte betonelementen een bouwplaatstolerantie wordt genoemd. Voor ter plaatse gestort beton spreekt men niet over fabricagetoleranties aangezien deze elementen op de bouwplaats zelf worden vervaardigd.

In de groep geprefabriceerd beton wordt er onderscheid gemaakt tussen niet-architectonisch en architectonisch beton. Alle toleranties die gelden voor niet-architectonisch beton gelden ook voor architectonisch beton. Echter worden er voor de meeste toleranties strengere waarden voorgeschreven. Daarnaast zijn er ook bijkomende toleranties voor architectonisch beton. De fabricagetoleranties op kolommen worden in de volgende normen en technische voorschriften beschreven:

- NBN EN 13369: Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten;
- NBN EN 13225: Geprefabriceerde betonproducten - Lijnvormige dragende elementen;
- PTV 21-601: Geprefabriceerde architectonische en industriële elementen van sierbeton;
- NBN EN 13670: Uitvoering van betonconstructies.

Een deel van de bouwplaatstoleranties wordt gegeven in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. De overige bouwplaatstoleranties worden onderverdeeld in de toleranties met betrekking tot de plaatsing van één kolom enerzijds en de toleranties met betrekking tot de plaatsing van meerdere kolommen anderzijds. Verder bestaan er twee tolerantieklassen die de waarde van de tolerantie bepalen. Tolerantieklasse 1 wordt opgenomen in de Europese normering. In de nationale aanvulling op de Europese norm wordt tolerantieklasse 2 gedefinieerd. Tolerantieklasse 2 legt strengere waarden op en wordt doorgaans gebruikt in België.

De bouwplaatstoleranties zijn niet afhankelijk van het soort beton. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen geprefabriceerd en ter plaatse gestort beton, met uitzondering van de toleranties op de onderlinge positie tussen kolommen waarbij geprefabriceerde kolommen steeds aan tolerantieklasse 2 moeten voldoen. In Tabel 3.3 worden alle bouwplaatstoleranties die van toepassing zijn op ter plaatse gestorte en geprefabriceerde kolommen opgelijst. De bouwplaatstoleranties op kolommen worden in de volgende normen beschreven:

- NBN EN 13670: Uitvoering van betonconstructies;
- NBN B 15-400: Uitvoering van betonconstructies - Nationale aanvulling bij NBN EN 13670.

Tabel 3.1: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een kolom

Maattoleranties / bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet-architectonisch beton	Architectonisch beton	
Dwarsafmeting	X	X	X
Hoogte	X	X	N.v.t.
Diagonaal	N.v.t.	X	N.v.t.
Afmetingen van uitsparingen en openingen	X	X	X
Positie van uitsparingen en openingen	X	X	X

Maatafwijking positie enkelvoudige voorzieningen	X	X	X
Maatafwijking onderlinge posities enkelvoudige voorzieningen in groep	X	X	X
Maatafwijking uitsteken van enkelvoudige voorzieningen	X	X	X

Tabel 3.2: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een kolom

Vormtoleranties / bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet-architectonisch beton	Architectonisch beton	
Hoekverdraaiing einddoorsnede	X	X	X
Hoekverdraaiing dwarsdoorsnede			X
Afwijking van de vlakheid in een willekeurig hoofdvlak	X	X	N.v.t.
Scheluwte	N.v.t.	X	N.v.t.
Loodrechtheid	N.v.t.	X	N.v.t.
Rechtheid van de randen	X	X	X
Rechtheid van een bekist vlak	X	X	X
Rechtheid van een afgestreken vlak	X	X	X
Scheefstand uitstekende staaf	X	X	X

Tabel 3.3: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een kolom

Bouwplaatstoleranties	
Positie en plaatsing van één kolom	Positie en plaatsing van meerdere kolommen
Horizontale afstand tot een secundaire as	Afstand tussen kolommen
Verticaliteit 1 verdieping	Afwijking tussen aslijnen
Verticaliteit n verdiepingen	
Kromming	

De toleranties die nog worden gebruikt in het verdere verloop van de masterproef worden in het vetgedrukt weergegeven in bovenstaande tabellen en worden besproken.

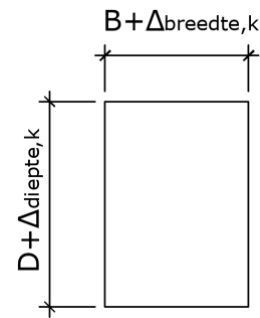
3.1.1 Dwarsafmetingen

In de nomen NBN EN 13369 en NBN EN 13670 worden de toleranties voor respectievelijk geprefabriceerd niet-architectonisch beton (GNA-beton) en ter plaatse gestort beton (TGP-beton) gedefinieerd voor drie verschillende dwarsafmetingen van een kolom waarbij tussenliggende waarden geïnterpoleerd dienen te worden. De toleranties, zoals beschreven in de norm, worden respectievelijk voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton en ter plaatse gestort beton weergegeven in Tabel 3.4 en Tabel 3.5 en getoond in Figuur 3.3.

Voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton wordt er een onderscheid gemaakt tussen de toegestane afwijking naar boven en de toegestane afwijking naar onder. Voor ter plaatse gestort beton is de tolerantie op de dwarsafmetingen afhankelijk van de tolerantieklasse.

Tabel 3.4: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{diepte,k}}$, $\Delta_{\text{breedte,k}}$ GNA-beton (mm)	
$D \leq 150$ mm	+10	-5
$D = 400$ mm	+15	-10
$D \geq 2500$ mm	+30	-30



Figuur 3.3: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom

Tabel 3.5: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor ter plaatse gestort beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{diepte,k}}$, $\Delta_{\text{breedte,k}}$ TPG-beton (mm)	
	Tolerantieklasse 1	Tolerantieklasse 2
$D \leq 150$ mm	± 10	± 5
$D = 400$ mm	± 15	± 10
$D \geq 2500$ mm	± 30	± 30

Om in het verdere verloop van de masterproef de toleranties op de dwarsafmetingen eenvoudig te berekenen, worden de toleranties uit Tabel 3.4 en Tabel 3.5 herschreven als formules door middel van interpolatie. Als voorbeeld wordt de formule bepaald voor de toegestane afwijking naar onder voor een geprefabriceerde niet-architectonische kolom wanneer de dwarsafmeting groter is dan 150 mm en kleiner is dan 400 mm.

$$\Delta D = -5 + (D - 150) \cdot \left(\frac{-10 - (-5)}{400 - 150} \right)$$

$$\Delta D = -\frac{D + 100}{50}$$

Met ΔD de toelaatbare afwijking, na eventuele afronding, in millimeter naar onder op de dwarsafmeting en D de dwarsafmeting van de kolom in millimeter. De formules voor de overige mogelijkheden worden op analoge wijze bepaald. De toleranties, na herformulering, worden respectievelijk voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton en ter plaatse gestort beton weergegeven in Tabel 3.6 en Tabel 3.7.

Tabel 3.6: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{diepte,k}}$, $\Delta_{\text{breedte,k}}$ GNA-beton (mm)	
$D \leq 150$ mm	+10	-5
$150 \text{ mm} < D \leq 400$ mm	$+\frac{D + 350}{50}$	$-\frac{D + 100}{50}$
$400 \text{ mm} < D \leq 2500$ mm	$+\frac{D + 1700}{140}$	$-\frac{D + 650}{105}$
$D > 2500$ mm	+30	-30

Tabel 3.7: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor ter plaatse gestort beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{diepte,k}}$, $\Delta_{\text{breedte,k}}$ TPG-beton(mm)	
	Tolerantieklasse 1	Tolerantieklasse 2
$D \leq 150$ mm	± 10	± 5
$150 \text{ mm} < D \leq 400$ mm	$\pm \frac{D + 350}{50}$	$\pm \frac{D + 100}{50}$
$400 \text{ mm} < D \leq 2500$ mm	$\pm \frac{D + 1700}{140}$	$\pm \frac{D + 650}{105}$
$D > 2500$ mm	± 30	± 30

De tolerantie op de dwarsafmeting voor geprefabriceerd architectonisch beton (GA-beton) heeft een vaste waarde zoals beschreven in PTV 21-601. Deze worden weergegeven in Tabel 3.8.

Tabel 3.8: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd architectonisch beton

Tolerantie $\Delta_{\text{diepte,k}}$, $\Delta_{\text{breedte,k}}$ GA-beton (mm)	
+3	-3

3.1.2 Hoogte

De tolerantie op de hoogte $\Delta_{\text{hoogte,k}}$ wordt voor geprefabriceerd beton weergegeven in Tabel 3.9. Voor een kolom uit ter plaatse gestort beton bestaat er geen tolerantie op de hoogte. Figuur 3.4 toont deze tolerantie.

Tabel 3.9: Tolerantie op de hoogte van een kolom voor geprefabriceerd beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{hoogte,k}}$ GNA-beton (mm)
	Tolerantie $\Delta_{\text{hoogte,k}}$ GA-beton (mm)
$H \leq 1$ m	± 3
$1 \text{ m} < H \leq 5$ m	± 4
$H > 5$ m	± 6



Figuur 3.4: Tolerantie op de hoogte van een kolom

3.1.3 Hoekverdraaiing van eind- en dwarsdoorsneden

Voor geprefabriceerd beton is de tolerantie op de hoekverdraaiing van eind- en dwarsdoorsneden $\Delta_{\text{hoek,k}}$ gelijk. Voor ter plaatse gestort beton wordt deze tolerantie opgesplitst en heeft een verschillende waarde voor einddoorsneden en dwarsdoorsneden. De tolerantie op de hoekverdraaiing voor geprefabriceerd en ter plaatse gestort beton wordt respectievelijk weergegeven in Tabel 3.10 en Tabel 3.11.

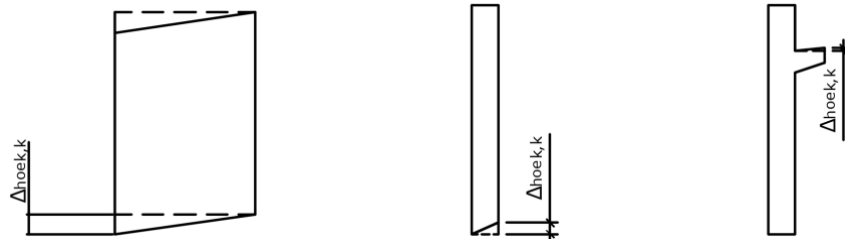
Tabel 3.10: Tolerantie op de hoekverdraaiing van eind- en dwarsdoorsneden van een kolom voor geprefabriceerd beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{hoek,k}}$ GNA-, en GA-beton (mm)
Eind- en dwarsdoorsneden	$\pm \frac{D}{100} > 5$
Oplegvlak	± 6

Tabel 3.11: Tolerantie op de hoekverdraaiing van eind- en dwarsdoorsneden van een kolom voor ter plaatse gestort beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{hoek,k}}$ TPG-beton (mm)
Einddoorsneden	$\pm 0,04 \cdot D < \pm 30$
Dwarsdoorsneden	$\pm 10 \leq \pm 0,04 \cdot D \leq \pm 20$

Figuur 3.5 toont van links naar rechts respectievelijk de hoekverdraaiing van een dwarsdoorsnede (bovenaanzicht), een einddoorsnede (vooraanzicht) en een oplegvlak van een kolom.



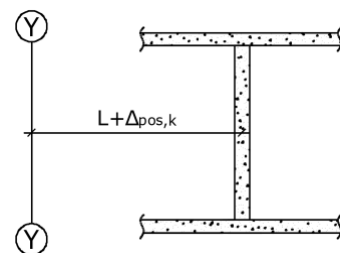
Figuur 3.5: Tolerantie op de hoekverdraaiing van een dwars- en einddoorsnede en een oplegvlak van een kolom

3.1.4 Horizontale afstand tot een secundaire as

De tolerantie op de horizontale afstand tot een secundaire as wordt weergegeven in Tabel 3.12 en Figuur 3.6. Deze tolerantie wordt ook de tolerantie op de positie $\Delta_{\text{pos,k}}$ genoemd.

Tabel 3.12: Tolerantie op de horizontale afstand van een kolom tot een secundaire as

	Tolerantie $\Delta_{\text{pos,k}}$ G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 1	± 25
Tolerantieklasse 2	± 10



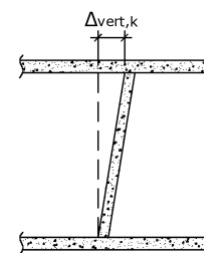
Figuur 3.6: Tolerantie op de horizontale afstand van een kolom tot een secundaire as

3.1.5 Verticaliteit 1 verdieping

De tolerantie op de verticaliteit van één verdieping $\Delta_{\text{vert,k}}$ wordt weergegeven in Tabel 3.13 en getoond in Figuur 3.7. De tolerantie is afhankelijk van de hoogte H van de kolom.

Tabel 3.13: Tolerantie op de verticaliteit van één verdieping voor een kolom

	Tolerantie $\Delta_{\text{vert,k}}$ G- en TPG-beton (mm)	
Tolerantieklasse 1	$H \leq 10\text{m}$	$\pm \frac{H}{400} \geq 15$
	$H > 10\text{m}$	$\pm \frac{H}{600} \geq 25$
Tolerantieklasse 2	$\pm \frac{5}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{H}{10}}$	



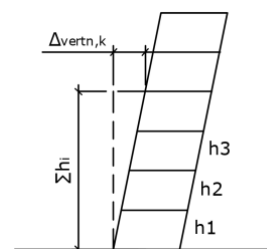
Figuur 3.7: Tolerantie op de verticaliteit van één verdieping voor een kolom

3.1.6 Verticaliteit n verdiepingen

De tolerantie op de verticaliteit van meerdere verdiepingen $\Delta_{\text{vertn,k}}$ wordt weergegeven in Tabel 3.14 en getoond in Figuur 3.8. Deze tolerantie is afhankelijk van de verdiepingshoogte H en het aantal verdiepingen n .

Tabel 3.14: Tolerantie op de verticaliteit van n verdiepingen voor een kolom

	Tolerantie $\Delta_{\text{vertn,k}}$ G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 1	$\pm \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{200 \cdot \sqrt{n}} \leq 50$
Tolerantieklasse 2	$\pm 2 \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i}{1000}\right)^2} + 25 \leq 50$



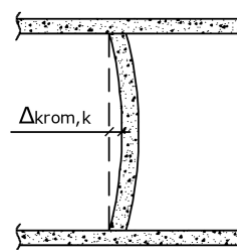
Figuur 3.8: Tolerantie op de verticaliteit van n verdiepingen voor een kolom

3.1.7 Kromming

De tolerantie op de kromming van een kolom $\Delta_{\text{krom,k}}$ wordt weergegeven in Tabel 3.15 en getoond in Figuur 3.9.

Tabel 3.15: Tolerantie op de kromming van een kolom

	Tolerantie $\Delta_{\text{krom,k}}$ G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 1	$\pm 15 \leq \frac{H}{300} \leq 30$
Tolerantieklasse 2	$\pm 10 \leq \frac{H}{1000} \leq 20$



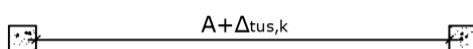
Figuur 3.9: Tolerantie op de kromming van een kolom

3.1.8 Afstand tussen kolommen

De tolerantie op de afstand tussen kolommen $\Delta_{\text{tus,k}}$ wordt weergegeven in Tabel 3.16 en getoond in Figuur 3.10. Het betreft de horizontale afstand tussen de kolommen, gemeten vanaf het betonoppervlakte. De waarde volgens tolerantieklasse 1 is afhankelijk van de tussenafstand A tussen de kolommen. Tolerantieklasse 2 kent een vaste waarde. Geprefabriceerd beton moet steeds voldoen aan de waarde van tolerantieklasse 2.

Tabel 3.16: Tolerantie op de afstand tussen kolommen

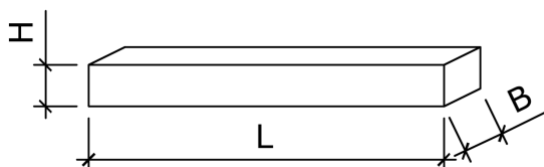
	Tolerantie $\Delta_{\text{tus,k}}$ G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 1	$\pm 20 \leq \frac{A}{600} \leq 60$
Tolerantieklasse 2 + Geprefabriceerd beton	± 15



Figuur 3.10: Tolerantie op de afstand tussen kolommen

3.2 Balk

De toleranties op een balk zijn zeer gelijkaardig aan de toleranties op een kolom. Om deze reden worden de toleranties die reeds beschreven zijn bij een kolom niet opnieuw behandeld. Alle mogelijke toleranties op een balk worden in wat volgt wel opgelijst. Eerst gebeurt dit voor de fabricagetoleranties, daarna voor de bouwplaatstoleranties. Er wordt een balk behandeld met breedte B , hoogte H en lengte L , zoals weergegeven in Figuur 3.11



Figuur 3.11: Naamgeving lengtematen van de balk

In Tabel 3.17, Tabel 3.18 en Tabel 3.19 worden respectievelijk alle maat-, vorm- en bouwplaatstoleranties weergegeven die van toepassing zijn op geprefabriceerde en ter plaatse gestorte balken. De tabellen kunnen op dezelfde manier worden geïnterpreteerd als bij kolommen. De toleranties die nog van belang zijn in de volgende hoofdstukken worden vetgedrukt weergegeven, waarna ze worden besproken.

De fabricagetoleranties en bouwplaatstoleranties op balken worden in de volgende normen en technische voorschriften beschreven:

- NBN EN 13369: Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten;
- NBN EN 13225: Geprefabriceerde betonproducten - Lijnvormige dragende elementen;
- PTV 21-601: Geprefabriceerde architectonische en industriële elementen van sierbeton;
- NBN EN 13670: Uitvoering van betonconstructies;
- NBN B 15-400: Uitvoering van betonconstructies - Nationale aanvulling bij NBN EN 13670.

Tabel 3.17: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een balk

Maattoleranties / Bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet- architectonisch beton	Architectonisch beton	
Dwarsafmetingen	X	X	X
Lengte	X	X	N.v.t.
Diagonaal	N.v.t.	X	N.v.t.
Afmetingen van uitsparingen en openingen	X	X	X
Positie van uitsparingen en openingen	X	X	X
Maatafwijking positie enkelvoudige voorzieningen	X	X	X
Maatafwijking onderlinge posities enkelvoudige voorzieningen in groep	X	X	X
Maatafwijking uitsteken van enkelvoudige voorzieningen	X	X	X

Tabel 3.18: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een balk

Vormtoleranties / Bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet- architectonisch beton	Architectonisch beton	
Hoekverdraaiing einddoorsnede	X	X	X
Hoekverdraaiing dwarsdoorsnede			X
Afwijking van de vlakheid in een willekeurig hoofdvlak	X	X	N.v.t.
Zeeg in het verticaal vlak	X	X	N.v.t.
Scheefheid van het verticaal symmetrievlak	X	X	N.v.t.
Scheluwte	N.v.t.	X	N.v.t.
Loodrechtheid	N.v.t.	X	N.v.t.
Rechtheid van de randen	X	X	X
Rechtheid van een bekist vlak	X	X	X
Rechtheid van een afgestreken vlak	X	X	X
Scheefstand uitstekende staaf	X	X	X

Tabel 3.19: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een balk

Bouwplaatstoleranties	
Positie en plaatsing van één balk	Positie en plaatsing van meerdere balken
Positie balk/kolomverbinding relatief aan de kolom	Hart-op-hartafstand tussen balken
	Niveaoverschil tussen naburige balken
Positie middellijn oplegging	Afstand tussen twee niveaus van opeenvolgende verdiepingen ter hoogte van de steunen
Kromming in het horizontaal vlak	Niveau balk van de bovenste verdieping ten opzichte van een lokaal referentiepeil
Inclinatie tussen de uiteinden van een balk	

Voor bouwplaatstoleranties bestaan er bij balken, net zoals voor kolommen, twee tolerantieclassen. Sommige toleranties worden enkel vermeld voor tolerantieklasse 1. Tolerantieklasse 2 is steeds strenger dan tolerantieklasse 1 en deze toleranties zijn hier dan dus automatisch ook op geldig.

3.2.1 Dwarsafmetingen

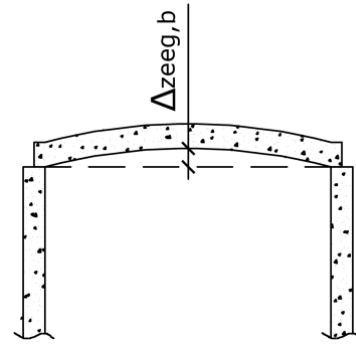
Deze tolerantie is voor een balk hetzelfde als voor een kolom. Hiervoor wordt er dus verwezen naar paragraaf 3.1.1.

3.2.2 Zeeg in het verticaal vlak

De tolerantie op de zeeg van een balk $\Delta_{zeeg,b}$ is enkel van toepassing op geprefabriceerd beton. Deze wordt weergegeven in Tabel 3.20 en getoond in Figuur 3.12.

Tabel 3.20: Tolerantie op de zeeg van een balk voor geprefabriceerd beton

	Tolerantie $\Delta_{zeeg,b}$ G-beton (mm)
GB, OB	$\pm \frac{L}{700}$
VB	$\pm 1,5 \frac{L}{700}$



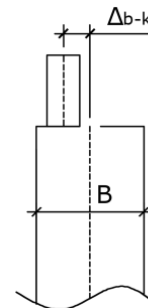
Figuur 3.12: Tolerantie op de zeeg van een balk

3.2.3 Positie balk/kolomverbinding relatief aan de kolom

De tolerantie op positie van een balk/kolomverbinding Δ_{b-k} zoals gemeten ten opzichte van de kolom wordt weergegeven in Tabel 3.21 en Figuur 3.13. Deze tolerantie is afhankelijk van de breedte B van de kolom.

Tabel 3.21: Tolerantie op de positie van een balk/kolomverbinding relatief aan de kolom

	Tolerantie Δ_{b-k} G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 1	$\pm \frac{B}{30} \geq 20$



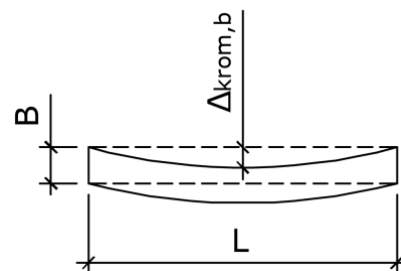
Figuur 3.13: Tolerantie op de positie van een balk/kolomverbinding relatief aan de kolom

3.2.4 Kromming in het horizontaal vlak

De tolerantie op de kromming in het horizontaal vlak $\Delta_{krom,b}$ wordt weergegeven in Tabel 3.22 en getoond in Figuur 3.14. Deze tolerantie is afhankelijk van de lengte L van de balk.

Tabel 3.22: Tolerantie op de kromming van een balk in het horizontaal vlak

	Tolerantie $\Delta_{krom,b}$ G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 1	$\pm \frac{L}{600} \geq 20$



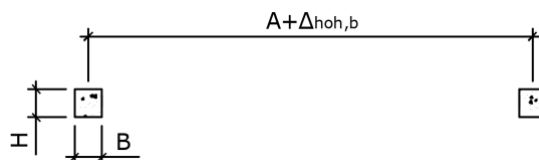
Figuur 3.14: Tolerantie op de kromming van een balk in het horizontaal vlak

3.2.5 Hart-op-hartafstand tussen balken

De tolerantie op de hart-op-hartafstand $\Delta_{\text{hoh,b}}$ wordt weergegeven in Tabel 3.23 en getoond in Figuur 3.15. Het betreft de horizontale afstand tussen de balken, gemeten vanaf het middelpunt. De waarde volgens tolerantieklasse 1 is afhankelijk van de tussenafstand A tussen de balken. Tolerantieklasse 2 kent een vaste waarde. Geprefabriceerd beton moet steeds voldoen aan de waarde van tolerantieklasse 2.

Tabel 3.23: Tolerantie op de hart-op-hartafstand tussen balken

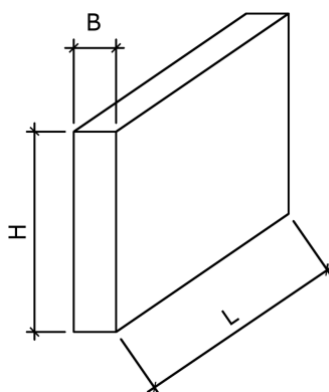
	Tolerantie $\Delta_{\text{hoh,b}}$ G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 1	$\pm 20 \leq \frac{A}{600} \leq 40$
Tolerantieklasse 2 (+prefab)	± 15



Figuur 3.15: Tolerantie op de hart-op-hartafstand tussen balken

3.3 Wand

In dit deel worden enkel de toleranties op een wand besproken, die nog belang hebben in het verdere verloop van de masterproef. Alle overige toleranties op een wand worden in wat volgt wel opgelijst. Er wordt een wand beschouwd met een lengte L , een breedte B en een hoogte H . Dit wordt weergegeven Figuur 3.16.



Figuur 3.16: Naamgeving lengtematen van de wand

In Tabel 3.24, Tabel 3.25 en Tabel 3.26 worden respectievelijk alle maat-, vorm- en bouwplaatstoleranties weergegeven die van toepassing zijn op geprefabriceerde en ter plaatse gestorte wanden. De tabellen kunnen op dezelfde manier worden geïnterpreteerd als bij kolommen. De tolerantie die nog van belang is in de volgende hoofdstukken wordt vetgedrukt weergegeven, waarna deze wordt uitgeschreven. De fabricage- en bouwplaatstoleranties op wanden worden in de volgende normen en technische voorschriften beschreven:

- NBN EN 13369: Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten;
- PTV 21-601: Geprefabriceerde architectonische en industriële elementen van sierbeton;
- NBN EN 14992: Geprefabriceerde betonproducten - Wandelementen;
- NBN EN 13670: Uitvoering van betonconstructies;
- NBN B 15-400: Uitvoering van betonconstructies - Nationale aanvulling bij NBN EN 13670.

Tabel 3.24: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een wand

Maattoleranties / Bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet-architectonisch beton	Architectonisch beton	
Dwarsafmeting	X	X	X
Hoogte	X	X	N.v.t.
Diagonaal	X	X	N.v.t.
Iedere lineaire afmeting	N.v.t.	N.v.t.	X
Afmetingen van uitsparingen en openingen	X	X	X
Positie van uitsparingen en openingen	X	X	X
Maatafwijking positie enkelvoudige voorzieningen	X	X	X
Maatafwijking onderlinge posities enkelvoudige voorzieningen in groep	X	X	X
Maatafwijking uitsteken van enkelvoudige voorzieningen	X	X	X

Tabel 3.25: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een wand

Vormtoleranties / Bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet-architectonisch beton	Architectonisch beton	
Hoekverdraaiing einddoorsnede	X	X	X
Hoekverdraaiing dwarsdoorsnede	X		X
Afwijking van de vlakheid in een willekeurig hoofdvlak	X	X	/
Schelluwte	/	X	/
Rechtheid van de randen	X	X	X
Rechtheid van een bekist vlak	X	X	X
Rechtheid van een afgestreken vlak	X	X	X
Scheefstand uitstekende staaf	X	X	X

Tabel 3.26: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een wand

Bouwplaatstoleranties	
Positie en plaatsing van één wand	Positie en plaatsing van meerdere wanden
Horizontale afstand tot een secundaire as	Afstand tussen wanden
Verticaliteit 1 verdieping	Afwijking tussen aslijnen
Verticaliteit n verdiepingen	
Kromming	

3.3.1 Dwarsafmetingen

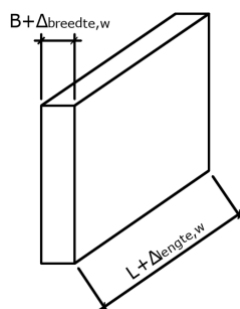
De tolerantie op de dwarsafmetingen van wanden is identiek aan deze op kolommen. Hiervoor wordt er dus verwezen naar paragraaf 3.1.1. Voor de tolerantie op de dwarsafmetingen van wanden uit geprefabriceerd beton is er echter een bijkomende norm, namelijk de NBN EN 14992. Volgens deze norm kent de tolerantie op de dwarsafmetingen andere, steeds strengere waarden. Afhankelijk van de te hanteren norm kent de tolerantie op de dwarsafmetingen voor geprefabriceerd beton dus twee verschillende waarden.

De norm NBN EN 14992 maakt ook een onderscheid tussen normale en kleinere panelen. Kleinere panelen zijn panelen die ongewapend zijn en een maximumoppervlakte van 2,25 m² hebben met een maximumlengte van 1,5 m en een dikte kleiner dan 80 mm.

De toleranties op geprefabriceerd niet-architectonisch beton, volgens de norm NBN EN 14992, wordt weergegeven in Tabel 3.27 en getoond in Figuur 3.17

Tabel 3.27: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een wand voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton volgens de norm NBN EN 14992

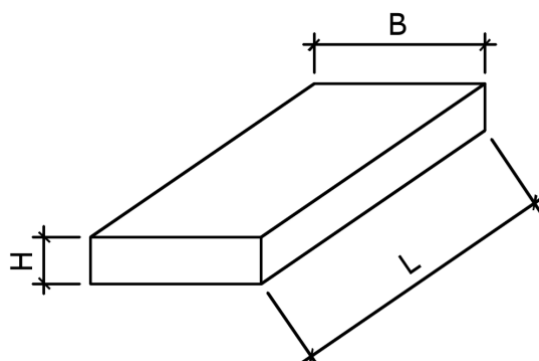
	Tolerantie $\Delta_{\text{lengte,w}}$, $\Delta_{\text{breedte,w}}$ GNA-beton (mm)		
	Tolerantieklasse A	Tolerantieklasse B	Voor kleinere panelen
$0 \text{ mm} \leq D \leq 500 \text{ mm}$	± 3	± 8	± 5
$500 \text{ mm} < D \leq 3000 \text{ mm}$	± 5	± 14	± 7
$3000 \text{ mm} < D \leq 6000 \text{ mm}$	± 6	± 16	N.v.t.
$6000 \text{ mm} < D \leq 10000 \text{ mm}$	± 8	± 18	N.v.t.
$D > 10000 \text{ mm}$	± 10	± 20	N.v.t.



Figuur 3.17: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een wand

3.4 Vloerplaat

In dit deel worden enkel de toleranties op een vloerplaat uitgelegd, die belang hebben in het verdere verloop van de masterproof. Alle overige toleranties op een vloerplaat worden in wat volgt wel opgelijst. Er wordt een vloerplaat beschouwd met hoogte H , breedte B en lengte L (Figuur 3.18).



Figuur 3.18: naamgeving lengtematen van de vloerplaat

In Tabel 3.28, Tabel 3.29 en Tabel 3.30 worden respectievelijk alle maat-, vorm- en bouwplaatstoleranties weergegeven die van toepassing zijn op geprefabriceerde en ter plaatse gestorte vloerplaten. De tabellen kunnen op dezelfde manier worden geïnterpreteerd als bij kolommen. De tolerantie die nog belang zal hebben in volgende hoofdstukken wordt vetgedrukt weergegeven, waarna deze wordt uitgeschreven. De fabricage- en bouwplaatstoleranties op vloerplaten worden in de volgende normen en technische voorschriften beschreven;

- NBN EN 13369: Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten;
- NBN EN 13747 + A2: Geprefabriceerde betonproducten - Breedplaten voor vloersystemen;
- PTV 21-601: Geprefabriceerde architectonische en industriële elementen van sierbeton;
- NBN EN 13224: Geprefabriceerde betonproducten - Geribde vloerelementen;
- NBN EN 1168 + A3: Geprefabriceerde betonproducten - Holle vloerplaten;
- NBN EN 13670: Uitvoering van betonconstructies;
- NBN B15-400: Uitvoering van betonconstructies - Nationale aanvulling bij NBN EN 13670.

Tabel 3.28: In de norm vermelde maat- en bouwplaatstoleranties op een vloerplaat

Maattoleranties / Bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet- architectonisch beton	Architectonisch beton	
Dwarsafmeting	X	X	N.v.t.
Lengte	X	X	N.v.t.
Afmetingen van uitsparingen en openingen	X	X	X
Positie van uitsparingen en openingen	X	X	X
Maatafwijking positie enkelvoudige voorzieningen	X	X	X
Maatafwijking onderlinge posities enkelvoudige voorzieningen in groep	X	X	X
Maatafwijking uitsteken van enkelvoudige voorzieningen	X	X	X

Tabel 3.29: In de norm vermelde vorm- en bouwplaatstoleranties op een vloerplaat

Vormtoleranties / Bouwplaatstoleranties	Geprefabriceerd beton		Ter plaatse gestort beton
	Niet- architectonisch beton	Architectonisch beton	
Hoekverdraaiing einddoorsnede	X	X	X
Hoekverdraaiing dwarsdoorsnede			X
Afwijking van de vlakheid in een willekeurig hoofdvlak	X	X	/
Langse uitbuiging	X	X	/
Rechtheid van de randen	X	X	X
Rechtheid van een bekist vlak	X	X	X
Rechtheid van een afgestreken vlak	X	X	X
Scheefstand uitstekende staaf	X	X	X

Tabel 3.30: In de norm vermelde bouwplaatstoleranties op een vloerplaat

Bouwplaatstoleranties	
Positie en plaatsing van één vloerplaat	Positie en plaatsing van meerdere vloerplaten
Positie van een vloer/kolomverbinding relatief aan de kolom	Niveaunderschil tussen aan elkaar grenzende vloerplaten
Positie middellijn oplegging	Afstand tussen twee niveaus
Inclinatie tussen de uiteinden van een vloerplaat	Niveau vloerplaat van de bovenste verdieping ten opzichte van een lokaal referentiepeil

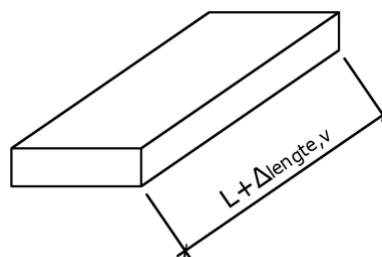
3.4.1 Lengte

De tolerantie op de lengte van een vloerplaat $\Delta_{\text{lengte},v}$ (Figuur 3.19) uit geprefabriceerd beton kent drie verschillende waarden, afhankelijk van de te hanteren norm. Volgens de norm NBN EN 13369 is de tolerantie identiek aan deze op kolommen, balken en wanden. Hiervoor wordt er verwezen naar paragraaf 3.1.2. Volgens de norm NBN EN 13747 + A2 kent de tolerantie op de lengte andere waarden (Tabel 3.31). Daarnaast bestaat er ook een aparte norm voor holle vloerplaten, namelijk NBN EN 1168 + A3. De tolerantie zoals hier beschreven wordt weergegeven in Tabel 3.32.

Voor een vloerplaat uit ter plaatse gestort beton bestaat er geen tolerantie op lengte.

Tabel 3.31: Tolerantie op de lengte van een vloerplaat voor geprefabriceerd beton volgens de norm NBN EN 13747 + A2

Tolerantie $\Delta_{\text{lengte},v}$ G-beton (mm)
± 20



Tabel 3.32: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een holle vloerplaat voor geprefabriceerd beton volgens de norm NBN EN 1168 + A3

Tolerantie $\Delta_{\text{lengte},v}$ G-beton (mm)
± 25

Figuur 3.19: Tolerantie op de lengte van een vloerplaat

4 Toleranties combineren volgens de kwadratische methode

In dit hoofdstuk wordt de combinatie van verschillende toleranties besproken wanneer er een model wordt geanalyseerd dat is opgebouwd uit verschillende bouwelementen. Het doel is om de totale afwijking op de bouwelementen te bepalen alsook de afwijking op de onderlinge positie tussen verschillende elementen.

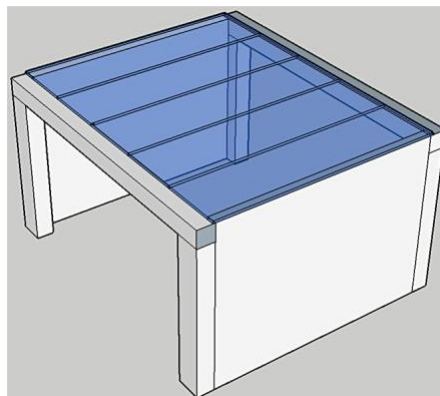
Wanneer een bouwelement geplaatst wordt, dan zijn er verschillende afwijkingen die kunnen voorkomen. Tijdens de fabricage kunnen er afwijkingen optreden op de maat en vorm van het elementen. Ook tijdens de uitvoering kunnen er zich afwijkingen voordoen. De verschillende toleranties beperken de mate waarin een afwijking zich mag voordoen. Het is vanzelfsprekend dat in de meeste gevallen er meerdere afwijkingen gelijktijdig voorkomen. De kans dat een element gefabriceerd en geplaatst wordt zonder dat er zich een enkele afwijking voordoet, is quasi onbestaand. Wanneer er meerdere afwijkingen kunnen voorkomen, dienen deze gecombineerd te worden om de totale afwijking te bepalen.

In de literatuurstudie werd er reeds besproken dat bij het combineren van toleranties het niet volstaat om de algebraïsche som te nemen van alle toleranties, die niet aan elkaar zijn gerelateerd. In eerste instantie werd de manier van het kwadratisch optellen besproken. Om de tolerantie op deze manier te combineren werd volgende formule bekomen:

$$s_t = \sqrt{\sum s_i^2} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_n^2}$$

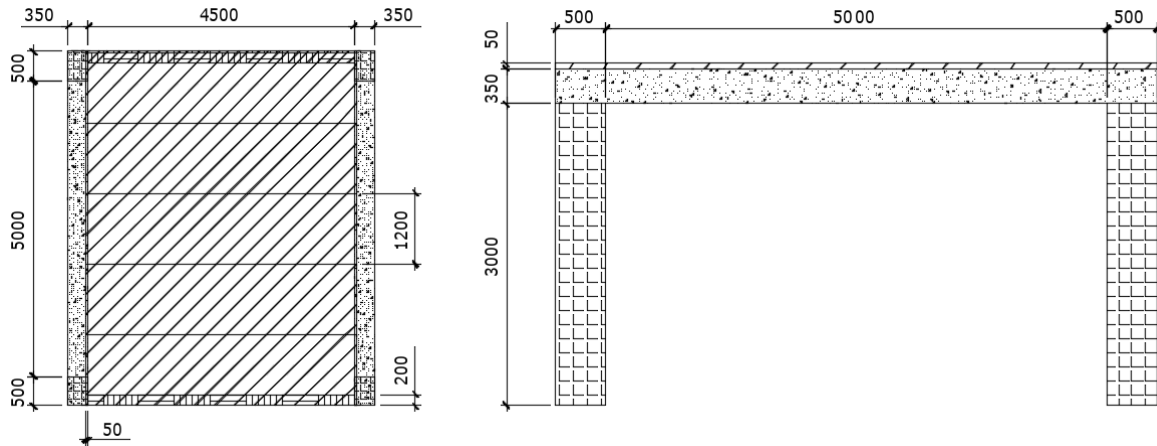
Met s_t de gecombineerde tolerantie en s_i de onderling afhankelijke toleranties.

Figuur 4.1 toont het model dat stapsgewijs wordt opgebouwd en geanalyseerd in dit hoofdstuk. In dit model komen de vier bouwelementen voor die in deze masterproef behandeld worden, namelijk een kolom, wand, balk en vloerplaat. Eerst wordt de totale afwijking van één kolom berekend. Vervolgens wordt er gekeken naar de afwijking op de onderlinge positie van twee kolommen. Tussen de twee voorste en de twee achterste kolommen wordt een wand geplaatst. De onderlinge positie van de wand en de kolommen wordt dan geanalyseerd. Wanneer dat gebeurd is, worden de balken beschouwd die op de twee linkse en de twee rechtse kolommen rusten. Tot slot wordt er gekeken naar de vloerplaten die op de balken steunen. Er wordt verondersteld dat de wanden geprefabriceerd en dragend zijn in dit voorbeeld.



Figuur 4.1: Uiteindelijk model

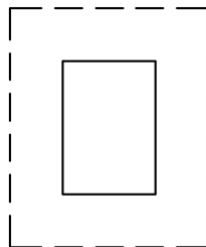
In iedere stap wordt er telkens naar de meest nadelige situatie gekeken. Dit is de situatie waarin het grootste aantal afzonderlijke afwijkingen kunnen voorkomen. De mogelijke totale afwijking is dan ook maximaal. Ook wordt er in iedere stap een rekenvoorbeeld gegeven, waar de afmetingen van de bouwelementen uit Figuur 4.2 worden aanschouwd. De afmetingen van de elementen die worden gebruikt in dit model zijn louter om het rekenvoorbeeld te verduidelijken. In de praktijk worden de dwarsafmetingen van de kolommen en balken doorgaans kleiner gedimensioneerd. Alle kolommen, balken, wanden en vloerplaten zijn vervaardigd uit geprefabriceerd beton. Voor de uitvoering wordt tolerantieklasse 2 gehanteerd.



Figuur 4.2: Boven- en linkerzijaanzicht van het uiteindelijk model

4.1 Eén kolom

In de eerste stap wordt er gekeken naar alle mogelijke afwijkingen die gelijktijdig kunnen voorkomen bij de fabricage en de plaatsing van één kolom. Er wordt bepaald hoeveel de positie van de omtrek van de kolom in het slechtste geval afwijkt van het ontwerp. Alle verschillende afwijkingen die zich kunnen voordoen worden gecombineerd om de maximale totale afwijking te bepalen. Deze totale afwijking wordt getoond in Figuur 4.3. Het bovenaanzicht van een kolom wordt getoond met daarrond een stippellijn. Deze stippellijn stelt de maximale totale afwijking voor waar de kolom in de meest nadelig positie niet zal buiten treden. Om het model stapsgewijs op te bouwen wordt op drie posities van de kolom de totale afwijking bepaald, namelijk onderaan de kolom, bovenaan de kolom en ter hoogte van het midden. Telkens is er dan een extra afwijking die invloed heeft op het resultaat.

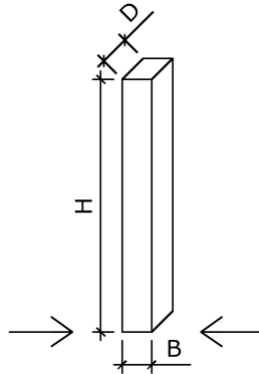


Figuur 4.3: Totale afwijking op het dwarsprofiel van een kolom

Vanaf hier wordt er over een afwijking ε gesproken in plaats van een tolerantie Δ . Met de afwijking ε wordt de mogelijke afwijking bedoeld die zich voordoet. De tolerantie Δ is de maximale waarde die deze afwijking mag hebben. De tolerantie is dus één waarde en beperkt de afwijking die mag voorkomen. Deze wordt daarom benoemd met ε . In het verdere verloop van deze paragraaf wordt hierop teruggekomen en wordt dit verder uitgelegd.

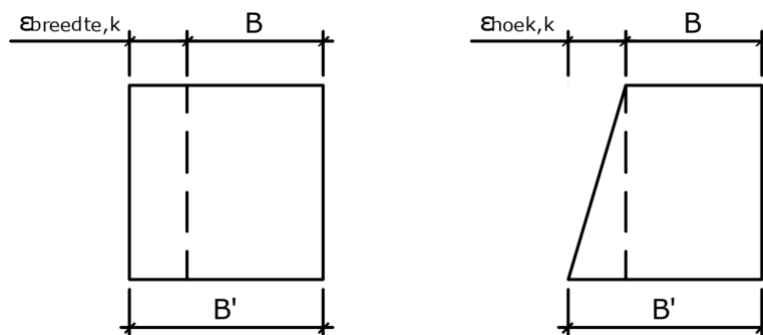
4.1.1 Onderaan de kolom

Eerst wordt er gekeken naar de fabricageafwijkingen die onderaan de kolom kunnen voorkomen. De fabricageafwijkingen bestaan uit maat- en vormafwijkingen. Het niveau waarop de afwijkingen worden bekeken wordt aangeduid met twee pijlen. Dit wordt weergegeven in Figuur 4.4. Het combineren van de afwijkingen wordt uitgewerkt voor de breedterichting. De werkwijze in de dieperichting is volledig analoog en wordt later aangehaald.



Figuur 4.4: 3D-weergave van een kolom onderzocht aan de onderkant

Wanneer een kolom wordt vervaardigd, kunnen er meerdere fabricageafwijkingen gelijktijdig voorkomen. Vormafwijkingen zijn altijd gerelateerd aan maatafwijkingen. Dit wilt zeggen dat wanneer er zich een vormafwijking voordoet, er ook een afwijking is op de maat van de kolom. Andersom is dit niet altijd het geval. Er kan een maatafwijking voorkomen zonder dat er een vormafwijking is. Dit wordt duidelijk gemaakt aan de hand van een voorbeeld. Er is één maatafwijking die de breedte van een kolom beïnvloedt, namelijk de afwijking op de breedte. Ook is er één vormafwijking die effect heeft op de breedte, namelijk de afwijking op de hoekverdraaiing. Deze worden getoond in Figuur 4.5.



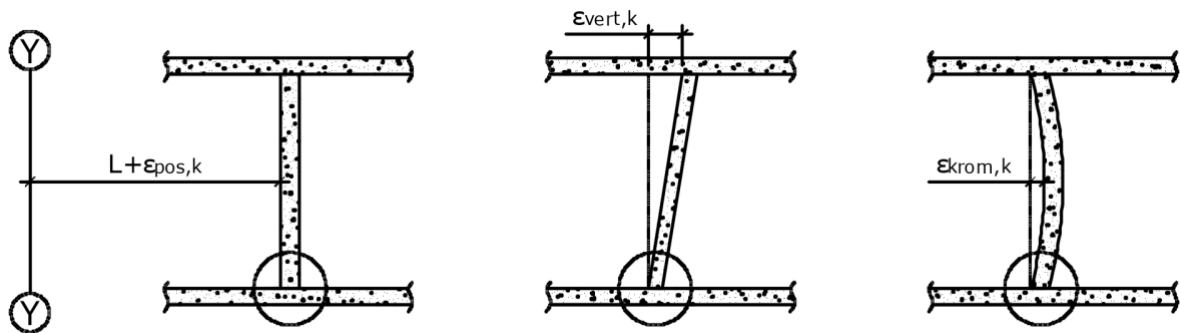
Figuur 4.5: Afwijking op de breedte en hoekverdraaiing onderaan de kolom

In het linkse geval is er enkel een afwijking op de breedte die $\epsilon_{\text{breedte},k}$ wordt genoemd. In het rechtse geval is er een afwijking op de hoekverdraaiing die $\epsilon_{\text{hoek},k}$ wordt genoemd. Deze afwijking brengt altijd een afwijking op de breedte met zich mee. In beide gevallen zorgt de afwijking ervoor dat de kolom breedte B' heeft in plaats van de gedimensioneerd breedte B . De breedte van de kolom mag haar tolerantie niet overschrijden. Om deze reden wordt enkel de afwijking op de breedte in rekening gebracht. Deze afwijking is maatgevend ten opzichte van de afwijking op de hoekverdraaiing.

Vervolgens wordt er naar de bouwplaatsafwijkingen gekeken. Er zijn drie verschillende afwijkingen die kunnen voorkomen, namelijk:

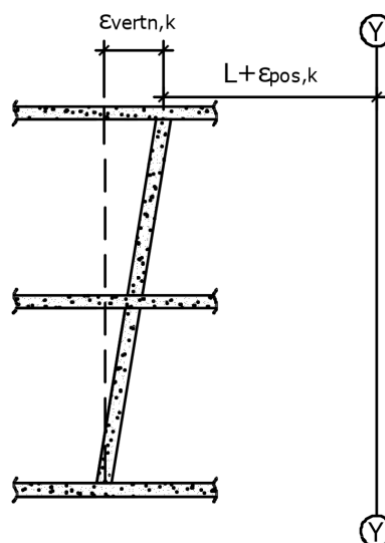
- de afwijking op de positie van de kolom;
- de afwijking op de verticaliteit van de kolom;
- de afwijking op de kromming.

Deze worden weergegeven in Figuur 4.6. De cirkel op de figuur duidt tevens aan waar op de kolom de totale afwijking wordt beschouwd.



Figuur 4.6: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen onderaan de kolom

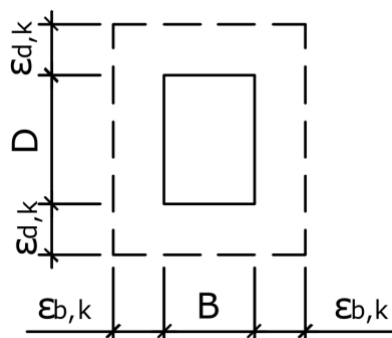
De toegestane afwijking op de positie van een kolom wordt beschreven door twee verschillende toleranties. Op een kolom die op het eerste niveau van een constructie wordt geplaatst geldt enkel de tolerantie op de afstand van de kolom tot de uitgezette as. Vanaf dat een kolom op het tweede niveau wordt geplaatst is er een bijkomende tolerantie die de positie beperkt, namelijk de verticaliteit van meerdere verdiepingen. Deze tolerantie beperkt de positie van de kolom ten opzichte van de verticale lijn van zijn theoretisch midden ter hoogte van de onderzijde van de constructie. Dit wordt verduidelijkt aan de hand van Figuur 4.7. Op de figuur wordt de tolerantie op de afstand tot de uitgezette as $\epsilon_{pos,k}$ genoemd en de tolerantie op de verticaliteit van de kolom op de verdieping $\epsilon_{vertn,k}$. Het is vanzelfsprekend dat de afwijking op de positie wordt beperkt door de kleinste tolerantie van de twee.



Figuur 4.7: Afwijking op de verticaliteit van meerdere verdiepingen

Ter hoogte van de onderzijde van de kolom speelt enkel de afwijking op de positie van de kolom een rol. De afwijking op de verticaliteit en op de kromming hebben geen invloed op de positie van de omtrek van de kolom ter hoogte van de onderzijde. Dit is bijvoorbeeld wel het geval wanneer er naar de positie van de omtrek van de kolom wordt gekeken ter hoogte van het midden van de kolom.

Alle afwijkingen die de positie van de betonoppervlakte onderaan de kolom beïnvloeden zijn nu gekend. Voor de breedterichting zijn dit de afwijking op de breedte en de afwijking op de positie van de kolom. Voor de diepterichting zijn dit de afwijking op de diepte en de afwijking op de positie van de kolom. Wanneer deze afwijkingen gelijktijdig voorkomen, dan is de afwijking van de positie van de omtrek van de kolom het grootst ten opzichte van het ontwerp. Dit wordt visueel weergegeven in Figuur 4.8. Op deze figuur wordt het grondvlak van de kolom getekend. De stippelijijn stelt de omtrek voor waarbinnen de kolom zich nog net bevindt wanneer de verschillende afwijkingen gelijktijdig voorkomen.



Figuur 4.8: Totale afwijking op het dwarsprofiel onderaan de kolom

Om de positie van de stippelijijn te berekenen ten opzichte van de positie van de van de omtrek van de kolom zoals ontworpen, worden de afwijkingen kwadratisch gecombineerd. De totale afwijking in de breedterichting $\epsilon_{b,k}$ wordt op de volgende wijze bepaald:

$$\epsilon_{b,k} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\text{breedte},k}}{2}\right)^2 + \epsilon_{\text{pos},k}^2}$$

Met $\epsilon_{\text{breedte},k}$ de afwijking op de breedte van de kolom en $\epsilon_{\text{pos},k}$ de afwijking op de positie van de kolom. De afwijking op de breedte wordt telkens vanuit het middelpunt van de kolom bekeken. Om die reden wordt in de formule de halve afwijking gebruikt. Wanneer de kolom met $\epsilon_{\text{breedte},k}$ breder is dan ontworpen, dan is de kolom vanuit het middelpunt gezien aan weerszijde breder met $\epsilon_{\text{breedte},k}/2$. Wanneer de positie afwijkt, dan wordt de positie van het middelpunt van de kolom bedoeld. Verder heeft de toegestane afwijking op de breedte twee verschillende waarden, namelijk een tolerantie naar boven en een tolerantie naar beneden. De tolerantie naar boven is altijd groter. Dit wilt zeggen dat de breedte altijd met een grotere afwijking te breed mag zijn dan te smal. Om deze reden wordt enkel met de afwijking naar boven rekening gehouden omdat deze ook altijd de grootste is.

De totale afwijking in de diepterichting $\epsilon_{d,k}$ wordt op analoge wijze bepaald:

$$\epsilon_{d,k} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\text{diepte},k}}{2}\right)^2 + \epsilon_{\text{pos},k}^2}$$

Wanneer de kolom nog niet vervaardigd is en de mogelijke totale afwijking dient bepaald te worden, dan kan de maximaal toegestane afwijking, de tolerantie Δ , worden ingevuld.

4.1.1.1 Rekenvoorbeeld

Om deze werkwijze te verduidelijken wordt telkens een rekenvoorbeeld gegeven. Er wordt een geprefabriceerde betonnen kolom (niet-architectonisch) met een breedte van 350 mm, een diepte van 500 mm en een hoogte van 3000 mm beschouwd. Verder is tolerantieklasse 2 van toepassing. Er wordt van uitgegaan dat iedere afwijking zijn tolerantie niet overschrijdt. Om deze reden wordt telkens de tolerantie ingevuld. Er wordt dus een worstcasescenario beschouwd. De tolerantie op de breedte werd reeds in Hoofdstuk 3 uitgelegd en wordt nogmaals weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Tolerantie op de dwarsafmetingen van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{breedte,k}}$ GNA-beton (mm)	
$150 \text{ mm} < D \leq 400 \text{ mm}$	$+\frac{D + 350}{50}$	$-\frac{D + 100}{50}$

De maximale afwijking op de breedte wordt dus:

$$\Delta_{\text{breedte,k}} = \frac{B + 350}{50} = \frac{350 + 350}{50} = 14 \text{ mm}$$

De maximale afwijking op de positie van de kolom werd reeds in Hoofdstuk 3 bepaald en voor tolerantieklasse 2 bedraagt deze:

$$\Delta_{\text{pos,k}} = \pm 10 \text{ mm}$$

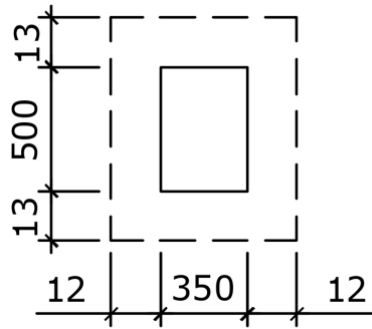
De totale afwijking kan nu worden bepaald:

$$\varepsilon_{\text{b,k}} = \sqrt{\left(\frac{14}{2}\right)^2 + 10^2} = 12 \text{ mm}$$

Voor de diepterichting kan dezelfde redenering worden gebruikt. De totale afwijking in de diepterichting bedraagt:

$$\varepsilon_{\text{d,k}} = \sqrt{\left(\frac{16}{2}\right)^2 + 10^2} = 13 \text{ mm}$$

In Figuur 4.9 wordt de totale afwijking in de breedte- en diepterichting getoond.

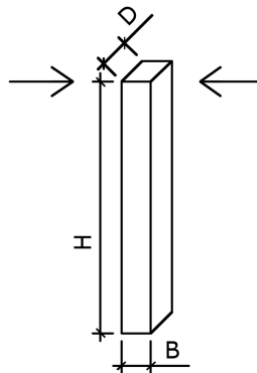


Figuur 4.9: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting onderaan de kolom

Voor de duidelijk wordt er nog even op gewezen dat de afwijking van 12 mm de maximale afwijking is waarmee de positie van de zijde van de kolom afwijkt. Op de figuur is aan beide kanten deze afwijking getekend, maar de afwijking duidt op de meest nadelige positie. In het slechtste geval is de zijde van de kolom ofwel de naar de ene, ofwel naar de andere kant verplaatst.

4.1.2 Bovenaan de kolom

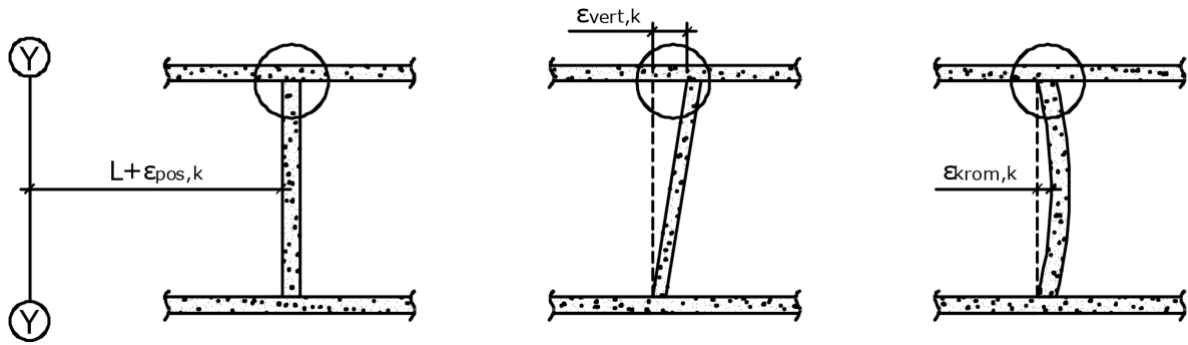
Vervolgens wordt de totale afwijking bepaald ter hoogte van bovenzijde van de kolom, zoals weergegeven op Figuur 4.10.



Figuur 4.10: 3D-weergave van een kolom onderzocht aan de bovenkant

Voor de fabricagetoleranties geldt dezelfde redenering zoals reeds uitgelegd bij de totale afwijking onderaan de kolom. Enkel de afwijking op de dwarsafmeting wordt in rekening gebracht.

Vervolgens wordt er naar de bouwplaatsafwijkingen gekeken. Er werd reeds vermeld dat er drie verschillende afwijkingen kunnen voorkomen. Wanneer de totale afwijking ter hoogte van de bovenzijde van de kolom wordt bekeken, dan speelt de afwijking op de positie een rol, maar ook de afwijking op de verticaliteit van de kolom. Dit zijn de respectievelijk het linkse en middelste geval zoals getoond in Figuur 4.11. De afwijking op de kromming, zoals rechts getoond, heeft geen invloed bovenaan de kolom. De cirkel op de figuur duidt tevens aan waar op de kolom de totale afwijking wordt beschouwd.



Figuur 4.11: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen bovenaan de kolom

Alle afwijkingen die de positie van de betonoppervlakte bovenaan de kolom beïnvloeden zijn nu gekend. De meest nadelige afwijking in de breedte- en diepterichting kan nu worden bepaald. Voor de breedterichting wordt dit op de volgende manier gedaan:

$$\varepsilon_{b,k} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\text{breedte},k}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{\text{pos},k}^2 + \varepsilon_{\text{vert},k}^2}$$

Met $\varepsilon_{\text{breedte},k}$ de afwijking op de breedte van de kolom, $\varepsilon_{\text{pos},k}$ de afwijking op de positie van de kolom en $\varepsilon_{\text{vert},k}$ de afwijking op de verticaliteit van de kolom.

Voor de diepterichting geldt een analoge werkwijze. Deze wordt niet meer uitgeschreven.

4.1.2.1 Rekenvoorbeeld

In het rekenvoorbeeld wordt dezelfde kolom van het vorige rekenvoorbeeld beschouwd. Bijkomend dient de afwijking op de verticaliteit te worden bepaald. Zoals reeds vermeld in Hoofdstuk 3 is de maximale afwijking voor de verticaliteit voor tolerantieklasse 2 gelijk aan:

$$\varepsilon_{\text{vert},k} = \pm \frac{5}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{H}{10}} = \pm \frac{5}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{3000}{10}} = \pm 8 \text{ mm}$$

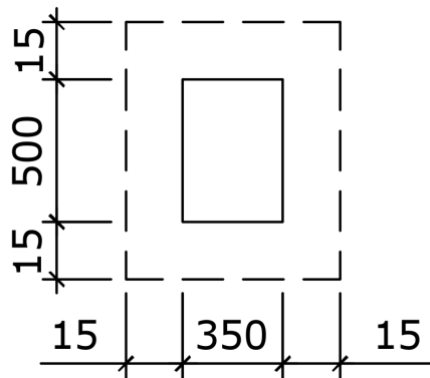
De totale afwijking kan nu worden bepaald, vermits enkel de verticaliteit erbij komt:

$$\varepsilon_{b,k} = \sqrt{\left(\frac{14}{2}\right)^2 + 10^2 + 8^2} = 15 \text{ mm}$$

Voor de diepterichting kan dezelfde redenering worden gebruikt. De totale afwijking in de diepterichting bedraagt:

$$\varepsilon_{d,k} = \sqrt{\left(\frac{16}{2}\right)^2 + 10^2 + 8^2} = 15 \text{ mm}$$

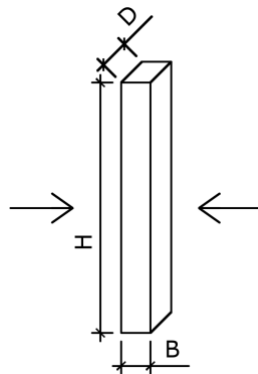
In Figuur 4.12 wordt de totale afwijking in de breedte- en diepterichting getoond.



Figuur 4.12: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting bovenaan de kolom

4.1.3 In het midden van de kolom

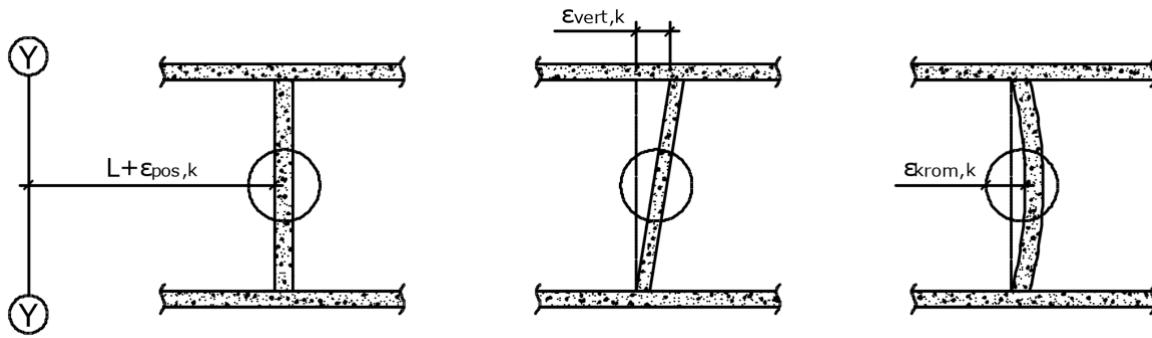
Tot slot wordt de totale afwijking bepaald in het midden van de kolom, zoals weergegeven in Figuur 4.13.



Figuur 4.13: 3D-weergave van een kolom onderzocht in het midden

Voor de fabricagetoleranties geldt dezelfde redenering zoals reeds uitgelegd bij de totale afwijking onderaan en bovenaan de kolom. Enkel de afwijking op de dwarsafmeting wordt in rekening gebracht.

Vervolgens wordt er naar de bouwplaatsafwijkingen gekeken. In midden beïnvloeden alle bouwplaatsafwijkingen de totale afwijking. De afwijking op de positie blijft gelijk. Omdat de kolom ter hoogte van het midden wordt bekeken is de afwijking op de verticaliteit de helft van de waarde bovenaan en is de afwijking op de kromming maximaal. De afwijkingen worden respectievelijk getoond in Figuur 4.14. De cirkel op de figuur duidt tevens aan waar op de kolom de totale afwijking wordt beschouwd.



Figuur 4.14: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen in het midden van de kolom

De meest nadelige afwijking in de breedte- en diepterichting kan nu dus worden bepaald. Voor de breedterichting wordt dit op de volgende manier gedaan:

$$\varepsilon_{b,k} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\text{breedte},k}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{\text{pos},k}^2 + \left(\frac{\varepsilon_{\text{vert},k}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{\text{krom},k}^2}$$

Met $\varepsilon_{\text{breedte},k}$ de afwijking op de breedte van de kolom, $\varepsilon_{\text{pos},k}$ de afwijking op de positie van de kolom, $\varepsilon_{\text{vert},k}$ de afwijking op de verticaliteit van de kolom en $\varepsilon_{\text{krom},k}$ de afwijking op de kromming van de kolom.

4.1.3.1 Rekenvoorbeeld

In het rekenvoorbeeld wordt weer dezelfde kolom gebruikt. In Hoofdstuk 3 werd de tolerantie op de kromming reeds uitgelegd. Voor tolerantieklasse 2 is deze terug te vinden in Tabel 4.2. De uitkomst in de rekenvoorbeelden wordt telkens afgerond tot op 1 mm.

Tabel 4.2: Tolerantie op de kromming van een kolom voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{krom},k}$ G- en TPG-beton (mm)
Tolerantieklasse 2	$\pm 10 \leq \frac{H}{1000} \leq 20$

De maximale afwijking op de kromming voor deze kolom bedraagt dus:

$$\Delta_{\text{krom},k} = \pm 10 \leq \frac{H}{1000} \leq 20 = \pm 10 \leq \frac{3000}{1000} \leq 20 = \pm 3$$

$$\Delta_{\text{krom},k} = \pm 10$$

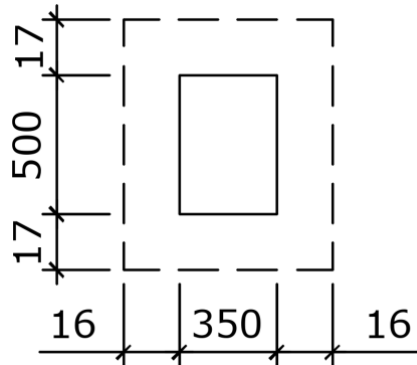
De totale afwijking kan nu worden bepaald, vermits enkel de afwijking op de kromming erbij komt:

$$\varepsilon_{b,k} = \sqrt{\left(\frac{14}{2}\right)^2 + 10^2 + \left(\frac{8}{2}\right)^2 + 10^2} = 16 \text{ mm}$$

Voor de diepterichting kan dezelfde redenering worden gebruikt. De totale afwijking in de diepterichting bedraagt:

$$\varepsilon_{d,k} = \sqrt{\left(\frac{16}{2}\right)^2 + 10^2 + \left(\frac{8}{2}\right)^2 + 10^2} = 17 \text{ mm}$$

In Figuur 4.15 wordt de totale afwijking in de breedte- en diepterichting getoond.



Figuur 4.15: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting in het midden van de kolom

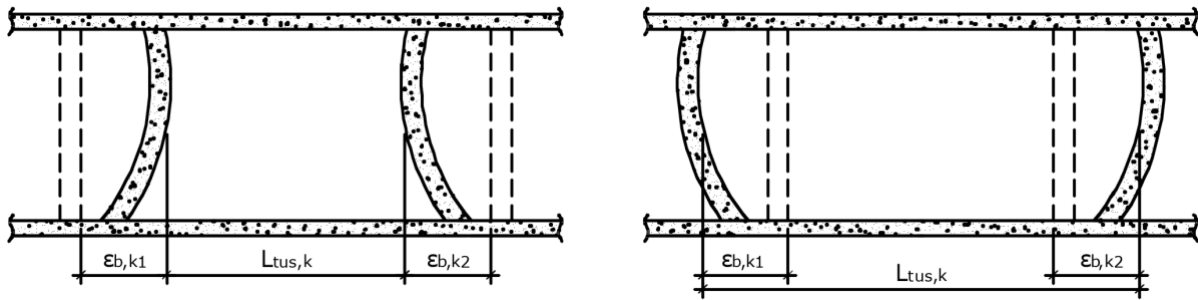
4.1.3.2 Bespreking

Wanneer de theoretisch meest nadelige situatie van één kolom wordt geanalyseerd, dan is de mogelijke totale afwijking het grootst ter hoogte van het midden van de kolom. Op deze plaats is het aantal afwijkingen het grootst. In de praktijk kan het ook voorkomen dat de totale afwijking bovenaan toch groter is. Bovenaan de kolom speelt de afwijking op de kromming geen rol, maar heeft de afwijking op de verticaliteit meer invloed dan ter hoogte van het midden. Als nu geweten is dat de afwijking op de kromming niet voorkomt of een zeer geringe waarde heeft, dan is het mogelijk dat de totale afwijking niet het grootst is in het midden van de kolom, maar bovenaan de kolom.

4.2 Twee kolommen

De volgende stap in de opbouw van het model is de analyse van twee kolommen ten opzichte van elkaar. Wanneer er meerdere kolommen in een horizontaal vlak worden geplaatst, kan de tussenafstand tussen de kolommen worden geanalyseerd. De tussenafstand is de uiteindelijke afstand tussen de oppervlakten van beide kolommen, na de plaatsing. Alle mogelijke afwijkingen die kunnen voorkomen tijdens de fabricage en plaatsing van een kolom, zoals besproken in de vorige paragraaf, beïnvloeden de tussenafstand tussen de kolommen.

De totale afwijking voor een kolom is het grootst ter hoogte van het midden, zoals blijkt uit de vorige paragraaf. De tussenafstand tussen twee kolommen wordt daarom uitgewerkt ter hoogte van het midden van de kolom. De tussenafstand tussen twee kolommen kent twee uiterste waarden, namelijk de minimale en de maximale waarde. Deze worden respectievelijk getoond in Figuur 4.16.



Figuur 4.16: Twee uiterste waarden voor de tussenafstand tussen twee kolommen

De totale afwijking van beide kolommen in het midden zal de uiteindelijke tussenafstand beïnvloeden. De tolerantie op de dwarsafmeting naar boven kent een hogere waarde dan de tolerantie op de dwarsafmeting naar beneden. Omdat in het linkse geval van Figuur 4.16 de afwijking op de dwarsafmeting naar boven wordt gebruikt en dus een worst case scenario is, wordt er met dit geval verder gewerkt.

De totale afwijking op de tussenafstand wordt bepaald door de totale afwijking in de breedterichting van beide kolommen kwadratisch op te tellen:

$$\varepsilon_{tus,k} = \sqrt{\varepsilon_{b,k1}^2 + \varepsilon_{b,k2}^2}$$

Met $\varepsilon_{b,k1}$ de totale afwijking in de breedterichting van kolom 1 en $\varepsilon_{b,k2}$ de totale afwijking van kolom 2.

Volgens de norm NBN EN 13670 is er ook een tolerantie op de tussenafstand tussen kolommen. De tolerantie, zoals gezien in Hoofdstuk 3, wordt in Tabel 4.3 getoond.

Tabel 4.3: Tolerantie op de tussenafstand tussen kolommen voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton

	Tolerantie $\Delta_{tus,k}$ GNA-beton(mm)
Tolerantieklasse 2 + Geprefabriceerd beton	± 15

In de praktijk wordt de tussenafstand ter hoogte van de onderzijde van de kolom gemeten wanneer deze tolerantie wordt gecontroleerd.

4.2.1 Rekenvoorbeeld

In het rekenvoorbeeld wordt de afwijking op de tussenafstand $\varepsilon_{tus,k}$ bepaald tussen twee dezelfde kolommen die reeds besproken zijn in dit hoofdstuk. Het gaat om twee kolommen met een breedte van 350 mm die volgens tolerantieklasse 2 worden geplaatst.

$$\varepsilon_{tus,k} = -\sqrt{16^2 + 16^2} = -23 \text{ mm}$$

Er wordt van een negatieve afwijking gesproken omdat, zoals reeds gezegd, enkel de meest nadelige situatie wordt bekeken. De tussenafstand is in dit geval 23 mm kleiner. Dit is wanneer beide kolommen te breed zijn en de plaatsing, verticaliteit en kromming naar elkaar toe zijn gericht.

Volgens de norm mag voor tolerantieklasse 2 de tussenafstand maximaal ± 15 mm afwijken. Het is dus mogelijk dat in het meest nadelige geval deze tolerantie overschreden wordt.

4.2.2 Bespreking

Wanneer de meest nadelige situatie van twee kolommen wordt geanalyseerd, dan is –net zoals voor één kolom– de mogelijke totale afwijking het grootst in het midden van de kolommen.

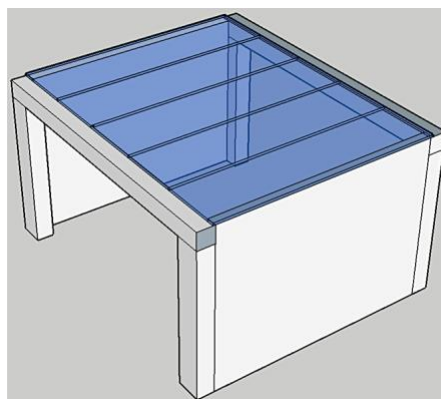
Er kan wel worden opgemerkt dat de kans dat deze meest nadelige situatie zich voordoet kleiner is dan de kans op de meest nadelige situatie van één kolom. Het kan immers ook zijn dat beide kolommen hun meest nadelige afwijking hebben naar eenzelfde kant. De oorspronkelijke tussenafstand, zoals op plan getekend zou dan onveranderd blijven. Het kwadratisch optellen van deze afwijkingen houdt rekening met de kans op voorkomen ervan.

Uit het rekenvoorbeeld valt af te leiden dat de tussenafstand in een slechtste geval 23 mm kan afwijken. Dit is een relatief grote afwijking, maar de reden hiervoor is omdat het een worstcasescenario is. In de praktijk zullen de afwijkingen elkaar in de meeste gevallen wel opheffen.

Volgens de norm bedraagt de maximale afwijking op de tussenafstand in dit geval maximaal 15 mm. Deze tolerantie betreft de afwijking die gemeten wordt nadat de constructie is gebouwd. Bij het bekomen van een afwijking op de tussenafstand van 23 mm wordt er rekening gehouden met alle mogelijke afwijkingen die kunnen voorkomen in het bouwproces.

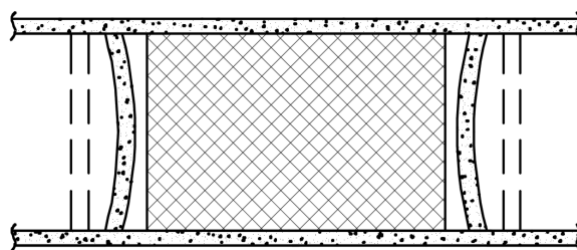
4.3 Twee kolommen en een wand

In deze stap wordt er gekeken naar de wand die tussen de kolommen wordt geplaatst (Figuur 4.17).



Figuur 4.17: Uiteindelijk model

Wanneer de wand tussen de kolommen wordt geplaatst, dan zal de uiteindelijke tussenafstand tussen de kolommen van belang zijn. Het is daarom belangrijk om de afwijking op de tussenafstand tussen de kolommen te kennen, zoals reeds besproken in de vorige paragraaf. De wand die tussen de kolommen wordt geplaatst heeft ook een mogelijke afwijking, namelijk de afwijking op de lengte. Om de gecombineerde afwijking te bepalen wordt naar de meest nadelige situatie gekeken. Dit wordt getoond in Figuur 4.18.



Figuur 4.18: Wand tussen twee kolommen

In het meest nadelige geval is de tussenafstand tussen de kolommen minimaal en is de lengte van de wand maximaal. Wanneer de wand nu de lengte heeft zoals ontworpen in een driedimensionaal model, zal deze niet passen tussen de kolommen. Om dit te voorkomen wordt de gecombineerde afwijking bepaald waarmee de wand korter dient te worden vervaardigd zodat deze altijd past tussen de kolommen. De afwijking op de tussenafstand tussen de kolommen is reeds bepaald in de vorige paragraaf en wordt op de volgende wijze beschreven:

$$\varepsilon_{\text{tus},k} = \sqrt{\varepsilon_{b,k1}^2 + \varepsilon_{b,k2}^2}$$

Vervolgens wordt de afwijking op de lengte van de wand $\varepsilon_{\text{lengte},w}$ gecombineerd met de afwijking op de tussenafstand om de totale afwijking te bepalen. De totale afwijking waarmee de wand korter dan zoals ontworpen dient vervaardigd te worden om tussen de kolommen te passen wordt dan:

$$\varepsilon_{k-w} = \sqrt{\varepsilon_{\text{tus},k}^2 + \varepsilon_{\text{lengte},w}^2}$$

4.3.1 Rekenvoorbeeld

In het rekenvoorbeeld wordt een geprefabriceerde wand tussen de kolommen uit het vorige rekenvoorbeeld geplaatst. Het geheel wordt vervaardigd volgens tolerantieklasse 2. Voor de wand wordt klasse B gehanteerd. Ook wordt er hier van uitgegaan dat de verschillende afwijking in de meest nadelige situatie de waarde van hun tolerantie hebben. In Hoofdstuk 3 werd de tolerantie op de lengte van een geprefabriceerde wand reeds beschreven. Deze wordt weergegeven in Tabel 4.4. De wand in het model heeft een lengte van 4,5 meter.

Tabel 4.4: Tolerantie op de lengte van een wand voor geprefabriceerde niet-architectonisch beton

	Tolerantie $\Delta_{\text{lengte},w}$ GNA-beton (mm)
3000 mm < L ≤ 6000 mm	±16

In de vorige paragraaf is de afwijking op de tussenafstand $\varepsilon_{\text{tus},k}$ reeds bepaald:

$$\varepsilon_{\text{tus},k} = -23 \text{ mm}$$

De afwijking ε_{k-w} kan nu worden bepaald:

$$\varepsilon_{k-w} = \sqrt{(-23)^2 + 16^2} = +28 \text{ mm}$$

De totale afwijking die bekomen wordt is gelijk aan 28 mm. Dit wilt zeggen dat in de meest nadelige situatie de wand, zoals in het beschouwd model, 28 mm te breed is om tussen de kolommen te passen. De lengte L' waarmee de wand moet worden vervaardigd om te verzekeren dat deze past wordt nu gedefinieerd:

$$L' = L - \varepsilon_{k-w}$$

$$L' = 4500 \text{ mm} - 28 \text{ mm} = 4472 \text{ mm}$$

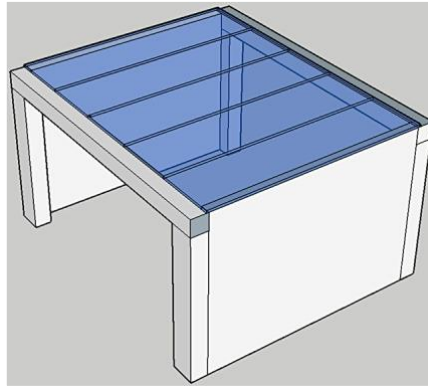
In dit geval moet de wand met een lengte van 4,472 meter worden besteld om zeker te zijn dat deze past tussen de kolommen. Dit is in de ontwerpfase wanneer zowel de kolommen als de wand nog niet gefabriceerd zijn.

4.3.2 Bespreking

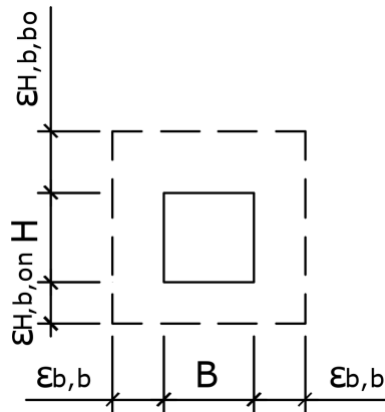
Bij het plaatsen van een wand tussen twee kolommen wordt de totale afwijking groter omdat er een bijkomende afwijking is. Praktisch kunnen de twee kolommen bijvoorbeeld wel iets te veel naar elkaar toe staan, maar kan de wand net iets te klein in lengte zijn, waardoor de wand toch zou passen.

4.4 Twee kolommen en een balk

In de verdere opbouw van het model wordt de totale afwijking bekeken van een balk die op twee kolommen rust. Eerst wordt dit gedaan voor één balk om in een volgende stap de afwijking op de onderlinge positie tussen twee balken te analyseren. Aanvankelijk wordt er gekeken naar de linkse kolommen zoals getoond in Figuur 4.19. Alle afwijkingen op de kolommen en de balk die invloed hebben op de positie van de omtrek van de balk worden in rekening gebracht. Deze worden gecombineerd om de maximale totale afwijking te bepalen. Dit wordt zowel in de breedte- als in de hoogterichting van de balk gedaan, zoals getoond in Figuur 4.20. Deze figuur toont het vooraanzicht van de balk die op twee kolommen rust. Rond de balk is een stippellijn getekend. Deze stippellijn stelt de maximale totale afwijking voor waar de balk in de meest nadelige positie niet zal buiten treden. De totale afwijking in de hoogte heeft niet dezelfde waarde aan de bovenzijde en de onderzijde van de balk, dit wordt later uitgelegd. De totale afwijking wordt enkel ter hoogte van het midden van de balk bepaald. Dit is de meest nadelige positie aangezien de kromming (in de horizontale en verticale richting) hier een rol speelt.

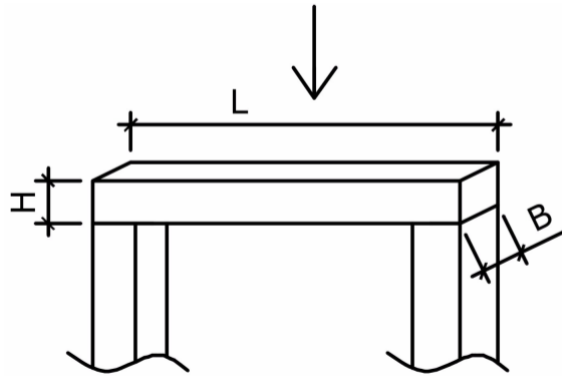


Figuur 4.19: Uiteindelijk model



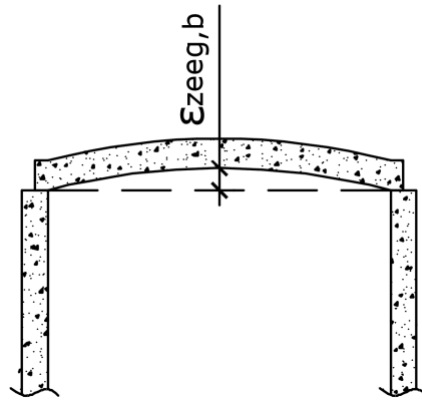
Figuur 4.20: Totale afwijking in de hoogte- en breedterichting van de balk

Figuur 4.21 geeft visueel weer op welke locatie de balk wordt onderzocht.



Figuur 4.21: 3D-weergave van een balk onderzocht in het midden

De mogelijke fabricageafwijkingen die kunnen voorkomen bij een balk zijn dezelfde als die van een kolom, namelijk de afwijking op de dwarsafmeting. Aangezien de balk op een kolom steunt, is het vanzelfsprekend dat de balk in de hoogterichting wordt beïnvloed door zowel de hoogte van de balk zelf als de hoogte van de kolom. Bijkomend is er voor balken (in het midden) een afwijking op de zegg $\epsilon_{zeeg,b}$. De zegg is de kromming van een bouwelement zoals weergegeven in Figuur 4.22. In de praktijk kan deze zegg voorkomen zodat de balk na de plaatsing niet doorbuigt. Omdat telkens de meest nadelige positie wordt besproken, wordt deze afwijking ook mee opgenomen in de berekening. Het opmeten van deze afwijking gebeurt direct na de plaatsing, waardoor er dan nog geen belasting op ligt.

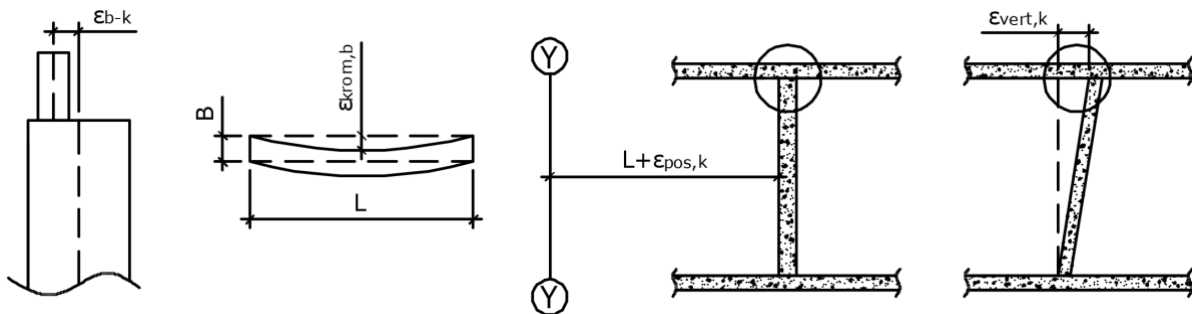


Figuur 4.22: De afwijking op de zeeg van een balk

Vervolgens wordt er naar de bouwplaatsafwijkingen gekeken. In het midden van de balk is er een bijkomende mogelijke afwijking, namelijk de kromming van de balk in het horizontale vlak. De bouwplaatsafwijkingen die van toepassing zijn in de breedterichting zijn:

- de afwijking op de positie van de balk ten opzichte van de kolom ε_{b-k} ;
- de afwijking op de horizontale kromming van de balk $\varepsilon_{krom,b}$;
- de afwijking op de positie van de kolom $\varepsilon_{pos,k}$;
- de afwijking op de verticaliteit van de kolom $\varepsilon_{vert,k}$.

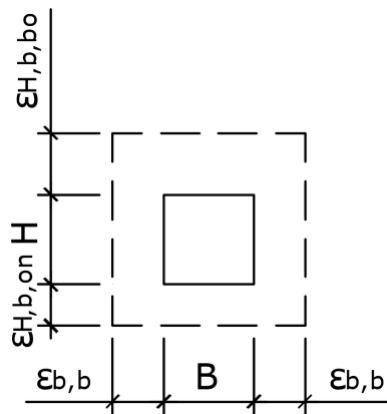
Deze worden respectievelijk weergegeven in Figuur 4.23.



Figuur 4.23: Mogelijke bouwplaatsafwijkingen voor de te beschouwen balk

Alle afwijkingen die de positie van de oppervlakte van de balk ter hoogte van het midden beïnvloeden zijn nu gekend. Indien deze tegelijk voorkomen dan is de afwijking van de positie van de omtrek van de balk het grootst ten opzichte van het ontwerp. Dit wordt weergegeven in Figuur 4.24. De totale afwijking in de breedterichting $\varepsilon_{b,b}$ wordt op de volgende wijze bepaald:

$$\varepsilon_{b,b} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{breedte,b}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{b-k}^2 + \varepsilon_{krom,b}^2 + \varepsilon_{pos,k}^2 + \varepsilon_{vert,k}^2}$$



Figuur 4.24: Totale afwijking in de hoogte- en breedterichting van de balk

Figuur 4.24 toont dat er een onderscheid wordt gemaakt tussen de afwijking in de hoogterichting aan de bovenzijde van de balk en aan de onderzijde van balk. Wanneer naar de meest afwijkende positie wordt gekeken van de onderzijde van de balk, dan speelt enkel de afwijking op de hoogte van de kolom een rol. De afwijking op de hoogte en zeeg van de balk zelf heeft hier geen invloed op, vermits de balk op de kolom ligt. Aan de bovenzijde van de balk is dit wel het geval.

De totale afwijkingen in de hoogterichting $\varepsilon_{h,b,on}$ en $\varepsilon_{h,b,bo}$ kunnen dus worden bepaald:

$$\varepsilon_{h,b,on} = \sqrt{\varepsilon_{\text{hoogte},k}^2} = \varepsilon_{\text{hoogte},k}$$

$$\varepsilon_{h,b,bo} = \sqrt{\varepsilon_{\text{hoogte},b}^2 + \varepsilon_{\text{zeeg},b}^2 + \varepsilon_{\text{hoogte},k}^2}$$

De afwijking op de hoogte van kolom en de afwijking op de zeeg van de balk vallen weg wanneer het gaat om ter plaatse gestort beton.

4.4.1 Rekenvoorbeeld

Om deze werkwijze te verduidelijken wordt er een rekenvoorbeeld gegeven. De kolommen en balk zoals in het model worden beschouwd. De balk heeft een breedte van 350 mm, een hoogte van 350 mm en een lengte van 6000 mm en is ook geprefabriceerd. Verder is tolerantieklasse 2 van toepassing. Eerst wordt de totale afwijking in de breedterichting bepaald, daarna in de hoogterichting.

De tolerantie op de breedte van de balk is identiek aan de tolerantie op de dwarsafmeting op een kolom aangezien deze in het rekenvoorbeeld dezelfde waarden hebben. De maximale afwijking op de breedte wordt dus:

$$\Delta_{\text{breedte},b} = +14 \text{ mm}$$

De tolerantie op de positie van de balk ten opzichte van de kolom werd ook reeds beschreven in Hoofdstuk 3. Deze is terug te vinden in Tabel 4.5.

Tabel 4.5: Tolerantie op de positie van een balk-kolom verbinding

Tolerantie Δ_{b-k} G- en TPG-beton (mm)
$\pm \frac{B}{30} \geq 20$

De maximale afwijking op de positie van een balk ten opzichte van de kolom wordt dus:

$$\Delta_{b-k} = \pm \frac{B}{30} \geq 20 = \frac{350}{30} \geq 20 = \pm 12 \text{ mm} \geq 20$$

$$\Delta_{b-k} = \pm 20 \text{ mm}$$

De afwijking op de kromming in het horizontale vlak werd ook reeds besproken in Hoofdstuk 3 en wordt getoond in Tabel 4.6.

Tabel 4.6: Tolerantie op de kromming van een balk voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton

Tolerantie $\Delta_{\text{krom,b}}$ G- en TPG-beton (mm)
$\pm \frac{L}{600} > 20$

De toegestane afwijking op de kromming in het horizontale vlak wordt:

$$\Delta_{\text{krom,b}} = \pm \frac{6000}{600} > 20 = \pm 10 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\text{krom,b}} = \pm 20 \text{ mm}$$

De maximale afwijking op de positie en de verticaliteit van een kolom zijn reeds eerder in dit hoofdstuk gebruikt en zijn:

$$\Delta_{\text{pos,k}} = \pm 10 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{\text{vert,k}} = \pm 8 \text{ mm}$$

De totale afwijking in de breedterichting kan nu worden bepaald:

$$\varepsilon_{b,b} = \sqrt{\left(\frac{14}{2}\right)^2 + 20^2 + 20^2 + 10^2 + 8^2} = 32 \text{ mm}$$

Omdat de kolom die de balk ondersteunt vervaardigd is uit geprefabriceerd beton, heeft deze een toegestane afwijking op de hoogte. Deze is reeds besproken in Hoofdstuk 3 en is gelijk aan:

$$\Delta_{\text{hoogte,k}} = \pm \left(10 + \frac{H}{1000}\right) < 40 = \pm \left(10 + \frac{3000}{1000}\right) < 40 = \pm 13 \text{ mm}$$

In Hoofdstuk 3 werd de toegestane afwijking op de zeeg reeds bepaald. Deze wordt gegeven in Tabel 4.7.

Tabel 4.7: Tolerantie op de zeeg van een balk voor geprefabriceerd niet-architectonisch beton

Tolerantie $\Delta_{\text{zeeg,b}}$ GNA-beton (mm)
$\pm \frac{L}{700}$

De toegestane afwijking op de zeeg wordt:

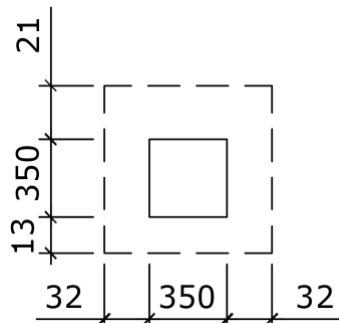
$$\Delta_{zeeg,b} = \pm \frac{6000}{700} = \pm 9 \text{ mm}$$

De totale afwijking in de hoogterichting wordt:

$$\varepsilon_{h,b,on} = 13 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{h,b,bo} = \sqrt{14^2 + 9^2 + 13^2} = 21 \text{ mm}$$

In Figuur 4.25 wordt de totale afwijking in de breedte- en hoogterichting getoond.

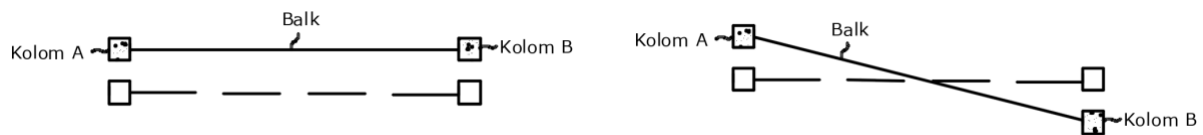


Figuur 4.25: Totale afwijking in de breedte- en hoogterichting van de kolom

4.4.2 Bespreking

Wanneer de meest nadelige situatie van een balk op twee kolommen wordt geanalyseerd in het midden van de balk kan dit in twee richtingen gebeuren. In de breedterichting van de balk spelen de afwijkingen bovenaan de kolom een rol. Verder zal de positie van de balk/kolomverbinding, de kromming en de breedte van de balk hier nog een invloed op hebben. In de hoogterichting van de balk zullen naast de hoogte van de kolommen, ook de zeeg en de hoogte van de balk een rol spelen. De lengterichting van de balk wordt niet beschouwd want hier zal er (ter hoogte van de oplegging) steeds voldoende oplegglengte zijn aangezien de balk volledig op de kolom ligt.

Het valt op dat bij het bestuderen van dit geval er één fundamenteel verschil is met voorgaande gevallen. Om de meest nadelige situatie te verkrijgen ter hoogte van het midden van de balk, moeten er twee kolommen naar eenzelfde kant maximaal afwijken. Dit wordt weergegeven aan de linkerkant van Figuur 4.26. Er wordt in de methode van kwadratisch optellen dus nergens rekening gehouden met het feit dat de kans dat één kolom maximaal naar één kant afwijkt en de kans dat twee kolommen maximaal naar éénzelfde kant afwijken verschillend is. Praktisch is het namelijk ook mogelijk dat kolom A iets te veel naar boven geplaatst wordt en kolom B iets te veel naar onder. De positie ter hoogte van het midden van de balk, zoals op plan getekend zou dan onveranderd blijven. Deze situatie wordt getoond aan de rechterkant van Figuur 4.26. De afwijkingen op de kromming en de breedte van de balk worden om dit principe aan te tonen hier dus even buiten beschouwing gelaten.



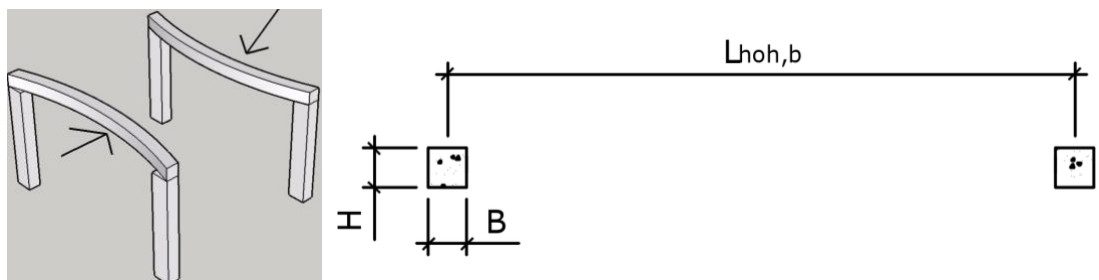
Figuur 4.26: Mogelijke afwijkingen van een balk op twee kolommen

Het niet in rekening brengen van deze kansen is dus een nadeel van de methode van kwadratisch optellen, maar dit is dan ook louter een manier om de worst case scenario te bestuderen. In Hoofdstuk 5 wordt hier een oplossing voor gezocht. In wat volgt zal dit fenomeen zich nog voordoen, maar aangezien dit hoofdstuk zich focust op het meest nadelige geval zal dit niet worden herhaald.

4.5 Twee balken

De volgende stap is de analyse van twee balken ten opzichte van elkaar. Wanneer er meerdere balken in een horizontaal vlak worden geplaatst, kan de hart-op-hartafstand tussen de balken worden geanalyseerd. De hart-op-hartafstand wordt voor de meest nadelige situatie bekeken. Dit zal weer het midden van de balken zijn aangezien hier het grootste aantal afwijkingen voorkomt. De hart-op-hartafstand heeft een maximaal toegestane waarde, zoals reeds besproken in Hoofdstuk 3. In eerste instantie wordt er gekeken naar de combinatie van alle mogelijke toleranties die kunnen voorkomen tijdens het bouwproces. In tweede instantie wordt dit vergeleken met de specifieke tolerantie die de norm hierop legt. Deze specifieke tolerantie wordt pas gecontroleerd als het uiteindelijke model gebouwd is. De kans dat deze tolerantie wordt overschreden is niet onbestaand.

De afwijking op de dwarsafmeting van de balken wordt buiten beschouwing gelaten omdat de hart-op-hartafstand de afstand is tussen de middelpunten van de balk. In Figuur 4.27 worden links tweemaal twee kolommen getoond waarop een balk ligt. Er wordt rechts een doorsnede getoond van de twee balken. De positie van deze doorsnede is in het midden van de balk, zoals ook links aangegeven.

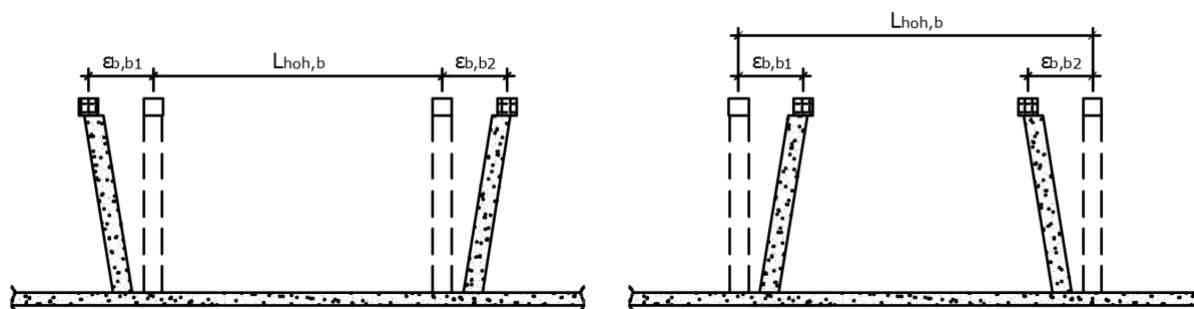


Figuur 4.27: Hart-op-hart afstand tussen twee balken

In de vorige paragraaf is de totale afwijking in het midden van een balk bepaald. De afwijkingen die van invloed zijn op de hart-op-hart afstand tussen de balken zijn:

- de afwijking op de positie van de balken ten opzichte van de kolom;
- de afwijking op de kromming van de balken in het horizontaal vlak;
- de positie van de kolommen zelf;
- de afwijking op de verticaliteit van de kolommen.

Wanneer deze afwijkingen voor beide balken en kolommen gelijktijdig voorkomen is de afwijking op de hart-op-hartafstand het grootst. Dit kan in beide richtingen voorkomen zoals wordt getoond in Figuur 4.28. Dit is een doorsnede zoals links aangeduid op Figuur 4.27. De kolommen die onder de balken worden getoond zijn de achterste kolommen.



Figuur 4.28: Meest nadelige situatie voor de hart-op-hart afstand tussen twee balken

De afwijking op de hart-op-hartafstand $\varepsilon_{hoh,b}$ wordt nu bepaald:

$$\varepsilon_{hoh,b} = \sqrt{\varepsilon_{b-k1}^2 + \varepsilon_{krom,b1}^2 + \varepsilon_{pos,k1}^2 + \varepsilon_{vert,k1}^2 + \varepsilon_{b-k2}^2 + \varepsilon_{krom,b2}^2 + \varepsilon_{pos,k2}^2 + \varepsilon_{vert,k2}^2}$$

4.5.1 Rekenvoorbeeld

In het rekenvoorbeeld wordt de afwijking op de hart-op-hartafstand bepaald tussen de balken uit het model. De verschillende afwijkingen op de balken en kolommen die van toepassing zijn werden reeds in de vorige paragraaf bepaald. De hart-op-hartafstand wordt vervolgens bepaald:

$$\varepsilon_{hoh,b} = \sqrt{20^2 + 20^2 + 10^2 + 8^2 + 20^2 + 20^2 + 10^2 + 8^2} = 44 \text{ mm}$$

Zoals reeds gezien in Hoofdstuk 3 is er ook een tolerantie op de hart-op-hartstand tussen balken. Voor geprefabriceerd balken is deze tolerantie:

$$\Delta_{hoh,b} = \pm 15 \text{ mm}$$

Wanneer de meest nadelige situatie voor beide balken wordt bekeken, dan bestaat er het risico dat de tolerantie op de hart-op-hartafstand overschreven wordt.

4.5.2 Bespreking

Wanneer de meest nadelige situatie van twee balken, beide gelegen op twee kolommen, wordt geanalyseerd, dan is de mogelijke totale afwijking op de hart-op-hartafstand het grootst in het midden van de balken. Dit komt omdat hier de meeste afwijkingen een invloed hebben.

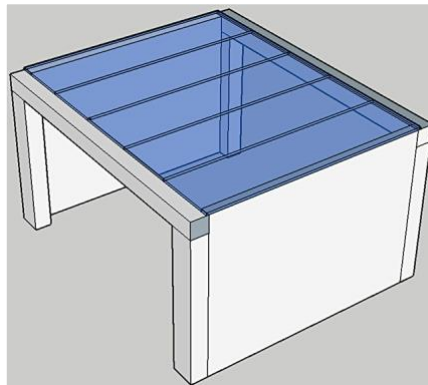
Uit het rekenvoorbeeld valt af te leiden dat de hart-op-hartafstand in het slechtste geval 44mm kan afwijken. Dit is een relatief grote afwijking, maar de reden hiervoor is dat het een worstcasescenario is. In de praktijk zullen de afwijkingen elkaar in de meest gevallen wel opheffen. Zo kunnen de kolommen maximaal van elkaar weg geplaatst zijn, maar zijn de balken naar binnen gekromd, waardoor de tolerantie op de hart-op-hartafstand mogelijk niet wordt overschreven.

Volgens de norm mag de maximale afwijking op de hart-op-hartafstand, gemeten nadat de constructie is gebouwd, in dit geval maximaal 15mm bedragen.

4.6 Twee balken en een vloerplaat

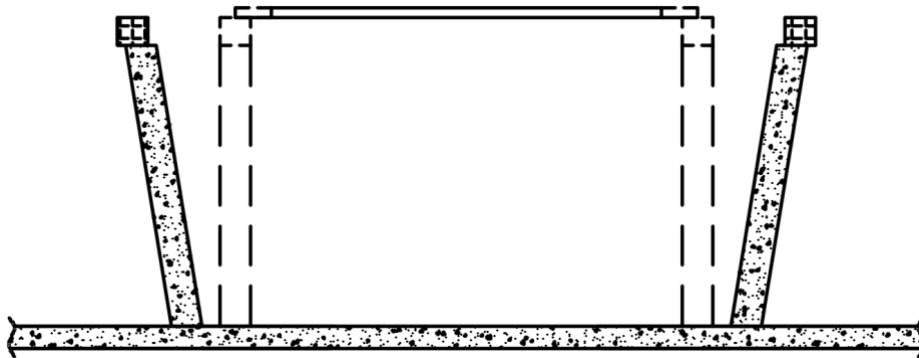
In de vorige paragraaf werd de hart-op-hartafstand tussen twee balken bekeken. In dit deel wordt gekeken naar oplegglengte van een vloerplaat wanneer deze op twee balken ligt. De balken steunen op hun beurt op kolommen, zoals getoond in Figuur 4.29. Op deze figuur steunen vijf breedvloerplaten op de balken aan weerszijden. De oplegglengte van de middelste plaat wordt geanalyseerd, omdat dit de

meest nadelige situatie is. Hier hebben de afwijkingen van de vloerplaat, balken en ondersteunende kolommen invloed op de opleglengte.



Figuur 4.29: Uiteindelijk model

In de meest nadelige situatie is de tussenafstand tussen de kolommen bovenaan het grootst, net zoals de tussenafstand tussen de balken die op de kolommen liggen. Gecombineerd met een te korte vloerplaat geeft die de totale afwijking. Deze situatie wordt getoond in Figuur 4.30.



Figuur 4.30: Meest nadelige situatie van een breedvloerplaat op twee balken

De totale afwijking van beide balken $\varepsilon_{b,b1}$ en $\varepsilon_{b,b2}$ worden gecombineerd, samen met de afwijking op de lengte van de vloerplaat $\varepsilon_{lengte,v}$ om de totale mogelijke afwijking op de opleglengte $\varepsilon_{opl,v}$ te bekomen.

$$\varepsilon_{opl,v} = \sqrt{\varepsilon_{b,b1}^2 + \varepsilon_{b,b2}^2 + \varepsilon_{lengte,v}^2}$$

Wanneer de vloerplaat een bepaalde opleglengte heeft, dan wijkt deze mogelijk af met $\varepsilon_{opl,v}$. Wanneer de vloerplaat zo wordt ontworpen dat de opleglengte gelijk is aan de minimale opleglengte, dan dient die vloerplaat met een lengte L' te worden vervaardigd die gelijk is aan:

$$L' = L + \varepsilon_{opl,v}$$

4.6.1 Rekenvoorbeeld

In het rekenvoorbeeld wordt hetzelfde model beschouwd, zoals getoond in Figuur 4.29. De mogelijke afwijking op de opleglengte van de middelste vloerplaat wordt bepaald. Deze vloerplaat steunt in het midden op de balken, waar de totale afwijking op de balken zelf het grootst is. De tussenafstand tussen

de balken bedraagt 4500 mm. De vloerplaat heeft een minimale opleglengte van 50 mm en dus een lengte van 4600 mm.

De tolerantie op de lengte van een geprefabriceerde breedvloerplaat werd reeds in Hoofdstuk 3 aangehaald en bedraagt:

$$\Delta_{\text{lengte,v}} = \pm 20 \text{ mm}$$

De andere toegestane afwijkingen op de balken en kolommen werd reeds in de voorgaande paragrafen bepaald. De kolommen en balk aan de linkerkant zijn gelijk aan de kolommen en balk aan de rechterkant van de vloerplaat en hebben dus ook dezelfde toleranties.

$$\varepsilon_{b,b} = \varepsilon_{b,b1} = \varepsilon_{b,b2} = 32 \text{ mm}$$

De totale afwijking op de opleglengte van de vloerplaat kan nu worden bepaald:

$$\varepsilon_{\text{opl,v}} = \sqrt{32^2 + 32^2 + 20^2} = \pm 49 \text{ mm}$$

De breedvloerplaat heeft volgens het ontwerp een lengte van 4600 mm. De nodige opleglengte wordt dan net behaald. Om zeker te zijn dat in het meest nadelige geval de vloerplaat nog de minimum opleglengte behaalt, moet de plaat vervaardigd worden met lengte:

$$L' = 4600 \text{ mm} + 49 \text{ mm} = 4649 \text{ mm}$$

Het kan nu ook voorkomen dat de kolommen en balken exact geplaatst worden zoals op plan voorzien. In dat geval is er geen gevaar dat de vloerplaat aan de andere kant van de balk, door een andere vloerplaat geraakt zou worden, aangezien de vloerplaat slechts 50mm opleglengte nodig heeft. Bij de opleglengte van een balk op een kolom, zou dit wel mogelijke problemen kunnen leveren.

4.6.2 Bespreking

Wanneer de meest nadelige situatie van een vloerplaat op twee balken wordt geanalyseerd, dan is de mogelijke totale afwijking op de opleglengte het grootst in van het midden van de balken. Dit komt omdat hier de meeste afwijkingen een invloed hebben.

Uit het rekenvoorbeeld valt af te leiden dat de opleglengte in een slechtste geval 49 mm kan afwijken. Dit is een opmerkelijk grote afwijking. In de praktijk zullen de afwijkingen elkaar in de meest gevallen wel opheffen.

4.7 Besluit

In dit hoofdstuk werd er een case opgebouwd in volgende stappen:

- Het analyseren van één kolom;
- Het analyseren van twee kolommen;
- Het analyseren van twee kolommen en een wand;
- Het analyseren van twee kolommen en een balk;
- Het analyseren van twee balken;
- Het analyseren van twee balken en een vloerplaat.

Bij het bekijken van één of meerdere kolommen op één niveau kan er steeds worden geconcludeerd dat de meest nadelige afwijking plaatsvindt in van het midden van de kolom. Dit was namelijk het geval bij de tussenafstand tussen twee kolommen en bij een wand die tussen twee kolommen wordt geplaatst. Dit komt omdat in het midden van de kolom er een bijkomende afwijking is, namelijk op de kromming van de kolom. Vanaf het moment dat de constructie op een hoger niveau wordt bekeken (alles wat op of boven de kolom ligt), wordt gewerkt met de maximale afwijking bovenaan de kolom.

Bij het bekijken van één of meerdere balken kan er ook weer worden geconcludeerd dat de meest nadelige afwijking plaatsvindt in het midden van de balken. Dit was het geval bij de hart-op-hartafstand van balken en bij de opleglengte van een vloerplaat en geldt zowel in de hoogte- als breedterichting van de balk. De reden hiervoor is dat de balk in het midden hier een extra tolerantie op heeft. In de breedterichting van de balk is dit de kromming en in de hoogterichting van de balk is dit de zeeg.

Balken en kolommen vertonen een gelijkaardig gedrag op vlak van toleranties.

In de norm zijn er enkele specifieke toleranties op bepaalde aspecten zoals de tussenafstand tussen kolommen, het niveauverschil tussen balken en de hart-op-hartafstand van balken. Deze specifieke toleranties worden gemeten na plaatsing van het geheel. In deze masterproef wordt er gekeken naar de afwijkingen tijdens het bouwproces die er effectief voor zorgen dat deze specifieke afwijkingen zich voordoen. Er wordt hier een worst case scenario beschouwd waardoor de waarde van deze afwijking steeds groter is dan de desbetreffende tolerantie beschreven in de norm.

Een mogelijke oorzaak van het niet op elkaar inpassen van verschillende bouwelementen kan zijn dat er omwille van een combinatie van afwijkingen sommige bouwelementen bijvoorbeeld niet voldoende opleglengte hebben. De opleglengte van een balk op een kolom wordt niet beschouwd omdat er nagenoeg altijd voldoende opleglengte is zijn want een balk wordt tot het midden van de kolom gedimensioneerd. De opleglengte van een vloerplaat op een balk kan, in een geval zoals besproken in het rekenvoorbeeld, 48mm afwijken. Er dient hier dus zeker rekening mee te worden gehouden.

Het kwadratisch optellen van de verschillende toleranties houdt rekening met de kans op gelijktijdig voorkomen van deze afwijkingen.

In het geval van de balk op twee kolommen werd er vastgesteld dat de kwadratische methode geen rekening houdt met het feit dat in het meest nadelig geval beide kolommen maximaal naar dezelfde kant afwijken. Hierbij worden deze maximale afwijkingen niet kwadratisch opgeteld want dit is een overschatting van de werkelijkheid.

De opbouw van elk model brengt specifieke gevallen met zich mee. Indien er bijvoorbeeld een model wordt beschouwd waarbij de vloerplaten in de lengterichting op de wanden liggen, dient er gewerkt te worden met de afwijkingen op de wand in plaats de afwijkingen op de kolommen en wanden. Verder zijn er bij een model dat bestaat uit meerdere niveaus bijkomende, strengere toleranties.

Zo is voor kolommen bijvoorbeeld een extra tolerantie op de positie wanneer de kolommen op het tweede niveau.

5 Monte-Carlosimulaties

In dit hoofdstuk wordt het model uit Hoofdstuk 4 bekeken, maar worden er Monte-Carlosimulaties uitgevoerd. In een Monte-Carlosimulatie wordt er geen berekening gemaakt met één inputwaarde, maar wordt een groot aantal simulaties uitgevoerd waarbij de input variabel is. In plaats van één waarde toe te kennen aan iedere afwijkingen, wordt er in dit hoofdstuk telkens een andere, willekeurige waarde genomen en wordt er een groot aantal simulaties uitgevoerd. Iedere afwijking op de bouwelementen die gecombineerd dient te worden, krijgt een statistische verdeling. In iedere simulatie wordt er een willekeurige waarde genomen voor iedere afwijking. Omdat er niet enkel de meest nadelige situatie wordt bekeken, dienen de afwijkingen ook niet kwadratisch gecombineerd te worden. De verschillende afwijkingen worden algebraïsch opgeteld, volgens de formule:

$$s_t = \sum s_i = s_1 + s_2 + \dots + s_n$$

Met s_t de gecombineerde tolerantie en s_i de onderling onafhankelijke afwijkingen.

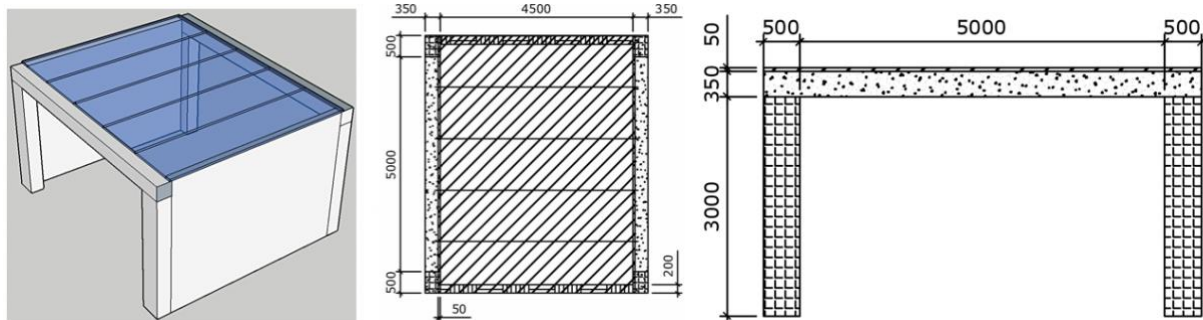
Door een groot aantal simulaties uit te voeren, kunnen de resultaten statistisch worden geanalyseerd. Het gemiddelde, de minima en maxima kunnen worden bepaald. Door het opgebouwde model uit Hoofdstuk 4 volgens een Monte-Carlosimulatie te analyseren, worden er twee belangrijke voordelen bekomen.

Eenzijds wordt niet enkel het resultaat bekeken dat volgt uit de kwadratische combinatie van de meest nadelige situatie, maar kan de probabiteit van die combinatie worden bepaald. Omdat er een groot aantal simulaties wordt uitgevoerd, kan naast bijvoorbeeld de maximumwaarde of het gemiddelde naar iedere waarde worden gekeken, zoals bijvoorbeeld de outputwaarde die door niet meer dan 95% van de gevallen wordt overschreden. Dit kan voor ieder zekerheidspercentage worden gedaan. Het is onrealistisch om een constructie te bouwen waarbij er met een zekerheid van 100% wordt uitgegaan dat er geen situaties voorkomen waarin bouwelementen niet op elkaar afgestemd zijn. De marges waarmee de bouwelementen vervaardigd dienen te worden zijn in dat geval zeer groot. Door het zekerheidspercentage op geen falen terug te brengen naar bijvoorbeeld 95%, worden de marges op de afwijkende afmetingen van de bouwelementen vele malen kleiner. De zeer uitzonderlijke situaties waarin de verschillende afwijkingen de meest nadelige waarde kennen, worden dan buiten beschouwing gelaten.

Anderzijds kan het effect van de statistische verdelingen van de inputparameters worden bekeken. De statistische verdeling van één van de te combineren afwijkingen kan worden aangepast terwijl de anderen constant worden gehouden. Op deze manier wordt duidelijk welke invloed de verschillende inputparameters, in dit geval afwijkingen, hebben op het resultaat. Er kan worden gekeken of de invloed van de verschillende afwijkingen gelijk blijft of net groter of kleiner wordt wanneer er andere bouwelementen worden beschouwd. Verder wordt onderzocht welke de meest belangrijke afwijkingen zijn. Deze eisen de meeste aandacht tijdens de uitvoering. Er wordt dan ook gekeken of de meest belangrijke afwijkingen veranderen wanneer er andere bouwelementen worden beschouwd of wanneer het model wordt gebreed.

Het model wordt weer in dezelfde volgorde geanalyseerd. Dit model wordt nogmaals getoond in Figuur 5.1. Omdat de focus voornamelijk op de Monte-Carlosimulaties ligt, worden deze niet uitgevoerd op iedere stap maar enkel op de meest belangrijke. In de eerste stap wordt de gecombineerde afwijking op één kolom geanalyseerd. Vervolgens wordt de onderlinge relatie tussen twee kolommen en een wand beschouwd. Tot slot wordt de meest uitgebreide stap in het proces

bekeken, namelijk de analyse van de oplegtinge van een breedvloerplaat wanneer deze wordt ondersteund door balken en kolommen. De Monte-Carlosimulaties worden geprogrammeerd in het programma MATLAB.



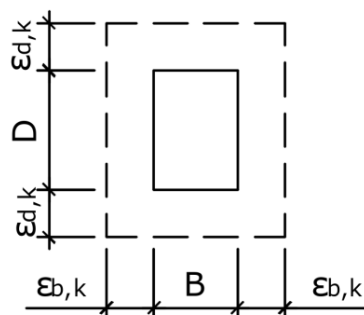
Figuur 5.1: Uiteindelijk model met bijhorende afmetingen

In het model uit Hoofdstuk 4 komen er telkens meerdere afwijkingen voor die invloed hebben op de totale afwijking. Het is waarschijnlijk dat in de realiteit de ene afwijking vaker voorkomt dan de andere.

De Technische Voorlichting 127, Toelaatbare maatafwijkingen, die gepubliceerd is door het WTCB beschrijft een empirisch onderzoek uit 1979 waarin ongeveer 65 000 metingen werden uitgevoerd in fabrieken en op bouwplaatsen. Het betreft een probabilistische bepaling van de voorkomende afwijkingen, gebaseerd op waarnemingen. Om representatieve resultaten te bekomen in de Monte-Carlosimulaties, worden de resultaten uit de Technische Voorlichting 127 gebruikt om de statistische verdeling van de verschillende afwijking op te baseren en de invloed van deze afwijkingen te onderzoeken. Wanneer er in een verder onderzoek in situ data wordt verzameld over het specifieke besproken scenario, dan kan deze worden geïmplementeerd in de werkwijze die in deze masterproef wordt uitgewerkt. De hypothesen over de statistische verdelingen kunnen dan verder worden getoetst.

5.1 Eén kolom

In de eerste stap wordt er gekeken naar de mogelijke afwijkingen die voorkomen bij één kolom. In Hoofdstuk 4 werd de totale afwijking bepaald op drie verschillende plaatsen, namelijk onderaan, in het midden en bovenaan de kolom. Dit werd gedaan om het model stapsgewijs op te bouwen. Ter hoogte van het midden van de kolom komt het grootste aantal mogelijke afwijkingen voor, met als gevolg dat de totale afwijking daar maximaal is. De totale afwijking waarmee de oppervlakte van de zijde van de kolom kan afwijken van het ontwerp wordt getoond in het bovenaanzicht in Figuur 5.2.



Figuur 5.2: Totale afwijking in de breedte- en diepterichting in het midden van de kolom

In Hoofdstuk 4 werd volgens de kwadratische methode bepaald dat $\epsilon_{b,k}$ gelijk is aan 16 mm en $\epsilon_{d,k}$ gelijk is aan 17 mm.

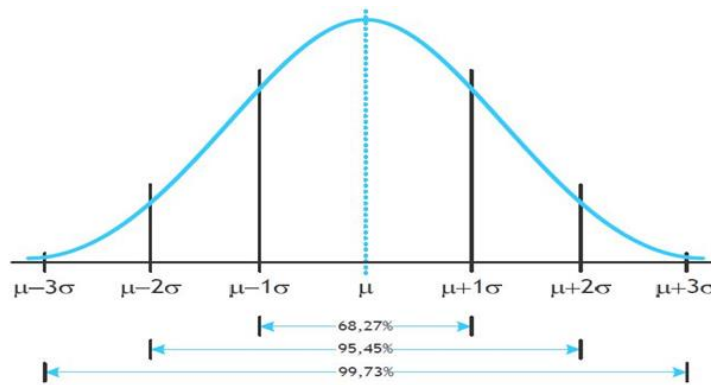
In dit deel wordt de totale afwijking van een kolom benaderd volgens een Monte-Carlosimulatie. Dit wordt voor de breedterichting uitgewerkt. De vier afwijkingen die de positie van de zijde van de kolom beïnvloeden worden beschreven met een statistische verdeling. Vervolgens worden er één miljoen simulaties uitgevoerd zodat een consistent resultaat wordt bekomen. In iedere simulatie wordt er telkens één waarde van iedere afwijking algebraïsch opgeteld.

In het vorige hoofdstuk werd enkel gekeken hoeveel de oppervlakte van de kolom in het meest nadelige geval afweek, weg van de kolom. Wanneer er naar de rechterzijde van de kolom werd gekeken, dan werd er vanuit gegaan dat de kolom te groot is, de positie naar rechts is verschoven, de kolom naar rechts helt en de kromming zich naar rechts voordoet. Omdat deze afwijkingen kwadratisch werden opgeteld, werd er steeds een positieve waarde bekomen. In dit hoofdstuk wordt er wel een onderscheid gemaakt tussen de positieve en negatieve waarde van de afwijking. Wanneer de afwijking wordt beschouwd, dan wordt verondersteld dat deze positief is wanneer deze zich voordoet in de richting die weg gaat van de betonoppervlakte. Wanneer de afwijking zich naar binnen oriënteert ten opzichte van de zijde van de kolom, dan is deze negatief. De gecombineerde afwijking die wordt bepaald zal daarom waarden vertonen van een negatief minimum tot een positief maximum. Dit wilt zeggen dat de betonoppervlakte zich zowel naar binnen als naar buiten kan verplaatsen.

In de analyse van één kolom wordt naar de positieve waarden gekeken van de resultaten. Er wordt dus naar de omtrek rond de kolom gekeken die de kolom niet zal overschrijden wanneer de verschillende afwijkingen gelijktijdig voorkomen. In de eerste plaats wordt er door het uitvoeren van een Monte-Carlosimulatie een zekerheidspercentage bekomen tegenover het resultaat uit de kwadratische methode. Beide resultaten kunnen dan met elkaar vergeleken worden. Vervolgens wordt er, volgens een beredeneerde denkwijze, onderzocht wat de invloed is van de verschillende inputparameters.

Het belangrijkste probleem dat zich nu voordoet is het beschrijven van de afwijkingen met een statistische verdeling. Een randvoorwaarde bij het aannemen van de verdelingen is dat de verschillende afwijkingen ongehinderd kunnen voorkomen. Hiermee wordt bedoeld dat de kolommen bijvoorbeeld niet op de rand van een vloerplaat worden geplaatst, zodat de afwijkingen op de positie enkel in één richting kan voorkomen. Met deze randvoorwaarde in gedacht, is het vanzelfsprekend dat de verschillende afwijkingen gelijkmatig voorkomen wanneer ze zouden worden opgemeten. De kans dat bijvoorbeeld een kolom te veel naar de ene kant wordt geplaatst is even groot als de kans dat de kolom te veel naar de andere kant wordt geplaatst. In dat geval wordt er over een negatieve en positieve afwijking gesproken. De curve die zou worden gevormd is symmetrisch en klokvormig. Om deze reden worden de afwijkingen verdeeld volgens een normaalverdeling. Een normaalverdeling is klokvormig en symmetrisch rond het gemiddelde, zoals getoond in Figuur 5.3.

Om een normaalverdeling te beschrijven is er naast het gemiddelde μ de standaardafwijking σ nodig. De kansdichtheid is symmetrisch rond het gemiddelde, hoog in het midden en wordt naar lage en hoge waarden steeds kleiner. De normaalverdeling geeft aan hoeveel procent van de gevallen binnen een bepaalde waarde liggen. Dit wordt aangegeven met de standaardafwijking. In een normaalverdeling ligt 68,3% van de gevallen in het gebied tussen $\mu - \sigma$ en $\mu + \sigma$, 95,5% van de gevallen tussen $\mu - 2\sigma$ en $\mu + 2\sigma$ en 99,7% van de gevallen tussen $\mu - 3\sigma$ en $\mu + 3\sigma$.



Figuur 5.3: Symmetrische normaalverdeling

Om vervolgens de gecombineerde afwijking op een kolom ter hoogte van het midden te vinden, worden deze afwijkingen in iedere simulatie algebraïsch opgeteld. Dit wordt gedaan volgens de formule:

$$\varepsilon_{b,k} = \frac{\varepsilon_{\text{breedte},k}}{2} + \varepsilon_{\text{pos},k} + \frac{\varepsilon_{\text{vert},k}}{2} + \varepsilon_{\text{krom},k}$$

Met $\varepsilon_{\text{breedte}}$ de afwijking op de breedte van de kolom, ε_{pos} de afwijking op de plaatsing van de kolom, $\varepsilon_{\text{vert}}$ de afwijking op de verticaliteit van één verdieping en $\varepsilon_{\text{krom}}$ de afwijking op de kromming van de kolom. De indices 'k' duiden aan dat het om een kolom gaat. De gecombineerde afwijking kan ook bovenaan worden bepaald. Dit worden met de formule:

$$\varepsilon_{b,k} = \frac{\varepsilon_{\text{breedte},k}}{2} + \varepsilon_{\text{pos},k} + \varepsilon_{\text{vert},k}$$

5.1.1 Gelijkaardige verdeling

Eerst wordt er voor iedere afwijking op gelijkaardige wijze het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald. Zo wordt eerst het resultaat met de kwadratische methode vergeleken. Het gemiddelde μ wordt bepaald door het gemiddelde van de minimale en maximale waarde van de toegestane afwijking te nemen. In Hoofdstuk 4 werd ervan uitgegaan dat de afwijkingen hun tolerantie niet overschreden. Bijgevolg wordt de standaardafwijking zo gekozen, dat 99,7% van de gevallen binnen de toegestane afwijking blijven. Dit wilt zeggen dat de toegestane afwijking gelijk is aan drie maal de standaardafwijking.

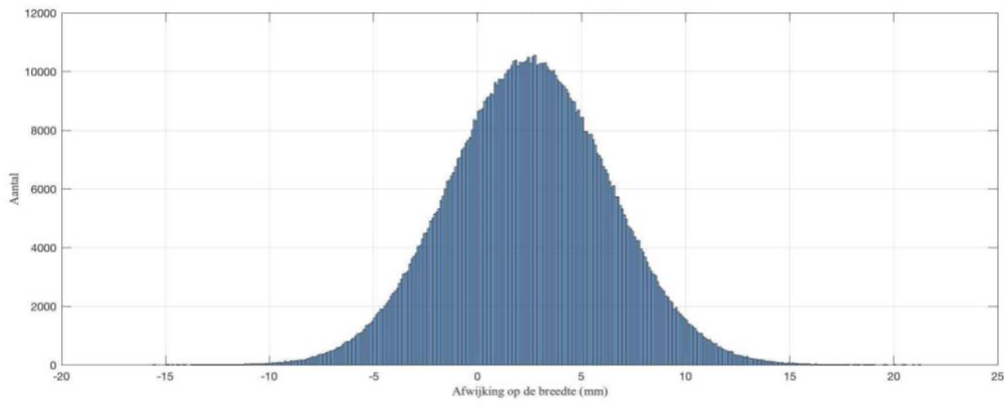
De verschillende toleranties op de afwijkingen hebben, uitgezonderd voor de breedte, dezelfde positieve als negatieve waarde. Daarom wordt het gemiddelde voor deze afwijkingen 0. De standaardafwijking wordt gelijk genomen aan één derde van de toegestane afwijking. Dit is geval voor de afwijking op de positie, kromming en verticaliteit. De positieve en negatieve waarde voor de toegestane afwijking op de dwarsafmeting verschillen. Ook hiervan wordt het gemiddelde genomen om het gemiddelde van de verdeling te bepalen. Het verschil van de toegestane afwijking en dit gemiddelde wordt door drie gedeeld om de standaardafwijking te bekomen. Omdat de toegestane afwijking naar onder kleiner is dan de toegestane afwijking naar boven, is het gemiddelde van beiden altijd positief. Er wordt dus verondersteld dat gemiddeld genomen de kolom met een te grote breedte wordt vervaardigd. De kans dat de bekisting van de kolom te klein of te groot wordt gemaakt is even groot, dus de verdeling moet een normaalverdeling zijn. Wanneer het gemiddelde niet gelijk is aan het gemiddelde van de negatieve en positieve tolerantie, dan kan er geen normaalverdeling worden gemaakt waarbij de toleranties op dezelfde afstand liggen van het gemiddelde.

Het gemiddelde en de standaardafwijking wordt voor de verschillende afwijking weergegeven in Tabel 5.1. De werkwijze wordt eerst uitgelegd voor de totale afwijking te bepalen in de breedterichting.

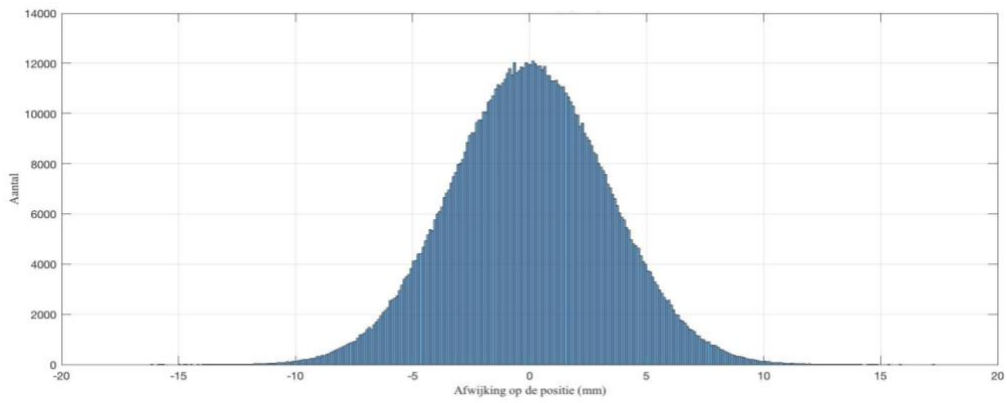
Tabel 5.1: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie

Afwijking op	Tolerantie Δ (mm)	Gemiddelde μ (mm)	Standaardafwijking σ (mm)
Breedte	-9/+14	$\frac{-9 + 14}{2} = +2,5$	$\frac{14 - 2,5}{3} = \frac{11,5}{3}$
Positie	± 10	$\frac{-10 + 10}{2} = 0$	$\frac{10 - 0}{3} = \frac{10}{3}$
Verticaliteit	± 8	$\frac{-8 + 8}{2} = 0$	$\frac{8 - 0}{3} = \frac{8}{3}$
Kromming	± 10	$\frac{-10 + 10}{2} = 0$	$\frac{10 - 0}{3} = \frac{10}{3}$

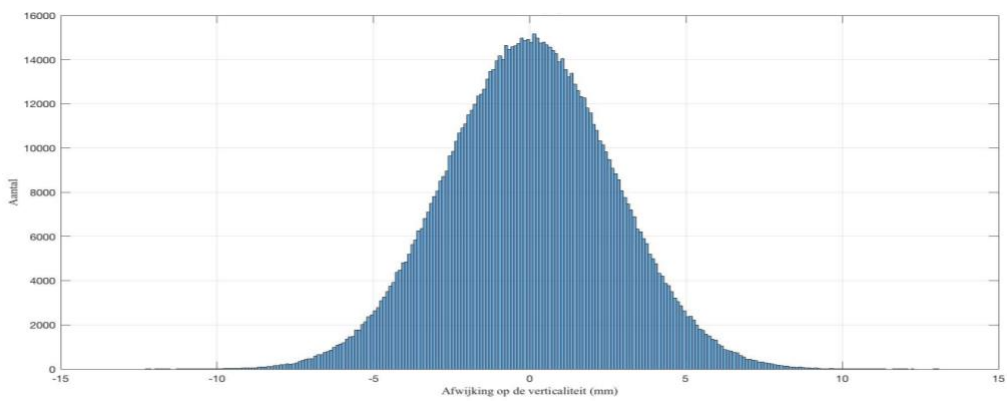
Met deze waarden kan voor iedere afwijking een normaalverdeling worden gemaakt. De afwijking op de breedte, positie, verticaliteit en kromming van een kolom worden respectievelijk getoond in Figuur 5.4, Figuur 5.5, Figuur 5.6 en Figuur 5.7.



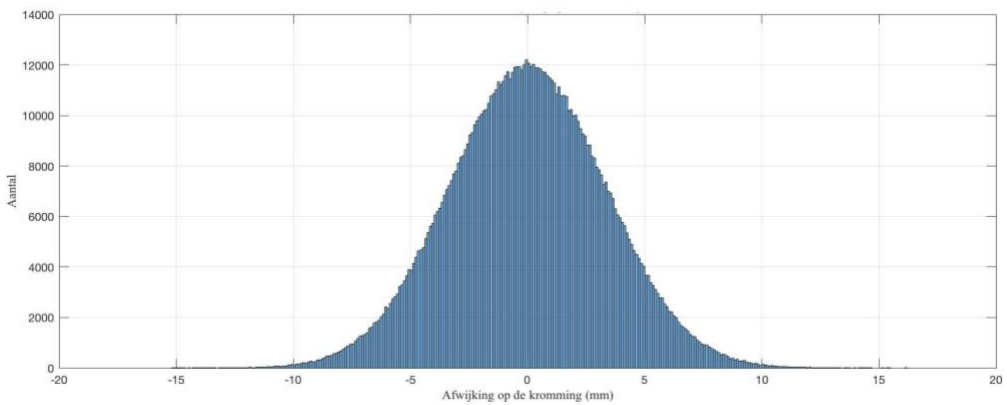
Figuur 5.4: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de breedte van een kolom



Figuur 5.5: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de positie van een kolom

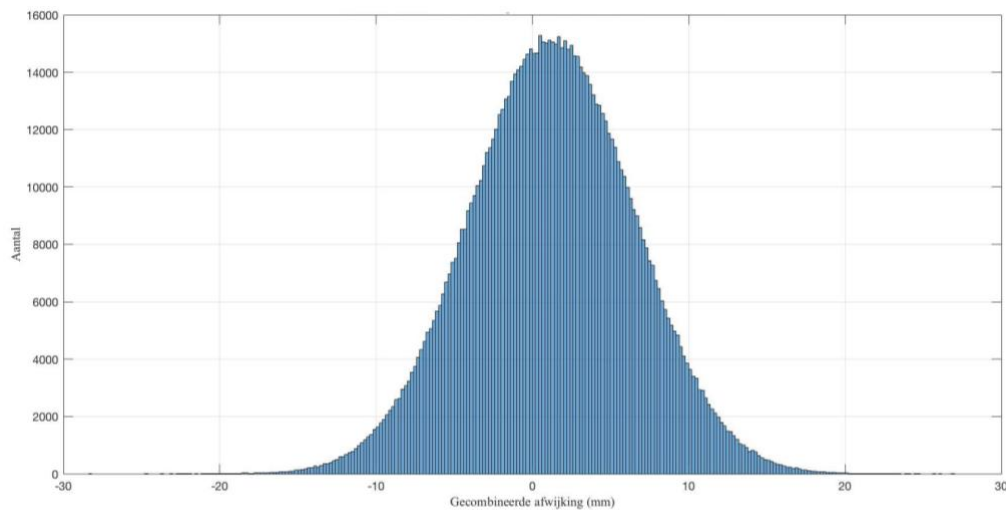


Figuur 5.6: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de verticaliteit van een kolom

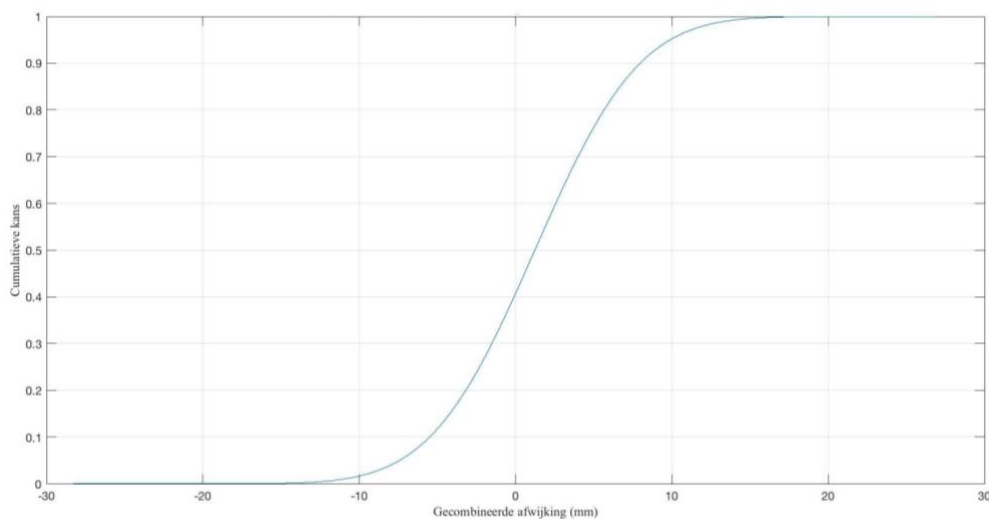


Figuur 5.7: Kansdichtheidsfunctie van de afwijking op de kromming van een kolom

Vervolgens worden de simulaties uitgevoerd. De gecombineerde afwijking wordt ter hoogte van het midden en bovenaan één miljoen keer berekend. Voor de resultaten ter hoogte van het midden worden verschillende grafieken gemaakt. Er wordt een kansdichtheidsfunctie gevonden, die wordt getoond in Figuur 5.8. Naast de kansdichtheidsfunctie kan er een cumulatieve distributiefunctie worden gemaakt, zoals getoond in Figuur 5.9. In deze grafiek worden op de horizontale as alle resultaten van klein naar groot geordend. De verticale as geeft de kans weer op het resultaat dat op de horizontale as staat.



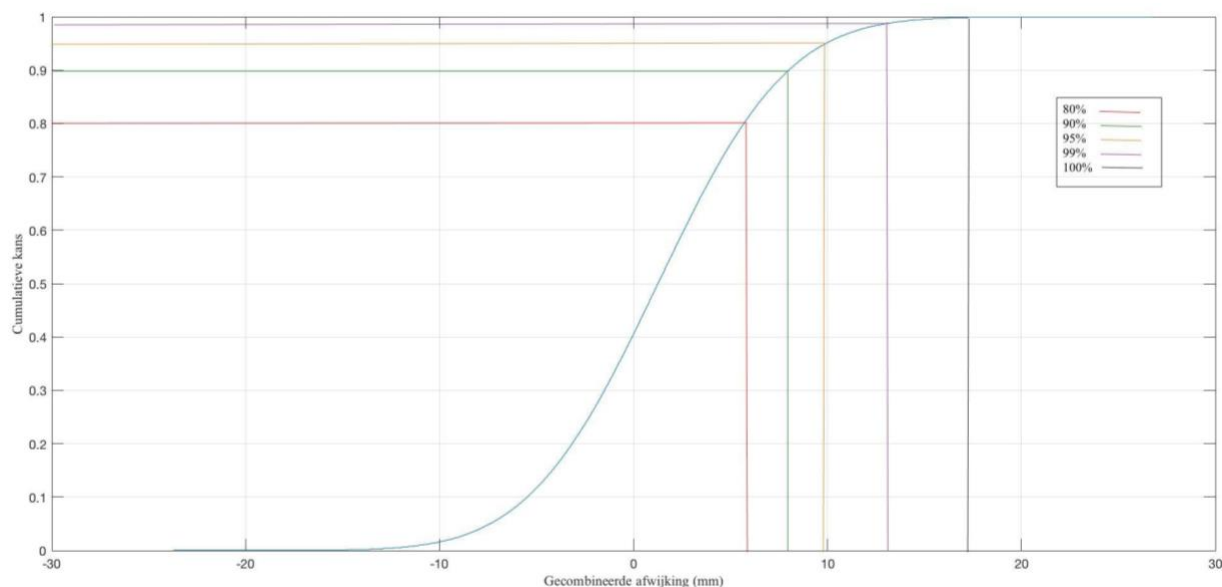
Figuur 5.8: Kansdichtheidsfunctie van de gecombineerde afwijking op een kolom



Figuur 5.9: Cumulatieve distributiefunctie van de gecombineerde afwijking op een kolom

De verschillende gecombineerde afwijkingen die uit de simulaties volgen, vormen een normaalverdeling. Dit is een verwacht resultaat omdat de vier inputvariabelen ook een telkens een normaalverdeling vormen. Omdat er één miljoen afwijkingen worden berekend, kunnen er verschillende belangrijke waarden worden onderzocht, in tegenstelling tot het resultaat dat volgt uit de kwadratische methode. Het minimum en maximum kan worden bekeken, maar veel belangrijker is dat nu ook iedere waarde van de gecombineerde afwijking kan worden gevonden die overeenkomt met een bepaalde kans op voorkomen. Concreet betekent dit dat de waarde kan worden gezocht die bijvoorbeeld in 80% van de gevallen niet wordt overschreden. Dit kan worden gedaan voor ieder zekerheidspercentage. Dit is nuttig omdat bij grote gecombineerde afwijkingen de frequentie waarmee deze voorkomt sterk afneemt.

De waarde van de gecombineerde afwijking die met een bepaalde zekerheid overeenkomt, wordt voor verschillende zekerheidspercentages gezocht. Dit wordt in de verschillende simulaties telkens met dezelfde waarden gedaan, zodat de resultaten vergeleken kunnen worden. Zoals in de cumulatieve distributiefunctie uit Figuur 5.9 kan worden gezien, stijgt de waarde van de gecombineerde afwijking aanzienlijk wanneer de kans op voorkomen 100% nadert. Dit is de meest interessante zone om te analyseren. Om deze reden wordt het resultaat gezocht dat overeenkomt met een zekerheid van 80%, 90%, 95%, 99% en 100%. Deze waarden worden aangeduid in de cumulatieve distributiefunctie zoals getoond in Figuur 5.10. Uit de MATLAB code kunnen deze waarden worden gegenereerd. De resultaten worden weergegeven in Tabel 5.2.



Figuur 5.10: Cumulatieve distributiefunctie met aanduiding van de beschouwde waarden

Tabel 5.2: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage

Zekerheidspercentage	In het midden	Bovenaan
	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)
80%	5,7	5,2
90%	8,0	7,2
95%	9,9	8,9
99%	13,5	12,1
100%	26,7	22,7
Kwadratisch	16,3	14,6

Dit zijn de resultaten die volgen uit de simulatie waarbij de vier afzonderlijke afwijkingen telkens worden beschreven met een normaalverdeling, waarbij 99,7% van de afwijkingen hun tolerantie niet overschrijdt. Wanneer de resultaten worden bekeken kunnen verschillende conclusies worden getrokken.

Omdat de vier inputvariabelen normaal verdeeld zijn, is de output, de gecombineerde afwijking, ook normaal verdeeld. Deze heeft ook een gemiddelde μ waarrond de kansdichtheid hoog is en lager wordt naar lage en hoge waarden. De zone rond het gemiddelde is niet interessant om te analyseren, maar de zone waar de gecombineerde afwijking hoge waarden heeft is wel interessant. In 80% van de gevallen is de gecombineerde afwijking in het midden niet groter dan 5,7 mm en 5,2 mm bovanaan. Voor 90% van de gevallen is dit respectievelijk 8,0 en 7,2 mm. Deze waarde loopt sneller op wanneer naar een

zekerheid van 95% en 99% procent wordt gekeken. Uit de kwadratische methode volgde een gecombineerde afwijking in het midden van 16,0 mm. Dit komt overeen met een zekerheidspercentage van 99,75%. Ook de 14,6 mm die uit de kwadratische methode volgt bovenaan komt overeen met een zekerheidspercentage van 99,75%.

De resultaten die uit deze Monte-Carlosimulatie volgen zijn afhankelijk van het soort beton (geprefabriceerd architectonisch, geprefabriceerd niet-architectonisch of ter plaatse gestort), de afmeting van de kolom, de tolerantieklasse die wordt gehanteerd en de statistische verdeling die de verschillende afwijkingen krijgen. Wanneer deze parameters reeds worden bepaald tijdens het modeleren van de kolom in een virtueel model, dan kan deze werkwijze worden geïmplementeerd in het model zodat de gecombineerde afwijking automatisch als extra eigenschap van de kolom kan worden weergegeven. Het zekerheidspercentage kan ook worden ingegeven om de overeenkomstige gecombineerde afwijking te bepalen.

Een ander voordeel van een Monte-Carlosimulatie is dat de invloed van de inputvariabelen kan worden onderzocht. Dit wordt in de volgende stap gedaan. Het is waarschijnlijk dat de verschillende afwijkingen niet even vaak voorkomen en allemaal voor 99,7% binnen hun tolerantie vallen. In de volgende stap worden de afwijking verdeeld waarbij gebaseerd wordt op het onderzoek uit de Technische Voorlichting 127.

5.1.2 Verdelingen volgens Technische Voorlichting 127

In dit deel wordt de Technische Voorlichting 127 gebruikt om de verdeling van de afwijkingen op te baseren. Hierin wordt voor iedere afwijking het interval waarbinnen 95% zich bevindt beschreven. Bij een normaalverdeling komt dit overeen met twee maal de standaardafwijking. De grenswaarde die 95% van de afwijkingen niet overschrijdt wordt daarom door twee gedeeld om de standaardafwijking te bekomen. De negatieve en positieve grens hebben steeds dezelfde absolute waarde. De verdelingen hebben daarom telkens een gemiddelde μ van 0 mm. De grenswaarde is in sommige gevallen afhankelijk van de hoogte H van de kolom en worden beschreven in Tabel 5.3. De waarde voor de afwijking op de positie werden niet opgemeten maar theoretisch afgeleid uit de bekomen resultaten van de overige metingen. Daarom wordt deze cursief aangeduid in de tabel.

Tabel 5.3: Afwijkingen volgens TV 127

Afwijking op	95%-zekerheidsgrens (mm)
Breedte	± 8
<i>Positie</i>	± 10
Verticaliteit	$\pm 2H \leq \pm 12$
Kromming	$\pm H \geq \pm 5$

Uit deze waarden blijkt dat de afwijking op de verticaliteit meer toeneemt dan de afwijking op de kromming naarmate de kolom hoger wordt. Ook wordt in het midden de afwijking op de verticaliteit door twee gedeeld. Bovenaan de kolom heeft de kromming geen invloed op de gecombineerde afwijking, maar telt de afwijking op de verticaliteit wel volledig. Op verschillende hoogtes is daarom de gecombineerde afwijking bovenaan groter dan ter hoogte van het midden.

De hoogte waarop de gecombineerde afwijking dient te worden beschouwd is afhankelijk van welke relatie tussen de bouwelementen wordt onderzocht. Wanneer bijvoorbeeld een wand tussen twee kolommen wordt geplaatst, dient de kleinste tussenafstand tussen de kolommen te worden bepaald. Deze tussenafstand kan dan ter hoogte van het midden of bovenaan het kleinst zijn. Wanneer enkel de positie van de bovenzijde van de kolom een rol speelt, wordt gekeken naar de gecombineerde

afwijking bovenaan. In dit deel wordt de invloed op de gecombineerde afwijking bovenaan en in het midden van de kolom onderzocht. De parameters van de verschillende verdelingen worden weergegeven in Tabel 5.4.

Tabel 5.4: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie

		Technische Voorlichting 127	
Afwijking op	Tolerantie Δ (mm)	95%-zekerheidsgrens (mm)	Standaardafwijking σ (mm)
Breedte	-9/+14	± 8	4,0
Positie	± 10	± 10	5,0
Verticaliteit	± 8	± 6	3,0
Kromming	± 10	± 5	2,5

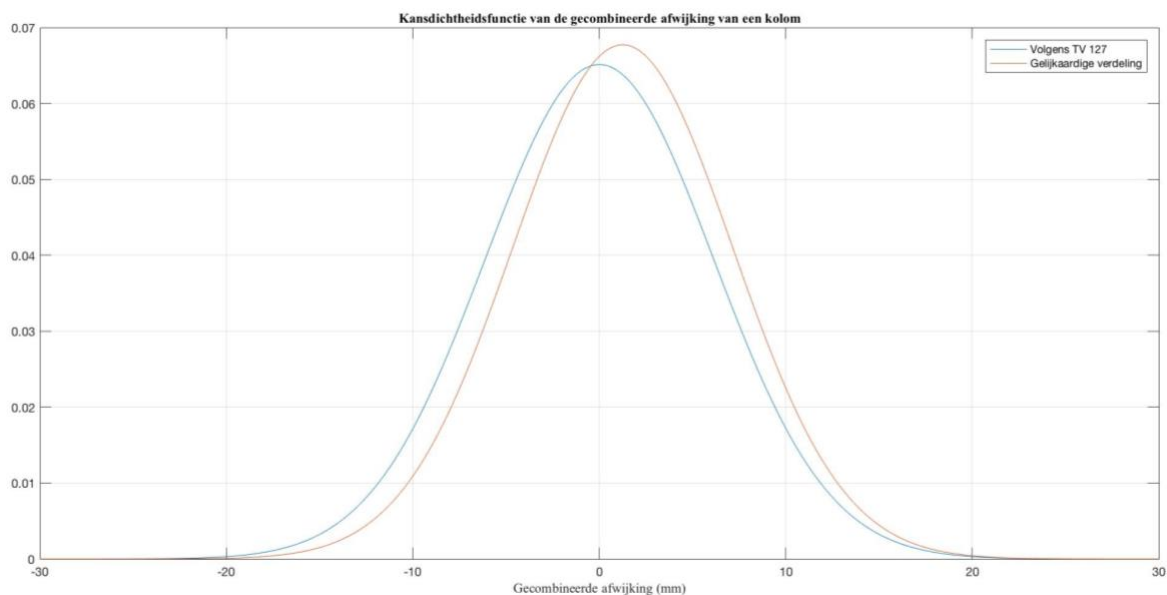
De resultaten die volgen uit één miljoen simulaties met deze verdelingen worden weergegeven in Tabel 5.5 en worden vetgedrukt. De MATLAB code is terug te vinden in Bijlage A. De resultaten uit de vorige paragraaf worden ook in de tabel getoond. De verdelingen zijn gebaseerd op empirisch onderzoek uit TV 127. Daarom is het resultaat dat volgt uit deze simulaties betrouwbaar en kunnen er conclusies worden getrokken.

Tabel 5.5: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage

	In het midden		Bovenaan	
	Gelijkaardig	TV 127	Gelijkaardig	TV 127
Zekerheidspercentage	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)
80%	5,7	5,1	5,2	5,2
90%	8,0	7,8	7,2	7,9
95%	9,9	10,1	8,9	10,1
99%	13,5	14,2	12,1	14,3
100%	26,7	28,0	22,7	28,4
Kwadratisch	16,3		14,6	

Er kan worden opgemerkt dat de gecombineerde afwijking bovenaan de kolom groter is dan in het midden. Voor de gecombineerde afwijking die volgt uit de gelijkaardige verdelingen is dit andersom. De waarden die volgen uit de kwadratische methode, 16,3 mm in het midden en 14,6 mm bovenaan, komen beiden overeen met een zekerheidspercentage van respectievelijk 99,75 en 99,10%. Het resultaat uit de kwadratische methode komt daarom goed overeen met de werkelijkheid. Het enige verschil is dat uit de Monte-Carlosimulaties volgt dat het resultaat in het midden groter is dan bovenaan de kolom. Dit is zichtbaar in de zekerheidspercentages waarmee de kwadratische methode overeenkomt.

Het verschil tussen het resultaat dat volgt uit TV 127 en uit gelijkaardige verdelingen is niet groot. Naarmate het zekerheidspercentage stijgt, stijgt het resultaat volgens TV 127 sneller dan volgens de gelijkaardige verdelingen. Dit is te verklaren door het verschil in de vorm van kansdichtheidsfuncties. De kansdichtheidsfunctie ter hoogte van het midden van de gecombineerde afwijking volgens gelijkaardige verdelingen en volgens TV 127 worden getoond in Figuur 5.11.



Figuur 5.11: Kansdichtheidsfunctie van de gecombineerde afwijking op een kolom

Voor de gelijkwaardige verdelingen heeft de gecombineerde afwijking een gemiddelde dat groter is dan voor de verdelingen volgens TV 127. De standaardafwijking daarentegen is wel kleiner, dus de kansdichtheidsfunctie is smaller. Dit wilt zeggen dat voor de afwijking volgens TV127 de waarde van het resultaat met een grotere stapgrootte stijgt bij eenzelfde toename van het zekerheidspercentage.

5.1.3 Invloed van de afwijkingen

In de vorige stap werd de gecombineerde afwijking bepaald volgens verschillende zekerheidspercentages, waarbij opmetingen uit een empirisch onderzoek aan de basis liggen. In deze stap wordt bekeken welke afwijkingen de grootste invloed hebben op het resultaat en waarvan ze afhankelijk zijn. Er wordt tevens gekeken wat het effect is wanneer iedere afwijking met dezelfde factor wordt verkleind. Er wordt telkens voor één afwijking het interval met 20% verkleind terwijl de andere afwijkingen niet worden aangepast. De aanpassing van de afwijking die het resultaat het meest beïnvloedt is de meest belangrijke afwijking. Eerst wordt dit gedaan met de resultaten uit onderdeel 5.1.2.

In de tweede kolom in Tabel 5.6 worden de standaardafwijkingen weergegeven die volgen uit Technische Voorlichting 127. In de derde kolom worden de verkleinde standaardafwijkingen getoond. In de vierde en vijfde kolom wordt weergegeven hoeveel de gecombineerde afwijking respectievelijk in het midden en bovenaan verkleint wanneer de overige afwijkingen behouden blijven.

Tabel 5.6: Invloed van de verschillende afwijkingen

Afwijking op	Standaardafwijking σ (mm)	Verkleinde standaardafwijking σ (mm)	In het midden	Bovenaan
			Verkleining van de gecombineerde afwijking	
Breedte	4,0	3,2	2%	2%
Positie	5,0	4,0	13%	13%
Verticaliteit	3,0	2,4	1%	1%
Kromming	2,5	2,0	4%	/

De gecombineerde afwijking is voor een kolom met deze hoogte bovenaan en in het midden gelijk. Het effect van het aanpassen van de verdelingen ook. Het is vanzelfsprekend dat de afwijking op de kromming geen invloed heeft op het resultaat bovenaan de kolom.

Er kan duidelijk worden gezien dat de afwijking op de positie de grootste invloed heeft op het resultaat. Wanneer de kolom 20% nauwkeuriger wordt gepositioneerd, dan daalt de gecombineerde afwijking met 13%. Voor de breedte, verticaliteit en kromming is dit respectievelijk 2, 1 en 4%. Dit is zo omdat de verdeling van de afwijking op de positie weider is en een grotere standaardafwijking heeft. De procentuele verbetering in het resultaat ten gevolge van de aanpassing van deze afwijking is ook afhankelijk van de verhouding tussen de verschillende standaardafwijkingen.

De afwijking op de positie is niet altijd de grootste afwijking. Dit is afhankelijk van de hoogte van de kolom, zoals te zien is in Tabel 5.7 (tabel met de waarden zoals uit TV 127). De afwijking op de breedte en de positie hebben dezelfde standaardafwijking, ongeacht de hoogte van de kolom. De afwijking op de verticaliteit en de kromming zijn afhankelijk van de hoogte. Er worden een aantal voorbeelden gegeven in Tabel 5.7.

Tabel 5.7: Afwijkingen op kolommen van verschillende hoogtes

Hoogte van de kolom (m)	Standaardafwijking σ (mm)			
	Breedte	Positie	Verticaliteit	Kromming
3	4,0	5,0	3,0	2,5
4	4,0	5,0	4,0	2,5
5	4,0	5,0	5,0	2,5
8	4,0	5,0	6,0	4,0
12	4,0	5,0	6,0	6,0
20	4,0	5,0	6,0	10,0

Het is niet zo dat de afwijking met de grootste standaardafwijking de meest maatgevende is. Dit hangt af van de manier waarop de afwijkingen worden gecombineerd. Wanneer de afwijking op de verticaliteit het grootst is, kan nog steeds de afwijking op de positie de meest maatgevende zijn ter hoogte van het midden omdat de verticaliteit met factor twee minder meetelt bij het combineren. De afwijking op de breedte is nooit de meest wijde en daarom ook nooit maatgevend. Wanneer de kolom ter hoogte van het midden wordt beschouwd, dan is de afwijking op de positie het meest maatgevend wanneer de kolom kleiner is dan tien meter. Bij een grotere hoogte wordt de afwijking op de kromming het meest maatgevend.

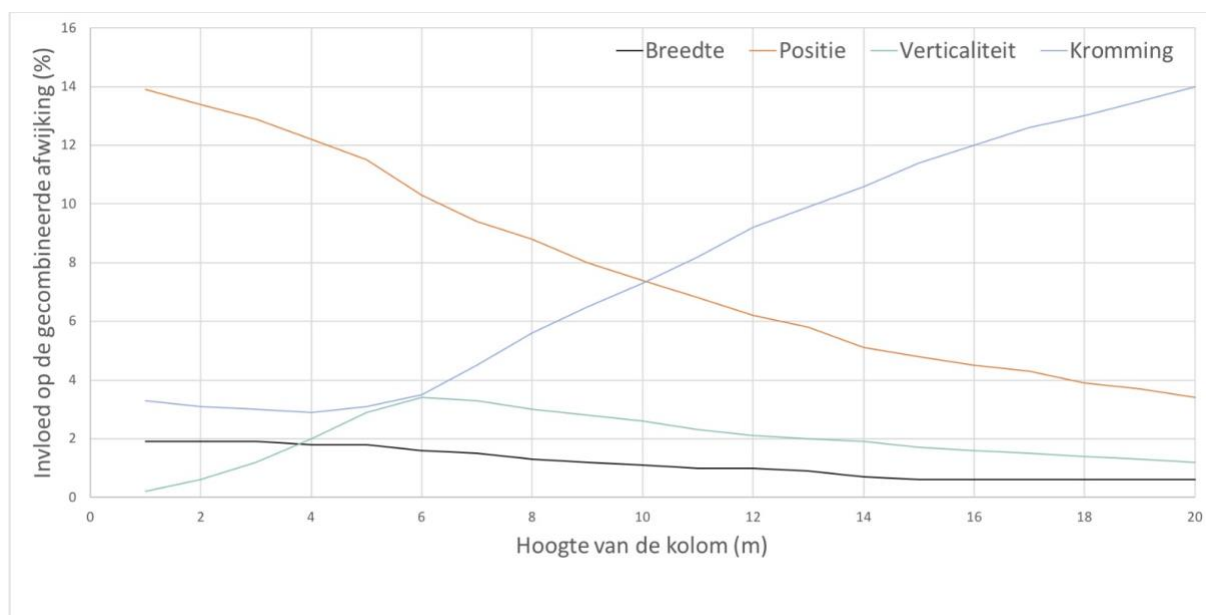
Bovenaan de kolom is dit anders. De afwijking op de positie en de verticaliteit wegen even zwaar door in de combinatie dus de grootste van de twee is het meest bepalend. Voor kolommen met een hoogte tot vijf meter is de verdeling van de afwijking op de positie het meest weid en dus het meest maatgevend. Voor kolommen die groter zijn dan vijf meter is de afwijking op de verticaliteit het meest bepalend.

De invloed die de meest belangrijke afwijking uitoefent op het resultaat is niet altijd even groot. Wanneer het midden van een kolom van bijvoorbeeld drie of acht meter hoog wordt bekeken, dan is in beide gevallen de positie het meest maatgevend. Wanneer de afwijking op de positie met 20% zou verkleind worden, dan is het effect op de gecombineerde afwijking verschillend voor de twee kolommen. De invloed van de afwijkingen is afhankelijk van de verhouding tussen de standaardafwijkingen van de verschillende verdelingen. Algemeen kan er worden gezegd dat naarmate de kolom groter wordt, de invloed van positie afneemt en de invloed van de kromming toeneemt ter

hoogte van het midden. Bovenaan de kolom geldt dit ook maar daar neemt de invloed van de verticaliteit toe. Om dit te visualiseren wordt het effect van het verkleinen van de afwijkingen met 20% getoond in functie van de hoogte, zowel bovenaan (Figuur 5.12) als in het midden (Figuur 5.13).



Figuur 5.12: Het effect van het verkleinen van de afwijking i.f.v. de hoogte bovenaan de kolom



Figuur 5.13: Het effect van het verkleinen van de afwijking i.f.v. de hoogte in het midden van de kolom

Om dit aan te tonen worden nog twee voorbeelden gegeven. Er wordt een kolom van acht meter en een van twaalf meter hoog beschouwd. Eerst wordt de kolom van acht meter bekeken. De gecombineerde afwijking wordt bepaald ter hoogte van het midden en bovenaan de kolom. De resultaten worden weergegeven in Tabel 5.8.

Tabel 5.8: Afwijking op een kolom van 8 m bij een opgegeven zekerheidspercentage

	In het midden	Bovenaan
Zekerheidspercentage	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)
80%	6,2	6,8
90%	9,4	10,3
95%	12,1	13,2
99%	17,1	18,7
100%	36,9	37,7
Kwadratisch	16,9	17,1

De verschillende afwijkingen worden om de beurt met 20% verkleind, terwijl de overige afwijkingen niet veranderen. Het effect daarvan wordt getoond in Tabel 5.9. Dit wordt zowel in het midden van de kolom als bovenaan gedaan. Er wordt ook nog gekeken naar het verschil met de kwadratische methode. Het resultaat uit de kwadratische methode komt in het midden en bovenaan overeen met een zekerheidspercentage van respectievelijk 98,3 en 98,3%.

Tabel 5.9: Invloed van de verschillende afwijkingen

Afwijking op	Standaardafwijking σ (mm)	Verkleinde standaardafwijking σ (mm)	In het midden	Bovenaan
			Verkleining van de gecombineerde afwijking	
Breedte	4,0	3,2	2%	< 1%
Positie	5,0	4,0	9%	7%
Verticaliteit	6,0	4,8	3%	11%
Kromming	4,0	3,2	5%	/

Het is duidelijk dat ter hoogte van het midden de afwijking op de positie de meest maatgevende is. Wanneer deze afwijking met 20% wordt verkleind, dan wordt de gecombineerde afwijking 9% kleiner. Voor een zekerheidspercentage van 99% zou dit betekenen dat de gecombineerde afwijking niet 17,1 mm maar 15,6 mm zou zijn. Wanneer de twee meest maatgevende afwijkingen, de positie en kromming, samen zouden worden verbeterd, dan zou het resultaat 14% verkleinen. De afwijking op de breedte en de verticaliteit hebben nagenoeg geen invloed.

Bovenaan de kolom is de afwijking op de verticaliteit de meest maatgevende. Door deze 20% te verkleinen zou de gecombineerde afwijking voor een zekerheidspercentage van 99% van 18,7 mm naar 16,6 mm gaan. Wanneer de afwijking op de positie en verticaliteit samen zouden worden verbeterd, dan zou het resultaat 19% verkleinen. De afwijking op de breedte heeft nagenoeg geen invloed op de resultaat. Zowel bovenaan als in het midden wordt het effect groter wanneer de twee meest maatgevende afwijkingen worden verbeterd.

Tot slot wordt een kolom van twaalf meter hoog beschouwd. De gecombineerde afwijking wordt bepaald ter hoogte van het midden en bovenaan de kolom. De resultaten worden weergegeven in Tabel 5.10.

Tabel 5.10: Afwijking op een kolom van 12 m bij een opgegeven zekerheidspercentage

	In het midden	Bovenaan
Zekerheidspercentage	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)	$\varepsilon_{b,k}$ (mm)
80%	7,2	6,8
90%	11,0	10,3
95%	14,1	13,2
99%	20,0	18,7
100%	39,9	38,1
Kwadratisch	18,3	17,8

Het effect van het afzonderlijk verkleinen van iedere afwijking met 20% wordt getoond in Tabel 5.11.

Tabel 5.11: Invloed van de verschillende parameters

Afwijking op	Standaardafwijking σ (mm)	Verkleinde standaardafwijking σ (mm)	In het midden	Bovenaan
			Verkleining van de gecombineerde afwijking	
Breedte	4,0	3,2	1%	1%
Positie	5,0	4,0	7%	7%
Verticaliteit	6,0	4,8	2%	10%
Kromming	6,0	4,8	10%	/

In het midden van de kolom is de afwijking op de kromming het meest maatgevend. Voor een zekerheidspercentage van 99% zou de gecombineerde afwijking verkleinen van 20,0 mm tot 18,0 mm. Wanneer de afwijking op de positie en de kromming zouden worden verkleind, dan wordt het resultaat met 16% kleiner.

Bovenaan is de afwijking op de verticaliteit het meest maatgevend. De gecombineerde afwijking verandert voor een zekerheidspercentage van 99% van 18,7 mm in 16,8 mm. Het verkleinen van de afwijking op de positie en de verticaliteit zou het resultaat met 19% doen verminderen.

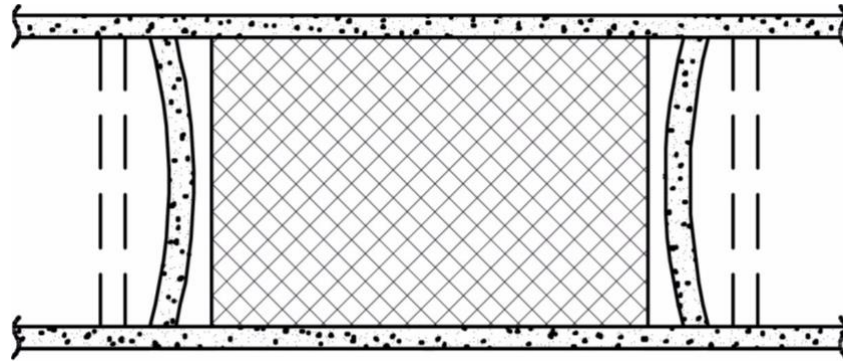
Wanneer de twee meest maatgevende afwijkingen samen voorkomen, dan is het effect op het resultaat niet hetzelfde als de som van het effect van de afzonderlijke verbeteringen. Het is afhankelijk van de verhouding tussen de standaardafwijkingen van de verschillende verdelingen. Hoe groter het verschil tussen de meest maatgevende afwijking(en) en de overige afwijkingen, hoe groter het effect op het resultaat.

5.2 Twee kolommen en een wand

In dit deel wordt de afwijking op de onderlinge relatie tussen meerdere bouwelementen onderzocht. Net zoals in Hoofdstuk 4 de onderlinge relatie tussen twee kolommen met daartussen een wand kwadratisch werd geanalyseerd, wordt dit nu benaderd met een Monte-Carlosimulatie.

In de eerste plaats wordt er door het uitvoeren van een Monte-Carlosimulatie een zekerheidspercentage bekomen tegenover het resultaat uit de kwadratische methode. Vervolgens wordt de invloed van de verschillende afwijkingen van de kolom op de onderlinge relatie tussen twee kolommen en een wand bestudeerd. De verdelingen van de afwijkingen worden gebaseerd op het empirisch onderzoek uit Technische Voorlichting 127.

In Hoofdstuk 4 werd reeds gezegd dat er wordt aangenomen dat het om een geprefabriceerde dragende wand gaat die tussen twee kolommen wordt geplaatst. Wanneer de tussenafstand tussen de kolommen minimaal is en de lengte van de wand maximaal, bestaat de kans dat de wand niet tussen de kolommen past. Wanneer deze twee situaties gelijktijdig voorkomen, dan kan de afwijking ε_{k-w} worden bepaald waarmee de wand korter dient te worden vervaardigd zodat deze past tussen de kolommen. Deze situatie wordt getoond in Figuur 5.14. In Hoofdstuk 4 werd volgens de kwadratische methode bepaald dat ε_{k-w} gelijk is aan 28 mm.



Figuur 5.14: Twee kolommen met een wand tussen

Zoals reeds eerder aangehaald zijn de afwijkingen op de kolom positief wanneer ze de positie van de zijde naar buiten verplaatsen. In dit geval wordt de tussenafstand tussen de kolommen minimaal. Voor de wand geldt hetzelfde principe. Wanneer de afwijking ervoor zorgt dat de wand een grotere lengte heeft, krijgt de afwijking een positief teken. Een positief gecombineerde afwijking geeft aan met welke afwijking de wand niet meer tussen de kolommen past. Een negatieve waarde geeft aan hoeveel ruimte er net over is tussen de wand en de kolommen ter hoogte van het midden.

Het is vanzelfsprekend dat de gecombineerde afwijking wordt bepaald op de meest nadelige hoogte. Daarom wordt zowel bovenaan als ter hoogte van het midden gekeken, waarna de het grootste resultaat wordt beschouwd. De verschillende afwijkingen worden algebraïsch opgeteld. De gecombineerde afwijking ε_{k-w} ter hoogte van het midden wordt op de volgende wijze bepaald:

$$\varepsilon_{k-w} = \frac{\varepsilon_{\text{breedte},k1}}{2} + \varepsilon_{\text{pos},k1} + \frac{\varepsilon_{\text{vert},k1}}{2} + \varepsilon_{\text{krom},k1} + \frac{\varepsilon_{\text{breedte},k2}}{2} + \varepsilon_{\text{pos},k2} + \frac{\varepsilon_{\text{vert},k2}}{2} + \varepsilon_{\text{krom},k2} + \varepsilon_{\text{lengte},w}$$

Bovenaan wordt de gecombineerde afwijking ε_{k-w} op de volgende wijze bepaald:

$$\varepsilon_{k-w} = \frac{\varepsilon_{\text{breedte},k1}}{2} + \varepsilon_{\text{pos},k1} + \varepsilon_{\text{vert},k1} + \frac{\varepsilon_{\text{breedte},k2}}{2} + \varepsilon_{\text{pos},k2} + \varepsilon_{\text{vert},k2} + \varepsilon_{\text{lengte},w}$$

5.2.1 Verdelingen volgens Technische Voorlichting 127

In deze stap worden de verschillende afwijkingen gecombineerd waarbij hun verdeling is gebaseerd op Technische Voorlichting 127. Ook voor de wand wordt de 95%-grenswaarde beschreven in functie van zijn lengte L . Deze wordt weergegeven in Tabel 5.12.

Tabel 5.12: Afwijkingen volgens TV 127

Afwijking op	95%-zekerheidsgrens (mm)
Lengte wand	$\pm(6 + L)$

Alle verdelingen van de afwijkingen kunnen nu worden beschreven. De waarden worden weergegeven in Tabel 5.13.

Tabel 5.13: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie

		Technische Voorlichting 127	
Afwijking op	Tolerantie Δ (mm)	95%-zekerheidsgrens (mm)	Standaardafwijking σ (mm)
Breedte kolom	-9/+14	± 8	4,0
Positie kolom	± 10	± 10	5,0
Verticaliteit kolom	± 8	± 6	3,0
Kromming kolom	± 10	± 5	2,5
Lengte wand	± 16	± 11	5,5

Vervolgens worden één miljoen simulaties uitgevoerd. De MATLAB code is terug te vinden in Bijlage B. De resultaten die overeenkomen met de gebruikelijke zekerheidspercentages worden getoond in Tabel 5.14.

Tabel 5.14: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage

Zekerheidspercentage	In het midden	Bovenaan
	ε_{k-w} (mm)	ε_{k-w} (mm)
80%	8,6	8,7
90%	13,1	13,2
95%	16,9	17,0
99%	23,9	24,0
100%	50,9	51,6
Kwadratisch	28,0	26,6

De waarden die in Tabel 5.14 worden getoond is de lengte waarmee de wand korter dient te worden vervaardigd om met de overeenkomende zekerheid te kunnen zeggen dat er geen conflict is tussen de wand en de kolommen. De simulaties zijn gebaseerd op empirisch onderzoek en zijn representatief voor de werkelijkheid.

Er wordt opgemerkt dat er amper een verschil is tussen de gecombineerde afwijking bovenaan en in het midden. Ook stijgen de resultaten aanzienlijk naarmate een groter zekerheidspercentage wordt beschouwd. Het resultaat uit de kwadratische methode komt in het midden en boven overeen met een zekerheid van respectievelijk 99,7 en 99,5%. Daarom is de kwadratische methode nauwkeurig genoeg. Wanneer een kleiner zekerheidspercentage wordt bekeken, bijvoorbeeld 90%, dan kan het resultaat uit de Monte-Carlosimulatie worden gehaald. De gecombineerde afwijking is dan aanzienlijk kleiner dan het resultaat uit de kwadratische methode.

5.2.2 Invloed van de afwijkingen

In dit deel wordt onderzocht welke invloed de afwijkingen hebben op het resultaat. Dit wordt gedaan door te kijken wat het effect is wanneer iedere afwijking met 20% wordt verkleind terwijl de overige afwijkingen gelijk blijven. Uit de resultaten kan dan ineens worden bepaald of de meest maatgevend afwijking verandert wanneer er twee kolommen en een wand zijn in plaats van één kolom. De resultaten worden weergegeven in Tabel 5.15.

Tabel 5.15: Invloed van de verschillende afwijkingen

Afwijking op	Standaardafwijking σ (mm)	Verkleinde standaardafwijking σ (mm)	In het midden	Bovenaan
			Verkleining van de gecombineerde afwijking	
Breedte kolom	4,0	3,2	1%	2%
Positie kolom	5,0	4,0	9%	9%
Verticaliteit kolom	3,0	2,4	< 1%	3%
Kromming kolom	2,5	2,0	2%	/
Lengte wand	5,5	4,4	5%	6%

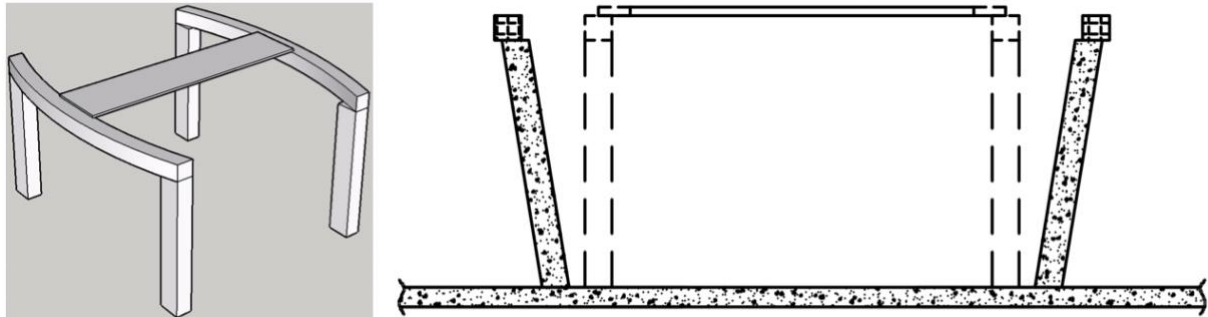
Ter hoogte van het midden is de afwijking op de positie het meest maatgevend ondanks dat deze afwijking niet de grootste standaardafwijking heeft. De standaardafwijking van de afwijking op de lengte van de wand is groter, maar de afwijking op de positie van de kolom komt tweemaal voor tijdens het combineren van de afwijking. Wanneer de kolom 20% nauwkeuriger wordt gepositioneerd, dan verkleint het resultaat voor een zekerheidspercentage van 99% van 23,9 mm naar 21,7 mm. Bij het verbeteren van de twee meest maatgevende afwijkingen, de positie van de kolommen en de lengte van de wand, dan zou het resultaat 15% verbeteren. De overige afwijkingen hebben nauwelijks effect op het resultaat.

Ook bovenaan is de afwijking op de positie van de kolommen het meest maatgevend. Een verkleining van 20% zou het resultaat voor een zekerheid van 99% verkleinen van 24,0 mm naar 21,8 mm. Wanneer de afwijking op de positie van de kolommen en de lengte van de wand samen worden verbeterd, dan zou de gecombineerde 15% kleiner worden. De overige afwijkingen hebben nagenoeg geen effect op het resultaat.

5.3 Vier kolommen, twee balken en een vloerplaat

In dit deel wordt, net zoals in Hoofdstuk 4, de opleglengte van een breedvloerplaat die op twee balken steunt geanalyseerd. De balken liggen allebei op twee kolommen. Ook hier wordt de invloed van de verschillende inputparameters onderzocht door verschillende Monte-Carlosimulaties uit te voeren. In deze situatie is het aantal afwijkingen die invloed hebben op de opleglengte van de vloerplaat het grootst. De verschillende afwijkingen op de kolommen, balken en vloerplaat beïnvloeden het resultaat. Wanneer de invloed van de verschillende parameters gekend is, kan praktisch nuttige informatie worden bekomen zoals bijvoorbeeld met welke lengte de breedvloerplaat moet worden vervaardigd zodat deze met een zekerheid van 90% zijn minimum opleglengte behaalt en welke afwijking de grootste invloed heeft op die lengte.

Figuur 5.15 toont links een afbeelding van de beschouwde bouwelementen in de meest nadelige situatie voor de vloerplaat. Rechts is een snede getekend ter hoogte van het midden van de balk waar de meest nadelige situatie zich voordoet. De achterste kolommen worden in aanzicht getoond. In dit model is de opleglengte van de vloerplaat gelijk aan het minimum. De lengte van de vloerplaat dient dus te worden bepaald zodat deze zijn minimale opleglengte nog steeds behaalt. Dit wordt gedaan door de afwijking waarmee de vloerplaat langer dient te worden vervaardigd $\varepsilon_{opl,v}$ te bepalen. Uit de kwadratische methode volgt dat de afwijking $\varepsilon_{opl,v}$ gelijk is aan $\pm 49,5$ mm.



Figuur 5.15: Vloerplaat op twee balken

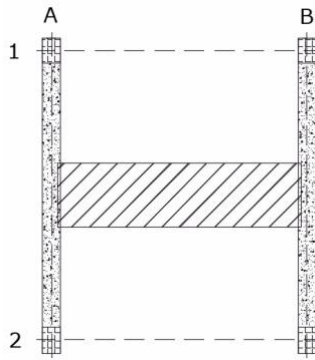
Voor de kolommen worden de afwijking op de positie en de verticaliteit in rekening gebracht. De afwijking op de breedte is niet van belang omdat de balk midden op de kolom wordt gelegd. Voor de balk worden de afwijking op de breedte, de kromming en de positie ten opzichte van de kolom in rekening gebracht. De breedvloerplaat heeft enkel een afwijking op de lengte.

In de Monte-Carlosimulatie wordt er, in tegenstelling tot de kwadratische methode, rekening gehouden met de vier kolommen. De vloerplaat steunt op twee balken in het midden. De positie van de zijkant van de balk wordt dus bepaald op deze plaats om de opleglengte van de vloerplaat te kunnen bepalen. Dit is ook het midden tussen de twee kolommen waarop de balk steunt. Om de positie van de zijkant van het midden van de balk te bepalen, wordt het gemiddelde genomen van de positie op de twee uiteinden van de balk. Dit wordt met een voorbeeld getoond in Figuur 5.16. Pas daarna wordt de afwijking op de horizontale kromming en de breedte van de balk in rekening gebracht. Dit wordt voor beide balken gedaan. Ten slotte wordt hiermee de afwijking op lengte van de vloerplaat gecombineerd om de gecombineerde afwijking $\varepsilon_{opl,v}$ te bepalen.



Figuur 5.16: Mogelijke afwijking vloerplaat op twee balken

De gecombineerde afwijking $\varepsilon_{opl,v}$ wordt in de MATLAB code in meerdere stappen uitgerekend. Omdat er vier kolommen, twee balken en een vloerplaat zijn, zijn er zeventien afwijkingen die $\varepsilon_{opl,v}$ beïnvloeden. De werkwijze wordt hier uitgelegd. De kolommen en balken worden in een rooster verdeeld zoals getoond in Figuur 5.17.



Figuur 5.17: Rooster van een vloerplaat op twee balken

Net zoals in de andere analyses krijgen de afwijkingen op de kolom, balk en vloerplaat een positief teken wanneer ze het betonoppervlak naar buiten verplaatsen. Wanneer naar de kolommen en balken op as A en B wordt gekeken in Figuur 5.17, dan worden de zijden beschouwd die naar elkaar gericht zijn. De afwijking is dus positief wanneer de tussenafstand tussen de balken kleiner is dan zoals ontworpen. De afwijking op de vloerplaat is positief wanneer de vloerplaat te lang is. Wanneer alle afwijkingen worden gecombineerd, dan wordt de afwijking $\varepsilon_{opl,v}$ gevonden. Dit is de afwijking waarmee de oplegglengte van de vloerplaat groter is dan het ontwerp. In deze analyse wordt dus naar de kleinere waarden gekeken van $\varepsilon_{opl,v}$.

Eerst worden voor de kolommen op as A en B de verschillende afwijkingen die de positie van de balk ter hoogte van de oplegging beïnvloeden gecombineerd. Dit wordt gedaan door het gemiddelde te nemen. Voor de kolommen op as A en B wordt dit respectievelijk:

$$\varepsilon_{gem,A} = \frac{\varepsilon_{pos,kA1} + \varepsilon_{pos,kA2}}{2} + \frac{\varepsilon_{vert,kA1} + \varepsilon_{vert,kA2}}{2} + \frac{\varepsilon_{b-k,A1} + \varepsilon_{b-k,A2}}{2}$$

$$\varepsilon_{gem,B} = \frac{\varepsilon_{pos,kB1} + \varepsilon_{pos,kB2}}{2} + \frac{\varepsilon_{vert,kB1} + \varepsilon_{vert,kB2}}{2} + \frac{\varepsilon_{b-k,B1} + \varepsilon_{b-k,B2}}{2}$$

Met $\varepsilon_{pos,k}$ de afwijking op de positie van de kolom, $\varepsilon_{vert,k}$ de afwijking op de verticaliteit van de kolom en ε_{b-k} de afwijking op de positie van de balk ten opzichte van de kolom. De indices A1 en dergelijke wijzen op de positie van de kolom in het rooster. In de volgende stap wordt de positie van de zijkant van de balk ter hoogte van het midden bepaald. Voor de balken op as A en B wordt dit respectievelijk:

$$\varepsilon_{bA} = \varepsilon_{gem,A} + \frac{\varepsilon_{breedte,bA}}{2} + \varepsilon_{krom,bA}$$

$$\varepsilon_{bB} = \varepsilon_{gem,B} + \frac{\varepsilon_{breedte,bB}}{2} + \varepsilon_{krom,bB}$$

Met $\varepsilon_{breedte,b}$ de afwijking op de breedte van de balk en $\varepsilon_{krom,b}$ de afwijking op de horizontale kromming van de balk. Ook hier wordt de afwijking op de breedte door twee gedeeld omdat er wordt aangenomen dat de balk in het midden op de kolom ligt. Wanneer de balk of de ondersteunende kolom te breed of te smal is, dan wordt de balk nog steeds op symmetrische wijze opgelegd. Tot slot wordt de gecombineerde afwijking $\varepsilon_{opl,v}$ bepaald. Dit is de afwijking waarmee de oplegglengte van de vloerplaat groter is dan het ontwerp:

$$\varepsilon_{opl,v} = \varepsilon_{bA} + \varepsilon_{bB} + \varepsilon_{lengte,v}$$

Met $\varepsilon_{lengte,v}$ de afwijking op de lengte van de vloerplaat. Deze formule is enkel geldig voor de vloerplaat die ter hoogte van het midden op de balken steunt omdat er voor verschillende afwijkingen van de ondersteunende kolommen het gemiddelde werd genomen.

5.3.1 Verdelingen volgens Technische Voorlichting 127

In deze stap worden de verschillende afwijkingen gecombineerd waarbij hun verdeling is gebaseerd op de Technische Voorlichting 127. Ook voor de afwijkingen op de balk en de vloerplaat wordt de 95%-grenswaarde beschreven afhankelijk van hun lengte L . Deze worden weergegeven in Tabel 5.16. De waarde voor de plaatsing van de balk (balk/kolomverbinding) werd niet opgemeten maar theoretisch afgeleid uit de bekomen resultaten van de overige metingen. Daarom wordt deze cursief aangeduid in de tabel.

Tabel 5.16: Afwijkingen volgens TV 127

Afwijking op	95%-zekerheidsgrens (mm)
Breedte balk	± 8
Kromming balk	$\pm L \geq \pm 5$
<i>Balk/kolomverbinding</i>	± 10
Lengte breedvloerplaat	$\pm(10 + 0,5L)$

De parameters van de verdelingen van alle afwijkingen worden weergegeven in Tabel 5.17.

Tabel 5.17: Inputwaarden voor de Monte-Carlosimulatie

Afwijking op	Tolerantie Δ (mm)	Technische Voorlichting 127	
		95%-zekerheidsgrens (mm)	Standaardafwijking σ (mm)
<i>Positie kolom</i>	± 10	$\pm 10,0$	5,00
Verticaliteit kolom	± 8	$\pm 6,0$	3,00
<i>Balk/kolomverbinding</i>	± 20	$\pm 10,0$	5,00
Breedte balk	$-9/+14$	$\pm 8,0$	4,00
Kromming balk	± 20	$\pm 6,0$	3,00
Lengte vloerplaat	± 20	$\pm 12,3$	6,15

De resultaten die volgen uit één miljoen simulaties met deze verdelingen worden weergegeven in Tabel 5.18. De MATLAB code is terug te vinden in Bijlage C.

Tabel 5.18: Afwijking bij een opgegeven zekerheidspercentage

Zekerheidspercentage	$\varepsilon_{opl,v}$ (mm)
80%	9,3
90%	14,2
95%	18,2
99%	25,8
100%	51,9
Kwadratisch	49,5

De waarden die in Tabel 5.18 worden getoond is de lengte waarmee de breedvloerplaat langer dient te worden vervaardigd om met de overeenkomende zekerheid te kunnen zeggen dat de minimale opleglengte nog wordt behaald. De simulatie is gebaseerd op empirisch onderzoek en is representatief voor de werkelijkheid.

Er kan worden opgemerkt dat het resultaat snel stijgt naarmate de zekerheid groter wordt. Dit komt omdat resultaat normaal is verdeeld en een kleine standaardafwijking heeft. De kansdichtheidsfunctie neemt dus snel af bij hogere waarden. Het resultaat uit de kwadratische methode komt overeen met een zekerheidspercentage dat groter is dan 99,9%. De kwadratische methode is daarom uiterst nauwkeurig. Wanneer een kleiner zekerheidspercentage wordt bekeken, bijvoorbeeld 90%, dan kan het resultaat uit de Monte-Carlosimulatie worden gehaald. De gecombineerde afwijking is dan aanzienlijk kleiner dan het resultaat uit de kwadratische methode.

5.3.2 Invloed van de afwijkingen

In dit deel wordt onderzocht welke invloed de afwijkingen hebben op het resultaat. Dit wordt gedaan door te kijken wat het effect is wanneer iedere afwijking met 20% wordt verkleind terwijl de overige afwijkingen gelijk blijven. Uit de resultaten kan dan ineens worden bepaald of de meest maatgevende afwijking anders is dan in bij één kolom en twee kolommen met een wand tussen. De resultaten worden weergegeven in Tabel 5.19.

Tabel 5.19: Invloed van de verschillende afwijkingen

Afwijking op	Standaardafwijking σ (mm)	Verkleinde standaardafwijking σ (mm)	Verkleining van de gecombineerde afwijking
<i>Positie kolom</i>	5,00	4,00	4%
Verticaliteit kolom	3,00	2,40	1%
<i>Balk/kolomverbinding</i>	5,00	4,00	4%
Breedte balk	4,00	3,20	1%
Kromming balk	3,00	2,40	2%
Lengte vloerplaat	6,15	4,92	6%

De afwijking op de lengte van de vloerplaat is het meest maatgevend. Het effect van een aanpassing van deze afwijking is kleiner dan in de vorige gevallen. Er zijn twee redenen hiervoor. In deze situatie zijn er meer afwijkingen die worden gecombineerd. Het effect van het aanpassen van één afwijking is daarom kleiner. Ook is het verschil tussen de standaardafwijkingen niet zo groot. Wanneer de lengte van de vloerplaat 20% nauwkeuriger wordt, dan verkleint het resultaat voor een zekerheid van 99% van 25,8 mm naar 24,3 mm. Dit is gering verschil. Wanneer de drie meest maatgevende afwijkingen, de positie van de kolom, de balk/kolomverbinding en de lengte van de vloerplaat, samen zouden worden verbeterd, dan zou het resultaat 14% kleiner worden. De andere afwijkingen hebben nauwelijks effect op het resultaat.

5.4 Conclusie

In dit hoofdstuk werden verschillende doelstellingen onderzocht. Door het uitvoeren van Monte-Carlosimulaties werd een zekerheidspercentage ingebouwd. Het resultaat kon dan vergeleken worden met de kwadratische methode. Omdat de afwijkingen een statistische verdeling krijgen in de Monte-Carlosimulaties, kon de invloed van de afwijkingen worden onderzocht. Er kan voor iedere situatie worden bepaald welke afwijking het belangrijkste is.

De verdelingen die de afwijkingen kregen zijn gebaseerd op empirisch onderzoek uit TV 127. Daarom is het resultaat betrouwbaar en representatief. Dit onderzoek bevat gegevens over de afwijkingen die werden gebruikt in dit hoofdstuk. Wanneer alle mogelijke relaties tussen bouwelementen worden onderzocht, dan is bijkomend onderzoek nodig om alle afwijkingen te begroten.

Bij het analyseren van één kolom werd de omtrek rond de kolom bepaald, die die kolom bij het samen voorkomen van de afwijkingen niet overschrijdt. Dit werd bovenaan en in het midden gedaan omdat de afwijkingen op een andere wijze worden gecombineerd. De kwadratische methode is gebaseerd op de toleranties van afwijkingen en daaruit volgt dat de gecombineerde afwijking in het midden steeds het grootst is. In de Monte-Carlosimulaties worden statistische verdelingen gebruikt waarvan de eigenschappen afhankelijk zijn van de hoogte van de kolom. De plaats waar de gecombineerde afwijking het grootst is, is afhankelijk van de hoogte van de kolom.

Wanneer bijvoorbeeld een geprefabriceerde wand tussen twee kolommen wordt geplaatst, dan wordt de tussenafstand tussen de kolommen zowel bovenaan als in het midden bepaald. De gecombineerde afwijking in het midden van de kolommen is onbelangrijk wanneer bijvoorbeeld de positie van een balk wordt bepaald die op de kolommen steunt.

Verder kan worden geconcludeerd dat de meest maatgevende afwijking afhankelijk is van de hoogte van de kolom. De breedte is nooit maatgevend en de kromming speelt enkel in het midden een rol. Bovenaan is de positie het meest maatgevend voor kolommen die kleiner zijn dan tien meter. Vanaf die hoogte is de verticaliteit het meest maatgevend. In het midden is de positie het meest maatgevend voor kolommen tot een hoogte van vijf meter. Voor grotere kolommen wordt dit de kromming.

De invloed van de afwijkingen is afhankelijk van de verhouding tussen de standaardafwijkingen van de verdelingen en de manier van combineren. Het is niet zo dat de afwijking waarvan de verdeling de grootste standaardafwijking heeft ook het meest maatgevend is. Deze afwijking kan een kleiner aandeel hebben in de combinatie. Voor iedere kolom is het effect van de afwijkingen anders en kan worden onderzocht. Zo is voor bijvoorbeeld voor een kolom van drie of acht meter de positie in het midden het meest maatgevend. Wanneer beide kolommen 20% nauwkeuriger worden geplaatst, dan verkleint het resultaat met respectievelijk 13 en 9%. Voor een kolom van twaalf meter zorgt het verkleinen van de afwijking op de positie, in het midden voor een resultaat dat 7% kleiner is. Voor een kolom met deze hoogte is de kromming het meest maatgevend en een verkleining van 20% beïnvloedt het resultaat met 10%.

Algemeen kan er worden gezegd dat naarmate de kolom groter wordt, de invloed van de positie afneemt. In het midden neemt de invloed van de kromming toe en bovenaan de verticaliteit. Het effect van het verbeteren van meerdere afwijkingen is niet gelijk aan de som van de effecten die de afwijkingen afzonderlijk hebben. Ook dit is afhankelijk van de verhouding tussen de standaardafwijkingen.

Het is vanzelfsprekend dat het verslechteren van de meest maatgevende afwijking ook het grootste effect heeft op het resultaat, in negatieve zin. Deze afwijking vereist het meeste aandacht en dient zo klein mogelijk te worden gehouden voor een optimaal resultaat.

Wanneer de relatie tussen meerdere bouwelementen wordt onderzocht, wordt praktisch nuttige informatie bekomen. De lengte van een geprefabriceerde wand werd bepaald zodat er kan worden gegarandeerd dat deze met een bepaalde zekerheid tussen twee geprefabriceerde kolommen past. De wand uit het model dient om met een zekerheid van 90 en 99% tussen de kolommen te passen

respectievelijk 13,2 en 24,0 mm korter te worden vervaardigd dan de tussenaafstand tussen de kolommen.

Ondanks dat de afwijking op de lengte van de wand de meest wijde verdeling heeft, is de positie van de kolommen het meest maatgevend. Wanneer deze 20% nauwkeuriger worden geplaatst, wordt het resultaat 9% beter.

Tot slot werd de lengte van een breedvloerplaat bepaald, zodat deze met een bepaald zekerheidspercentage zijn minimale opleglengte behaalt. De vloerplaat in het model dient om met een zekerheid van 90 en 99% zijn opleglengte te behalen respectievelijk 14,2 en 25,8 mm langer te worden vervaardigd dan zoals ontworpen. de afwijking op de lengte van de vloerplaat is het meest maatgevend met een invloed van 6% op het resultaat bij een verkleining van 20%. De invloed wordt kleiner naarmate er meer afwijkingen worden gecombineerd. In deze analyse waren dat er zeventien.

Alle Monte-Carlosimulaties werden uitgevoerd alsof de constructie nog in de ontwerpfase is. Er is nog geen enkel element vervaardigd of geplaatst dus iedere mogelijk afwijking krijgt een statistische verdeling. Wanneer in een constructie reeds elementen zijn vervaardigd of geplaatst die invloed hebben op nog te plaatsen elementen, dan kunnen werkelijke waarden worden ingevuld. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer de opleglengte van een vloerplaat op de vierde verdieping wordt onderzocht, terwijl de kolommen op de eerste verdieping reeds zijn geplaatst. De afwijking op die kolommen kan dan worden opgemeten zodat de werkelijke waarden kunnen worden gebruikt in simulaties. Op deze manier wordt de voorspelling van de lengte van de vloerplaat nauwkeuriger.

6 Besluit

Om de totale afwijking te bekomen, worden alle afwijkingen op de bouwelementen gecombineerd. In de kwadratische methode wordt de meest nadelige situatie verondersteld. Daarom worden de tolerantiewaarden die de verschillende afwijkingen beperken gebruikt voor het combineren. De toleranties zijn vaak groter dan de werkelijke afwijkingen en daarom is de kwadratische combinatie in een groot deel van de gevallen een overschatting van de totale afwijking.

In de Monte-Carlosimulaties worden de afwijkingen beschreven door kansverdelingen, die gebaseerd zijn op empirisch onderzoek om een representatief resultaat te bekomen.

Wanneer één kolom wordt beschouwd, dan volgt uit de kwadratische methode dat de totale afwijking in het midden steeds het grootst is omdat hier de meeste afwijkingen voorkomen. Uit de Monte-Carlosimulaties volgt dat de plaats waar de totale afwijking het grootst is, afhangt van de hoogte de kolom. Dit komt omdat volgens het empirisch onderzoek de kansverdeling van de afwijkingen ook afhankelijk is van de hoogte.

Algemeen kan er worden gezegd dat naarmate de kolom groter wordt, de invloed van de positie afneemt. In het midden neemt de invloed van de kromming toe en bovenaan de verticaliteit.

Door de meest belangrijke afwijking te verbeteren kan het resultaat positief beïnvloed worden. Echter vereist deze afwijking ook de meeste aandacht omdat deze ook het grootste effect heeft op het resultaat bij een verslechtering.

Het onderzoeken van de relatie tussen bouwelementen levert praktisch nuttige informatie. In deze masterproef werd de lengte van een geprefabriceerde wand bepaald zodat er kan worden gegarandeerd dat deze met een bepaalde zekerheid tussen twee geprefabriceerde kolommen past. Hetzelfde werd gedaan voor de lengte van een breedvloerplaat zodat deze zijn minimale opleglengte behaalt.

De resultaten uit de kwadratische methode en de Monte-Carlosimulaties zijn afhankelijk van het soort beton (geprefabriceerd architectonisch, geprefabriceerd niet-architectonisch of ter plaatse gestort), de afmeting van het bouwelement, de toegepaste normen en de kansverdeling van de afwijkingen. Wanneer deze parameters worden bepaald tijdens het modelleren van het element in een virtueel model, dan kan deze werkwijze worden geïmplementeerd in de software zodat de gewenste afwijkingen automatisch als extra eigenschap van de bouwelementen kunnen worden meegegeven.

Deze masterproef focuste zich op het opstellen van een verwerkingsmethode, vormde een visie over het praktisch omgaan met bouwtoleranties en gaf de aanzet naar verder onderzoek en het automatiseren van bouwtoleranties in BIM.

Bibliografie

- [1] BAM Contractors, „bamcontractors,” [Online]. Available: <http://www.bamcontractors.be/algemeen/profiel/>. [Geopend 2017].
- [2] Het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, „wtcb,” [Online]. Available: https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=standards_regulations&pag=tolerances&art=general. [Geopend 2017].
- [3] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, „Speciale uitgave: toleranties in de bouw,” Brussel, 2010.
- [4] *NBN ISO 3443-2: Maatafwijkingen voor gebouwen - Deel 2 : Statische grondslag voor het voorspellen van passen tussen onderdelen met een normale maatverdeling*. [Performance]. 1992.
- [5] V. Pollet, „Toleranties op ter plaatse gestort beton: evolutie van de specificaties,” 2004.
- [6] J. De Cuyper en V. Pollet, „Toleranties op ter plaatse gestort beton”.
- [7] J. Wijnants, „Dimensionale toleranties op betonconstructies,” 2013.
- [8] E. Noyez, „BIM verenigt bouwpartners op digitaal platform,” 2015.
- [9] Design express, „vectorworks,” [Online]. Available: <http://www.vectorworks.be/nl/software/vectorworks-architectuur-en-interieur/vectorworks-en-bim/wat-is-bim>. [Geopend 2018].
- [10] T. Lemoine, „wtcb,” 2014. [Online]. Available: <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact42&art=643>. [Geopend 2018].
- [11] Mathieu Gijbels, [Online]. Available: <http://www.bouwenmetbim.be/nl/voordelen-voor-de-architect>.
- [12] Mathieu Gijbels, [Online]. Available: <http://www.bouwenmetbim.be/nl/het-oordeel-van-de-klant#5Page>.
- [13] Missouri University of Science and Technology, „Monte Carlo simulation”.
- [14] Palisade, „palisade,” [Online]. Available: http://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp. [Geopend 2018].
- [15] C. Robert, C. Kenneth W. en M. Spencer P., „New Metrics for Evaluating Monte Carlo,” [Online]. Available: http://adcats.et.byu.edu/Publication/98-2/CvP1-2col__6=30=98.html.

Bijlage A: MATLAB code van één kolom

Contents

- [Input](#)
- [Afwijkingen op één kolom](#)
- [Resultaten](#)

Input

```
aantalsim = 1000000;

% Afwijkingen verdelingen:
% Breedte van de kolom
gem_kolom_br = 0;
std_kolom_br = 4;
% Positie van de kolom
gem_kolom_pos = 0;
std_kolom_pos = 5;
% Verticaliteit van de kolom
gem_kolom_vert = 0;
std_kolom_vert = 3;
% Kromming van de kolom
gem_kolom_krom = 0;
std_kolom_krom = 2.5;
```

Afwijkingen op één kolom

```
% Afwijking op de breedte
EB1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_br +gem_kolom_br;
% Afwijking op de positie
EP1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_pos +gem_kolom_pos;
% Afwijking op de verticaliteit
EV1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_vert +gem_kolom_vert;
% Afwijking op de kromming
EK1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_krom +gem_kolom_krom;

% Totale afwijking
ETOT_MIDDEN = EB1/2 + EP1 + EK1 + EV1/2;
ETOT_BOVEN = EB1/2 + EP1 + EV1;

% Output sorteren
ETOT_MIDDEN_gesorteerd = sort(ETOT_MIDDEN);
ETOT_BOVEN_gesorteerd = sort(ETOT_BOVEN);
```

Resultaten

```
% Totale afwijking in het midden
grens_80_procent_midden = ETOT_MIDDEN_gesorteerd(0.80*aantalsim);
grens_90_procent_midden = ETOT_MIDDEN_gesorteerd(0.90*aantalsim);
grens_95_procent_midden = ETOT_MIDDEN_gesorteerd(0.95*aantalsim);
grens_99_procent_midden = ETOT_MIDDEN_gesorteerd(0.99*aantalsim);
maximum_midden = max(ETOT_MIDDEN);

% Totale afwijking bovenaan
grens_80_procent_boven = ETOT_BOVEN_gesorteerd(0.80*aantalsim);
grens_90_procent_boven = ETOT_BOVEN_gesorteerd(0.90*aantalsim);
grens_95_procent_boven = ETOT_BOVEN_gesorteerd(0.95*aantalsim);
grens_99_procent_boven = ETOT_BOVEN_gesorteerd(0.99*aantalsim);
maximum_boven = max(ETOT_BOVEN);
```

Bijlage B: MATLAB code van twee kolommen en een wand

Contents

- [Input](#)
- [Afwijkingen op de kolommen en de wand](#)
- [Resultaten](#)

Input

```
aantalsim = 1000000;  
  
% Afwijkingen verdelingen:  
% Breedte van de kolom  
gem_kolom_br = 0;  
std_kolom_br = 4;  
% Positie van de kolom  
gem_kolom_pos = 0;  
std_kolom_pos = 5;  
% Verticaliteit van de kolom  
gem_kolom_vert = 0;  
std_kolom_vert = 3;  
% Kromming van de kolom  
gem_kolom_krom = 0;  
std_kolom_krom = 2.5;  
% lengte van de wand  
gem_wand_lengte = 0;  
std_wand_lengte = 5.5;
```

Afwijkingen op de kolommen en de wand

```
%afwijkingen op de eerste kolom  
% Afwijking op de breedte  
EB1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_br +gem_kolom_br;  
% Afwijking op de positie  
EP1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_pos +gem_kolom_pos;  
% Afwijking op de verticaliteit  
EV1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_vert +gem_kolom_vert;  
% Afwijking op de kromming  
EK1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_krom +gem_kolom_krom;  
  
E1_MIDDEN = EB1/2 + EP1 + EK1 +EV1/2;  
E1_BOVEN = EB1/2 + EP1 + EV1;  
  
% Afwijkingen op de tweede kolom  
% Afwijking op de breedte  
EB2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_br +gem_kolom_br;  
% Afwijking op de positie  
EP2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_pos +gem_kolom_pos;  
% Afwijking op de verticaliteit  
EV2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_vert +gem_kolom_vert;  
% Afwijking op de kromming  
EK2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_krom +gem_kolom_krom;  
  
E2_MIDDEN = EB2/2 + EP2 + EK2 + EV2/2;
```

```

E2_BOVEN = EB2/2 + EP2 + EV2;

% Afwijking op de wand
ELW = randn(1,aantalsim)*std_wand_lengte +gem_wand_lengte;

% Gecombineerde afwijking
ETOT_MIDDEN = E1_MIDDEN + E2_MIDDEN + ELW;
ETOT_BOVEN = E1_BOVEN + E2_BOVEN + ELW;

% Output sorteren
ETOT_gesorteerd_MIDDEN = sort(ETOT_MIDDEN);
ETOT_gesorteerd_BOVEN = sort(ETOT_BOVEN);

```

Resultaten

```

% Totale afwijking in het midden
grens_80_procent_MIDDEN = ETOT_gesorteerd_MIDDEN(0.80*aantalsim)
grens_90_procent_MIDDEN = ETOT_gesorteerd_MIDDEN(0.90*aantalsim)
grens_95_procent_MIDDEN = ETOT_gesorteerd_MIDDEN(0.95*aantalsim)
grens_99_procent_MIDDEN = ETOT_gesorteerd_MIDDEN(0.99*aantalsim)
maximum_MIDDEN = max(ETOT_MIDDEN)

% Totale afwijking bovenaan
grens_80_procent_BOVEN = ETOT_gesorteerd_BOVEN(0.80*aantalsim)
grens_90_procent_BOVEN = ETOT_gesorteerd_BOVEN(0.90*aantalsim)
grens_95_procent_BOVEN = ETOT_gesorteerd_BOVEN(0.95*aantalsim)
grens_99_procent_BOVEN = ETOT_gesorteerd_BOVEN(0.99*aantalsim)
maximum_BOVEN = max(ETOT_BOVEN)

```

Bijlage C: MATLAB code van vier kolommen, twee balken en een vloerplaat

Contents

- [Twee kolommen en een wand](#)
- [Balk in rij A](#)
- [Balk in rij B](#)
- [Totale afwijking op de balken en de vloerplaat](#)
- [OUTPUT](#)

Twee kolommen en een wand

```
aantalsim = 1000000;  
  
% Afwijkingen verdelingen:  
% Positie van de kolommen  
gem_kolom_pos = 0;  
std_kolom_pos = 5;  
% Verticaliteit van de kolommen  
gem_kolom_vert = 0;  
std_kolom_vert = 3;  
% Balk-kolom verbindingen  
gem_balk_kolom = 0;  
std_balk_kolom = 5;  
% Breedte van de balken  
gem_balk_breedte = 0;  
std_balk_breedte = 4;  
% Kromming van de balken  
gem_balk_krom = 0;  
std_balk_krom = 3;  
% Lengte van de breedvloerplaat  
gem_vloer_lengte = 0;  
std_vloer_lengte = 6.15;
```

Balk in rij A

```
% Gemiddelde van de afwijkingen die voorkomen aan beide kolommen  
% houdt in: positie en verticaliteit van de kolommen, balk-kolom verbinding  
EP_KOLOM_A1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_pos +gem_kolom_pos;  
EV_KOLOM_A1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_vert +gem_kolom_vert;  
EB_K_KOLOM_A1 = randn(1,aantalsim)*std_balk_kolom +gem_balk_kolom;  
  
EP_KOLOM_A2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_pos +gem_kolom_pos;  
EV_KOLOM_A2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_vert +gem_kolom_vert;  
EB_K_KOLOM_A2 = randn(1,aantalsim)*std_balk_kolom +gem_balk_kolom;  
  
E_GEM_B_A = (EP_KOLOM_A1 + EP_KOLOM_A2)/2 + (EV_KOLOM_A1 + EV_KOLOM_A2)/2 +  
(EB_K_KOLOM_A1 + EB_K_KOLOM_A2)/2;  
  
% Zijkant van de balk in rij A  
% houdt in: afwijking op de breedte en kromming van de balk die worden  
% gecombineerd met het de hartlijn van de balk (gemiddelde)  
EB_BALK_A = randn(1,aantalsim)*std_balk_breedte +gem_balk_breedte;
```



```
EK_BALK_A = randn(1,aantalsim)*std_balk_krom +gem_balk_krom;

E_B_A = E_GEM_B_A + EB_BALK_A/2 + EK_BALK_A;
```

Balk in rij B

```
% Gemiddelde van de afwijkingen die voorkomen aan beide kolommen
% houdt in: positie en verticaliteit van de kolommen, balk-kolom verbinding
EP_KOLOM_B1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_pos +gem_kolom_pos;
EV_KOLOM_B1 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_vert +gem_kolom_vert;
EB_K_KOLOM_B1 = randn(1,aantalsim)*std_balk_kolom +gem_balk_kolom;

EP_KOLOM_B2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_pos +gem_kolom_pos;
EV_KOLOM_B2 = randn(1,aantalsim)*std_kolom_vert +gem_kolom_vert;
EB_K_KOLOM_B2 = randn(1,aantalsim)*std_balk_kolom +gem_balk_kolom;

E_GEM_B_B = (EP_KOLOM_B1 + EP_KOLOM_B2)/2 + (EV_KOLOM_B1 + EV_KOLOM_B2)/2 +
(EB_K_KOLOM_B1 + EB_K_KOLOM_B2)/2;

% Zijkant van de balk in rij A
% houdt in: afwijking op de breedte en kromming van de balk die worden
% gecombineerd met het de hartlijn van de balk (gemiddelde)
EB_BALK_B = randn(1,aantalsim)*std_balk_breedte +gem_balk_breedte;
EK_BALK_B = randn(1,aantalsim)*std_balk_krom +gem_balk_krom;

E_B_B = E_GEM_B_B + EB_BALK_B/2 + EK_BALK_B;
```

Totale afwijking op de balken en de vloerplaat

```
% Tussenafstand tussen de balken
% met deze waarde is de afstand tussen de zijkanten van de balken kleiner
% dan volgens het ontwerp
E_TUS_B = E_B_A + E_B_B;

% Totale afwijking op de opleglengte
% met deze waarde is de opleglengte groter dan volgens het ontwerp
E_vloer_lengte = randn(1,aantalsim)*std_vloer_lengte +gem_vloer_lengte;
ETOT = E_TUS_B + E_vloer_lengte;
```

OUTPUT

```
% Sorteren
ETOT_gesorteerd = sort(ETOT);

% Resultaten
grens_80_procent = abs(ETOT_gesorteerd(0.20*aantalsim))
grens_90_procent = abs(ETOT_gesorteerd(0.10*aantalsim))
grens_95_procent = abs(ETOT_gesorteerd(0.05*aantalsim))
grens_99_procent = abs(ETOT_gesorteerd(0.01*aantalsim))
maximum = max(ETOT)
```

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Onderzoek naar het combineren van bouwtoleranties en hun integratie in BIM

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**
Jaar: **2018**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Deflem, Wout

Parisi, Anthony

Datum: **4/06/2018**